

بررسی تجربی و اجزای محدود در عیب‌یابی لوله‌های کامپوزیتی زمینه پلیمری با استفاده از آزمون غیرمخرب حرارت‌نگاری مادون‌قرمز

کریم جمالی

یوسف مظاهری*

مهدی کریمی زارچی

یونس مظاهری

محمد رضا حاتمی

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، همدان، ایران

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران

چکیده

در این مقاله به ارزیابی حرارت‌نگاری مادون‌قرمز در شناسایی عیوب زیرسطحی لوله‌های مواد مرکب زمینه پلیمری ساخته شده به روش رشته پیچی، پرداخته شد. در این روش به منظور تحریک نمونه، شار گرمایی به سطح قطعه، اعمال شده و با پردازش پاسخ حرارتی عیوب شناسایی شدند. بررسی تجربی به وسیله تحریک هوای گرم و تحریک نوری پالس و مدوله شده بر روی نمونه‌های ساخته شده با نقص‌های کنترل شده 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 ۴ میلی‌متر نقص الیاف خشک با حداقل اندازه ۳۰×۴۰ میلی‌متر و نقص‌های جدایش بین لایه‌های و نفوذ مواد ناخواسته با حداقل اندازه ۲۵×۲۵ میلی‌متر به‌وضوح قابل شناسایی و اندازه‌گیری بودند. ارزیابی الگوی تحریک نشان داد که در نمونه‌های مورد بررسی با توجه به نوع ساختار استوانه‌ای و امکان اعمال سیال حرارتی به درون آن، روش تحریک هوای گرم به وسیله دمنده روشی قابل اعتماد بود و نتایج مطمئنی را ارائه داد.

واژه‌های کلیدی: آزمون غیرمخرب، حرارت‌نگاری مادون‌قرمز، لوله‌های کامپوزیتی.

Experimental and Finite Element Investigation in Defect Detecting of Polymer Matrix Composite Pipes by Non-Destructive Infrared Thermography Test

K. Jamali

Y. Mazaheri

M. Karimi Zarchi

Y. Mazaheri

M. R. Hatami

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

Department of Materials Engineering, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Department of Materials Engineering, University of Shiraz, Shiraz, Iran

Department of Materials Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Department of Materials Engineering, University of Shiraz, Shiraz, Iran

Abstract

In this paper, the evaluation of infrared thermography has been done to detect subsurface defects of polymer composite pipes made by filament winding method. In this method, in order to stimulate the test specimen, the heat flux is applied over the surface of the specimen and the thermal response is processed to detect defects. Experimental investigation was applied by hot air, optical pulse, and modulated stimulation on specimens were 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 4 mm thickness dry fiber defect with a minimum size of 30×40 mm, delamination and inclusion defects with a minimum size of 25×25 mm clearly is detected and is measured. The evaluation of thermal stimulation techniques shows in the examined samples, according to the type of cylindrical structure and ability of applying thermal fluid to its internal side, the method of hot air stimulation by the blower is a reliable method and provides trusted results.

Keywords: Non-destructive test, Infrared thermography, Composites pipes.

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 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، بر اساس تابش امواج الکترومغناطیس از اجسام در دمای مختلف است که این تشعشع توسط دوربین حرارت‌نگاری دریافت

۱- مقدمه

لوله‌های مواد مرکب به دلیل مزایایی نظیر نسبت 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 [۱]. برای اطمینان از عملکرد صحیح سازه دسترسی به آزمون غیرمخربی لازم است که قادر به

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: y.mazaheri@basu.ac.ir

ساخته شده به روش رشته پیچی^۳ دارای عیوب زیر سطحی می‌باشد تا بتوان عملکرد آزمایش حرارت‌نگاری را در شناسایی موقعیت و ابعاد نقص‌های مختلف ارزیابی نمود. 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 نمود. برای این منظور لوله مواد مرکب از جنس شیشه اپوکسی^۴ دارای نقص‌های کنترل‌شده از نوع الیاف خشک^۵، جدایش بین لایه‌ای^۶ و نفوذ مواد ناخواسته^۷ برای تحلیل تجربی و اجزای محدود مورد استفاده قرار گرفت. با استفاده از برنامه کاربردی و عملیات پس پردازش تصاویر، کارایی حرارت‌نگاری مادون‌قرمز و نیز انواع روش‌های تحریک در شناسایی عیوب زیر سطحی لوله‌های مواد مرکب بررسی شد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- طراحی و ساخت نمونه

سه نمونه که هر یک شامل عیوب کنترل‌شده رایج در مواد مرکب می‌باشند طراحی و ایجاد گردید. لوله‌های مواد مرکب با استفاده از تقویت‌کننده‌های الیاف شیشه، رزین گرما سخت و دیگر افزودنی‌ها ساخته شد. پس از آماده شدن نمونه برای کاهش بازتاب تشعشع با رنگ سیاه مات پوشش داده شدند.

۲-۱-۱- نمونه ماده مرکب با عیب الیاف خشک

نمونه لوله ماده مرکب با عیب الیاف خشک، با استفاده از خوردگی حاصل از اعمال سولفوریک اسید در قسمت داخلی لوله ایجاد گردید. عیب الیاف خشک نقصی اساسی در مواد مرکب با رزین مایع می‌باشد. ضخامت نمونه ۴ میلی‌متر و لوله به طول ۱۷۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۱۰۰ میلی‌متر بود که الیاف خشک در ناحیه‌ای با ابعاد ۳۰×۴۰ میلی‌متر ایجاد گردید. شکل ۱ نمونه طراحی شده و ساخته شده برای بررسی عیب الیاف خشک را نشان می‌دهد.

۲-۱-۲- نمونه ماده مرکب با عیب جدایش بین لایه‌ای

نمونه با عیب جدایش بین لایه‌ای عموماً در آزمایش‌ها با برش ناحیه‌ای و قرار دادن فیلم تفلون در آن ایجاد می‌گردد [۱۲]. ضخامت نمونه ۴ میلی‌متر و لوله به طول ۱۷۰ میلی‌متر و قطر داخلی ۱۰۰ میلی‌متر بود که تراش نمونه از داخل لوله و در ابعاد ۲۵×۲۵ میلی‌متر و با عمق‌های مختلف ۱، ۲ و ۳ میلی‌متر ایجاد گردید. شکل ۲ نمونه طراحی شده و ساخته شده برای بررسی عیب جدایش بین لایه‌ای را نشان می‌دهد.

و توسط پردازنده تحلیل می‌شود [۲].

حرارت‌نگاری مادون‌قرمز بر پایه تغییر رسانایی گرمایی یک ماده به طور موضعی به سبب حضور عیوب است. اگر نمونه شامل عیوب در معرض یک منبع گرمایی یکسان در سطح باشد، جریان گرما از طریق مواد انتشار می‌یابد و هر زمان که این امواج حرارتی به ناپوستگی^۱ مانند عیوب زیرسطحی یا ناهمگنی^۲ برسند، نقص‌ها به‌عنوان مانع حرارتی عمل کرده و موجب ایجاد الگویی حرارتی متفاوت در سطح می‌گردد. پاسخ حرارتی از سطح نمونه در همان زمان با استفاده از دوربین مادون‌قرمز ثبت و با پردازش تصاویر اطلاعات نقص استخراج می‌شوند [۳].

