



ارزیابی غیرمخرب حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده در عیب‌یابی مواد مرکب زمینه پلیمری

کریم جمالی¹، داود اکبری^{2*}، محمد گلزار³

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

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 آبان 1396

پذیرش: 10 دی 1396

ارائه در سایت: 05 بهمن 1396

کلید واژگان:

آزمون غیرمخرب

حرارت‌نگاری

مدولاسیون

مواد مرکب

چکیده

در این مقاله به ارزیابی حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده در شناسایی عیوب زیر سطحی مواد مرکب زمینه پلیمری پرداخته شده است. در این روش به منظور تحریک نمونه، شار حرارتی به صورت متناوب به سطح قطعه اعمال شده و پاسخ حرارتی به وسیله تبدیل فوریه پردازش و تصاویر دامنه و فاز استخراج می‌شوند. پس زمینه غیریکنواخت مشاهده‌شده در تصاویر حاصل، اغلب قدرت تشخیص را پایین می‌آورد؛ بنابراین برای بهبود ارزیابی این روش، فیلتر آشکارساز لبه و ریخت‌شناسی توصیفی بر روی تصاویر اعمال می‌گردد. بررسی تجربی در فرکانس‌های مختلف بر روی نمونه‌های ساخته‌شده با نقص‌های کنترل‌شده رایج در مواد مرکب صورت گرفت. از تحلیل نتایج برای تعیین دقیق موقعیت و ابعاد عیوب استفاده و مشاهده شد که در نمونه‌های با ضخامت 2 میلی‌متر نقص جدایش بین لایه‌های با حداقل اندازه 20-10 میلی‌متر و نقص‌های الیاف خشک و نفوذ مواد ناخواسته با حداقل اندازه 50-40 میلی‌متر شناسایی و اندازه‌گیری می‌شوند. در تحلیل اجزای محدود هندسه و عیوب به کار برده شده در آزمون تجربی، در نظر گرفته شد. مشاهده شد که نتایج ارزیابی اجزای محدود با ارزیابی تجربی مطابقت داشته و می‌تواند در یافتن متغیرهای بهینه در بررسی حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده در عیب‌یابی مواد مرکب به کار گرفته شود.

Non-destructive Investigation of Modulated Infrared Thermography in Evaluation of Subsurface Defects in Polymer Matrix Composites

Karim Jamali¹, Davood Akbari^{1*}, Mohammad Golzar¹

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

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 November 2017
Accepted 31 December 2017
Available Online 25 January 2018

Keywords:
Non-destructive test
Thermography
Modulation
Composites

ABSTRACT

In this paper, an investigation was done on modulated IR thermography for detection and evaluation of artificial subsurface defects in composite materials. In this method, 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 in order 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. Experimental investigations were applied for different frequencies on specimens made with common controlled defects in composite materials. Interpretation of the results were utilized in the calculation of defects' size and location, it was observed that in specimen with 2 mm thickness delamination defect with a minimum size of 20-10 mm, dry fiber and inclusion defects with a minimum size of 50-40 mm is detected and is measured. The same geometry and the artificial defects used in experiments were considered in the finite element analysis. The results of finite element analysis were found to have an agreement with the experimental results and can be used to find the optimum parameters in investigation of modulated IR thermography for detection of defects on composites.

1- مقدمه

قادر به شناسایی و مکان‌یابی این آسیب‌ها به طور دقیق و به موقع باشد. اگرچه روش‌های زیادی برای آزمایش غیرمخرب به منظور شناسایی عیوب وجود دارند، ولی در صنایع مختلف نیاز به روشی است که بتواند در مدت زمان کوتاه، سطوح وسیعی از قطعات را با دقت بالا ارزیابی و عیوب درونی سازه را شناسایی کند. آزمون حرارت‌نگاری که در مقایسه با روش‌های موجود قابلیت کنترل کیفی قطعات بزرگ را در مدت زمانی کوتاه دارد، براساس

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 عملکرد صحیح سازه دسترسی به آزمون غیرمخرب لازم است که

Please cite this article using:

K. Jamali, D. Akbari, M. Golzar, Non-destructive Investigation of Modulated Infrared Thermography in Evaluation of Subsurface Defects in Polymer Matrix Composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 18, No. 02, pp. 225-233, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

www.scribd.com

نشان دادند. لیو و همکاران [13] برای تعیین مقدار خوردگی لوله از حرارت‌نگاری مادون قرمز استفاده نمودند. آن‌ها یک روش پردازش تصویر برای استخراج اطلاعات خوردگی از دنباله تصاویر حرارتی تولید شده که انعکاس روند انتشار گرما در دیواره لوله است را ارائه دادند.

هدف از این تحقیق بررسی تجربی و اجزای محدود حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده در مواد مرکب دارای عیوب زیر سطحی است تا بتوان عملکرد آزمایش حرارت‌نگاری مدوله‌شده را در شناسایی عیوب مختلف ارزیابی کرد. با استفاده از تحلیل اجزای محدود می‌توان تعداد تکرار انجام آزمایش را در مطالعات آزمایشگاهی کاهش داد و تأثیر عوامل مختلف بر دقت روش را ارزیابی کرد. برای این منظور ورق مواد مرکب از جنس شیشه بی‌وی‌سی⁴ دارای نقص‌های کنترل‌شده از نوع الیاف خشک⁵، جدایش بین لایه‌ای⁶ و نفوذ مواد ناخواسته⁷ برای تحلیل تجربی و اجزای محدود مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از برنامه کاربردی و پردازش دنباله تصاویر حرارتی، تصاویر دامنه و فاز حاصل شد و با اعمال فیلترهای آشکارساز لبه و ریخت‌شناسی توصیفی بر تصویر فاز، تشخیص و شناسایی عیوب بهبود یافت. با بررسی توزیع حرارتی سطح نمونه و موقعیت و ابعاد نقص، توانایی روش در شناسایی نقص‌های زیر سطحی مواد مرکب زمینه پلیمری مورد بررسی قرار گرفت.

2- اصول حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده

در حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده از تحریک مدوله‌شده همساز منبع نوری برای ایجاد شار حرارتی به مواد بهره گرفته می‌شود. رابطه (1) منبع حرارتی را توصیف می‌کند [14].

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

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

این شار حرارتی شامل دو قسمت است. یک قسمت بخش استاتیک بوده که افزایش حرارت سطح در معرض تحریک را تا زمانی که به تعادل حرارتی برسد ایجاد می‌کند و یک قسمت درجه حرارت نوسانی است که در حالت پایا برای یک صفحه نیمه نامحدود می‌تواند به‌عنوان تابعی از عمق z و زمان t با رابطه (2) برای انتقال حرارت در یک بعد بیان شود [14].

$$T(z, t) = T_0 \exp\left(\frac{-z}{\mu}\right) \exp(i[\omega t - \varphi_{(z)}]) \quad (2)$$

در این رابطه $T_{(z,t)}$ درجه حرارت در عمق z و در زمان t ، $\varphi_{(z)}$ اختلاف فاز بین حرارت مدوله‌شده اعمالی و پاسخ حرارتی و μ عمق نفوذ حرارتی است که به صورت رابطه (3) محاسبه می‌شود [15].

$$\mu \equiv \sqrt{\frac{2 \cdot \alpha}{\omega}} = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \quad (3)$$

در این رابطه α ضریب نفوذ حرارتی است. در مورد تصویر فازی محدوده عمق در حدود 1.8 برابر بزرگ‌تر است [15].

