

شناسایی جدایش بین لایه‌ای در مواد مرکب با تحلیل پاسخ پالسی ترموگرافی نوری

کارشناس ارشد، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، پژوهشگاه هوافضا
دانشیار، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، پژوهشگاه هوافضا

جعفر صفری چایکندی
محمدطاهای ابدی*

چکیده

این مقاله به تحلیل پاسخ گذرای آزمایش غیرمخرب ترموگرافی نوری می‌پردازد که برای شناسایی جدایش بین‌لایه‌ای در مواد مرکب استفاده می‌شود. در این روش شار حرارتی به صورت پالسی و در مدت زمان کوتاهی به یک سطح قطعه اعمال شده و ابعاد عیوب جدایش بین‌لایه‌ای با تحلیل توزیع درجه حرارت این سطح تعیین می‌شود. پاسخ حرارتی گذار با تحلیل اجزای محدود در ماده مرکب تحت اثر شار حرارتی ایجاد شده توسط لامپ هالوژنی در مدت زمان چند میلی‌ثانیه و شار حرارتی ناشی از سرمایش همرفتی در مدت زمان طولانی تعیین می‌شود. این روش برای ورق ماده مرکب چند لایه دارای عیوب با ابعاد و عمق مختلف استفاده می‌شود که لایه‌ی نازک آلومینیومی برای انتقال حرارت مناسب بر روی سطح آن قرار داده شده است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد در اثر تغییرات قابل توجه مقاومت حرارتی مواد مرکب در نواحی جدایش بین‌لایه‌ای، گرادیان درجه حرارت در محدوده‌ی معینی از زمان در سطحی ورود شار حرارتی ایجاد می‌شود که تعیین موقعیت و ابعاد عیوب جدایش بین‌لایه‌ای با ابعاد کوچک را با این روش امکان‌پذیر می‌سازد. نتایج تحلیل دما و مشتق مکانی توزیع دما برای تعیین دقیق ابعاد عیوب استفاده می‌شود و زمان بهینه برای تصویربرداری ترموگرافی از سطح نمونه برای دستیابی به نتایج مناسب از تحلیل گذرای پاسخ حرارتی تعیین می‌شود.

واژه‌های کلیدی: ترموگرافی نوری، جدایش بین‌لایه‌ای، آزمایش غیرمخرب، مواد مرکب.

Identifying Delamination in Composite Materials Using Impulse Response Analysis of Infrared Thermography

J. Safari Chaykandi M.Sc., Ministry of Science, Research and Technolog, Aerospace Research Institute
M. Tahaye Abadi Associate Professor, Ministry of Science, Research and Technolog, Aerospace Research Institute

Abstract

The paper concerns with the transient response analysis of the nondestructive infrared thermography test to detect the delaminations in the laminated composites. A thermal pulse flow is applied to the surface of composite samples and the dimension and position of delamination defects are determined based on the temperature distribution analysis of the heating surface. The transient thermal response is determined by finite element model of laminated composite subjected to heat flux of halogen lamp in a short time period and natural cooling convection flow on the specimen surfaces at long time. The thermography model is implemented for a laminated composite sheet with different size delaminations located at multiple depths. Thin aluminum layers are considered on the composite surfaces to uniform heat transfer. The numerical results show that temperature gradient is observed at specific time range on heating surface due to considerable thermal resistance variation of defects and the temperature distribution can be used to detect the small size delaminating in the laminated composites. The temperature distribution and spatial derivation result in the exact size of damage regions and the optimum inspection time leading to appropriate results in impulsive infrared thermography test.

Keywords: Infrared thermography, Delamination, Nondestructive test, Composite material.

۱- مقدمه

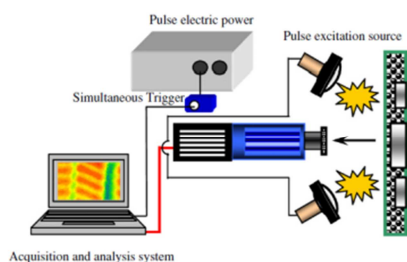
جدایش بین لایه‌ای یکی از رایج‌ترین عیوب در قطعات مواد مرکب چند لایه است. معمولاً جدایش بین لایه‌ای در نواحی ایجاد می‌شود که ناپیوستگی هندسی یا تغییر در جنس وجود داشته باشد. لبه‌های آزاد، کاهش ضخامت لایه‌ها در سطوح داخلی یا خارجی و لبه‌ی بیرون‌زده‌ها پوسته یا تقویت‌کننده‌ها نمونه‌هایی از شرایطی است که بیشترین پتانسیل جدایش بین‌لایه‌ای دارند [۱]. جدایش بین لایه‌ای ممکن است در حین فرآیند ساخت مواد مرکب و در اثر ورود هوا بین دو لایه یا رزین اضافی در اتصال بین دو لایه ایجاد شود. اگرچه روش‌های زیادی برای آزمایش غیر مخرب به منظور شناسایی جدایش بین‌لایه‌ای 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 کند و عیوب درونی سازه را شناسایی کند. آزمایش ترموگرافی که در مقایسه با روش‌های موجود قابلیت کنترل کیفی قطعات بزرگ در مدت زمان کمی دارد براساس تشعشع امواج الکترومغناطیس از اجسام در درجه حرارت مختلف است که این تشعشع توسط دوربین ترموگراف دریافت و توسط پردازنده تحلیل می‌شود. توزیع درجه حرارت قطعات را می‌توان با استفاده از روش‌های پردازش سیگنال تحلیل و ارزیابی نمود تا بدون وابستگی به دقت کاربر، نواحی معیوب قطعات را بخوبی شناسایی کرد.

ترموگرافی که برای شناسایی عیوب در مواد مرکب قابل استفاده است به دو نوع ترموگرافی فراصوتی (ultrasonic thermography) و ترموگرافی نوری تقسیم می‌شود. در ترموگرافی فراصوت قطعه با استفاده از عملگر پیزوالکتریکی تحریک شده که منجر به انتشار امواج مکانیکی در قطعه می‌شود. این امواج موجب افزایش دما در عیوب و نواحی جدایش بین لایه‌ای می‌شود که افزایش دما با استفاده از دوربین ترموگرافی اندازه‌گیری می‌شود [۲]. ترموگرافی نوری با اعمال امواج حرارتی به سطح قطعه مورد آزمون انجام می‌شود که امواج حرارتی به دو صورت پالسی و متناوب است. زمان انجام آزمایش در ترموگرافی نوری پالسی کم بوده و افزایش دمای سطح در حدود چند درجه است به‌طوری‌که افزایش درجه کم در این روش منجر به ایجاد عیوب در قطعه نمی‌شود. آزمایش ترموگرافی نوری پالسی سریع و می‌توان در محل استفاده قطعات در تجهیزات انجام شود در صورتی‌که در ترموگرافی فراصوت تحریک سازه با فرکانس مشخص مشکل بوده و شرایط تکیه‌گاهی بر دقت نتایج تأثیر دارد. از طرف دیگر، مدت زمان انجام آزمایش در ترموگرافی نوری متناوب زیاد است تا توزیع درجه حرارت به مقدار پایایی در سطوح قرار برسد. در ترموگرافی نوری آزمایش قطعه به‌صورت یکپارچه و با دسترسی به یک طرف قطعه انجام می‌شود و برای تمام مواد مرکب و متخلخل قابل اجرا است. آزمایش ترموگرافی

پالسی نوری با توجه به این مزایا و سهولت استفاده از آن در صنایع مختلف مورد توجه زیادی توسط صنعتگران و پژوهشگران قرار گرفته است.

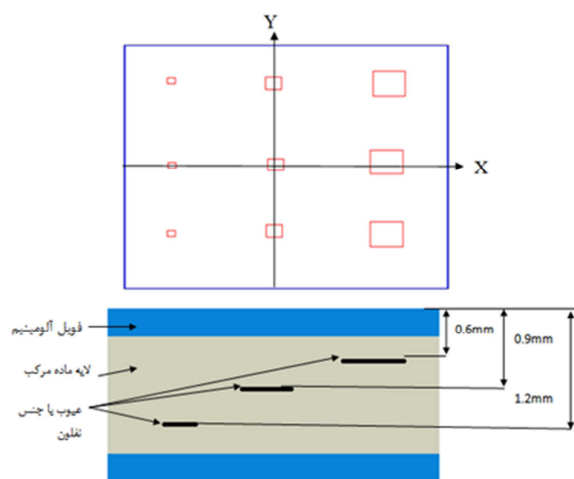
با توجه به استفاده روز افزون مواد مرکب در سازه‌های مختلف و اهمیت آشکارسازی سلامت سازه، مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی در این زمینه انجام شده است و سعی شده است علاوه بر شناسایی عیوب با مطالعه‌ی تجربی، روشی برای مدل‌سازی این آزمایش ارائه شود. مبروکی (Mabrouki) و همکارانش [۳] با مطالعه‌ی آزمایشگاهی عیوب با ابعادهای مختلف و در عمق‌های مختلف راشناسایی کردند. آنها نشان دادند با استفاده از ترموگرافی پالسی می‌توان عیوب را تا ابعاد ۳ میلی‌متر و در عمق ۰/۶ میلی‌متر و عیوب تا ابعاد ۱۰ میلی‌متر در عمق ۱/۶۵ میلی‌متر قابل شناسایی کرد. جون‌یان (Junyan) و همکارانش [۴] مطالعه‌ی آزمایشگاهی را با استفاده از ترموگرافی نوری به روش پالسی و متناوب برای مواد مرکب دارای الیاف کربن با بار حرارتی مختلف و فرکانس‌های مختلف انجام دادند و عیوب با ابعادهای مختلف را در عمق‌های مختلف شناسایی کردند. پیکرینگ (Pickering) و آلموند (Almond) [۵] عیوب با قطرهای مختلف را در عمق‌های مختلف در ماده‌ی مرکب دارای الیاف کربن را با استفاده از ترموگرافی نوری پالسی و متناوب شناسایی نموده و توانایی و محدودیت هر دو روش را بررسی کردند. آنها با مقایسه توانایی و محدودیت هر دو روش نشان دادند با استفاده از ترموگرافی نوری پالسی می‌توان عیوب با قطرهای مختلف را در عمق‌های مختلف شناسایی کرد. مثولا کاروسنا (Meola) و همکارانش [۶] با استفاده از ترموگرافی نوری متناوب، عیوب با قطرهای معادل مختلف در ماده مرکب با الیاف کربن را در فرکانس‌های مختلف را با استفاده از مطالعه‌ی آزمایشگاهی شناسایی کردند. وو (Wu) و همکارانش [۷] عیوب موجود در ماده مرکب کربن-اپوکسی را با استفاده از ترموگرافی نوری متناوب در دو فرکانس ۰/۰۳ و ۰/۰۶ هرتز شناسایی نمودند و مشاهده کردند عیوب در فرکانس کمتر، بهتر قابل شناسایی هستند. آنها این آزمایش را برای سازه‌ی دارای تقویت‌کننده استفاده کردند و در نواحی که چسبندگی تقویت‌کننده به سازه از بین رفته بود را شناسایی نمودند. این روش را در یک سیستمی که شامل تعدادی پیچ بود بکار بردند و پیچ‌هایی که شل شده بود را شناسایی نمودند. لاهیری (Lahiri) و همکارانش [۸] با استفاده از ترموگرافی نوری پالسی و متناوب عیوب را در کربن فایبر، لاستیک با چگالی بالا و چگالی پایین و آلومینیم در عمق و ابعادهای مختلف با فرکانس‌های مختلف شناسایی نمودند. آنها با تعیین فرکانس بهینه در ترموگرافی متناوب برای نمونه‌های مختلف، مشاهده کردند با افزایش عمق عیب، اختلاف فاز بین