مطالعات گسترده‌ای در زمینه استفاده از حرارت‌نگاری مادون‌قرمز در عیب‌یابی صورت گرفته است. پاستزاک [۴] به وسیله حرارت‌نگاری مادون‌قرمز فعال به بررسی مواد مرکب دارای انحنا با عیب جدایش بین لایه‌ای و نیز تخریب حاصل از بارگذاری پرداخته و موقعیت نقص و اثر جدایش بین لایه‌ای در رشد نقص در بارگذاری را بررسی نمود. مبروکی و همکاران [۵] 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 ۳ میلی‌متر و در عمق ۰/۶ میلی‌متر و عیوب تا ابعاد ۱۰ میلی‌متر در عمق ۱/۶۵ میلی‌متر یافت. مثولا و همکاران [۶] اثرات اندازه، عمق و ضخامت نقص را در ورق‌های مواد مرکب با استفاده از حرارت‌نگاری مدوله‌شده بررسی کردند. چوی [۷] اندازه و محل نقص‌های زیرسطحی را با استفاده از حرارت‌نگاری مادون‌قرمز مدوله‌شده ارزیابی کرد و نشان داد که تفاوت فاز بین منطقه سالم و معیوب موقعیت مکانی و اندازه نقص را نشان می‌دهد. مثولا و همکاران [۸] با استفاده از حرارت‌نگاری مادون‌قرمز، عیوب با قطرهای معادل مختلف در ماده مرکب با الیاف کربن را در فرکانس‌های مختلف با استفاده از مطالعه آزمایشگاهی شناسایی کردند. لاهیری و همکاران [۹] با استفاده از حرارت‌نگاری مادون‌قرمز 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، اختلاف‌فاز بین موج تحریک و پاسخ حرارتی افزایش می‌یابد در حالی که اختلاف دما کاهش پیدا می‌کند. ژنگ و همکاران [۱۰] 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 به‌وضوح مشاهده نمودند. لیو و همکاران [۱۱] برای تعیین مقدار خوردگی لوله از حرارت‌نگاری مادون‌قرمز استفاده نمودند. آن‌ها یک روش پردازش تصویر برای استخراج اطلاعات خوردگی از دنباله تصاویر حرارتی تولیدشده که انعکاس روند انتشار گرما در دیواره لوله می‌باشد را ارائه دادند.

هدف از این تحقیق، بررسی تجربی و اجزای محدود حرارت‌نگاری مادون‌قرمز به وسیله تحریک هوای گرم و نوری در لوله‌های مواد مرکب

³ Filament Winding

⁴ Epoxy

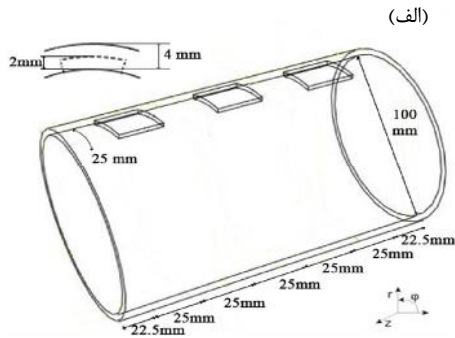
⁵ Dry fiber

⁶ Delamination

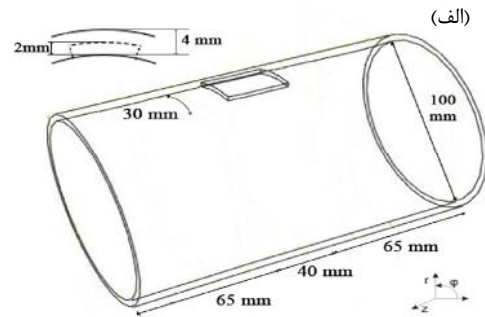
⁷ Inclusions

¹ Discontinuity

² Non-homogeneity



شکل ۳- (الف) مدل طراحی شده و (ب) نمونه ماده مرکب ساخته شده با عیب نفوذ مواد ناخواسته



شکل ۱- (الف) مدل طراحی شده و (ب) نمونه ماده مرکب ساخته شده با عیب الیاف خشک

۲-۲- ارزیابی تجربی

آزمایش تجربی با استفاده از تحریک حرارتی نوری سطح لوله به صورت انعکاسی و هوای گرم داخل لوله به صورت عبوری به منظور بر هم زدن تعادل حرارتی انجام شد. منبع تحریک حرارتی نوری شامل دو لامپ هالوژن ۱۰۰۰ وات بود که به وسیله مولد تابع^۱ با قابلیت برنامه-نویسی راهاندازی می‌شد. تحریک حرارتی هوای گرم در بررسی لوله‌ها و قطعات دارای منفذهای غیر قابل دسترس نظیر پره توربین کاربرد دارد. در این روش سیال گرم به وسیله دمنده به درون لوله روانه می‌شود. دوربین حرارت‌نگاری مورد استفاده اینفرک^۲ R300sR بوده که مجهز به آشکارساز^۳ مایکروبولو^۴ و با گستره کاری ۸ تا ۱۴ میکرومتر می‌باشد. وضوح دوربین ۶۴۰×۴۸۰ پیکسل و اندازه پیکسل ۲۵×۲۵ میکرومتر است. در حین آزمایش تصاویر حرارتی با نرخ فریم ۸ نمایش و ثبت می‌شود. شکل ۴ نمایی کلی از چیدمان تجهیزات مورد استفاده در آزمایش‌های تجربی را نشان می‌دهد.

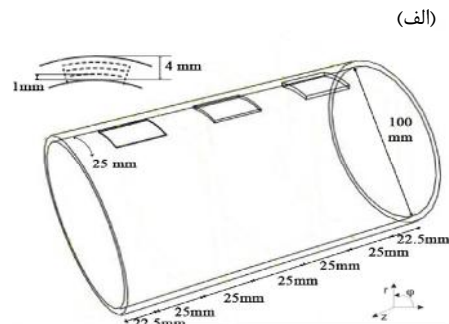
برای ارزیابی غیرمخرب قابل‌اعتماد، دانستن پخشندگی گرمایی، ضخامت ماده تحت بررسی و فرکانس موج تحریک ضروری است. یکی از مشکلات اصلی حرارت‌نگاری مدوله‌شده این است که فرکانس‌های تحریک بر تشخیص نقص اثر می‌گذارد. اگر فرکانس تحریک اشتباه انتخاب شود نقص ممکن است از دست برود. برای برطرف کردن این نقص، آزمون حرارت‌نگاری مدوله‌شده در فرکانس‌های مختلف صورت می‌گیرد. تقریباً هر فرکانس در محدوده ۰/۰۵ تا ۵ هرتز می‌تواند برای حرارت‌نگاری مدوله‌شده استفاده شود [۱۳].

