

Performance Evaluation of Thermography Test Parameters for the Inspection of Composite Patches

MirSaeed Safizadeh¹  | Hadi Pourshahsavari² 

1. Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
E-mail: safizadeh@iust.ac.ir
2. Department of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
E-mail: Hadi_Pourshahsavari@mecheng.iust.ac.ir

Article Information:

Research Article

Received 19 Sept. 2025

Revised 23 July 2026

Accepted 4 Oct. 2026

Keywords:

Repaired Composite Str.,
Test Parameters,
Thermography,
Delamination,
Disbond.

ABSTRACT

Due to the increasing use of composite patches for repairing or reinforcing metallic and composite structures, health monitoring of these patches has become critically important. Thermography is one of the most powerful non-destructive testing methods employed for evaluating repaired structures. Given the numerous parameters influencing defect detection in repaired composite structures, identifying the most effective approach for determining these parameters is of great significance. In this study, experimental and finite element simulation methods were used to investigate key parameters for thermographic inspection of carbon fiber composite patches, such as the duration of thermal loading and the optimal imaging frame. The composite patch used to repair the carbon fiber base structure contained delamination and disbanding defects of various sizes and characteristics at different depths. In the thermal simulation, a criterion based on the maximum thermal variation along a path was developed to extract the optimal thermal imaging frames. Validation of the results was performed by defining direct and diagonal paths across the defects in both experimental thermographic images and simulated temperature contours. The average error in thermal variation across different paths in thermographic and simulation images was less than 4.5%, confirming the consistency of results from both methods. Another major challenge in defect detection process is determining the impact of defect characteristics on the detection process and prioritizing these features. In this research, defect attributes—including size, depth, material type, and distance from the edge—were examined using methods developed in the present study. The findings indicate that the influence of defect characteristics on detection follows the order: material type, depth, size, and proximity to free edges. Furthermore, the study revealed that the distance between two defects significantly affects image contrast in thermographic detection. The relationship between defect spacing and defect dimensions was extracted through simulation method and validated using experimental thermographic images.

Cite this article: Safizadeh, M. S., & Pourshahsavari, H., (2025). Evaluation of the Impact of Thermography Test Parameters on the Detection of Defects in Composite Patches. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 5 (1), 15-30.



© The Author(s).

DOI: <http://doi.org/10.30494/jndt.2026.547984.1170>

Publisher: Iranian Society for Nondestructive Testing

ارزیابی تاثیر پارامترهای آزمون دمانگاری برای بازرسی وصله‌های کامپوزیتی

میرسعید صفی‌زاده^۱ | هادی پورشه‌سوار^۲^۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، رایانامه: safizadeh@iust.ac.ir^۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، رایانامه: Hadi_Pourshahsavari@mecheng.iust.ac.ir

چکیده:

با توجه به افزایش کاربرد وصله‌های کامپوزیتی به منظور ترمیم و یا تقویت سازه‌های فلزی و کامپوزیتی، پایش سلامت این وصله‌ها حائز اهمیت می‌باشد. روش دمانگاری یکی از قدرتمندترین روش‌های آزمون غیرمخرب است که برای ارزیابی سازه‌های ترمیم‌شده به کار گرفته می‌شود. از آنجا که پارامترهای زیادی در شناسایی عیوب در سازه‌های کامپوزیتی تعمیرشده تأثیرگذار هستند، استخراج مؤثرترین روش برای تعیین این پارامترها اهمیت زیادی دارد. در این مقاله، پارامترهای آزمایشی جهت بازرسی دمانگاری وصله کامپوزیتی فایبر کربن مانند مدت زمان اعمال بار حرارتی و بهترین فریم تصویری با استفاده از آزمایش تجربی و شبیه‌سازی اجزای محدود مطالعه شده است. وصله کامپوزیتی که جهت تعمیر سازه پایه‌ای از جنس فایبر کربن استفاده شده دارای عیوب تورق و جدایش با ابعاد و ویژگی‌های مختلف در اعماق گوناگون است. ابتدا در شبیه‌سازی حرارتی، معیار بیشینه تغییرات حرارتی نسبت طول مسیر توسعه داده شد تا زمان بهترین فریم‌های حرارتی استخراج شوند. صحنه‌گذاری نتایج از طریق تعریف مسیرهای مستقیم و مورب عبوری از عیوب، در تصاویر دمانگاری آزمون تجربی و کانتورهای دمایی شبیه‌سازی، صورت پذیرفته است. میانگین خطای تغییرات حرارتی در مسیرهای مختلف نمایش داده‌شده در تصاویر دمانگاری و شبیه‌سازی کمتر از ۴/۵ درصد است که تطابق نتایج حاصل از هر دو روش را تأیید می‌کند. یکی دیگر از چالش‌های مهم در تشخیص عیوب، تعیین تأثیر ویژگی‌های عیوب بر فرآیند تشخیص و اولویت‌بندی این ویژگی‌هاست. در این مقاله، ویژگی‌های عیوب شامل اندازه، عمق، جنس ماده و فاصله از لبه بواسطه روش‌های توسعه داده شده، مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج حاکی از آنست که ویژگی‌های عیوب و تأثیر آن‌ها بر فرآیند شناسایی، به ترتیب شامل جنس عیب، عمق، اندازه و لبه آزاد می‌باشند. همچنین در این پژوهش مشخص شد که فاصله بین دو عیب برای وضوح تصاویر دمانگاری در شناسایی عیوب مؤثر می‌باشد و ارتباط فاصله بین دو عیب با اضلاع عیوب از طریق شبیه‌سازی استخراج شد و صحنه‌گذاری روابط ارائه‌شده، از طریق تصاویر آزمون تجربی صورت پذیرفت.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۴/۰۶/۲۸

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۵/۰۵/۰۱

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۵/۰۷/۱۲

کلیدواژگان:

سازه کامپوزیتی تعمیرشده،

پارامترهای آزمون،

دمانگاری،

تورق،

جدایش.

استناد: صفی‌زاده، میرسعید؛ و پورشه‌سوار، هادی. (۱۴۰۴). ارزیابی تاثیر پارامترهای آزمون دمانگاری برای شناسایی عیوب وصله‌های کامپوزیتی. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۵ (۱)، ۳۰-۱۵.

© نویسندگان

ناشر: انجمن آزمون‌های غیرمخرب ایران



DOI: http://doi.org/10.30494/jndt.2026.547984.1170

۱. مقدمه

با توجه به کاربرد روزافزون مواد کامپوزیتی در صنایع هوایی، نیاز به روش‌های جدید و سریع مانند آزمون‌های غیرمخرب برای بازرسی این مواد احساس می‌شود. برخی مطالعات پیشین بر روش‌های پایه‌ای مانند آزمون‌های ضربه‌ای، نشرآویی، پرتونگاری، فراصوت و دمانگاری برای بازرسی مواد کامپوزیتی تمرکز داشته‌اند [۵-۱]. خلاصه‌های جامعی از آخرین روش‌های دمانگاری فعال^۱ مورد استفاده در سازه‌های کامپوزیتی، بر اساس اصول فیزیکی و منابع تحریک حرارتی، ارائه شده است [۸-۶].

از سوی دیگر، تعمیر سازه‌های آسیب‌دیده با استفاده از وصله‌های کامپوزیتی همواره مورد توجه صنایع مختلف بوده است. پارامترهای هندسی وصله‌ها و افزایش خواص مکانیکی سازه‌های کامپوزیتی آسیب‌دیده با استفاده از وصله‌ها [۹-۱۰] و همچنین استفاده از روش‌های بازرسی غیرمخرب^۲ مانند دمانگاری برای بررسی وصله‌ها مورد توجه قرار گرفته است [۱۱-۱۲].

امروزه به دلیل نسبت بالای مقاومت به وزن، سازه‌های کامپوزیتی نقش مهمی در صنایع مختلف دارند. اگرچه وصله‌های کامپوزیتی در تعمیر سازه‌های کامپوزیتی نسبت به وصله‌های فلزی ترجیح داده شده‌اند، اما مطالعات کمی در زمینه پایش سلامت این وصله‌ها انجام شده است. مطالعاتی که بر روی وصله‌های کامپوزیتی برای تعمیر سازه‌های فلزی تمرکز دارند، به شناسایی عیوب زیرسطحی از طریق روش‌های مختلف دمانگاری پرداخته‌اند [۱۳] و تمرکز برخی دیگر به شناسایی عیوب جدایش بین وصله و سازه اصلی که معمولاً آلومینیومی است، صورت پذیرفته است [۱۴-۱۵]. استفاده از روش‌های دمانگاری برای شناسایی عیوب جدایش ممکن است با محدودیت‌هایی همراه باشد [۱۶]، اما از آنجا که جنس سازه پایه می‌تواند به‌طور مؤثر به شناسایی عیب کمک کند، محدودیت‌ها برای سازه‌های فلزی با وصله‌های کامپوزیتی، نسبت به سازه کامپوزیتی با وصله، کمتر است [۱۷].

افزون بر این، کاربرد دمانگاری گذرا^۲ برای پایش سلامت وصله کامپوزیتی در طی فرآیند تعمیر نیز مورد توجه قرار

گرفته است [۱۸-۱۹].

