



## توسعه آزمون غیرمخرب حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده در عیب‌یابی مواد مرکب به وسیله فیلتر آشکارساز لبه و ریخت‌شناسی توصیفی

کریم جمالی<sup>1</sup>، داود اکبری<sup>2\*</sup>، محمد گلزار<sup>3</sup>، رضا نعیمی مرندی<sup>4</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

3- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

4- دانشجوی دکتری، مهندسی برق، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

\* تهران، صندوق پستی 143-14115، daakbari@modares.ac.ir

### چکیده

### کلیدواژگان

در این مقاله به توسعه آزمون غیرمخرب حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده در عیب‌یابی مواد مرکب به وسیله فیلتر آشکارساز لبه و ریخت‌شناسی توصیفی پرداخته شده است. در حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده به منظور تحریک نمونه، شار حرارتی به صورت متناوب به سطح قطعه اعمال شده و پاسخ حرارتی به وسیله تبدیل فوری به پردازش و تصاویر دامنه و فاز استخراج می‌شوند. پس‌زمینه غیر یکنواخت مشاهده شده در تصاویر حاصل، اغلب قدرت تشخیص را پایین آورده و در برخی موارد موجب عدم شناسایی ناحیه معیوب می‌گردد؛ لذا برای بهبود ارزیابی این روش، فیلتر آشکارساز لبه و ریخت‌شناسی توصیفی بر روی تصاویر اعمال می‌گردد. بررسی عددی در فرکانس‌های مختلف بر روی نمونه ایجاد شده با نقص‌های کنترل شده زیر سطحی در ابعاد و عمق‌های مختلف انجام و تصاویر حاصل پردازش شد. از تحلیل نتایج حاصل از پردازش تصاویر برای تشخیص و تعیین دقیق موقعیت عیوب استفاده و مشاهده شد که روش ارائه شده قابلیت تشخیص نقص را بالا برده و احتمال از دست دادن عیب را در فرکانس‌های مورد بررسی کاهش می‌دهد.

آزمون غیرمخرب  
حرارت‌نگاری  
مدولاسیون  
آشکارساز لبه  
ریخت‌شناسی توصیفی

## Development & application of modulated IR thermography in non-destructive evaluation of composite materials by an edge detection filter and a morphological attribute profile

Karim Jamali<sup>1</sup>, Davood Akbari<sup>1\*</sup>, Mohammad Golzar<sup>1</sup>, Reza Naeimi Marandi<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

2- Department of Electrical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14115-143 Tehran, Iran, daakbari@modares.ac.ir

### Keywords

Non-destructive test  
Thermography  
Modulation  
Edge detection  
Morphological attributes

### Abstract

In this paper, development of modulated IR thermography non-destructive test has been addressed to detect and evaluate artificial subsurface defects in composite materials by an edge detection filter and a morphological attribute profile. At modulated IR thermography, in order to stimulate the test specimen, the heat flux is applied periodically over the surface of the specimen and the thermal response is decomposed by the Fourier transform method to extract its amplitude and phase images. The non-uniform backgrounds in the obtained images often reduce detection ability. In order to improve the evaluation of this method, an edge detection filter and a morphological attribute profile were applied to the images. Finite element analyses were applied for different frequencies on the model that were simulated with common controlled defects in composite materials. The results of image processing were used in order to locate the defects and it was observed that this method increases the defect detection ability and decreases the possibility of losing the defects in these frequencies.

### 1- مقدمه

عملکرد صحیح سازه دسترسی به آزمون غیرمخربی لازم است که قادر به شناسایی و مکان‌یابی این آسیب‌ها به‌طور دقیق و به‌موقع باشد. اگرچه روش‌های زیادی برای آزمایش غیرمخرب به‌منظور شناسایی عیوب وجود دارند ولی در صنایع مختلف نیاز به روشی است که بتواند در مدت‌زمان کوتاه، سطوح وسیعی از قطعات را با دقت بالا ارزیابی و عیوب درونی سازه را شناسایی

مواد مرکب به دلیل مزایایی نظیر استحکام به وزن بالا و عمر خستگی زیاد در مقایسه با فلزات، کاربرد گسترده‌ای در صنایع مختلف یافته‌اند. مواد مرکب ممکن است در حین ساخت و یا در طول زمان سرویس‌دهی دچار نواقصی شوند که خواص مکانیکی و کارکرد سازه را با مشکل مواجه سازند [1]. برای اطمینان از

Please cite this article using:

K. Jamali, D. Akbari, M. Golzar, R. Naeimi Marandi, Development & application of modulated IR thermography in non-destructive evaluation of composite materials by an edge detection filter and a morphological attribute profile, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 5, No. 1, pp. 55-62, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

بر روی لوله‌های دارای ترک زیر سطحی نشان دادند. ونگاس و همکاران [6] آزمون حرارت‌نگاری مادون قرمز را با اعمال الگوریتم پردازش داده‌ها و تصاویر بر روی نمونه‌های مواد مرکب ساندویچی مورد بررسی قرار داده و عیوب را شناسایی و دسته‌بندی نمودند. سراوان و همکاران [7] با ارزیابی غیرمخرب حرارت‌نگاری مادون قرمز جوش اصطکاکی و پردازش تصاویر، تباین تصویر را تا 80 درصد افزایش داده و عیوب را به وضوح مشاهده نمودند. ژنگ لیو و همکاران [8] برای تعیین مقدار خوردگی لوله از حرارت‌نگاری مادون قرمز استفاده نمودند. آن‌ها روش پردازش تصویر ریخت‌شناسی برای استخراج اطلاعات مربوط به خوردگی از دنباله تصاویر حرارتی تولید شده که انعکاس روند انتشار گرما در دیواره لوله می‌باشد را ارائه دادند. کایبی ژنگ و همکاران [9] با پردازش تصاویر به دست آمده از روش حرارت‌نگاری پالس پس‌زمینه تصاویر را بازسازی نموده و نویز را کاهش دادند سپس با انجام آزمون‌های تجربی عیوب موجود در مواد مرکب را به وضوح مشاهده نمودند.