¹ Function Generator

² Infrec

³ Detector

⁴ Microbolo



شکل ۲- (الف) مدل طراحی شده و (ب) نمونه ماده مرکب ساخته شده با عیب جدایش بین لایه‌ای

۳-۱-۲- نمونه ماده مرکب با عیب نفوذ مواد ناخواسته

نمونه با حضور مواد ناخواسته در ماده مرکب، با قرار دادن قطعاتی با رسانایی گرمایی متفاوت با ماده پایه در لایه‌های داخلی لوله ایجاد گردید. این قطعات از جنس فلز لحیم و پلیمر پلی یورتان با ضخامت‌های ۲ میلی‌متر در ابعاد ۲۵×۲۵ میلی‌متر، در عمق ۲ میلی متری از سطح نمونه به ضخامت ۴ میلی متر و طول ۱۷۰ میلی متر و قطر داخلی ۱۰۰ میلی متر قرار داده شد. شکل ۳ مدل طراحی شده و نمونه ساخته‌شده قطعه معیوب را نشان می‌دهد.

جدول ۱- خواص فیزیکی مواد [۱۶]

چگالی (kg/m^3)	گرمای ویژه ($J/kg K$)	رسانایی گرمایی ($W/m K$)	نوع ماده
۹۲۵۰	۱۸۰	۵۱	لحیم
۱۹۶۰	۸۴۰	۱/۲	شیشه اپوکسی
۲۵۵۰	۸۰۰	۱/۳۵	الیاف شیشه
۹۵۰	۱۰۰۰	۰/۵	پلی یورتان
۱/۲	۱۰۰۵	۰/۰۲	هوا



شکل ۴- چیدمان تجهیزات مورد استفاده در ارزیابی تجربی

بررسی تجربی و اجزای محدود در عبورهای کمپوزیتی ...

توان لامپها در طول تحریک ۶۸۰ وات یعنی ۳۴ درصد قدرت ۲ لامپ هالوژن ۱۰۰۰ وات می‌باشد [۱۷]. بنابراین معادله تحریک مدوله شده را می‌توان به صورت رابطه ۱ نوشت.

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

برای تعریف تحریک متناوب در نرم‌افزار آباکوس از داده مدوله شده^۲ استفاده می‌شود. در نرم‌افزار داده مدوله شده به صورت معادله ۲ تعریف می‌شود [۱۸].

$$a = A_0 + A \sin \omega_1(t - t_0) \sin \omega_2(t - t_0) \quad \text{for } t > t_0 \quad (2-f)$$

$$a = A_0 \quad \text{for } t \leq t_0 \quad (2-b)$$

که در آن A ، A_0 ، t_0 ، ω_1 و ω_2 ثابت‌های تعریف شده کاربر می‌باشد. لذا برای اعمال بار حرارتی موردنظر این ضرایب محاسبه و اعمال می‌گردند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تعیین اندازه المان در تحلیل عددی

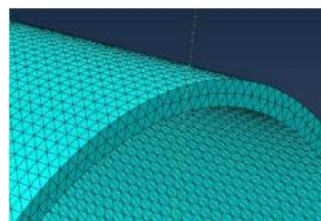
در بررسی عددی، اندازه المان یکی از عوامل مؤثر بر دقت شبیه‌سازی حرارت‌نگاری با استفاده از تحلیل اجزای محدود است و مقدار آن باید به اندازه کافی کوچک انتخاب شود تا توزیع دما در ابعاد عیب مشخص شود. برای این منظور حساسیت نتایج تحلیل در اندازه المان‌های مختلف بررسی می‌شود تا اندازه المان مناسب با توجه به حد مجاز خطای محاسباتی تعیین گردد. در این تحلیل، نتایج نشان دادند که اندازه المان ۰/۰۰۲ میلی متر مناسب بوده و تغییرات دمایی برای المان‌های کوچک‌تر از آن بسیار ناچیز است.

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 [۱۸]. شکل ۶ حداکثر اختلاف دمایی محاسبه شده در نقطه سالم و معیوب را با استفاده از المان‌های مرتبه اول و دوم با ابعاد ۰/۰۰۵، ۰/۰۰۲ و ۰/۰۰۱ میلی‌متر بر روی نمونه با عیب جدایش بین لایه‌های را پس از ۵ ثانیه تحریک نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج المان مرتبه اول و مرتبه

۳-۲- ارزیابی اجزای محدود

از آنجا که تحلیل مستقیم مسئله حرارتی زمان بر 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 حرارت-نگاری مدوله شده، معادله گرمای سه بعدی با استفاده از نرم‌افزار آباکوس^۱ انجام می‌شود. در مدل‌سازی اجزای محدود همان هندسه و عیوب مصنوعی مورد استفاده در بررسی تجربی در نظر گرفته می‌شود. شکل ۵ مدل شبکه بندی شده ارزیابی اجزای محدود مشخصات حرارتی مواد استفاده شده در مدل اجزای محدود حرارت‌نگاری نوری در جدول ۱ آورده شده است. مشخصات حرارتی شیشه اپوکسی وابسته به نسبت حجمی و جهت گیری الیاف می‌باشد. رسانایی گرمایی شیشه اپوکسی تا زمانی که شبیه سازی عددی رفتار حرارتی مشابه با بررسی تجربی نشان دهد به تدریج تغییر داده شد [۵] و در این ارزیابی مقدار ۱/۲ وات بر متر کلون انتخاب گردید که متناسب با رسانایی گرمایی محاسبه شده در مواد مرکب می‌باشد [۱۴].

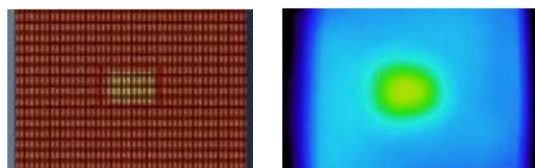
در شبیه سازی حرارت‌نگاری به وسیله تحریک نوری و هوای گرم مطابق با بررسی تجربی انجام می‌گیرد. از آنجا که در حرارت‌نگاری مدوله شده گرمای متناوب به سطح نمونه اعمال می‌شود، در شبیه سازی عددی سطح جلوی ورق ماده مرکب به مدت ۳۰ ثانیه به صورت متناوب تحریک می‌شود. تجزیه و تحلیل گسترده برای یافتن انتقال گرمای همرفت 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 ۱۰ وات بر مترمربع کلون تعیین می‌گردد [۱۵]. دمای سیال اطراف ورق با دمای اولیه آن برابر و مقدار آن ۲۹۸ کلون در نظر گرفته می‌شود.



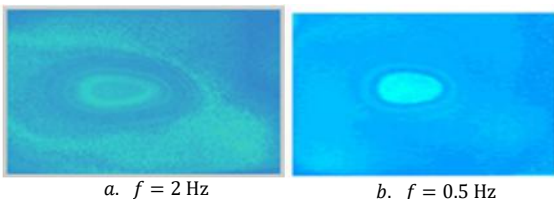
شکل ۵- مدل اجزای محدود شبکه بندی شده

² Modulated Data

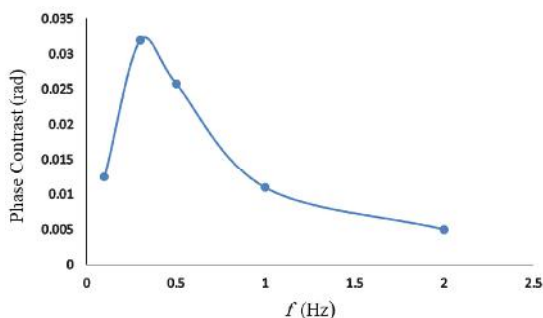
¹ Abaqus



شکل ۷- تصاویر حرارتی تحلیل‌های تجربی و اجزای محدود نقص الیاف خشک با تحریک نوری پالس



