



Identification of Delamination Defects in Metal-Composite Shells Using Pulse Thermography

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Ardebili A.R.¹ MSc,
Farahani M.R.*¹ PhD

How to cite this article

Ardebili A.R, Farahani M.R. Identification of Delamination Defects in Metal-Composite Shells Using Pulse Thermography. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(9):2303-2312.

¹Manufacturing Engineering Department, Mechanical Engineering Faculty, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: College of Engineering, University of Tehran, Pardis Fanni (2), Kargar Shomali Street, Tehran, Iran.
Postal Code: 111554563.
Phone: +98 (21) 88353893
Fax: +98 (21) 88013029
mrfarahani@ut.ac.ir

Article History

Received: April 04, 2020
Accepted: July 13, 2020
ePublished: September 20, 2020

ABSTRACT

Thermal image analysis can be used to identify and detect patch defects in the interface between multilayer sheets. Specimens made for testing were carbon fiber and glass fiber patches on aluminum sheets that were embedded in composite patch layers, for interlayer separation, in different metal-patch joints. The defect pattern was designed so that the bugs at the edge and center of the patch were tested simultaneously. In this study, the effects of depth and dimension of separation faults with pulsed heat treatment were identified and investigated. Then, the factors affecting the accuracy of the identified defect size were investigated. In the thermal images obtained, almost all the defects can be identified by pulsed thermography and with increasing the size of the defect the thermal difference with the sound areas increases. It was found that the defects in the carbon fiber field were up to an average of 1°C, there was a greater thermal difference than that of glass fiber field. However, the results showed that the accuracy of the measurement of defects in glass fiber was 2 times higher than that of carbon fiber.

Keywords Nondestructive Test; Active Thermography; Metal-Composite Shells; Pulse Thermography

CITATION LINKS

- [1] An infrared line scanning technique for detecting delaminations in carbon fibre tubes [2] Characterization of defects of pulsed thermography inspections by orthogonal polynomial decomposition [3] Low energy impact damage detection in CFRP using eddy current pulsed thermography [4] Low-velocity impact damage characterization of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) using infrared thermography [5] Recent advances in the use of infrared thermography [6] Nondestructive evaluation of carbon fibre reinforced composites with infrared thermography and ultrasonics [7] Experimental investigation of nano-alumina effect on the filling time in VARTM process [8] Experimental investigation of nanoparticles effects on cohesive model and bridging laws of mode I fracture in the adhesive joints [9] Damage investigation in composite materials by means of new thermal data processing procedures: Damage investigation with simulated thermography [10] Robust quantitative depth estimation on CFRP samples using active thermography inspection and numerical simulation updating [11] Infrared thermography: Principle and applications to aircraft materials [12] Pulsed phase thermography reviewed [13] Defect evaluation of the honeycomb structures formed during the drilling process [14] MWCNT-epoxy nanocomposite sensors for structural health monitoring [15] Characterization of cohesive model and bridging laws in mode I and II fracture in nano composite laminates [16] Nondestructive testing with thermography [17] Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb structures [18] Application of thermography with radiation excitation for non-destructive evaluation of composite and metal shells [19] Detection of edge debonding in composite patch using novel post processing method of thermography [20] Investigating the effects of cooling rate on distortion of asymmetric composite laminates

شناسایی عیوب عدم چسبندگی در ورق دوجنسی فلز- کامپوزیت با استفاده از دمانگاری پالسی

امیررضا اردبیلی MSc

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

محمدرضا فراهانی * PhD

گروه ساخت و تولید، دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده های فنی دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

از تجزیه و تحلیل تصاویر حرارتی می‌توان جهت شناسایی و تشخیص عیوب جدایش در فصل مشترک ورق‌های چندلایه استفاده نمود. نمونه‌های ساخته‌شده برای انجام آزمایش، ورق‌های دوجنسی آلومینیوم- کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربنی و آلومینیوم- کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه بودند که در فصل مشترک فلز- کامپوزیتی، جهت ایجاد جدایش بین لایه‌ای، صفحاتی از جنس کپتون با ابعاد مختلف، جاسازی شدند. الگوی جای‌گیری عیوب طوری طراحی شد که عیوب در لبه و مرکز ورق به‌طور همزمان مورد آزمایش قرار گیرند. در این پژوهش اثرات موقعیت و ابعاد عیب جدایش به روش دمانگاری پالسی شناسایی و بررسی شد. در ادامه عوامل تاثیرگذار بر دقت اندازه‌گیری ابعاد عیوب مورد بررسی قرار گرفتند. در تصاویر حرارتی به‌دست‌آمده تقریباً تمامی عیوب به روش دمانگاری پالسی قابل شناسایی بودند و با افزایش اندازه عیب، اختلاف حرارتی عیب با مناطق سالم افزایش پیدا کرد. مشخص شد که عیوب در زمینه فیبرکربنی، تا میانگین یک درجه سانتی‌گراد اختلاف حرارتی بیشتری نسبت به زمینه فیبر شیشه پیدا می‌کردند. با این وجود، نتایج به‌دست‌آمده نشان دادند که دقت اندازه‌گیری ابعاد عیوب در زمینه الیاف شیشه‌ای تا ۲ برابر نسبت به زمینه الیاف کربنی بالاتر است.

کلیدواژه‌ها: آزمون غیرمخرب، دمانگاری فعال، ورق دوجنسی فلز- کامپوزیت، دمانگاری پالسی

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۴/۲۳

*نویسنده مسئول: mrfarahani@ut.ac.ir

مقدمه

تصویربرداری حرارتی مادون قرمز یک روش منظم برای جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و تحلیل انرژی تابشی مادون قرمز با استفاده از سیستم‌های تصویربرداری مادون قرمز است. یک تصویر حرارتی، تصویری است که نقشه توزیع سطوح مختلف انرژی تابشی مادون قرمز را از سطحی از جسم که قابل مشاهده است، نشان می‌دهد. دمانگاری جایگزین هیچ روش دیگر پایش وضعیت نیست ولی می‌تواند با روش‌های دیگر ترکیب شده و به‌صورت مراقبت وضعیت و پیش‌بینی عیوب قطعات استفاده نمود. عملکرد هر دستگاه همواره با انتشار گرما همراه است و معمولاً هر عیب در تجهیزات با افزایش یا کاهش دما بروز می‌نماید. گرمای منتشرشده از سطح بیرونی اجسام به‌صورت تشعشعات مادون قرمز که توسط چشم انسان قابل رویت نیستند آزاد می‌شود. از بررسی‌های حرارتی می‌توان جهت شناسایی و تشخیص عیوب استفاده نمود.

مواد کامپوزیتی در طیف گسترده‌ای از صنایع شامل هواافزا، دریایی، خودرو، حمل و نقل و تجهیزات ورزشی مورد استفاده قرار می‌گیرد. آسیب در لایه‌های کامپوزیت همیشه برای چشم غیرمسلح قابل مشاهده نیست و میزان آسیب به‌وسیله روش‌های غیرتخریبی مناسب تعیین می‌شود. استفاده از فناوری دمانگاری از حدود سال ۱۹۹۵ میلادی آغاز شد و برخی از موضوعاتی که نزدیک به موضوع تحقیق مورد نظر است، تحت بررسی قرار گرفت.