هدف از این تحقیق، توسعه حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده به وسیله فیلترهای ریخت‌شناسی توصیفی و آشکارساز لبه به منظور افزایش قابلیت آزمون غیرمخرب حرارت‌نگاری مدوله‌شده در شناسایی عیوب زیر سطحی مواد مرکب می‌باشد. با حرارت‌نگاری مدوله‌شده ورق مواد مرکب از جنس شیشه اپوکسی<sup>5</sup> دارای نقص‌های کنترل‌شده تحت اعمال بار حرارتی متناوب در فرکانس‌های مختلف و استفاده از برنامه کاربردی در پردازش دنباله تصاویر حرارتی، مدلی برای بهبود توانایی تشخیص و شناسایی عیوب زیر سطحی مواد مرکب طرح و با ارزیابی تجربی و عددی کارایی آن مورد بحث و بررسی قرار می‌گیرد.

## 2- پردازش تصاویر حرارت‌نگاری مدوله‌شده

برای ایجاد شار حرارتی مناسب در روش حرارت‌نگاری مدوله‌شده از تحریک همساز منبع نوری بهره گرفته می‌شود. رابطه (1) تغییرات شار منبع حرارتی را توصیف می‌کند.

$$q = \frac{Q_0}{2}(1 + \cos(\omega t)) \quad (1)$$

که در آن  $Q_0$  شدت منبع حرارتی،  $\omega = 2\pi f$  فرکانس زاویه‌ای مدولاسیون،  $f$  فرکانس تحریک و  $t$  زمان است.

پاسخ حرارتی از سطح نمونه مورد بررسی در همان زمان با استفاده از دوربین مادون قرمز ثبت و به کمک تحلیل دنباله

کند. آزمون حرارت‌نگاری که در مقایسه با روش‌های موجود قابلیت کنترل کیفی قطعات بزرگ را در مدت زمانی کوتاه دارد، بر اساس تشعشع امواج الکترومغناطیس از اجسام در درجه حرارت مختلف است که این تشعشع توسط دوربین حرارت‌نگاری دریافت و توسط پردازنده تحلیل می‌شود [2].

حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده یکی از روش‌های فعال در حرارت‌نگاری مادون قرمز است که بر اساس استفاده از امواج حرارتی متناوب، برای بررسی نمونه می‌باشد. امواج متناوب منتشرشده با تابش، به سطح قطعه مورد بررسی رسیده و انرژی حرارتی ایجاد شده، سطح نمونه را گرم می‌کند تا پس از آن با پخش شدن از طریق مواد به‌عنوان موج حرارتی انتشار یابد. هر زمان که این امواج حرارتی به ناپیوستگی<sup>1</sup> مانند عیوب زیرسطحی یا ناهمگنی<sup>2</sup> می‌رسند، این نقص‌ها به‌عنوان مانع حرارتی عمل کرده و موجب تغییر در دامنه و تأخیر فاز سیگنال پاسخ در سطح می‌گردد. پاسخ حرارتی از سطح نمونه در همان زمان با استفاده از دوربین مادون قرمز ثبت و به کمک تحلیل دنباله تصاویر، تصاویر دامنه و فاز استخراج می‌شوند [3]. از مزایای روش حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده نسبت به روش‌های متداول می‌توان به عدم حساسیت به شرایط محیطی نظیر نور و گرمایش غیر یکنواخت، امکان بررسی عیوب زیر سطحی تا عمق بیشتر و امکان استفاده از منابع حرارتی کم قدرت و ساده اشاره نمود [2].

در تصاویر به دست آمده، تباین بین مناطق معیوب و سالم اغلب به دلیل نویز و پس‌زمینه غیریکنواخت به‌وضوح دیده نمی‌شود. در زمینه پردازش تصاویر دو حوزه بهبود و بازسازی تصویر وجود دارد. فیلترهای مقابله با نویز از دسته بازسازی تصاویر بوده که سعی بر بهبود تخریب ایجاد شده بر روی تصویر دارد. یکی از فیلترهای غیرخطی، فیلتر ریخت‌شناسی توصیفی<sup>3</sup> می‌باشد که ساختارها را با توجه به معیارهایی نظیر مساحت، قطر و غیره استخراج می‌کند [4].

مطالعاتی در زمینه پردازش تصاویر حرارت‌نگاری مادون قرمز در عیب‌یابی صورت گرفته است. ونگ و تیبسی [5] روشی متشکل از حرارت‌نگاری مادون قرمز و آشکارساز لبه ارائه دادند که در آن تصاویر حرارتی دریافت شده از دوربین مادون قرمز به وسیله آشکارساز لبه کنی<sup>4</sup> پردازش شده و تباین لبه ناحیه‌های معیوب بهبود می‌یابد. آن‌ها صحت کارکرد این روش را به صورت تجربی

<sup>1</sup> Discontinuity

<sup>2</sup> Non-homogeneity

<sup>3</sup> Morphological Attribute Profiles

<sup>4</sup> Canny

<sup>5</sup> Epoxy

متفاوت می‌باشد. شکل 1 هندسه و عیوب طراحی شده برای ارزیابی را نشان می‌دهد. جزئیات نقص‌های در نظر گرفته شده در جدول 1 و مشخصات حرارتی ماده به کار گرفته شده در جدول 2 آورده شده است.

