



تحلیل پاسخ حرارتی آزمایش ترموگرافی متناوب برای شناسایی جدایش بین لایه‌ای مواد مرکب

جعفر صفری چایکندی^۱ و محمد طاهای ابدی^{۲*}

^۱ کارشناسی ارشد، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

^۲ دانشیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۰۱/۲۳؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۵/۰۲/۲۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۰۵/۰۲

چکیده

در این مقاله عیوب جدایش بین لایه‌ای در مواد مرکب با تحلیل پاسخ گذرای حرارتی ایجاد شده در روش آزمایش غیرمخرب ترموگرافی نوری متناوب شناسایی می‌شود. این تحلیل برای ورق ماده مرکب چند لایه دارای عیوب با ابعاد و عمق مختلف استفاده می‌شود که تحت اثر بار حرارتی متناوب از یک سطح آن است. انتشار امواج حرارتی در ضخامت ورق ناشی از حرارتی‌دهی یک سطح در نواحی سالم و معیوب شبیه‌سازی می‌شود و اختلاف دامنه و فاز امواج حرارتی در نواحی سالم و معیوب تعیین می‌شود. اختلاف فاز امواج برگشتی از داخل نمونه حساسیت بیشتری به وجود عیب در مقایسه با اختلاف دامنه امواج حرارتی دارند. نتایج تحلیل نشان می‌دهد اختلاف فاز بین نواحی سالم و معیوب با افزایش فرکانس حرارتی تا حد معینی افزایش می‌یابد و از این شبیه‌سازی فرکانس بهینه برای شناسایی عیوب تعیین می‌گردد. همچنین نتایج تحلیل نشان می‌دهد مقدار لگاریتمی اختلاف فاز نسبت به عمق عیب به صورت خطی تغییر می‌کند. بنابراین از اختلاف فاز امواج می‌توان برای تعیین عمق عیوب استفاده نمود. نتایج این شبیه‌سازی برای تعیین بهینه متغیرهای انجام آزمایش ترموگرافی به منظور شناسایی دقیق محل عیوب جدایش بین لایه‌ای قابل استفاده است.

کلمات کلیدی: ترموگرافی نوری متناوب؛ جدایش بین لایه‌ای؛ مواد مرکب؛ تحلیل حرارتی گذرا.

Thermal Response Analysis of Lock-in Thermography Test to Identify the Delamination in Composite Materials

J. Safari Chaykandi¹, M. Tahaye Abadi^{2,*}

¹Researcher, Aerospace Reseach Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran.

² Associatie Professor, Aerospace Reseach Institute, Ministry of Science, Research and Technology, Tehran, Iran.

Abstract

The delamination defects in the laminated composite structures are detected using the transient response analysis in the lock-in thermography test. The analysis procedure is implemented for a laminated composite plate subjected to harmonic heat flux in the top surface. The plate has some delamination defects with different sizes and locations. The thermal wave propagation due to heat loading is simulated in the plate thickness along the healthy and defective regions and the amplitude and phase differences are determined in such regions. The phase difference of reflected waves is more sensitive to the defects than the amplitude variation of the thermal waves. The results show that the phase difference between reflected waves from healthy and defective regions increases up to a specific frequency value and the optimum frequency is determined using the present simulation. The results also show that the logarithmic phase difference depends linearly on the depth of delamination and such dependency can be used to determine the defect depth. The simulation results of lock-in thermography test are used to determine the optimum parameters required to detect the delamination in the laminated composite materials.

Keywords: Lock-in Thermography; Delamination; Composite Materials; Transient Thermal Analysis.

۱- مقدمه

در حال حاضر کنترل کیفیت محصولات در صنایع مختلف مانند هوافضا، خودروسازی، وسایل الکترونیکی پرهزینه و بسیار بااهمیت است. در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای کاهش هزینه و افزایش اطمینان در بازرسی قطعات مختلف صنعتی شده است که با توجه هزینه‌های بالای مواد و فرآیندهای ساخت، آزمایش‌های غیرمخرب اهمیت زیادی در مقایسه با روش‌های دیگر کنترل کیفی دارند. روش ترموگرافی فعال برای بازرسی غیرمخرب به دلیل ارزیابی سریع کیفیت و دقت زیاد نتایج ارزیابی بسیار رایج شده است. اساس این روش تشعشع امواج الکترومغناطیس از اجسام در دمای بالای صفر کلویین است که این تشعشع توسط یک دوربین ترموگرافی دریافت و توسط پردازنده تحلیل می‌شود. توزیع درجه حرارت قطعات را می‌توان با استفاده از روش‌های پردازش تصویر تحلیل و ارزیابی کرد تا بدون وابستگی به دقت کاربر، براساس تغییرات دمایی در نواحی مختلف قطعات اطلاعات مفیدی از وضعیت عیوب در قطعات بدست آورد. نواحی خاصی از قطعات که تغییرات دمایی متفاوت با دیگر قسمت‌ها داشته باشد نشان دهنده تغییر در مواد نمونه یا عیوب هندسی و در نتیجه تغییر در کیفیت محصول است. جدایش بین لایه‌ای یکی از عیوب رایج در مواد مرکب است که با افزایش سطح بارگذاری گسترش یافته و موجب شکست وسایل و تجهیزات می‌گردد. این عیوب بیشتر در لبه‌های آزاد، کاهش ضخامت لایه‌ها در سطوح داخلی یا خارجی و لبه‌ی بیرون زده از پوسته یا تقویت‌کننده‌ها به وجود می‌آید [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.

روش‌های آزمایش غیرمخرب رایج برای شناسایی عیوب شامل بازرسی چشمی، بازرسی با مایع نافذ، آزمایش رادیوگرافی و آزمایش مافوق صوت است. در روش‌های بازرسی چشمی و بازرسی با مایع نافذ فقط عیوب سطحی شناسایی می‌گردد در صورتی که با روش رادیوگرافی و مافوق صوت می‌توان عیوب داخل جسم را شناسایی کرد. از مشکلات روش آزمایش رادیوگرافی می‌توان به الزام دسترسی دو سطح قطعات برای انجام آزمایش و آسیب به کاربران در بلند مدت به دلیل استفاده از اشعه ایکس یا گاما اشاره کرد.

انجام آزمایش‌های رادیوگرافی و مافوق صوت در محل استفاده قطعات مشکل است و معمولاً این آزمایش‌ها پس از جداسازی قطعات و در محل آزمایشگاه انجام می‌شود. روش ترموگرافی علاوه بر شناسایی عیوب سطحی و داخلی قطعه، انجام آزمایش در محل استفاده قطعات را امکان‌پذیر می‌سازد و سلامت کاربران در اجرای این آزمایش تهدید نمی‌شود. ترموگرافی که برای شناسایی عیوب در مواد مرکب قابل استفاده است به دو نوع ترموگرافی فراصوتی^۱ و ترموگرافی نوری تقسیم‌بندی می‌شود. در ترموگرافی فراصوت قطعه با استفاده از عملگر پیزوالکتریک 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. ترموگرافی نوری با اعمال امواج حرارتی به سطح قطعه مورد آزمون انجام می‌گردد که امواج حرارتی به دو صورت پالسی و متناوب است؛ در ترموگرافی فراصوت تحریک سازه با فرکانس مشخص مشکل بوده و شرایط تکیه‌گاهی بر دقت نتایج تأثیر قابل توجهی دارند. در ترموگرافی نوری آزمایش قطعه به صورت یکپارچه و با دسترسی به یک طرف قطعه انجام می‌شود و برای تمام مواد مرکب و متخلخل قابل اجرا است. این مزایا و سهولت استفاده از آزمایش ترموگرافی موجب شده است این روش در صنایع مختلف مورد توجه بیشتر پژوهشگران و صنعتگران شود.

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 و همکارانش [۲] با مطالعه‌ی آزمایشگاهی، عیوب با ابعادهای مختلف را در عمق‌های مختلف شناسایی کردند. آنها نشان دادند با استفاده از ترموگرافی پالسی عیوب را تا ابعاد 3×3 میلی‌متر مربع در عمق 0.6 میلی‌متر و عیوب تا ابعاد 10×10 میلی‌متر مربع را در عمق $1/65$ میلی‌متر قابل شناسایی است. جون‌یان^۲ و همکارانش [۳] مطالعه‌ی آزمایشگاهی را با استفاده از

¹ Ultrasonic Thermography² Junyan

مشخص کنند. آنها برای ایجاد عیوب جدایش بین لایه‌ای در مواد مرکب، ورق‌های نازک تفلونی را بین لایه‌ها جایگذاری کردند و با روشن کردن لامپ‌های هالوژنی در نزدیک سطح مواد مرکب، گرمایش مورد نیاز را تأمین کردند. سپس با دوربین ترموگراف دمای سطح را تصویربرداری کردند و با مقایسه‌ی توزیع دمایی قطعات سالم و معیوب موفق به تشخیص نواحی جدایش بین لایه‌ای شدند. سپس مراحل عیب‌یابی را با استفاده از نرم افزار المان محدود شبیه سازی کردند. بدین ترتیب که مدلی سه بعدی چند لایه را ایجاد کرده در نواحی دارای جدایش بین لایه‌ای اتصال حرارتی برقرار کرده و انتقال حرارت گذرا را در جسم تحلیل کردند. آنها نشان دادند نتایج تحلیل عددی با نتایج آزمایشگاهی تطابق بسیار مناسبی دارند و توانستند عمق عیب را با این روش تعیین کنند. کریشنندو^۶ و همکارانش [۹] عیوب در عمق‌های مختلف را با استفاده از روش پالسی و متناوب شناسایی نمودند. آنها برای شناسایی عیوب در ترموگرافی متناوب اثر فرکانس‌ها را بررسی کردند و همچنین نسبت سیگنال به خطا را محاسبه کرده و مشاهده کردند این مقدار در روش پالسی در عمق‌های کمتر بیشتر بوده و مقدار آن با افزایش عمق کمتر می‌شود.

ترموگرافی نوری علاوه بر کاربرد در مواد مرکب، در کنترل کیفی فلزات نیز استفاده شده است. چویی^۷ و همکارانش [۱۰] عیوب با قطر و عمق‌های مختلف در یک صفحه‌ی فولادی را از مطالعه‌ی عددی و آزمایشگاهی با استفاده از عکس فاز ترموگرافی نوری متناوب شناسایی نمودند. این آزمایش برای فرکانس‌های مختلف انجام شده و فرکانس بهینه برای شناسایی این عیوب محاسبه شد. زی‌زنگ^۸ و همکارانش [۱۱] عیوب در عمق‌های مختلف قطعات فولادی را با استفاده از ترموگرافی نوری به روش پالسی شناسایی نمودند. آنها در عمق‌های مختلف سوراخ ایجاد کرده و این سوراخ‌ها را با چهار مواد نفت، هوا، آب و موم پر نمودند. سپس تغییرات دمایی روی سطح را بررسی نموده و مشاهده کردند با افزایش ضریب انعکاس، تغییرات دمایی