در دو طرف نمونه قرار دارد و چهار لایه ماده مرکب اپوکسی- شیشه با ضخامت 0.3 میلی‌متر در بین دو لایه آلومینیم قرار می‌گیرد. تفلون با ضخامت 45 میکرومتر به ترتیب در عمق‌های 0.6 ، 0.9 و 1.2 میلی‌متر از سطح و در مرز مشترک لایه‌ها قرار دارند. نواحی جدایش بین لایه‌ای به‌صورت نواحی مربع شکل با طول ضلع مختلف از مقدار 2.5 تا 10 میلی‌متر است که در جدول ۱ موقعیت هر یک از آنها به همراه کد عیب آورده شده است و برای عیوب مختلف نامگذاری در این جدول بیان شده است. محل قرارگیری عیوب و لایه چینی در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱- تجهیزات لازم برای انجام ترموگرافی نوری با اعمال پالس حرارتی بر سطح قطعه [۴]

جدول ۱- عمق و ابعاد عیوب موجود در سازه		
عمق عیب (میلی‌متر)	کد عیب	ابعاد عیب (میلی‌متر)
۰.۶	D1p1	2.5×2.5
	D2p1	5×5
	D3p1	10×10
۰.۹	D1p2	2.5×2.5
	D2p2	5×5
	D3p2	10×10
۱.۲	D1p3	2.5×2.5
	D2p3	5×5
	D3p3	10×10



شکل ۲- موقعیت عیوب جدایش بین لایه‌ای در ورق مرکب چهار

تحریک و پاسخ حرارتی افزایش می‌یابد در حالی که اختلاف دما کاهش دارد.

هدف از این تحقیق مدل‌سازی پاسخ پالسی آزمایش ترموگرافی نوری در مواد مرکب دارای عیوب جدایش بین لایه‌ای است تا بتوان عملکرد آزمایش ترموگرافی را در شناسایی عیوب با ابعاد و عمق مختلف ارزیابی کرد. با استفاده از این مدل می‌توان تعداد تکرار انجام آزمایش را در مطالعات آزمایشگاهی کاهش داد و تأثیر عوامل مختلف بر دقت روش را ارزیابی نمود. برای این منظور ورق ماده مرکب چند لایه دارای عیوب با ابعاد و عمق مختلف مدل‌سازی می‌شود که برای انتقال حرارت مناسب بر روی سطح آن لایه‌ی نازک آلومینیمی متصل می‌شود. برای حل معادلات انتقال حرارت گذرا از حل عددی به روش تحلیل اجزای محدود استفاده می‌شود که برای ورق دارای عیوب با ابعاد و عمق‌های مختلف به کار برده می‌شود. با استفاده از روش شبیه‌سازی، زمانی تعیین می‌شود که حداکثر اختلاف دمایی در سطح ورق مشاهده می‌شود و توانایی این روش در شناسایی عیوب جدایش بین لایه‌ای با عمق‌های مختلف ارزیابی می‌شود. در این تحقیق ابتدا با تعریف مسئله و تئوری حاکم بر ترموگرافی نوری، روشی برای تحلیل پاسخ حرارتی نمونه‌ی ماده مرکب دارای جدایش بین لایه‌ای و نحوه‌ی اعمال روش ترموگرافی توضیح داده می‌شود. سپس با ارائه نتایج شبیه‌سازی، اثر عمق عیوب بر تغییرات زمانی دمای سطحی و خواص ناهمسانگرد ماده بر تصاویر حرارتی توضیح داده می‌شود. متغیرهای مؤثر بر دقت نتایج تحلیل شناسایی و ارزیابی شده و روش تعیین اندازه عیوب و زمان بهینه تحلیل نتایج ارائه می‌شود.

۲- تعریف مسئله

روش ترموگرافی نوری با اعمال پالس حرارتی برای شناسایی عیوب در عمق‌های مختلف ورق مستطیلی از ماده مرکب چند لایه در نظر گرفته می‌شود که در لایه‌های مختلف جدایش بین لایه‌ای با ابعاد مختلف وجود دارد. این نمونه مطابق با شکل ۱ تحت اثر موج حرارتی ناشی از روشن شدن لحظه‌ای لامپ‌های هالوژنی قرار می‌گیرد و دمای سطحی ورق توسط دوربین اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. معمولاً برای ایجاد نواحی جدایش بین لایه‌ای در مطالعات آزمایشگاهی، لایه‌ی نازک تفلونی در حین ساخت ماده مرکب در نواحی مورد نظر قرار داده می‌شود. سطوح ورق را می‌توان با لایه‌ی نازکی از آلومینیم برای گرمایش یکنواخت سطح پوشش داد.

ورق ماده‌ی مرکب به صورت مربعی شکل به طول ضلع 100 میلی‌متر است که از لایه‌های مواد مرکب پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه و زمینه اپوکسی است که راستای الیاف در کلیه لایه‌ها موازی با یکدیگر است. آلومینیم با ضخامت 0.3 میلی‌متر

لایه اپوکسی - شیشه و دو لایه نازک آلومینیم در سطوح خارجی سطح نمونه با استفاده از لامپهای حرارتی به مدت زمان ۱۰ میلی ثانیه گرم می شود که موجب ورودی شار حرارتی ۴۸۰۰ ژول به سطح فوقانی ورق می شود. سپس تغییرات دمایی سطح نمونه در زمان یک ثانیه بعد از تحریک حرارتی ورق بررسی می شود، سرمایش نمونه با انتقال حرارت جابه جایی طبیعی از سطوح بالایی و پایینی ورق با ضریب انتقال حرارت جابجایی ۱۰ وات بر مترمربع کلون مدل سازی می شود و دمای سیال اطراف ورق با دمای اولیه آن برابر و مقدار آن ۲۵ درجه سانتی گراد در نظر گرفته می شود. مشخصات حرارتی مواد استفاده شده در مدل اجزای محدود ترموگرافی نوری در جدول ۲ آورده شده است.

جدول ۲- خواص فیزیکی مواد [۲]

نوع ماده	آلومینیم	اپوکسی - شیشه	تفلون
ضریب انتقال حرارت (w/mc)	۱۲۱	-	۰/۱۹۵
ظرفیت گرمای ویژه (J/kg c)	۸۷۵	۸۴۰	۱۱۷۲
چگالی (kg/m3)	۲۷۸۰	۱۹۶۰	۲۱۵۰

ماده مرکب اپوکسی - شیشه در دستگاه مختصات اصلی دارای سه صفحه تقارن است و به صورت ماده ی ارتوتروپیک عمل می کند که ضریب هدایت حرارتی آن با سه ثابت مطابق با جدول ۳ توصیف می شود. در این جدول ضریب نفوذ گرمایی معیاری از توانایی یک ماده در رسانش گرما در قیاس با ذخیره انرژی گرمایی در آن ماده است. این کمیت به صورت نسبت گرمای عبور کرده به گرمای ذخیره شده در واحد حجم ماده است.