واریس و همکاران^[1]، تحریک حرارتی خط فروسرخ را بر روی نمونه‌های استوانه‌ای از جنس الیاف کربن و الیاف شیشه اعمال کردند. برای شناسایی عیوب در این لوله‌ها از منبع تحریک حرارتی خطی و یک اسکنر خطی فروسرخ استفاده شد. در روش آنها، سیلندر چرخانده شده و آشکارساز یک خط تکین از سطح سیلندر را ثبت کرد. *آلوارز رستریو* و همکاران^[2]، در پژوهشی به بررسی ویژگی‌های تشخیصی نقص با روش دمانگاری پالسی (Pulse Thermography) پرداخت. روش‌های آزمایش غیرمخرب مانند کنتراست حرارتی عادی (Normal Thermal Contrast; NTC) و بازسازی سیگنال حرارتی (Thermographic Signal Reconstruction; TSR)، براساس تحلیل دامنه زمانی پیکسل به پیکسل است. سایر فناوری‌های موجود در حوزه فرکانس مانند دمانگاری فازی پالسی (Pulse Phase Thermography; PPT) همین نقطه ضعف را نشان می‌دهند. یک روش برای ارزیابی نقص در نمونه‌های کامپوزیت براساس تجزیه تصویر به یک فضای دوبعدی متعامد پیشنهاد شد. سه نمونه ناهمسانگرد کامپوزیتی توسط چهار روش دمانگاری NTC، TSR، PPT مورد بررسی قرار گرفتند و نتایج آنها با هم مقایسه شد. نتایج نشان داد که با این روش عمق نقص را تا عمق ۱/۲ میلی‌متر در نمونه‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن و شیشه می‌توان تخمین زد. *لیانگ* و همکاران^[3]، برای شناسایی آسیب‌های حاصل از ضربه از دمانگاری پالسی جریان گردابی (Eddy Current Pulsed Thermography; ECPT) استفاده کردند. این آسیب‌ها به‌صورت مصنوعی، توسط نیروهای ضربه ۴، ۶، ۸ و ۱۰ ژول ایجاد شدند. سپس نقص‌ها با تجزیه و تحلیل توزیع گرما و الگوها در تصاویر حرارتی ارزیابی شدند. به‌منظور تشخیص نقص‌های کوچک، از روش تجزیه و تحلیل آماری با استفاده از تبدیل موجک همراه با تجزیه و تحلیل مولفه اصلی (Principal Components Analysis) برای استخراج ویژگی‌های عیوب آسیب استفاده شد. نشان داده شد که ECPT می‌تواند در تشخیص نقص‌های کوچک در پردازش تصویر الیاف کربن تقویت‌شده کمک کند که این کار با استفاده از سطح مناسب موجک و فریم‌های تصاویر حرارتی انجام شد. روش جدید تبدیل موجک ترکیبی با PCA پیشنهاد داده شد که داده‌های اصلی داده‌های چندبعدی را به چندین تصویر مشخص تبدیل کند و اطلاعات اضافی را جدا کند. نتایج نشان داد که روش پیشنهادی تشخیص بیشتری نسبت به نتایج حاصل از فناوری دمانگاری القایی در شناسایی آسیب‌های ضربه‌های کوچک

نیازی به تنظیم فرکانس نمونه یا انتشار برای عمق‌های مختلف نیست. در پژوهش‌هایی [11, 12, 13]، روش‌های مختلف دمانگاری فعال، شامل دمانگاری پالسی، قفلی، پالسی فازی بر روی یک ساندویچ پل حاوی برخی از عیوب رایج (از جمله جدایش، ضربه و خوردگی) در قطعات هوافضایی اجرا و با نتایج تجربی حاصل از تحریک نوری، مکانیکی و الکترومغناطیسی مقایسه شد. عیوب مورد بررسی در این پژوهش‌ها شامل ضربه، محل‌های بریده شده و جدایش بودند.

برخلاف ترموگرافی منفعل، ترموگرافی فعال نیاز به یک منبع گرمای خارجی برای تحریک مواد تحت آزمایشات دارد. منابع حرارتی نوری به‌طور معمول به‌عنوان تحریک‌کننده استفاده می‌شوند (مانند لامپ‌های سینماتوگرافی با قدرت بالا، خطوط مادون قرمز، فلاش لامپ با قدرت بالا و پرتو لیزر). اثرات نقص‌ها و آسیب‌هایی مانند ضربه، لایه‌لایه‌شدگی و گسیختگی در استحکام و یا عمر یک ساختار چندلایه فلز- کامپوزیتی اجتناب‌ناپذیر است. آزمون غیرمخرب دمانگاری فروسرخ، پتانسیل و مزایای زیادی را نشان می‌دهد که از نوآوری‌های طراحی آزمایشات، ارزیابی همزمان انواع عیب از لحاظ مکان (لبه‌ها و وسط ورق)، اندازه عیوب و ضخامت پوسته‌های کامپوزیتی از مزیت‌های این نوع روش بازرسی است. در این پژوهش عیوب جدایش با ابعاد مختلف در فصل مشترک ورق دوجنسی آلومینیوم- کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف کربن و آلومینیوم- کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف شیشه به‌صورت غیرمخرب با استفاده از روش حرارت‌نگاری مادون قرمز مورد بازرسی قرار گرفتند. اثر ابعاد عیوب، موقعیت هندسی عیوب و ضخامت لایه کامپوزیتی بر قابلیت شناسایی و دقت اندازه‌گیری ابعاد عیوب مورد مطالعه قرار گرفت.

اصول تئوری و معادلات حاکم

تابش عبارت است از انتقال حرارتی که از طریق امواج الکترومغناطیسی صورت می‌گیرد. از آنجایی که این امواج با سرعت نور منتقل می‌شوند، بنابراین سرعت انتقال انرژی در این حالت نیز برابر با سرعت نور است. به جسمی که کامل‌ترین جذب‌کننده و ساطع‌کننده انرژی در یک طول موج خاص باشد، جسم سیاه گفته می‌شود. در یک دما و طول خاص هیچ جسمی نمی‌تواند بیشتر از جسم سیاه انرژی ساطع کند. از نظر تئوری یک جسم سیاه، انرژی را در تمامی جهات به‌طور یکنواخت جذب می‌کند. اما انرژی جذب‌شده، وابسته به جهت تابش موج رسیده به آن است. میزان انرژی ساطع‌شده از یک جسم سیاه، در واحد زمان و در واحد سطح را می‌توان با استفاده از قانون استفان-بولتزمن محاسبه کرد.

$$E_b = \sigma T^4 \left(\frac{w}{m^2} \right) \quad (1)$$

$$\sigma = 5/67 \times 10^{-8} \left(\frac{w}{m^2 k^4} \right) \quad (2)$$

در معادله ۱، T دمای مطلق سطح جسم سیاه است که برحسب کلین بیان می‌شود. همچنین E_b را توان گسیل جسم سیاه