از سوی دیگر، مدل‌سازی بر پایه روش اجزای محدود^۳ می‌تواند برای محاسبه توزیع دمای سه‌بعدی در مواد با خواص نامتقارن استفاده شود. برای سازه‌هایی با پیچیدگی‌های هندسی بیشتر، روش‌های عددی مانند اجزای محدود نسبت به روش‌های تحلیلی ترجیح داده می‌شوند. همچنین اجزای محدود، به‌عنوان یکی از قدرتمندترین روش‌های عددی برای شبیه‌سازی فرآیند انتقال حرارت، به‌ویژه در کامپوزیت‌ها، شناخته شده است [۲۱-۲۰].

در برخی مطالعات انجام‌شده، از روش اجزای محدود برای اعتبارسنجی نتایج آزمایشگاهی استفاده شده است. به‌کارگیری این روش می‌تواند به بررسی تأثیر عمق و اندازه جدایش‌ها در شناسایی آن‌ها از طریق دمانگاری کمک کند [۲۲-۲۴]. شناسایی عیوب بر اساس داده‌های تجربی به شرایط تنظیمات آزمایش و جانمایی تجهیزات وابسته است. بنابراین، استفاده از مدل‌سازی عددی می‌تواند اطلاعاتی در مورد آزمون و مکانیزم انتقال حرارت ارائه دهد [۲۵-۲۶].

اگرچه مطالعات زیادی درباره شناسایی عیوب در سازه‌های کامپوزیتی انجام شده است، اما مطالعات محدودی به بررسی آسیب‌ها در سازه‌های تعمیرشده با وصله کامپوزیتی پرداخته‌اند. شناسایی عیوب بین وصله و سازه کامپوزیتی به دلیل تفاوت در ضرایب رسانایی حرارتی در جهت‌های مختلف نسبتاً پیچیده است. به عبارتی، شناسایی عیوب در سازه‌های کامپوزیتی تعمیرشده، چالش‌برانگیزتر از سازه‌های فلزی تعمیرشده است.

مطالعات مرتبط با بازرسی دمانگاری کامپوزیت‌ها نشان می‌دهند که تعیین پارامترهای مناسب آزمون دمانگاری نقش کلیدی در فرآیند شناسایی عیب دارد. مدل‌های شبیه‌سازی می‌توانند به درک پارامترهای قابل‌کنترل و پارامترهای قابل‌صرف‌نظر در فرآیند آزمون کمک کنند.

بر همین اساس، مطالعه حاضر بر آزمون تجربی و شبیه‌سازی از طریق روش اجزای محدود با استفاده از نرم‌افزار آباکوس^۴ تمرکز دارد تا درک فیزیکی از روش دمانگاری مرحله‌ای در بازرسی یک قطعه کامپوزیتی تقویت‌شده با وصله کامپوزیتی حاصل شود.

3. FEM
4. Abaqus

1. Non-destructive Inspection
2. Transient Thermography

کاهش و در نتیجه میزان هدایت حرارتی موثر کامپوزیت افزایش می‌یابد. مدل هاسلمن جانسون برای الیاف کامپوزیتی به ترتیب برای صفحه‌های کروی، استوانه‌ای و صفحه مسطح به صورت زیر است:

$$k_{eff} = k_m \frac{[2(\frac{k_1}{k_m} - \frac{k_1}{ah_c} - 1)\phi + \frac{k_1}{k_m} + \frac{2k_1}{ah_c} + 2]}{[(1 - \frac{k_1}{k_m} + \frac{k_1}{ah_c})\phi + \frac{k_1}{k_m} + \frac{2k_1}{ah_c} + 2]} \quad (3)$$

$$k_{eff} = k_m \frac{[(\frac{k_1}{k_m} - \frac{k_1}{ah_c} - 1)\phi + (1 + \frac{k_1}{k_m} + \frac{k_1}{ah_c})]}{[(1 - \frac{k_1}{k_m} + \frac{k_1}{ah_c})\phi + (1 - \frac{k_1}{k_m} + \frac{k_1}{ah_c})]} \quad (4)$$

$$k_{eff} = \frac{k_1}{[(1 - \frac{k_1}{k_m} + \frac{2k_1}{ah_c})\phi + \frac{k_1}{k_m}]} \quad (5)$$

در رابطه (۵) که برای صفحات صاف نوشته شده k_{eff} هدایت حرارتی موثر کامپوزیت، k_1 و k_m به ترتیب هدایت حرارتی الیاف و هدایت حرارتی رزین، h_c هدایت حرارتی مرزی، ϕ حجم شکاف رزین و a شعاع ذرات رزین می باشد. با افزایش ردیف‌های تار و پود میزان هدایت حرارتی الیاف (k_1) افزایش یافته و مخرج کسر معادله (۵) کوچک شده و در نتیجه میزان هدایت حرارتی موثر کامپوزیت افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن $h_c = \infty$ و نوشتن معادله (۶) نتیجه حاصله بهتر مشخص می‌شود:

$$\begin{aligned} k_{eff} &= \frac{k}{(1 - \frac{k_1}{k_m})\phi + \frac{k_1}{k_m}} = \frac{k}{(\phi - \frac{k_1}{k_m}\phi) + \frac{k_1}{k_m}} \\ &= \frac{k_1}{\phi + (1 - \phi)\frac{k_1}{k_m}} \Rightarrow \\ \frac{1}{k_{eff}} &= \frac{\phi + (1 - \phi)\frac{k_1}{k_m}}{k_1} \Rightarrow \frac{1}{k_{eff}} = \frac{\phi}{k_1} + \frac{1}{k_m} - \frac{\phi}{k_m} \\ &\Rightarrow \frac{1}{k_{eff}} = \frac{\phi}{k_1} + \frac{(1 - \phi)}{k_m} \\ &\Rightarrow \frac{1}{k_{eff}} = \frac{V_1}{k_1} + \frac{V_m}{k_m} \end{aligned} \quad (6)$$

V_m و V_1 به ترتیب کسر حجمی الیاف و کسر حجمی رزین می‌باشد که نسبت حجم میزان الیاف یا رزین به حجم ϕ می‌باشند. با افزایش k_1 و یا k_m مقدار k_{eff} افزایش می‌یابد. محاسبه میزان هدایت حرارتی برای الیاف کامپوزیتی نشان می‌دهد که انتقال حرارت الیاف دو جهته بیشتر از الیاف تک جهته می‌باشد.

به این منظور ۳۲ عیب (جدایش و تورق) با جانمایی متفاوت تحت بازرسی قرار گرفت. اثر پارامترهای اندازه، موقعیت و عمق، با تعیین مسیرهای عبوری از عیوب با نوع یکسان و متفاوت، بر روی توانایی شناسایی مورد بررسی قرار گرفت. همچنین به منظور درک بهتر فرآیند آزمون، با ارائه معیارها و روش‌های متفاوت، به تعیین مدت زمان اعمال بار حرارتی بهینه و بهترین فریم دمایی پرداخته شده است. برای اعتبارسنجی نتایج نهایی، یک آزمون تجربی دمانگاری انجام شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با آزمون تجربی، از طریق بررسی نمودارها و تغییرات دمایی در محل عیوب، صورت پذیرفته است. در پژوهش حاضر از تمامی مزیت‌های روش اجزای محدود شامل تعیین پارامترهای آزمایش، بررسی اثرات مهم زوایا الیاف و ویژگی عیوب و صحت‌گذاری نتایج آزمایش استفاده شده است.

۲. معادلات حاکم بر ضرایب هدایت حرارتی

به منظور بررسی معادلات حاکم برای ضریب هدایت حرارتی سازه‌ها با خواص متفاوت در سه جهت اصلی^۱، به خصوص کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف تک و یا دوجته، از مدل هاسلمن جانسون^۲ استفاده می‌کنیم. میزان مقاومت حرارتی الیاف کامپوزیتی از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۷]:

$$R = \frac{4h}{k_e(a_w + g_w)(a_f + g_f)} \quad (1)$$

که در آن h ضخامت کامپوزیت، k_e هدایت حرارتی موثر کامپوزیت، a_w و g_w به ترتیب ضخامت الیاف و فاصله بین آنها و a_f و g_f به ترتیب ضخامت ردیف‌های رزین و فاصله بین آنها است. با بررسی رابطه ۱ نتیجه می‌شود که اگر الیاف تک جهته باشد یعنی فقط تار و یا فقط پود باشد یک از ترم‌های $(a_w + g_w)$ یا $(a_f + g_f)$ حذف شده و مخرج کسر بالا کوچک شده که باعث افزایش مقاومت و در نتیجه کاهش میزان هدایت حرارتی موثر کامپوزیت می‌شود. از طرفی با افزایش تعداد ردیف‌های نوارهای الیاف میزان مقاومت گرمایی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \dots \quad (2)$$

با افزایش تعداد ردیف‌ها میزان مقاومت گرمایی کلی

۳. شبیه‌سازی و نتایج

همه سطوح انتقال حرارت همرفت در نظر گرفته شده و برای سطح بالایی مدل، تابش حرارتی نیز در نظر گرفته شده است. ضریب انتقال حرارت h برابر ۲۰ وات بر متر مربع کلونین و ضریب تابش ε سطح کربن/اپوکسی برابر با ۰/۹۵ در نظر گرفته شده است. نوع المان بین لایه‌ها از نوع تائ^۸ تعریف شده و دمای محیط نیز ۲۵ درجه سانتی‌گراد برای هر دو انتقال حرارتی همرفت و تابشی در نظر گرفته شده است. بار حرارتی ۲۰۰۰ ژول مستقیماً به سطح قطعه اعمال شده است. در جدول ۱، خواص حرارتی مواد استفاده‌شده ارائه گردیده است.