پاسخ حرارتی از سطح نمونه مورد بررسی در همان زمان با استفاده از دوربین مادون قرمز ثبت و به کمک تحلیل دنباله تصاویر دامنه و فاز استخراج می‌شوند. روش تبدیل فوریه⁸ ابزاری قدرتمند برای محاسبه دامنه و زاویه فاز امواج حرارتی است. تبدیل فوریه دنباله تصاویر حرارتی در رابطه (4) آورده

تشنوع امواج الکترومغناطیس از اجسام در درجه حرارت مختلف است که این تشنوع توسط دوربین حرارت‌نگاری دریافت و توسط پردازنده تحلیل می‌شود [2].

حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده براساس استفاده از امواج حرارتی متناوب برای بررسی نمونه است. امواج متناوب منتشر شده 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 به عنوان موج حرارتی انتشار یابد. هر زمان که این امواج حرارتی به ناپیوستگی¹ مانند عیوب زیر سطحی یا ناهمگنی² می‌رسند، این نقص‌ها به عنوان 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]. در تصاویر به دست آمده تباین بین مناطق معیوب و سالم اغلب به دلیل نویز و پس‌زمینه غیریکنواخت به وضوح 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 می‌کند بر تصویر دارد. یکی از فیلترهای غیرخطی، فیلتر ریخت‌شناسی توصیفی³ است که ساختارها را با توجه به معیارهایی نظیر مساحت، قطر و غیره استخراج می‌کند [4].

پژوهش‌هایی در زمینه استفاده از حرارت‌نگاری مادون قرمز در عیب‌یابی صورت گرفته است. مبروک و همکاران [5] با مطالعه آزمایشگاهی عیوب با ابعاد و عمق‌های مختلف را شناسایی کردند و نشان دادند که با استفاده از حرارت‌نگاری می‌توان عیوب را تا ابعاد 3 میلی‌متر و در عمق 0.6 میلی‌متر و عیوب تا ابعاد 10 میلی‌متر در عمق 1.65 میلی‌متر یافت. بوسه [6] اهمیت استفاده از زاویه فاز به منظور اندازه‌گیری عمق و توسعه بیشتر تصویربرداری زیر سطح را نشان داد. مئولا و همکاران [7] اثرات اندازه، عمق و ضخامت نقص را در ورق‌های مواد مرکب با استفاده از حرارت‌نگاری مدوله‌شده بررسی کردند. چوی [8] اندازه و محل نقص‌های زیر سطحی را با استفاده از حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده ارزیابی کرد و نشان داد که تفاوت فاز بین منطقه سالم و معیوب موقعیت مکانی و اندازه نقص را نشان می‌دهد. مئولا و همکاران [9] با استفاده از حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده، عیوب با قطرهای معادل مختلف در ماده مرکب با الیاف کربن را در فرکانس‌های مختلف با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی شناسایی کردند. لاهییری و همکاران [10] با استفاده از حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده عیوب را در لاستیک با چگالی بالا و چگالی پایین و آلومینیوم در عمق و ابعاد مختلف با فرکانس‌های مختلف شناسایی نمودند. آن‌ها با تعیین فرکانس بهینه در حرارت‌نگاری مدوله‌شده برای نمونه‌های مختلف مشاهده کردند که با افزایش عمق عیب، اختلاف فاز بین موج تحریک و پاسخ حرارتی افزایش می‌یابد در حالی که اختلاف دما کاهش پیدا می‌کند. ژنگ و همکاران [11] 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. اجمل و همکاران [12] در پژوهشی به ارزیابی غیرمخرب حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده و همبستگی تصویر دیجیتال در تعیین اندازه و رشد جدایش بین لایه‌ای در مواد مرکب پرداخته و با بررسی نمونه تحت بار توانایی هر روش در تشخیص و اندازه‌گیری نقص را

⁴ PVC (Polyvinyl chloride)

⁵ Dry fiber

⁶ Delamination

⁷ Inclusions

⁸ Fourier Transform

¹ Discontinuity

² Non-homogeneity

³ Morphological Attribute Profiles

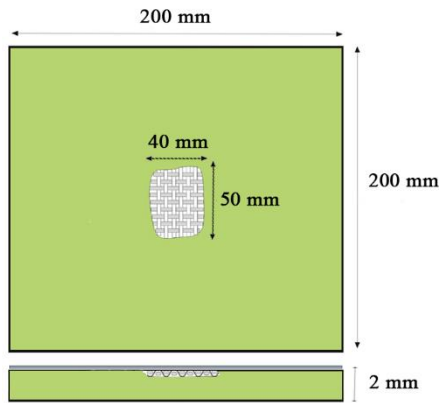


Fig. 1 Composite sample design with dry fiber defect

شکل 1 نمونه ماده مرکب طراحی شده با عیب الیاف خشک

ابعاد 30-40 و 10-20 میلی‌متر در زیر لایه رویی و در عمق 0.5 میلی‌متر از سطح ماده مرکب شیشه پی‌وی‌سی با ابعاد 200-200 میلی‌متر قرار داده شده است. طراحی نمونه در شکل 2 مشاهده می‌شود.

3-1-3- نمونه ماده مرکب با عیب نفوذ مواد ناخواسته

نمونه با حضور مواد ناخواسته در بین لایه‌های ماده مرکب با قرار دادن قطعاتی با هدایت حرارتی متفاوت از ماده پایه ایجاد گردید [17]. این قطعات از جنس کاغذ نسوز و فلز آلومینیوم با ضخامت‌های به ترتیب 0.2 و 0.5 میلی‌متر و در ابعاد 40-50 میلی‌متر و در عمق 0.5 میلی‌متر از سطح نمونه در هنگام ساخت قرار داده شد. شکل 3 طراحی نمونه را نشان می‌دهد.

3-2- ارزیابی تجربی

آزمایش تجربی با استفاده از تحریک حرارتی مدوله‌شده متناوب به صورت انعکاسی انجام شد. منبع تحریک حرارتی شامل دو لامپ هالوژن 1000 وات است که به وسیله مولد تابع² و تقویت‌کننده³ راه‌اندازی می‌شود. یک مولد تابع برنامه‌نویسی شده برای ایجاد امواج سینوسی استفاده گردید. دوربین حرارت‌نگاری مورد استفاده اینفرک⁴ R300sR بوده که مجهز به آشکارساز⁵ میکروبولو⁶ و با گستره کاری 8 تا 14 میکرومتر است. وضوح دوربین 480×640 پیکسل و اندازه پیکسل 25×25 میکرومتر است. در حین آزمایش تصاویر حرارتی با نرخ فریم 8 نمایش و ثبت می‌شود. شکل 4 نمایی کلی از چیدمان تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی را 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 مدوله‌شده این است که فرکانس‌های تحریک بر تشخیص نقص اثر می‌گذارد. در این روش تحریک حرارتی با فرکانسی متناسب با عمق مشخص، عیوب معینی قابل تشخیص اند و اگر فرکانس تحریک اشتباه انتخاب شود ممکن است که نقص از دست برود. برای برطرف نمودن این مشکل، آزمون باید با فرکانس‌های متفاوت و متناسب با ضخامت قطعه انجام شود. در ارزیابی حاضر برای انتخاب دقیق محدوده فرکانس تحریک، عمق نفوذ تصویر فازی متناسب با ضخامت نمونه محاسبه و فرکانس در محدوده 0.1-5 هرتز انتخاب می‌گردد [19].

