

Application of Electrical Stimulation for Inspection of Composite Materials in The Thermography Method

Arman Ansari ¹  | Davood Akbari ^{2✉} 

1. Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
E-mail: daakbari@modares.ac.ir

Article Information:

Research Article

Received 04 Dec. 2022

Revised 28 Dec. 2022

Accepted 07 January 2023

Keywords:

Infrared Thermography,
Carbon Fibers
Composites,
Electrical Stimulation.

ABSTRACT

In this Paper, thermography inspection of carbon fiber reinforced composite parts made by two methods of vacuum infusion and manual layering has been investigated. In this method, composite materials are subjected to a direct electrical stimulation including voltage of 5 volts, current of 1.6 amps for 1-2 seconds and are heated uniformly. By means of an infrared camera, non-destructive evaluation of these parts is conducted. Since the first signs of defects in the electrical stimulation are changes in temperature, this method greatly contributes to the quality of the thermal images taken by the infrared camera and the accuracy of the test. By applying the electrical conductive stimulation directly to the samples, cracks with dimensions of 2 and 1.5 cm in the hand layup parts and cracks with dimensions of 2, 1.5 and 1 cm in parts made by vacuum infusion method were detected. Direct stimulation by means of electrical conductive makes the method more flexible in many real parts that cannot be tested with conventional methods like direct heating or flashlights.

Cite this article: Ansari, A., Akbari, D. (2023). Application of Electrical Stimulation for Inspection of Composite Materials in the Thermography Method. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (11), 2-12.
<http://doi.org/10.30494/JNDT.2022.375375.1109>

بازرسی عیب ترک در مواد مرکب تقویت شده با الیاف کربن به روش حرارت‌نگاری مادون قرمز با استفاده از تحریک الکتریکی آرمان انصاری^۱ | داود اکبری^۲ ✉

۱. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران. رایانامه: daakbari@modares.ac.ir

چکیده:

در این مقاله، بازرسی حرارت‌نگاری قطعات کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن با بافت ۲ جهته ساخته شده با دو روش خلاء و لایه‌گذاری دستی به کمک هدایت الکتریکی بررسی شده است. در این روش مواد کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن تحت پارامترهای بهینه تحریک شامل ولتاژ ۵ ولت، جریان ۱.۶ آمپر و مدت زمان اعمال جریان به مدت ۱ تا ۲ ثانیه قرار گرفته و به صورت یکنواخت گرم شده‌اند و با کمک دوربین حرارتی مادون قرمز، بازرسی انجام شد. از آنجا که اولین نشانه‌های بروز عیب در تحریک الکتریکی تغییرات دما می‌باشد این روش کمک زیادی به کیفیت تصویرهای حرارتی گرفته شده توسط دوربین مادون قرمز و دقت آزمون می‌کند. در نهایت با اعمال تحریک هدایتی الکتریکی به صورت مستقیم به نمونه‌ها، عیب ترک با ابعاد ۲ و ۱.۵ سانتی‌متر در قطعات ساخته شده با روش لایه‌گذاری دستی و ترک با ابعاد ۲، ۱.۵ و ۱ سانتی‌متر در قطعات ساخته شده با روش خلاء توسط دوربین مادون قرمز شناسایی و ثبت گردید.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۰۹/۱۳

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۱/۱۰/۰۷

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۱/۱۰/۱۷

کلیدواژگان:

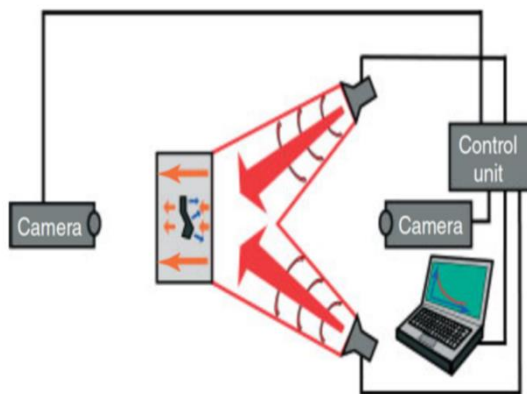
حرارت‌نگاری مادون قرمز، کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن، تحریک گرمایی الکتریکی.