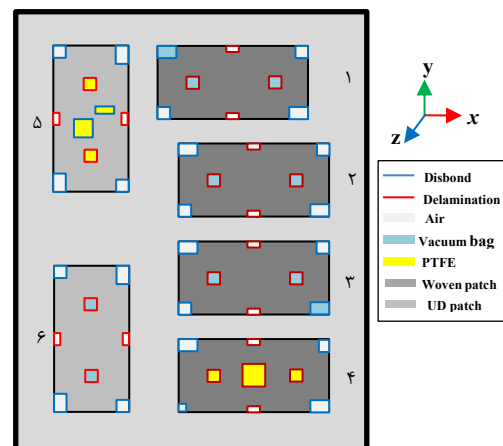
جدول (۱) خواص حرارتی مواد به کار رفته [۲۸-۲۹]

چگالی (ρ) (kg/m ³)	گرمای ویژه (C_p) (J/kg.K)	هدایت حرارتی (k) (W/m.K)			جنس
۱۶۰۰	۹۰۰	K ₁	K ₂	K ₃	کربن/اپوکسی
		۵	۵	۰/۵	
۱۲۵۰	۱۲۶۰	۰/۲			رزین اپوکسی
۱۱۴۰	۱۶۷۰	۰/۲۴			نایلون واکيوم
۲۲۰۰	۱۱۵۰	۰/۴			تفلون
۱/۲	۱۰۰۰	۰/۰۲۵			هوا

برای هندسه نشان داده‌شده در شکل ۱، از روش مش‌بندی ساختاری برای مدل‌سازی استفاده شده است. اندازه مش و گام زمانی، بر همگرایی و پایداری حل مدل حرارتی توسط ماژول انتقال حرارت نرم‌افزار آباکوس تأثیر مستقیم دارند. مدل به هندسه‌های استاندارد تقسیم شده و هر بخش به‌صورت جداگانه مش‌بندی شده است. در نهایت، همه بخش‌های مش‌بندی‌شده با هم ترکیب شده‌اند. نوع المان مورد استفاده در مدل، المان هگزاهدال خطی نوع DC3D8 است که المانی استاندارد برای انتقال حرارت سه‌بعدی در نرم‌افزار آباکوس به‌شمار می‌رود. برای دستیابی به نتایج دقیق، ابعاد المان وصله‌ها برابر با ۰/۹ میلی‌متر تعیین شده‌اند. در قطعات کامپوزیتی، لایه‌رزین، نواحی جداشده و ترک‌خوردگی‌های داخلی دارای عناصر با ابعادی کوچکتر از ساختار پایه هستند. شکل ۲ مش‌بندی قطعه مورد آزمون و جدول ۲ ویژگی‌ها و عمق عیب‌ها را نشان می‌دهند.

سازه اصلی و وصله‌های مورد بررسی در این آزمون، از جنس کامپوزیت کربن-اپوکسی با پارچه الیاف کربن دوجهته ۰ و ۹۰ درجه^۱ تشکیل شده است. در مطالعه حاضر، جانمایی عیوب تورق^۲ (بین لایه‌های وصله) و عیوب جدایش^۳ (بین وصله و سازه اصلی) در ابعاد و عمق‌های مختلف در نظر گرفته شده است. در این مدل‌سازی، شش وصله کامپوزیتی با ابعاد ۶۰×۱۲۰ میلی‌متر روی یک سازه کامپوزیتی شش‌لایه از جنس پلیمر تقویت‌شده با الیاف کربن^۴ با ضخامت ۱/۸ میلی‌متر و ابعاد ۲۹۰×۳۶۵ میلی‌متر نصب شده‌اند، بطوری‌که وصله‌های سمت راست قطعه با پارچه دو جهته و وصله‌های سمت چپ از پارچه‌های تک جهته^۵ استفاده شده است.

شکل ۱ موقعیت و نوع عیوب تورق و جدایش را در وصله‌های مختلف روی سازه اصلی CFRP نشان می‌دهد. عیوب تورق در لایه‌های مختلف وصله‌ها قرار گرفته‌اند تا اثر عمق عیب بررسی شود. برای شبیه‌سازی این عیوب و ایجاد عیوب مصنوعی، از نایلون واکيوم یا کیسه خلأ^۶ با ضریب رسانایی حرارتی ۰/۲۴ وات بر متر کلونین و ضخامت ۰/۰۷۵ میلی‌متر و تفلون^۷ با ضریب رسانایی حرارتی ۰/۴ وات بر متر کلونین و ضخامت ۰/۱۲ میلی‌متر استفاده شده است.

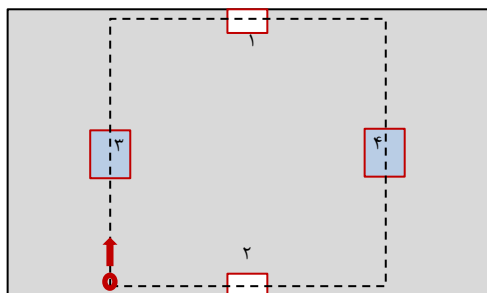


شکل (۱) شماتیک کلی از موقعیت وصله‌ها و عیوب تورق و جدایش در آزمون دمانگاری، دو مرحله گرمایش و مرحله رسیدن به دمای تعادل وجود دارد. در شبیه‌سازی، شرایط مرزی، برای

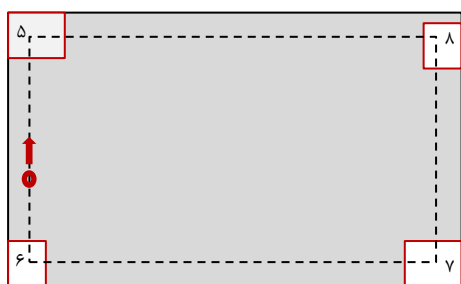
5. Uni Directional
6. Vacuum Bag
7. PTFE
8. tie

1. woven
2. Delamination
3. Disbond
4. Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)

وصله‌های اول تا سوم از جنس نایلون واکيوم با ضخامت $0.75/0$ میلی‌متر و در وصله چهارم تفلون با ضخامت $12/0$ میلی‌متر صورت پذیرفته است. جانمایی عیوب تورق در وصله اول بین لایه اول و دوم، در وصله دوم بین لایه سوم و چهارم، در وصله سوم بین لایه پنجم و ششم، و در وصله چهارم بین لایه سوم و چهارم صورت پذیرفته است.



شکل ۳) مسیر داده شده برای عبور از ۴ عیب تورق

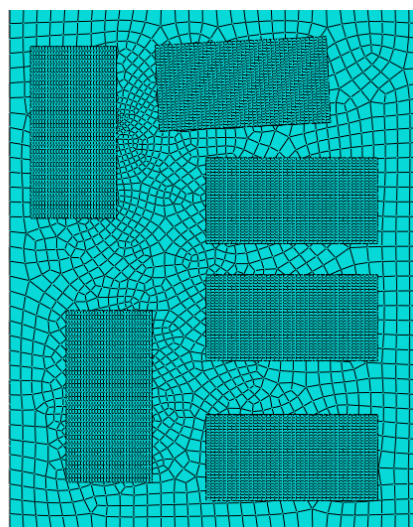


شکل ۴) مسیر داده شده برای عبور از ۴ عیب جدایش

شکل ۵، نمودار دما بر حسب طول مسیر عبوری از چهار عیب تورق یک تا چهار را نشان می‌دهد که برای چهار وصله رسم شده است. مسیر داده شده طبق شکل ۳ می‌باشد. در نمودار مشخص می‌شود که عیوب تورق در بالا و پایین وصله‌ها دمای بالاتری به نسبت عیوب در وسط وصله دارا می‌باشند که به ترتیب قله دوم و چهارم می‌باشند. همچنین هرچه عمق این عیوب کمتر باشد دمای قله‌ها بیشتر است. عیوب در وصله اول در بیشترین عمق و در وصله سوم در کمترین عمق قرار دارند و عیوب در وصله دوم و چهارم در عمق یکسانی تعبیه شده‌اند. مطابق جدول ۳، با توجه به اینکه عیوب در وصله سوم در کمترین عمق قرار دارند، پس نمودار آن دارای بیشترین اختلاف دما و بلندترین قله و همچنین با توجه به اینکه عیوب در وصله اول در بیشترین عمق قرار دارند، پس نمودار آن دارای کمترین اختلاف دما و کوتاه‌ترین قله می‌باشد.