ترموگرافی نوری به روش پالسی و متناوب برای ماده مرکب دارای الیاف کربن با بار حرارتی مختلف و فرکانس‌های مختلف انجام دادند و عیوب با ابعاد مختلف را در عمق‌های مختلف شناسایی کردند. پیکرینگ^۱ و همکارانش [۴] عیوب با قطرهای مختلف را در عمق‌های مختلف در ماده مرکب دارای الیاف کربن 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. مئولاکاروسنا^۲ و همکارانش [۵] با استفاده از ترموگرافی نوری متناوب، عیوب با قطرهای معادل مختلف در ماده مرکب با الیاف کربن را در فرکانس‌های مختلف با استفاده از مطالعه‌ی آزمایشگاهی شناسایی کردند. وو^۳ و همکارانش [۶] عیوب موجود در ماده مرکب کربن- اپوکسی را با استفاده از ترموگرافی نوری متناوب در دو فرکانس مختلف 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 شناسایی شدند. آنها این روش را در یک سیستمی که شامل تعدادی پیچ بود بکار بردند و پیچ‌هایی که شل شده شناسایی شدند. لاهیری^۴ و همکارانش [۷] با استفاده از ترموگرافی نوری پالسی و متناوب عیوب را در مواد مرکب با الیاف کربن، لاستیک با چگالی مختلف و آلومینیم دارای عیوب در عمق و ابعادهای مختلف با فرکانس‌های مختلف شناسایی نمودند. آنها فرکانس بهینه تحریک را در ترموگرافی متناوب برای نمونه‌های مختلف به صورت آزمایشگاهی تعیین نمودند و مشاهده کردند با افزایش عمق عیب، اختلاف فاز بین تحریک و پاسخ حرارتی افزایش می‌یابد در حالی که اختلاف دما کاهش دارد. ویجایارا^۵ و همکارانش [۸] با استفاده از ترموگرافی نوری توانستند عیوب جدایش بین لایه‌ای را در لوله‌های چندلایه

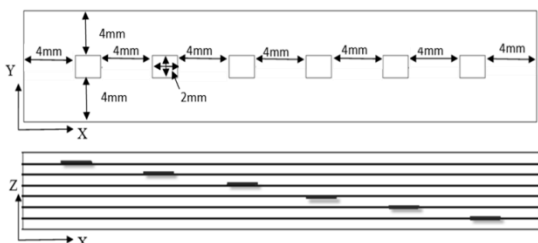
¹ Pickering² Meola³ Wu⁴ Lahiri⁵ ViJayaraghavan⁶ Krishnendu⁷ Choi⁸ Zhi Zeng

برای تحلیل پاسخ گذاری ماده مرکب از لحظه‌ی شروع اعمال بارگذاری حرارتی متناوب تا زمان لازم برای دستیابی به پاسخ پایا، یک مدل از ورق ماده مرکب ۷ لایه با لایه‌هایی از جنس اپوکسی تقویت‌شده با الیاف شیشه وزمینه اپوکسی مطابق با شکل ۲ ایجاد می‌شود که ورق به صورت مستطیلی شکل با ابعاد 40×10 میلی‌متر مربع و با عیوب در عمق‌های مختلف است. ضخامت کل نمونه $4/25$ میلی‌متر و ضخامت عیوب 50 میکرومتر است.

سطح فوقانی ورق ماده مرکب تحت اثر مستقیم شار حرارتی متناوب است که دامنه‌ی آن در کلیه نقاط این سطح ثابت و برابر با 750 وات بر متر مربع است در صورتی که کلیه سطوح خارجی دیگر ورق ماده مرکب تحت اثر هدایت حرارت همرفتی است که موجب خروج انرژی گرمایی تریق شده به ورق می‌شود به طوری که پس از گذشت زمان معینی، میزان انرژی گرمایی وارد شده از سطح فوقانی برابر با انرژی گرمایی خروجی از دیگر سطوح شده و توزیع دمای پایایی در ورق ایجاد می‌شود. ضریب هدایت حرارت همرفتی 15 وات بر متر مربع بر درجه سانتی‌گراد و دمای سیال اطراف ورق با دمای اولیه آن برابر و مقدار آن 25 درجه سانتی‌گراد در نظر گرفته می‌شود.

چگالی و خواص حرارتی ماده مرکب و ورق نازک تفلونی

در



شکل ۲- موقعیت عیوب به ترتیب از چپ در عمق‌های

$0/6, 1/2, 1/8, 2/4, 3$ و $3/6$ میلی‌متر از سطح بالا

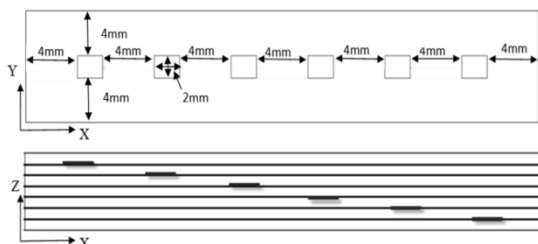
جدول ۱ ارائه شده است. ماده مرکب اپوکسی - شیشه در دستگاه مختصات اصلی دارای سه صفحه تقارن است و به صورت ماده ارتوتروپیک عمل می‌کند که ضریب هدایت حرارتی آن با سه ثابت مطابق با جدول ۲ توصیف می‌شود. در این جدول ضریب نفوذ گرمایی معیاری از توانایی ماده در رسانش گرما درمقیاسه با ذخیره انرژی گرمایی در آن ماده است. این کمیت فیزیکی بیان‌گر نسبت گرمای عبور کرده به گرمای ذخیره شده توسط واحد حجم ماده است.

افزایش می‌یابد و زمان رسیدن به بیشترین تغییرات دمایی نیز با افزایش ضریب انعکاس بیشتر می‌شود.

هدف از این مقاله تحلیل پاسخ گذاری حرارتی مواد مرکب دارای جدایش بین‌لایه‌ای در آزمایش ترموگرافی نوری متناوب است تا علاوه بر ارزیابی عملکرد این روش در شناسایی عیوب جدایش بین‌لایه‌ای در مواد مرکب، متغیرهای مؤثر بر دقت نتایج را شناسایی و بهینه نمود. 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. برای حل معادلات انتقال حرارت از حل عددی به روش تحلیل اجزای محدود استفاده می‌شود که عیوب مختلف در عمق‌های مختلف سازه بررسی می‌شود. در این مقاله ابتدا با تعریف مسئله و تئوری حاکم بر ترموگرافی نوری، روشی برای تحلیل پاسخ حرارتی نمونه‌ی ماده مرکب دارای جدایش بین‌لایه‌ای و نحوه اعمال روش ترموگرافی توضیح داده می‌شود. سپس با ارائه نتایج شبیه‌سازی، اثر عمق عیب بر تغییرات زمانی دمای سطحی و خواص ناهمسانگرد ماده بر تصاویر حرارتی توضیح داده می‌شود.

۲- تعریف مسئله

روش ترموگرافی نوری متناوب برای شناسایی عیوب در عمق‌های مختلف ماده مرکب چند لایه استفاده می‌شود. در این روش شار حرارتی متناوب به یک سطح ورق ماده مرکب دارای جدایش بین‌لایه‌ای در لایه‌های مختلف و با ابعاد مختلف اعمال می‌شود. نمونه آزمایشگاهی مطابق با شکل ۱ تحت اثر موج حرارتی ناشی از روشن و خاموش شدن متناوب لامپ‌های هالوژنی قرار می‌گیرد و دمای سطحی ورق توسط دوربین اندازه‌گیری و ثبت می‌شود. معمولاً در مطالعات آزمایشگاهی لایه‌ی نازک تفلونی در حین ساخت ماده مرکب برای ایجاد جدایش بین‌لایه‌ای در نواحی مورد نظر قرار داده می‌شود. فرکانس و شدت نور با استفاده از ولتاژ الکتریکی اعمالی به لامپ‌ها کنترل می‌شود و دمای سطحی با استفاده از روش‌های پردازش تصویر برای شناسایی عیوب ارزیابی می‌شود.



شکل ۲- موقعیت عیوب به ترتیب از چپ در عمق‌های ۰/۶، ۱/۲، ۱/۸، ۲/۴، ۳ و ۳/۶ میلی متر از سطح بالا

جدول ۱- خواص فیزیکی مواد [۲]

نوع ماده	اپوکسی- شیشه	تفلون
ضریب هدایت حرارت (w/mc)	-	۰/۱۹۵
ظرفیت گرمایی ویژه (J/kg/°C)	۸۴۰	۱۱۷۲
چگالی (kg/m³)	۱۹۶۰	۲۱۵۰

جدول ۲- خواص حرارتی ماده مرکب اپوکسی- شیشه در دستگاه مختصات اصلی [۳]

محور دستگاه مختصات	X	Y	Z
ضریب نفوذ حرارتی (mm²/s)	۶/۳	۲۳/۳	۲۳/۳
ضریب هدایت حرارت (w/mc)	۱۰/۴	۳۸/۳	۳۸/۳

۳- معادلات حاکم بر پاسخ ترموگرافی نوری

سطح نمونه با شار حرارتی متناوب در این روش ترموگرافی نوری حرارت داده می‌شود و هم‌زمان با اعمال شار حرارتی، تغییرات دمایی سطح با استفاده از دوربین ترموگرافی ثبت می‌شود. شار حرارتی که در زمان تحلیل گرمایش وارد ورق مرکب می‌شود موجب گرادیان حرارتی در جسم می‌شود که با توجه به ضریب هدایت حرارتی می‌توان ارتباط بین شار حرارتی و گرادیان حرارتی را بدین صورت بیان کرد:

$$\vec{q} = -\mathbf{K} \cdot \nabla T \quad (2)$$

در این رابطه \vec{q} بردار شارحرارتی بر حسب وات بر متر مربع، \mathbf{K} تانسور ضریب هدایت گرمایی با واحد $\frac{w}{m^2K}$ ، ∇T بردار گرادیان دمایی است که در دستگاه مختصات کارتزین برابر است با:

$$\nabla T = \frac{\partial T}{\partial x} \vec{e}_x + \frac{\partial T}{\partial y} \vec{e}_y + \frac{\partial T}{\partial z} \vec{e}_z \quad (3)$$

\vec{e}_x ، \vec{e}_y و \vec{e}_z بردارهای یکه در راستای محورهای x ، y و z در دستگاه مختصات دکارتی و T مقدار دما است. مقدار تغییر دما در آزمایش ترموگرافی نوری مقدار قابل توجهی نیست و می‌توان با دقت مناسب فرض کرد مقدار ضریب

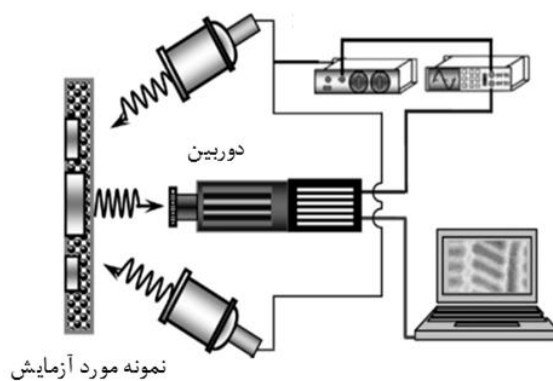
شکل ۲ ماده مرکب چند لایه دارای عیوب جدایش بین لایه‌های را نشان می‌دهد که ضخامت هر لایه از ماده مرکب ۰/۶ میلی‌متر است و عیوب جدایش بین لایه‌های به ابعاد ۲×۲ میلی‌متر مربع در موقعیت‌های مختلف و لایه‌های مختلف آن قرار می‌گیرد. عیوب به ترتیب در عمق‌های ۰/۶، ۱/۲، ۱/۸، ۲/۴، ۳ و ۳/۶ میلی‌متر از سطح بالا قرار دارد. الیاف در تمامی لایه‌ها موازی با محور x در نظر گرفته شده است.

سطح نمونه با استفاده از لامپ‌های حرارتی گرم می‌شود که مقدار شار حرارتی با زمان به صورت متناوب در این روش ترموگرافی تغییر داده می‌شود. مدت زمان گرم کردن سطح نمونه به حد کافی طولانی در نظر گرفته می‌شود تا توزیع دمای پایا در جسم مورد آزمون ایجاد شود. شار حرارتی ورودی به سطح قطعه را می‌توان بدین صورت بیان کرد:

$$q(x, y, 0, t) = \frac{q_{max}}{2} [1 + \cos(2\pi f t)] \quad (1)$$

که q_{max} حداکثر شار حرارتی، f فرکانس تغییرات زمانی شار حرارتی متناوب است. بار حرارتی q_{max} برابر با ۷۵۰ وات بر متر مربع با فرکانس‌های مختلف به سطح نمونه اعمال می‌شود و تغییرات دمایی سطح ورود شار حرارتی تا پایدار شدن تغییرات دمایی بررسی می‌شود.