استناد: انصاری، آرمان؛ اکبری، داود (۱۴۰۱). بازرسی عیب ترک در مواد مرکب تقویت شده با الیاف کربن به روش حرارت‌نگاری مادون قرمز با استفاده از تحریک الکتریکی. *مجله فناوری آزمون‌های غیرمخرب*، ۳ (۱۱)، ۱۲-۲. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2022.375375.1109>

۱- مقدمه

- حرارت‌نگاری فعال^۴
- حرارت‌نگاری غیر فعال^۵

در بسیاری از کاربردهای تصویر برداری حرارتی مادون قرمز ارزیابی به صورت غیر فعال انجام می‌شود، این بدان معنی است که دوربین صحنه را مشاهده کرده و تشعشعات گرمایی ساطع شده از اجسام را آشکار می‌کند. به دلیل اینکه تشعشعات از محیط منتشر می‌شود، دیده شدن اختلاف تابش در یک تصویر تنها زمانی میسر است که دمای سوژه با دمای محیط اختلاف داشته باشد. این روش حرارت‌نگاری با توجه به اینکه توزیع دمای موجود از میدان دید سوژه بدون دخالت جریان حرارت اضافی به آن تحلیل می‌شود غیر فعال نامیده می‌شود. متأسفانه، در اغلب موارد تفاوت دمایی طبیعی وجود ندارد یا اگر وجود دارد ممکن است به اندازه‌ی کافی قوی نبوده و اگر کسی هنوز بخواهد که نیم‌نگاهی زیر سطحی داشته باشد، یعنی بخواهد جزئیات ساختاری زیر سطح را شناسایی کند نیاز به روش حرارت‌نگاری فعال دارد. این روش بر پایه گرم کردن (و در موارد خاص سرد کردن) سطح برای تحقیق است. این فرآیند یک گرادیان غیر ثابت دما در داخل ساختار تحت آزمایش تدارک می‌بیند که بر توزیع دمایی سطح قابل مشاهده تاثیر می‌گذارد [۵]. شکل زیر نمای کلی یکی از تکنیک‌های تصویر برداری فعال را ارائه کرده است.



شکل ۱- تصویر برداری حرارتی فعال با تحریک نوری [۶]

به ترکیب ماکروسکوپی دو یا چند ماده‌ی مجزا که سطح مشترک مشخصی بین آن‌ها وجود داشته باشد، مواد مرکب^۱ گفته می‌شود. مواد مرکب در حین ساخت و یا در طول عمر مفید خود ممکن است دچار نواقصی شوند که در کارکرد سازه مشکل ایجاد کنند و خسارت‌های جبران ناپذیری به بار آورند [۱]. برای اطمینان از کارکرد صحیح سازه لازم است به آزمون غیرمخربی که قادر به تشخیص و مکان‌یابی این آسیب‌ها به‌طور دقیق و به‌موقع باشد دسترسی داشت.

حرارت‌نگاری یا به اصطلاح ترموگرافی نوعی تصویربرداری مادون قرمز^۲ است که به این نوع خاص از تصویربرداری، تصویربرداری دمایی یا گرمایی و حتی حرارتی نیز گفته می‌شود. در این روش، دوربین حرارت‌نگاری تابش مادون قرمز (فروسرخ) دارای طیف الکترومغناطیسی $9\mu\text{m}$ تا $14\mu\text{m}$ را دریافت می‌نماید و از این طیف‌ها دامنگاشت تهیه می‌کند. مطابق با قانون پلانک، تابش جسم سیاه هر جسمی که دمایی بالاتر از صفر مطلق یا صفر کلوین (K) داشته باشد از خود تشعشع مادون قرمز ساطع می‌کند [۲]. این تابش‌ها امکان دیده شدن جسم در شرایط نور مرئی و تاریکی مطلق را فراهم می‌کنند میزان پرتو مادون قرمز منتشر شده از هر جسم با تغییرات حرارتی جسم وابسته است این اصل سبب می‌شود تا تغییرات نامحسوس دمایی در تصویربرداری فروسرخ قابلیت مشاهده داشته باشد. از آزمون حرارت‌نگاری می‌توان جهت شناسایی و تشخیص نواقص^۳ مانند اتصالات الکتریکی نامناسب، شل بودن قطعات و تجهیزات، تغییرات متالورژی، بار بیش از حد، خنک‌کاری نامناسب، ولتاژ نامناسب، اتصال و رسانائی نامناسب، کثیف بودن تجهیزات، وجود آلودگی محیطی، اکسید شدن اتصالات، ظرفیت نامناسب، خوردگی و فرسایش خارجی، عدم هم‌محوری و ارتعاشات بیش از حد و بسیاری عیوب دیگر را که در نهایت باعث معیوب شدن قطعات و تجهیزات می‌گردند، استفاده نمود [۳و۴].

تقسیم بندی کلی تصویر برداری حرارتی:

- 1 Composite
- 2 Infrared Thermography
- 3 Defects

⁴ Active Thermography
⁵ Passive Thermography

کامپوزیت‌های پیشرفته ساختاری حاوی نانولوله‌های کربنی هم‌تراز با رسانای الکتریکی به‌صورت اهمی از طریق تماس‌های الکتریکی ساده گرم شده و عیب را از طریق تصویربرداری ترموگرافی که قابل مشاهده می‌باشد، گزارش کرده‌اند.