جدول ۲) ویژگی‌های عیوب

شماره وصله	نوع عیب	عمق عیب
۱	جدایش	لایه چسب
	تورق	بین لایه ۱ و ۲
۲ و ۶	جدایش	لایه چسب
	تورق	بین لایه ۳ و ۴
۳	جدایش	لایه چسب
	تورق	بین لایه ۵ و ۶
۴ و ۵	جدایش	لایه چسب
	تورق	بین لایه ۳ و ۴

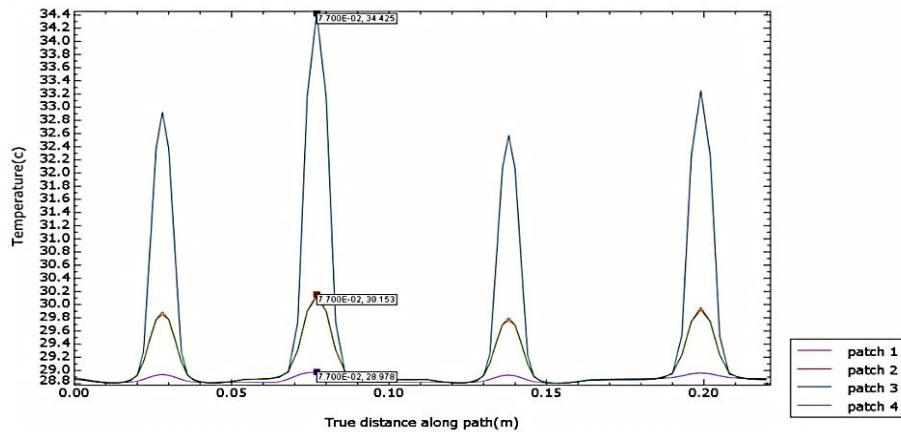


شکل ۲) مش‌بندی قطعه نهایی با استفاده از المان DC3D8

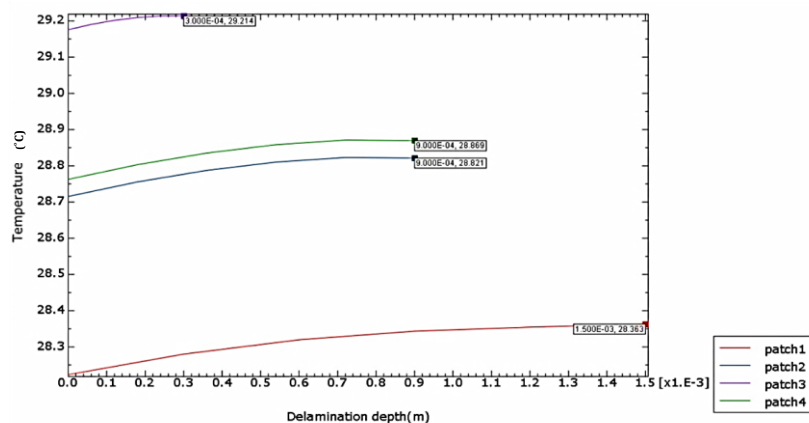
بهترین زمان گرمایش زمانی است که در نمودارهای دما بر حسب زمان بیشترین اختلاف میانگین دما بین نقاط سالم و معیوب وجود داشته باشد و آن زمان گرمایش ۷ ثانیه‌ای می‌باشد [۱۵]. روش استخراج بهترین فریم در این پژوهش به نحوی توسعه داده شده است که مسیر مناسبی مطابق شکل ۳ برای عیب تورق و شکل ۴ برای عیب جدایش طوری تعیین می‌شود که از میان نقاط دارای نقص عبور کند و دمای نقاط نسبت به زمان، از ابتدای اعمال بار حرارتی، ثبت می‌شود. سپس از تابع انحراف معیار استفاده می‌شود تا زمان مناسب با بیشترین مقدار انحراف معیار، به عنوان بهترین زمان برای آشکارسازی عیوب شناسایی گردد. بنابراین نمودارهای دما بر حسب طول مسیر برای عیوب تورق و جدایش ۴ وصله اول استخراج می‌شود. مطابق شکل ۱ و جدول ۲ جانمایی دو عیب تورق لبه بالا و پایین از جنس هوا و دو عیب مرکزی برای

یکی از عیوب تورق در تمامی وصله‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است؛ با توجه به اینکه عیب تورق وصله سوم در عمق کمتری قرار دارد، در شکل ۶ مشاهده می‌شود که عیب تورق وصله سوم دمای بالاتری نسبت به سایر وصله‌ها دارد.

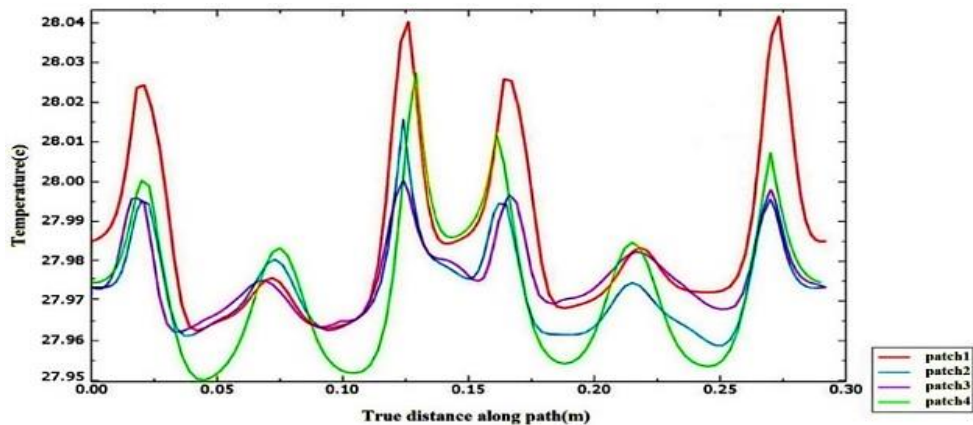
بنابراین، مطابق شکل ۵، تأثیر عمق عیب‌ها به صورت کیفی در ارتفاع قله‌ها نشان داده شده و به صورت کمی در جدول ۳ از طریق اختلاف دما بین نقاط بیشینه و کمینه نمایش داده شده است. همچنین، برای بررسی دقیق‌تر تأثیر عمق عیب‌ها،



شکل ۵) نمودار دما برحسب طول مسیر ۴ عیب تورق



شکل ۶) اثر عمق عیوب تورق

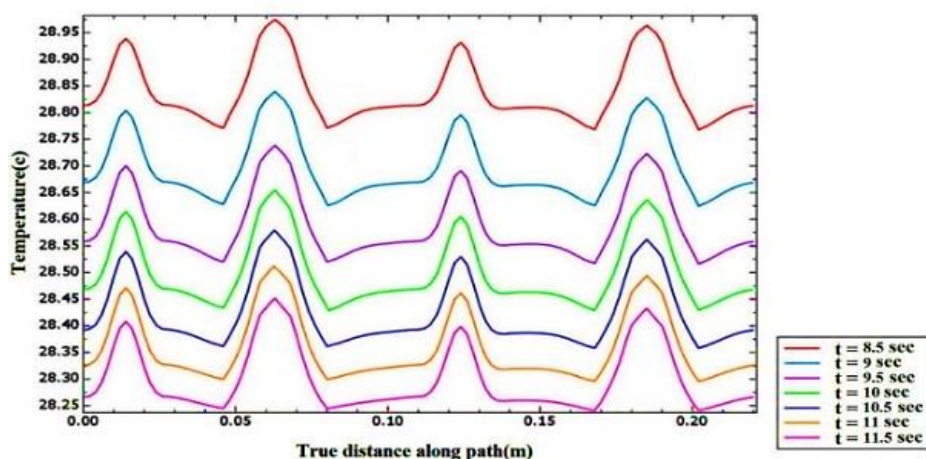


شکل ۷) نمودار دما برحسب طول مسیر ۴ عیب جدایش

در مکان ۰/۰۷ متر و ۰/۲۲ متر (محور افقی) قرار دارند که به علت وجود عیوب تورق در این نقاط است که در تحلیل این نمودار، از بررسی آنها صرف نظر شده است. بدلیل اینکه عیوب تورق در وصله‌ها در عمق‌های متفاوت قرار دارند، لذا به منظور صحت‌گذاری بهترین زمان در شنایابی عیوب و استخراج اثر فاصله از سطح، یکی از عیوب تورق در تمامی وصله‌ها و زمان‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد.

همچنین، از آنجا که وصله در حال سرد شدن است، به دلیل انتقال حرارت به محیط، اتلاف حرارت در سطح آن سریع‌تر از عمق وصله رخ داده و به همین دلیل نمودار دما با افزایش

عمق، روند صعودی دارد. شکل ۷، نمودار دما برحسب طول مسیر عبوری از چهار عیب جدایش را مطابق مسیر شکل ۴ نشان می‌دهد. در نمودار مشاهده می‌شود که دو قله کوچک



شکل ۸) نمودار دما برحسب طول مسیر وصله اول

وصله‌ها، در سه بازه زمانی در جدول ۳ آورده شده است. نتایج حاکی از آن است که با گذر زمان اختلاف دما در نمودار وصله‌ها کاهش می‌یابد و شناسایی عیوب دشوار می‌شود. این اختلاف دما در زمان ۸/۵ ثانیه بیشترین مقدار خود را داراست و از این رو برای وصله‌ها بهترین فریم برای تشخیص عیوب می‌باشد.

۴. آزمون تجربی و بحث

به منظور بازرسی نمونه به روش دمانگاری، از دوربین مادون قرمز IR928+ محصول شرکت وان‌گایدر با مشخصات موجود در جدول ۴ استفاده شده است.