الیاف کربن تقویت‌شده ناشی از انرژی را کم نشان می‌دهد. لی و همکاران [4]، با تحریک هدایت حرارتی پالسی، تحریک حرارتی اصطکاکی و تحریک هدایت حرارتی تحت تحریک فراصوت، نمونه‌های پلیمر تقویت‌شده الیاف کربن حاوی آسیب ضربه با سرعت کم را مورد آزمون دمانگاری قرار دادند. از طریق شبیه‌سازی عددی و بررسی تجربی، نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که ترکیبی از دو روش تشخیص می‌تواند به‌طور قابل توجهی توانایی شناسایی و ارزیابی آسیب ضربه را در پلیمر تقویت‌شده الیاف کربن بهبود بخشد. مئولا و همکاران [5]، توسط دمانگاری فروسرخ، پژوهشی را بر روی بازرسی کامپوزیت آسیب‌دیده انجام دادند. در این پژوهش به‌طور خاص، دمانگاری با عملکرد دوگانه که عبارت است از نظارت بر آزمون‌های ضربه و ارزیابی غیرمخرب، نمونه‌های آسیب‌دیده مورد استفاده قرار گرفت. انواع مختلف کامپوزیت‌ها در نظر گرفته می‌شوند که شامل تغییر ماتریس از یک ترموست به یک ترموپلاستیک و همچنین اضافه‌کردن عامل سازگارکننده یا تقویت‌کننده از کربن به شیشه است. حضور سازگارکننده در ماتریس ترموپلاستیک، مانع از تغییر شکل بزرگ می‌شود و همچنین باعث می‌شود که شبیه مواد ماتریس ترموست باشد. همچنین در پژوهش‌های دیگری [6, 7, 8]، نمونه آزمایشی ضربه خورده شده توسط دمانگاری قفلی و نظارت حرارتی روشن مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابقت بین آنچه که توسط دمانگاری قفلی و آنچه که از طریق نظارت حرارتی روشن به‌دست آمد، وجود داشت. دمانگاری قفلی نتوانست تمام جزئیات منطقه لایه‌لایه‌شدگی را ارزیابی کند و عیوب کوچک با صحنه پس‌زمینه اشتباه گرفته شد. پروفیل‌های درجه حرارت داده‌شده توسط نظارت مستقیم حرارتی روشن در ناحیه آسیب‌دیده، اجازه می‌دهد تشخیص بهتر نوع آسیب از طریق گسترش منطقه گرم، حاصل شود. نتایج به‌دست‌آمده نشان‌دهنده امکان استفاده از دمانگاری فروسرخ برای ارزیابی سریع رفتار کامپوزیت‌ها از طریق نظارت روشن بر روی آزمون‌های ضربه است. پالومبو و گالییتی [9]، تأثیر پارامترهای اصلی دمانگاری فعال، با استفاده از تجزیه و تحلیل نقایص شبیه‌سازی شده بر روی یک نمونه از پلیمر تقویت‌شده الیاف شیشه را مورد بررسی قرار دادند. به‌طور خاص بر روی بهینه‌سازی پارامترهای آزمون برای بهبود کیفیت سیگنال و کاهش زمان آزمون تمرکز شد. یک روش جدید براساس الگوریتم مناسب برای اندازه‌گیری حداقل مربعات ارایه شد که قادر به ارایه تحلیل‌های مختلف حرارتی، همزمان با تحریک گرمای مدولاسیون در یک آزمون واحد است. نتایج به‌دست‌آمده از الگوریتم با آزمون دمانگاری قفلی (Lock-In Thermography) مقایسه شد و تطابق خوبی بین دو فناوری به‌دست آمد. پیترز و همکاران [10]، مدل عددی برای تخمین عمق عیب ارایه دادند که نتایج حاصل با استفاده از اندازه‌گیری‌های ترموگرافی پالسی فازی مطابقت داشت. برای عیوب عمیق‌تر از ۲ میلی‌متر، مدل عددی بهینه‌شده دقت بیشتری را داشته است. مزیت روش به‌کاربرده شده این است که

این صنایع، اغلب آلومینیوم ۲۰۲۴ است. این آلیاژ علاوه بر استحکام مطلوب جهت مصرف در صنایع حساس، قابلیت‌های عملیاتی و ساخت خوبی دارد. به همین دلیل جنس فلز پایه نمونه‌ها آلومینیوم T4-۲۰۲۴ با ضخامت ۴ میلی‌متر انتخاب شد. این جنس برای ساخت قطعات هواپیما، خودرو و برخی قطعات نظامی به دلیل داشتن استحکام بالا و وزن کم استفاده می‌شود. تعداد لایه‌های پوسته کامپوزیتی نمونه‌ها، چهار و هشت لایه الیاف کربن و الیاف شیشه در نظر گرفته شد. عیوب مورد بررسی، عیب جدایش بین لایه‌ای است. برای شبیه‌سازی اثر این عیب، ورق‌هایی از جنس کپتون در بین فصل مشترک فلز- کامپوزیت جایگذاری شد. جهت ساخت ورق‌های دوجنسی، از فناوری وکیوم پرس استفاده شده است. شماتیک فرآیند ساخت پوسته‌ها تحت کیسه خلاء در شکل ۱ نمایش داده شده است. برای جایگذاری نمونه‌ها، شابلونی تهیه شد تا عیوب در موقعیت صحیح خود قرار گیرند. در ساخت نمونه‌های الیاف کربنی، بین هر لایه مخلوط رزین اپوکسی ۲۰۱۷ و هاردنر اپوکسی ۲۰۱۸ EPOLAM به نسبت ۱۰۰/۳۰ (۵/کیلوگرم رزین و ۱۵/کیلوگرم هاردنر) استفاده شد. در ساخت نمونه‌های الیاف شیشه‌ای، رزین Ly556 Huntsman و شتاب‌دهنده DY07 (به‌ازای ۱۰۰ گرم رزین، ۹۰ گرم هاردنر و یک گرم شتاب‌دهنده) استفاده شد. از پارچه کربن ۲۰۰ گرمی Plain در ساخت نمونه‌ها استفاده شد. پخت نمونه‌های دوجنسی آلومینیوم-کربنی، در محیط و دمای کارگاه به مدت ۳ روز خشک شدند. اندازه‌های عیوب، با بررسی مقالات منتشرشده در این زمینه، به‌ترتیب از کوچک‌ترین تا بزرگ‌ترین اندازه عیوب ۲/۵×۲/۵ (با رواداری چند دهم میلی‌متر بزرگ‌تر)، ۵×۵، ۱۰×۱۰ و ۲۵×۲۵ در نظر گرفته شدند. به‌منظور جلوگیری از تداخل اثرات حرارتی عیوب، چیدمان عیوب طوری صورت گرفت که عیوب با هم فاصله مناسبی داشته باشند. در نهایت اندازه نمونه‌های چهار لایه‌ای ۳۰×۱۱ سانتی‌متر و اندازه نمونه‌های هشت لایه‌ای ۳۰×۶/۵ سانتی‌متر در نظر گرفته شد. تصاویر نقشه‌های نمونه‌ها در شکل‌های ۲ و ۳ آورده شده است.

برای آزمایش دمانگاری، به‌دلیل به حداقل رساندن بازتاب نور، حذف نویز در تصاویر دمانگاری و جذب حداکثری حرارت، باید سطح تحت تحریک نوری قرار گرفته، مات و تیره باشد. بنابراین بر روی سطح تمام نمونه لایه‌ای نازک، رنگ مشکی مات اسپری شد و با حرارت تابشی خشک شدند. این عمل زمان خشک شدن رنگ را کاهش می‌دهد و باعث مات‌تر شدن رنگ نیز می‌شود [15].