با توجه به مقاله‌های صورت گرفته در زمینه ارزیابی مواد مرکب تقویت شده با الیاف کربن به کمک حرارت‌نگاری با استفاده از تحریک الکتریکی، اغلب در مورد عیب حفره و لایه‌بندی بحث شده است و عیب ترک با دو فرآیند ساخت مختلف مورد بررسی قرار نگرفته‌است. عیب ترک یکی از عیب‌های موجود در ساختار مواد مرکب می‌باشد که در این مقاله این عیب در دو روش ساخت متفاوت مورد بررسی قرار گرفته‌شده‌است.

۲- حرارت‌نگاری با استفاده از تحریک هدایتی الکتریکی

در این روش یک ماده مرکب رسانا (تقویت شده با الیاف رسانا) تحت یک جریان الکتریکی قرار داده می‌شود تا جریان الکتریکی در تمام نقاط ماده انتقال پیدا کند. اگر در محلی از قطعه عیبی وجود داشته باشد مانع از عبور جریان الکتریکی در آن ناحیه می‌شود و در آن ناحیه تغییرات دما اتفاق می‌افتد که این تغییرات دما توسط دوربین‌های مادون قرمز قابل شناسایی و ضبط می‌باشد و براحتی می‌توان عیوب را تشخیص داد. حال با استفاده از تحریک هدایتی الکتریکی بازرسی حرارت‌نگاری روی یک مدل کامپوزیتی طراحی شده انجام می‌پذیرد. بدین صورت که ابتدا یک نمونه کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن (CFRP)^۲ را طراحی کرده و عیب ترک با ابعاد مختلف را در سطح نمونه کامپوزیتی تعبیه کرده سپس عناصر و پارامترهای مختلف را بر روی این ساختار تجزیه و تحلیل می‌شود. در این مقاله از تحریک پالس الکتریکی استفاده خواهد شد بدین صورت که تحریک را در مدت زمان کوچک‌تر یا مساوی ۱ ثانیه اعمال کرده و نتایج بدست آمده مورد بررسی قرار می‌گیرد.

پژوهش‌هایی که در زمینه شناسایی عیب ترک با استفاده از این روش، صورت گرفته است، محدود می‌باشد. از جمله پژوهش‌های انجام شده با این روش مقاله احمد و همکارانش [۷] است. آنان یک روش بالقوه با استفاده از کامپوزیت‌های پلیمری هیبریدی به وسیله‌ی حرارت‌نگاری مادون قرمز برای ارزیابی غیرمخرب پیشرفته از مواد کامپوزیتی پلیمری ارائه داده‌اند. در این روش از لایه‌های انتشار گرما برای حرارت‌نگاری^۱ استفاده کرده‌اند. بدین صورت که یک لایه انتشار گرما (HEL) برای انرژی تلف شده در بین ساختار کامپوزیتی جاسازی کرده و بعد از فعالسازی این لایه توسط جریان الکتریکی اعمالی، می‌توانند دمای سطح را به وسیله‌ی یک آشکار ساز مادون قرمز ضبط کنند.

از دیگر پژوهش‌های انجام شده در این زمینه، مقاله آنیتا و همکارانش [۸] است. آنان یک ساختار کامپوزیتی مجهز به یک مدار الکتریکی طراحی شده ویژه با شبکه سه‌بعدی که عناصری با مقاومت ویژه بالا در آن تعبیه شده فرض کرده‌اند. همچنین با طرح خاصی از مدار الکتریکی فعال شده توسط جریان‌های کوچک، منابع پراکنده ای از رشته‌های حرارتی در ورق تعبیه کرده‌اند. فرض آنان بر این است که المان‌های جریان، عیوب و شکست‌ها را نشان می‌دهند و این شکست‌ها در مدار الکتریکی باعث تغییر در رشته حرارتی می‌شوند که توسط یک دوربین حرارتی موج بلند مشاهده می‌شوند.

از دیگر پژوهش‌های صورت گرفته در این رابطه، مقاله گرماتیکوس و همکاران [۹] است. آنان یک روش ارزیابی غیرمخرب مبتکرانه برای حرارت‌نگاری مواد تحریک شده با جریان الکتریکی و همچنین کارایی روش حرارت‌نگاری فاز پالس را برای لایه‌های کامپوزیتی تقویت شده با نانوتیوب‌های کربنی آسیب دیده تحت ضربه با سرعت کم را که در معرض سطوح مختلف انرژی قرار دارند، ارائه داده‌اند. در مقاله‌ی دیگر پینتو و همکارانش [۱۰] به تجزیه و تحلیل یک تکنیک جدید برای نظارت بر سلامت ساختار بر پایه گنجاندن یک شبکه گرمازا الکتریکی در بین لایه‌های ساختار کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن پرداخته‌اند.

