

Evaluation and health monitoring of the thermal insulation honeycomb sandwich wall of the cryogenic tank by thermography method

Amirreza Ardebili ¹  | Mohammad Hossein Alaei ² | Amir Kaveh ³  | Jafar Eskandari Jam ³

1. Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
E-mail: amirreza.ardebili@ut.ac.ir
2. Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
E-mail: mhallaee@gmail.com
3. Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
E-mail: P90132910@aut.ac.ir
4. Faculty of Materials and Manufacturing Technologies, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran
E-mail: jejaam@gmail.com

ABSTRACT

Honeycomb sandwich panels are lightweight yet strong structures. These panels have features such as thermal insulation due to their honeycomb structure. The honeycomb sandwich panel structure is a combination of high flexural strength and flexural strength with low weight. These materials are widely used in the aviation industry. Manufacturing defects and operational damage have emerged as an important safety concern, and as a result, the need for non-destructive testing to identify defects and damage during operation and maintenance has increased. In addition to detecting defects, it is very important to accurately identify or classify them. In this article, the insulating cryogenic composite tank wall has been inspected by a non-destructive method. Four sandwich samples with a honeycomb structure were designed and manufactured using two CFRP plates and a Nomex core. On one side of the samples, there was 5 mm of resin with nano clay 30B, which was mixed by ultrasonic mixing method. This structure was designed as thermal insulation and gas barrier. Infrared thermography was used to detect and categorize defects in the honeycomb structure. These defects included adhesive separation, delamination, presence of air in the carbon shells and resin layer, and fracture in the honeycomb core. Thermography results showed that by using thermography, defects in the outer shell and resin can be identified with high accuracy, but the accuracy is lower in the inner shell and core. According to the thermography results, it was observed that all defects were detected up to the fourth layer, but in the lower layers (layers 5, 6 and 7) defects such as Teflon, Kapton and dry carbon layers could not be detected. In addition, based on observations, defects such as lack of adhesion from the side of the resin layer due to high thickness and insufficient heat transfer could not be identified. Using the temperature-location diagram, the size of the defects up to 1 mm depth was determined with high accuracy.

Article Information:

Research Article

Received 10 April 2024

Revised 21 June 2024

Accepted 16 August 2024

Keywords:

Honeycomb composites,
Insulated panel,
Thermography,
Health Monitoring.

Cite this article: Ardebili, A., Alaei, M. H., Kaveh, A. & Eskandari Jam, J. (2024). Evaluation and health monitoring of the thermal insulation honeycomb sandwich wall of the cryogenic tank by thermography method. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (4), 11-22.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2024.451958.1142>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

ارزیابی و پایش سلامت دیواره ساندویچ لانه زنبوری عایق حرارتی مخزن کرایوژنیک با روش دمانگاری

امیررضا اردبیلی^۱ | محمد حسین علایی^۲ | امیر کاوه^۳ | جعفر اسکندری جم^۴

۱. مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، رایانامه: amirreza.ardebili@ut.ac.ir
۲. مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، رایانامه: mhallaee@gmail.com
۳. مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، رایانامه: P90132910@aut.ac.ir
۴. مجتمع دانشگاهی مواد و فناوری‌های ساخت، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران، ایران، رایانامه: jejaam@gmail.com

چکیده:

ساندویچ پانل‌های لانه زنبوری ساختارهایی سبک و در عین حال مستحکم هستند. این پانل‌ها به دلیل ساختار لانه زنبوری خود، دارای ویژگی‌هایی مانند عایق حرارتی می‌باشند. ساختار ساندویچ پانل لانه زنبوری ترکیبی از استحکام خمشی بالا و مقاومت خمشی با وزن کم بوده که مواد به طور گسترده در صنایع هوایی استفاده می‌شوند. نقص‌های ساخت و آسیب‌های عملیاتی به عنوان یک نگرانی ایمنی مهم مطرح شده‌اند و در نتیجه نیاز به آزمون‌های غیرمخرب برای شناسایی نقص‌ها و آسیب‌ها در طول عملیات و تعمیر و نگهداری افزایش یافته است. علاوه بر تشخیص عیوب، شناسایی دقیق یا طبقه‌بندی آنها بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله، دیواره عایق مخزن کامپوزیتی کرایوژنیک به روش غیرمخرب مورد بازرسی قرار گرفته است. چهار نمونه ساندویچی با ساختار لانه زنبوری با استفاده از دو صفحه CFRP و هسته‌ای از جنس نومکس طراحی و ساخته شدند. در یک سمت از نمونه‌ها ۵ میلی‌متر رزین با نانو خاک رس 30B بود که با روش اختلاط فراصوت مخلوط شده بود. این ساختار به عنوان عایق حرارتی و مانع گاز طراحی شده بود. برای تشخیص و دسته‌بندی عیوب موجود در ساختار لانه زنبوری، از دمانگاری مادون قرمز استفاده شد. این عیوب شامل جدایش چسب، لایه‌لایه‌شدگی، وجود هوا در پوسته‌های کربنی و لایه رزینی و شکستگی در هسته لانه زنبوری بودند. نتایج دمانگاری نشان داد که می‌توان با استفاده از دمانگاری، عیوب درون پوسته خارجی و رزین با دقت بالا شناسایی شدند، اما در پوسته داخلی و هسته دقت پایین‌تری ملاحظه می‌شود. بر طبق نتایج حاصله از نتایج دمانگاری مشاهده شد که تا لایه چهارم همه عیوب شناسایی شدند اما در لایه‌های پایین (لایه ۵، ۶ و ۷) عیوبی چون تفلون، کپتون و لایه‌های کربنی خشک قابل شناسایی نشدند. علاوه بر این بر مبنای مشاهدات عیوبی چون عدم چسبندگی از سمت لایه رزین به دلیل ضخامت بالا و عدم انتقال حرارت کافی قابل شناسایی نشدند. با استفاده از نمودار دما - مکان، اندازه عیوب تا عمق ۱ میلی‌متر با دقت بالا مشخص شد.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۳/۰۴/۰۱

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۳/۰۴/۱۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۳/۰۵/۲۶

کلیدواژگان:

کامپوزیت لانه زنبوری،
صفحه عایق حرارتی،
دمانگاری،
پایش سلامت.

استناد: اردبیلی، امیررضا؛ علایی، محمد حسین؛ کاوه، امیر و اسکندری جم، جعفر. (۱۴۰۳). ارزیابی و پایش سلامت دیواره ساندویچ لانه زنبوری عایق حرارتی مخزن کرایوژنیک با روش دمانگاری. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۴)، ۱۱-۲۲.