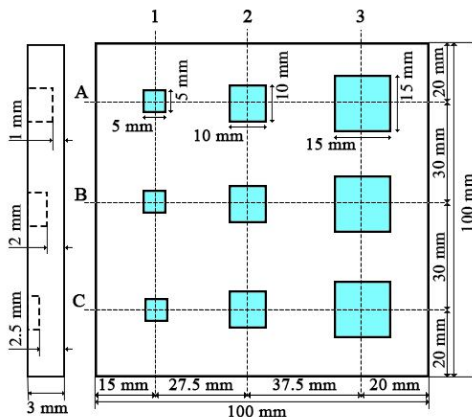


Fig. 1 Geometry of specimen with defects

شکل 1 هندسه نمونه طراحی شده با عیوب زیر سطحی

جدول 1 جزئیات ابعاد و عمق عیوب

Table 1 Details of defects size and depth

مشخصه نقص	طول ضلع (mm)	عمق (mm)
$A_1$	5	1
$A_2$	10	1
$A_3$	15	1
$B_1$	5	2
$B_2$	10	2
$B_3$	15	2
$C_1$	5	2/5
$C_2$	10	2/5
$C_3$	15	2/5

جدول 2 خواص فیزیکی شیشه اپوکسی [12]

Table 2 Physical properties of glass epoxy [12]

نوع ماده	شیشه اپوکسی
ضریب انتقال حرارت (W/m K)	1/2
ظرفیت گرمای ویژه (J/kg K)	840
چگالی ( $\text{kg/m}^3$ )	1960

برای انجام مطالعات بهینه و درک فیزیک آزمون تجربی، تحلیل اجزای محدود آزمون حرارت‌نگاری مدوله‌شده با استفاده از نرم‌افزار آباکوس<sup>6</sup> انجام می‌شود. از آنجا که حرارت متناوب به سطح نمونه اعمال می‌شود، در ارزیابی سطح جلوی ورق ماده مرکب به مدت 30 ثانیه به صورت متناوب تحریک می‌شود.

تصاویر دامنه و فاز استخراج می‌شوند. روش تبدیل فوری<sup>1</sup> ابزاری قدرتمند برای محاسبه دامنه و زاویه فاز امواج حرارتی می‌باشد. تبدیل فوری دنباله تصاویر حرارتی در معادله (2) آورده شده است.

$$F_k(x, y) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[ F_n(x, y) \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi K n}{N}\right) \right] \quad (2)$$

$$K = 1, 2, \dots, N$$

در این رابطه  $F_k(x, y)$  تبدیل فوری دنباله تصاویر حرارتی،  $F_n(x, y)$  دنباله تصاویر حرارتی،  $N$  تعداد نمونه در هر دوره مدوله‌شده و  $K$  فرکانس دیجیتال است. به منظور استخراج موج حرارتی در فرکانس مدوله‌شده، فرکانس دیجیتال  $K$  از رابطه (3) به دست می‌آید.

$$K = N \frac{f_e}{f_s} + 1 \quad (3)$$

که در این رابطه  $f_e$  فرکانس حرارت‌نگاری مدوله‌شده،  $f_s$  نرخ فریم تصاویر است. دامنه و فاز امواج حرارتی به کمک روابط (4) و (5) به دست می‌آیند.

$$A_s = \sqrt{[\text{Re}(F_k(x, y))]^2 + [\text{Im}(F_k(x, y))]^2} \quad (4)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}(F_k(x, y))}{\text{Re}(F_k(x, y))} \right) \quad (5)$$

که در این روابط  $A_s$  دامنه سیگنال موج حرارتی و  $\varphi$  فاز سیگنال موج حرارتی می‌باشد [10].

به منظور پردازش تصاویر حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده و اعمال فیلترهای آشکارساز لبه و ریخت‌شناسی توصیفی از محیط برنامه‌نویسی متلب<sup>2</sup> استفاده می‌گردد. الگوریتم‌های بسیاری برای شناسایی لبه در این تابع وجود دارد که از مهمترین آن‌ها می‌توان به کنی، زروکراس<sup>3</sup>، سوبل<sup>4</sup> و لوگ<sup>5</sup> اشاره نمود. ریخت‌شناسی یک نظریه و تکنیک آنالیز و پردازش ساختارهای هندسی بر پایه نظریه مجموعه‌ها و توابع تصادفی است که بر روی تصاویر دیجیتالی صورت می‌گیرد [11].

### 3- ارزیابی حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده

در ارزیابی حاضر، یک نمونه شیشه اپوکسی مربع شکل در ابعاد 100 میلی‌متر با ضخامت 3 میلی‌متر و عیوب مربع شکل با ابعاد و عمق‌های مختلف پشت آن مدل شده است. هر سطر از عیوب در صفحه پلیمری نشان دهنده نقص با عمق ثابت و ابعاد

<sup>1</sup> Fourier Transform

<sup>2</sup> Matlab

<sup>3</sup> Zerocross

<sup>4</sup> Sobel

<sup>5</sup> Log

<sup>6</sup> Abaqus

نمونه ای از ورق مواد مرکب دارای جدایش بین لایه‌ای انجام می‌شود که هندسه و شرایط حرارتی بررسی عددی مطابق با آزمایش تجربی انتخاب می‌گردد. نمونه آزمایشگاهی با ابعاد  $140 \times 210$  میلی‌متر دارای نقص‌هایی در ابعاد و عمق‌های مختلف می‌باشد که جزئیات طراحی در شکل 2 و نمونه ساخته‌شده در شکل 3 نشان داده شده است.

## 5- نتایج و بحث

### 5-1- تعیین اندازه المان در تحلیل عددی

در بررسی عددی، اندازه المان یکی از عوامل مؤثر بر دقت شبیه‌سازی حرارت‌نگاری با استفاده از تحلیل اجزای محدود است و مقدار آن باید به اندازه کافی کوچک انتخاب شود تا توزیع درجه حرارت در ابعاد عیب مشخص شود. برای این منظور حساسیت نتایج تحلیل در اندازه المان‌های مختلف بررسی می‌شود تا اندازه المان مناسب با توجه به حد مجاز خطای محاسباتی تعیین گردد. در این تحلیل، نتایج نشان می‌دهند که اندازه المان  $0/002$  میلی‌متر مناسب بوده و تغییرات دمایی برای المان‌های کوچک‌تر از آن بسیار ناچیز است.