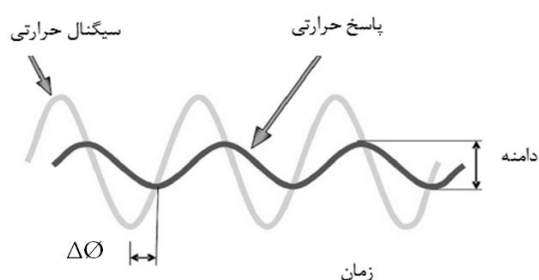
تصویر حرارتی از سطح جسم با استفاده از دوربین ترموگرافی تهیه می‌شود که معمولاً فرکانس داده‌برداری برای دوربین‌های معمولی بین ۴۰ تا ۶۰ هرتز (۴۰ تا ۶۰ عکس در ثانیه) می‌باشد [۲]. فرکانس داده‌برداری برای تحلیل نتایج در این تحقیق ۵۰ هرتز انتخاب می‌شود.



نمونه مورد آزمایش

شکل ۱- تجهیزات لازم برای انجام ترموگرافی نوری با اعمال بار حرارتی متناوب بر سطح قطعه [۳]

نسبت به یکدیگر دارند. شکل ۳ اختلاف فاز موج حرارتی برای تحریک سینوسی و پاسخ حرارتی سطح را نشان می‌دهد که دارای دامنه‌ی مختلف و اختلاف فاز نسبت به یکدیگر است. اختلاف دامنه دمای سطح ورود شار حرارتی در نواحی سالم و در نواحی بالای عیوب ناشی از وجود مقاومت حرارتی مختلف در مسیر انتقال حرارت است و از آنجا که طول مسیر انتشار موج حرارتی در راستای ضخامت برای نواحی سالم و معیوب مختلف است موج حرارتی در این نواحی نسبت به یکدیگر اختلاف فاز دارند. دمای ورق از یک دما ثابت و برابر محیط توسط شار حرارتی اعمالی به سطح آن تغییر داده می‌شود و برای ایجاد دمای پایا و متناوب در سطح ورق نیاز است مدت زمان معینی این شار متناوب به ورق وارد شود. بنابراین قبل از تحلیل نیاز است از ایجاد امواج حرارتی پایا در سطح ورق مطمئن شد. برای این منظور تبدیل فوریه گسسته تغییرات زمانی دمای سطح محاسبه می‌شود که در صورت پایا شدن دما سطح، مقدار دامنه‌ی تبدیل فوریه گسسته فقط در فرکانس تحریک مقدار معینی دارد و در فرکانس‌های دیگر مقدار دامنه‌ی آن ناچیز است. همچنین با استفاده از تبدیل فوریه گسسته می‌توان دامنه و اختلاف فاز موج حرارتی در ناحیه سالم و معیوب را تعیین کرد. با استفاده از داده‌های تغییرات دمایی، توزیع درجه حرارت و فاز امواج حرارتی برای کلیه نقاط سطح به دست می‌آید. از توزیع درجه حرارت سطحی و اختلاف فاز بین امواج ناحیه سالم و معیوب برای ارزیابی عیوب داخلی جسم استفاده می‌شود.



شکل ۳- اختلاف فاز شکل موج برای تحریک حرارتی سینوسی و پاسخ حرارتی سطح [۱۴]

در این تحقیق برای تعیین دامنه و اختلاف فاز از روش تبدیل فوریه گسسته و روش چهار نقطه‌ای برای هر دوره

هدایت حرارتی در معادلات حاکم ثابت است که مقدار آن بستگی به نوع ماده و راستای دستگاه مختصات در مواد مرکب دارد. تانسور ضریب هدایت گرمایی که بیان‌گر توانایی جسم در هدایت و عبور دادن انرژی گرمایی در راستای مختلف است در مواد ناهمسانگرد در حالت کلی ۹ مؤلفه دارند که این ضرایب را می‌توان به صورت ماتریسی بدین صورت نوشت:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{xx} & k_{xy} & k_{xz} \\ k_{yz} & k_{yy} & k_{yz} \\ k_{zx} & k_{zy} & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (۴)$$

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 می‌شود:

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & k_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & k_{zz} \end{bmatrix} \quad (۵)$$

ماده مرکبی که در این تحقیق در نظر گرفته می‌شود دارای تقویت‌کننده تک جهتی است و می‌توان آن را به صورت ماده 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 حاکم بر توزیع دما در هر نقطه از جسم و در زمان‌های مختلف بعد از حرارت‌دهی با استفاده از اصل بقای انرژی در مختصات دکارتی با ضریب هدایت ثابت بدین صورت بیان می‌شود:

$$k_{xx} \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k_{yy} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k_{zz} \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + g(x, y, z, t) = \rho c \frac{\partial T(x, y, z, t)}{\partial t} \quad (۶)$$

که g تابع مقدار نرخ انرژی داخلی تولیدی در واحد جرم، ρ چگالی، c ظرفیت گرمایی و t زمان است.

در ترموگرافی نوری متناوب، دمای جسم در نقاط مختلف سطح ورود شار حرارتی اندازه‌گیری می‌شود. اگر جسم دارای عیوب داخلی باشد توزیع دمای مختلفی در سطح بالای عیب در مقایسه با نواحی سالم ایجاد می‌شود. دمای جسم در نواحی سالم و معیوب به صورت متناوب تغییر می‌کند که فرکانس تغییرات دما در حالت پایا برابر با فرکانس شار حرارتی اعمالی به جسم است. تغییرات متناوب دمای سطحی در نواحی سالم و معیوب علاوه بر اختلاف دامنه، اختلاف فاز

که تابع atan2 مقدار زاویه را براساس تانژانت معکوس نسبت مقدار موهومی و حقیقی تبدیل فوریه و موقعیت آن در ربع دایره مثلثاتی محاسبه می‌کند. اگر پاسخ دمایی سطحی ورق تحت اثر شار حرارتی متناوب پایا باشد مقدار تبدیل فوریه در فرکانس تحریک دامنه آن مقدار معینی است و در فرکانس‌های دیگر مقدار دامنه آن با صرف‌نظر از خطای عددی، صفر است.

در صورتی که دمایی سطحی ورق براساس نتایج تحلیل فوریه پایا شود روش ساده‌ای برای محاسبه دامنه و فاز سیگنال متناوب دما وجود دارد که آن را روش چهار نقطه‌ای می‌نامند. در روش چهار نقطه‌ای برای محاسبه دامنه تغییرات متناوب دما و فاز سیگنال حرارتی از چهار نقطه با فاصله زمانی یک چهارم دوره تناوب استفاده می‌شود.

شکل ۴ روش انتخاب چهار نقطه را نشان می‌دهد که برای محاسبه فاز و دامنه در این روش به چهار داده با فاصله زمانی یکسان و در سه چهارم یک دوره تناوب نیاز است. اگر مقادیر تابع در این نقاط S_i باشد دامنه و فاز سیگنال حرارتی متناوب برابر است با [۳]:

$$\emptyset = \arctan\left(\frac{S_1 - S_3}{S_2 - S_4}\right) \quad (12)$$

$$A = \sqrt{(S_1 - S_3)^2 - (S_2 - S_4)^2} \quad (13)$$

که A و \emptyset به ترتیب دامنه و فاز سیگنال حرارتی است.

تغییرات دمایی سطح هم‌زمان با گرمایش سطح در روش ترموگرافی نوری متناوب ثبت می‌شود و زمانی که تغییرات دمایی روی سطح به حالت پایا می‌رسد با استفاده از روش چهار نقطه‌ای اختلاف فاز بین سیگنال حرارتی در منطقه سالم و معیوب به دست می‌آید. برای مشخص کردن قابلیت توانایی استفاده از اختلاف فاز برای شناسایی جدایش بین‌لایه‌ای، از معیار DL^1 استفاده می‌شود. در این روش اگر اختلاف فاز بین نواحی سالم و معیوب بیش از معیار DL باشد عیب را می‌توان شناسایی کرد. این معیار به عنوان اغتشاش سطحی در نزدیکی عیوب در نظر گرفته می‌شود. در واقع معیار DL اغتشاشات دمایی روی سطح نمونه مورد آزمایش در نظر گرفته می‌شود و بدین‌صورت تعریف می‌شود:

$$DL = 2\sigma_d + 2\sigma_s \quad (14)$$

تناوب [۱۰] استفاده می‌شود. در ادامه توضیح مختصری درباره این روش‌های تحلیل سیگنال حرارتی ارائه می‌شود.

۴- محاسبه اختلاف فاز

در ترموگرافی نوری به روش متناوب بار حرارتی به صورت متناوب به سطح نمونه وارد می‌شود و تغییرات دمایی سطح هم‌زمان با استفاده از دوربین ثبت می‌شود، و زمانی که تغییرات دمایی سطح به حالت پایا رسید عیوب را می‌توان با استفاده از اختلاف دامنه امواج حرارتی و اختلاف فاز بین امواج حرارتی ناحیه سالم و معیوب شناسایی نمود.

در تبدیل فوریه گسسته باید مقادیر حاصل از تابع درفاصله‌های یکسان از هم باشند. اگر تعداد داده‌ها سیگنال برابر با N باشد و مقدار سیگنال گسسته X_n باشد که $n = \{0, 1, \dots, N-1\}$ است. در این صورت تبدیل فوریه گسسته سیگنال گسسته بدین‌صورت تعریف می‌شود:

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{-2\pi jnk/N} \quad -\frac{N}{2} \leq k \leq \frac{N}{2} - 1 \quad (7)$$

که $f_k = k/N$ فرکانس، k عدد صحیح و X_k عدد مختلط است که اندازه آن دامنه و آرگومان آن فاز عدد مختلط مربوط به دما در فرکانس f_k است. باید توجه شود تعداد نقاط داده‌برداری باید عدد زوج باشد تا مطابق با رابطه (۷) مقادیر k عدد صحیح شود. برای تحلیل سیگنال با تبدیل فوریه گسسته باید گام زمانی داده‌برداری ثابت باشد و کل زمان داده‌برداری دوره تناوب تابع را شامل شود. در این صورت فرکانس متناظر با عدد صحیح k برابر است با:

$$f_k = \frac{k}{T} \quad (8)$$

که T کل زمان داده‌برداری است. بنابراین فرکانسی که مقادیر تبدیل فوریه برای آنها محاسبه می‌شوند عبارتند از:

$$\frac{-N}{2T}, \dots, \frac{-1}{T}, 0, \frac{1}{T}, \dots, \frac{N-1}{2T} \quad (9)$$

تبدیل فوریه (X_k) طبق رابطه‌ی (۷) عدد مختلط است که اندازه آن دامنه و آرگومان آن فاز عدد مختلط مربوط به دما در فرکانس f_k است. دامنه و اختلاف فاز براساس مقادیر حقیقی و موهومی تبدیل فوریه بدین‌صورت محاسبه می‌شود:

$$\frac{|X_k|}{N} = \sqrt{\text{Re}(X_k)^2 + \text{Im}(X_k)^2} \quad (10)$$

$$\emptyset = \text{atan2}(\text{Im}(X_k), \text{Re}(X_k)) \quad (11)$$

شناسایی عیوب با بررسی توزیع درجه حرارت سطحی نمونه آزمایشی ارائه کرد. از روش عددی اجزای محدود برای حل معادله (۶) استفاده می‌شود به طوری که 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 آنجاکه دامنه‌ی تغییرات دمایی در سازه کم است و در حد چند درجه استاز انتقال حرارت ناشی از تشعشع صرف نظر می‌شود.