جدول ۳- خواص حرارتی ماده مرکب اپوکسی - شیشه در دستگاه مختصات اصلی [۳]

محور دستگاه مختصات	X	Y	Z
ضریب نفوذ حرارتی (mm ² /s)	۶/۳۴	۲۳/۳	۲۳/۳
ضریب انتقال حرارت هدایت (w/mc)	۱۰/۴۴	۳۸/۳۶	۳۸/۳۶

۳- معادلات حاکم بر پاسخ ترموگرافی نوری

پاسخ حرارتی گذرای ماده ی مرکب برای تعیین موقعیت عیوب جدایش بین لایه ای در روش ترموگرافی نوری با تحریک امواج پالسی اهمیت دارد زیرا سطح قطعه در مدت زمان بسیار کمی گرم می شود و توزیع درجه حرارت سطحی برای ارزیابی عیوب داخلی جسم استفاده می شود. شار حرارتی که در لحظه

اولیه گرمایش وارد ورق مرکب می شود موجب گردایان حرارتی در جسم می شود که با توجه به ضریب هدایت حرارتی می توان ارتباط بین شار حرارتی و گردایان حرارتی را بدین صورت بیان کرد:

$$\vec{q} = -K \nabla \vec{T} \quad (۱)$$

که $\vec{q}$ بردار شارحرارتی بر حسب وات بر متر مربع، K تانسور ضریب هدایت گرمایی با واحد وات بر متر درجه سانتی گراد است که توانایی جسم در هدایت و عبور دادن انرژی گرمایی را در جهات مختلف بیان می کند، $\nabla \vec{T}$ بردار گردایان دمایی است که در دستگاه مختصات کارتزین برابر است با:

$$\nabla \vec{T} = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{e}_z \quad (۲)$$

$\vec{e}_x$ ، $\vec{e}_y$ و $\vec{e}_z$ بردارهای یکه در راستای محورهای x ، y و z دستگاه مختصات دکارتی و T درجه حرارت است. مقدار تغییر دما در آزمایش ترموگرافی نوری مقدار قابل توجهی نیست و می توان با دقت مناسب فرض کرد که مقدار ضریب هدایت حرارتی در این محدوده دما ثابت است که وابسته به نوع ماده ی مرکب و راستای مورد نظر در دستگاه مختصات است. تانسور ضریب هدایت گرمایی در مواد ناهمسانگرد در حالت کلی ۹ مولفه دارند که این ضرایب را به صورت ماتریسی را بدین صورت می توان نوشت:

$$K = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yz} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (۳)$$

در مواد ارتوتروپیک که دارای سه صفحه تقارن عمود بر هم هستند مقادیر غیر قطری تانسور ضریب هدایت حرارتی صفر است و تانسور ضریب هدایت حرارتی چنین بیان می شود:

$$K = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (۴)$$

ماده ی مرکبی که در این تحقیق در نظر گرفته می شود دارای تقویت کننده تک جهتی است و می توان آن را به صورت ماده ی ارتوتروپیک در نظر گرفت که با توجه به موازی بودن راستای الیاف با محور x ، صفحات تقارن منطبق بر سه صفحه دستگاه مختصات دکارتی است. معادله ی حاکم بر توزیع دما در هر نقطه از جسم در زمان های مختلف بعد از حرارت دهی طبق اصل بقای انرژی در مختصات دکارتی با توجه به ضریب هدایت حرارتی ثابت و بدون منبع تولیدکننده انرژی داخلی بدین صورت بیان می شود:

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = k_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \quad (۵)$$

۴- روش تحلیل آزمایش ترموگرافی

هدف از تحلیل معادله ی بقای انرژی در آزمایش ترموگرافی، تعیین تأثیر عیوب بر توزیع دمای سطحی جسم است که با

که Δt مقدار نمو زمانی و a_n بردار دما در گره‌ها در لحظه‌ی t_n است. برای حل از روش المان انتقال حرارت سه‌بعدی استفاده می‌شود، برای المان‌بندی باید کوچک‌ترین اندازه المان حداقل برابر با کوچک‌ترین عیب شبیه‌سازی شده در نظر گرفته شود تا کوچک‌ترین عیب نیز قابل تشخیص باشد و ضخامت المان هر لایه حداقل باید برابر با ضخامت لایه باشد.

شارحرارتی اعمالی به ورق در مدت زمان کمی اعمال می‌شود و سپس تغییرات درجه حرارت در کل زمان بررسی می‌شود. برای این منظور کل بازه زمانی به نمونه‌های زمانی تقسیم می‌شود و مقدار درجه حرارت در هر لحظه با توجه به خواص ماده و مقدار دما در نمو قبل با استفاده از رابطه‌ی (۷) و با حل دستگاه معادلات خطی به دست می‌آید. برای حل عددی از نرم افزار تحلیل اجزای محدود آباکوس (Abaqus) استفاده می‌شود و بیشترین گام زمانی ۵۰ میلی‌ثانیه در نظر گرفته می‌شود. در صورتی‌که در هر نمو اختلاف دمایی بیشتر از ۰.۰۵ درجه سانتی‌گراد باشد نمو زمانی کوچک‌تر می‌شود.

۵- نتایج

در این بخش تغییرات دمایی سطحی ورق به دست آمده از تحلیل اجزای محدود بررسی می‌شود تا معیاری برای شناسایی نواحی جدایش بین‌لایه‌ای ارائه شود. همان‌طور که بیان شد در محلی که عیب وجود داشته باشد مقاومت بیشتری برای عبور شار حرارتی در مقایسه با قسمت‌های سالم ورق وجود دارد. در نتیجه تغییرات دمایی سطح فوقانی و در راستای ناحیه‌ی جدایش بین‌لایه‌ای با سایر قسمت‌ها متفاوت است. برای شناسایی بهتر عیوب باید زمانی که حداکثر اختلاف دمایی روی سطح بین منطقه‌ی سالم و معیوب ایجاد می‌شود تغییرات توزیع دمایی بررسی شود تا عیوب به راحتی قابل شناسایی باشد.

شکل ۴ تغییرات دمایی روی سطح ورق را در پس از گذشت ۰.۲۱ ثانیه از حرارت‌دهی اول نشان می‌دهد. مقدار دما در سطح تا حداکثر مقدار ۲۸.۴ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با مقدار اولیه ۲۵ درجه سانتی‌گراد افزایش یافته است که حداکثر مقدار در راستای با عیب ۱۰ میلی‌متر و در عمق ۰.۶ مشاهده می‌شود. هر چه عمق عیب بیشتر و اندازه‌ی آن کوچک‌تر شود افزایش دما کمتر می‌شود. تغییر دما در عیب با اندازه ۲.۵ میلی‌متر در عمق ۰.۶ میلی‌متری قابل شناسایی است ولی در عمق‌های بیشتر این عیب دیگر به راحتی شناسایی نمی‌شود.

شناسایی عیوب به حساسیت دوربین ترموگراف وابسته است. دوربین ترموگرافی تعداد زیادی حسگر حساس به امواج گرمایی دارد که هر یک از سنسورها دمای بخش کوچکی از میدان دید لنز دوربین را اندازه‌گیری می‌کند. این سنسورها روی صفحه‌ای که به آن آشکارساز (detector) می‌گویند به صورت سطری و ستونی

داشتن این نتایج می‌توان ارتباط بین توزیع دمایی و عیوب داخلی جسم را بیان کرد. ناحیه‌ی جدایش بین‌لایه‌ای موجب می‌شود مقاومت حرارتی برای انتقال شار ایجاد شده بیشتر شود و قسمتی از شار حرارتی به سطح جسم برمی‌گردد و توزیع دمایی متفاوتی در سطح جسم و در راستای ناحیه‌ی جدایش بین‌لایه‌ای ایجاد شود. با استفاده از دوربین ترموگرافی از سطح نمونه، تصویری از تغییراتی دمایی به دست می‌آید که با استفاده از آن می‌توان عیوب را شناسایی نمود. برای تعیین توزیع دما نیاز به حل معادله‌ی (۵) است ولی حل آن به‌صورت تحلیلی برای هندسه‌های پیچیده بسیار دشوار است. لذا از روش عددی اجزای محدود برای تحلیل انتقال حرارت گذار استفاده می‌شود به‌طوری‌که ورق چند لایه در تحلیل اجزای محدود به قطعات کوچک‌تر المان تقسیم می‌شود. برای هر گره این المان، یک درجه آزادی مربوط به دمای جسم در نظر گرفته می‌شود که تغییر دمای هر نقطه از قطعه را می‌توان با حل عددی محاسبه کرد. از آنجایی که دامنه‌ی تغییر دمایی در سازه کمتر بوده و در حد معمولی چند درجه است از انتقال حرارت ناشی از تشعشع صرف نظر می‌شود. برای تحلیل اجزای محدود از المان‌های شش وجهی مرتبه اول استفاده می‌شود که در هر گره یک درجه آزادی مربوط به دما وجود دارد. هندسه در نظر گرفته‌شده برای المان‌بندی قسمتی از ورق ماده مرکب در شکل ۳ نشان داده شده است.

برای تحلیل دما روی سطح، از حل صریح (explicit) با گسسته‌سازی به روش پسرو (backward) استفاده می‌شود. برای حل عددی وقتی خواص حرارتی ماده مستقل از دما در نظر گرفته شود معادله‌ی انتقال حرارت گذرا را می‌توان چنین نوشت [۳]:

$$\dot{C}_a + K_T a = Q \quad (6)$$

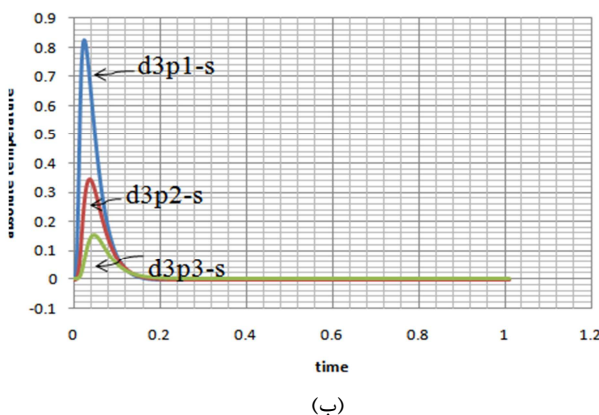
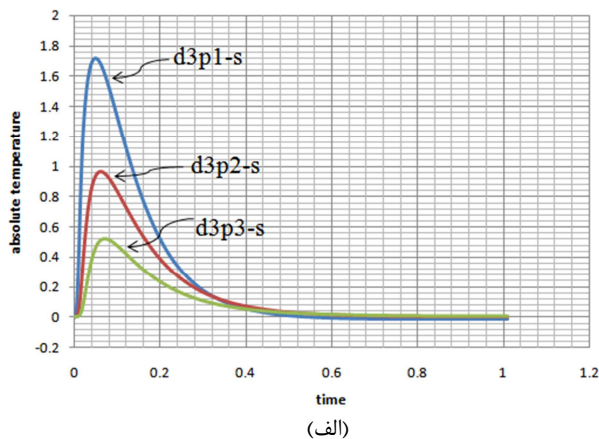