فرآیند ساخت قطعات کامپوزیتی CFRP با استفاده از روش دستی صورت پذیرفته است. به منظور ساخت قطعات از الیاف کربن Colan Plain AC220 و رزین اپوکسی LR630 استفاده شده است. در این آزمایش از یک لامپ هالوژن به عنوان منبع حرارتی استفاده شده است که توان مصرفی ۲۰۰۰ وات دارد. میزان گرمادهی به سازه کامپوزیتی بوسیله

جدول ۳) اختلاف حداکثر و حداقل دمای عیوب تورق در زمان‌های مختلف

وصله	اختلاف دما (°C) در زمان		
	11.5 s	10 s	8.5 s
۱	0.214	0.218	0.155
۲	0.649	1.094	1.334
۳	1.651	3.152	5.615
۴	0.719	1.094	1.256

لازم بذکر است که عیوب در عمق‌های متفاوتی از ۰/۳ تا ۱/۵ میلی‌متر در انواع وصله‌ها قرار دارند. همانطور که در نمودار شکل ۸ مشاهده می‌شود با اعمال بار حرارتی ۷ ثانیه به وصله اول، که عیوب در آن بیشترین فاصله از سطح را دارند، قله‌ها در زمان‌های مختلف با ارتفاع کمتری نسبت به سایر وصله‌ها مشاهده می‌شوند. این فرآیند برای وصله دوم، سوم و چهارم

در زمان‌های مختلف نیز صورت پذیرفته است و اختلاف دما نقاط ماکزیمم بلندترین قله با نقاط مینییمم نمودار هر یک از

مرحله گرمادهی تا ۳۰ ثانیه پس از خنک‌سازی ضبط می‌شود. فیلم حرارتی به‌دست‌آمده سپس برای تحلیل به رایانه منتقل می‌شود.

برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی و استفاده از آن‌ها در مراحل دیگر تشخیص عیب‌ها، مسیرهایی در تصاویر وصله چهارم تعریف شده‌اند تا نتایج با یکدیگر مقایسه شوند.

در وصله چهارم، جانمایی عیوب تورق بین لایه سوم و چهارم صورت پذیرفته است و چهار عیب جدایش بین این وصله و قطعه کامپوزیتی CFRP با خواص ذکر شده وجود دارد. عیوب از جنس تفلون و هوا مطابق شکل ۱ می‌باشند.

پس از تنظیمات آزمایش، تصاویر خام دمانگاری استخراج شدند. تصاویر خام با استفاده از فیلتر گاوسی^۱ پیش‌پردازش شدند. در این روش، با اعمال فیلتر گاوسی بر ماتریس تصویر، مرزهای عیوب وضوح بهتری پیدا کردند. عیوب تورق و جدایش با دقت شناسایی شده‌اند. همان‌طور که در ستون سمت چپ شکل ۱۱ نشان داده شده، چهار مسیر به منظور بررسی دمایی و کمی‌سازی شناسایی عیوب طراحی شد. مسیر افقی و عمودی عیوب تورق و مسیر مورب ۱ و ۲ ترکیبی عیوب تورق و جدایش تعیین شده است. کانتورهای دمایی شبیه‌سازی برای این وصله استخراج و مطابق شکل ۱۰ مسیرهای جهت‌دار مشابه تصاویر و کانتورهای دمانگاری و شبیه‌سازی، در بهترین فریم یعنی ۸/۵ ثانیه در نظر گرفته شده است. نمودارهای دما بر حسب پیکسل در شبیه‌سازی که خروجی کانتورهای دمایی می‌باشند در ستون سمت راست شکل ۱۱ آورده شده است. همچنین به منظور صحت‌گذاری نتایج آزمایش با شبیه‌سازی نمودارهای دمایی برحسب تعداد پیکسل چهار مسیر عبوری از تصاویر دمانگاری استخراج و مقایسه دو روش مطابق جدول ۵ صورت می‌پذیرد.

این لامپ‌ها باید کنترل شود و گستره زمانی مشخصی برای اعمال شار حرارتی وجود دارد که معمولاً تا حدود ۱۵ ثانیه، از منظر شناسایی عیوب، به سازه آسیب نمی‌زند. سازه و وصله‌های CFRP مطابق شکل ۹ با خواص و عیوب ذکرشده تحت آزمایش دمانگاری قرار می‌گیرند.

جدول ۴) دقت و مشخصات دوربین مادون قرمز

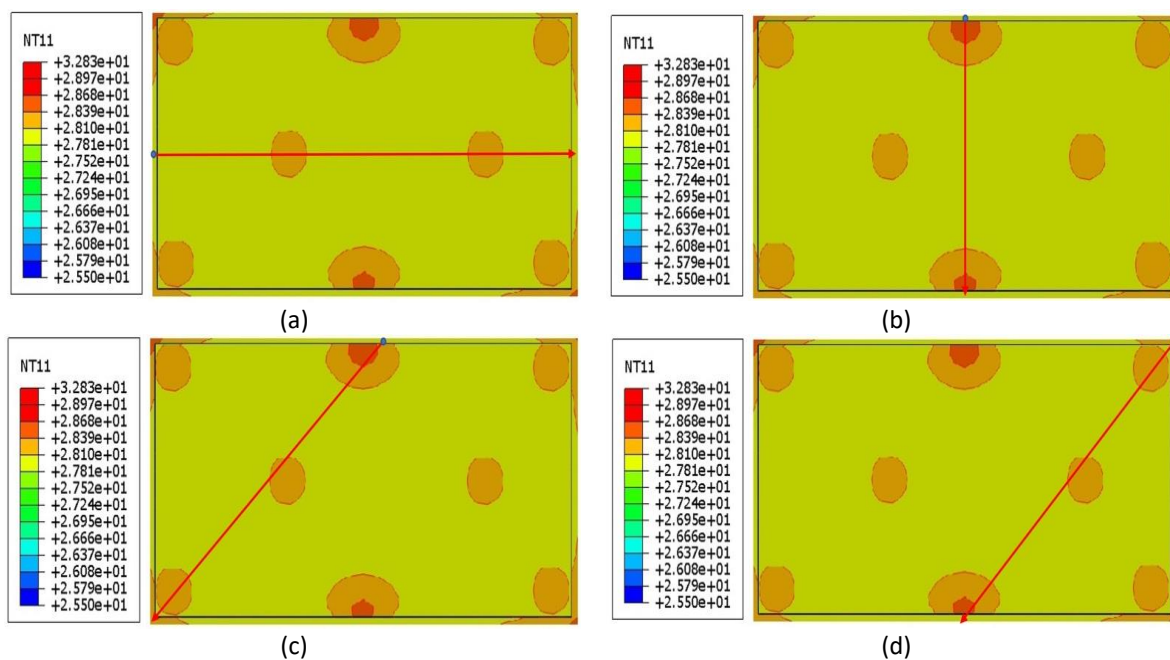
حداقل فاصله تنظیم	۱۵ اینچ (۰/۳۸ متر)
حساسیت دمایی	۰/۰۸ درجه در ۳۰ درجه سانتی‌گراد
ابعاد تصویر دیجیتال	۶۴۰ × ۴۸۰ پیکسل با ۲۴ رنگ
محدوده دمایی	۲۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد
نرخ نمونه‌برداری	۲۵ هرتز



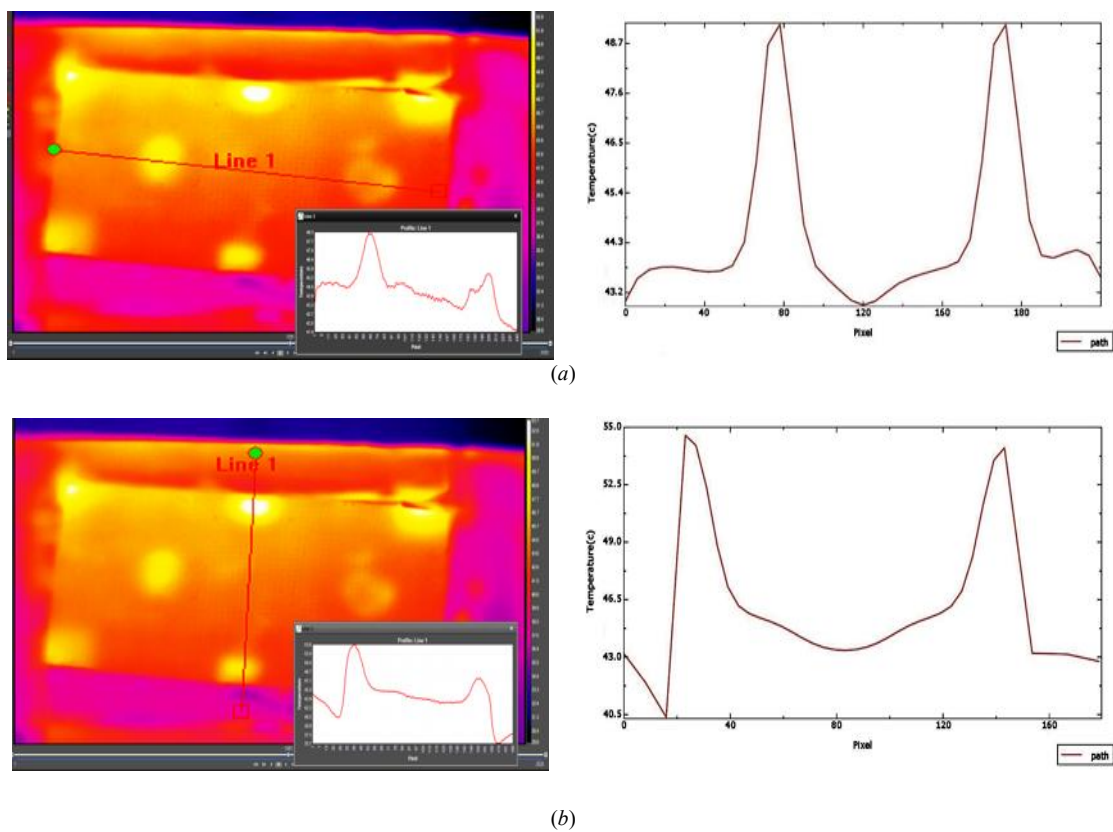
شکل ۹) چیدمان دوربین و لامپ هالوژن نسبت به نمونه