در فناوری تحریک حرارتی نوری (Optical Pulse Thermography) از لامپ‌هایی با توان حرارتی بالا به‌عنوان منابع حرارتی برای تحریک نمونه‌ها توسط پالس‌های حرارت استفاده می‌شود. این روش شامل گرم کردن نمونه‌ها از طریق اعمال ناگهانی حجم عظیمی از نور انرژی‌دهنده در یک بازه زمانی کوتاه و مشاهده تغییر دمای سطح نمونه، بلافاصله پس از تحریک است. انجام این روند، امکان شناسایی عیوب مختلف در نمونه را

می‌نامند. برای نمونه می‌توان یک محفظه بسته که دارای حفره‌ای کوچک است را مدل‌سازی خوبی برای جسم سیاه دانست. توان تشعشعی جسم سیاه برابر با میزان انرژی ساطع‌شده از آن در واحد زمان، سطح و طول موج است. این کمیت را با نماد $E_{b\lambda}$ نشان می‌دهند. قانون توزیع پلانک بیان می‌کند که برای چنین جسمی رابطه میان $E_{b\lambda}$ با دما و طول موج به‌صورت زیر است.

$$E_{b\lambda}(T) = \frac{C_1}{\lambda^5 \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]} \quad (3)$$

$$C_1 = 2\pi h c^2 = 3.742 \times 10^8 \text{ (W} \cdot \frac{\mu\text{m}^4}{\text{m}^2}) \quad (4)$$

$$C_2 = \frac{hc_0}{k} = 1.439 \times 10^4 \text{ (}\mu\text{m} \cdot \text{K)} \quad (5)$$

$$k = 1.3805 \times 10^{-23} \text{ (J/K)} \quad (6)$$

به نسبت انرژی ساطع‌شده توسط یک سطح به انرژی ساطع‌شده توسط جسم سیاه که در دمایی یکسان قرار گرفته‌اند، گسیلندگی گفته می‌شود که با ϵ نشان داده می‌شود که این مقدار همواره بین صفر و یک قرار می‌گیرد. این کمیت به ما نشان می‌دهد که خواص تابشی یک سطح واقعی به چه میزان به جسم سیاه نزدیک است (ضریب گسیلندگی برای جسم سیاه برابر با یک است). از تعریف ارائه‌شده برای این مقدار پیدا است که می‌توان این عدد را با استفاده از رابطه زیر محاسبه کرد.

$$\epsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} = \frac{E(T)}{\sigma T^4} \rightarrow E(T) = \epsilon(T) \sigma T^4, \quad \epsilon_\lambda(T) = \frac{E_\lambda(T)}{E_{b\lambda}(T)} \quad (7)$$

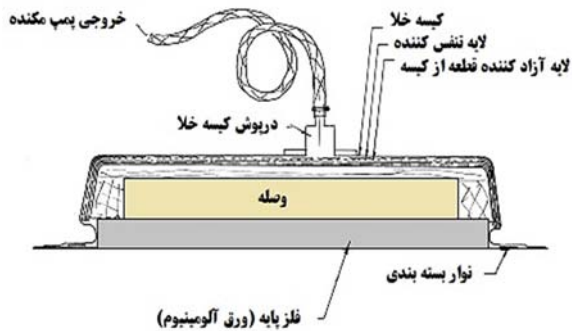
در معادله ϵ گسیلندگی کلی یک سطح را نشان می‌دهد. اما در بعضی از تحلیل‌ها از توانایی گسیلش سطح، در یک طول موج خاص استفاده می‌شود. در چنین شرایطی می‌توان از مفهوم گسیلندگی طیفی بهره برد. گسیلندگی سطحی را با نماد ϵ_λ نشان می‌دهند. در هر دو مفهوم بالا دمای سطح واقعی و جسم سیاه برابر هستند. در رابطه بالا $E_\lambda(T)$ توان تابش طیفی یک جسم سیاه است [14, 15].

مواد و روش انجام آزمایشات

امروزه به‌علت مزایایی که کامپوزیت‌ها نسبت به فلزات دارند، توسعه زیادی پیدا کرده‌اند. از جمله می‌توان به کاربرد قطعات کامپوزیتی در وصله‌کاری و ساخت ورق‌های چندلایه اشاره کرد. قالب‌گیری به روش دستی متداول‌ترین روش تولید قطعات در صنعت کامپوزیت است. معمولاً از این روش برای ساخت قطعات با تعداد کم استفاده می‌شود. قالب‌گیری به روش کیسه خلاء در حقیقت ادامه فرآیند لایه‌گذاری دستی است. به‌طوری که برای فراهم شدن یک ترکیب محکم‌تر و یکپارچه‌تر، پس از اتمام لایه‌گذاری، بر روی آن فشار اعمال می‌شود. هنگامی که در قالب قرار دارد، بر روی کامپوزیت چندلایه خیس کیسه پلاستیکی کشیده می‌شود. هوای زیر کیسه به‌وسیله پمپ خلاء مکیده شده و بدین ترتیب تا حد یک بار فشار را می‌توان بر روی کامپوزیت چندلایه برای یکپارچه‌شدنش اعمال نمود.

عملیات وصله‌کاری و یا ساخت ورق‌های دوجنسی معمولاً در صنایع هوایی و فضایی صورت می‌پذیرد. جنس فلز مورد مصرف در

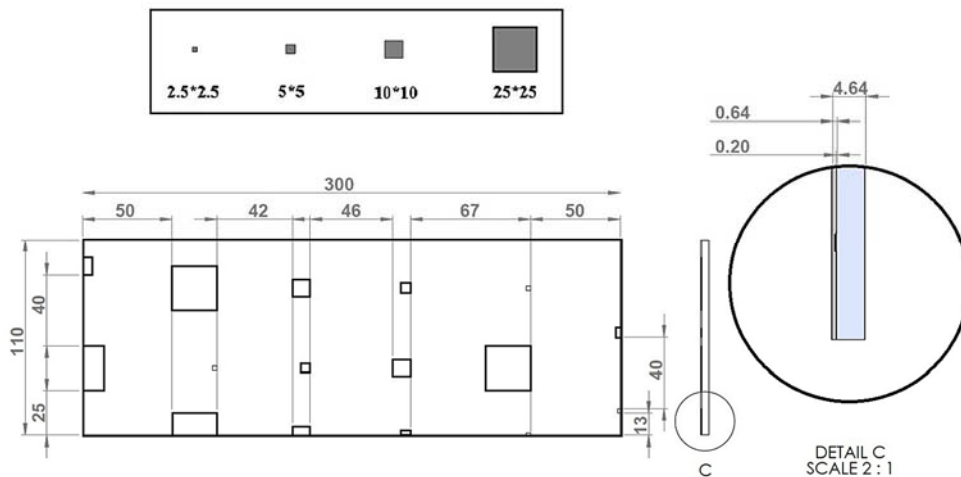
به طوری که منابع تحریک حرارتی و دوربین فرورسرخ در یک سمت، در مقابل سمت کامپوزیتی قرار داده شدند. چندین آزمایش بر روی سایر چیدمان‌های دمانگاری دیگر از جمله چیدمان گذرا نیز انجام شد (شکل ۴) که منجر به شناسایی مطلوب عیوب نشدند. بنابراین از چیدمان بازتابی در بازرسی دمانگاری و جمع آوری نتایج استفاده شد.