شکل ۸- تصاویر فاز حاصل در فرکانس‌های (a) 2 هرتز و (b) 0.5 هرتز



شکل ۹- منحنی تباین فاز و فرکانس تحریک

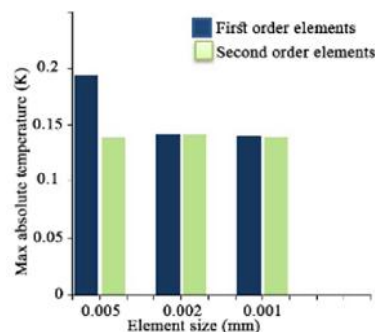
تصاویر حرارتی، فاز و دامنه به دست آمده از حرارت‌نگاری مدوله شده از بررسی تجربی و اجزای محدود در فرکانس ۰/۳ هرتز در شکل ۱۰ آورده شده است. مشاهده می‌شود که روش حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله شده روشی کارآمد در تشخیص عیوب بوده و نیز تحلیل اجزای محدود در تشخیص عیوب زیر سطحی با نتایج تجربی مطابقت دارد.

۳-۲-۱-ج- تحریک هوای گرم

در تحریک هوای گرم به وسیله دمنده درون لوله، ناحیه معیوب مقاومت کمتری برای عبور شار گرمایی در مقایسه با قسمت‌های سالم لوله وجود دارد، لذا تغییرات دمایی سطح رویی و در راستای ناحیه معیوب با سایر قسمت‌ها متفاوت است. شکل ۱۱ تغییرات دمایی روی سطح ورق را پس از گذشت ۲ ثانیه از گرما دهی اول نشان می‌دهد. دما در سطح ناحیه معیوب افزایش بیشتری یافته و نقص کاملاً شناسایی می‌گردد.

از نتایج به دست آمده می‌توان اطلاعاتی از ابعاد نقص به دست آورد. تصویر حرارتی حاصل از تحریک هوای گرم با معیار اندازه‌گیری متناسب با ابعاد واقعی نمونه بر روی تصویر به منظور فراهم آوردن امکان اندازه‌گیری دقیق نقص، در شکل ۱۲ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود با در نظر گرفتن قسمت متباین تصویر در راستای x اندازه ۴۰ میلی‌متر و در راستای y، ۳۰ میلی‌متر می‌باشد که مطابق با اندازه واقعی است.

دوم با اندازه المان یکسان ۰/۰۲ میلی‌متر انتخاب شده، اختلاف بسیار کمی دارند و استفاده از المان مرتبه دوم تأثیر ناچیزی در دقت نتایج دارد و زمان تحلیل را افزایش می‌دهد.



شکل ۶- حداکثر اختلاف دمایی برای اندازه المان‌های مرتبه اول و دوم

۳-۲-۲- نتایج حاصل از ارزیابی تجربی و عددی

تحلیل تجربی و اجزای محدود برای دوره‌های تحریک در محدوده فرکانسی ۵ تا ۰/۱ 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 مدوله شده، نتایج حاصل از آزمون‌های صورت گرفته بر روی هر یک از نمونه‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۳-۲-۱- نمونه ماده مرکب با عیب الیاف خشک

۳-۲-۱-الف- تحریک نوری پالس

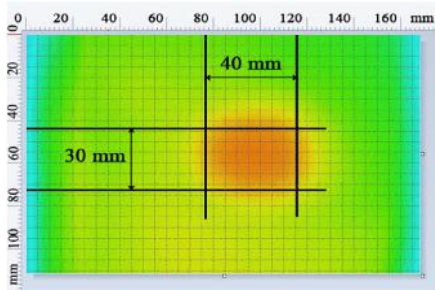
در ناحیه معیوب مقاومت بیشتری برای عبور شار گرمایی در مقایسه با قسمت‌های سالم ورق وجود دارد. در نتیجه تغییرات دمایی سطح خارجی لوله و در راستای ناحیه معیوب با سایر قسمت‌ها متفاوت است. برای شناسایی بهتر عیوب باید زمانی که حداکثر اختلاف دمایی روی سطح بین منطقه سالم و معیوب ایجاد می‌شود تغییرات توزیع دمایی بررسی شود تا عیوب به راحتی قابل شناسایی باشد.

شکل ۷ تغییرات دمایی روی سطح ورق را پس از گذشت ۰/۲۱ ثانیه از گرما دهی اول نشان می‌دهد. دما در سطح ناحیه معیوب افزایش بیشتری یافته و نقص با کیفیت مناسب شناسایی می‌گردد.

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 حرارت‌نگاری پالس لوله مواد مرکب دارای نقص الیاف خشک به کار گرفته شود.

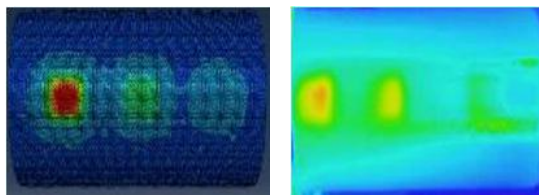
۳-۲-۱-ب- تحریک نوری مدوله شده

تصاویر فاز تحلیل تجربی در فرکانس‌های تحریک ۲ و ۰/۵ هرتز، در شکل ۸ آورده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود برای فرکانس ۲ هرتز نقص با تباین پایین و تنها کمی روشن‌تر از پس‌زمینه مشخص می‌باشد. در شکل ۹ نمودار تباین فاز نسبت به فرکانس تحریک نشان می‌دهد که تباین با کاهش فرکانس افزایش یافته و بیشترین آن در فرکانس ۰/۳ هرتز صورت می‌گیرد و در فرکانس‌های پایین‌تر از آن تشخیص عیب را با تباین کم ممکن می‌سازند.