© نویسندگان

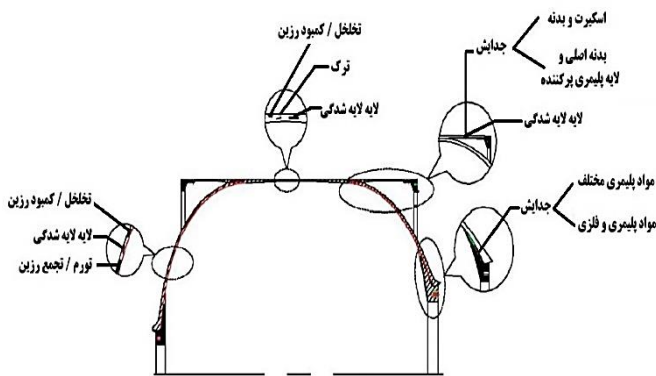
ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2024.451958.1142>



۱- مقدمه

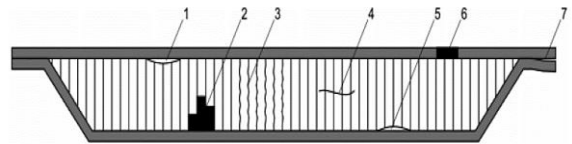
هزینه‌های نگهداری را برای ماهواره‌ها قابل استفاده مجدد در آینده کاهش دهد [۴]. احتمال وجود انواع مختلفی از عیوب با اثر همپوشانی نیز وجود دارد. برخی از عیوب بحرانی که به دلیل تغییرات فرآیند مشاهده می‌شوند، در شکل (۲) نشان داده شده است. همراه با چنین عیوب، تغییرات خصوصیات فیزیکی دیگری مانند محتوای رزین، کسر حجمی الیاف، چگالی و دمای انتقال شیشه‌ای ممکن است دیده شود [۵].



شکل (۲) حالات عیوب بحرانی در دیواره مخازن کامپوزیتی [۵].

کامپوزیت‌های ساندویچی لانه زنبوری^۲ (HSCs)، متشکل از دو پوسته با استحکام بالا و یک هسته لانه زنبوری سبک (متشکل از موادی مانند آلومینیوم، تیتانیوم یا کاغذ)، کاربرد گسترده‌ای در ساختارهای باربر اولیه و ثانویه وسایل نقلیه هوافضا پیدا کرده‌اند. این امر به ترکیب استثنایی آنها از سختی ویژه بالا، استحکام ویژه بالا، چگالی کم، عایق حرارتی موثر و خواص میرایی ارتعاش نسبت داده می‌شود [۶]. پوسته دارای استحکام کششی، فشاری و خمشی همراه با سفتی ساختاری سطحی است [۸،۷]. در همین حال، استحکام هسته لانه زنبوری را تضمین می‌کند و به پراکندگی بارهای اعمال شده در سطح وسیع‌تر کمک می‌کند [۹]. هسته‌های لانه زنبوری نومکس^۳ مقاومت فوق‌العاده‌ای در برابر حرارت، شعله و خوردگی نشان می‌دهند و نسبت مقاومت فشاری به چگالی بالایی نسبت به هسته‌های لانه زنبوری جایگزین دارند [۱۰]. کامپوزیت‌های ساختار لانه زنبوری نومکس در دم عمودی ایرباس A340

کامپوزیت‌ها با ساختار ساندویچی ضمن داشتن خواص مطلوب از نظر نیاز طراحی فریم‌های هوافضایی، در شرایط سخت عمر مفید قطعه مستعد آسیب دیدن هستند. ضربه کم سرعت، باعث ایجاد آسیب ضربه‌ای که به سختی قابل مشاهده است^۱ (BVID) می‌شود، می‌تواند تأثیر شدیدی بر عملکرد هواپیمای کامپوزیتی داشته باشد و خطرناکترین نوع آسیب به این نوع سازه است. علاوه بر این، گرم شدن سریع سازه‌های ساندویچی ناشی از انفجار مهمات نزدیک هواپیما یا صاعقه، می‌تواند صدمات زیادی به سازه نیز وارد کند. اضافه بار بیش از حد بر روی ساختار ساندویچ در هنگام ساخت یا نگهداری نیز می‌تواند باعث خرابی آن شود. لایه‌های خارجی ساندویچ بیشتر در معرض این نوع آسیب قرار می‌گیرند. با این حال، ساختارهای ساندویچی لانه زنبوری همچنین مستعد آسیب به هسته (خرد شدن، ترک خوردن، نفوذ مایع، لهیدگی) یا سطح مشترک هسته - پوسته هستند. شکل (۱) این اشکال آسیب را نشان می‌دهد [۱].



شکل (۱) انواع آسیب به ساختار ساندویچ لانه زنبوری: (۱) جدا شدن سطح خارجی صفحه و هسته لانه زنبوری، (۲) نفوذ مایع در هسته لانه زنبوری، (۳) هسته لانه زنبوری خرد شده، (۴) هسته لانه زنبوری ترک خورده به موازات سطح بازرسی، (۵) جدا شدن ورق داخلی و هسته لانه زنبوری، (۶) لایه لایه شدگی صفحات CFRP خارجی موازی سطح و (۷) آسیب لبه (لایه لایه شدگی، جدا شدن) [۱].

قابلیت اطمینان، ایمنی و امکان‌سنجی اقتصادی سیستم‌های حمل و نقل فضایی آینده، نه تنها به پیشرفت‌های فنی و عملیاتی آن‌ها، بلکه بر اجرای فناوری‌های نظارت بر سلامت ساختاری و روش‌های تشخیص آسیب متکی است [۲، ۳]. استفاده از چنین فناوری این امکان را فراهم می‌کند که به طور قابل توجهی

² Honeycomb sandwich composites

³ Nomex

¹ Barely visible impact damage

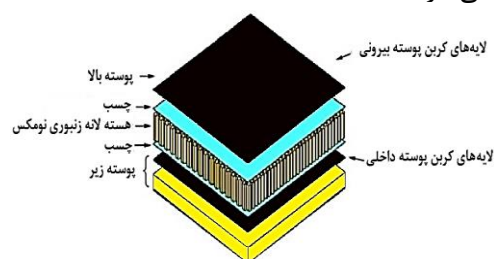
برای طبقه‌بندی میزان حفاظت محفظه‌های محصولات الکترونیکی در برابر اجسام خارجی مانند گرد و غبار، آب و نفوذ استفاده می‌شود) آغشته به روغن سیلیکونی، لایه‌لایه شدگی با استفاده از قطعات تفلون^۲ و کپتون^۳، عدم چسبندگی با عدم وجود رزین یا چسب، کثیف بودن سطح با استفاده از مخلوط رزین و خاک، شکستگی هسته با بریدن دیواره‌های لانه زنبوری و نفوذ رطوبت و روغن با پرکردن چند سلول هسته شبیه سازی شدند. در شکل (۴) شماتیک نمونه‌های ساخته شده و عیوب آن‌ها آورده شده است. در نمونه ۱، صفحات رویه دارای عیوب و صفحات پشتی و رزین حاوی ۱٪ نانوکلی^۴ پخش شده با استفاده از فراصوت سالم هستند. بعد از تقسیم سطح نمونه به دو قسمت مساوی، در یک قسمت عیوب لایه لایه شدگی (با استفاده از کپتون و تفلون به ضخامت ۰/۳ میلی‌متر) در بین لایه‌ها و در قسمت دیگر عیوب جدایش بین هسته و رویه و هسته بدون عیب قرار داده شد. در نمونه ۲، صفحات رویه سالم و صفحات پشتی دارای عیوب و رزین حاوی ۱٪ نانوکلی پخش شده با استفاده از فراصوت هستند، نحوه چیدمان عیوب مانند نمونه ۱ انجام شد. در نمونه ۳ رویه‌های جلو و پشت سالم، هسته و رزین دارای عیوب هستند. بعد از تقسیم سطح نمونه به دو قسمت مساوی، یک قسمت از نمونه بدون عیب و قسمت دیگر چیدمان عیوب قرار داده شد. نحوه چیدمان عیوب هسته در نمونه ۳ مانند دو نمونه قبل انجام شد. رزین حاوی ۱٪ نانوکلی پخش شده با استفاده از فراصوت در ابعاد 3Cm×3Cm و 1.5Cm×1.5Cm با دو عمق مختلف ۳ و ۱ میلی‌متر (انتها بسته) بریده و با رزین خالص پر شدند. هنگام ریختن رزین حاوی ۱٪ نانوکلی پخش شده با استفاده از فراصوت در ارتفاع‌های ۳ و ۱ میلی‌متر، جهت شبیه سازی وجود هوا، قطعات نایلون IP67 آغشته به روغن سیلیکون قرار داده شد. در نمونه ۴ عیوب فقط در بین لایه‌های رویه بالا وجود دارند. در بین هر لایه عیوب صفحات خشک، قطعات تفلون، کپتون، نایلون IP67 آغشته به روغن سیلیکون، رزین مخلوط شده با خاک و رزین خشک شده قرار داده شد.