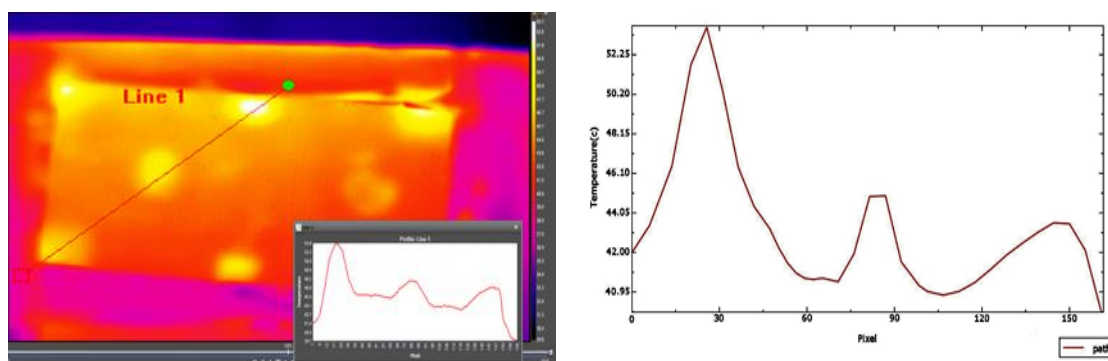
نمونه آزمایش به‌صورت عمودی قرار داده شده است به‌طوری‌که سطح وصله در معرض دید دوربین باشد. لامپ هالوژن نیز به‌گونه‌ای قرار گرفته است که توزیع یکنواختی از گرما را در سطح وصله ایجاد کند. شار حرارتی اعمال‌شده به یکی از وصله‌ها در مدت زمان گرمادهی ۷ ثانیه، به‌طور متوسط برابر با ۱/۵ کیلووات بر متر مربع است. فیلم حرارتی از ابتدای

1. Gaussian Blur

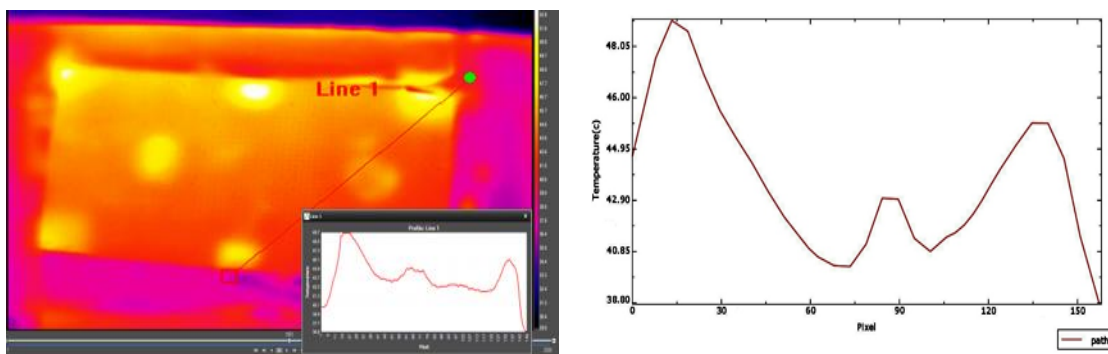


شکل ۱۰) کانتورهای دمایی حاصل از شبیه‌سازی و مسیرهای عیوب تورق (a) افقی (b) عمودی، و مسیر ترکیبی شامل عیب تورق و جدایش (c) مورب ۱ (d) مورب ۲





(c)



(d)

شکل ۱۱- تصاویر دمانگاری و نمودارهای دما آزمون تجربی (ستون سمت چپ) و شبیه‌سازی (ستون سمت راست) بر حسب پیکسل، مسیر عبوری (a) افقی (b) عمودی (c) مورب ۱ (d) مورب ۲

می‌کند. همان‌طور که در تصویر دمانگاری و نمودار حاصل به وضوح دیده می‌شود، عیب اول این مسیر به دلیل نوع هوا بودن، عمق کمتر، داشتن یک لبه آزاد، با وجود مساحت کوچک‌تر از عیب دوم دارای ارتفاع قله بزرگ‌تر و دمای حداکثر $53/6$ درجه است و با داشتن مساحت بزرگ‌تر و عمق کمتر علی‌رغم داشتن لبه آزاد کمتر نسبت به عیب سوم دارای قله بزرگ‌تر دمایی می‌باشد و از طرفی طبق شکل ۱۱d، در مسیر مورب دوم، عیب اول جدایش نوع هوا با دو لبه آزاد و فاصله $1/8$ میلی‌متر از لبه است که ارتفاع قله بزرگ‌تری نسبت به دو عیب تورق با عمق یا فاصله کمتر از سطح ($0/9$ میلی‌متر) دارد. این به دلیل جنس هوا در مقایسه با تفلون در عیب دوم و همچنین داشتن مساحت بزرگ‌تر و دو لبه آزاد در مقایسه با عیب سوم است که میزان اهمیت و اولویت این پارامترها را نشان می‌دهد؛ بطوری‌که اثر پارامتر جنس عیب مصنوعی با جنس هوا با فاصله زیاد نسبت به سایر

بنابراین، در آزمون تجربی، با اعمال زمان بار حرارتی به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی به مدت ۷ ثانیه به سازه کامپوزیتی تقویت‌شده با وصله و استخراج بهترین فریم حرارتی در حدود $8/5$ ثانیه، اعتبار این پارامترها تأیید شده و منجر به استخراج تصاویر حرارتی با وضوح مناسب شده است. سپس نمودارهای دمایی به منظور تشخیص عیوب در روش شبیه‌سازی با روش تجربی مقایسه شده و مطابق با شکل‌های ۱۰ و ۱۱ و جدول ۵، نتایج کمی‌سازی شده نشان‌دهنده تطابق دو روش هستند. یکی دیگر از دستاوردها، مقایسه اهمیت دو پارامتر عمق و جنس ماده در تشخیص عیوب است. در شکل ۱۱c، مسیر مورب از سه عیب عبور می‌کند. با توجه به جهت مسیر، که بطور مورب از بالا به پایین می‌باشد، به ترتیب از عیب تورق نوع هوا با لبه آزاد و عمق $0/9$ میلی‌متر، سپس عیب تورق نوع تفلون در وسط با عمق $0/9$ میلی‌متر و در نهایت عیب جدایش نوع تفلون با دو لبه آزاد و فاصله $1/8$ میلی‌متر از سطح عبور

طبق جدول ۵، اختلاف دمای نقاط مختلف از طریق دو روش آزمایش و اجزای محدود تعیین شده و در نهایت درصد خطای نتایج تجربی از طریق روش اجزای محدود محاسبه شده است. نتایج ارائه شده در ستون آخر جدول ۵ نشان می‌دهد که درصد خطا در اکثر مسیرهای تعریف شده کمتر از ۵ درصد می‌باشد و حداکثر خطا در یکی از عیوب ۲۰ درصد می‌باشد. بنابراین بطور کلی میانگین خطای نتایج آزمون تجربی دمانگاری نسبت به اجزای محدود، میانگین درصد خطای ستون آخر، در تمام مسیرها حدود ۴/۵ درصد است که حاکی از تطابق نتایج شبیه‌سازی با نتایج حاصل از آزمون تجربی دمانگاری می‌باشد.

پارامترها به شدت قابلیت شناسایی را بالا می‌برد و بعد از آن اثر عمق و با فاصله کمتر از آن اثر مساحت می‌باشد. بنابراین، برای کامپوزیت تعمیر شده با وصله، تأثیر ویژگی‌های عیوب بر شناسایی آن‌ها بر اساس اولویت به ترتیب شامل جنس عیب، عمق، اندازه و لبه آزاد است.

خلاصه نتایج نشان می‌دهد که نمودارهای استخراج شده از شبیه‌سازی، قله‌های دمایی متفاوتی را در مسیرهای افقی، عمودی و دو مسیر مورب نشان می‌دهند. از آنجا که تعداد قله‌ها برابر با تعداد عیوب در مسیر است، در تصاویر دمانگاری و شبیه‌سازی، کیفیت نتایج تشخیص مطلوب است.