شده است [16].

$$F_k(x, y) = \sum_{n=0}^{N-1} \left[F_n(x, y) \exp\left(-j \frac{2\pi K n}{N}\right) \right] \quad (4)$$

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

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 (5) به دست می‌آید [16].

$$K = N \frac{f_e}{f_s} + 1 \quad (5)$$

در این رابطه f_e فرکانس حرارت‌نگاری مدوله شده، f_s نرخ فریم تصاویر است. دامنه و فاز امواج حرارتی به کمک روابط (6,7) به دست می‌آیند [16].

$$A_s = \sqrt{[\operatorname{Re}(F_k(x, y))]^2 + [\operatorname{Im}(F_k(x, y))]^2} \quad (6)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left(\frac{\operatorname{Im}(F_k(x, y))}{\operatorname{Re}(F_k(x, y))} \right) \quad (7)$$

در این روابط A_s دامنه سیگنال موج حرارتی و φ فاز سیگنال موج حرارتی است.

3- مواد و روش‌ها

3-1- طراحی و ساخت نمونه

سه نمونه که هر یک شامل عیوب کنترل شده رایج در مواد مرکب است طراحی و ساخته شد. در این نمونه‌ها از فیلم‌های پلیمری گرمانرم پی‌وی‌سی با نرم‌کننده دی‌اکتیل فتالات¹ به عنوان زمینه و الیاف شیشه پارچه‌ای بافته شده نوع E با مشخصه وزنی 200 گرم بر متر مربع به عنوان تقویت‌کننده آن استفاده شده است. ضخامت لایه‌های پی‌وی‌سی و الیاف شیشه به ترتیب 0.25 و 0.3 میلی‌متر است. لایه‌های پلیمری و الیاف به صورت یک در میان به طوری که لایه اول و آخر پی‌وی‌سی باشد روی هم قرار می‌گیرند.

پس از لایه چینی نمونه بین دو کفه آلومینیومی که با ورق نسوز پوشیده شده‌اند، قرار می‌گیرند. از مکانیزم پیچ و مهره برای اعمال نیرو استفاده می‌گردد. پس از قرارگیری دو کفه، چهار جفت تسمه به صورت عرضی در دو طرف کفه‌ها قرار می‌گیرد و با محکم کردن پیچ‌ها، وظیفه اعمال فشار بر ماده مرکب را بر عهده دارند. در ادامه ورق ماده مرکب به مدت 10 دقیقه در دمای 220 درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد. پس از خنک‌کاری و آماده شدن نمونه برای کاهش بازتاب تشعشع سطحی با رنگ سیاه مات پوشش داده می‌شود.

3-1-1- نمونه ماده مرکب با عیب الیاف خشک

عیب الیاف خشک نقضی اساسی در مواد مرکب با رزین مایع است [17]. نمونه شیشه پی‌وی‌سی با عیب الیاف خشک شامل 4 لایه الیاف و 5 لایه پی‌وی‌سی با ابعاد 200-200 میلی‌متر است که نقص با ایجاد برش در لایه رویی پی‌وی‌سی و در ناحیه‌ای با ابعاد 40-50 میلی‌متر ایجاد گردید. طراحی نمونه در شکل 1 آورده شده است.

3-1-2- نمونه ماده مرکب با عیب جدایش بین لایه‌ای

نمونه با عیب جدایش بین لایه‌ای را عموماً در آزمایش‌ها با برش ناحیه‌ای و قرار دادن فیلم تفلون در آن ایجاد می‌گردد [18]. گنجاندن فیلم در ماده مرکب بر جریان حرارت تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین از تفلونی با ضخامت کم به منظور به حداقل رساندن این اثر نامطلوب استفاده می‌شود. قطعات فیلم به

² Function Generator

³ Amplifier

⁴ Infrec

⁵ Detector

⁶ Microbolo

¹ Dioctyl Phthalate

تجربی در نظر گرفته می‌شود. شکل 5 مدل شبکه‌بندی شده ارزیابی اجزای محدود را نشان می‌دهد.

مشخصات حرارتی مواد استفاده شده در مدل اجزای محدود حرارت‌نگاری نوری در جدول 1 آورده شده است. مشخصات حرارتی شیشه پی‌وی‌سی وابسته به نسبت حجمی و جهت‌گیری الیاف است. ضریب انتقال حرارت شیشه پی‌وی‌سی تا زمانی که شبیه‌سازی عددی رفتار حرارتی مشابه با بررسی تجربی نشان دهد به تدریج تغییر داده شد [5] و در این ارزیابی مقدار 1 وات بر متر کلونین انتخاب گردید که متناسب با ضریب انتقال حرارت محاسبه شده در مواد مرکب است [20].

از آن‌جا که حرارت متناوب به سطح نمونه اعمال می‌شود در شبیه‌سازی عددی سطح جلوی ورق ماده مرکب به مدت 30 ثانیه به صورت متناوب و مطابق ارزیابی تجربی تحریک می‌شود. 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 مترمربع کلونین تعیین می‌گردد [21].

دمای سیال اطراف ورق با دمای اولیه آن برابر و مقدار آن 298 درجه کلونین در نظر گرفته می‌شود.

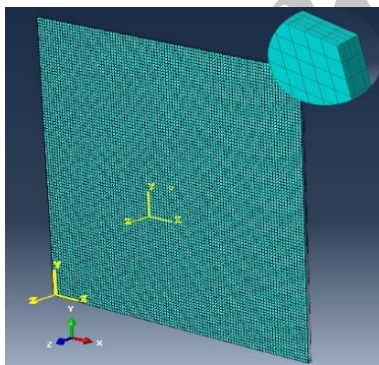
توان لامپ‌ها در طول تحریک 680 وات یعنی 34% قدرت 2 لامپ هالوژن 1000 وات است [23]؛ بنابراین رابطه (1) را می‌توان به صورت رابطه (8) نوشت.

$$q = 340 [1 - \cos(2\pi ft)] \quad (8)$$

برای تعریف تحریک متناوب در نرم‌افزار آباکوس از داده مدوله‌شده² استفاده می‌شود. در نرم‌افزار داده مدوله‌شده به صورت رابطه (9) تعریف می‌شود [24].

$$a = A_0 + A \sin \omega_1(t - t_0) \sin \omega_2(t - t_0) \quad t > t_0 \quad (9-a)$$

$$a = A_0 \quad t \leq t_0 \quad (9-b)$$



شکل 5 مدل اجزای محدود شبکه‌بندی شده

جدول 1 خواص فیزیکی مواد [22]

Table 1 Physical properties of materials [22]

تفلون	آلومینیوم	الیاف شیشه	شیشه پی‌وی‌سی	نوع ماده
0.195	121	1.35	1	ضریب انتقال حرارت (W/m K)
1172	875	800	850	ظرفیت گرمای ویژه (J/kg K)
2150	2780	2550	1955	چگالی (kg/m ³)