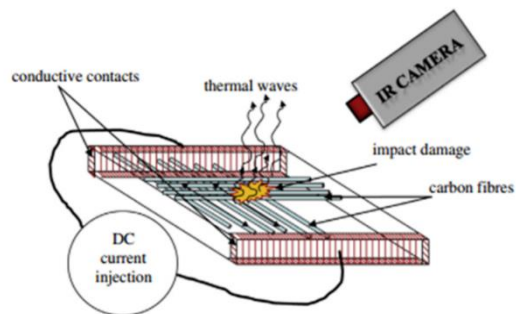
از دیگر مقاله‌های انجام شده، مقاله روبرتو و همکاران [۱۱] بوده است که یک رویکرد جدید که در آن

^۲ Carbon fiber reinforced polymers

^۱ HELTHY



شکل ۲- رزین و هاردنر مورد استفاده در ساخت نمونه‌ها



شکل ۱- پیکربندی تنظیمات آزمایشی جریان اعمالی در روش تحریک الکتریکی [۹]

۳- مواد و روش مقاله

۳-۱ ساخت نمونه

در این مقاله، نمونه‌های کامپوزیتی مورد نظر به دو روش لایه‌گذاری دستی^۱ و لایه‌گذاری تزریقی کیسه خلاء^۲ ساخته شده‌اند که در ادامه توضیحات مربوط به هر روش شرح داده شده‌است.

روش لایه‌گذاری دستی (HLP):

برای ساخت نمونه‌ها با این روش از الیاف کربن دو جهته و رزین و هاردنر ۲۰۹ استفاده شد شکل (۳). بدین صورت که ابتدا قالب مورد نظر با گریس برای جدا سازی راحت تر قطعه آغشته شد. سپس یک لایه الیاف کربن با ابعاد ۱۰×۱۵ سانتی‌متر روی قالب قرار داده‌شد و در ادامه تمام سطح الیاف با مخلوط رزین و هاردنر توسط یک غلتک آغشته شد و دوباره یک لایه الیاف کربن قرار داده شد و همین روند برای ۸ لایه الیاف کربن صورت گرفت. بعد از اتمام کار قطعه در دمای محیط پخته شد. لازم به ذکر است قطعه نهایی چون با پخت کردن در دمای محیط احتمال دارد که ۱۰ الی ۲۰ درصد ساختار در این روش تشکیل نشود و هم‌چنین تمام نمونه یکسان ساخته نشود عملیات بعد از پخت در کوره با دمای ۵۰ درجه سانتی‌گراد صورت گرفت. در نهایت قطعه به ۶ نمونه با ابعاد ۵×۵ سانتی‌متر با واترجت برش داده شد.



شکل ۳- ساخت نمونه به روش لایه‌گذاری دستی

روش لایه‌گذاری تزریقی کیسه خلاء (وکیوم اینفیوژن) (VIP):

برای ساخت نمونه‌ها با این روش ابتدا ۱۲ لایه الیاف کربن دو جهته با ابعاد ۱۰×۱۵ سانتی‌متر برش داده‌شد. سپس قطعه مورد نظر با لایه‌گذاری صورت گرفته بصورت خشک درون کیسه قرار داده‌شد و وکیوم صورت گرفت که در شکل (۵) می‌توان مشاهده نمود. در این روش نیز از رزین و هاردنر ۲۰۹ استفاده شد و در نهایت به کمک فشار ایجاد شده توسط وکیوم مخلوط رزین و هاردنر درون کیسه و در بین لایه‌ها تزریق شد. در نهایت قطعه به ۶ نمونه با ابعاد ۵×۵ سانتی‌متر با واترجت برش داده‌شد.

¹ Hand Lay Up (HLP)

² Vacuum Infusion Processing (VIP)

ا: جریان الکتریکی بر واحد آمپر

t: زمان بر واحد ثانیه

لذا براساس این رابطه ساده می‌توان پارامترهای ورودی را برای ایجاد حرارت کنترل شده به قطعات تنظیم کرد.

۳-۳ نحوه اعمال جریان الکتریکی

به منظور اعمال جریان الکتریکی از یک منبع تغذیه DC 160 آمپر و ۳۰ ولت استفاده شده است که در شکل (۶) نشان داده شده است. از مهم‌ترین پارامترها در این روش بازرسی پیدا کردن ولتاژ، جریان و مدت زمان مناسب برای گرم کردن نمونه می‌باشد. بدین صورت که نمونه باید سریعاً و با اعمال جریان در کوتاه‌ترین زمان ممکن به طور یکنواخت گرم شود. هر چه شدت جریان اعمالی و مدت زمان جریان اعمالی بیشتر باشد قطعه بیش از حد گرم شده و تشخیص نقص دشوارتر می‌شود. بنابراین با بررسی‌های صورت گرفته جریان ۱.۶ آمپر، ولتاژ ۵ ولت و مدت زمان اعمال جریان ≤ 1 ثانیه به عنوان متناسب‌ترین پارامترهای جریان انتخاب شد. در برخی نمونه‌ها، جریان ۳.۲ آمپر و ولتاژ ۱۰ ولت و مدت زمان ۲ ثانیه نیز مورد استفاده واقع شده است.