جدول ۵) میزان خطا تصاویر دمانگاری در شناسایی عیوب نسبت به تصاویر شبیه‌سازی

مسیر	عیب	دما	دمای دمانگاری (°C)	دمای شبیه‌سازی (°C)	اختلاف دما (°C)	درصد خطا
افقی	اول	ماکزیمم	48.3	48.9	0.6	1.2
		مینیمم	44.5	43.7	0.8	1.8
	دوم	ماکزیمم	45.5	48.9	3.4	7.5
		مینیمم	42.0	43.8	1.8	4.3
عمودی	اول	ماکزیمم	53.6	54.3	0.7	1.3
		مینیمم	40.5	40.5	0	0
	دوم	ماکزیمم	47.6	53.8	6.2	13
		مینیمم	35.7	42.9	7.2	20
مورب ۱	اول	ماکزیمم	53.6	53.7	0.1	0.2
		مینیمم	41.4	41.5	0.1	0.2
	دوم	ماکزیمم	47.9	45.1	2.8	5.8
		مینیمم	43.9	41.3	2.6	5.9
	سوم	ماکزیمم	46.9	43.6	3.3	7
		مینیمم	41.2	40.1	1.1	2.7
مورب ۲	اول	ماکزیمم	49.7	49.1	0.6	1.2
		مینیمم	40.1	43.9	3.8	9.5
	دوم	ماکزیمم	45.2	43.5	1.7	3.8
		مینیمم	42.8	41.4	1.4	3.3
	سوم	ماکزیمم	46.1	45.5	0.6	1.3
		مینیمم	41.6	41.3	0.3	0.7

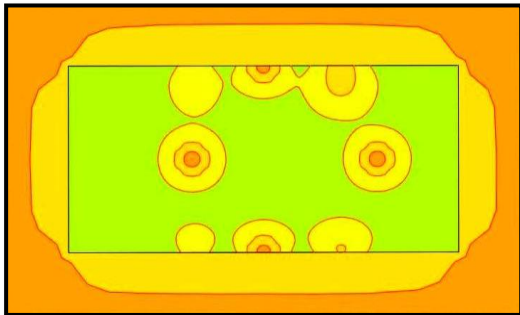
عیوب مطابق شکل ۱۲ طراحی می‌شود. فواصل مختلف بین عیوب در نظر گرفته می‌شود و شبیه‌سازی حرارتی برای شناسایی عیوب و استخراج حاشیه عیوب صورت می‌گیرد.

۵. بررسی اثر فاصله بهینه عیوب در شناسایی مطلوب

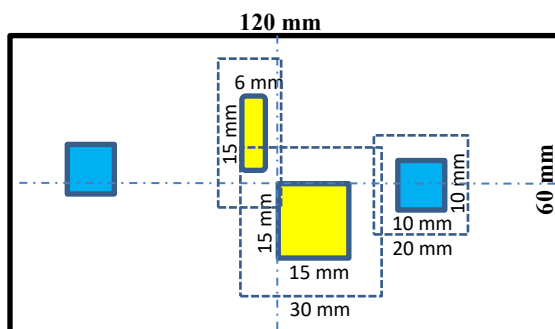
بعد از بررسی‌های صورت گرفته از تصاویر حرارتی مختلف، تداخل مرزی در بعضی از تصاویر حرارتی عیوب هم‌جوار مشاهده می‌گردد. به همین واسطه دلیل این تداخل حاشیه عیوب در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد. برای بررسی فاصله بهینه برای تشخیص دو عیب هم‌جوار باید طول ضلع برای اشکال چهارگوش و یا طول شعاع برای دایره مورد بررسی قرار گیرد. به این منظور یک چیدمان

منظر محل و اندازه، دقیق‌تر صورت خواهد پذیرفت.

برای صحنه‌گذاری مجدد این موضوع از وصله شماره پنج مورد مطالعه این پژوهش استفاده می‌شود. عیوب جانمایی شده در این وصله مطابق شکل ۱۵ نمایش داده شده است.

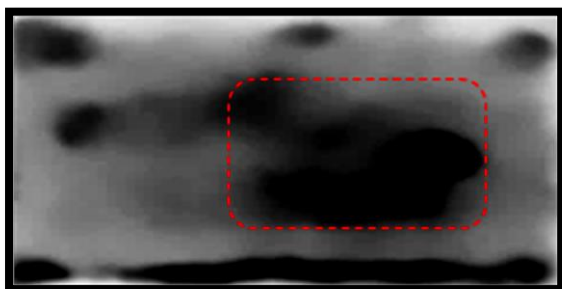


شکل ۱۴) شبیه‌سازی و اعمال بار حرارتی و استخراج کانتور دمایی



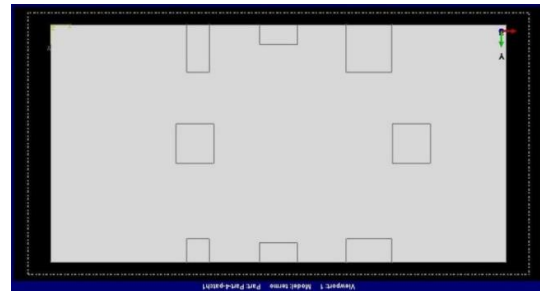
- Disbond defect of base plate
- Delamination defect of patch
- defect band

شکل ۱۵) فاصله کم عیوب و تداخل حاشیه عیوب با یکدیگر



شکل ۱۶) نتایج پردازش شده با روش PCA و تداخل عیوب

همانطور که طبق شکل ۱۶ مشخص است فواصل کم بین عیوب شکل ۱۵، باعث تداخل در شناسایی عیوب نزدیک به هم شده است و این تحلیل ارائه شده در این بخش مقاله نشان

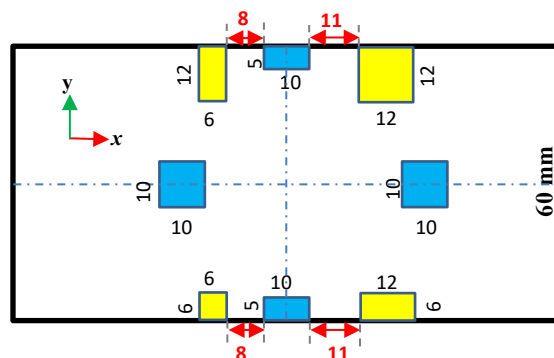


شکل ۱۲) طراحی وصله و جانمایی عیوب با ابعاد و فواصل مختلف

بنابراین به‌منظور کمی‌سازی حداقل فاصله، اگر طول ضلع یک عیب a و طول ضلع عیب دیگر b باشد و حداقل فاصله این دو عیب از یکدیگر x باشد رابطه V باید جهت شناسایی برقرار باشد:

$$x \geq \frac{a+b}{2} \quad (V)$$

که برای بررسی و صحنه‌گذاری رابطه فوق مطابق شکل ۱۳ فواصل بین عیوب مختلف بدست آمده و شبیه‌سازی حرارتی جهت شناسایی عیوب و استخراج حاشیه و تداخل عیوب انجام می‌شود. فاصله 11 mm کوچکترین حاصل رابطه V می‌باشد یعنی میانگین دو عدد 10 mm و 12 mm می‌باشد. در شکل ۱۴، نتایج شبیه‌سازی و کانتور حرارتی استخراج شده از روابط فوق و چیدمانی عیوب شکل ۱۳، به نمایش درآمده است. همانطور که در کانتور دمایی مشخص است هیچ‌گونه تداخل نامناسب در مرز حاشیه عیوب بواسطه این نوع چیدمانی مشاهده نمی‌گردد.



شکل ۱۳) فواصل بین عیوب مختلف

به‌همین دلیل در صورتی که حداقل فاصله بین دو عیب هم‌جوار مطابق این روش باشد فرآیند شناسایی عیوب، از

ویژگی‌های عیوب بر فرآیند تشخیص و اولویت‌بندی این ویژگی‌هاست. در این تحقیق، ویژگی‌های عیوب شامل اندازه، عمق، جنس ماده و فاصله از لبه بواسطه روش‌های توسعه داده شده، مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج حاکی از آنست که ویژگی‌های عیوب و تاثیر آن‌ها بر فرآیند شناسایی، به ترتیب شامل جنس عیب، عمق، اندازه و لبه آزاد می‌باشند.

آزمون دمانگاری با گرمایش مرحله‌ای برای اعتبارسنجی نتایج شبیه‌سازی انجام شده است. استخراج نمودارهای تغییرات دما، از طریق تعریف مسیرهای مختلف بر روی تصاویر دمانگاری و کانتورهای دمایی شبیه‌سازی صورت پذیرفته است. نتایج از نظر کیفی و کمی مورد تحلیل قرار گرفته است و در نهایت، نتایج دمای حداکثر و حداقل آزمون تجربی با صرف‌نظر از درصد خطای جزئی (۴/۵ درصد)، نتایج و روش‌های مبتنی بر روش اجزای محدود ارائه‌شده در این مطالعه را تأیید می‌کنند.

همچنین در این مقاله، اثر فاصله عیوب از یکدیگر بر روی فرآیند شناسایی مورد بررسی قرار می‌گیرد و رابطه فاصله بهینه عیوب از سایر عیوب پیشنهاد می‌شود و برای اجتناب از خطا در مطالعات تحقیقاتی و یا تحلیل بازرسی‌های صنعتی از این بعد مطالعاتی، راه‌حلی ارائه شده است.