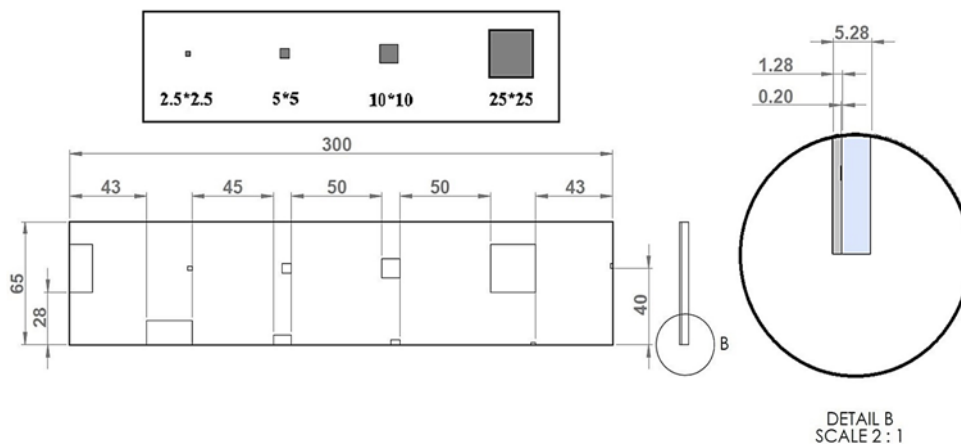
شکل ۱) شماتیک روش پرس کیسه خلاء (اینفیوژن)

فراهم می‌کند. این لامپ‌ها، به شکل پالس بلند (۱۰ ثانیه) اعمال حرارت می‌کنند که باعث می‌شود نور مستقیماً به طرف سطحی که باید گرم شود، تابیده شود و بدین ترتیب، اتلاف انرژی را کاهش می‌دهد [16, 17, 18]. جهت تحریک حرارتی نمونه‌های مورد آزمایش، از دو پروژکتور ۲ کیلووات لامپ تنگستنی استفاده شد. دوربین مورد استفاده در آزمایشات، دوربین فرورسرخ Flir با رزولوشن ۳۲۵×۲۴۰ پیکسل با حساسیت حرارتی ۰/۵ درجه سانتی‌گراد و فرکانس ۶۰ هرتز است. با استفاده از نرم‌افزار ResearchIR Flir Mx+HSDR Version 4.40.1.6 (64bit) (Nov 30, 2016) تصاویر حرارتی استخراج و تحلیل شد.

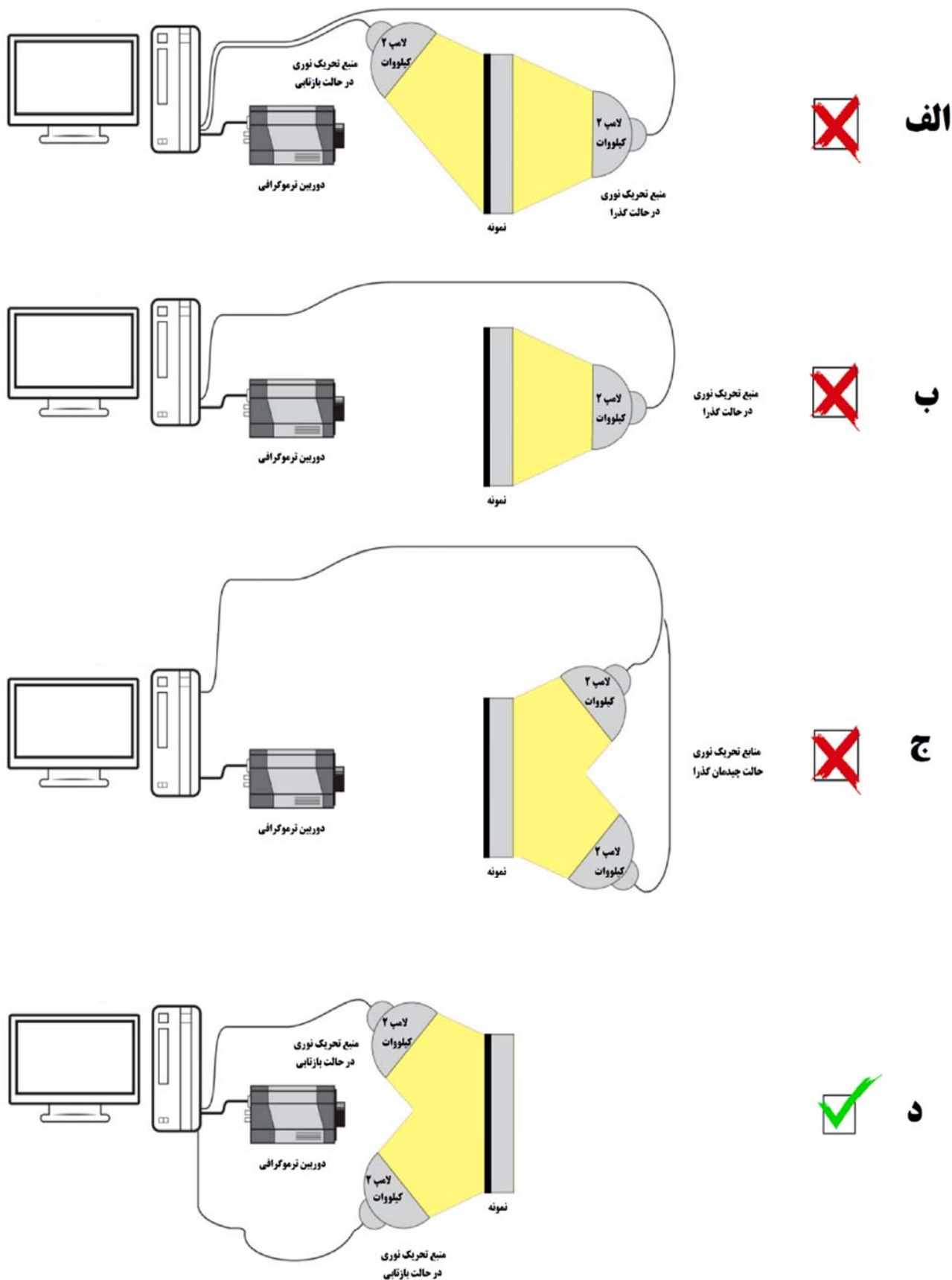
دمانگاری فرورسرخ فعال شامل تحریک سطح جسم مورد مطالعه توسط یک منبع حرارتی با یک روش کنترل شده است. پاسخ دینامیکی موج حرارتی تولیدشده در سطح، با استفاده از یک دوربین فرورسرخ (که تغییرات دما را در طول زمان ضبط می‌کند)، آشکارسازی می‌شود. توالی حرارتی به دست آمده از دوربین، می‌تواند بعداً پردازش شود تا نتایج به دست آمده، بهبود یابند [19, 20]. در آزمایشات صورت گرفته، از چیدمان بازتابی استفاده شده است.