شکل ۱۲- ارزیابی کمی نمونه دارای نقص الیاف خشک در تصویر حرارتی با مقیاس محورها

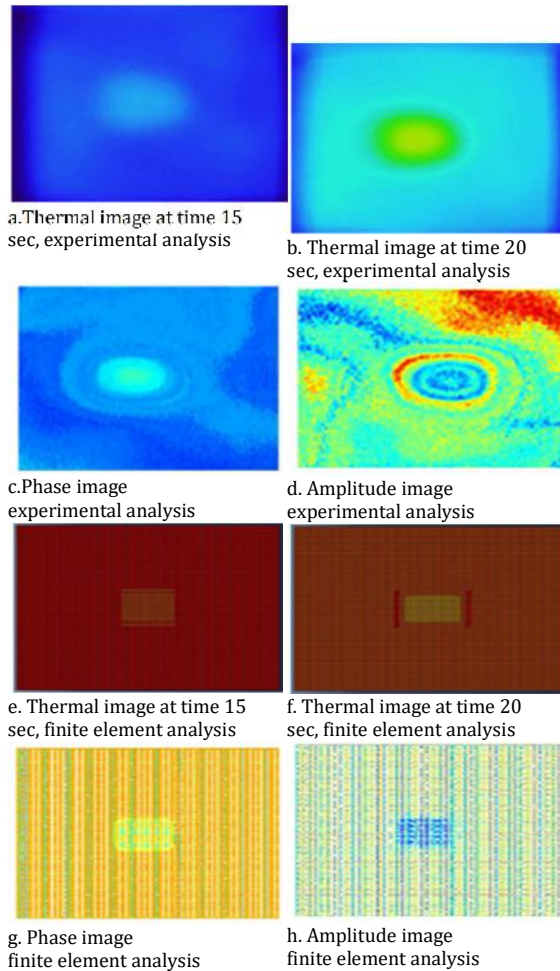
شکل ۱۳ تغییرات دمایی روی سطح ورق را پس از گذشت ۰/۳ ثانیه از گرما دهی اول نشان می‌دهد. دما در سطح ناحیه معیوب افزایش بیشتری یافته و نقص شناسایی می‌گردد. روش تحریک نوری پالس در مواردی که عیوب با عمق‌های مختلف در نمونه وجود دارد موجب می‌شود تا در زمان بسیار کوتاه پس از تحریک نقص‌های نزدیک به سطح آشکار شوند اما با گذشت زمان، نشر حرارت موجب پدیدار شدن عیوب عمیق‌تر شده و عیوب نزدیک به سطح تباین خود را از دست می‌دهند. بنابراین در بررسی نمونه‌های با عیوب در عمق‌های مختلف زمان مناسب برای مشاهده عیوب باید در نظر گرفته شود. برای مقایسه توزیع دمای سطح با متغیر عمق عیوب، مقطع اندازه‌گیری A-A' در امتداد عیوب که در شکل ۱۴ (a) نشان داده شده است، ایجاد گردید. تصویر حرارتی در زمان ۰/۳۷ ثانیه برای تحلیل‌ها در نظر گرفته شد. از شکل ۱۴ (b) مشاهده می‌شود که مقدار جریان گرمای بالا، تفاوت دمایی بیشتری را در سطح عیوب ایجاد کرده و تباین حرارتی به تغییرات عمق عیب وابسته و با افزایش عمق از سطح سالم، کاهش می‌یابد. از مقایسه نتایج شبیه‌سازی و اجزای محدود نیز مشخص شد که اگرچه روند مشابهی دارند اما دمای به دست آمده از آزمایش‌های تجربی کمی متفاوت از اجزای محدود است.



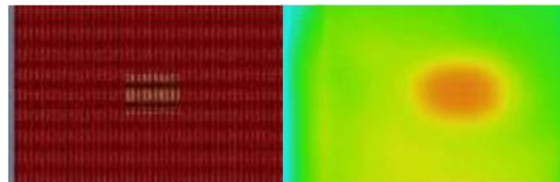
شکل ۱۳- تصاویر حرارتی تحلیل‌های تجربی و اجزای محدود جدایش بین لایه ای با تحریک نوری

۲-۲-۳-ب- تحریک نوری مدوله شده

تحلیل تجربی و اجزای محدود برای دوره‌های تحریک مختلف بر روی سطح رویی نمونه انجام و تصاویر حرارتی پردازش می‌شوند. تصاویر فاز و دامنه حرارتی به دست آمده از حرارت‌نگاری مدوله شده از بررسی تجربی و اجزای محدود در فرکانس ۰/۵ هرتز در شکل ۱۵ آورده شده است. تطابق نتایج تحلیل تجربی و اجزای محدود در تشخیص عیوب بیابگر قابلیت روش حرارت‌نگاری مادون قرمز مدوله شده می‌باشد.



شکل ۱۰- تصاویر حرارتی، دامنه و فاز در فرکانس ۰/۳ هرتز تحلیل‌های تجربی و اجزای محدود



شکل ۱۱- تصاویر حرارتی تحلیل‌های تجربی و اجزای محدود نقص الیاف خشک با تحریک هوای گرم

۲-۲-۳-۲- نمونه ماده مرکب با عیب جدایش بین لایه‌ای

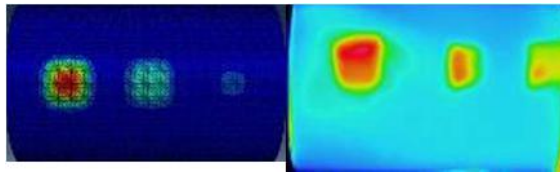
۲-۲-۳-الف- تحریک نوری پالس

در نمونه با نقص جدایش بین لایه ای نیز، ناحیه معیوب مقاومت بیشتری برای عبور شار گرمایی در مقایسه با قسمت‌های سالم ورق وجود دارد. در نتیجه تغییرات دمایی سطح رویی لوله و در راستای ناحیه معیوب با سایر قسمت‌ها بیشتر است.

۳-۲-۲-ج- تحریک هوای گرم

در تحریک هوای گرم به وسیله دمنده درون لوله، ناحیه معیوب مقاومت کمتری برای عبور شار گرمایی در مقایسه با قسمت‌های سالم لوله وجود دارد. در نتیجه تغییرات دمایی سطح رویی و در راستای ناحیه معیوب با سایر قسمت‌ها متفاوت است. عیب نزدیک سطح خارجی لوله به علت نشر حرارت سطحی بزرگتر و عیب با عمق بیشتر نسبت به سطح کوچکتر پدیدار می‌شود.

شکل ۱۶ تغییرات دمایی روی سطح ورق را پس از گذشت ۲ ثانیه از گرما دهی اول نشان می‌دهد. دما در سطح ناحیه معیوب افزایش بیشتری یافته و نقص شناسایی می‌گردد. در مقایسه با ارزیابی تجربی، مشاهده می‌شود که تحلیل اجزای محدود در تشخیص عیوب زیر سطحی همخوانی دارد.



a. Finite Element Analysis b. Experimental Analysis

شکل ۱۶- تصاویر حرارتی تحلیل‌های تجربی و اجزای محدود جدایش بین لایه ای با تحریک هوای گرم

برای مقایسه توزیع دمای سطح بین متغیر اندازه عمق عیوب، مقطع اندازه‌گیری A-A' در امتداد عیوب که در شکل ۱۷ (a) نشان داده شده است، ایجاد گردید.

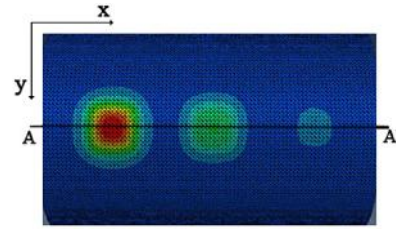
تصویر حرارتی در زمان ۳/۱۰ ثانیه برای تحلیل‌ها در نظر گرفته شد. از شکل ۱۷ (b) مشاهده می‌شود که عمق عیوب عامل ایجاد تغییرات توزیع دمایی در سطح نمونه می‌گردد. با شناسایی عیوب می‌توان دریافت قسمت با تغییر دمایی بیشتر بیانگر نقصی نزدیک به سطح و قسمت با تغییرات کمتر بیانگر وجود نقصی با عمق بیشتر می‌باشد.

برای ارزیابی اندازه عیوب، تصویر حرارتی با خطوط معیار اندازه‌گیری در شکل ۱۸ 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 عیوب، ۲۵ میلی‌متر و در راستای x، ۲۵ میلی‌متر می‌باشد با اندازه واقعی مطابقت نسبتاً خوبی دارد.