پیشنهاد می‌شود در مطالعات آینده، این موضوع برای سازه‌های تعمیرشده با مواد مختلف توسعه یابد. همچنین با ثبت اطلاعات و تاریخچه بازرسی‌های انجام‌شده می‌توان از شبکه عصبی و حسگرهای مختلف برای بررسی فرآیند بازرسی آنلاین استفاده کرد. همچنین تغییر دوربین با حساسیت دمایی متفاوت و استفاده از دامنه‌های گرمایی بیشتر و یا استفاده از سرمایش (حتی زیر صفر) و رسیدن به دمای تعادل و بررسی تاثیر آن بر کشف عیوب، نیز می‌توانند در مطالعات بعدی مورد بررسی قرار گیرند.

۷. تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۸. منابع

- [1] Vavilov V.P., et al. (2019). Comparative study of active infrared thermography, ultrasonic laser vibrometry and laser ultrasonics in application to the inspection of graphite/epoxy composite parts.

می‌دهد که در طراحی و جانمایی عیوب مصنوعی با جنس سازه مشابه، عدم رعایت این فاصله برای عیوب هم‌جوار ممکن است باعث تداخل در شناسایی محل و اندازه عیوب گردد. همچنین در بازرسی‌های صنعتی این موضوع در تفسیر تصاویر پردازش‌شده می‌تواند حائز اهمیت باشد به عبارت دیگر وجود عیوب بزرگ در تصاویر حاصل از دمانگاری لزوماً به معنی وجود یک عیب می‌تواند نباشد و ممکن است عیوب مختلف با عمق‌های متفاوت ولی نزدیک به هم منجر به این نوع تصاویر خروجی شده باشد.

۹. نتیجه‌گیری

فرآیند بازرسی در سازه کامپوزیتی تعمیرشده نسبت به سازه‌های فلزی تعمیر شده دارای چالش بیشتری می‌باشد. این چالش‌ها در یک سازه کامپوزیت تعمیر شده با ضریب هدایت حرارتی غیریکنواخت بواسطه بکار بردن انواع وصله و عیوب با ویژگی‌های ناپیدا بیشتر هم می‌شود و ارائه روش‌هایی جهت بررسی پارامترهای آزمایش در راستای شناسایی این عیوب جدید و حائز اهمیت می‌باشد.

در این پژوهش به‌منظور استخراج پارامترهای آزمون دمانگاری و آنالیز اثر پارامترهای مختلف، شبیه‌سازی با استفاده از روش اجزا محدود انجام شده است. به این منظور معیاری ارائه شده است که با تعریف یک مسیر عبوری از عیوب، به کمک تابع انحراف معیار، لحظه‌ای که بیشترین مقدار انحراف معیار را دارد به عنوان بهترین لحظه برای شناسایی عیوب در نظر گرفته شده است.

با استفاده از طراحی مناسب مسیرهای عبوری از عیوب به مقایسه اثر عمق و جنس عیب پرداخته شده است. نتایج حاکی از آن است که با تعریف مسیر باز مورب ۱ و ۲ که از هر دو نوع عیب عبور می‌کند، اگرچه فاصله از سطح عیب تورق با جنس تفلون، نصف فاصله از سطح عیب جدایش با جنس هوا می‌باشد لکن قله‌های حاصل از تغییرات دمایی هم در آزمون تجربی و هم در شبیه‌سازی، ارتفاع کمتری نسبت به عیوب جدایش با جنس هوا دارند. لذا عیوب جدایش با جنس هوا وضوح و قابلیت شناسایی بالاتری نسبت به عیوب تورق با جنس تفلون و نزدیک‌تر به سطح دارند.

یکی از چالش‌های مهم در تشخیص عیوب، تعیین تأثیر

- [12] Balageas D., et al. (2010), Improvement of the detection of defects by pulse thermography thanks to the TSR approach in the case of a smart composite repair patch, *Quan. Inf. Thermography*, <https://doi.org/10.3166/qirt.7.167-187>.
- [13] Martens U., Schröder K., (2020), Evaluation of infrared thermography methods for analysing the damage behaviour of adhesively bonded repair solutions, *Composite Structures* 240, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.1119>.
- [14] Daryabor P., Safizadeh M. S., (2016), Investigation of defect characteristics and heat transfer in step heating thermography of metal plates repaired with composite patches. *Infrared Physics & Technology* 76, <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2016.04.009>.
- [15] Moradi M., Safizadeh M. S., (2019), Experimental and numerical study of the effect of using polyurethane instead of Teflon strip to simulate debonding defect in composite patch repairs aluminum plate under thermography inspection. *Composites Part B: Engineering*, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107>.
- [16] Genest M., et al. (2009), Pulse thermography for non-destructive evaluation and damage growth monitoring of bonded repairs, *Com. Str.*, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2008.02.01>
- [17] Ardebili A., farahani M., (2022), Delamination Defect Evaluation in CFRP Composite Patches by the Use of Active Thermography, *Nondestructive Evaluation*. <https://doi.org/10.1007/s10921-022-00892-z>.
- [18] Poudel A., et al. (2015), Non-destructive evaluation of composite repairs by using infrared thermography, *Journal of Composite Materials*, <https://doi.org/10.1177/0021998315574755>.
- [19] Bekas D., et al. (2019), A smart multi-functional printed sensor for monitoring curing and damage of composite repair patch, *Smart Materials & Structures*, <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ab2d08>.
- [20] DeMonte F., (2000), Transient heat conduction in one-dimensional composite slab. A 'natural' analytic approach, *J. Heat Mass Transfer*. [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(00\)00008-9](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(00)00008-9).
- [21] Yan X., & Yu, Z., (2001). Finite element formulation of 3-D heat transfer problem for orthotropic materials, *Mechanics Research Communications*, [https://doi.org/10.1016/S0093-6413\(02\)00215-X](https://doi.org/10.1016/S0093-6413(02)00215-X).
- Quantitative InfraRed Thermography Journal*. <https://doi.org/10.1080/17686733.2019.164697>
- [2] Towsyfy H., et al. (2020). Successes and challenges in non-destructive testing of aircraft composite structures. *Chinese Journal of Aeronautics*, p. 771 - 791, <https://doi.org/10.1016/j.cja.2019.09.017>.
- [3] Gholizadeh S., (2022). Impact behaviours and Non-Destructive Testing methods in Carbon Fiber Composites in Aerospace Industry. *Authorea Prep*, <https://doi.org/10.22541/au.164502808.880721>.
- [4] Zhou W., et al. (2023). Review on acoustic emission source location, damage recognition and lifetime prediction of fiber-reinforced composites. *Journal of Materials Science* 58(9), <https://doi.org/10.1007/s10853-022-08063-1>.
- [5] Kim S., (2018). Numerical Simulations of Tap Test on Composite Structures. *The International Journal of Acoustics and Vibration* 23(2). <https://doi.org/10.20855/ijav.2018.23.21381>
- [6] Yunze He, et al. (2021). Infrared machine vision and infrared thermography with deep learning: A review. *Infrared Physics and Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2021.103754>.
- [7] Ciampa F., et al. (2018). A review of Recent Advances of Active Infrared Thermography for Non-destructive Testing of Aerospace Components. *Sensors* 18, p. 609, <https://doi.org/10.3390/s18020609>.
- [8] Yoonjae C., et al. (2021). A review of Latest Advances in Common Signal Processing of Pulsed Thermography for Enhanced Detectability. *Applied Sciences*, <https://doi.org/10.3390/app112412168>.
- [9] Coelho S. R. M., et al. (2017). Effects of external patch configuration on repaired composite laminates subjected to multi-impacts, *Composite Structures* 168, p.259-265, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.02.06>
- [10] Hall Z., et al. (2022). The effectiveness of patch repairs to restore the impact properties of carbon-fibre reinforced-plastic composites, *Engineering Fracture Mechanics*, <https://doi.org/10.1016/j.engfractmech.2022.108>
- [11] Avdelidis N.P., et al. (2004). A thermographic comparison study for the assessment of composite patches, *infra. Physics&Technology*, <https://doi.org/10.1016/j.infrared.2004.01.001>.

- [26] Krishnapillai M., et al. (2006), NDTE using pulse thermography: Numerical modeling of composite subsurface defects, *Composite Structures*, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2006.04.07>
- [27] Hasselman D. P. H., Johnson L. F., (1987), Effective thermal conductivity of composites with interfacial thermal barrier resistance, *Journal of composite materials* 21.6: 508-515. <https://doi.org/10.1177/00219983870210>.
- [28] Zhan-Sheng, G., et al. (2005). Temperature field of thick thermoset composite laminates during cure process. *Composites Sci. and Tech.*, <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.07.0>
- [29] Peters, ST., (1998). Handbook of composites, Part One: basic materials. 2nd ed. London: C h a p m a n a n d H a l l .
- [22] Junyan L., et al. (2012), Experimental study on active infrared thermography as a NDI tool for carbon-carbon composites, *Composite Part B*, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2012.09.0>
- [23] Vijayaraghavan G. K., et al. (2010), numerical modelling and analysis of delamination in GRP pipes, *Insight - NDT and Condition Monitoring*, <https://doi.org/10.1784/insi.2010.52.9.481>.
- [24] Sundaravalli S., et al. (2013), Modeling and Simulation of Delaminations in FML Using Step Pulse Active Thermography, *International Journal of Mechanical and Mechatronics Engineering*, <https://doi.org/10.5281/zenodo.1336336>.
- [25] Krishnapillai M., et al. (2004), Thermography as a tool for damage assessment, *Composite Structures*, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct>.