شکل ۲) نقشه نمونه‌های با پوسته چهار لایه‌ای کامپوزیتی (اندازه‌ها به میلی‌متر هستند)



شکل ۳) نقشه نمونه‌های با پوسته هشت لایه کامپوزیتی (اندازه‌ها به میلی‌متر هستند)



شکل ۴) شماتیک چیدمان‌های ریشه و چیدمان مورد استفاده

با مقایسه شکل‌های ۶ و ۷ با نمودار ۱، می‌توان این‌گونه جمع‌بندی نمود که عیوب با اختلاف حرارتی کمتر از ۱/۵ درجه سانتی‌گراد، بدون استفاده از نمودارهای دما- پیکسل، قابل شناسایی نیستند. جهت شناسایی واضح‌تر عیوب کوچک (کمتر از ۵ میلی‌متر)، به منبع حرارتی توان بالاتر و با زمان تحریک کوتاه‌تر نیاز است. زیرا با افزایش زمان تحریک اختلاف حرارتی عیوب با مناطق سالم کاهش می‌یابد و عیوب محو می‌شوند.

بررسی عوامل تاثیرگذار بر دقت اندازه‌گیری عیوب شناسایی‌شده

میزان دقت اندازه‌گیری عیوب نمونه‌ها در نمودارهای ۲ و ۳ با هم مقایسه شده‌اند. عیوب $2/5 \times 2/5$ میلی‌متر (تقریباً ۲ برابر اندازه واقعی) با کمترین دقت و عیوب 25×25 میلی‌متر (تقریباً بدون خطا) با بیشترین دقت، اندازه‌گیری شدند. دقت اندازه‌گیری عیوب در زمینه الیاف فیبر کربن بود. دلیل آن این است که عیوب در زمینه الیاف کربن اختلاف حرارتی بیشتری با مناطق سالم داشتند و وضوح کمتری داشتند. عیوب لبه‌ای تا ۵۰٪ بهتر از عیوب مرکزی اندازه‌گیری شدند. با افزایش اندازه عیب از کوچک به بزرگ، به‌ترتیب ۲۵٪ بر دقت اندازه‌گیری عیب افزوده می‌شود. دلیل آن این است که با اندازه عیب، وضوح عیب افزایش است. با افزایش ضخامت پوسته کامپوزیتی (چهار لایه اضافه شود) حدود ۲۵٪ از دقت اندازه‌گیری عیوب کاسته می‌شود. با توجه به اینکه هر پیکسل تصویر $0/4$ میلی‌متر است، عرض عیوب از نمودارهای دما- پیکسل محاسبه شدند.

همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ نمایش داده شده است، عرض به‌دست‌آمده از نمودارهای دما- پیکسل نیز با عیوب ظهوریافته در تصاویر ترموگرافی مطابقت دارد. به‌طوری که حداقل خطای تصویربرداری حرارتی از عیوب 25×25 میلی‌متر، حداکثر میزان خطای تصویربرداری حرارتی از عیوب 5×5 میلی‌متر مشاهده شد و عیوب $2/5 \times 2/5$ میلی‌متر بودند.

پارامترهای مورد بررسی در شناسایی عیوب با روش دمانگاری فعال، اثر عمق و ابعاد عیوب بر روی اختلاف دمایی عیوب با مناطق سالم و درصد اختلاف اندازه عیوب شناسایی شده است. روش استخراج این پارامترها از منحنی‌های دما- پیکسل در شکل ۵ نشان داده شده است. بهترین وضوح تصاویر حرارتی گرفته‌شده در ثانیه اول مرحله خنک‌کاری به‌دست آمد.

همان‌طور که در شکل‌های ۶ و ۷ مشاهده می‌شود، جهت حذف پراکندگی دمایی محیط اطراف نمونه‌ها و شناسایی مطلوب عیوب، فاصله و وضوح دوربین به مقداری بود که فقط نمونه را تصویربرداری کند. با توجه به هندسه نمونه‌ها و قابلیت دوربین، در سه مرحله از نمونه‌ها تصویربرداری حرارتی شد.

تجزیه و تحلیل عیوب در تصاویر حرارتی

تقریباً تمامی عیوب شناسایی شدند. بهترین وضوح را عیوب 25×25 میلی‌متر داشتند که لبه‌های آنها کاملاً مشخص است. عیوب 5×5 و 10×10 میلی‌متر نیز قابل شناسایی بودند ولی در بعضی از مکان‌ها وضوح کافی برای تشخیص لبه‌های آنها به‌دست نیامد. عیوب شناسایی‌نشده در شکل‌های ۶ و ۷ نشان داده شده‌اند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، عیوب در زمینه الیاف کربن، پس از تحریک حرارتی، نسبت به عیوب در زمینه الیاف شیشه، اختلاف حرارتی بیشتری با سطوح بی‌عیب پیدا می‌کنند. همچنین عیوب در زمینه الیاف شیشه، پس از تحریک حرارتی، نسبت به عیوب در زمینه الیاف کربن، وضوح بیشتری داشتند.

به‌طور کلی، تعداد عیوب قابل شناسایی در کامپوزیت‌های چهار لایه بیشتر از تعداد عیوب قابل شناسایی در کامپوزیت‌های هشت لایه بودند. به‌دلیل تجمع حرارتی در لبه‌ها، تعداد عیوب لبه‌ای قابل شناسایی کمتر از تعداد عیوب مرکزی قابل شناسایی بودند.

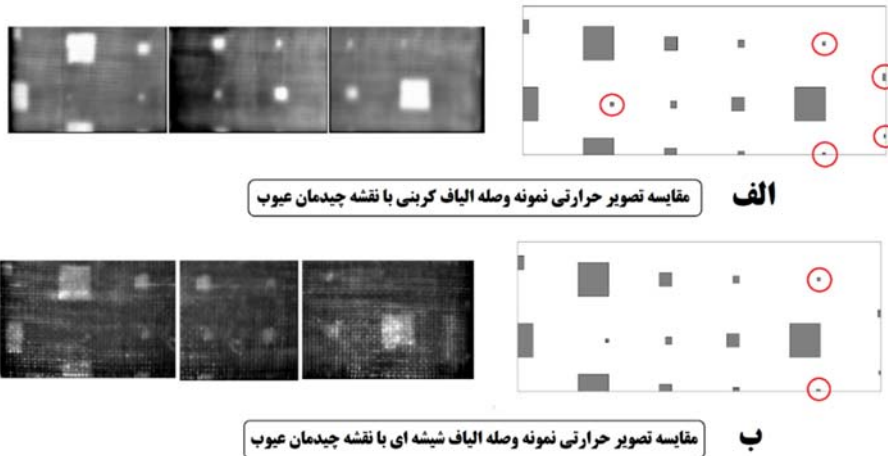
بررسی عوامل موثر بر روی اختلاف حرارتی عیوب با سطوح سالم

منحنی‌های اختلاف حرارتی عیوب با مناطق سالم در نمونه‌های مختلف، در نمودار ۱ با هم مقایسه شده است.