[۱۱] و در هواپیمای مسافربری Comac C919 [۱۲] استفاده شده است.

در این پژوهش به ارزیابی عیوب معمول [۱۷] در هنگام ساخت مخزن کامپوزیتی با دیواره ساندویچی عایق با لایه رزینی (به عنوان لاینر) پرداخته شده است. این امر از طریق دمانگاری غیرمخرب تکمیل شده و با بررسی سیگنال‌های حرارتی خام جهت شناسایی دقیق عیب به دست آمد.

۲- ساخت نمونه

از آنجایی که ساخت نمونه در مقیاس واقعی نیاز به زمان و هزینه بالایی داشت، در این تحقیق از نمونه‌های نماینده دیواره عایق مخزن واقعی با استفاده از طرح زو و همکاران [۱۳] هدف گذاری شد. چهار نمونه کامپوزیتی لانه زنبوری به ابعاد 21 Cm × 20 Cm × 3 Cm ساخته شد. از پارچه ۲۰۰ گرمی الیاف کربن T-300، لانه زنبوری نومکس ATA-NH Aerospace Grade جهت ساخت نمونه‌ها استفاده شد [۲۰]. شماتیک اجزای نمونه‌های ساخته شده در شکل (۳) نشان داده شده است. ابتدا هر رویه ساخته و در نهایت با چسب همراه با فشار مستمر بر روی هسته لانه زنبوری چسبانده شدند. بدین ترتیب ۸ لایه کربن برای پوسته بالا و پایین، ۵ میلی‌متر رزین حاوی نانوکلی و ۲۰ میلی‌متر هسته نومکس، مجموعاً هر نمونه با ضخامت ۳۰ میلی‌متر ساخته شد.



شکل (۳) اجزای نمونه‌های نماینده مخزن ساخته شده.

در نمونه‌ها عیوب وجود هوا با استفاده از نایلون IP67^۱ (رتبه‌بندی IP که به عنوان رتبه‌بندی حفاظت از ورود نیز شناخته می‌شود، یک استاندارد بین‌المللی است که توسط کمیسیون بین‌المللی برق (IEC 60529) ایجاد شده است و

² Teflon Tape

³ Kepton Film

⁴ Nanoclay 30B

¹ Nylon IP67

۳- روش بازرسی نمونه

جهت تحریک حرارتی نوری، از لامپ‌هایی با توان حرارتی بالا به عنوان منابع حرارتی برای تحریک نمونه‌ها استفاده شد. این روش شامل گرم کردن نمونه‌ها از طریق اعمال ناگهانی حجم عظیمی از نور انرژی دهنده در یک بازه زمانی و مشاهده تغییر دمای سطح نمونه، بلافاصله پس از تحریک است. انجام این روند، امکان شناسایی عیوب مختلف در نمونه را فراهم می‌کند. این لامپ‌ها با پالس بلند مربعی ۱۵ ثانیه‌ای اعمال حرارت کردند. جهت تحریک حرارتی نمونه‌های مورد آزمایش، از دو پروژکتور ۲ کیلووات (مجموعاً ۴ کیلووات انرژی حرارتی) لامپ تنگستنی استفاده شد. نمونه‌ها یک بار از سطح جلو و پس از خنک کاری، بار دیگر از سطح پشت تحریک و مورد ارزیابی قرار گرفتند. دوربین مورد استفاده در آزمایشات، دوربین مادون قرمز Flir A325SC با رزولیشن ۳۲۵ × ۲۴۰ پیکسل با حساسیت حرارتی ۰/۰۵ درجه سانتی‌گراد، فرکانس ۶۰ هرتز با دقت اندازه‌گیری حرارت ±۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. با استفاده از نرم افزار Flir ResearchIR Mx+HSDR Version 4.40.12.38 تصاویر حرارتی استخراج شد. شماتیک چیدمان و ادوات آزمایش در شکل (۵) نشان داده شده است.

انتقال حرارت هدایتی (رسانش) زمانی اتفاق می‌افتد که دو شی در دماهای مختلف در تماس با یکدیگر هستند. حرارت از جسم گرم به جسم سردتر جریان می‌یابد تا زمانی که هر دو در یک دما قرار بگیرند. انتقال حرارت از یک طرف دیوار (که گرمتر است) به طرف دیگر آن (که دمای کمتری دارد) می‌باشد هدایت حرکت گرما از طریق یک ماده توسط برخورد مولکول‌ها است. در نهایت، نرخ انتقال گرما به نوعی از ویژگی‌های ماده بستگی دارد که با ضریب هدایت حرارتی یا ضریب رسانندگی توصیف می‌شود [۱۸]. تمام این عوامل مؤثر که در معادله ساده حاکم بر هدایت حرارتی دیده می‌شوند، ابتدا به صورت تجربی استنباط شده و بعدها نیز توسط آزمایش‌های تجربی تأیید شده‌اند. نرخ انتقال حرارت هدایتی در قطعه با رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{Q}{t} = \frac{KA(T_2 - T_1)}{d} \quad (1)$$

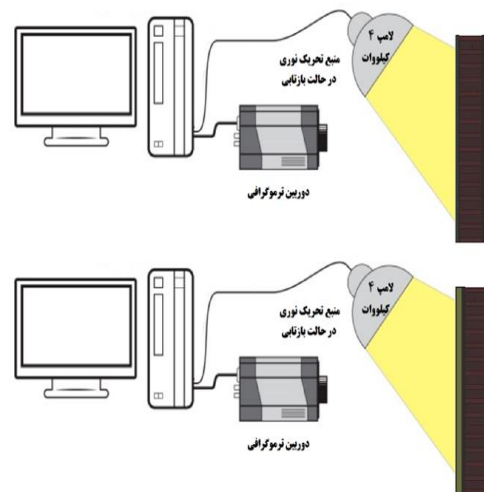
که در آن Q/t نرخ انتقال گرما با واحد ژول بر ثانیه (J/s) ، K ضریب هدایت گرمایی ماده، A سطح مقطع، d ضخامت و $T_2 - T_1$ اختلاف دما میان دو سر جسم است.