شکل ۵- منبع تغذیه بکار گرفته شده برای اعمال جریان الکتریکی

همانطور که در شکل (۷) مشاهده می‌شود، بهترین روش برای اعمال جریان به نمونه‌ها اتصال مستقیم جریان به قطعه می‌باشد. دلیل انتخاب این روش مدت زمان اعمال جریان می‌باشد زیرا که از این طریق می‌توان با تحریک الکتریکی به مدت کوچک‌تر مساوی ۱ ثانیه نمونه‌ها را گرم کرد.



شکل ۴- ساخت نمونه به روش وکیوم اینفیوژن

۳-۲ تبدیل جریان الکتریکی به گرما

هنگامی که جریان الکتریکی از طریق یک هادی جریان می‌یابد، انرژی گرما در هادی ایجاد می‌شود. اثر گرمایشی یک جریان الکتریکی به ۳ عامل بستگی دارد:

مقاومت (R): هر چه مقاومت بالاتر باشد گرمای بیشتری تولید می‌کند.
زمان (t): هر چه مدت زمان اعمال جریان بیشتر باشد، گرمای بیشتری تولید می‌شود.
جریان (I): هر چه شدت جریان بیشتر باشد، میزان گرمای تولید شده بیشتر است.

از این رو اثر گرمایشی توسط یک جریان الکتریکی تولید می‌شود که بر حسب ژول می‌باشد.

میزان تبدیل انرژی الکتریکی به گرمایی از طریق رابطه ساده زیر قابل محاسبه است:

انرژی الکتریکی = توان الکتریکی × زمان.

$$\begin{aligned} Q &= P \times t \\ Q &= I^2 R t \\ P &= VI \\ P &= RI^2 \\ P &= V^2 / R \end{aligned} \quad (1)$$

P: توان بر واحد وات

R: مقاومت بر واحد اهم

۵ × ۵ سانتی‌متر و ضخامت ۲.۸ میلی‌متر می‌باشند. جریان اعمالی به این نمونه‌ها بصورت اتصال مستقیم بوده و شامل جریان ۱.۶ و ۳.۲ آمپر، ولتاژ ۵ و ۱۰ ولت و مدت زمان جریان اعمالی ۱ و ۲ ثانیه می‌باشد. در جدول ۱ مشخصات مربوط به هر یک از نمونه‌ها و در ادامه تصاویر حرارتی ضبط شده توسط دوربین حرارت‌نگاری مادون قرمز آورده شده‌است.

جدول ۱- مشخصات مربوط به نمونه‌های الیاف کربن ۲ جهته با روش ساخت لایه گذاری دستی

شماره نمونه	شماره	جریان (A)	ولتاژ (V)	زمان جریانی اعمالی (s)	نوع نقص	شماره دمانگاشت
۱	۱.۶	۵	۱	۲	ترک ۲ سانتی‌متر	a
۲	۱.۶	۵	۱	۱.۵	ترک ۱.۵ سانتی‌متر	b
۳	۱.۶	۵	۲	۱	ترک ۱ سانتی‌متر	c
۴	۱.۶	۱۰	۲	۱	ترک ۱ سانتی‌متر	d
۵	۳.۲	۵	۱	۱	ترک ۱ سانتی‌متر	e
۶	۳.۲	۱۰	۱	۱	ترک ۱ سانتی‌متر	f

در ادامه توضیحات مربوط به هر کدام از تصاویر حرارتی گرفته شده و شناسایی و عدم شناسایی نواقص مربوطه مورد بحث قرار گرفته است.

نمونه ۱: با توجه به تصویر حرارتی گرفته شده از این نمونه با اعمال جریان الکتریکی با ولتاژ ۵ ولت، جریان ۱.۶ آمپر و به مدت ۱ ثانیه نمونه به خوبی گرم شده و جریان در تمام نقاط نمونه بدون اینکه قطعه بیش از حد گرم و تشخیص نقص با مشکل مواجه شود پخش شده‌است. در این نمونه که دارای نقص ترک با طول ۲ سانتی‌متر می‌باشد نقص به خوبی توسط دوربین شناسایی و ثبت شده که در شکل (۹) می‌توان همراه با گراف تغییرات دما در ناحیه عیب مشاهده نمود. در تمامی تصاویر حرارتی، ناپیوستگی جزئی قابل مشاهده در مرکز تصویر نشان دهنده موقعیت ترک است که در برخی موارد به خوبی و در برخی با شدت



شکل ۶- اعمال جریان الکتریکی به صورت مستقیم به نمونه

۳-۴ تجهیزات مورد استفاده در ارزیابی حرارت‌نگاری

برای ثبت دمای سطح نمونه، دوربین حرارتی FLUKE TIS75 با رزولوشن ۲۴۰ × ۳۲۰ پیکسل مورد استفاده قرار گرفت و همچنین از یک اتاق تاریک برای قرار دادن نمونه در آن و پایه نگهدارنده برای نگه‌داشتن نمونه استفاده شد که در شکل (۸) آورده شده‌است.