تحلیل اجزای محدود هر لایه از ورق مواد مرکب با استفاده از تعدادی المان‌های شش وجهی مرتبه اول انجام می‌شود که در هر گره یک درجه آزادی مربوط به دما وجود دارد. نحوه‌ی المان‌بندی قسمتی از ورق ماده مرکب در شکل ۵ نشان داده شده است.

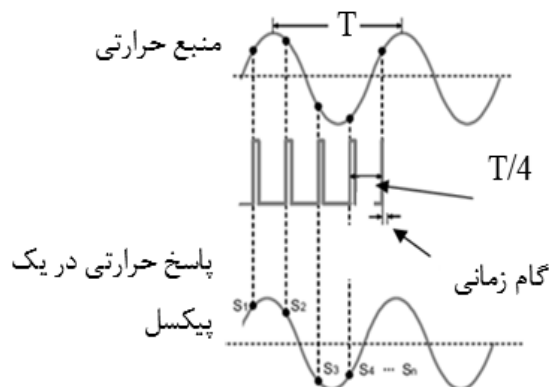
وقتی که خواص حرارتی نمونه‌ها مستقل از دما در نظر گرفته شود معادله‌ی انتقال حرارت گذرا در تحلیل اجزای محدود را می‌توان چنین نوشت [۱۲]:

$$CT + K_T T = Q \quad (15)$$

که T بردار ستونی متشکل از دمای گره‌ها، \dot{T} بردار ستونی متشکل از نرخ تغییر زمانی دمای گره‌ها، Q بردار ستونی 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 محدوده تغییر دما در نمونه‌ی آزمایشگاهی کم است. برای تحلیل گذرای حرارت در کل جسم از حل صریح^۱ با گسسته‌سازی به روش پسرود^۲ در حوزه زمان استفاده می‌شود که در این صورت رابطه‌ی (۱۵) را می‌توان چنین نوشت:

$$\left[\frac{C}{\Delta t} + K_T \right] T_n = Q_n + \frac{1}{\Delta t} CT_{n-1} \quad (16)$$

که Δt مقدار نمو زمانی و T_n بردار ستونی دمای گره‌ها در لحظه‌ی t_n است. 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 باید حداقل برابر با ضخامت لایه مواد



شکل ۴- موج حرارتی ورودی و پاسخ حرارتی در ترموگرافی نوری [۳]

که σ_s و σ_d به ترتیب انحراف معیار اختلاف فاز ناحیه‌ی سالم و معیوب در چند نقطه روی سطح بالایی نمونه بعد از پایدار شدن تغییرات دمایی سطح است.

اگر اختلاف فاز ایجاد شده روی یک ناحیه‌ی معیوب و سالم بیشتر از DL باشد، ناحیه‌ی معیوب فوق قابل شناسایی خواهد بود در غیر این صورت قابل شناسایی نخواهد بود، و این به دلیل زیاد بودن اغتشاشات دمایی سطح و در نتیجه اغتشاشات اختلاف فاز روی نقطه سالم و نقطه معیوب از اختلاف فاز ایجاد شده می‌باشد.

برای به دست آوردن تغییرات دمایی روی سطح باید رابطه (۶) حل شود که در این تحقیق از روش اجزای محدود برای حل این رابطه در ورق مرکب دارای جدایش بین لایه‌ای استفاده می‌شود.

۵- تحلیل اجزای محدود انتقال حرارت گذار ورق مرکب

هدف از حل معادله‌ی بقای انرژی در ورق مرکب دارای عیوب جدایش بین لایه‌ای تحت اثر آزمایش ترموگرافی نوری متناوب، تعیین تأثیر عیوب بر توزیع دمای سطحی جسم است که با داشتن این نتایج می‌توان ارتباط بین توزیع دمایی و عیوب داخلی جسم را بیان کرد. ناحیه‌ی جدایش بین لایه‌ای موجب می‌شود مقاومت حرارتی برای انتقال شار ایجاد شده بیشتر شود و قسمتی از شار حرارتی به سطح جسم برگردد و توزیع دمایی متفاوتی در سطح جسم و در راستای ناحیه‌ی جدایش بین لایه‌ای ایجاد شود. معیار مناسبی را می‌توان برای

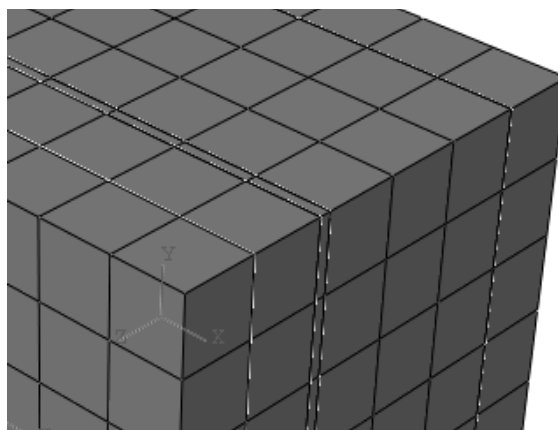
¹ Explicit

² Backward

تغییرات شار حرارتی یکسان می‌شود. همان‌طور که در بزرگ‌نمایی قسمتی از نمودار تغییرات دما نسبت به زمان در شکل ۶-الف نشان داده شده است نمودار دمایی این چهار نقطه بر یکدیگر منطبق نیستند و کمترین دما در نقطه‌ی انتخابی در نواحی سالم و بیشترین دما در نقطه‌ی متناظر با عیب در عمق کمتر تعیین می‌شود. اختلاف دمای بین ناحیه‌ی سالم و معیوب در سطح ورود شار مقدار قابل توجهی نیست و به این علت این عیوب با استفاده از اختلاف دامنه به وضوح قابل شناسایی نیستند. شکل ۶-ب تغییرات دمایی محاسبه‌شده روی نواحی معیوب و سالم را در مدت زمان دو دوره تناوب نشان می‌دهد. نمودار دمایی متناوب در ناحیه سالم و معیوب نسبت به یکدیگر اختلاف فاز دارند و به عنوان معیار دیگر می‌توان برای شناسایی عیوب در ترموگرافی متناوب از اختلاف فاز استفاده کرد.

اختلاف دما بین ناحیه‌ی سالم و معیوب در حالت پایا به صورت متناوب و با فرکانس شار حرارتی تغییر می‌کند. اگر نمودار دما در این دو ناحیه هم‌فاز باشند اختلاف آنها در یک دوره تناوب از صفر به بیشترین مقدار مثبت و مجدداً به صفر و بیشترین مقدار منفی می‌رسد. شکل ۷-الف تغییرات دمایی را روی سطح ورودی شار حرارتی در زمان بیشترین اختلاف دمایی بین ناحیه سالم و معیوب نشان می‌دهد. بیشترین اختلاف دمایی بین ناحیه‌ی سالم و ناحیه‌ی معیوب روی عیب با عمق $0/6$ میلی‌متر حدود $0/06$ درجه سانتی‌گراد است که با افزایش عمق عیب این اختلاف دمایی کمتر می‌شود. شکل ۷-ب تغییرات دمایی روی خط تقارن در جهت X در زمان بیشترین اختلاف دمایی بین نواحی سالم و معیوب را نشان می‌دهد. عمق عیب از چپ به راست بیشتر می‌شود و همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است اختلاف دمایی بین این نواحی معیوب و سالم با افزایش عمق عیب کمتر می‌شود. 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 خواهد بود. از طرفی با افزایش عمق عیب مقدار افت انرژی حرارتی ناشی از انتقال حرارت عرضی ورق بیشتر می‌شود که منجر به کاهش انرژی حرارتی برگشتی به سطح ورق و کاهش افزایش دما در عیوب با عمق بیشتر می‌شود.

مرکب یا ضخامت ورق تفلونی باشد. برای حل عددی از نرم افزار آباکوس استفاده می‌شود.

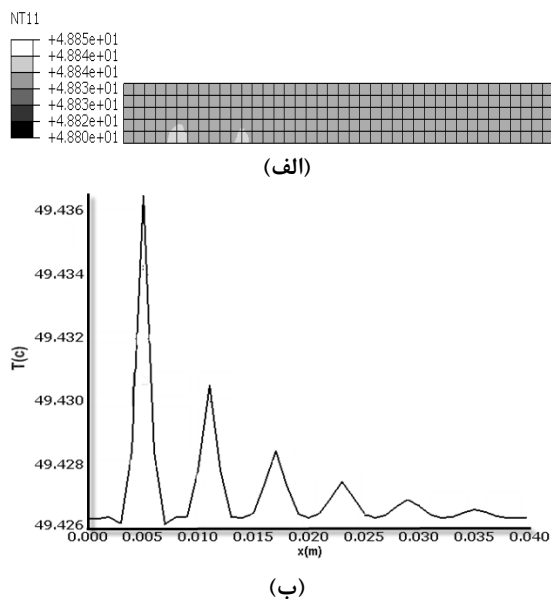


شکل ۵- نحوه بالمان بندی ورق مرکب چندلایه برای تحلیل حرارتی

۶- نتایج

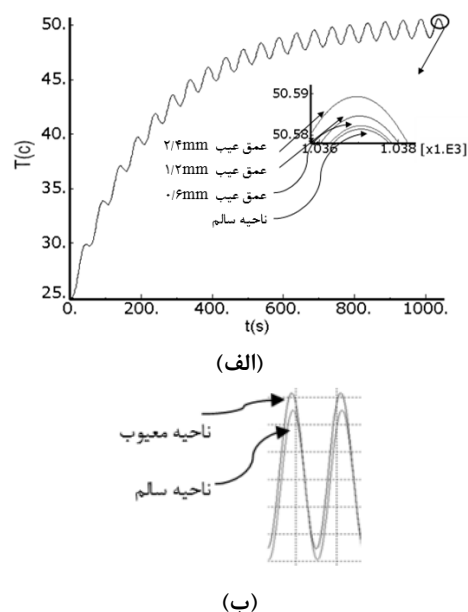
در این بخش نتایج مربوط به تحلیل پاسخ گذرای دمایی سطحی ورق بررسی می‌شود تا معیاری برای شناسایی نواحی جدایش بین‌لایه‌ای براساس پاسخ مواد مرکب در آزمایش ترموگرافی متناوب ارائه شود. از آنجا که راستای الیاف در کلیه لایه‌ها موازی یکدیگر است و کل هندسه و شرایط حرارتی نسبت به محور A-A در شکل ۲ متقارن است پس پاسخ گذاری حرارتی نیمی از ورق تحلیل شده و شار حرارتی عمود بر سطح تقارن برای اعمال شرط تقارن صفر در نظر گرفته می‌شود.