شکل ۳- نحوه‌ی المان بندی ورق مرکب چندلایه برای تحلیل حرارتی

که a بردار متشکل از دمای گره‌ها، $\dot{a}$ برداری متشکل از نرخ تغییر زمانی دمای گره‌ها، Q بردار شار حرارتی، C ماتریس ظرفیت گرمایی و K_T ماتریس ضرایب است. مؤلفه‌های ماتریس ظرفیت گرمایی و ضرایب در این تحلیل مستقل از دما فرض می‌شوند زیرا محدوده‌ی تغییر دما در نمونه آزمایشگاهی کم است. با استفاده از تقریب عددی مشتق زمانی دمای گره‌ها با روش پسرو، گسسته‌سازی رابطه‌ی (۶) چنین می‌شود:

$$\left[\frac{C}{\Delta t} + K_T \right] a_n = Q_n + \frac{1}{\Delta t} C a_{n-1} \quad (7)$$

در مرجع ۳ آورده شده است یک ورق مستطیلی به ابعاد 30.4×80 میلی‌متر مربع از ماده‌ی مرکب با زمینه‌ی اپوکسی و تقویت‌کننده الیاف شیشه بافته است که لایه‌های آلومینیومی با ضخامت 0.3 میلی‌متر برای ایجاد شرایط گرمایش یکنواخت در سطح فوقانی و تحتانی آن متصل شده است. لایه‌های تفلونی با ضخامت تفلون 0.45 میلی‌متر و ابعاد مختلف 1×1 تا 20×20 میلی‌متر مربع در دو عمق متفاوت 0.6 و 1.65 میلی‌متر برای ایجاد جدایش بین لایه‌ای در نمونه‌ی آزمایشگاهی قرار داده شده است. برای گرمایش سطح نمونه از دو عدد لامپ هالوژنی استفاده شده است

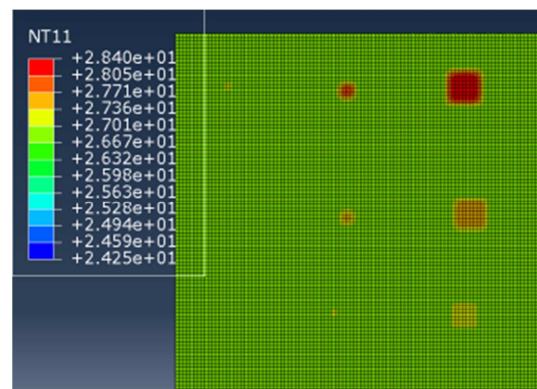


شکل ۵- اختلاف دمایی سطح بالای عیب با عمق‌های مختلف در مقایسه با دمای ناحیه‌ی سالم در زمان مختلف پس از تحریک حرارتی ورق در نواحی دارای عیوب با ابعاد الف) 10 میلی‌متر ب) 2.5 میلی‌متر

که هر کدام 2400 J انرژی در واحد سطح انرژی گرمایی منتشر می‌کند و مدت زمان روشن‌بودن آنها 10 میلی‌ثانیه تنظیم می‌شود. دمای سطح با استفاده از یک دوربین با مشخصات 240×320 پیکسل، نرخ داده‌برداری 60 Hz استفاده می‌شود و مدت تصویربرداری 3 ثانیه انتخاب می‌شود. حداکثر اختلاف دمایی قابل اندازه‌گیری توسط دوربین مورد استفاده در آزمایش 25 میلی‌کلوین می‌باشد.

در کنار هم چیده شده‌اند. دوربین‌های ارزان قدیمی به طور معمول دارای تعداد آشکارسازهای 80×80 بودند که هر یک از آنها 19200 پیکسل دارند. امروزه دوربین‌های با تعداد آشکارسازهای 120×120 وجود دارد که معمولاً هر آشکارساز 77000 تا 650000 پیکسل دارد. شکل اختلاف دمای سطح بر روی یک قسمت عیوب با ابعاد مختلف نسبت به قسمت سالم را نشان می‌دهد که این عیوب در سه عمق مختلف 0.6 ، 0.9 و 1.2 میلی‌متر قرار دارند.

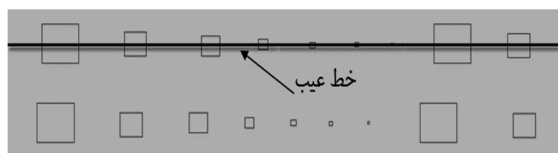
دمای محل سالم با فاصله‌ی مناسب از محل عیب در نظر گرفته می‌شود به‌طوری‌که مقدار دما در آن قسمت نسبت به نواحی مجاور خود تغییرات ندارد. با توجه به شکل ۵- الف زمان حداکثر اختلاف دمایی ایجادشده در عمق بیشتر، افزایش می‌یابد. با کوچک‌شدن عیوب اختلاف دما کاهش می‌یابد که این موضوع در شکل ۵- ب نشان داده شده است. قابلیت شناسایی عیوب در مطالعه‌ی آزمایشگاهی بستگی به حداقل اختلاف دمایی قابل ثبت دوربین ترموگرافی دارد. نتایج نشان می‌دهد اگر دوربین ترموگراف به دمای حدود 0.1 درجه سانتی‌گراد حساس باشد کوچک‌ترین عیب در عمق 1.2 میلی‌متر نیز قابل شناسایی خواهد بود. حداقل اختلاف دمایی قابل شناسایی با استفاده از دوربین‌های مورد استفاده برای ترموگرافی نوری حدود 25 میلی‌کلوین است [۳]. بنابراین با ترموگرافی نوری می‌توان کلیه عیوب در نظر گرفته شده در ورق ماده مرکب تا اندازه 2.5 میلی‌متر را شناسایی کرد.



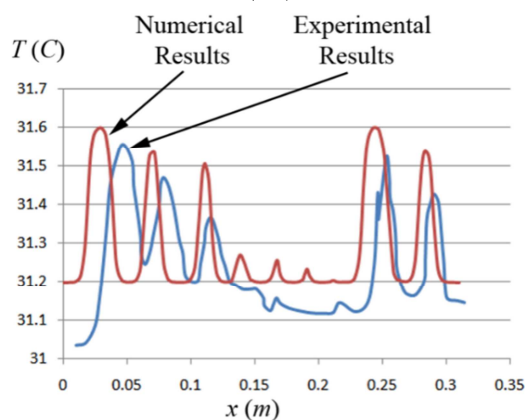
شکل ۴- توزیع دمای سطحی ورق در زمان 0.21 ثانیه

۶- صحنه‌گذاری

مدل ارائه شده برای تحلیل آزمایش ترموگرافی باید صحنه‌گذاری شود تا از نتایج به دست‌آمده از این مدل اطمینان حاصل شود. برای این منظور در این بخش آزمایش ترموگرافی نوری با تحریک پالسی در نمونه‌ای از ورق مرکب چندلایه دارای جدایش بین لایه‌ای بررسی می‌شود که هندسه و شرایط حرارتی آن مشابه با آزمایش انجام‌شده توسط پژوهشگران پیشین [۳] انتخاب می‌شود و برای صحنه‌گذاری نتایج تحلیل با مشاهدات آزمایشگاهی مقایسه می‌شود. نمونه‌ی آزمایشگاهی که جزئیات آن

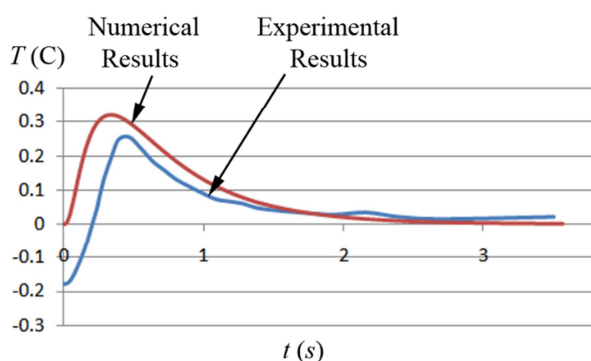


(الف)



(ب)

شکل ۶- الف) هندسه‌ی ورق ماده مرکب و عیوب در نمونه‌ی آزمایشگاهی [۳] ب) توزیع دما روی خطی در سطح فوقانی و عبورکننده از نواحی معیوب در زمان ۴۸۰ میلی‌ثانیه



شکل ۷- اختلاف دما بین نواحی سالم و عیوب در عیب شماره ۱ به دست‌آمده از آزمایش [۳] و تحلیل حرارتی در زمان‌های مختلف

۷- بحث و بررسی

۷-۱ تعیین اندازه المان برای تحلیل ترموگرافی

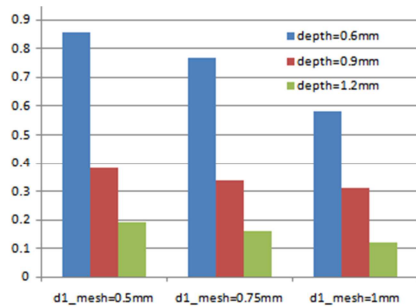
اندازه‌ی المان یکی از عوامل مؤثر بر دقت شبیه‌سازی ترموگرافی نوری با استفاده از تحلیل اجزای محدود است و مقدار آن باید به اندازه‌ای کافی کوچک انتخاب شود تا توزیع درجه در ابعاد عیب تعیین شود. برای این منظور حساسیت نتایج تحلیل در اندازه المان‌های مختلف بررسی می‌شود تا اندازه المان مناسب با توجه به حد مجاز خطای محاسباتی تعیین شود. سه المان‌بندی با اندازه‌ی کلی ۱، ۰/۷۵ و ۰/۵ میلی‌متر برای تحلیل ترموگرافی ورق مرکب دارای اندازه‌ی عیب ۲/۵ میلی‌متری در عمق ۰/۶ میلی‌متری در نظر گرفته می‌شود و نتایج آنها با یکدیگر مقایسه

به‌منظور صحت‌گذاری روش تحلیل، مدل اجزای محدود مطابق با هندسه‌ی ورق در تحلیل آزمایشگاهی ایجاد می‌شود که دارای یک ورق آلومینیومی به ضخامت ۰/۳ میلی‌متر در سطح فوقانی، ورق از ماده‌ی مرکب با ضخامت ۰/۳ میلی‌متر در زیر آن است که عیوب تفلونی در سطح زیرین آن قرار دارد. در سطح تحتانی نیز یک لایه‌ی آلومینیومی با ضخامت ۰/۳ میلی‌متر متصل شده است. خواص حرارتی ماده‌ی مرکب، آلومینیوم و تفلون در جدول ۲ آورده شده است. دمای ورق در اثر هدایت حرارت همرفتی در سطوح فوقانی و تحتانی به تدریج کاهش می‌یابد که مقدار ضریب همرفت ۱۰ وات بر متر مربع کلوین است. برای تحلیل از المان‌های سه بعدی شش وجهی مرتبه اول با هشت گره با کوچک‌ترین ابعاد ۱ میلی‌متر استفاده می‌شود.