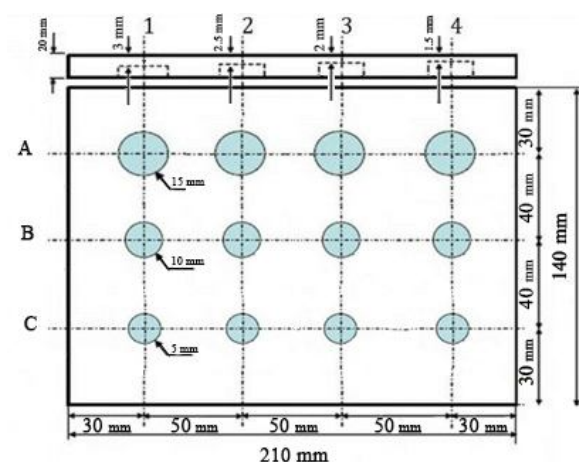


Fig. 2 Composite sample design with delamination defect

شکل 2 نمونه ماده مرکب طراحی شده با عیب جدایش بین لایه‌ای



Fig. 3 Composite sample manufactured with delamination defect

شکل 3 نمونه ماده مرکب ساخته شده با عیب جدایش بین لایه‌ای

تجزیه و تحلیل گسترده برای یافتن انتقال حرارت همرفت از تمامی صفحات نمونه در طول حرارت‌نگاری و انجام ارزیابی با ضرایب همرفت متفاوت نشان می‌دهد که حرارت از دست داده شده ناشی از همرفت طبیعی، سهمی قابل توجه در تغییرات دمایی نمونه مورد ارزیابی داشته و مقدار  $10$  وات بر متر مربع کلونین تعیین می‌گردد [13]. دمای سیال اطراف ورق با دمای اولیه آن برابر و مقدار آن  $298$  درجه کلونین در نظر گرفته می‌شود.

توان لامپ‌ها در طول تحریک  $680$  وات یعنی  $34\%$  قدرت  $2$  لامپ هالوژن  $1000$  وات می‌باشد [14]. بنابراین معادله (1) را می‌توان به صورت رابطه (6) نوشت.

$$q = 340 [1 - \cos(2\pi ft)] \quad (6)$$

برای تعریف تحریک متناوب در نرم‌افزار آباکوس از داده مدوله‌شده<sup>1</sup> استفاده می‌شود. در نرم‌افزار داده مدوله‌شده به صورت معادله 7 تعریف می‌شود [15].

$$a = A_0 + A \sin \omega_1(t - t_0) \sin \omega_2(t - t_0) \quad \text{for } t > t_0 \quad (7\text{-الف})$$

$$a = A_0 \quad \text{for } t \leq t_0 \quad (7\text{-ب})$$

که در آن  $A$ ،  $A_0$ ،  $t_0$ ،  $\omega_1$  و  $\omega_2$  ثابت‌های تعریف شده کاربر می‌باشد. لذا برای اعمال بار حرارتی موردنظر این ضرایب محاسبه و اعمال می‌گردند. شکل 2 مدل شبکه‌بندی شده ارزیابی اجزای محدود را با نوع المان  $86727$  از نوع  $DC3D8$  نشان می‌دهد.

برای ارزیابی غیرمخرب قابل اعتماد، دانستن نشر حرارتی، ضخامت ماده تحت بررسی و فرکانس موج تحریک ضروری است. یکی از مشکلات اصلی حرارت‌نگاری مدوله شده این است که فرکانس‌های تحریک بر تشخیص نقص اثر می‌گذارد.

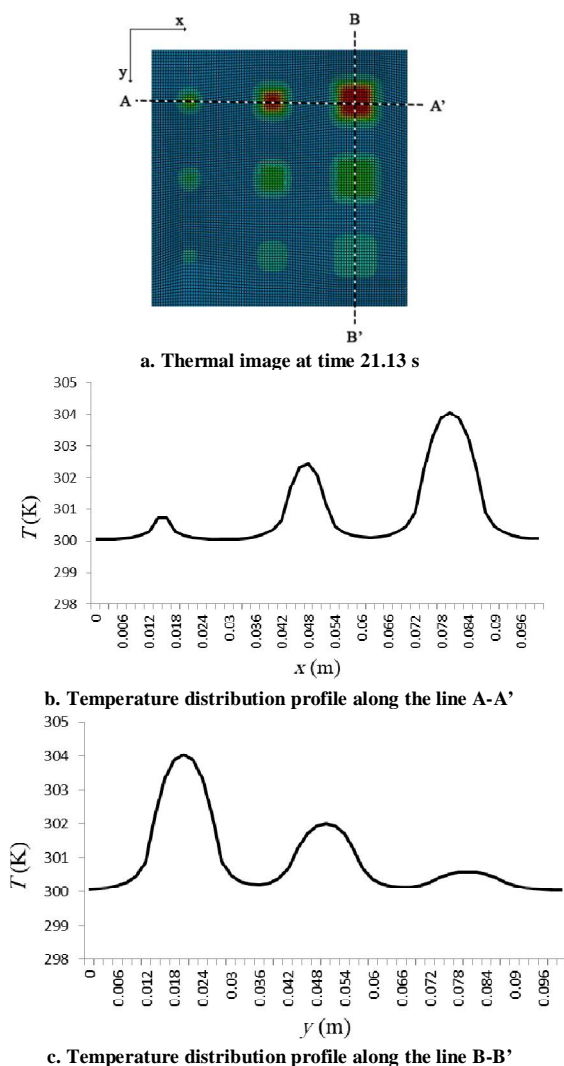
اگر فرکانس تحریک اشتباه انتخاب شود نقص ممکن است از دست برود. برای برطرف کردن این نقص، آزمون حرارت‌نگاری مدوله شده در فرکانس‌های مختلف صورت می‌گیرد. تقریباً هر فرکانس در محدوده  $0/05$  تا  $5$  هرتز می‌تواند برای حرارت‌نگاری مدوله شده استفاده شود. محدوده فرکانس تحریک، متناسب با عمق نقص و ضخامت نمونه انتخاب می‌گردد.