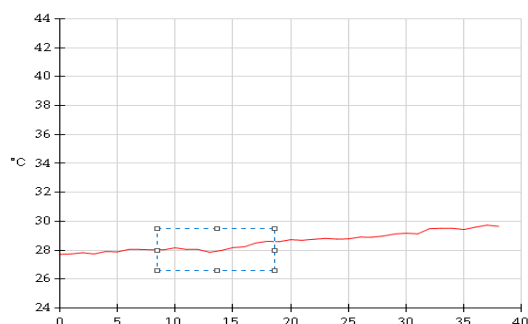
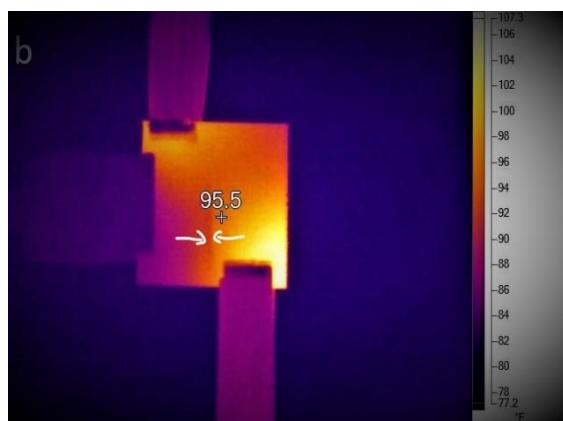
شکل ۷- تجهیزات مورد استفاده در ارزیابی حرارت‌نگاری

۴- نتایج

در این بخش ارزیابی حرارت‌نگاری فروسرخ به کمک جریان هدایتی الکتریکی برای تشخیص عیب ترک بیان شده‌است. در ادامه دمانگاشت‌های مربوط به هر نمونه و پارامترهای مربوط به هر ارزیابی بصورت جداگانه توضیح داده شده‌است.

۴-۱ نتایج ارزیابی نمونه‌های الیاف کربن ساخته شده به روش لایه‌گذاری دستی

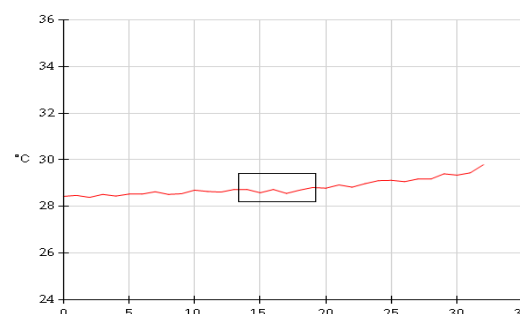
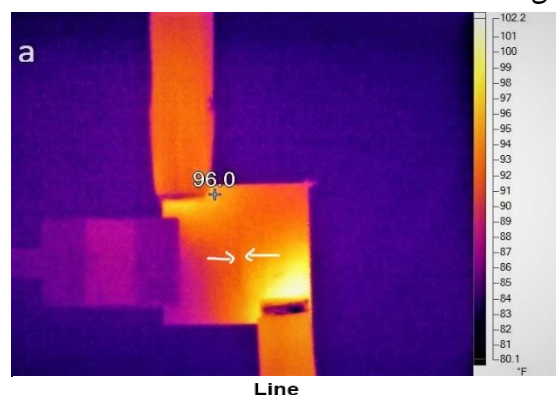
این نمونه‌ها شامل ۸ لایه الیاف کربن دو جهته و با ابعاد



شکل ۹- تصویر و گراف حرارتی نمونه ۲ دارای نقص ترک با طول ۱.۵ سانتی متر

در این نمونه که دارای نقص ترک با طول ۱.۵ سانتی‌متر می‌باشد نقص توسط دوربین قابل شناسایی نبود و تشخیص داده نشد. در ارزیابی نمونه ۴ پارامترهای منبع تغذیه را تغییر داده و از ولتاژ ۱۰ ولت و جریان ۱.۶ آمپر استفاده شد که همچنان ترک ۱.۵ سانتی‌متری قابل شناسایی نبود. همچنین در ارزیابی نمونه ۵ پارامترهای منبع تغذیه را تغییر داده و ولتاژ ۵ ولت و جریان ۳.۲ آمپر و مدت زمان جریان ۲ و ۱ ثانیه بکار گرفته شد که همچنان ترک ۱.۵ سانتی‌متری قابل تشخیص نبود. همچنین در ارزیابی نمونه ۶ پارامترهای منبع تغذیه را تغییر داده و ولتاژ ۱۰ ولت و جریان ۳.۲ آمپر و مدت زمان جریان ۱ و ۲ ثانیه بکار گرفته شد که همچنان ترک ۱.۵ سانتی‌متری قابل تشخیص نبود. تصاویر حرارتی مربوط به این ۴ نمونه را در شکل (۱۱) می‌توان مشاهده نمود.