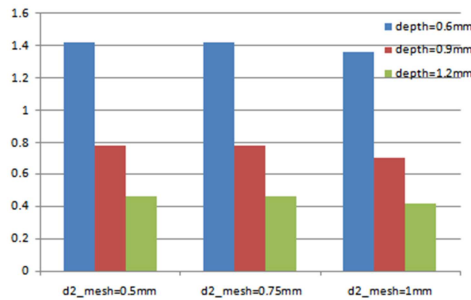
تحلیل حرارتی ورق تحت اثر اعمال شار حرارتی پالسی ۴۸۰۰ ژول بر متر مربع در سطح فوقانی به مدت زمان ۱۰ میلی‌ثانیه و سپس سرمایش آن ناشی از انتقال حرارت همرفتی در سطوح فوقانی و تحتانی انجام می‌شود تا توزیع دمای روی سطح فوقانی در زمان‌های مختلف تعیین شود. این توزیع دما با استفاده از روش ارایه‌شده در این تحقیق به دست می‌آید. شکل ۶- الف) هندسه ورق ماده مرکب و موقعیت عیوب در نمونه‌ی آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. تغییرات دمای سطح ناشی از وجود عیب با ابعاد مختلف بر روی مسیر مستقیم در سطح اعمال شار حرارتی بررسی می‌شود و مقادیر به دست‌آمده از تحلیل و مطالعات آزمایشگاهی با یکدیگر مقایسه می‌شوند. شکل ۶- ب) مقدار درجه حرارت را در زمان ۴۸۰ میلی‌ثانیه روی خط مستقیم نشان می‌دهد. از آنجا که این خط از نواحی بالای عیوب و نواحی سالم عبور می‌کند اختلاف دمای بین نواحی سالم و معیوب به خوبی نشان داده می‌شود. روند تغییرات دمای محاسبه‌شده در تحلیل عددی با نتایج تجربی و عددی با یکدیگر هم‌خوانی دارد. حداکثر خطای ایجاد شده بین نتایج تجربی و عددی کمتر از ۰/۳ درجه سانتی‌گراد می‌باشد که علت اختلاف بین توزیع دما فرض توزیع یکنواخت بار حرارتی در مدل‌سازی آزمایش است. جابه‌جایی محور افقی نتایج عددی نسبت به نتایج تجربی به دلیل اختلاف محل عیوب در دو روش است.

شکل ۷ اختلاف دما بین نواحی سالم و عیوب در اولین عیب را در زمان‌های مختلف نشان می‌دهد که از آزمایش و تحلیل حرارتی به دست آمده است. تغییرات زمانی اختلاف دما در نتایج تجربی و عددی روند مشابهی دارند و عدد منفی در نتایج تجربی در زمان‌های ابتدایی به دلیل غیر یکنواخت بودن شار حرارتی اعمالی و در نتیجه غیر یکنواخت بودن توزیع دما می‌باشد.

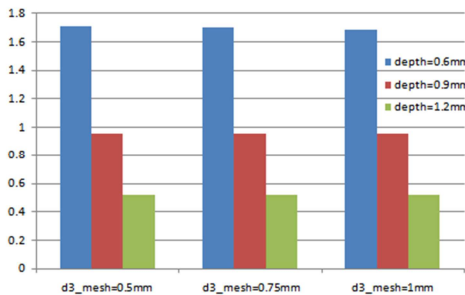
بنابراین یک چهارم عیب برای تحلیل در نظر گرفته می‌شود. تحلیل حرارتی در این هندسه کوچک‌تر را می‌توان با تعداد المان بیشتر و نتایج دقیق‌تر در زمان کوتاهی انجام داد. برای بررسی دقیق‌تر اختلاف دمایی بالای عیب در نمونه دارای عیب با ابعاد ۲٫۵ میلی‌متر، مدل اجزای محدود کوچک‌تری به ابعاد ۶×۶ میلی‌متر مربع ایجاد می‌شود که فقط یک عیب در عمق ۰٫۶ میلی‌متری به ابعاد ۲٫۵×۲٫۵ میلی‌متر دارد.



(الف)



(ب)

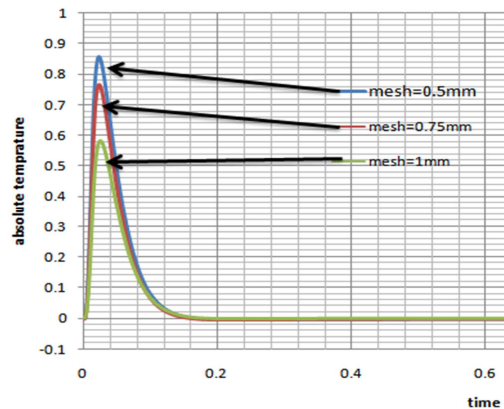


(ج)

شکل ۹- حداکثر اختلاف دمایی در سطح بالای عیوب در عمق‌های مختلف با المان‌های ۰٫۵، ۰٫۷۵ و ۱ میلی‌متر برای نمونه‌های دارای عیب (الف) ۲٫۵ میلی‌متر (ب) ۵ میلی‌متر (ج) ۱۰ میلی‌متر

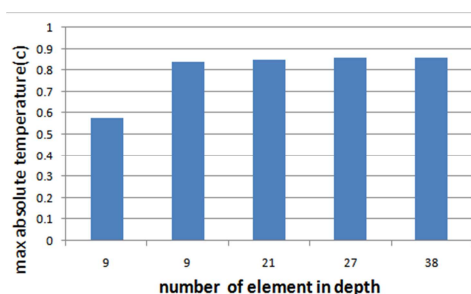
شکل ۱۰ حداکثر اختلاف دمایی در پنج اندازه‌ی المان مختلف را نشان می‌دهد که در آن حداکثر اختلاف دمایی تا المان به اندازه‌ی ۰٫۵ میلی‌متری بیشتر شده ولی تغییرات دمایی برای المان‌های کوچک‌تر از ۰٫۵ میلی‌متری بسیار ناچیز است. بنابراین المان کوچک‌تر از این اندازه تأثیر ناچیزی در نتایج نداشته و فقط زمان تحلیل را افزایش می‌دهد.

می‌شوند. شکل ۸ اختلاف دمایی قسمت سالم و معیوب برای این ورق مرکب را نشان می‌دهد که با این سه المان‌بندی به دست آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود حداکثر اختلاف دمایی ایجاد شده با کوچک شدن المان افزایش یافته است و نیاز است المان‌بندی کوچک‌تری برای تعیین دقیق‌تر حداکثر دما انتخاب شود. برای بررسی اندازه‌ی المان بر دقت نتایج مقدار حداکثر دمایی که در شکل ۸ مشاهده می‌شود برای کلیه عیوب با هم مقایسه می‌شود. برای این منظور برای تحلیل اجزای محدود از المان‌های با ابعاد کلی ۱، ۰٫۷۵ و ۰٫۵ میلی‌متر برای شناسایی عیوب با ابعاد مختلف در عمق‌های مختلف استفاده می‌شود و حداکثر اختلاف دمایی بین نواحی سالم و معیوب تعیین می‌شود که مقادیر آنها در شکل ۹ نشان داده شده است. حداکثر اختلاف دما در عیوب با ابعاد ۱۰ و ۵ میلی‌متر در کلیه عمق‌ها مطابق با شکل ۹-ب و ج با کاهش اندازه المان با دقت قابل قبولی همگرا می‌شود ولی حداکثر اختلاف دما در اندازه عیب ۲٫۵ میلی‌متری با کاهش ابعاد المان با توجه به شکل ۹ الف همگرا نمی‌شود و برای تعیین دقیق نتایج نیاز است از المان‌های کوچک‌تر از ۰٫۵ میلی‌متر برای تحلیل استفاده شود. تحلیل اجزای محدود با المان‌های مختلف نشان می‌دهد مقدار حداکثر دما در عمق‌های مختلف حساسیت زیادی نسبت به اندازه المان دارد و تقریباً دقت نتایج در کلیه عیوب با ابعاد یکسان و در عمق‌های مختلف به طور مشابه تغییر می‌کند.



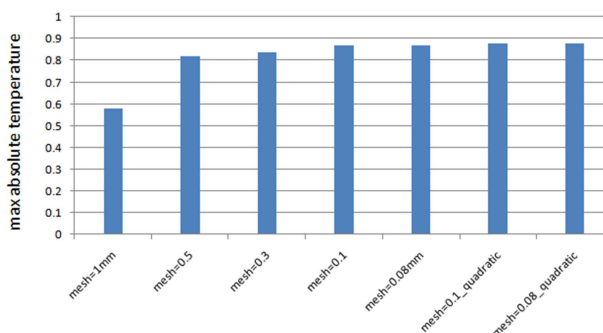
شکل ۸- اختلاف دمایی سطح بالای عیب ۲٫۵ میلی‌متر در مقایسه با دمای ناحیه‌ی سالم در زمان مختلف در عمق ۰٫۶ میلی‌متر در سه المان‌بندی مختلف

از آنجاکه تحلیل پاسخ ترموگرافی مواد مرکب در المان‌های بسیار کوچک به زمان و حافظه زیادی نیاز دارد از نتایج تحلیل حرارتی نشان داده شده در شکل ۴ استفاده می‌شود که توزیع دمایی اطراف هر عیب در فاصله‌ی مشخصی از آن یکنواخت شده است. بنابراین پاسخ‌گذاری حرارتی در ماده مرکب چند لایه را می‌توان با در نظر گرفتن قسمتی از هندسه‌ی اطراف عیب تحلیل کرد که بردار شار حرارتی در سطوح جانبی آن موازی با این سطوح است.