² Modulated Data

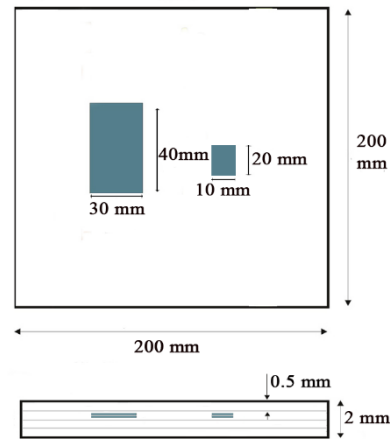


Fig. 2 Composite sample design with delamination defect

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

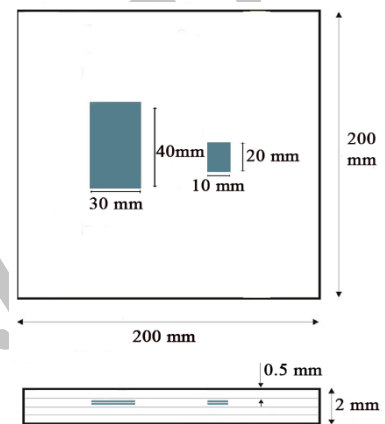


Fig. 3 Composite sample design with inclusions defect

شکل 3 نمونه ماده مرکب طراحی شده با عیب نفوذ مواد ناخواسته



Fig. 4 Experimental set-up used to thermography

شکل 4 چیدمان تجهیزات مورد استفاده در ارزیابی تجربی

3-3- ارزیابی اجزای محدود

از آن‌جا که تحلیل مستقیم مسأله حرارتی زمان‌بر و پیچیده است، مدل‌سازی عددی برای ارزیابی ترجیح داده می‌شود. تحلیل عددی کمک می‌کند تا فیزیک آزمون تجربی درک و مطالعات بهینه‌سازی و پیش‌بینی نتایج ممکن شود. برای تحلیل اجزای محدود آزمون حرارت‌نگاری مدوله‌شده، جریان حرارتی سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس¹ انجام می‌شود. در مدل‌سازی اجزای محدود همان هندسه و عیوب مصنوعی مورد استفاده در بررسی

¹ Abaqus

4-2-1- نمونه ماده مرکب با عیب الیاف خشک

تصاویر فاز تحلیل تجربی در فرکانس‌های تحریک 2 و 0.5 هرتز در شکل 7 آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای فرکانس 2 هرتز نقص با تباين پایین و تنها کمی روشن‌تر از پس‌زمینه مشخص است. در شکل 8 نمودار تباين فاز نسبت به فرکانس تحریک نشان می‌دهد که تباين با کاهش فرکانس افزایش یافته و بیشترین آن در فرکانس 0.3 هرتز صورت می‌گیرد و فرکانس‌های پایین‌تر از آن تشخیص عیب را با تباين کم ممکن می‌سازند. هنگامی که موج حرارتی به سطح نقص می‌رسد، نقص با تباين پایین ظاهر می‌شود و تا زمانی که موج حرارتی به مرکز ضخامت نقص برسد، با کاهش فرکانس تحریک، تباين افزایش می‌یابد. پس از آن تا رسیدن موج حرارتی به لایه زیرین نقص، با افزایش فرکانس تباين کاهش یافته تا نقص ناپدید شود و مجدداً با تغییر رنگ پدیدار گردد [25].

تصاویر حرارتی، فاز و دامنه به دست آمده از حرارت‌نگاری مدوله‌شده از بررسی تجربی و اجزای محدود در فرکانس 0.3 هرتز در شکل 9 آورده شده است. در مقایسه با ارزیابی تجربی مشاهده می‌شود که تحلیل اجزای محدود در تشخیص عیوب زیر سطحی نتایج مشابه داشته و می‌تواند در یافتن پارامترهای بهینه در ارزیابی‌های دیگر عیب الیاف خشک مواد مرکب شیشه پی‌وی‌سی به کار گرفته شود.

از نتایج به دست آمده می‌توان اطلاعاتی از ابعاد نقص به دست آورد. برای امکان تشخیص و اندازه‌گیری بهتر عیوب از فیلترهای آشکارساز لبه و ریخت‌شناسی توصیفی استفاده می‌شود. لبه به نقاطی از تصویر گفته می‌شود که در پیکسل‌های کنار یکدیگر دو مقدار فاصله زیادی از نظر ارزش عددی داشته باشند. الگوریتم‌های بسیاری برای شناسایی لبه در این تابع وجود دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به کنی، زروکراس¹، سوبل² و لوگ³ اشاره نمود.

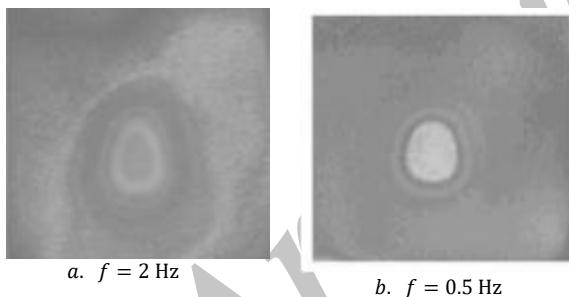


Fig. 7 Phase images taken at different f values a- 2 Hz, b- 0.5Hz

شکل 7 تصاویر فاز حاصل در فرکانس‌های a- 2 هرتز، b- 0.5 هرتز

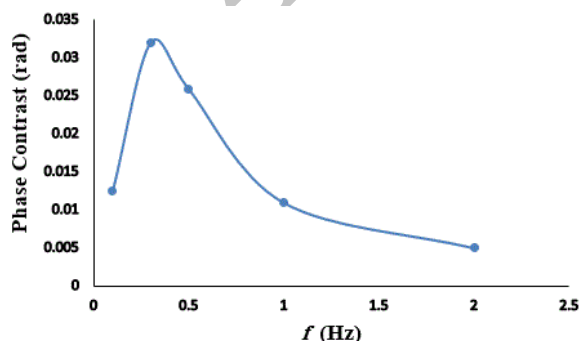


Fig. 8 Phase contrast with heating frequency on the sample with dry fiber defect

شکل 8 منحنی تباين فاز و فرکانس تحریک نمونه با نقص الیاف خشک

در آن A_0 ، A ، t_0 و ω_1 و ω_2 ثابت‌های تعریف‌شده کاربر است. برای اعمال بار حرارتی موردنظر این ضرایب محاسبه و اعمال می‌گردند.

4- نتایج و بحث

4-1- 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.

تأثیر انتخاب نوع المان بر دقت نتایج تحلیل نیز می‌تواند اثرگذار 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 آن‌هاست. 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 [24]. شکل 6 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 نمونه با عیب جدایش بین لایه‌های 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.

4-2- نتایج حاصل از ارزیابی تجربی و عددی

تحلیل تجربی و اجزای محدود برای دوره‌های تحریک در محدوده فرکانسی 5 تا 0.1 هرتز انجام می‌شود. در طول تحریک تصاویر حرارتی با مختصات x و y ذخیره و هر پیکسل یک مقدار دما را نشان می‌دهد. برای ارزیابی توزیع دمای سطح و عملکرد حرارت‌نگاری مدوله‌شده نتایج حاصل از آزمون‌های صورت گرفته بر هر یک از نمونه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

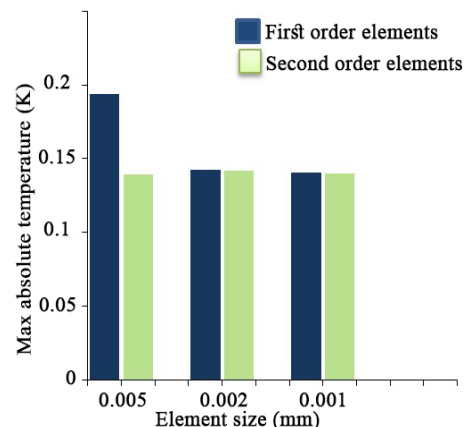


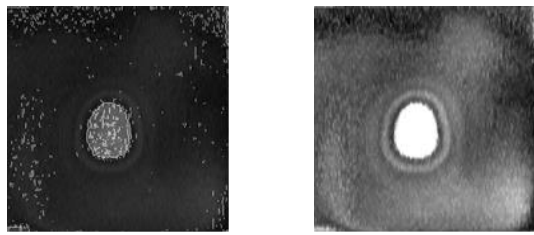
Fig. 6 Maximum temperature difference for the size of first and second order elements