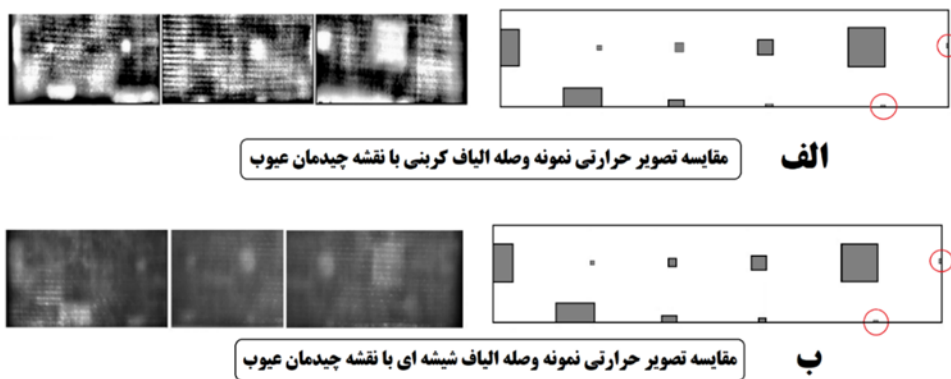
همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌طور کلی هر چقدر عیب بزرگ‌تر باشد اختلاف حرارتی آن بیشتر است. اختلاف حرارتی عیوب در زمینه الیاف کربن بیشتر از اختلاف حرارتی عیوب در زمینه الیاف شیشه است. میانگین اختلاف حرارتی عیوب در زمینه الیاف کربن حدود ۲ برابر بیشتر از میانگین اختلاف حرارتی عیوب در زمینه الیاف شیشه است.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



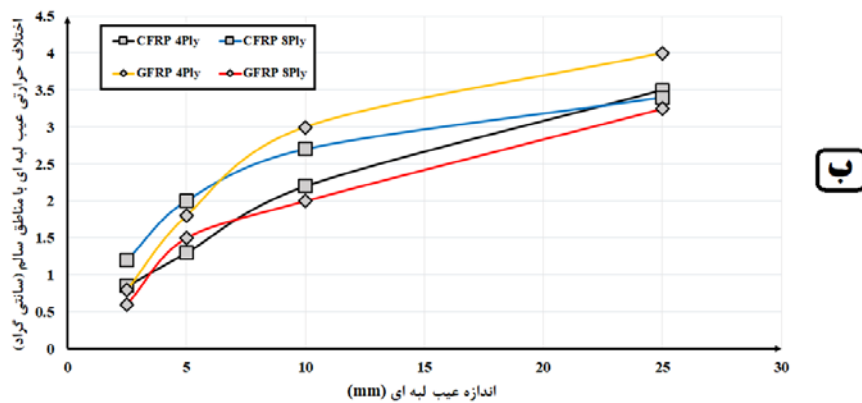
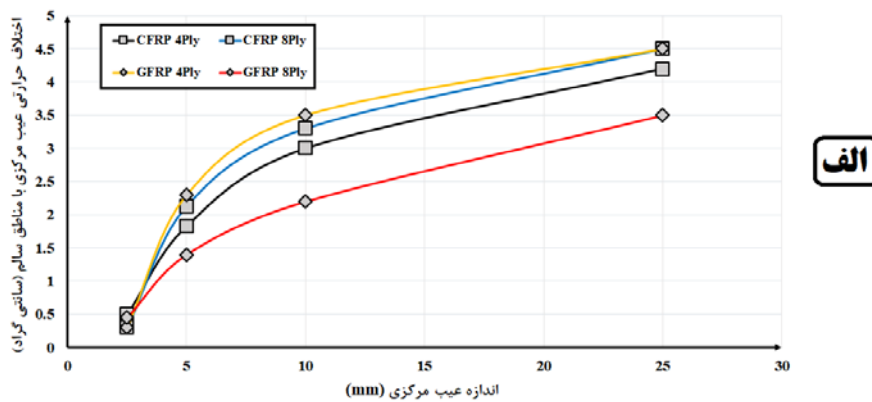
شکل ۵) نحوه محاسبه دقت اندازه‌گیری و اختلاف حرارتی عیوب



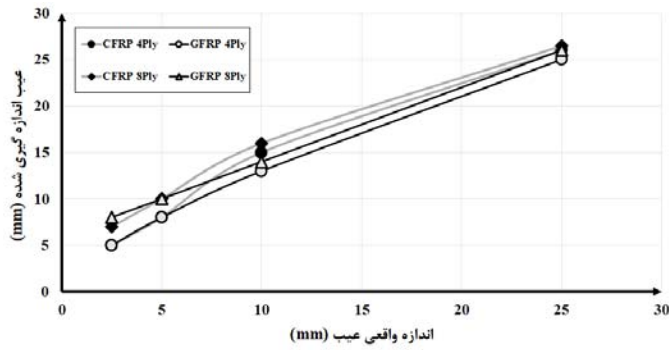
شکل ۶) تصاویر حرارتی نمونه‌ها با کامپوزیت چهار لایه‌ای



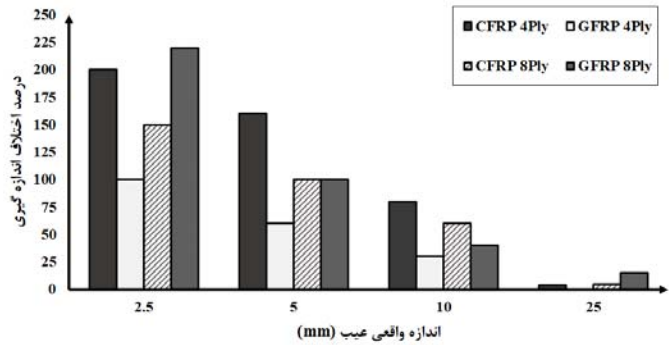
شکل ۷) تصاویر حرارتی نمونه‌ها با کامپوزیت هشت لایه‌ای



نمودار ۱) اثر عمق و اندازه عیب بر اختلاف حرارتی عیوب شناسایی شده در نمونه‌ها

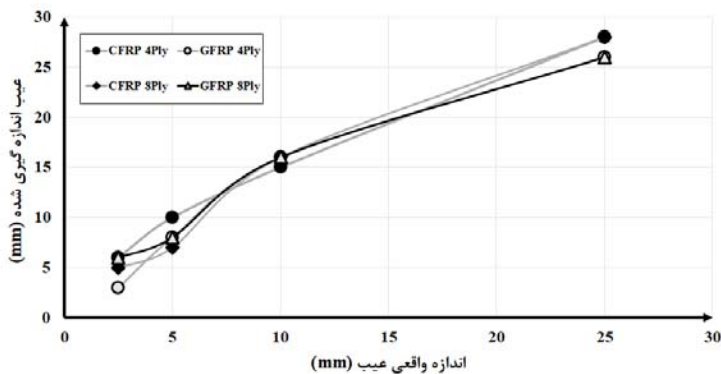


الف

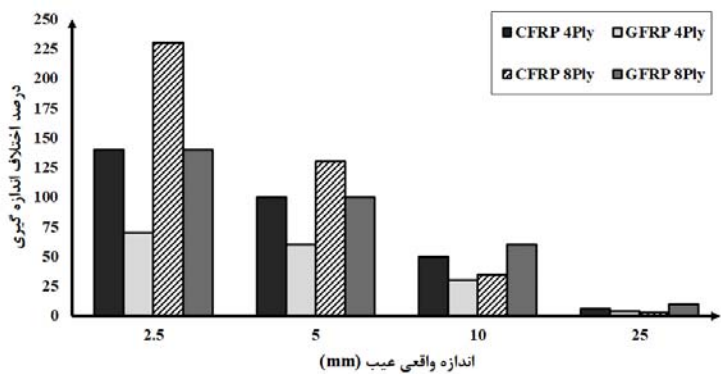


ب

نمودار ۲) منحنی‌های دقت اندازه‌گیری عیوب مرکزی شناسایی‌شده در نمونه‌ها



الف



ب

نمودار ۳) منحنی‌های دقت اندازه‌گیری عیوب لبه‌ای شناسایی‌شده در نمونه‌ها

اختلاف دمایی عیوب با مناطق سالم و درصد اختلاف اندازه عیوب شناسایی‌شده با اندازه واقعی عیوب است. برای تفسیر نتایج آزمایشات متعددی بر روی نمونه‌های مختلف انجام شد. خلاصه نتایج حاصله به شرح زیر است:

جمع‌بندی

آزمون غیرمخرب دمانگاری برای شناسایی عیوب جدایش در ورق‌های دولایه فلز- کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفت. از اهداف پژوهش، ارزیابی اثر ابعاد عیب و ضخامت لایه کامپوزیتی بر

Monaco E, Ricci F. Nondestructive evaluation of carbon fibre reinforced composites with infrared thermography and ultrasonics. *Composite Structures*. 2015;134:845-853.