شکل ۱۲- حداکثر اختلاف دمایی روی یک نقطه سالم و معیوب در تعداد المان مختلف در جهت عمق

تأثیر انتخاب نوع المان بر دقت نتایج تحلیل نیز ممکن است بسیار مهم 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 است 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. شکل ۱۳ حداکثر اختلاف دمایی محاسبه شده در نقطه‌ی سالم و معیوب را با استفاده از المان‌های مرتبه اول با ابعاد ۱، ۰٫۵، ۰٫۳، ۰٫۱ و ۰٫۰۸ میلی‌متر و المان‌های مرتبه دوم با ابعاد ۰٫۱ و ۰٫۰۸ میلی‌متر نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتایج المان مرتبه اول و مرتبه دوم با اندازه‌ی المان یکسان اختلاف بسیار کمی دارند و استفاده از المان مرتبه دوم تأثیر ناچیزی در دقت نتایج دارد و فقط زمان تحلیل را افزایش می‌دهد.

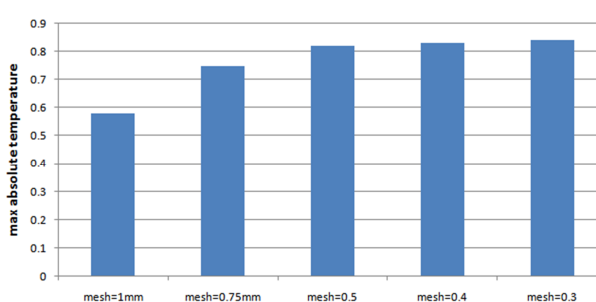


شکل ۱۳- حداکثر اختلاف دمای برای پنج اندازه‌ی مختلف المان مرتبه اول و دو اندازه مختلف المان مرتبه دوم

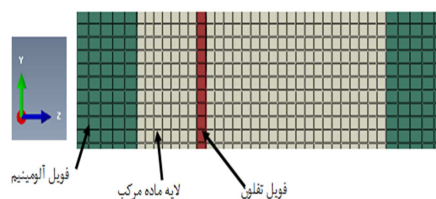
۲-۷ تعیین ابعاد عیوب براساس نتایج ترموگرافی

ابعاد و هندسه ناحیه‌ی جدایش بین‌لایه‌ای را می‌توان با استفاده از نتایج آزمایش ترموگرافی و براساس هندسه و مساحت قسمت دارای افزایش دما تعیین کرد. به علت رسانش حرارتی در داخل صفحه، ابعاد قسمت دارای افزایش عیب در سطح فوقانی کمی بزرگ‌تر از اندازه‌ی ناحیه‌ی جدایش بین‌لایه‌ای است. این

در مدل‌هایی که تاکنون ایجاد شده است تعداد یک المان در جهت ضخامت هر یک از لایه‌ها به علت ضخامت کم آنها در نظر گرفته می‌شود. یکی از عواملی که می‌تواند بر دقت نتایج تأثیر داشته باشد تعداد المان در جهت ضخامت است. برای این منظور، تعداد ۵ المان در جهت ضخامت لایه‌ی آلومینیم و هر لایه از ماده‌ی مرکب مطابق با شکل ۱۱ انتخاب می‌شود تا تغییرات دمایی با افزایش پنج برابر المان بررسی شود. ابعاد المان در دو راستای عمود بر ضخامت ورق برابر با ابعاد المان در جهت ضخامت در نظر گرفته می‌شود. از آنجا که ضخامت تفلون ۰٫۴۵ میلی‌متر و بسیار کمتر از ضخامت دیگر لایه‌ها است یک المان در جهت ضخامت آن ایجاد شده است.

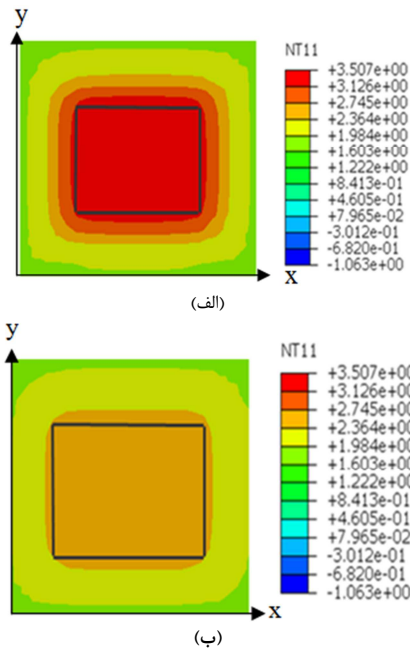


شکل ۱۰- حداکثر اختلاف دمایی در پنج اندازه‌ی المان مختلف در نمونه دارای عیب ۲٫۵ میلی‌متر در عمق ۰٫۶ میلی‌متری



شکل ۱۱- المان بندی سازه در جهت ضخامت

شکل ۱۲ حداکثر اختلاف دمایی روی یک نقطه‌ی سالم و معیوب در تعداد مختلف المان در جهت ضخامت را نشان می‌دهد که این نتایج برای هندسه اطراف یک عیب در عمق ۰٫۶ میلی‌متری و ابعاد ۲٫۵ میلی‌متر به دست آمده است. اندازه المان در داخل صفحه که برای ایجاد تعداد المان مورد نظر در ضخامت در نظر گرفته شده است در شکل ۱۰ به ترتیب از چپ به راست ۱، ۰٫۳، ۰٫۱، ۰٫۰۸ و ۰٫۰۴۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. اگرچه اندازه‌ی المان از یک میلی‌متر تا ۰٫۰۴۵ میلی‌متر تغییر داده می‌شود، اختلاف دمایی با افزایش تعداد المان در جهت ضخامت تغییر زیادی ندارد. پس افزایش المان در جهت ضخامت تأثیر ناچیزی در دقت نتایج دارد و اگر اندازه‌ی المان در جهت ضخامت با اندازه المان در جهت‌های دیگر برابر باشد برای دستیابی به نتایج دقیق کافی است.



شکل ۱۴- مرز ناحیه‌ی جدایش بین لایه‌ای و سطح دارای تغییرات دما در سطح فوقانی برای عیب ۱۰ میلی‌متر در عمق الف) ۰/۶ میلی‌متر ب) ۰/۹ میلی‌متر

برای تعیین شیب اختلاف دمایی در گرهِ‌های مختلف از تقریب مشتق‌گیری پسرو (backward) استفاده می‌شود و شیب در دو راستای عمود بر هم با تقریب بدین‌صورت بیان می‌شود:

$$\Delta x \frac{\partial \Delta T(x, y, 0, t)}{\partial x} \approx \Delta T(x + \Delta x, y, 0, t) - \Delta T(x, y, 0, t) \quad (\text{الف}-\lambda)$$

$$\Delta y \frac{\partial \Delta T(x, y, 0, t)}{\partial y} \approx \Delta T(x, y + \Delta y, 0, t) - \Delta T(x, y, 0, t) \quad (\text{ب}-\lambda)$$

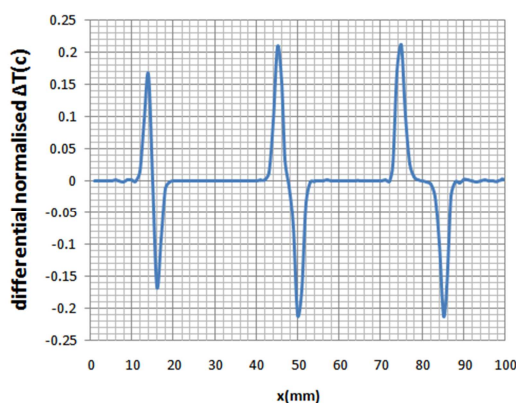
که $\Delta T(x, y, 0, t)$ مقدار تغییر درجه حرارت در گرهِ‌ای از سطح فوقانی نمونه است. مشتق اختلاف دمایی در راستای محورهای x و y محاسبه می‌شود که در شکل ۴ نشان داده شده است. شکل ۱۶-الف شیب اختلاف دمایی در جهت محور x روی عیوب با اندازه مختلف در عمق ۰/۶ میلی‌متر را نشان می‌دهد. نواحی سالم تغییرات دمایی ندارد و شیب حرارتی آنها صفر است ولی وقتی مسیرهای انتخابی وارد سطح بالای ناحیه معیوب می‌شود شیب حرارتی تغییر قابل توجهی دارد.