شکل 6 حداکثر اختلاف دمایی برای اندازه المان‌های مرتبه اول و دوم

¹ Zerocross

² Sobel

³ Log



a. edge detection filter

b. morphological attribute

Fig. 10 Phase image by applying a- the edge detection filter, b- the morphological attribute profile

شکل 10 تصویر فاز با اعمال الف- فیلتر آشکارساز لبه، ب- فیلتر ریخت‌شناسی توصیفی

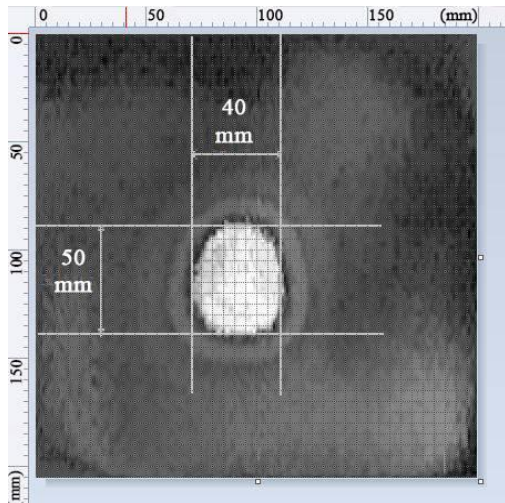


Fig. 11 Phase image at 0.3 Hz frequency with the edge detection filter and the morphological attribute profile and axes scales

شکل 11 تصویر فاز در فرکانس 0.3 هرتز و اعمال فیلترهای آشکارساز لبه و ریخت‌شناسایی توصیفی با مقیاس محورها

تصویر در راستای y اندازه 50 میلی‌متر و در راستای x، 40 میلی‌متر است که مطابق با ارزیابی عددی و اندازه واقعی است.

4-2-2- نمونه ماده مرکب با عیب جدایش بین لایه‌ای

تحلیل تجربی و اجزای محدود برای دوره‌های تحریک مختلف بر سطح جلویی نمونه انجام و تصاویر حرارتی ذخیره می‌شوند. برای مقایسه توزیع دمای سطح با متغیر اندازه عیوب، مقطع اندازه‌گیری A-A¹ در امتداد عیوب که در شکل 12-a نشان داده شده ایجاد گردید. تصویر حرارتی در فرکانس 0.5 هرتز و زمان 21.13 ثانیه برای تحلیل‌ها در نظر گرفته شد. از شکل 12-b مشاهده می‌شود که مقدار جریان حرارت بالا تفاوت دمایی بیشتری را در سطح عیوب ایجاد کرده و تباین حرارتی به تغییرات اندازه عیب وابسته و با اندازه نقص افزایش می‌یابد. از مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اجزای محدود نیز مشخص شد که اگرچه روند مشابهی دارند اما دمای به‌دست‌آمده از آزمایش‌های تجربی به دلیل ساختار غیریکنواخت کمی متفاوت از اجزای محدود است. تطابق تصاویر فاز و دامنه حرارتی به دست آمده از حرارت‌نگاری مدوله‌شده بررسی تجربی و اجزای محدود در فرکانس 0.5 هرتز در شکل 13 آورده شده است.

ضریب نفوذ حرارتی در نمونه مورد بررسی 0.00602 سانتی‌متر مربع بر ثانیه [27] و اولین فرکانس که نقص تشخیص داده می‌شود 2 هرتز است. به کمک رابطه (3) مقدار عمق 0.56 میلی‌متر حاصل می‌شود که این عمق عملاً با محل نقص هم‌خوانی دارد.

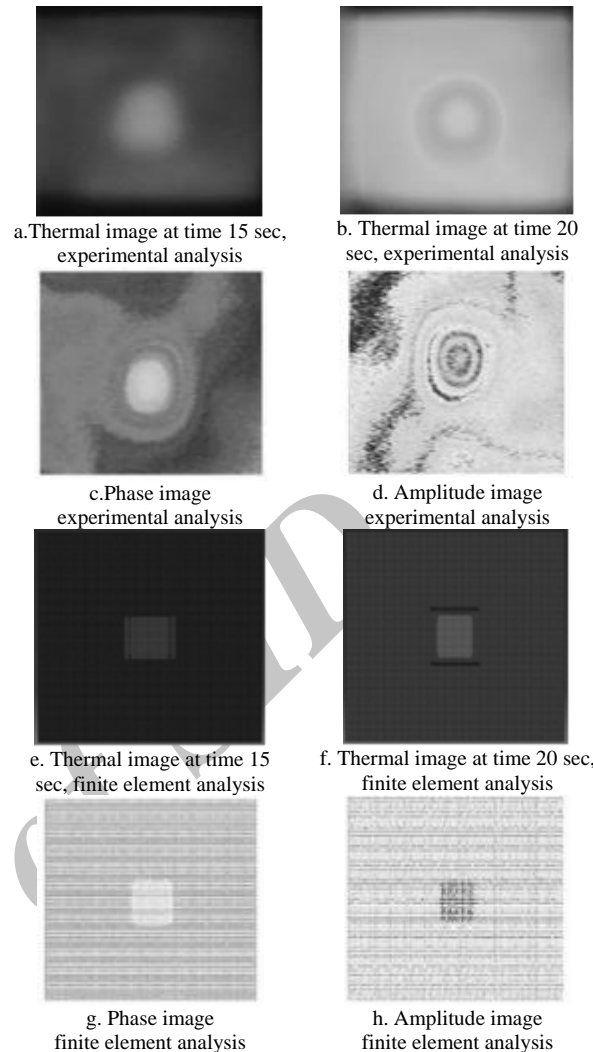


Fig. 9 Thermal, Amplitude and Phase image at the frequency of 0.3 Hz, experimental and finite element analysis on the sample with dry fiber defect

شکل 9 تصاویر حرارتی، دامنه و فاز در فرکانس 0.3 هرتز تحلیل‌های تجربی و اجزای محدود نمونه با نقص الیاف خشک

ریخت‌شناسی یک نظریه و تکنیک آنالیز و پردازش ساختارهای هندسی بر پایه نظریه مجموعه‌ها و توابع تصادفی است که بر تصاویر دیجیتالی صورت می‌گیرد [26]. برای اعمال این توابع در پردازش تصاویر حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله‌شده از محیط برنامه‌نویسی متلب¹ استفاده می‌شود. برنامه تصاویر فاز حرارت‌نگاری را به عنوان ورودی دریافت و عملیات بهبود تصویر بر آن‌ها انجام می‌دهد. این فیلترها موجب برجسته نمودن لبه و استخراج عیوب در تصویر می‌گردد. چنانچه در شکل 10-a نشان داده شده است اضافه نمودن فیلتر آشکارساز لبه موجب بهبود لبه تصویر فاز شده و مرز نقص به خوبی قابل تشخیص است. شکل 10-b نیز اعمال فیلتر ریخت‌شناسی توصیفی را نشان می‌دهد که نقص به وضوح استخراج شده است.