## 4- صحه‌گذاری

مدل ارائه شده برای بهبود تحلیل آزمایش حرارت‌نگاری مدوله شده باید صحه‌گذاری شود تا از نتایج به دست آمده از مدل اطمینان حاصل گردد. برای این منظور آزمایش حرارت‌نگاری نوری با تحریک مدوله شده و اعمال فیلترهای بهبود تصویر در

<sup>1</sup> Modulated Data

از شکل‌های 5b و 5c مشاهده می‌شود که مقدار جریان حرارت بالا، تفاوت دمایی بیشتری را در سطح عیوب ایجاد کرده و برای شناسایی عیوب مناسب است. تباین حرارتی به تغییرات عمق و اندازه عیب وابسته و با افزایش عمق نقص از سطح تحت اعمال حرارت و یا کوچک شدن اندازه نقص، کاهش می‌یابد.



**Fig. 5** Temperature distribution. a) Thermal Image at frequency of 1 Hz and time 21.13 s b) Temperature distribution profile along the line A-A' and c) Temperature distribution profile along the line B-B'

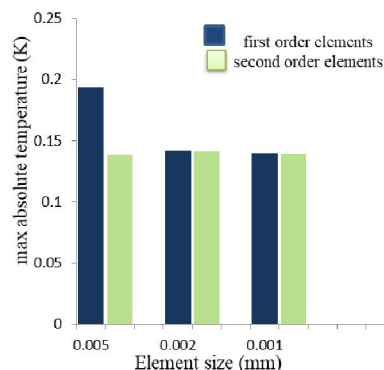
شکل 5 توزیع دمایی، تصویر حرارتی در فرکانس 0/5 هرتز و زمان 21/13 ثانیه (a) پروفیل توزیع دمایی در امتداد خط A-A' و پروفیل توزیع دمایی در امتداد خط B-B' (c)

پاسخ حرارتی از سطح نمونه مورد بررسی در همان زمان ثبت شده و سپس برای تعیین فاز و دامنه تغییرات دمایی در سطح نمونه پس‌پردازش می‌شوند. تصاویر فاز و دامنه حرارتی به دست آمده از حرارت‌نگاری مدوله شده تحلیل عددی در فرکانس

تأثیر انتخاب نوع المان بر دقت نتایج تحلیل نیز می‌تواند اثر گذار باشد. المان را می‌توان از نوع درجه اول یا درجه دوم انتخاب کرد. انتخاب المان درجه اول دارای این مزیت است که زمان تحلیل کم و برای مشاهده نتایج اولیه مناسب است. المان مرتبه دوم با سه گره در هر ضلع دارای دو گره در ابتدا و انتهای هر ضلع المان و یک گره در بین آن‌ها است. مشکل اصلی این المان افزایش قابل توجه حجم محاسبات و نیاز بیشتر به مقدار حافظه و زمان تحلیل است. بنابراین ضروری است اصلاح نتایج با این نوع المان بررسی شود [15]. شکل 4 حداکثر اختلاف دمایی محاسبه شده در نقطه سالم و معیوب را با استفاده از المان‌های مرتبه اول و دوم با ابعاد 0/005، 0/002 و 0/001 میلی‌متر بر روی نمونه با عیب جدایش بین لایه‌ای را پس از 5 ثانیه تحریک نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج المان مرتبه اول و مرتبه دوم با اندازه المان یکسان 0/002 میلی‌متر انتخاب‌شده، اختلاف بسیار کمی دارند و استفاده از المان مرتبه دوم تأثیر ناچیزی در دقت نتایج دارد و زمان تحلیل را افزایش می‌دهد.

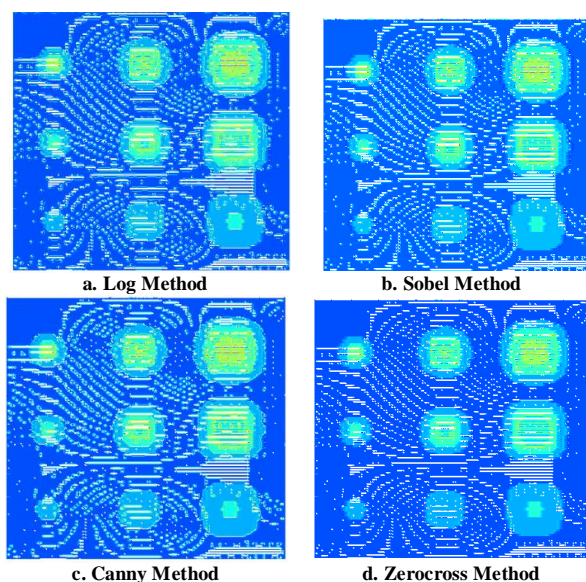
## 2-5- نتایج ارزیابی حرارت‌نگاری مدوله شده

تحلیل اجزای محدود برای دوره‌های تحریک در محدوده فرکانسی 5 تا 0/05 هرتز انجام می‌شود. در طول تحریک تصاویر حرارتی با مختصات x و y ذخیره و هر پیکسل یک مقدار دما را نشان می‌دهد. برای مقایسه توزیع دمای سطح بین متغیرهای عمق و قطر عیوب، مقطع اندازه‌گیری A-A' و B-B' در امتداد عیوب  $A_1$ ،  $A_2$  و  $A_3$  با عمق 1 میلی‌متر از سطح سالم و در امتداد عیوب  $B_3$ ،  $B_2$  و  $B_1$  با طول ضلع 15 میلی‌متر و عمق‌های 1، 2 و 2/5 میلی‌متر از سطح سالم که در شکل 5a نشان داده شده است، ایجاد گردید. تصویر حرارتی در فرکانس 1 هرتز و زمان 21/13 ثانیه برای تحلیل‌ها در نظر گرفته شد.