انتقال حرارت همرفتی به انتقال گرما توسط حرکت توده مولکول‌ها در سیالات، از قبیل گازها و مایعات، گفته می‌شود. جابجایی زمانی رخ می‌دهد که مناطق گرم نسبت به مناطق خنک در مایع و یا گاز افزایش یابد. همانطور که این اتفاق می‌افتد، مایع یا گاز خنک‌تر جایگزین مناطق گرم‌تر شده که بالاتر از آن است. مقدار گرمای انتقال یافته در این روش از رابطه‌ای به نام قانون سرمایش نیوتون به دست می‌آید:

$$Q = hA(T_w - T_\infty) \quad (2)$$

که در آن T_w دمای سطح در حال تماس با سیال، T_∞ دمای سیال، A مساحت سطح و h ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی است. این ضریب برای جابه‌جایی اجباری (نیروی) بیشتر از آزاد (طبیعی) است. در انتقال حرارت تابشی، گرما با استفاده از مکانیسم

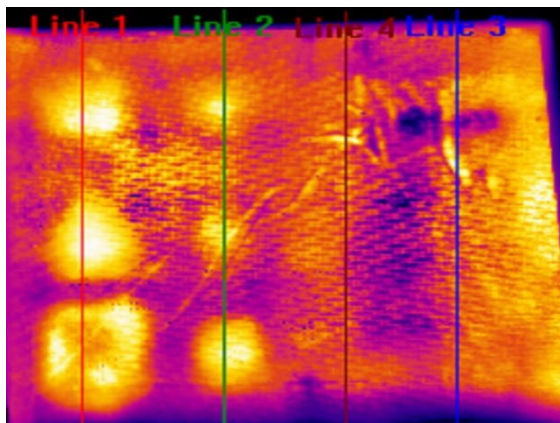
از نقطه نظر سخت افزاری، بسته به اینکه این گرادیان دمایی را ما ایجاد کنیم و یا ناشی از کارکرد جسم، بطور طبیعی وجود داشته باشد؛ بازرسی به دو روش بازرسی فعال و غیرفعال تقسیم بندی می‌شود. در بازرسی دمانگاری فعال،



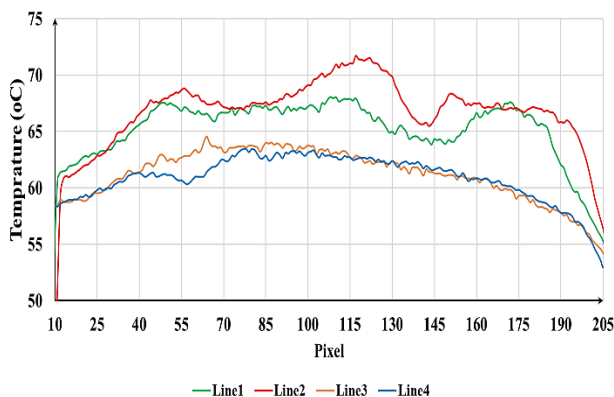
شکل (۵) شرایط بازرسی نمونه‌های معیوب.

در این روش بازرسی، گرما با استفاده از مکانیسم

در نتایج شکل (۷) مربوط به نمونه ۳، متوسط حرارت عیوب رزین خشک شده (مربعی) و هوا (مثلثی) بین $42-45^{\circ}\text{C}$ مشاهده شد. پیک‌های اول و آخر نمودار نشان دهنده گوشه‌های نمونه و تمرکز حرارتی در لبه‌های نمونه می‌باشد. اندازه عیوب در خط ۱ بین ۳۵-۵۵ پیکسل (۲۰ میلی‌متر)، ۹۰-۱۲۰ (۳۰ میلی‌متر)، ۱۴۰-۱۵۵ پیکسل (۱۵ میلی‌متر) و ۱۷۵-۱۹۰ پیکسل (۱۵ میلی‌متر) از نمودار شکل (۷) - ب قابل تشخیص بودند که دقیقاً به همان اندازه واقعی هستند. اندازه عیوب در خط ۲ بین ۳۰-۶۰ پیکسل (۲۰ میلی‌متر) و ۱۸۰-۱۹۵ پیکسل (۱۵ میلی‌متر) از نمودار شکل (۷) - ب قابل تشخیص بودند که دقیقاً به همان اندازه واقعی هستند. محل دقیق و پیک حرارتی عیب هسته در نمودار شکل (۷) - ب قابل تشخیص نبود اما با توجه به شکل (۷) - الف محل حدودی آن در خط ۲ بین ۱۷۰-۵۵ پیکسل (۱۱۵ میلی‌متر)، در پیک حرارتی 42°C قرار دارد.



الف



ب

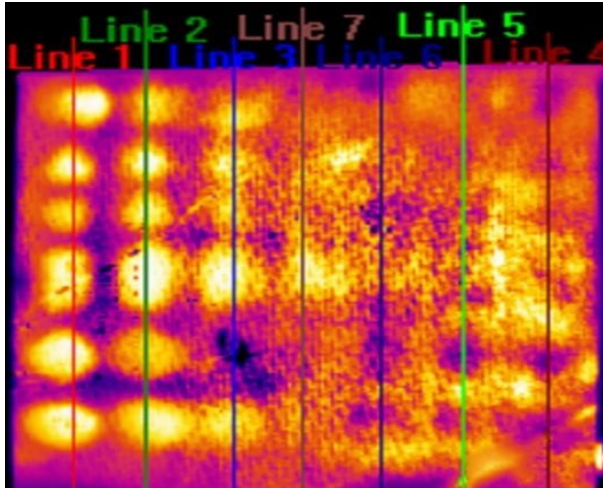
شکل (۶) مقایسه حرارتی عیوب نمونه ۱ (الف) محل خطوط رسم شده و (ب) نمودار دما - مکان.

تابش انرژی یا حرکت موج از یک جسم به جسم دیگر اتفاق می‌افتد. در این روش برخلاف دو روش قبل برای انتقال حرارت نیاز به ماده نیست. مانند گرمای خورشید که از فضای بدون ماده عبور کرده و به ما می‌رسد. میزان گرمای منتقل شده از روش تابش به دو عامل بستگی دارد: دمای جسم و رنگ آن. هرچه دمای جسم بیشتر باشد میزان گرمای تابیده از آن بیشتر است و اگر دمای آن کمتر باشد، بیش از آنکه گرما را تابش کند، دریافت می‌کند.

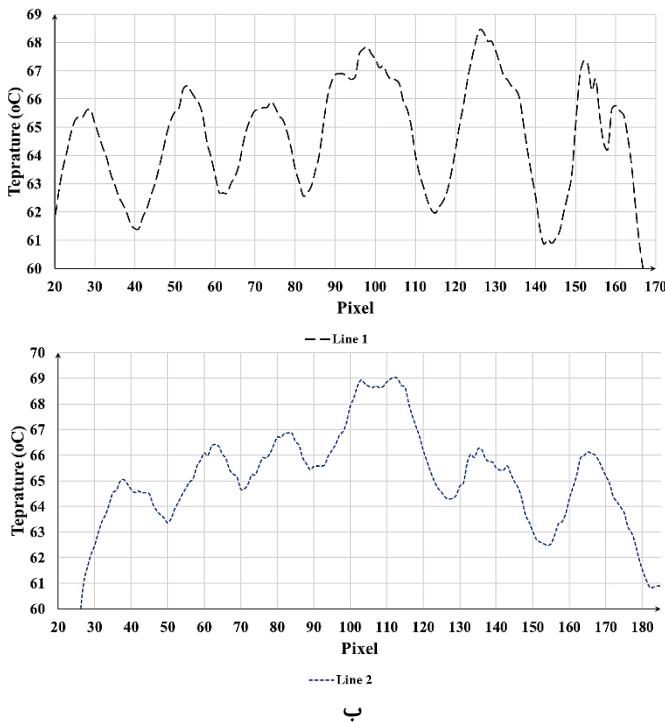
۴- بحث و نتایج

از اهداف پژوهش، ارزیابی اثر ابعاد عیب و ضخامت لایه کامپوزیتی بر اختلاف دمایی عیوب با مناطق سالم و درصد اختلاف اندازه عیوب شناسایی شده با اندازه واقعی عیوب است. برای تفسیر نتایج آزمایشات متعددی بر روی نمونه‌های مختلف انجام شد.