تصویر فاز ایجادشده در فرکانس 0.3 با اعمال فیلتر ریخت‌شناسی و آشکارساز لبه به همراه معیار اندازه‌گیری متناسب با ابعاد واقعی نمونه بر تصویر به منظور فراهم آوردن امکان اندازه‌گیری دقیق نقص در شکل 11 آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن قسمت روشن

¹ Matlab

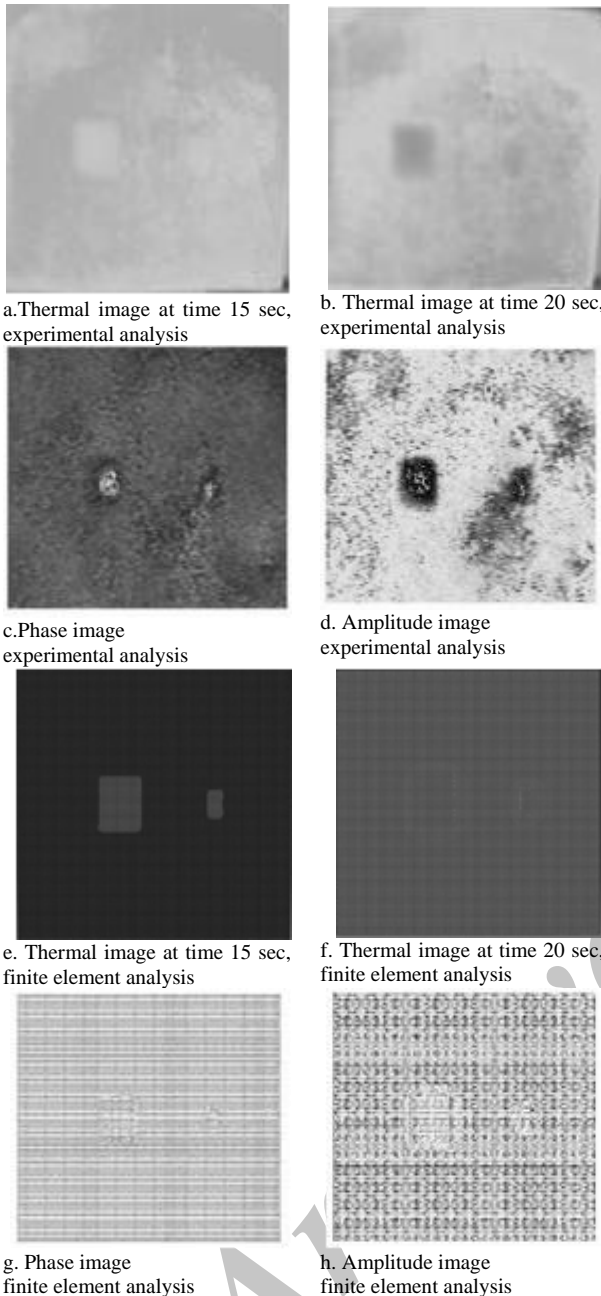
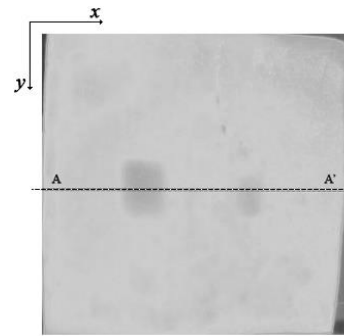


Fig. 13 Thermal, Amplitude and Phase Image at frequency of 0.5 Hz, experimental and finite element analysis on the sample with delamination defect

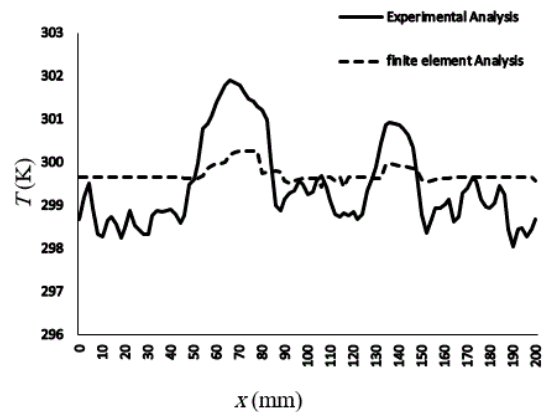
شکل 13 تصاویر حرارتی، دامنه و فاز در فرکانس 0.5 هرتز تحلیل‌های تجربی و اجزای محدود برای نمونه با عیب جدایش بین لایه‌های

تصاویر فاز و دامنه حرارتی به دست آمده از حرارت‌نگاری مدوله‌شده از بررسی تجربی و اجزای محدود در فرکانس 0.5 هرتز در شکل 16 آورده شده است. در مقایسه با نتایج اجزای محدود تحلیل تجربی که با نویز سازه و تجهیزات همراه است عیوب را مشابه و با تباین کمتر نشان می‌دهد.

ضریب نفوذ حرارتی در نمونه مورد بررسی 0.00602 سانتی‌متر مربع بر ثانیه و اولین فرکانس که نقص تشخیص داده می‌شود، 2 هرتز است. به کمک رابطه (3) مقدار عمق 0.56 میلی‌متر حاصل می‌شود که این عمق با محل نقص مطابقت دارد. ابعاد قسمت معیوب در سطح فوقانی به علت رسانش حرارتی در داخل صفحه بزرگ‌تر از اندازه نقص است. این موضوع در شکل 17



a. Thermal image at time 21.13 sec



b. Temperature distribution profile

Fig. 12 Temperature distribution, a- Thermal Image at frequency of 0.5 Hz and time 21.13 sec b- Temperature distribution profile along the line A-A'

شکل 12 توزیع دمایی، الف- تصویر حرارتی در فرکانس 0.5 هرتز و زمان 21.13 ثانیه، ب- پروفیل توزیع دمایی در امتداد خط A-A'

برای برجسته نمودن لبه و استخراج ساختار عیوب از فیلتر آشکارساز لبه و ریخت‌شناسی توصیفی استفاده نموده و چنانچه در شکل 14 نشان داده شده است با خطوط معیار برای اندازه‌گیری عیوب مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود یافتن مرز بین منطقه سالم و معیوب کمی مشکل بوده و در واقع قسمت‌های کناری توسط الیاف پوشیده شده است. با اندازه‌گیری قسمت متباین در راستای y اندازه عیب بزرگ‌تر 40 میلی‌متر و در راستای x 30 میلی‌متر و عیب کوچک‌تر در راستای y 20 میلی‌متر و در راستای x 10 میلی‌متر است که نسبتاً مطابق با نتایج تحلیل عددی و اندازه واقعی است.

4-2-3- نمونه ماده مرکب با عیب نفوذ مواد ناخواسته

تحلیل تجربی و اجزای محدود برای دوره‌های تحریک مختلف بر نمونه با عیب نفوذ مواد ناخواسته انجام و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. مقطع اندازه‌گیری A-A' در امتداد عیوب که در شکل 15-a نشان داده شده برای مقایسه توزیع دمای سطح بین متغیر جنس عیوب ایجاد گردید. تصویر حرارتی در فرکانس 0.5 هرتز و زمان 15.10 ثانیه برای تحلیل‌ها در نظر گرفته شد. از شکل 15-b مشاهده می‌شود که جنس عیوب عامل ایجاد تغییرات توزیع دمایی در سطح نمونه می‌گردد. با شناسایی عیوب می‌توان دریافت قسمت روشن‌تر بیانگر نقصی با انتقال حرارت بیشتر و قسمت تیره‌تر بیانگر وجود نقصی با انتقال حرارت کمتر نسبت به ماده زمینه است. از نتایج تحلیل تجربی و شبیه‌سازی مشاهده می‌شود چنانچه عیب دارای ضریب انتقال حرارت کم باشد عیب به دلیل اندک بودن هدایت حرارتی ماده زمینه به شکل مناسب قابل تشخیص نیست.