موضوع در شکل ۱۴-الف و ب برای عیب ۱۰ میلی‌متر به‌ترتیب در عمق‌های ۰/۶ و ۰/۹ میلی‌متری نشان داده شده است به‌طوری‌که عیبی که در عمق بیشتر قرار دارد افزایش ابعاد بیشتری دارد 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. موضوع دیگری که در تعیین ابعادی جدایش بین لایه‌ای باید در نظر گرفته شود تغییر ضریب هدایت حرارتی داخل صفحه‌ای در راستای مختلف مواد مرکب است. ماده مرکب در راستای محور x که منطبق بر راستای الیاف است هدایت حرارتی کمتر از راستای دیگر در داخل صفحه است که این موضوع در شکل ۱۴-ب نشان داده شده است. پس طول ناحیه دارای افزایش درجه حرارت، در راستای الیاف کمتر است. ارتباط طول ناحیه‌ی دارای تغییر درجه حرارت و طول ناحیه‌ی جدایش بین لایه‌ای با استفاده از نمودار درجه حرارت در راستای دو محور x و y (که در شکل ۲ نشان داده شده است) بررسی می‌شود. محور x که از سطوح فوقانی ورق چند لایه عبور می‌کند برای بررسی اثر تغییر درجه حرارت در عیوب با ابعاد مختلف و در عمق یکسان ۰/۶ میلی‌متر استفاده می‌شود که شکل ۱۵-الف نمودار تغییر درجه حرارت در راستای این مسیر را نشان می‌دهد. عیوب بزرگ‌تر دارای افزایش درجه حرارت بیشتر و پهنای بیشتر ناحیه‌ی دارای تغییر درجه حرارت است و اگر طول عیوب براساس طول قسمت دارای افزایش درجه حرارت تعیین شود ابعاد بیشتری برای ناحیه‌ی جدایش بین لایه‌ای تعیین می‌شود شکل ۱۵-ب تغییر درجه حرارت را در مسیر y نشان می‌دهد که از سطح فوقانی ورق و نواحی دارای افزایش حرارت دمایی ناشی از عیب با اندازه ۵ میلی‌متر و سه عمق مختلف عبور می‌کند. با بیشتر شدن عمق عیب تغییرات دمایی روی سطح کمتر می‌شود ولی طول آن زیاد می‌شود. پس برای تعیین ابعاد دقیق عیوبی که در عمق بیشتری قرار دارند بررسی اثر انتشار حرارتی داخل صفحه ضروری است.

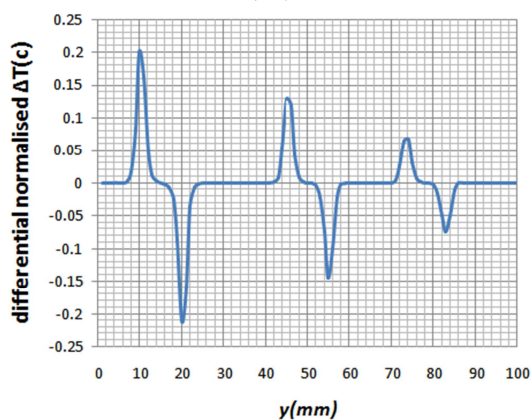
استفاده از شیب حرارتی بر روی سطح جسم یکی از روش‌های مناسب برای تعیین اندازه عیب است. برای این منظور اختلاف دمای دو گرهِ مجاور هم محاسبه می‌شود که اگر تقسیم بر فاصله بین دو نقطه شود بیانگر تقریبی از شیب حرارتی در داخل صفحه است. شیب حرارتی داخل صفحه‌ای را می‌توان برای دو راستای عمود بر هم و در راستای محورهای x و y در داخل صفحه محاسبه کرد.

۳-۷- زمان مناسب برای تحلیل نتایج ترموگرافی

دمای سطحی در آزمایش ترموگرافی با زمان تغییر می‌کند و تعیین زمانی که منجر به کسب نتایج دقیق‌تری برای شناسایی موقعیت و ابعاد ناحیه‌ی جدایش بین‌لایه‌ای می‌شود اهمیت زیادی در این روش آزمایش دارد. شار حرارتی پالسی که از سطح جسم وارد می‌شود با توجه به خواص ماده، منجر به تغییر دمای سطح و انتشار انرژی حرارتی به داخل جسم می‌شود و در صورتی که مانعی در برابر انتشار شار حرارتی وجود داشته باشد قسمتی از انرژی حرارتی به سطح جسم برمی‌گردد که موجب تغییر درجه حرارت در مقایسه با نواحی سالم می‌شود.



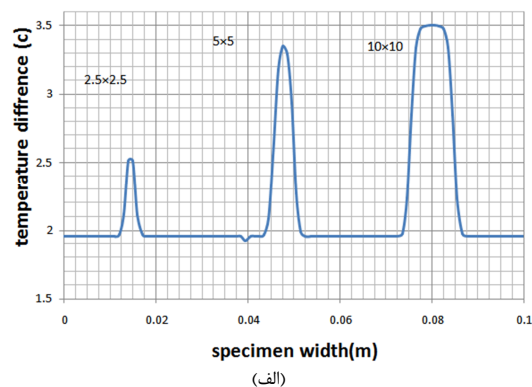
(الف)



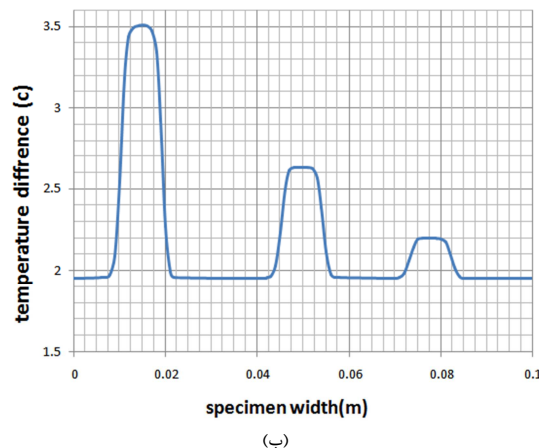
(ب)

شکل ۱۶- شیب اختلاف دمایی (الف) در جهت محور X روی عیوب با ابعاد مختلف و در عمق ۰/۶ میلی‌متر (ب) در جهت محور Y روی عیوب ۱۰ میلی‌متر و در سه عمق‌های مختلف

برای تعیین میزان تغییر درجه حرارت روی سطح جسم ناشی از شار حرارتی اولیه و شار حرارتی برگشتی، دو مسیر در جهت ضخامت مطابق شکل ۱۷ در نظر گرفته می‌شود که نتایج تحلیل حرارت در زمان‌های مختلف بر روی این دو مسیر نشان داده می‌شود. مسیر اول و دوم به ترتیب از نواحی سالم و دارای جدایش بین‌لایه‌ای عبور می‌کند.



(الف)



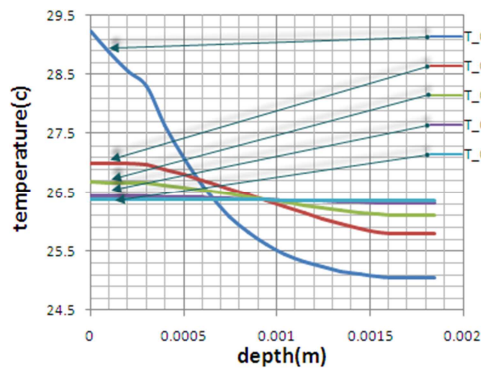
(ب)

شکل ۱۵- تغییرات دمایی در زمان ۳۰ میلی‌ثانیه در (الف) عیوب با ابعاد مختلف و در عمق ۰/۶ میلی‌متر (ب) عیوب ۱۰ میلی‌متری به ترتیب از چپ به راست در سه عمق ۰/۶، ۰/۹ و ۱/۲ میلی‌متری

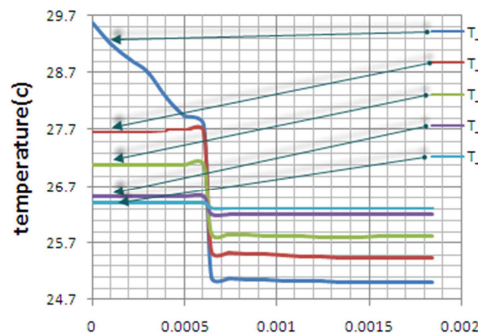
از آنجاکه درجه حرارت در وسط عیب به بیشترین مقدار خود می‌رسد همان‌طور که نشان داده شده است شیب آن در وسط عیب صفر است ولی شیب آن در نیمی از آن مثبت و در نیمه‌ی دیگر دوم منفی است. حداکثر مقدار شیب در ناحیه‌ی مثبت و منفی با هم برابرند و مقدار آن در عیوب با اندازه مختلف تغییر قابل توجهی ندارد.

شکل ۱۶- ب شیب اختلاف دمایی در راستای محور Y را نشان می‌دهد که این مسیر از ناحیه دارای افزایش حرارت ناشی از عیوب ۱۰ میلی‌متر و عمق‌های مختلف عبور می‌کند. افزایش عمق عیب موجب کاهش حداکثر مقدار شیب منحنی می‌شود ولی شکل نمودار بدون تغییر است. با استفاده از نمودارهای شکل ۱۶، فاصله‌ی بین بیشترین اختلاف شیب و کمترین اختلاف شیب تعیین می‌شود و این فاصله با اندازه‌ی عیب در راستای مسیر مقایسه می‌شود. همان‌طور که در نمودارها مشخص است این فاصله با اندازه‌ی عیب برابر است و با این روش می‌توان با دقت مناسبی ابعاد عیوب جدایش بین‌لایه‌ای را تعیین نمود. مرکز عیب در موقعیتی قرار دارد که منحنی شیب دمایی در محل بین بیشترین و کمترین اختلاف شیب، محور افقی را قطع می‌کند. با توجه به شکل ۱۶ نتیجه می‌شود این روش برای عیوب با اندازه‌ی و عمق مختلف نتایج دقیقی را ارائه می‌کند.

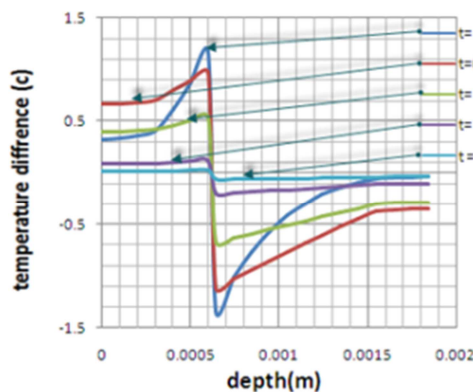
می‌شود. مقدار شار حرارتی در مسیر سالم پس از گذشت زمان ۰/۰۲ ثانیه به داخل جسم منتقل شده است و در وسط ضخامت به بیشترین مقدار خود می‌رسد در صورتی که در جسم معیوب شار حرارتی بین سطح ورود شار و ناحیه‌ی جدایش بیشترین مقدار را دارد.