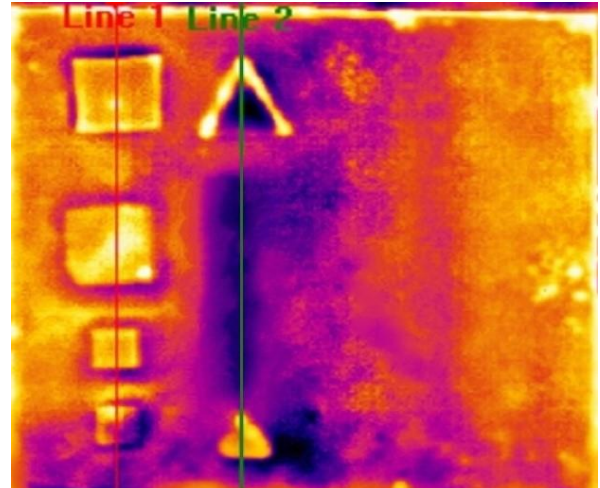
جهت تعیین دمای متوسط و اندازه عیوب، با کشیدن خط از روی عیوب، نمودارهای دما - مکان هر خط قابل ترسیم هستند. از ۴ نمونه، نمونه ۲ به دلیل نداشتن شرایط مناسب در تصاویر حرارتی قابلیت ترسیم خطوط و بازرسی موفقیت آمیز نداشت. نمونه ۴ به دلیل شلوغ بودن و نزدیک بودن عیوب به یکدیگر، نمودارها بطور مجزا نمایش داده شدند. با توجه به اینکه عرض نمونه 204 میلی‌متر و تعداد پیکسل‌هایی که روی عرض نمونه قرار دارند 200 عدد است، فاصله هر پیکسل حدود 1 میلی‌متر در نظر گرفته شد. در شکل (۶) عیوب ظاهر شده در لایه پنجم باهم مقایسه شدند. متوسط حرارت عیوب کپتون 67°C ، عیوب هوا 71°C و عیوب رزین خشک شده 67°C مشاهده شد. اندازه عیوب در خط ۱ بین ۷۰-۴۰ پیکسل (۳۰ میلی‌متر)، ۱۳۰-۱۰۰ (۳۰ میلی‌متر) و ۱۹۰-۱۵۰ پیکسل (۴۰ میلی‌متر) از نمودار شکل (۶) - ب قابل تشخیص بودند که دقیقاً به همان اندازه واقعی هستند. اندازه عیوب در خط ۲ بین ۶۰-۴۰ پیکسل (۲۰ میلی‌متر)، ۱۲۵-۱۰۵ (۲۰ میلی‌متر) و ۱۸۵-۱۵۵ پیکسل (۳۰ میلی‌متر) از نمودار شکل (۶) - ب قابل تشخیص بودند که از میزان واقعی 5 میلی‌متر بزرگتر هستند.



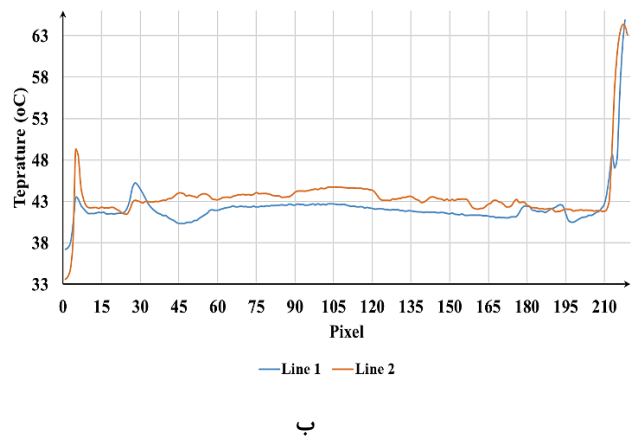
الف



شکل (۸) مقایسه حرارتی عیوب نمونه ۴ الف) محل خطوط رسم شده و ب) نمودار دما - مکان خطوط ۱ و ۲.



الف

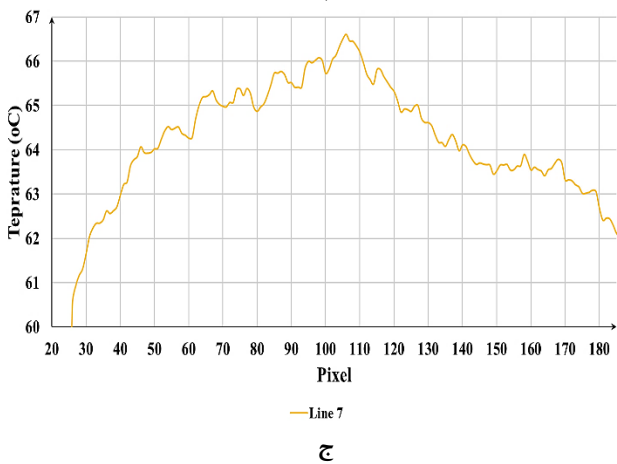
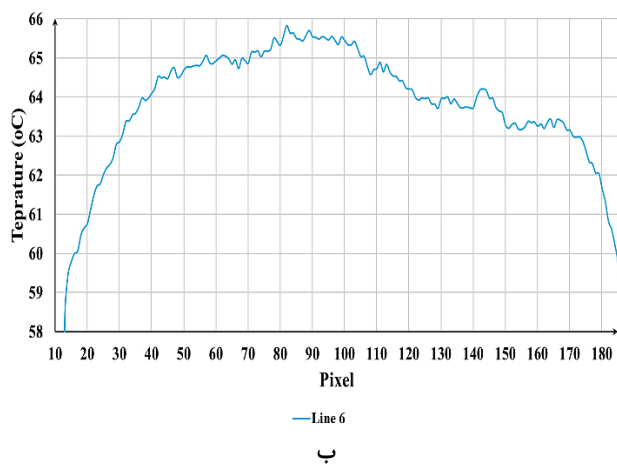
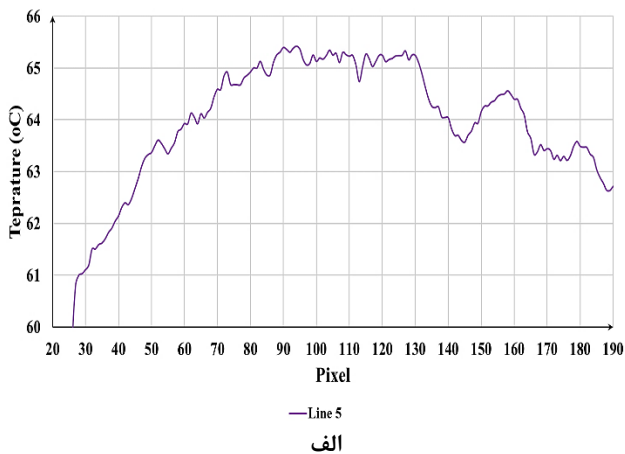


ب

شکل (۷) مقایسه حرارتی عیوب نمونه ۳ الف) محل خطوط رسم شده و ب) نمودار دما - مکان.