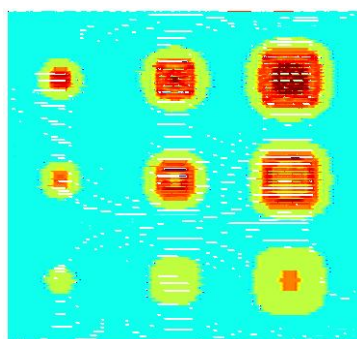
**Fig. 4** Maximum temperature difference for the size of first and second order elements

شکل 4 حداکثر اختلاف دمایی برای اندازه المان‌های مرتبه اول و دوم



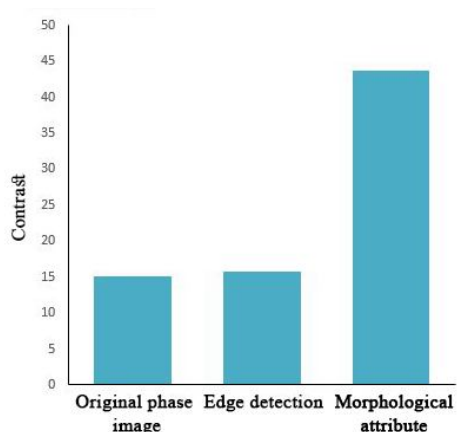
**Fig. 7** Comparison of Edge Detection Techniques on Phase Image, a) Log Method, b) Sobel Method, c) Canny Method and d) Zerocross Method

**شکل 7** مقایسه انواع روش‌های آشکارساز لبه بر روی تصویر فاز، روش لوگ (a)، روش سوبل (b)، روش کنی (c) و روش زروکراس (d)



**Fig. 8** Phase image at 0.5 Hz frequency with the morphological attribute profile

**شکل 8** تصویر فاز در فرکانس 0/5 هرتز با اعمال ریخت‌شناسایی توصیفی



**Fig. 9** Comparison of contrast achieved by various image processing algorithms

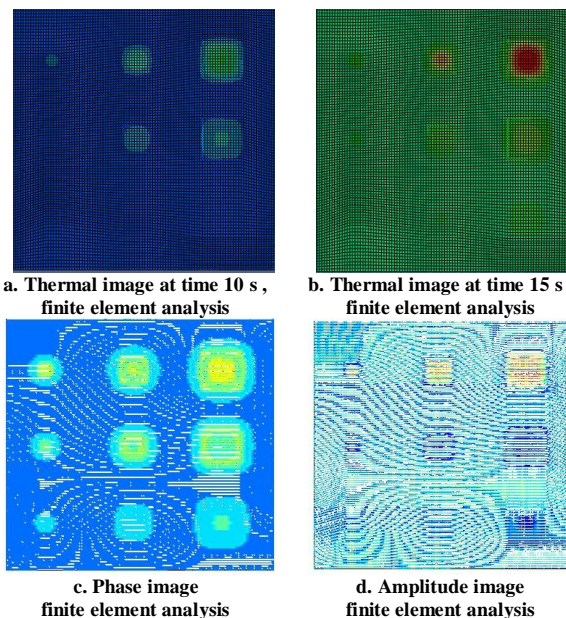
**شکل 9** مقایسه تباین با الگوریتم‌های پردازش تصویر مختلف

1 هرتز در شکل 6 آورده شده است. تحلیل به دلیل اختلاف دمای بین نواحی سالم و معیوب دارای قابلیت تشخیص عیوب زیر سطحی است.

از نتایج به‌دست‌آمده می‌توان اطلاعاتی از ابعاد نقص به دست آورد. برای امکان تشخیص و اندازه‌گیری بهتر عیوب از فیلترهای آشکارساز لبه استفاده می‌شود. این فیلترها موجب برجسته نمودن لبه و استخراج عیوب شده و گامی اساسی در تشخیص نقص می‌باشند؛ لذا به دست آوردن لبه واقعی به وسیله انواع روش‌های آشکارساز لبه دارای اهمیت می‌باشد. در شکل 7 چهار روش آشکارساز لبه بر روی تصویر فاز اعمال شده که موجب بهبود لبه تصویر فاز شده و مرز نقص به خوبی قابل تشخیص می‌باشد.

ریخت‌شناسی توصیفی نیز با بالا بردن تباین ناحیه معیوب، تشخیص و استخراج ناحیه هدف را ممکن ساخته و قابلیت حرارت‌نگاری را افزایش می‌دهد. شکل 8 اعمال فیلتر ریخت‌شناسی توصیفی بر روی تصویر فاز را نشان می‌دهد که

نقص به وضوح استخراج گردیده است. شکل 9 تغییرات تباین تصویر فاز حاصل را با اعمال الگوریتم‌های آشکارساز لبه و ریخت‌شناسی توصیفی نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که روش ریخت‌شناسی توصیفی تباین 15/16 درصد تصویر اولیه را تا 43/63 درصد افزایش داده و موجب تشخیص بهتر نقص می‌گردد.