(الف)



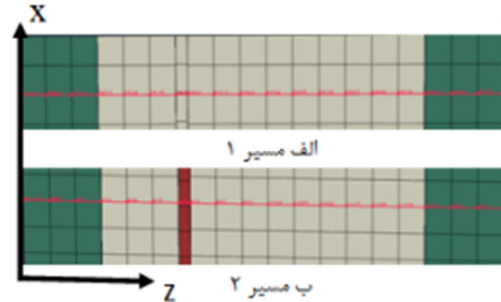
(ب)



(ج)

شکل ۱۸- (الف) توزیع دمای مسیر سالم (ب) توزیع دمای مسیر عبوری از ناحیه‌ی جدایش (ج) اختلاف دمای بین مسیرهای دارای جدایش و سالم

با گذشت زمان قسمت عمده‌ای از انرژی حرارتی در جسم معیوب به علت سرمایش از سطح کاهش می‌یابد بدون آنکه انرژی حرارتی وارد جسم شود. بنابراین در صورتی که ضریب هدایت حرارتی کمی در سطح ایجاد شود می‌توان نتایج بهتری در ترموگرافی



شکل ۱۷- مسیر در جهت ضخامت روی نواحی (الف) سالم (ب) معیوب

شکل ۱۸- الف و بتوزیع دما در جهت ضخامت را به ترتیب بر روی مسیر اول و دوم و شکل ۱۸- ج اختلاف دمایی بین این دو مسیر را نشان می‌دهد. مطابق باشکله ۱۸- الف، ورود شار حرارتی پالسی در لحظه‌ی اولیه موجب افزایش دمای سطح نمونه شده که با گذشت زمان و با انتشار انرژی حرارتی، دما نقاط دیگر افزایش می‌یابد و توزیع دمای یکسانی در کل ضخامت ایجاد می‌شود. توزیع دمایی در مسیر نواحی سالم در جهت ضخامت با شیب ملایم تغییر می‌کند و در این مسیر تغییرات دمایی در زمان‌های ۰/۰۸ ثانیه و بالاتر ناچیز و به حالت پایدار رسیده است. شکستگی در عمق ۰/۳ میلی‌متری به دلیل تغییر خواص ماده از آلومینیم به ماده‌ی مرکب و به علت پایین بودن ضریب انتقال حرارت ماده‌ی مرکب نسبت به آلومینیم است. شار حرارتی در ورق دارای جدایش بین لایه‌ای به علت وجود عیب به مقدار ناچیزی از قسمت معیوب عبور می‌کند و دما بالاتری در قسمتی از ماده بین سطح ورود شار حرارتی و نواحی جدایش بین لایه‌ای مطابق باشکله ۱۸- ب در مدت زمان بیشتری مشاهده می‌شود زیرا این نواحی به صورت عایق عمل کرده و از نفوذ حرارتی جلوگیری می‌کند. مشابه با جسم سالم در زمان‌های بیشتر از ۰/۱۲ ثانیه و به علت انتقال شار حرارتی ناشی از همرفت از سطوح جسم و رسانش به نقاط دیگر، دما یکسانی در کل ضخامت ایجاد می‌شود. اختلاف درجه حرارت در دمای سطحی جسم سالم و معیوب که در شکل ۱۸- ج آورده شده است اهمیت زیادی دارد. تغییرات دما در جسم معیوب در بین سطح جسم و ناحیه‌ی معیوب در مقایسه با نواحی دیگر بعد از عیب اختلاف قابل توجهی دارد ولی با گذشت زمان و به تدریج نواحی دیگر تغییر دما داده و در زمان بیشتر از ۰/۱۲ ثانیه، درجه حرارت یکسانی در کل ضخامت ایجاد می‌شود. نکته قابل توجه این است که اختلاف دمای سطح تا عمق ۰/۵ میلیمتر در لحظه ۰/۰۲ ثانیه بیشتر از دمای ۰/۰۱ است که به علت برگشت شار حرارتی از ناحیه‌ی جدایش بین لایه‌ای به سمت سطح ورق است.

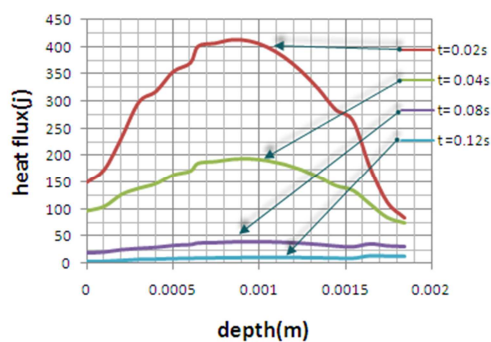
نمودار شار حرارتی در مسیر سالم و دارای جدایش بین لایه‌ای برای بررسی بیشتر به ترتیب در شکل ۱۹- الف و ب نشان داده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود وجود جدایش بین لایه‌ای به عنوان عایق عمل نموده و موجب تأخیر در عبور شار حرارتی

بسیار کم است و سطح وسیعی از قطعه را می‌توان بدون جداسازی از تجهیزات ارزیابی نمود. نتایج تحلیل برای ورق مرکب چند لایه نشان داد با توجه به دقت دوربین‌های ترموگراف موجود برای ثبت دما می‌توان از این روش برای شناسایی عیوب کوچک تا ابعاد ۲٫۵ میلی‌متر و تا عمق ۱٫۲ میلی‌متر استفاده کرد. در صورتی که ضریب هدایت حرارتی سطح ورود انرژی در ترموگرافی نوری کم باشد نتایج بهتری از آزمایش قطعات به دست می‌آید زیرا شار حبس‌شده بین سطح ورود انرژی و عیوب در مدت زمان بیشتری درجه حرارت سطح بالای عیوب را در دمای بالاتری نگه می‌دارد.

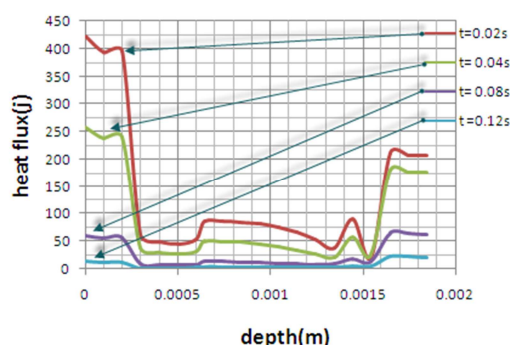
مراجع

- [1] O'Brien T. K., "Development of a composite delamination fatigue life prediction methodology", NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, USA, 2009.
- [2] Yang B., Huang Y., and Cheng L., "Defect detection and evaluation of ultrasonic infrared thermography for aerospace CFRP composites", Infrared Physics and Technology, vol. 60, pp. 166-173, 2013.
- [3] Mabrouki F., Genest M., Shi G., and Fahr A., "Numerical modeling for thermographic inspection of fiber metal laminates", NDT&E International, vol. 42, no. 7, pp. 581-588, 2009.
- [4] Junyan L., Liqiang L., and Yang W., "Experimental study on active infrared thermography as a ndi tool for carbon-carbon composites", Composites Part B: Engineering, vol. 45, no. 1, pp. 138-14, 2013.
- [5] Pickering S., and Almond, D., "Matched excitation energy comparison of the pulse and lock-in thermography nde techniques", NDT & E International, vol. 41, no. 7, pp. 501-509, 2008.
- [6] Meola C., Carlomagno G. M., Squillace A., and Vitiello A., "Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography", Engineering Failure Analysis, vol. 13, no. 3, pp. 380-388, 2006.
- [7] Zweschper Th., Salerno A., and Busse G. "Inspection of aerospace structures with ultrasound lock-in-Thermography", Proceedings of the 15th World Conference on Nondestructive Testing, Roma, Italy, 2000.
- [8] Lahiri B. B., Bagavathiappan S., Reshmi P. R., Philip J., Jayakumar T., and Raj B., "Quantification of defects in composites and rubber materials using active thermography", Infrared Physics & Technology, vol. 55, no. 2-3, pp. 191-199, 2012.

کسب کرد زیرا شار حبس‌شده بین سطح ورود انرژی و عیب در مدت زمان بیشتری درجه حرارت سطح بالای عیب را در دمای بالاتر نگه می‌دارد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۹- شار حرارتی مسیر عبوری از الف) نواحی سالم ب) ناحیه‌ی جدایش در زمان‌های مختلف

۸- نتیجه گیری

شبیه‌سازی ترموگرافی نوری نشان می‌دهد با اعمال پالس حرارتی به یک سطح از ورق ماده مرکب و با تحلیل توزیع درجه حرارت می‌توان موقعیت و ابعاد نواحی دارای جدایش بین‌لایه‌ای را در مواد مرکب شناسایی نمود. ابعاد عیب با توجه به سطح دارای افزایش دما ارزیابی می‌شود که مقدار مساحت محدوده‌های دارای افزایش دما با توجه به انتقال حرارت داخل صفحه‌ای از مساحت عیوب بزرگ‌تر است که با توجه به ضریب هدایت حرارتی می‌توان ابعاد قسمت‌های دارای افزایش دما را اصلاح نمود تا ابعاد نواحی جدایش بین‌لایه‌ای تخمین زده شود. استفاده از شیب حرارتی در سطح نمونه روش مناسبی برای تعیین دقیق اندازه عیوب است و نتایجی که با این روش به دست می‌آید مستقل از عمق عیوب، ابعاد دقیقی را تعیین می‌کند. تحلیل پاسخ پالسی ترموگرافی نوری نشان می‌دهد افزایش کمی در دمای سطحی قطعه ایجاد می‌شود و بدون ایجاد عیوب ناشی از افزایش درجه حرارت می‌توان موقعیت و ابعاد عیوب را با تحلیل گرادیان حرارتی در سطح ورود انرژی شناسایی کرد. مدت زمان لازم برای داده‌برداری در این روش با توجه به سرعت بالای امواج حرارتی