در نتایج نمودارهای شکل (۸) تا (۱۰) مربوط به نمونه ۴، تنها عیوب واقع در خطوط ۱ تا ۳ قابل تشخیص هستند. تمامی عیوب شناسایی شده در محدوده پیک حرارتی 66°C قرار دارند و فاصله بین دو قعر هر پیک تا ۵ میلی‌متر (0.33%) بزرگتر از واقعیت قابل تشخیص هستند.

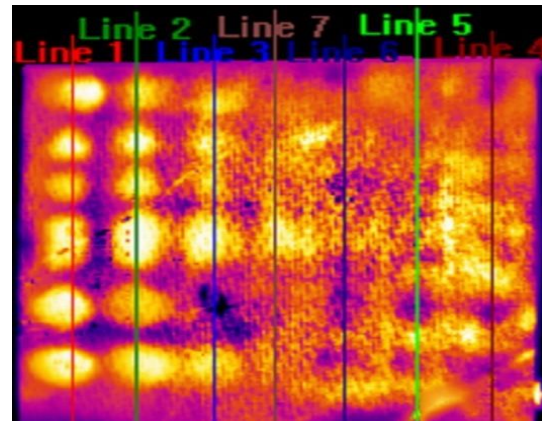
همان طور که مشاهده می‌شود، به طور کلی هر چقدر عیب بزرگتر باشد اختلاف حرارتی آن بیشتر است. اختلاف حرارتی عیوب در زمینه الیاف کربن بیشتر از اختلاف حرارتی عیوب در زمینه الیاف شیشه است. میانگین اختلاف حرارتی عیوب در زمینه الیاف کربن حدود ۲ برابر بیشتر از میانگین اختلاف حرارتی عیوب در زمینه الیاف شیشه است. هر چه پوسته الیاف کربنی ضخیم‌تر باشد، اختلاف حرارتی



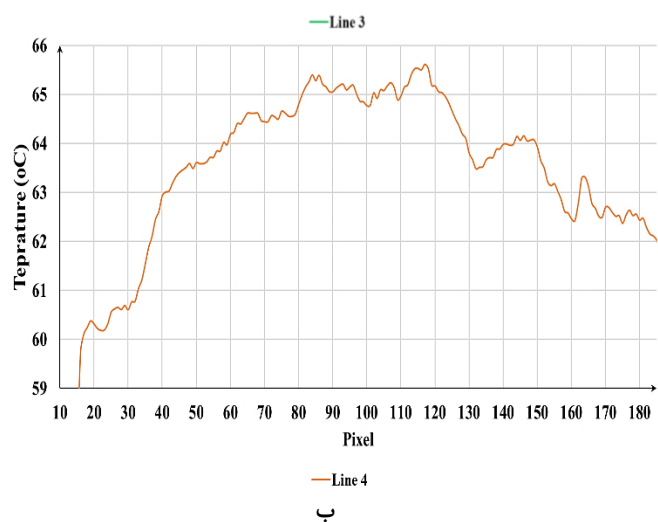
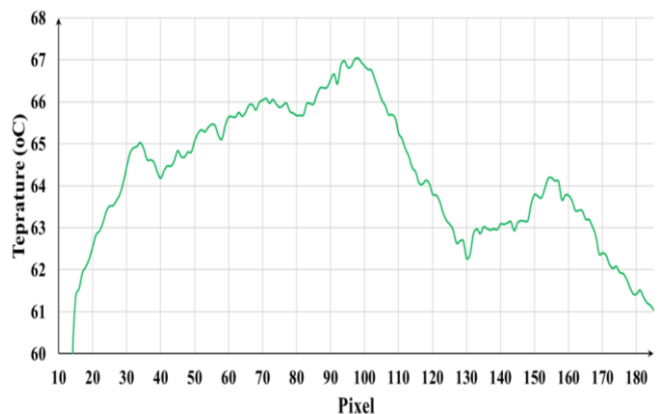
شکل (۱۰) مقایسه نمودار دما - مکان خطوط ۵ و ۶ و ۷.

در جدول (۱) شدت حرارتی، اندازه و درصد اختلاف اندازه عیوب شناسایی شده در نمونه‌های ۱، ۳ و ۴ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، عیوب واقع در پوسته و رزین با دقت بالایی شناسایی شدند.

عیوب با مناطق سالم بیشتر می‌شود. این روند در پوسته‌های الیاف شیشه‌ای برعکس است و هر چه پوسته ضخیم‌تر می‌شود، اختلاف حرارتی عیوب با مناطق سالم کاهش می‌یابد [۱۹].



الف



شکل (۹) مقایسه حرارتی عیوب نمونه ۴ و الف) محل خطوط رسم شده و ب) نمودار دما - مکان خطوط ۳ و ۴.

بالایی است و با استفاده از نمودار دما - مکان، اندازه عیوب تا عمق ۱ میلی‌متر را می‌توان با دقت بالایی مشخص نمود، اما در شناسایی عیوب در لایه‌های داخلی و هسته دقت پایینی دارد. همچنین، در نمونه شماره ۴، تا لایه چهارم، روش دمانگاری در شناسایی انواع عیب موثر بوده، اما در لایه‌های بعدی این روش موثر نیست. در ادامه نتایج تحقیقی مشابه، جهت مقایسه با نتایج پژوهش فعلی آورده شده است. چانگ و همکاران [۲۱] تجزیه و تحلیل عمیقی از کاربرد دمانگاری قفل شده^۱ (LIT) برای ارزیابی غیر مخرب ورود آب در سازه‌های ساندویچی لانه زنبوری (پوسته الیاف شیشه و هسته نومکس) را ارائه دادند. آن‌ها از یک نمونه کامپوزیت لانه زنبوری مربعی با ابعاد ۲۱۰ میلی‌متر × ۲۱۰ میلی‌متر، حاوی ۱۶ ناحیه معیوب مختلف در اندازه‌های مختلف، که هر کدام با درصد‌های مختلف حجم سلول (۲۵، ۵۰، ۷۵، و ۱۰۰ درصد) پر از آب شده‌اند، استفاده کردند (شکل (۱۱)). نمونه در فرکانس‌های مدولاسیون چندگانه از ۱ هرتز تا ۰،۰۱ هرتز در معرض LIT قرار می‌گیرد. سپس سیگنال‌های فاز حاصل از طریق الگوریتم Otsu برای باینری‌سازی پردازش کردند و امکان تمایز واضح‌تر بین مناطق معیوب و غیر معیوب را فراهم کردند. روش تحریک شامل گرم کردن سطح نمونه با یک لامپ هالوژن ۱ کیلوواتی و گرفتن پاسخ حرارتی با یک دوربین مادون قرمز بود. مطالعه آن‌ها داد که تشخیص نفوذ آب به طور قابل توجهی تحت تأثیر فرکانس مدولاسیون مورد استفاده قرار گرفت. بطوریکه با فرکانس‌های پایین‌تر به کنتراست فاز و CNR بهتری بدست آمد. فرکانس بهینه برای تشخیص عیب حدود ۰،۱ هرتز بود، زیرا بالاترین کنتراست فاز و مقادیر CNR را ارائه داد. همچنین آن‌ها رابطه بین کنتراست فاز و CNR را بررسی کردند و نشان دادند که بهترین مقادیر CNR با فرکانس‌های مدولاسیونی مطابقت دارد که حداکثر کنتراست فاز را ایجاد می‌کند (شکل (۱۲)). علاوه بر این، عملکرد الگوریتم Otsu را در باینریزه کردن تصاویر زاویه فاز ارزیابی کردند که اشکال عیوب را ساده می‌کند و قابلیت تشخیص را افزایش می‌دهد. در نتیجه مطالعه آن‌ها نشان داد که LIT، همراه با الگوریتم Otsu یک روش بسیار مؤثر برای تشخیص ورودی آب در ساختارهای ساندویچی لانه زنبوری است [۲۱].