کمتری قابل مشاهده است. برای مشاهده بهتر، در برخی موارد که ترک مشاهده شده است، موقعیت آن با فلشهایی نشان داده شده است.



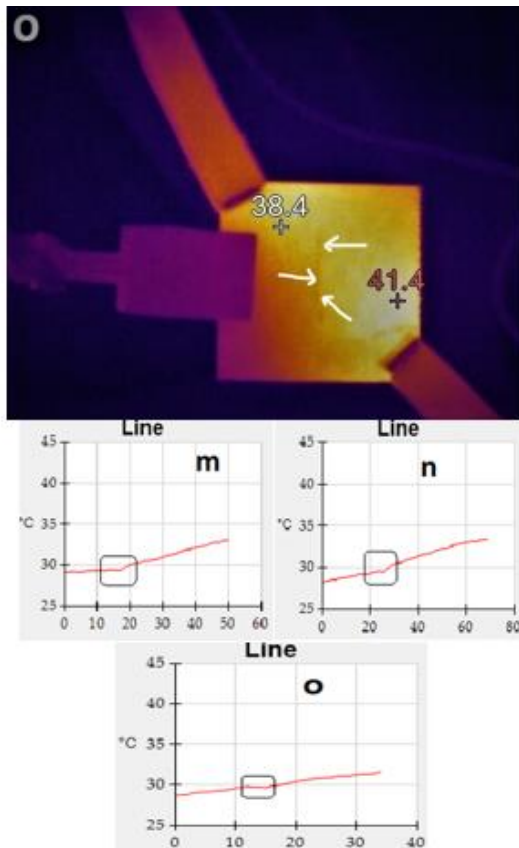
شکل ۸- تصویر و گراف حرارتی نمونه ۱ دارای نقص ترک با طول ۲ سانتی متر

نمونه ۲: با توجه به تصویر حرارتی گرفته شده از این نمونه با اعمال جریان الکتریکی با ولتاژ ۵ ولت، جریان ۱.۶ آمپر و به مدت ۱ ثانیه نمونه به خوبی گرم شده و جریان در تمام نقاط نمونه بدون اینکه قطعه بیش از حد گرم و تشخیص نقص با مشکل مواجه شود پخش شده است. در این نمونه که دارای نقص ترک با طول ۱.۵ سانتی‌متر می‌باشد نقص به خوبی توسط دوربین شناسایی و ثبت شده که در شکل (۱۰) می‌توان همراه با گراف تغییرات دما در ناحیه عیب مشاهده نمود.

نمونه ۳ و ۴ و ۵ و ۶: با توجه به تصویر حرارتی گرفته شده از نمونه ۳ با اعمال جریان الکتریکی با ولتاژ ۵ ولت، جریان ۱.۶ آمپر و به مدت ۱ ثانیه نمونه به خوبی گرم شده و جریان در تمام نقاط نمونه بدون اینکه قطعه بیش از حد گرم و تشخیص نقص با مشکل مواجه شود پخش شده است.

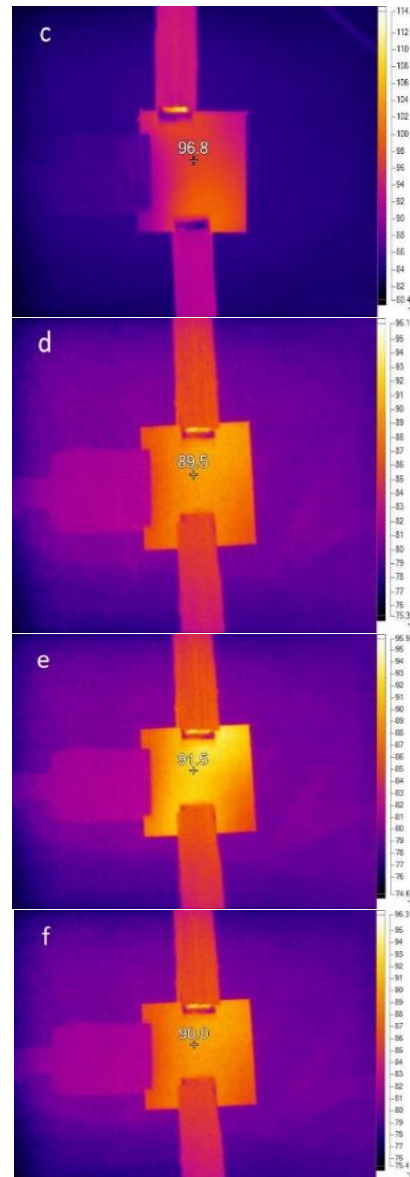
جدول ۲- مشخصات مربوط به نمونه‌های الیاف کربن ۲ جهته با روش ساخت و کیوم اینفیوژن