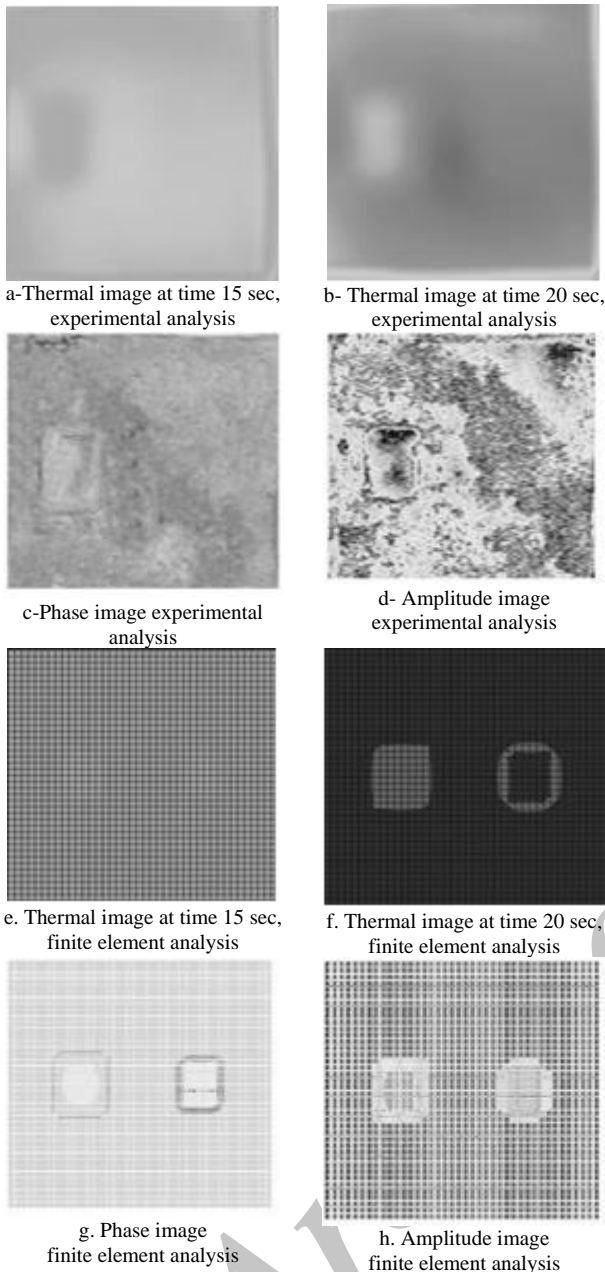


Fig. 16 Thermal, Amplitude and Phase Image at frequency 0.5 Hz, experimental and finite element analysis on the sample with inclusions defect

شکل 16 تصاویر حرارتی، دامنه و فاز در فرکانس 0.5 هرتز تحلیل‌های تجربی و اجزای محدود برای نمونه با عیب نفوذ مواد ناخواسته

موضوع دیگری که در تعیین ابعادی عیب نفوذ مواد ناخواسته باید در نظر گرفته شود تغییر ضریب هدایت حرارتی داخل صفحه‌ای در جنس‌های مختلف و نیز در راستای مختلف مواد مرکب است. ماده مرکب در راستای الیاف هدایت حرارتی کمتر از راستای دیگر در داخل صفحه است؛ بنابراین طول ناحیه دارای افزایش درجه حرارت در راستای الیاف کمتر است. پس برای تعیین ابعاد دقیق عیوب مواد ناخواسته بررسی اثر انتشار حرارتی داخل صفحه ضروری است. همان‌طور که در شکل 17 مشاهده می‌شود برای اندازه‌گیری اندازه نقص نفوذ ماده ناخواسته کاغذ نسوز تنها مرز پایین نقص قابل تشخیص و نقص فلزی با اندازه‌گیری قسمت متباین در راستای y اندازه عیب 50 میلی‌متر و در راستای x 40 میلی‌متر حاصل می‌شود که مطابقت

برای عیب نفوذ ماده ناخواسته از جنس کاغذ نسوز نشان داده شده است به طوری که عیبی که انتقال حرارت پایین‌تری نسبت به ماده زمینه دارد افزایش ابعاد بیشتری می‌یابد، زیرا زمان بیشتری برای انتقال شار حرارتی از سطح ورق تا عیب و برگشت آن به سطح وجود دارد و انتقال حرارت داخل صفحه بیشتری در این مدت زمان انجام می‌شود.

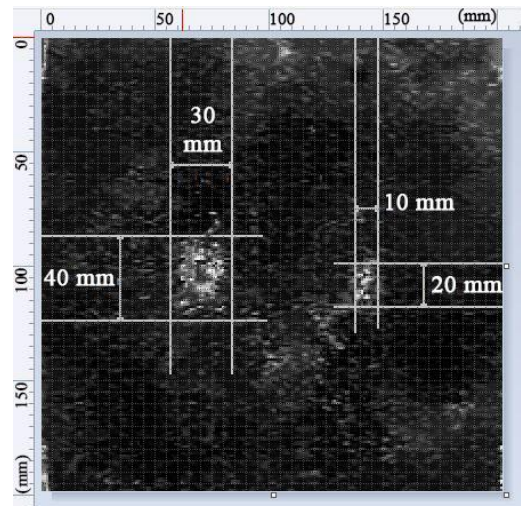
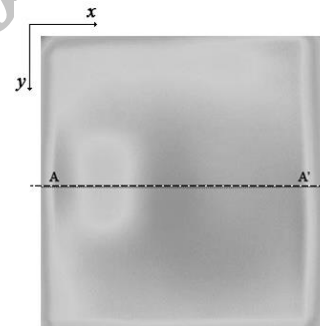
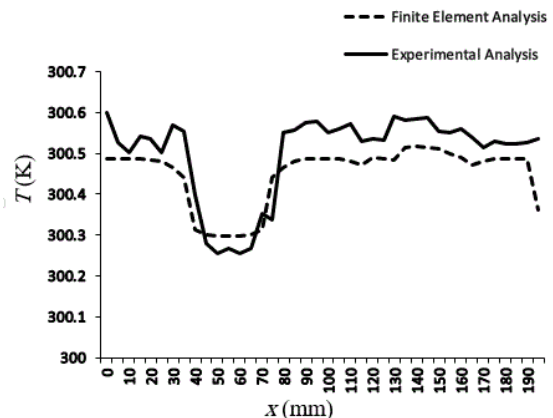


Fig. 14 Phase image at 0.5 Hz frequency with the edge detection filter and the morphological attribute profile and axes scales

شکل 14 تصویر فاز در فرکانس 0.5 هرتز و اعمال فیلترهای آشکارساز لبه و ریخت شناسایی توصیفی با مقیاس محورها



a. Thermal image at time 15.10 sec



b. Temperature distribution profile

Fig. 15 Temperature distribution, a- Thermal image at frequency 0.5 Hz and time 15.10 sec b- Temperature distribution profile along the line A-A'

شکل 15 توزیع دمایی، الف- تصویر حرارتی در فرکانس 0.5 هرتز و زمان 15.10 ثانیه، ب- پروفیل توزیع دمایی در امتداد خط A-A'