جدول (۱) اطلاعات اندازه و شدت حرارتی عیوب شناسایی شده در نمونه‌های ساندویچی

| نمونه ۱ | | | |
|--------------------|--------|------------|--------------|
| درصد اختلاف اندازه | اندازه | شدت حرارتی | نوع عیب |
| ۰ | ۳۰ | ۶۷ | کپتون - خط ۱ |
| ۰ | ۴۰ | ۷۱ | هوا - خط ۱ |
| ۳۳ | ۲۰ | ۶۷ | کپتون - خط ۲ |
| ۳۳ | ۳۰ | ۷۱ | هوا - خط ۲ |

| نمونه ۳ | | | |
|--------------------|--------|------------|----------------------------------|
| درصد اختلاف اندازه | اندازه | شدت حرارتی | نوع عیب |
| ۰ | ۲۰ | ۴۷ | رزین خشک شده عمق ۳ میلی متر خط ۱ |
| ۰ | ۳۰ | ۴۵ | رزین خشک شده عمق ۱ میلی متر خط ۱ |
| ۰ | ۱۵ | ۴۳ | رزین خشک شده عمق ۳ میلی متر خط ۱ |
| ۰ | ۱۵ | ۴۴ | رزین خشک شده عمق ۱ میلی متر خط ۱ |
| ۰ | ۲۰ | ۴۵ | هوا ۳ میلی متر خط ۲ |
| ۰ | ۱۵ | ۴۳ | هوا ۱ میلی متر خط ۲ |
| ۴۷ | ۱۱۵ | ۴۲ | هسته شکسته خط ۲ |

| نمونه ۴ | | | |
|--------------------|--------|------------|-------------------------------|
| درصد اختلاف اندازه | اندازه | شدت حرارتی | نوع عیب |
| ۰ | ۱۵ | ۶۶ | دو لایه پارچه کربن خشک لایه ۷ |
| ۰ | ۱۵ | ۶۵ | دو لایه پارچه کربن خشک لایه ۶ |
| ۰ | ۱۵ | ۶۵ | دو لایه پارچه کربن خشک لایه ۵ |
| ۰ | ۱۵ | ۶۶ | کپتون لایه ۷ |
| ۰ | ۰ | ۶۶ | کپتون لایه ۶ |
| ۳۳ | ۲۰ | ۶۶ | کپتون لایه ۵ |
| ۰ | ۱۵ | ۶۶ | تفلون لایه ۷ |
| ۰ | ۱۵ | ۶۷ | تفلون لایه ۶ |
| ۳۳ | ۲۰ | ۶۷ | تفلون لایه ۵ |
| ۰ | ۲۵ | ۶۸ | هوا لایه ۷ |
| ۰ | ۲۵ | ۶۸ | هوا لایه ۶ |
| ۳۳ | ۳۰ | - | هوا لایه ۵ |
| ۰ | ۱۵ | ۶۹ | گرد و خاک لایه ۷ |
| ۰ | ۱۵ | ۶۶ | گرد و خاک لایه ۶ |
| ۰ | ۱۵ | ۶۸ | رزین خشک شده لایه ۷ |
| ۰ | ۱۵ | ۶۶ | رزین خشک شده لایه ۶ |
| ۲۰ | ۱۲ | ۶۴ | رزین خشک شده لایه ۵ |

از نتایج بدست آمده استنباط می‌شود که روش دمانگاری در شناسایی عیوب در لایه‌های خارجی و رزین دارای دقت

¹ Lock-in Thermography

۵- نتیجه‌گیری

بطور خلاصه نتایج بدست آمده بصورت زیر آورده شده است:

۱- شناسایی عیوب از طریق دمانگاری فقط با روش بازتابی قابل انجام بود. بطوریکه منبع تحریک حرارتی و دوربین مادون قرمز در روبروی محل عیوب قرار داده شدند.
۲- در هنگام تحریک حرارتی به دلیل بازتاب نور از قطعه و تجمع حرارتی ناشی از حضور لامپ نویزهای زیادی در تصویر دیده می‌شد و به همین دلیل شناسایی عیوب می‌باشد، در هنگام خنک کاری انجام شود.
۳- در ارزیابی‌های دمانگاری مشخص شد که تمامی عیوب درون پوسته خارجی و رزین با وضوح بالا قابل شناسایی هستند، اما عیوب پوسته داخلی و عیوب هسته با دقت پایینی شناسایی شدند.

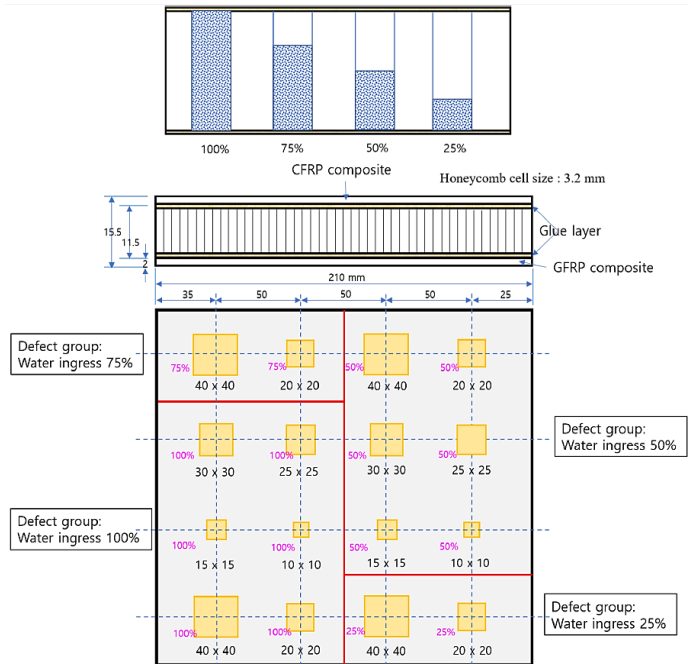
۴- در نمونه شماره ۴ کارایی روش دمانگاری در شناسایی انواع عیب در لایه‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفت. تا لایه چهارم تمامی عیوب قابل شناسایی شدند. عیوب تفلون، کپتون و لایه‌های پارچه کربنی خشک در لایه‌های میانی (۵، ۶ و ۷) قابل شناسایی نشدند.
۵- با استفاده از نمودار دما - مکان اندازه عیوب تا عمق ۱ میلی‌متر را می‌توان با دقت بالایی مشخص نمود.