شار حرارتی متناوب با دامنه 750 وات بر متر مربع و فرکانس $0/2$ هرتز به سطح فوقانی ورق اعمال می‌شود و تغییرات درجه حرارت کلیه نقاط جسم از مقدار اولیه تا دمایی پایدار آن تعیین می‌شود. شکل ۶-الف تغییرات دمایی محاسبه‌شده در چهار نقطه از سطح ورود شار حرارتی را از لحظه‌ی شروع حرارت‌دهی تا زمان لازم برای رسیدن به توزیع دما پایا را نشان می‌دهد. این نقاط بر روی عیوب در سه عمق مختلف و روی ناحیه‌ی سالم انتخاب شده است. دمای این نقاط از مقدار اولیه 25 درجه سانتی‌گراد با اعمال شار حرارتی افزایش می‌یابد و با گذشت زمان تغییرات دما به صورت متناوب می‌شود که فرکانس تغییرات آنها با فرکانس



شکل ۷- تغییرات دمایی سطح محاسبه شده (الف) در زمان بیشترین اختلاف دمایی بین ناحیه سالم و معیوب در زمان ۸۲۲/۷۰ ثانیه و (ب) روی مسیر عبوری از مرکز عیوب در زمان ۸۲۲/۷۰ ثانیه

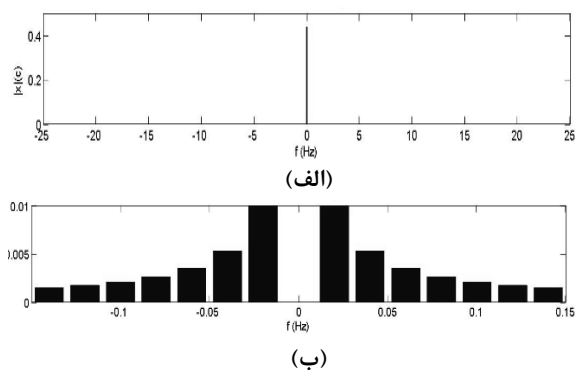
معینی کاملاً متناوب شده است و از ناحیه گذرا بین دما اولیه و حالت پایا عبور کرده است. برای این منظور تبدیل فوریه سیگنال حرارتی برای محدوده زمانی معینی از اختلاف دما تعیین می‌شود تا از متناوب بودن این سیگنال اطمینان حاصل شود. شکل ۸-الف دامنه‌ی اختلاف دمایی را در کل بازه‌ی فرکانسی نشان می‌دهد که مقادیر از محدوده زمانی ۱۰۰۰ تا ۱۰۵۰ ثانیه انتخاب شده است. نرخ داده‌برداری در این محدوده ۵۰ داده بر ثانیه است تا بتوان پهنای فرکانسی ۲۵ هرتز را در تبدیل فوریه بررسی نمود. همان‌طور که در این شکل نشان داده شده است مقدار دامنه‌ی اختلاف دمایی بجز در فرکانس تحریک (که برابر با ۰/۰۲ هرتز است) در بقیه فرکانس‌ها ناچیز است. شکل ۸-ب دامنه‌ی اختلاف دمایی را در بازه دو برابر فرکانس تحریک با بزرگ‌نمایی بیشتر نشان می‌دهد تا با دقت بیشتری نشان داده شود مقدار دامنه در فرکانس‌های غیر از فرکانس تحریک، نزدیک صفر است. تعداد داده، فرکانس کل، و گام زمانی در این تحلیل طوری انتخاب شود که فرکانس تحریک در فرکانس انتخابی داده‌برداری از نتایج تحلیل عددی مطابقت داشته موجود باشد در غیر این صورت اختلاف فاز محاسبه شده با روش تبدیل فوریه



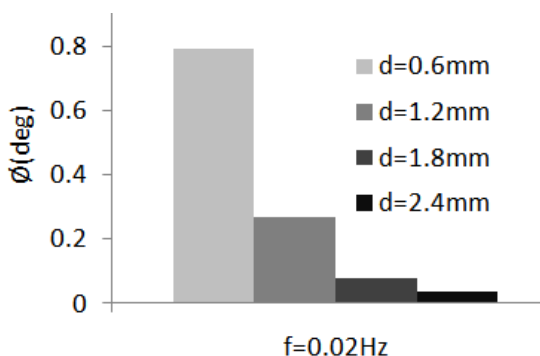
شکل ۶- تغییرات دمایی محاسبه شده (الف) در سطح ورود شار بر روی سه عیب در عمق مختلف و یک نقطه روی ناحیه سالم و (ب) روی ناحیه معیوب و سالم در دو دوره تناوب

در تحلیل پاسخ گذرای دما از مقدار اولیه تا رسیدن به تغییرات متناوب مقدار بزرگ‌ترین و کوچک‌ترین نمود زمانی به ترتیب ۰/۵ ثانیه و ۱۰ میکروثانیه و مقدار نمود اولیه ۰/۰۰۱ ثانیه انتخاب می‌شود که مقدار آن با توجه به تغییر دمای محاسبه شده بدین صورت اصلاح می‌شود که اگر در یک نمود زمانی تغییر دما از ۰/۲ درجه سانتی‌گراد بیشتر شود نمود زمانی کوچک‌تر شده و نمود زمانی که تغییرات دمایی آن بیش از ۰/۲ شده است با نمود زمانی کوچک‌تر دوباره تکرار می‌شود. همچنین اگر تغییرات دمایی در چند نمود زمانی پیاپی کمتر از ۰/۲ باشد مقدار نمود زمانی در مراحل تحلیل بعدی به تدریج افزایش داده می‌شود و افزایش تا موقعی ادامه می‌یابد که تغییرات دمایی کمتر از ۰/۲ باشد. پس از متناوب شدن تغییرات درجه حرارت در ماده، مقدار نمود زمانی ثابت و برابر با ۰/۰۲ ثانیه در نظر گرفته می‌شود.

اعمال شار حرارتی به جسم در دمای اولیه محیط به تدریج دمای جسم را افزایش می‌دهد و پس از مدت زمان معینی دما جسم به صورت متناوب تغییر می‌کند. قبل از محاسبه اختلاف فاز نمودار دما در بین نواحی سالم و معیوب نیاز است مطمئن شد نمودار حرارتی پس از گذشت زمان



شکل ۸- دامنه‌ی تغییرات دمایی در فرکانس ۰/۰۲ هرتز الف) در تمامی بازه و ب) با بزرگ نمایی بیشتر



شکل ۹- اختلاف فاز بین نواحی سالم- معیوب در فرکانس ۰/۰۲ هرتز چهار عیب مختلف

همان‌طور که در شکل ۷-الف نشان داده شده است گردایان حرارتی اطراف عیب ناچیز است و برای ترموگرافی متناوب نوری می‌توان عیوب را مستقل از هم با دقت خوبی تحلیل نمود. پس برای کاهش زمان محاسباتی جهت تحلیل تأثیر اندازه‌ی المان در نتایج پاسخ‌گذاری حرارتی، قسمتی از ماده مرکب در نظر گرفته می‌شود که مطابق با شکل ۱۰ به صورت ورق ماده مرکب مربعی شکل به طول ضلع ۱۴ میلی‌متر است که از لایه‌های مواد مرکب پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه و زمینه اپوکسی تشکیل شده است و راستای الیاف در کلیه لایه‌ها موازی با یکدیگر است. با توجه به وجود دو صفحه تقارن عمود بر هم نسبت به مرکز عیب یک چهارم نمونه برای تحلیل در نظر گرفته می‌شود که به‌عنوان شرط مرزی، شار حرارتی عمود بر سطوح تقارن و سطوح جانبی دیگر ورق مربعی شکل صفر انتخاب می‌شود.

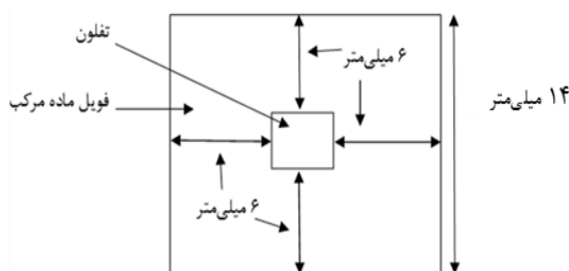
خطا دارد. با توجه به تبدیل فوریه مقادیر اختلاف دما که در شکل ۸ ارائه شده است نتیجه می‌شود در محدوده زمانی انتخابی سیگنال اختلاف دما با دقت قابل قبولی متناوب شده است و می‌توان از روش تبدیل فوریه یا روش چهار نقطه‌ای برای محاسبه اختلاف فاز استفاده نمود.

شکل ۹ اختلاف فاز بین نواحی سالم و معیوب را در فرکانس تحریک ۰/۰۲ هرتز روی چهار عیب نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود در یک فرکانس مشخص با افزایش عمق عیب، اختلاف فاز بین نواحی سالم و معیوب کمتر می‌شود و با افزایش عمق عیب شناسایی عیب با مشکل مواجه می‌شود. دو متغیر قابل اندازه‌گیری در ترموگرافی متناوب شامل تغییر دامنه و فاز در سطح بالای ناحیه معیوب نسبت به ناحیه سالم است که این دو متغیر مکمل یکدیگر هستند. اگرچه اختلاف دمایی ناچیزی بین نواحی سالم و معیوب مطابق شکل ۷ وجود دارد ولی اختلاف فاز بین این نواحی مطابق با شکل ۹ مقدار قابل توجهی است و از این معیار برای شناسایی نواحی معیوب می‌توان استفاده کرد.

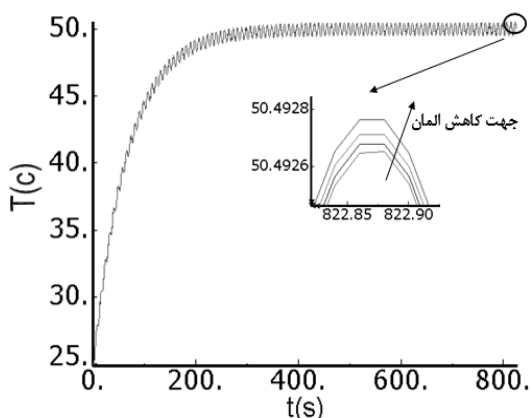
۷- بحث و بررسی

در ترموگرافی نوری به روش متناوب می‌توان از اختلاف فاز و اختلاف دامنه برای شناسایی عیوب استفاده نمود ولی به دلیل ناچیز بودن اختلاف دامنه امواج حرارتی ناشی از انتقال حرارت در جهت عرض ورق، مقدار اختلاف دامنه امواج حرارتی بین نواحی سالم و معیوب برای شناسایی عیوب مناسب نیست در صورتی که تأثیر میزان انتقال حرارتی عرضی در اختلاف فاز نسبت به اختلاف دامنه بسیار کمتر است. بنابراین اختلاف فاز امواج حرارتی برگشتی نتایج مناسبی برای شناسایی عیوب ارائه می‌دهد ولی برای محاسبه اختلاف فاز نیاز است مدت زمان حرارتی‌دهی به اندازه کافی طولانی باشد تا تغییرات دمایی سطح متناوب شود. این اختلاف فاز ایجاد شده وابسته به عمق عیب، اندازه عیب، ضخامت ورق و فرکانس منبع حرارتی آزمایش ترموگرافی است. از عواملی که بر تحلیل پاسخ‌گذاری حرارتی و بر اختلاف فاز و اختلاف دامنه‌ی حرارتی تأثیر داشته باشد می‌توان به اندازه المان، گام زمانی در پاسخ‌گذاری و پایای مواد مرکب است که در این بخش تأثیر این عوامل بررسی می‌شود.

به دلیل زمان طولانی پایدار شدن تغییرات دمایی سطح، برای کاهش زمان محاسبات نیاز است گام زمانی متفاوتی در دو قسمت گذرا و پایا انتخاب شود. در قسمت پایا باید گام زمانی ثابت باشد تا بتوان دما را در تعداد ثابتی نقاط در نمودار درجه حرارت با توجه به دوره تناوب امواج حرارتی تعیین کرد. وجود نقاط با فاصله زمانی یکسان و برابر با یک چهارم دوره تناوب برای تعیین اختلاف فاز با روش چهار نقطه ضروری است. استفاده از قسمت گذرا برای تحلیل اختلاف فاز لازم نیست و انتخاب گام زمانی ثابت در قسمت گذرا ضروری نیست ولی باید گام زمانی به اندازه کافی کوچک انتخاب شود تا توزیع درجه حرارت محاسبه شده در قسمت گذرا از دقت کافی برخوردار باشد تا نتایج در حالت پایا و به‌ویژه اختلاف فاز با دقت مناسبی تعیین شود.