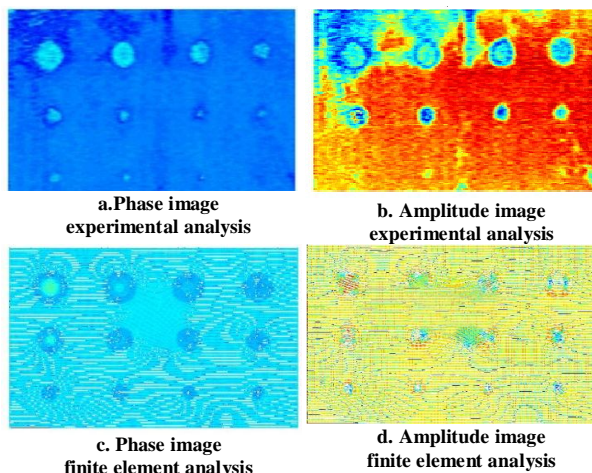
**Fig. 6** Thermal, Amplitude and Phase Image at frequency of 1 Hz finite element analysis on the sample with defects

**شکل 6** تصاویر حرارتی، دامنه و فاز در فرکانس 1 هرتز تحلیل اجزای محدود برای نمونه معیوب

تباين حرارتی به تغییرات عمق و اندازه عیب وابسته و با کاهش عمق از سطح سالم و افزایش اندازه نقص، بیشتر می‌شود. از مقایسه نتایج تجربی و اجزای محدود نیز مشخص شد که اگر چه روند مشابهی دارند اما دمای به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی به دلیل نویز سازه و تجهیزات، کمی متفاوت از اجزای محدود است.

تصاویر فاز و دامنه حرارتی بررسی تجربی و اجزای محدود به‌دست‌آمده از حرارت‌نگاری مدوله‌شده در فرکانس 0/5 هرتز در شکل 11 آورده شده است. در مقایسه با ارزیابی تجربی، مشاهده می‌شود که تحلیل اجزای محدود در تشخیص عیوب زیر سطحی نتیجه‌ای مشابه داشته و لذا می‌تواند در یافتن پارامترهای بهینه در ارزیابی‌های دیگر عیب جدایش بین لایه‌های مواد مرکب به کار گرفته شود.

برای برجسته نمودن لبه و استخراج ساختار عیوب، از فیلتر آشکارساز لبه و ریخت‌شناسی توصیفی استفاده نموده و چنانچه در شکل 12 نشان داده شده است، یافتن مرز بین منطقه سالم و معیوب به وضوح قابل تشخیص است و لذا الگوی ارائه شده توان توسعه و افزایش قابلیت روش حرارت‌نگاری مادون قرمز را در تشخیص عیوب دارد.



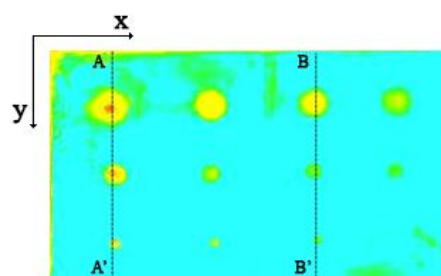
**Fig. 11** Thermal, Amplitude and Phase Image at frequency of 0.5 Hz, experimental and finite element analysis on the sample with delamination defect

شکل 11 تصاویر دامنه و فاز تحلیل‌های تجربی و اجزای محدود در فرکانس 0/5 هرتز برای نمونه با عیب جدایش بین لایه‌های

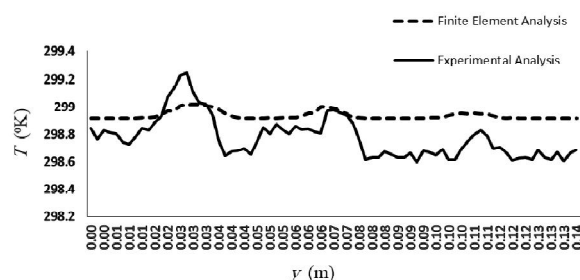
## 6- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این مقاله استفاده از حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله شده و الگوی پردازش تصویر به منظور بهبود قابلیت ارزیابی نقص‌های زیر سطحی را در مواد مرکب ارائه می‌دهد.

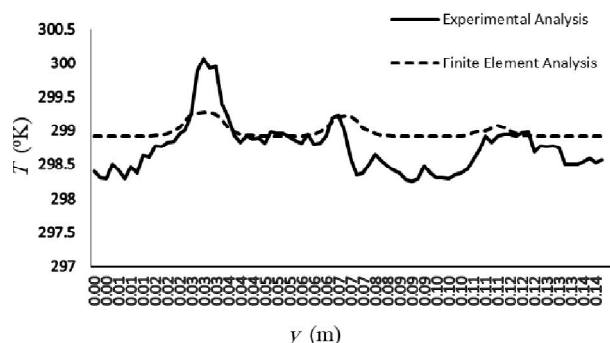
به منظور اعتبار سنجی، بررسی تجربی و عددی بر روی نمونه ورق ماده مرکب دارای نقص جدایش بین لایه‌های انجام و نتایج حاصل مورد بررسی قرار گرفت. برای مقایسه توزیع دمای سطح بین متغیرهای عمق و قطر عیوب، مقطع اندازه‌گیری A-A' و B-B' در امتداد عیوب  $A_4$ ،  $B_4$  و  $C_4$  با عمق‌های 1/5 میلی‌متر و در امتداد عیوب  $A_2$ ،  $B_2$  و  $C_2$  با عمق عیب 2/5 میلی‌متر که در شکل 10a نشان داده شده است، ایجاد گردید. تصویر حرارتی در فرکانس 0/5 هرتز و زمان 15/10 ثانیه برای تحلیل‌ها در نظر گرفته شد. از شکل 10b و 10c مشاهده می‌شود که مقدار جریان حرارت بالا، تفاوت دمایی بیشتری را در سطح عیوب ایجاد کرده و برای شناسایی عیوب مناسب است.