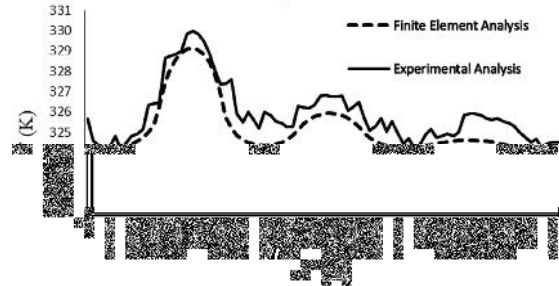
۳-۲-۳- نمونه ماده مرکب با عیب نفوذ مواد ناخواسته

۳-۲-۳-الف- تحریک نوری پالس

در ناحیه معیوب با نقص نفوذ مواد ناخواسته مقاومت متفاوتی برای عبور شار گرمایی در مقایسه با قسمت‌های سالم ورق وجود دارد. در نتیجه تغییرات دمایی سطح فوقانی و در راستای ناحیه معیوب با سایر قسمت‌ها متفاوت است. شکل ۱۹ تغییرات دمایی روی سطح ورق را پس از گذشت ۰/۰۳ ثانیه از گرما دهی نشان می‌دهد. دما در سطح ناحیه معیوب نسبت به ناحیه سالم تغییر یافته و نقص شناسایی می‌گردد.

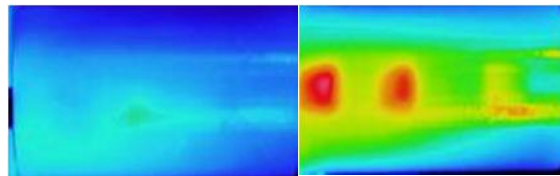


a. Thermal image at time 0.037 sec



b. Temperature distribution profile

شکل ۱۴- توزیع دمایی، (a) تصویر حرارتی در زمان ۰/۰۳۷ ثانیه (b) پروفیل توزیع دمایی در امتداد خط A-A'

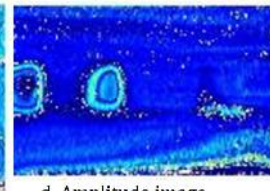


a. Thermal image at time 15 sec, experimental analysis

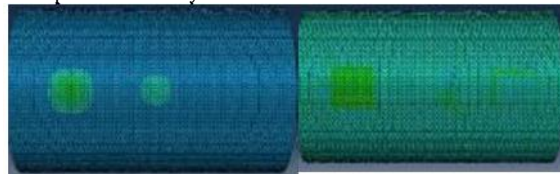
b. Thermal image at time 20 sec, experimental analysis



c. Phase image experimental analysis



d. Amplitude image experimental analysis

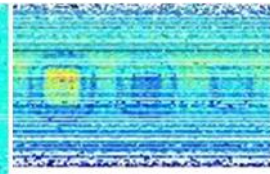


e. Thermal image at time 15 sec, finite element analysis

f. Thermal image at time 20 sec, finite element analysis



g. Phase image finite element analysis

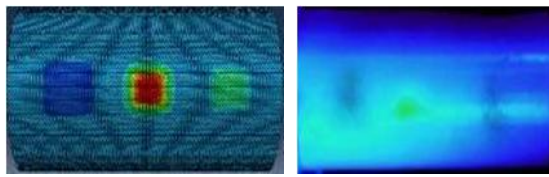


h. Amplitude image finite element analysis

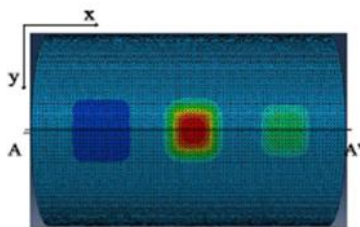
شکل ۱۵- تصاویر حرارتی، دامنه و فاز در فرکانس ۰/۵ هرتز تحلیل- های تجربی و اجزای محدود برای نمونه با عیب جدایش بین لایه ای

۳-۲-۳-ب- تحریک نوری مدوله شده

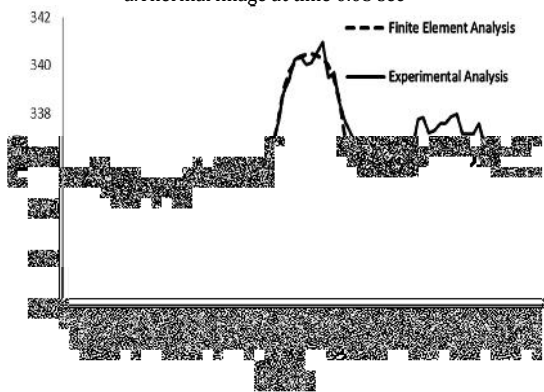
تحلیل تجربی و اجزای محدود، برای دوره‌های تحریک مختلف بر روی نمونه با عیب نفوذ مواد ناخواسته انجام شد و نتایج مورد بررسی قرار گرفت. تصاویر فاز و دامنه حرارتی به دست آمده از حرارت‌نگاری مدوله شده از بررسی تجربی و اجزای محدود در فرکانس ۰/۵ هرتز در شکل ۲۱ آورده شده است. در مقایسه با نتایج اجزای محدود تحلیل تجربی که با نویز سازه و تجهیزات همراه است عیوب را مشابه و با تباين کمتر نشان می‌دهد.



شکل ۱۹- تصاویر حرارتی تحلیل‌های تجربی و اجزای محدود نفوذ مواد ناخواسته با تحریک نوری



a. Thermal image at time 0.05 sec

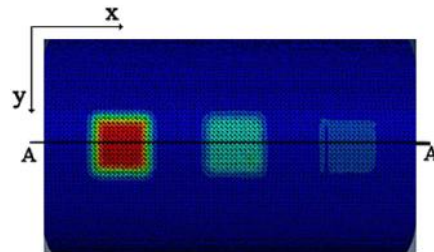


b. Temperature distribution profile

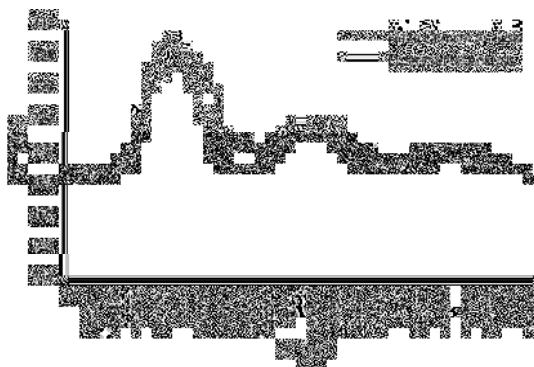
شکل ۲۰- توزیع دمایی، (a) تصویر حرارتی در زمان ۰/۰۵ ثانیه (b) پروفیل توزیع دمایی در امتداد خط A-A'

۳-۲-۳-ج- تحریک هوای گرم

در تحریک هوای گرم به وسیله دمنده درون لوله، ناحیه معیوب مقاومت متفاوتی برای عبور شار گرمایی در مقایسه با قسمت‌های سالم لوله وجود دارد. در نتیجه تغییرات دمایی سطح رویی و در راستای ناحیه معیوب با سایر قسمت‌ها متفاوت است. شکل ۲۲ تغییرات دمایی روی سطح ورق را پس از گذشت ۲ ثانیه از گرما دهی اول نشان می‌دهد. دما در سطح ناحیه معیوب تغییر یافته و نقص با کیفیت مناسب