شکل ۱۰- موقعیت قرارگیری عیب ۲×۲ میلی‌متر مربع در عمق ۰/۶ میلی‌متری



شکل ۱۱- جهت کاهش اندازه المان روی نقطه سالم انتخابی جسم با المان‌های ۰/۵، ۰/۷۵، ۱ و ۲ میلی‌متری

لایه‌ی نازک تفلونی با ضخامت ۵۰ میکرومتر برای شبیه‌سازی عیب جدایش بین‌لایه‌ای در عمق ۰/۶ میلی‌متر از سطح قرار داده شده است. موقعیت قرارگیری عیب در عمق ۰/۶ میلی‌متری برای ماده مرکب با ضخامت کل ۱/۲۵ میلی‌متر در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

تغییر درجه حرارت روی سطح جسم در چهار اندازه مختلف المان روی نقطه‌ای از نواحی سالم با فرکانس ۰/۱۲ هرتز در شکل ۱۱ نشان داده شده است. تغییرات کمی در دمای سطح ورق با کوچک شدن المان از دو میلی‌متر به یک میلی‌متر مشاهده می‌شود ولی در مقایسه با نتایج بدست‌آمده با المان‌های یک میلی‌متر، تغییرات بسیار ناچیزی در نتایج با کوچک شدن المان مشاهده می‌شود در صورتی که المان‌های کوچک‌تر از یک میلی‌متر زمان تحلیل را طولانی می‌کند. شکل ۱۲ توزیع اختلاف دمایی بین نواحی سالم و معیوب در روی سطح ورق را در زمان بیشترین اختلاف دمایی پایا (زمان ۸۲۲/۸۶ ثانیه) نشان می‌دهد که با کوچک‌تر شدن المان تغییرات دمایی روی سطح تغییر می‌کند. توزیع دمایی روی سطح با افزایش اندازه‌ی المان تا مقدار ۲ میلی‌متر تقریباً یکسان شده و با این المان توزیع دمایی روی سطح در مناطق معیوب و سالم هیچ تفاوتی ندارد. با کوچک نمودن اندازه‌ی المان گرادینان حرارتی سطحی در بالای نواحی سالم و معیوب به‌خوبی مشهود می‌شود که برای اندازه المان و هندسه ناحیه‌ی دارای افزایش دما تقریباً یکسان است و استفاده از المان کوچک‌تر از یک میلی‌متر تأثیر چندانی بر دقت محاسباتی ندارد. نفوذ حرارت در جهت عمود بر الیاف با توجه به شکل ۱۲ بیش از جهت الیاف است، زیرا ضریب هدایت حرارتی در جهت الیاف کمتر از ضریب هدایت در جهت عمود بر الیاف می‌باشد که منجر به نفوذ حرارت بیشتری در جهت عمود بر الیاف در مقایسه با جهت الیاف می‌شود.

شکل ۱۳ تغییرات دمایی روی یک نقطه در دو مدل با ضخامت ۱/۲۵ و ۱/۸۵ میلی‌متر و شرایط اولیه یکسان را در فرکانس ۰/۱۲ هرتز نشان می‌دهد. با افزایش ضخامت نمونه، زمان پایداری تغییرات دمایی سطح زیاد شده است که به دلیل افزایش زمان برگشت امواج حرارتی از عمق‌های بیشتر است. بنابراین اگر عمق نمونه زیاد باشد زمان پایداری افزایش می‌یابد.

فاز بین ناحیه سالم و معیوب کمتر می‌شود و کوچک شدن حداکثر افزایش دما در ناحیه گذرا از ۰/۲ درجه سانتی‌گراد، تأثیر ناچیزی بر دقت نتایج دارد. بنابراین حداکثر افزایش دمایی مجاز در تحلیل قسمت گذرای پاسخ حرارتی ۰/۲ درجه در نظر گرفته می‌شود. همچنین نتایج شکل ۱۴ نشان می‌دهد اختلاف فاز محاسبه‌شده با دو روش چهار نقطه‌ای و تبدیل فوریه گسسته تفاوت زیادی با هم ندارند و برای سهولت محاسبات می‌توان از روش چهار نقطه‌ای استفاده نمود.

فرکانس تغییرات شار حرارتی متناوب یکی از متغیرهای مهم آزمایش ترموگرافی نوری می‌باشد. شکل ۱۵ اختلاف فاز دمای بین نواحی سالم و معیوب برای نمونه اصلی (نمونه شکل ۲) با در نظر گرفتن محور تقارن و نصف نمونه را نشان می‌دهد. اختلاف فاز در عمق‌های کمتر با افزایش فرکانس بیشتر می‌شود. برای بررسی علت افزایش اختلاف فاز حل تحلیلی معادله‌ی بقای انرژی بیان شده در رابطه‌ی (۶) در یک ورق با ابعاد بی‌نهایت بررسی می‌شود که دمای سطحی آن به صورت متناوب و با دامنه T_0 تغییر داده می‌شود. در این صورت تغییرات دما در عمق z بدین صورت می‌باشد [۱۳]:

$$T(z, t) = T_0 \exp\left(-\frac{z}{\mu}\right) \cos\left(\frac{2\pi z}{\lambda} - 2\pi ft\right) \quad (17)$$

که λ طول موج انتشار گرمایی و μ طول انتشار گرمایی می‌باشد که به ترتیب بدین صورت تعریف می‌شوند [۱۳]:

$$\lambda = 2\pi\mu \quad (18)$$

$$\mu = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi f}} \quad (19)$$

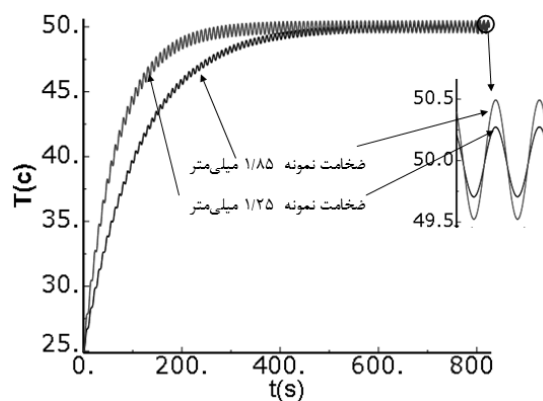
طول انتشار گرمایی نرخ تعیین‌کننده نفوذ امواج حرارتی در داخل مواد، α ضریب نفوذ حرارتی است و بسته به جنس ماده است و f فرکانس منبع حرارتی می‌باشد، بنابراین با افزایش فرکانس طول انتشار گرمایی کمتر می‌شود و نفوذ امواج در داخل عمق کمتر می‌شود. اختلاف فاز در رابطه (۱۷) را می‌توان برحسب فرکانس چنین نوشت:

$$\phi = \frac{2\pi z}{\lambda} = \frac{z}{\mu} = z \sqrt{\frac{\pi f}{\alpha}} \quad (20)$$

بنابراین اختلاف فاز با مجذور فرکانس در مسائل یک‌بعدی متناسب است که این حالت برای عیوب دارای عمق کم مطابق با شکل ۱۵ مشابَهت دارد. از طرفی برای عیب با



شکل ۱۲- تأثیر اندازه‌ی المان بر توزیع دمایی روی سطح در زمان حداکثر اختلاف دمایی بین نواحی سالم و معیوب در فرکانس ۰/۱۲ هرتز



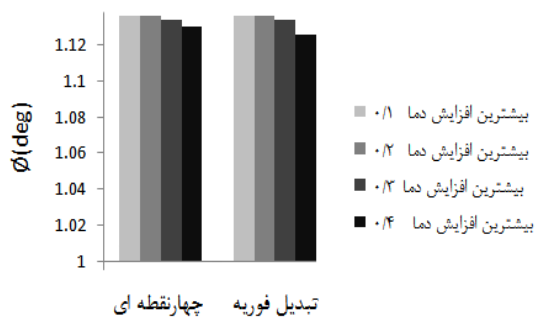
شکل ۱۳- تغییرات دمایی روی یک نقطه در دو مدل با ضخامت متفاوت و شرایط یکسان

همان‌طور که بیان شد گام زمانی در قسمت گذرا با توجه به حداکثر مقدار مجاز افزایش دما در هر نمونه تعیین می‌شود. بنابراین برای اطمینان از انتخاب مناسب گام زمانی در ناحیه گذرا نیاز است اثر حداکثر افزایش درجه حرارت در هر نمونه زمانی بر اختلاف فاز محاسبه‌شده در ناحیه پایا بررسی شود. شکل ۱۴ اختلاف فاز بین نواحی معیوب و سالم را با استفاده از دو روش تبدیل فوریه گسسته و چهار نقطه‌ای نشان می‌دهد. این نتایج در گام‌های زمانی مختلف با توجه به مقادیر مختلف حداکثر افزایش دمایی مجاز در هر نمونه محاسبه شده است. فرکانس شار حرارتی متناوب در این تحلیل ۰/۱۲ هرتز انتخاب شده است. با بیشتر شدن حداکثر افزایش دمای مجاز در هر نمونه زمانی در ناحیه گذرا، اختلاف

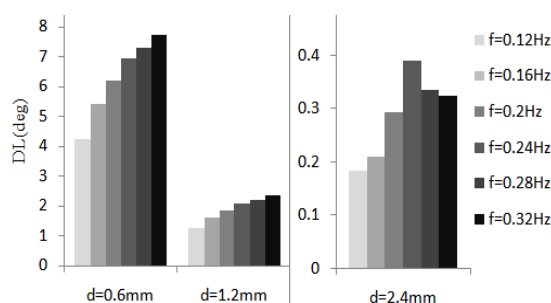
هر عیب با عمق مختلف انتخاب می‌شود تا براساس تغییرات درجه حرارت، مقدار اختلاف فاز در این نقاط محاسبه شود. شکل ۱۶ موقعیت نقاط انتخابی روی نواحی سالم و معیوب را نشان می‌دهد. این نقاط نسبت به خط میانی عیوب متقارن است که مقادیر فاز امواج در این نقاط در جدول ۳ برای فرکانس ۰/۱۲ هرتز آورده شده است. مقادیر این جدول بیان می‌کند فاز نقاط ۲ و ۳ به ترتیب با فاز نقاط ۴ و ۵ برابر می‌باشد که به دلیل محور تقارن از مرکز جسم می‌باشد. براساس مقادیر این جدول مقادیر فاز در نواحی سالم تغییر زیادی ندارد ولی مقادیر فاز تغییرات قابل توجهی در نواحی معیوب دارد. انحراف استاندارد مقادیر فاز در نواحی سالم و معیوب به عنوان شاخصی برای بررسی میزان تغییرات فاز محاسبه می‌شود. مقدار تغییرات در فاز وابسته به فرکانس شار حرارتی است که به عنوان نمونه انحراف استاندارد در نواحی سالم برای فرکانس‌های مختلف در شکل ۱۷ نشان داده شده است. مقادیر انحراف استاندارد در فرکانس‌های کوچک‌تر نسبت به سایر فرکانس‌ها کمتر است. پس با افزایش فرکانس خطای تحلیل عددی بیشتر و در فرکانس‌های بیشتر برای پایداری زمان زیادی لازم است.

برای بررسی توانایی روش ترموگرافی نوری برای شناسایی عیوب از معیار DL تعریف شده در رابطه (۱۴) استفاده می‌شود. این معیار را می‌توان به عنوان اغتشاش سطحی در محدوده نزدیک عیب در نظر گرفت. برای شناسایی عیوب باید اختلاف فاز بین نواحی سالم و معیوب از اغتشاشات سطحی ایجاد شده بیشتر باشد. با توجه به شکل ۱۷ تلرانس اختلاف فاز روی ناحیه سالم محدود می‌باشد. بنابراین اگر تفاوت بین اغتشاش سطحی و اختلاف فاز نواحی معیوب و سالم از ۰/۰۷ درجه سانتی‌گراد بیشتر باشد عیب با این روش قابل شناسایی خواهد بود. شکل ۱۸ اغتشاش سطحی محاسبه شده با استفاده از روش DL را نشان می‌دهد به طوری که اغتشاش سطحی در عمق‌های کم با افزایش فرکانس زیاد شده است ولی در عمق‌های بیشتر بعد از یک فرکانس مشخص مقدار آن کمتر شده است. شکل ۱۹ تفاوت بین اختلاف فاز و اغتشاشات سطحی را در عمق‌های مختلف نشان می‌دهد به طوری که در عمق‌های کمتر با افزایش فرکانس عیوب به راحتی قابل شناسایی هستند، ولی عیب در عمق ۲/۴ میلی‌متر عیب قابل شناسایی نیست.