**a. Thermal image at time 15.10 s**



**b. Temperature distribution profile along the line A-A'**



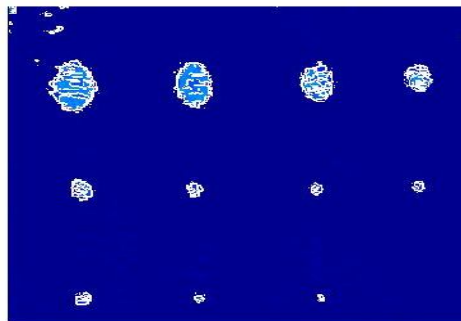
**c. Temperature distribution profile along the line B-B'**

**Fig. 10** Temperature distribution, a) Thermal Image at frequency of 0.5 Hz and time 15.10 s b) Temperature distribution profile along the line A-A' b) Temperature distribution profile along the line B-B'

شکل 10 توزیع دمایی، تصویر حرارتی در فرکانس 0/5 هرتز و زمان 15/10 ثانیه (a) پروفیل توزیع دمایی در امتداد خط A-A' (b) پروفیل توزیع دمایی در امتداد خط B-B'

aerospace materials by pulsed thermography, lock-in thermography and vibrothermography: A comparative study, in *Proceeding of*, 16-24.

- [4] M. Dalla Mura, J. A. Benediktsson, B. Waske, L. Bruzzone, Morphological attribute profiles for the analysis of very high resolution images, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 48, No. 10, pp. 3747-3762, 2010.
- [5] P. W. Tse, G. Wang, Sub-surface defects detection of by using active thermography and advanced image edge detection.
- [6] P. VENEGAS, R. USAMENTIAGA, L. VEGA, J. GUEREDIAGA, I. JORGE, I. LÓPEZ, I. S. DE OCÁRIZ, Image and Data Processing Techniques Applied to Infrared Thermographic Non-Destructive Inspections of Aeronautical Composite Components.
- [7] T. Saravanan, B. Lahiri, K. Arunmuthu, S. Bagavathiappan, A. Sekhar, V. Pillai, J. Philip, B. Rao, T. Jayakumar, Non-destructive evaluation of friction stir welded joints by X-ray radiography and infrared thermography, *Procedia Engineering*, Vol. 86, pp. 469-475, 2014.
- [8] Z. Liu, M. Genest, D. Krysz, Processing thermography images for pitting corrosion quantification on small diameter ductile iron pipe, *NDT & E International*, Vol. 47, pp. 105-115, 2012.
- [9] K. Zheng, Y.-S. Chang, K.-H. Wang, Y. Yao, Improved non-destructive testing of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites using pulsed thermograph, *Polymer Testing*, Vol. 46, pp. 26-32, 2015.
- [10] J. Liu, W. Yang, J. Dai, Research on thermal wave processing of lock-in thermography based on analyzing image sequences for NDT, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 53, No. 5, pp. 348-357, 2010.
- [11] E. J. Breen, R. Jones, Attribute openings, thinnings, and granulometries, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 64, No. 3, pp. 377-389, 1996.
- [12] F. Mabrouki, M. Genest, G. Shi, A. Fahr, Numerical modeling for thermographic inspection of fiber metal laminates, *NDT & E International*, Vol. 42, No. 7, pp. 581-588, 2009.
- [13] J. Holman, Heat transfer, 8<sup>th</sup> ed, *New York*, 1997.
- [14] M. Kurpiński, M. Fidali, Detection of Bonded Joint Defects by use of Lock-in Thermography, *Measurement Automation Monitoring*, Vol. 62, No. 10, pp. 333--336, 2016.
- [15] D. Systemes, ABAQUS 6.14 Documentation–Theory Guide, *Providence, RI*, 2015.



**Fig. 12** Phase image at 0.5 Hz frequency with the edge detection filter and the morphological attribute profile

شکل 12 تصویر فاز در فرکانس 0/5 هرتز و اعمال فیلترهای آشکارساز لبه و ریخت‌شناسایی توصیفی

نتایج نشان می‌دهند که قابلیت تشخیص عیوب زیر سطحی با حرارت‌نگاری مادون قرمز بستگی به خواص مواد، اندازه و عمق عیب، هندسه و سطح قطعه، حساسیت حرارتی دوربین حرارت‌نگاری، فرکانس تحریک، توان عامل تحریک و غیره دارد. بنابراین مشخص است که توسعه الگو با در نظر گرفتن متغیر-های آزمون به بهبود کارایی حرارت‌نگاری مدوله شده برای اندازه گیری عیب کمک می‌کند.

روش آشکارساز لبه و ریخت‌شناسایی توصیفی بر روی تصویر فاز حاصل از پردازش سیگنال دنباله تصاویر حرارتی، اعمال و نشان داده شد که شناسایی نقص سازه با لبه‌یابی و استخراج ساختار عیوب، بهبود می‌یابد، لذا احتمال از دست دادن عیب در فرکانس‌های مورد بررسی را کاهش و با برجسته نمودن لبه عیوب در تصاویر و بالا بردن تباین نقص نسبت به زمینه تا 43/63 درصد، قابلیت حرارت‌نگاری مدوله شده در تشخیص و مکان‌یابی عیوب مواد مرکب را افزایش می‌دهد. تحلیل اجزای محدود مطابقت خوبی با داده‌های تجربی داشته و لذا قابلیت یافتن متغیرهای بهینه و بررسی الگوی توسعه‌ای در عیب‌یابی مواد مرکب زمینه پلیمری را دارا می‌باشد.

## 7- مراجع

- [1] C. Boller, W. Staszewski, G. R. Tomlinson, *Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing*: J. Wiley, 2004.
- [2] H. A. Thajeel, *Numerical modeling of infrared thermography techniques via ANSYS*: Missouri University of Science and Technology, 2014.
- [3] C. Ibarra-Castaneda, M. Genest, S. Guibert, J.-M. Piau, X. P. Maldague, A. Bendada, Inspection of