7- Ghabezi P, Farahani M, Hosseinifakhr M. Experimental investigation of nano-alumina effect on the filling time in VARTM process. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*. 2016;8(2):925-940

8- Ghabezi P, Farahani M. Experimental investigation of nanoparticles effects on cohesive model and bridging laws of mode I fracture in the adhesive joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2017;31(16):1807-1823.

9- Palumbo D, Galietti U. Damage investigation in composite materials by means of new thermal data processing procedures: Damage investigation with simulated thermography. *Strain*. 2016;52(4):276-285.

10- Peeters J, Ibarra-Castanedo C, Sfarra S, Maldague X, Dirckx JJJ, Steenackers G. Robust quantitative depth estimation on CFRP samples using active thermography inspection and numerical simulation updating. *NDT & E International*. 2017;87:119-123.

11- Ibarra-Castanedo C, Susa M, Klein M, Grenier M, Piau JM, Larby WB, et al. Infrared thermography: Principle and applications to aircraft materials. *International Symposium on NDT in Aerospace*, 3-5 December 2008, Furth, Germany. Unknown Publisher City: NDT; 2008.

12- Ibarra-Castanedo C, Maldague X. Pulsed phase thermography reviewed. *Quantitative Infrared Thermography Journal*. 2004;1(1):47-70.

13- Ghabezi P, Farahani M, Shahmirzaloo A, Ghorbani H, Harrison NM. Defect evaluation of the honeycomb structures formed during the drilling process. *International Journal of Damage Mechanics*. 2020;29(3):454-466.

14- Sam-Daliri O, Faller LM, Farahani M, Roshanghias A, Oberlercher H, Mitterer T, et al. MWCNT-epoxy nanocomposite sensors for structural health monitoring. *Electronics*. 2018;7(8):143.

15- Ghabezi P, Farahani M. Characterization of cohesive model and bridging laws in mode I and II fracture in nano composite laminates. *Journal of Mechanical Engineering and Sciences*. 2018;12(4):4329-4355.

16- Ibarra-Castanedo C, Tarpani JR, Maldague XP. Nondestructive testing with thermography. *European Journal of Physics*. 2013;34(6):91-109.

17- Ibarra-Castanedo C, Piau JM, Guilbert S, Avdelidis NP, Genest M, Bendada A, et al. Comparative study of active thermography techniques for the nondestructive evaluation of honeycomb structures. *Research in Nondestructive Evaluation*. 2009;20(1):1-31.

18- Ardebili A, Farahani M, Asghari S. Application of thermography with radiation excitation for non-destructive evaluation of composite and metal shells. *Nondestructive Testing Technology*. 2020;2(5):3-13. [Persian]

19- Moradi M, Safizadeh MS. Detection of edge debonding in composite patch using novel post processing method of thermography. *NDT & E International*. 2019;107:102153.

20- Mobarakian M, Safarabadi M, Farahani M. Investigating the effects of cooling rate on distortion of asymmetric composite laminates. *Composite Structures*. 2020;236:111875.

۱- میانگین دقت اندازه‌گیری عیوب لبه‌ای، ۵۰٪ (۰/۰۵٪ برابر) بیشتر از عیوب مرکزی بوده است.

۲- میانگین دقت اندازه‌گیری ابعاد عیوب جدایش در نمونه‌های ورق آلومینیوم- وصله الیاف شیشه‌ای، ۱۰۰٪ (یک برابر) بیشتر از میانگین دقت عیوب اندازه‌گیری‌شده در نمونه‌های آلومینیوم- وصله الیاف کربنی است.

۳- مقدار اختلاف حرارتی عیوب شناسایی‌شده در پوسته‌های الیاف کربنی، یک درجه سانتی‌گراد بیشتر از اختلاف حرارتی عیوب شناسایی‌شده در پوسته‌های الیاف شیشه‌ای است. به همین دلیل احتمال شناسایی عیوب در نمونه‌های آلومینیوم- الیاف کربنی بیشتر از نمونه‌های آلومینیوم- الیاف شیشه‌ای است.

۴- درصد خطای اندازه‌گیری عیوب در پوسته‌های چهار لایه کامپوزیتی، به دلیل ضخامت کم پوسته و عمق یکسان عیوب، در هر دو جنس الیاف به هم نزدیک بود.

۵- با افزایش ضخامت پوسته کامپوزیت از چهار به هشت لایه، حدود ۲۵٪ از دقت اندازه‌گیری عیوب کاسته می‌شود.

تشکر و قدردانی: از آزمایشگاه کاربردی جوش و آزمون‌های غیرمخرب دانشگاه تهران به دلیل در اختیار قراردادن آزمایشگاه جهت انجام آزمایشات و مطالعات انجام‌گرفته قدردانی می‌شود.

تاییدیه اخلاقی: تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است و همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری ارسال نشده است. گواهی می‌شود که کلیه اصول اخلاق در مهندسی رعایت شده است.

تعارض منافع: هیچ تعارضی در منافع نویسندگان وجود ندارد.

سه‌م نویسندگان: امیررضا اردبیلی (نویسنده اول)، تحلیلگر آماری/نگارنده بحث (۵۰٪)؛ محمدرضا فراهانی (نویسنده دوم)، پژوهشگر اصلی (۵۰٪).

منابع مالی: هزینه‌ها به‌صورت شخصی تامین شده است.

منابع

1- Varis J, Rantala J, Hartikainen J. An infrared line scanning technique for detecting delaminations in carbon fibre tubes. *NDT & E International*. 1996;29(6):371-377.

2- Alvarez-Restrepo CA, Benitez-Restrepo HD, Tobón LE. Characterization of defects of pulsed thermography inspections by orthogonal polynomial decomposition. *NDT & E International*. 2017;91:9-21.

3- Liang T, Ren W, Tian GY, Elradi M, Gao Y. Low energy impact damage detection in CFRP using eddy current pulsed thermography. *Composite Structures*. 2016;143:352-361.

4- Li Y, Zhang W, Yang ZW, Zhang JY, Tao SJ. Low-velocity impact damage characterization of carbon fiber reinforced polymer (CFRP) using infrared thermography. *Infrared Physics & Technology*. 2016;76:91-102.

5- Meola C, Carlomagno GM. Recent advances in the use of infrared thermography. *Measurement Science and Technology*. 2004;15(9):27.

6- Meola C, Boccardi S, Carlomagno GM, Boffa ND,