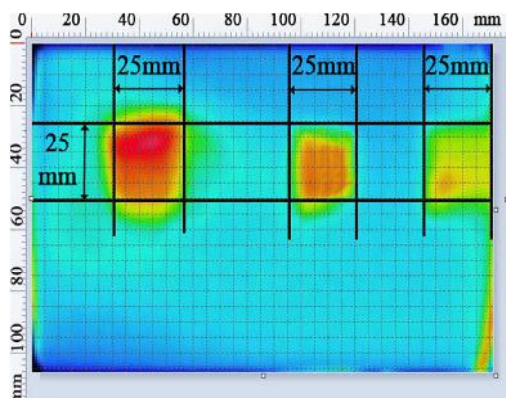


a. Thermal Image at time 3.10 sec



b. Temperature distribution profile

شکل ۱۷- (a) توزیع دمایی، تصویر حرارتی تحریک هوای گرم در زمان ۳/۱۰ ثانیه (b) پروفیل توزیع دمایی در امتداد خط A-A'

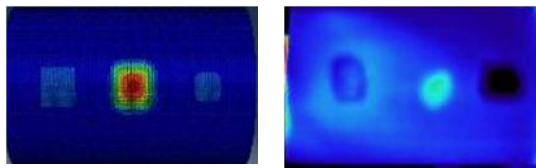


شکل ۱۸- ارزیابی کمی نمونه دارای نقص جدایش بین لایه‌ای در تصویر حرارتی با مقیاس محورها

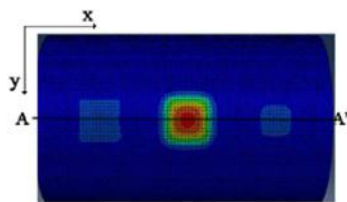
برای مقایسه توزیع دمای سطح بین متغیر جنس عیوب، مقطع اندازه‌گیری A-A' در امتداد عیوب که در شکل ۲۰ (a) نشان داده شده است، ایجاد گردید. تصویر حرارتی در زمان ۰/۰۵ ثانیه برای تحلیل‌ها در نظر گرفته شد. از شکل ۲۰ (b) مشاهده می‌شود که جنس عیوب عامل ایجاد تغییرات توزیع دمایی در سطح نمونه می‌گردد. با شناسایی عیوب می‌توان دریافت قسمت روشن‌تر بیانگر نقصی با انتقال گرمای کمتر و قسمت تیره‌تر بیانگر وجود نقصی با انتقال گرمای بیشتر نسبت به ماده زمینه می‌باشد. از نتایج تحلیل تجربی و شبیه سازی مشاهده می‌شود چنانچه عیب دارای ضریب انتقال گرمای کم باشد به دلیل اندک بودن رسانایی گرمایی ماده زمینه، عیب بزرگتر از اندازه واقعی مشاهده می‌شود.

در نظر گرفته شود تغییر رسانایی گرمایی داخل صفحه‌ای برای جنس‌های مختلف و نیز در راستای مختلف مواد مرکب است. ماده مرکب در راستای الیاف رسانایی گرمایی کمتر از راستای دیگر در داخل صفحه است لذا طول ناحیه دارای افزایش دما، در راستای الیاف کمتر است. پس برای تعیین ابعاد دقیق عیوب مواد ناخواسته بررسی اثر انتشار حرارتی داخل صفحه ضروری است.

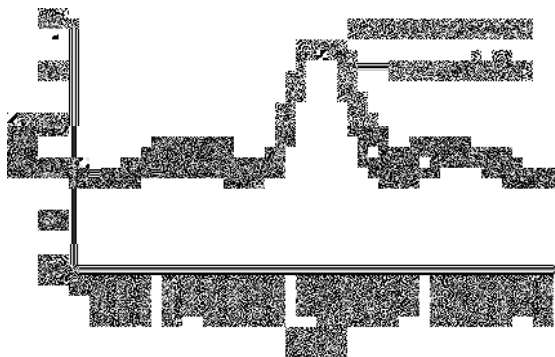
همان‌طور که در شکل ۲۴ مشاهده می‌شود برای اندازه‌گیری اندازه نقص نفوذ ماده ناخواسته با اندازه‌گیری قسمت متباین، در راستای y اندازه عیب ۲۵ میلی‌متر و در راستای x ، ۲۵ میلی‌متر حاصل می‌شود که مطابقت خوبی با اندازه واقعی دارد.



شکل ۲۲- تصاویر حرارتی تحلیل‌های تجربی و اجزای محدود نفوذ مواد ناخواسته با تحریک هوای گرم



a. Thermal image at time 5 sec



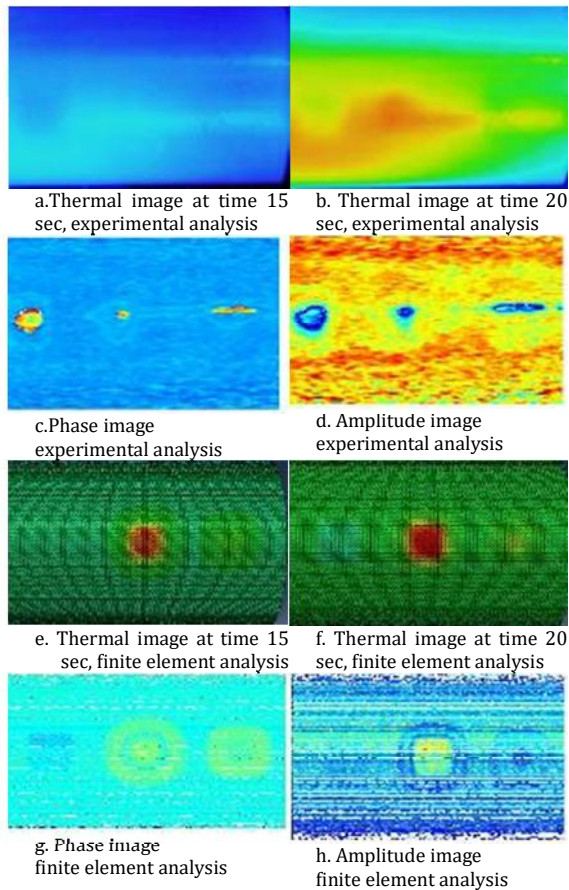
b. Temperature distribution profile

شکل ۲۳- توزیع دمایی، (a) تصویر حرارتی در زمان ۵ ثانیه (b) پروفیل توزیع دمایی در امتداد خط A-A'

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

این مقاله استفاده از حرارت‌نگاری مادون‌قرمز و الگوی تحریک برای ارزیابی کمی نقص‌های زیرسطحی را در لوله‌های مواد مرکب را بررسی می‌نماید. نتایج ارزیابی نشان می‌دهد که با اعمال تحریک و با تحلیل توزیع دما می‌توان موقعیت و ابعاد نواحی معیوب را در مواد مرکب شناسایی نمود. با پردازش تصویر قسمت متباین نقص، در نمونه با نقص الیاف خشک 30×40 میلی‌متر، برای نمونه‌های با نقص جدایش بین لایه‌ای و نفوذ مواد ناخواسته 25×25 میلی‌متر می‌باشد که با اندازه

شناسایی می‌گردد.