عمق بیشتر و برابر با ۲/۴ میلی‌متر، مطابق با شکل ۱۵ مقدار افزایش اختلاف فاز در اثر افزایش فرکانس تا مقدار معینی از فرکانس مشاهده می‌شود و پس از آن اختلاف فاز کاهش می‌یابد. علت این پدیده به علت کاهش نفوذ امواج در درون سازه است که باعث کاهش اختلاف فاز می‌شود.

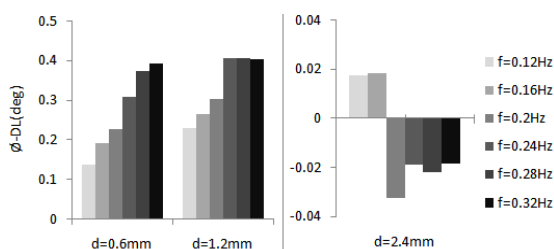


شکل ۱۴- اختلاف فاز بین ناحیه معیوب و سالم با استفاده از دو روش با حداکثر افزایش دمایی مختلف بر حسب سانتی‌گراد در ناحیه گذرا در فرکانس تحریک ۰/۱۲ هرتز

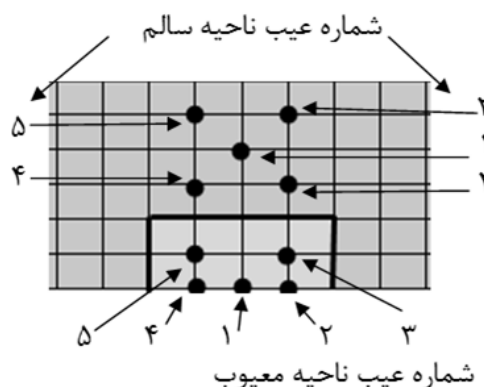


شکل ۱۵- اختلاف فاز بین ناحیه معیوب و سالم در عمق‌های ۰/۶، ۱/۲ و ۲/۴ میلی‌متری

تاکنون برای محاسبه اختلاف فاز دمای سطحی نقطه‌ای در وسط ناحیه معیوب و دمای نقطه‌ای دور از ناحیه سالم انتخاب می‌شود. در آزمایش ترموگرافی دمای محدوده‌ای توسط دوربین ترموگرافی اندازه‌گیری می‌شود که توزیع درجه حرارت در این محدوده یکسان نیست. بنابراین نیاز است واریانس درجه حرارت در این نواحی محاسبه شود تا براساس نوسان درجه حرارت معیاری برای توانایی شناسایی عیوب براساس اندازه‌گیری اختلاف فاز و نوسان درجه حرارت بیان شود. برای این منظور ۵ نقطه در نواحی سالم و ۵ نقطه در



شکل ۱۹- اختلاف بین اغتشاش سطحی از روش DL و اختلاف فاز بین نواحی سالم و معیوب در عمق های ۰/۶، ۱/۲ و ۲/۴ میلی‌متری



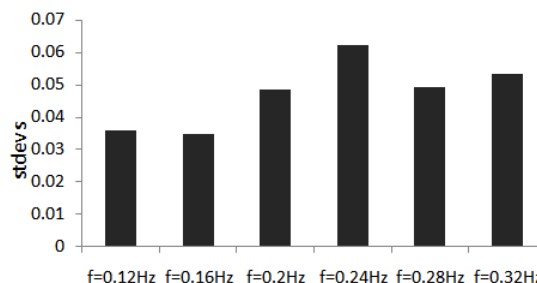
شکل ۱۶- موقعیت نقاط انتخابی روی ناحیه سالم و معیوب

جدول ۳- فاز نمودار دمای متناوب نقاط انتخابی در فرکانس ۰/۱۲ هر تتر

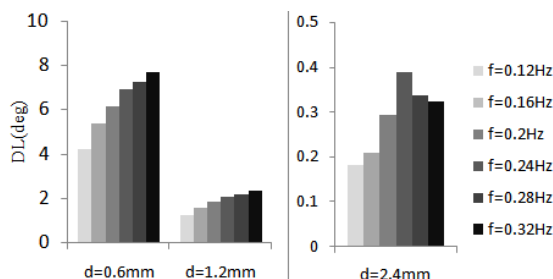
ناحیه سالم	۱/۸ میلی‌متر	۱/۲ میلی‌متر	۰/۶ میلی‌متر	ناحیه معیوب
۱	-۷۵/۴۶	-۷۱/۰۴	-۶۰/۳۰	۱
۲	-۷۶/۳۳	-۷۲/۶۵	-۶۳/۴۸	۲
۳	-۷۶/۸۴	-۷۳/۹۰	-۶۶/۶۶	۳
۴	-۷۶/۳۳	-۷۲/۶۵	-۶۳/۴۸	۴
۵	-۷۶/۸۴	-۷۳/۹۰	-۶۶/۶۶	۵

اندازه‌ی ناحیه‌ی جدایش بین‌لایه‌ای ممکن است در تحلیل نتایج تأثیر داشته باشد زیرا مقدار انرژی حرارتی بیشتری با بزرگ شدن آن به سطح جسم برمی‌گردد. تغییر اندازه‌ی جدایش بین‌لایه‌ای ممکن است بر روی فرکانس بهینه تأثیر داشته باشد که برای بررسی آن جدایش بین‌لایه‌ای با اندازه‌ی متفاوت با تحلیل قبلی در نظر گرفته می‌شود. برای این منظور ورق‌ی از ماده مرکب چند لایه مشابه با شکل ۲ در نظر گرفته می‌شود که فقط اندازه‌ی عیوب جدایش بین‌لایه‌ای آن به اندازه‌ی ۴×۴ میلی‌متر مربع تغییر کرده است و این عیوب در عمق‌های مختلف وجود دارند. به‌علت تقارن نیمی از این ورق مطابق با شکل ۲۰ تحلیل می‌شود که موقعیت قرارگیری عیوب نیز در این شکل نشان داده شده است. کلیه شرایط اولیه تحلیل مشابه با تحلیل قبلی است و فاصله‌ی بین تمامی عیوب یکسان بوده و ضخامت نمونه ۴/۲۵ میلی‌متر می‌باشد.

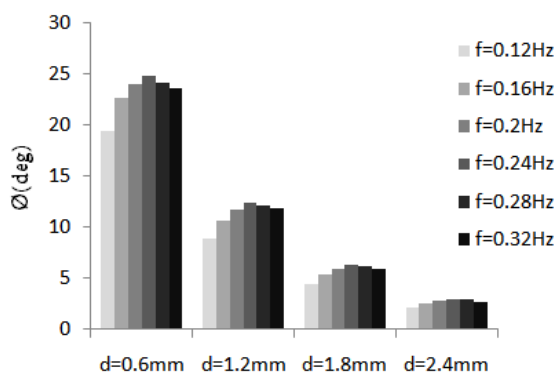
شکل ۲۱ اختلاف فاز بین نواحی سالم و معیوب در چهار عمق مختلف برای عیب ۴×۴ میلی‌متر مربع با فرکانس‌های مختلف را نشان می‌دهد. همواره اختلاف فاز با افزایش فرکانس مطابق با این شکل افزایش نمی‌یابد و مقدار آن بعد از یک فرکانس مشخص کاهش یافته است، که علت کاهش اختلاف فاز در فرکانس‌های بالا کاهش نفوذ امواج و قابل توجه بودن اختلاف بین تحلیل یک بعدی و سه بعدی می‌باشد. انحراف استاندارد تغییرات فاز روی ناحیه‌ی سالم باید به صورت کلی مشابه با شکل ۱۷ باشد که مقدار آن به تعداد نقاط انتخابی و محل این نقاط وابسته است؛ در صورتی که تعدادی از این نقاط نزدیک نواحی معیوب انتخاب شود ممکن است مقدار آن زیاد باشد ولی به طور معمول باید این نقاط در محلی انتخاب شود که نواحی معیوب تأثیری در این



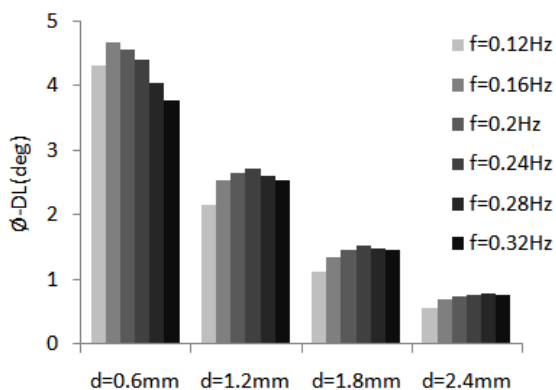
شکل ۱۷- انحراف استاندارد فاز نمودار متناوب دما در نقاط انتخابی روی نواحی سالم



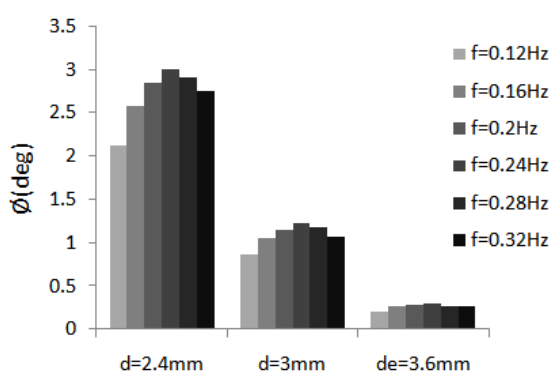
شکل ۱۸- اغتشاش سطحی بین ناحیه معیوب و سالم در عمق های ۰/۶، ۱/۲ و ۲/۴ میلی‌متری



شکل ۲۱- اختلاف فاز بین ناحیه سالم و معیوب در چهار عمق مختلف برای عیب ۴×۴ میلی‌متر مربع با فرکانس‌های مختلف بر حسب هر ترز



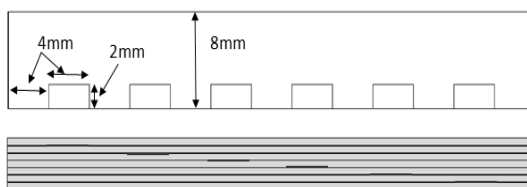
شکل ۲۲- اغتشاش با استفاده از روش DL در چهار عمق مختلف با فرکانس‌های مختلف



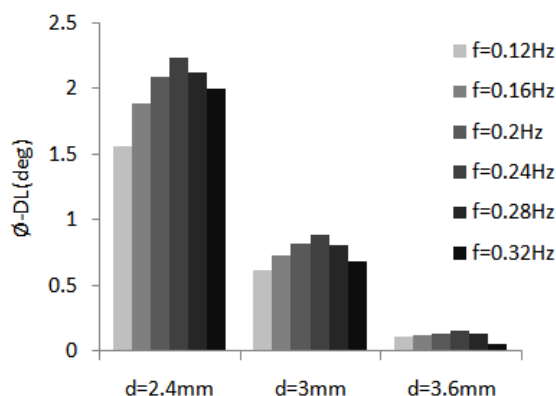
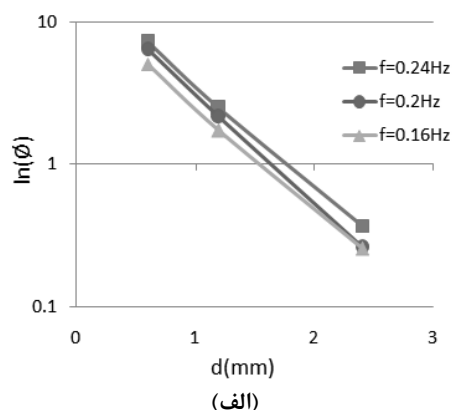
شکل ۲۳- اختلاف فاز بین ناحیه سالم و معیوب در عمق و فرکانس‌های مختلف برای عیب ۴×۴ میلی‌متر مربع