- [2] H. A. Thajeel, *Numerical Modeling of Infrared Thermography Techniques via ANSYS*, Missouri University of Science and Technology, 2014.
- [3] C. Ibarra-Castanedo, M. Genest, S. Guibert, J. M. Piau, X. P. Maldague, A. Bendada, Inspection of aerospace materials by pulsed thermography, lock-in thermography and vibrothermography: A comparative study, *Proceedings of The SPIE Conference*, Canada, June 16-24, 2007.
- [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] 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.
- [6] G. Busse, Optoacoustic phase angle measurement for probing a metal, *Applied Physics Letters*, Vol. 35, No. 10, pp. 759-760, 1979.
- [7] C. Meola, G. M. Carlomagno, L. Giorleo, Geometrical limitations to detection of defects in composites by means of infrared thermography, *Nondestructive Evaluation*, Vol. 23, No. 4, pp. 125-132, 2004.
- [8] M. Choi, K. Kang, J. Park, W. Kim, K. Kim, Quantitative determination of a subsurface defect of reference specimen by lock-in infrared thermography, *Ndt & E International*, Vol. 41, No. 2, pp. 119-124, 2008.
- [9] C. Meola, G. M. Carlomagno, A. Squillace, A. Vitiello, Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 13, No. 3, pp. 380-388, 2006.
- [10] B. Lahiri, S. Bagavathiappan, P. Reshmi, J. Philip, T. Jayakumar, B. Raj, Quantification of defects in composites and rubber materials using active thermography, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 55, No. 2, pp. 191-199, 2012.
- [11] 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, No.1, pp. 26-32, 2015.
- [12] H. O. Ajmal, A. Crocombe, M. R. Gower, D. Jesson, S. Ogin, A comparison of the use of 3D DIC and thermography in determining the size and growth of delaminations in woven GFRP epoxy laminates, *Proceedings of The 21th International Conference on Composite Materials*, Xi'an, China, August 20-25, 2017.
- [13] Z. Liu, M. Genest, D. Kryszewski, Processing thermography images for pitting corrosion quantification on small diameter ductile iron pipe, *NDT & E International*, Vol. 47, No. 1, pp. 105-115, 2012.
- [14] R. Montanini, F. Freni, Non-destructive evaluation of thick glass fiber-reinforced composites by means of optically excited lock-in thermography, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 11, pp. 2075-2082, 2012.
- [15] C. Meola, G. M. Carlomagno, A. Squillace, G. Giorleo, Non-destructive control of industrial materials by means of lock-in thermography, *Measurement Science and Technology*, Vol. 13, No. 10, pp. 1583, 2002.
- [16] 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.
- [17] M. Lizaranzu, A. Lario, A. Chiminelli, I. Amenabar, Non-destructive testing of composite materials by means of active thermography-based tools, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 71, No. 7, pp. 113-120, 2015.
- [18] D. Bates, G. Smith, D. Lu, J. Hewitt, Rapid thermal non-destructive testing of aircraft components, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 31, No. 3, pp. 175-185, 2000.
- [19] S. Ranjit, K. Kang, W. Kim, Investigation of lock-in infrared thermography for evaluation of subsurface defects size and depth, *Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 16, No. 11, pp. 2255-2264, 2015.
- [20] J. Schuster, D. Heider, K. Sharp, M. Glowania, Thermal conductivities of three-dimensionally woven fabric composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 9, pp. 2085-2091, 2008.
- [21] J. Holman, *Heat Transfer*, pp. 327-350, McGraw-Hill series in mechanical engineering, 2009.
- [22] B. Yang, Y. Huang, L. Cheng, Defect detection and evaluation of ultrasonic infrared thermography for aerospace CFRP composites, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 60, No. 1, pp. 166-173, 2013.
- [23] 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.
- [24] *Abaqus Analysis User's Guide*, Accessed on 20 July 2015; <http://abaqus.software.polimi.it/v6.14/index.html>.
- [25] C. Meola, G. M. Carlomagno, Recent advances in the use of infrared thermography, *Measurement Science and Technology*, Vol. 15, No. 9, pp. R27, 2004.
- [26] E. J. Breen, R. Jones, Attribute openings, thinnings, and granulometries, *Computer Vision and Image Understanding*, Vol. 64, No. 3, pp. 377-389, 1996.
- [27] C. Meola, C. Toscano, Flash thermography to evaluate porosity in carbon fiber reinforced polymer (CFRPs), *Materials*, Vol. 7, No. 3, pp. 1483-1501, 2014.

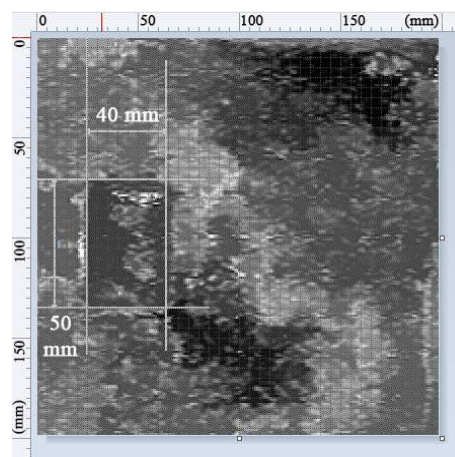


Fig. 17 Phase image at 0.5 Hz frequency with the edge detection filter and the morphological attribute profile and axes scales

شکل 17 تصویر فاز در فرکانس 0.5 هرتز و اعمال فیلترهای آشکارساز لبه و ریخت‌شناسایی توصیفی با مقیاس محورها خوبی با تحلیل عددی و اندازه واقعی دارد.

5- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این مقاله استفاده از حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله شده و الگوی پردازش تصویر در ارزیابی کمی نقص‌های زیر سطحی در سازه‌های مواد مرکب را بررسی می‌نماید. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله شده روشی قابل اعتماد در شناسایی عیوب بوده و می‌توان با تحلیل تصاویر حرارتی موقعیت و ابعاد نواحی معیوب را در مواد مرکب شناسایی نمود. با پردازش تصویر و اعمال فیلترهای آشکارساز لبه و ریخت‌شناسایی توصیفی به منظور استخراج قسمت متباین تصویر، اندازه نقص در نمونه با نقص جدایش بین لایه‌های 10-20 میلی‌متر و در نمونه‌های با نقص الیاف خشک و نفوذ مواد ناخواسته 40-50 میلی‌متر حاصل می‌شود که با اندازه واقعی مطابقت نسبتاً خوبی دارد.

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 تحریک و غیره دارد؛ بنابراین مشخص است که توسعه الگو با در نظر گرفتن متغیرهای آزمون به بهبود کارایی حرارت‌نگاری مدوله شده برای اندازه‌گیری عیب کمک می‌کند.

تحلیل اجزای محدود با داده‌های تجربی در توزیع حرارت سطحی و تشخیص موقعیت و ابعاد نقص مطابقت داشته و قابلیت یافتن متغیرهای بهینه در بررسی عیوب مواد مرکب زمینه پلیمری را دارد. علاوه بر این مقایسه نتایج تجربی و عددی نشان می‌دهد که تشخیص عیوب در بررسی تجربی با نوبز سازه و تجهیزات محدود شده است. نوبز ساختاری بستگی به ویژگی مواد و شرایط مرزی داشته و حذف آن دشوار است. نوبز آشکارساز می‌تواند با استفاده از دوربین‌های حرارت‌نگاری با حساسیت و وضوح بالا کاهش یابد.

6- مراجع

- [1] C. Boller, W. Staszewski, G. R. Tomlinson, *Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing*, pp. 15-35, J. Wiley, 2004.