شکل ۲۴- تصاویر حرارتی، دامنه و فاز در فرکانس 0.5 هرتز - تحلیل‌های تجربی و اجزای محدود برای نمونه با عیب نفوذ مواد ناخواسته

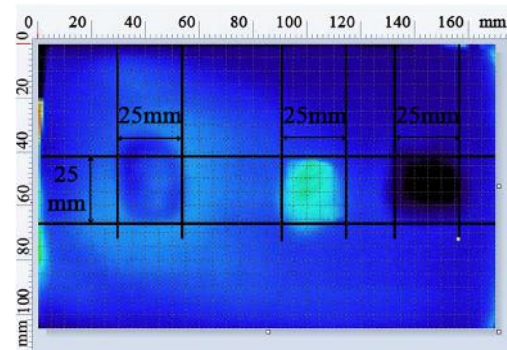
به علت رسانش گرما در داخل صفحه، ابعاد قسمت معیوب در سطح فوقانی نقص با نشر حرارتی کمتر از زمینه بزرگ‌تر از اندازه واقعی نقص است. این موضوع در شکل ۲۲ برای عیب نفوذ ماده ناخواسته از جنس هوا نشان داده شده است که افزایش ابعاد بیشتری دارد زیرا زمان بیشتری برای انتقال شار گرمایی از سطح ورق تا عیب و برگشت آن به سطح وجود دارد و انتقال حرارت داخل صفحه بیشتری در این مدت‌زمان انجام می‌شود. برای مقایسه توزیع دمای سطح بین متغیر جنس عیوب، مقطع اندازه‌گیری A-A' در امتداد عیوب که در شکل ۲۳ (a) نشان داده شده است، ایجاد گردید. تصویر حرارتی در زمان ۵ ثانیه برای تحلیل‌ها در نظر گرفته شد. از شکل ۲۳ (b) مشاهده می‌شود که جنس عیوب عامل ایجاد تغییرات توزیع دمایی در سطح نمونه می‌گردد. با شناسایی عیوب می‌توان دریافت قسمت دمای کمتر بیانگر نقصی با انتقال گرمای بیشتر و قسمت با دمای بیشتر بیانگر وجود نقصی با انتقال گرمای کمتر نسبت به ماده زمینه می‌باشد. از نتایج تحلیل تجربی و شبیه‌سازی مشاهده می‌شود نتایج همخوانی داشته و می‌توان از بررسی عددی در یافتن مقادیر بهینه در بررسی تجربی استفاده نمود.

موضوع دیگری که در تعیین ابعادی عیب نفوذ مواد ناخواسته باید

- [4] Pastuszak P. D., Characterization of defects in curved composite structures using active infrared thermography, *Procedia Engineering*, Vol. 157, pp. 325-332, 2016.
- [5] Mabrouki F., Genest M., Shi G., Fahr A., Numerical modeling for thermographic inspection of fiber metal laminates, *NDT & E International*, Vol. 42, No. 7, pp. 581-588, 2009.
- [6] Meola C., Carlomagno G. M., Giorleo L., Geometrical limitations to detection of defects in composites by means of infrared thermography, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 23, No. 4, pp. 125-132, 2004.
- [7] Choi M., Kang K., Park J., Kim W., Kim K., 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.
- [8] Meola C., Carlomagno, G. M. Squillace A., Vitiello A., Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 13, No. 3, pp. 380-388, 2006.
- [9] Lahiri B., Bagavathiappan S., Reshmi P., Philip J., Jayakumar T., Raj B., Quantification of defects in composites and rubber materials using active thermography, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 55, No. 2, pp. 191-199, 2012.
- [10] Zheng K., Chang Y.-S., Wang K.-H., Yao Y., Improved non-destructive testing of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) composites using pulsed thermograph, *Polymer Testing*, Vol. 46, pp. 26-32, 2015.
- [11] Liu Z., Genest M., Krysz D., Processing thermography images for pitting corrosion quantification on small diameter ductile iron pipe, *NDT & E International*, Vol. 47, pp. 105-115, 2012.
- [12] Bates D., Smith G., Lu D., Hewitt J., Rapid thermal non-destructive testing of aircraft components, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 31, No. 3, pp. 175-185, 2000.
- [13] Ranjit S., Kang K., Kim W., Investigation of lock-in infrared thermography for evaluation of subsurface defects size and depth, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 16, No. 11, pp. 2255-2264, 2015.
- [14] Schuster J., Heider D., Sharp K., Glowania M., Thermal conductivities of three-dimensionally woven fabric composites, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 9, pp. 2085-2091, 2008.
- [15] Holman J., Heat transfer, 8th ed, *New York*, 1997.
- [16] Yang B., Huang Y., Cheng L., Defect detection and evaluation of ultrasonic infrared thermography for aerospace CFRP composites, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 60, pp. 166-173, 2013.
- [17] Kurpiński M., Fidalí M., Detection of Bonded Joint Defects by use of Lock-in Thermography, *Measurement Automation Monitoring*, Vol. 62, No. 10, pp. 333-336, 2016.
- [18] Systemes D., ABAQUS 6.14 Documentation–Theory Guide, *Providence, RI*, 2015.

واقعی مطابقت نسبتاً خوبی دارد.

در بررسی الگوی تحریک مشاهده می‌شود در مواردی که تنها دسترسی به یک سمت قطعه امکان پذیر باشد، روش حرارت‌نگاری نوری مدوله‌شده با وجود مدت زمان بررسی بیشتر نسبت به حرارت‌نگاری نوری پالس امکان شناسایی عیوب در عمق‌های بیشتر و با تباین بالاتر را فراهم آورده و در ارزیابی مواد مرکب کارآمد است. در نمونه‌های مورد بررسی با توجه به نوع ساختار استوانه‌ای و امکان اعمال سیال حرارتی به درون آن، روش تحریک هوای گرم به وسیله دمنده روشی قابل اعتماد بوده و نتایج مطمئنی را ارائه می‌دهد.



شکل ۲۴- ارزیابی کمی نمونه دارای نقص نفوذ مواد ناخواسته در تصویر حرارتی با مقیاس محورها

تحلیل اجزای محدود مطابقت خوبی با داده‌های تجربی داشته و لذا نشان می‌دهد 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.

قابلیت تشخیص عیوب زیرسطحی با حرارت‌نگاری مادون‌قرمز 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 مدوله‌شده برای اندازه‌گیری عیب کمک می‌کند. لذا پیشنهادهایی برای بهبود و بررسی قابلیت حرارت‌نگاری مادون‌قرمز مدوله‌شده طرح می‌گردد.

۵- مراجع

- [1] Boller C., Staszewski W., Tomlinson G. R., *Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing*: J. Wiley, 2004.
- [2] Thajeel H. A., *Numerical modeling of infrared thermography techniques via ANSYS*: Missouri University of Science and Technology, 2014.
- [3] Ibarra-Castaneda C., Genest M., Guibert S., Piau J.-M., Maldague X. P., Bendada A., Inspection of aerospace materials by pulsed thermography, lock-in thermography and vibrothermography: A comparative study, in *Proceeding of*, 16-24.