۶- تعارض منافع

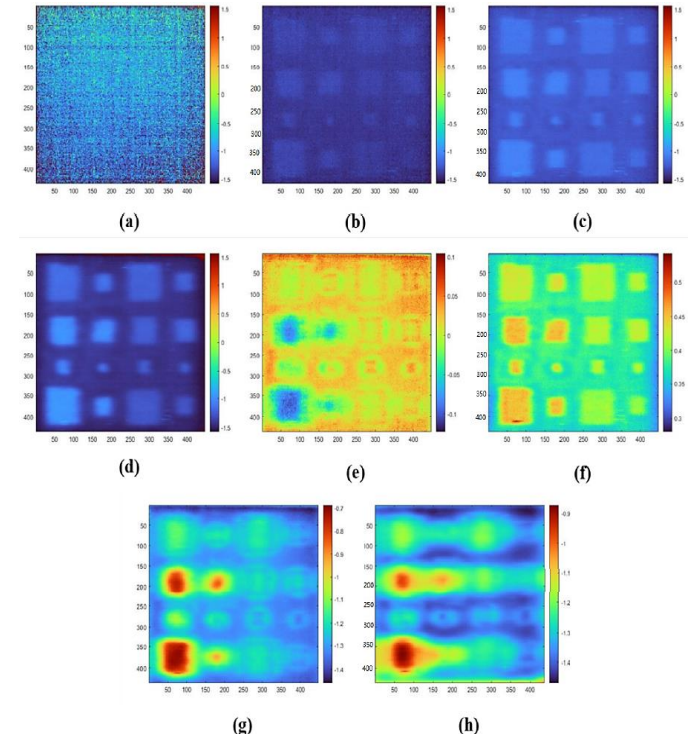
هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷- منابع

- [1] Tříska, V., Chlebeček, T., Hnidka, J., & Mañas, K. (2021). Testing of the heating element integrated into the honeycomb sandwich structure for active thermography inspection. *Journal of Sandwich Structures & Materials*, 23(7), 3368-3389.
- [2] Graue, R., Krisson, M., Erdmann, M., & Reutlinger, A. (2000). Integrated health monitoring approach for reusable cryogenic tank structures. *Journal of Spacecraft and Rockets*,



شکل (۱۱) شماتیک ساندویچ پانل با هسته لانه زنبوری با در نظر گرفتن حجم مختلف آب [۲۱].



شکل (۱۲) تصاویر فاز (a) ۱ هرتز، (b) ۰.۵ هرتز، (c) ۰.۲ هرتز، (d) ۰.۱ هرتز، (e) ۰.۷ هرتز، (f) ۰.۵ هرتز، (g) ۰.۳ هرتز، (h) ۰.۱ هرتز [۲۱].

- [13] Xue, X., Zhang, C., Chen, W., Wu, M., & Zhao, J. (2019). Study on the impact resistance of honeycomb sandwich structures under low-velocity/heavy mass. *Composite Structures*, 226, 111223.
- [14] Ardebili, A., Farahani, M., & Asghari, S. (2020). Thermography with radiation excitation for non-destructive evaluation of composite and sheet metal. *NDT Technology*, 2(5), 3-13.
- [15] Khoshkbary, R., Farahani, M., Safarabadi, M., & Asghari, S. (2019). Using of Modulated Thermography for Nondestructive Testing of Polymer Plates. *NDT Technology*, 2(4), 38-45.
- [16] Nategh, K., & Farahani, M. (2022). Improving the Nondestructive Thermography Inspection Results for Detection of Circular Defects in Coated Metals Using Principal Component Analysis. *NDT Technology*, 2(9), 33-40.
- [17] Zarei, A., Farahani, S., & Pilla, S. (2022). An experimental study on the manufacturing of engineered defects in composite plates. *Composites Part C: Open Access*, 9, 100327.
- [18] Ardebili, A., Farahani, M. and Asghari, S., (2020). Thermography with radiation excitation for non-destructive evaluation of composite and sheet metal. *NDT Technology*, 2(5), pp.3-13.
- [19] Ardebili, A. and Farahani, M.R., (2020). Identification of Delamination Defects in Metal-Composite Shells Using Pulse Thermography. *Modares Mechanical Engineering*, 20(9), pp.2303-2312.
- [20] Jafari, M., Kaveh, A., Ardebili, A. and Moini Jazani, O., (2022). Design and simulation Sandwich Composite Fairing Shells Using FEM Analyzing. *Journal of Computational Applied Mechanics*, 53(1), pp.55-65.
- [21] Chung Y, Shrestha R, Lee S, Kim W., (2022). Binarization mechanism evaluation for water ingress detectability in honeycomb sandwich structure using lock-in thermography. *Materials*. 21;15(6):2333.
- [2] 37(5), 580-585.
- [3] Lu, F., Ju, H., & Huang, J. (2016). An improved extended Kalman filter with inequality constraints for gas turbine engine health monitoring. *Aerospace Science and Technology*, 58, 36-47.
- [4] Attarian, V. (2014). Long-term structural health monitoring of plate-like structures using distributed guided wave sensors (Doctoral dissertation, Imperial College London).
- [5] Behera, S., Sahoo, S. K., Srivastava, L., & Gopal, A. S. (2019). Structural integrity assessment of filament wound composite pressure vessel using through transmission technique. *Procedia Structural Integrity*, 14, 112-118.
- [6] Wang, X., Gao, M., Wang, F., Yang, F., Yue, H., & Liu, J. (2023). Convolution Neural Network Fusion Lock-In Thermography: A Debonding Defect Intelligent Determination Approach for Aviation Honeycomb Sandwich Composites (HSCs). *Metals*, 13(5), 881.
- [7] Abbadi, A., Azari, Z., Belouettar, S., Gilgert, J., & Freres, P. (2010). Modelling the fatigue behaviour of composites honeycomb materials (aluminium/aramide fibre core) using four-point bending tests. *International Journal of Fatigue*, 32(11), 1739-1747.
- [8] Synaszko, P., Sałaciński, M., & Kornas, Ł. (2015). The effect of environmental flight conditions on damage propagation in composite sandwich structure. *Fatigue of Aircraft Structures*, 2015(7), 24-27.
- [9] Kim, G., Sterkenburg, R., & Tsutsui, W. (2018). Investigating the effects of fluid intrusion on Nomex® honeycomb sandwich structures with carbon fiber facesheets. *Composite Structures*, 206, 535-549.
- [10] Herrmann, A. S., Zahlen, P. C., & Zuardy, I. (2005). Sandwich structures technology in commercial aviation: Present applications and future trends. In *Sandwich Structures 7: Advancing with Sandwich Structures and Materials: Proceedings of the 7th International Conference on Sandwich Structures*, Aalborg University, Aalborg, Denmark, 29–31 August 2005 (pp. 13-26). Springer Netherlands.
- [11] Zhang, Y., Liu, T., & Tizani, W. (2018). Experimental and numerical analysis of dynamic compressive response of Nomex honeycombs. *Composites Part B: Engineering*, 148, 27-39.
- [12] Gurgun S., Cakir H., Sofuoglu M.A., Kushan M.C. (2018). Composite structures of C919, *Proceedings of Conference for 8th International Conference*, Singapore, 26th–27th, pp. 1–5.