انحراف معیار نداشته باشند. در صورتی که اختلاف بین اغتشاش سطحی و اختلاف فاز بین نواحی سالم و معیوب بیش از ۰/۰۷ باشد عیب فوق با این روش قابل شناسایی خواهد بود. شکل ۲۲ اغتشاش سطحی را بر اساس متغیر DL در چهار عمق مختلف با فرکانس‌های مختلف نشان می‌دهد که اغتشاش نیز مانند اختلاف فاز در فرکانس‌های مختلف متفاوت می‌باشد. شکل ۲۳ اختلاف فاز بین نواحی سالم و معیوب در عمق و فرکانس‌های مختلف برای عیب ۴×۴ میلی‌متر مربع را نشان می‌دهد که این اختلاف فاز در تمامی این عمق‌ها از انحراف معیار ناحیه سالم بیشتر است بنابراین اگر اختلاف بین اغتشاش سطحی و اختلاف فاز بیش از ۰/۰۷ باشد تمامی عیوب قابل شناسایی خواهند بود. شکل ۲۴ اختلاف بین اغتشاش سطحی و اختلاف فاز بین نواحی سالم و معیوب را نشان می‌دهد که بیشترین مقدار آن با افزایش فرکانس بیشتر شده و بعد از یک فرکانس مشخص مقدار آن کمتر شده است و مقدار آن در فرکانس ۰/۲۴ هرترز به بیشترین مقدار خود رسیده است در این فرکانس عیب ۴×۴ میلی‌متر مربع در عمق ۳/۶ میلی‌متری به راحتی قابل شناسایی می‌باشد.

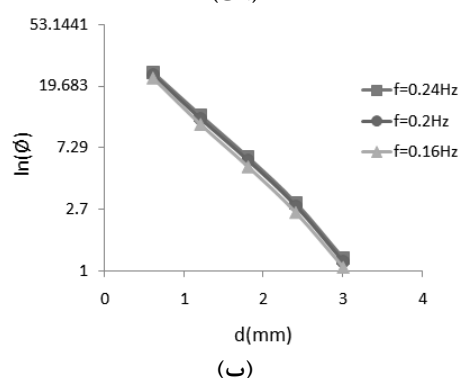
شکل ۱۵ نشان می‌دهد اختلاف فاز در عمق‌های کمتر برای عیب ۲×۲ میلی‌متر مربع با افزایش فرکانس افزایش یافته ولی در عمق‌های بیشتر تا یک فرکانس مشخص افزایش یافته ولی بعد از یک فرکانس مشخص کمتر می‌شود بنابراین برای یک عیب مشخص با افزایش عمق عیب فرکانس بهینه کمتر می‌شود. شکل ۲۱ و شکل ۲۳ نشان می‌دهد برای عیب ۴×۴ میلی‌متر مربع با افزایش فرکانس اختلاف فاز زیاد شده و بعد از یک فرکانس مشخص کمتر می‌شود.



شکل ۲۰- موقعیت قرارگیری عیب ۴×۲ میلی‌متر مربع به ترتیب از چپ در عمق‌های ۰/۶، ۱/۲، ۱/۸، ۲/۴، ۳ و ۳/۶ میلی‌متر از سطح بالا



شکل ۲۴- اختلاف بین اعتشاش سطحی و اختلاف فاز بین نواحی سالم و معیوب در سه عمق مختلف



شکل ۲۵- مقدار لگاریتم اختلاف فاز نسبت به عمق عیب در فرکانس‌های مختلف برای ورق دارای عیوب به اندازه الف) ۲×۲ میلی‌متر مربع ب) ۴×۴ میلی‌متر مربع

۸- نتیجه‌گیری

در ترموگرافی نوری به روش متناوب توزیع دمایی با فرکانس برابر با فرکانس تحریک حرارتی در سطح ورق ایجاد می‌شود که دامنه و اختلاف فاز توزیع دمایی با توجه به حضور عیوب جدایش بین‌لایه‌ای در ماده تغییر می‌کند. دامنه امواج حرارتی سطحی در مقایسه با اختلاف فاز حساسیت کمتری دارد و تصاویر اختلاف فاز اثر نواحی جدایش بین‌لایه‌ای را در عمق‌های مختلف بر سطح ورق نشان می‌دهد. تحلیل پاسخ گذرای ماده مرکب از درجه حرارت محیط تا رسیدن به درجه حرارت متناوب نشان می‌دهد که انتخاب مقدار حداکثر تغییر دما در هر نمو از تحلیل حرارتی موجب می‌شود نتایج با دقت مناسبی بدون نیاز به انجام محاسبات در زمان طولانی بدست آید. پس از ایجاد توزیع دما متناوب و با فرکانس برابر با تحریک حرارتی متناوب می‌توان نمو زمانی را ثابت در نظر گرفت تا براساس نتایج بدست‌آمده و با تحلیل چهار نقطه،

برای شناسایی عیوب می‌توان از فرکانسی استفاده نمود که در آن اختلاف فاز بین نواحی سالم و معیوب در عمق‌های زیاد بیشترین مقدار باشد که آن را فرکانس بهینه آزمایش ترموگرافی نامیده می‌شود. یکی از مسئله‌های مهم پیش‌بینی تغییر اختلاف فاز در فرکانس‌های مختلف و عمق‌های مختلف می‌باشد. شکل ۲۵ مقدار لگاریتمی اختلاف فاز نسبت به عمق عیب را نشان می‌دهد که در فرکانس‌های مختلف تحریک و در همسایگی فرکانس بهینه مشاهده شده است. نکته مهمی که در این نمودار نشان داده شده است ارتباط خطی بین عمق عیب و لگاریتم اختلاف فاز در فرکانس‌های مختلف با دقت بسیار مناسبی وجود دارد. یعنی

$$\ln \phi = ad + b \quad (21)$$

که ϕ اختلاف فاز بین نواحی سالم و معیوب و a و b ضرایبی هستند که با توجه به جنس ماده، فرکانس تحریک و اندازه عیب تعیین می‌شوند. از طرفی شکل ۲۵ نشان می‌دهد که تغییرات این ضرایب در محدوده فرکانسی بین ۰/۱۶ تا ۰/۲۴ هرتز قابل توجه نیست و می‌توان ارتباط بین اختلاف فاز و عمق عیب را برای ورق‌های دارای عیوب با اندازه ۲×۲ و ۴×۴ میلی‌متر مربع به ترتیب بدین صورت بیان کرد:

$$d = e^{-0.258\phi + 2.355} \quad (22)$$

$$d = e^{-0.055\phi + 1.895} \quad (23)$$

بنابراین براساس مقدار اختلاف فاز اندازه‌گیری شده و خواص ماده و محدوده عیب می‌توان عمق عیب را با دقت مناسبی با استفاده از روش ترموگرافی نوری متناوب تعیین کرد.

- tool for carbon-carbon composites. *Compos Part B: Eng* 45(1):138-147.
- [4] Pickering S, Almond D (2008) Matched excitation energy comparison of the pulse and lock-in thermography NDE techniques. *NDT & E Int* 41(7): 501-509.
- [5] Meola C, Carlomagno GM, Squillace A, Vitiello A (2006) Non-destructive evaluation of aerospace materials with lock-in thermography. *Eng Fail Anal* 13(3): 380-388.
- [6] WuD, ZweschperTh, Salerno A, Busse G (1998) Lock-in thermography for nondestructive evaluation of aerospace structures. *NDT Net* 3(9).
- [7] Lahiri BB, Bagavathiappan S, ReshmiPR, Philip J, Jayakumar T, Raj B (2012) Quantification of defects in composites and rubber materials using active thermography. *Infrared Phys&Techn* 55(2-3):191-199.
- [8] Vijayaraghavan GK, MajumderMC, Ramachandran KP (2010) Quantitative analysis of delaminations in grp pipes using thermal NDTE technique. *J Adv ResMechEng* 1.1.
- [9] Chatterjee K, Tuli S, PickeringSG, Almond DP (2011) A comparison of the pulsed, lock-in and frequency modulated thermography nondestructive evaluation techniques. *NDT&E Int* 44: 655-667.
- [10] Choi M, Kang K, Park J, Kim W, Kim K (2008) Quantitative determination of a subsurface defect of reference specimen by lock-in infrared thermography. *NDT&E Int* 41: 119-124.
- [11] Zeng Z, Li C, Tao N, Feng L, Zhang C (2012) Depth prediction of non-air interface defect using pulsed thermography. *NDT&E Int* 48: 39-45.
- [12] RaoS S (2005) The finite element method in engineering. 4th edn. Elsevier Pub.
- [13] Castanedo CL (2005) Quantitative subsurface defect evaluation by pulsed phase thermography. PhD Thesis, University Laval Quebec.
- [14] Wallbrink C, Wade SA, Jones R (2007) The effect of size on the quantitative estimation of defect depth in steel structures using lock-in thermography. *J Appl Phys* 101 (10): 104907-1-8.
- اختلاف فاز را با دقت مناسب تعیین نمود. زمان لازم برای رسیدن به تغییرات پایا دما در سطح ورق به ضخامت نمونه وابسته است و این زمان در نمونه‌های با ضخامت بیشتر افزایش می‌یابد. براساس نتایج تبدیل فوریه گسسته می‌توان زمان لازم برای پایا شدن توزیع حرارتی در سطح ماده مرکب را تعیین کرد که پس از این زمان می‌توان اختلاف فاز بین نواحی سالم و معیوب را با استفاده از روش تبدیل فوریه گسسته و روش چهار نقطه‌ای تعیین نمود. با بزرگ شدن اندازه عیب اختلاف فاز بین نواحی سالم و معیوب بیشتر می‌شود که این مسئله با حل تحلیلی مسائل یک‌بعدی مطابقت دارد ولی بعد از یک فرکانس مشخص با بزرگ شدن فرکانس اختلاف فاز کمتری بین نواحی سالم و معیوب به دلیل کمتر شدن نفوذ امواج حرارتی مشاهده می‌شود. نتایج تحلیل نشان داد ارتباط خطی بین عمق عیب و لگاریتم اختلاف فاز در فرکانس‌های مختلف با دقت مناسبی وجود دارد که ضرایب این رابطه خطی با توجه به جنس ماده و فرکانس تحریک و اندازه عیب تعیین می‌شود. تغییرات ضرایب این رابطه خطی در محدوده فرکانس نزدیک فرکانس بهینه قابل توجه نیست و می‌توان یک رابطه بین اختلاف فاز و عمق عیب برای ورق‌های دارای عیوب با اندازه مشخص تعریف نمود.

۹- مراجع

- [1] Kevin T, Brien O (2009) Development of a composite delamination fatigue life prediction methodology. Durability, Damage Tolerance and Reliability Branch, NASA Langley Research Center, Hampton, Virginia, USA.
- [2] Mabrouki F, Genest M, Shi G, Fahr A (2009) Numerical modeling for thermographic inspection of fiber metal laminates. *NDT&E Int* 42: 581-588.
- [3] Junyan L, Liqiang L, Yang W (2013) Experimental study on active infrared thermography as a NDI