شماره تصویر حرارت نگار	ابعاد نقص	نوع نقص	نمونه
m	۲ سانتی‌متر	ترک	۱
n	۱.۵ سانتی‌متر	ترک	۲
o	۱ سانتی‌متر	ترک	۳
p	۰.۵ سانتی‌متر	ترک	۴



شکل ۱۱- تصاویر و گراف های حرارتی نمونه (ا و ۲ و ۳ دارای نقص ترک با طول ۲ و ۱.۵ سانتی متر

نمونه ۴: با توجه به تصویر حرارتی گرفته شده از نمونه ۴ و اعمال جریان الکتریکی با مشخصه‌های گفته شده در بالا، نمونه به خوبی گرم شده و جریان در تمام نقاط نمونه بدون اینکه قطعه بیش از حد گرم و تشخیص نقص با مشکل مواجه شود پخش شده‌است. در این نمونه که دارای نقص ترک با طول ۰.۵ سانتی‌متر می‌باشد نقص توسط دوربین قابل شناسایی نبود و تشخیص داده نشد. در شکل (۱۳) می‌توان تصویر حرارتی ثبت شده از این نمونه را مشاهده نمود.



شکل ۱۰- نمونه ۳ و ۴ و ۵ و ۶ با ترک ۱ سانتی متر

۲-۴ نتایج ارزیابی نمونه‌های الیاف کربن ساخته شده به روش و کیوم اینفیوژن

این نمونه‌ها شامل ۱۲ لایه الیاف کربن دو جهته و با ابعاد ۵ × ۵ سانتی‌متر و ضخامت ۳ میلی‌متر می‌باشند. جریان اعمالی به این نمونه‌ها بصورت اتصال مستقیم بوده و شامل جریان ۱.۶ آمپر، ولتاژ ۵ ولت و مدت زمان جریان اعمالی ۱ ثانیه می‌باشد. در جدول ۲ مشخصات مربوط به هر یک از نمونه‌ها و در ادامه تصاویر حرارتی ضبط شده توسط دوربین حرارت‌نگاری مادون قرمز آورده شده‌است.

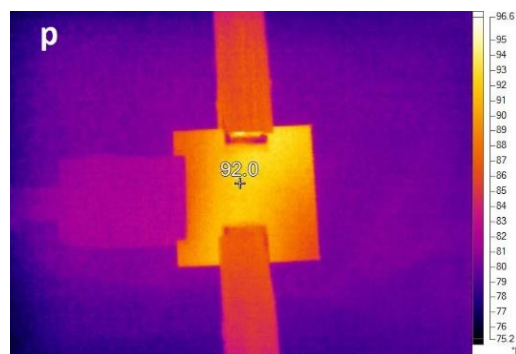
موثر در شناسایی ترک زیر سطحی در نمونه‌های کامپوزیتی محسوب کرد.

۶- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

۷- منابع

- [1] NDT booklet written by IKIU: Imam Khomeini International University (In Persian).
- [2] D. Akbari, M. Farahani, An introduction to Non Destructive Testings, pp. 1-100: Tehran, 2017 (in persian).
- [3] Prakash, Raghu, ed. Infrared thermography. BoD-Books on Demand, Intech Open Publication, 2012.
- [4] Maldague, X. P. V., et al. "Chapter 2: Fundamentals of Infrared and Thermal Testing: Part 1. Principles of Infrared and Thermal Testing." *Nondestructive handbook, infrared and thermal testing 3* (2001): 718.
- [5] X. Maldague, H. Streckert, and M. Trimm, "Introduction to infrared and thermal testing: Part 1. Nondestructive testing," *Nondestructive Handbook, Infrared and Thermal Testing*, vol. 3, 2001.
- [6] C. Boller, W. Staszewski, and G. R. Tomlinson, *Health Monitoring of Aerospace Structures: Smart Sensor Technologies and Signal Processing*: J. Wiley, 2004.
- [7] Ahmed, Tahira, et al. "Heat Emitting Layers as an aid for Enhancing NDE of Aircraft Composite Structures." 49th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference, 16th AIAA/ASME/AHS Adaptive Structures Conference, 10th AIAA Non-Deterministic Approaches Conference, 9th AIAA Gossamer Spacecraft Forum, 4th AIAA Multidisciplinary Design Optimization Specialists Conference. 2008.
- [8] Orłowska, Anita, Przemysław Kołakowski, and Jan Holnicki-Szulc. "Detecting delamination zones in composites by embedded electrical grid and thermographic methods." *Smart Materials and Structures* 20.10 (2011): 105009.
- [9] Grammatikos, S. A., et al. "Current injection phase thermography for low-velocity impact damage identification in composite laminates." *Materials & Design* 55 (2014): 429-441.
- [10] Pinto, F., F. Y. Maroun, and M. Meo. "Material enabled thermography." *NDT & E International* 67 (2014): 1-9.
- [11] De Villoria, Roberto Guzman, et al. "Multi-



شکل ۱۲- نمونه ۴ دارای نقص ترک با طول ۰.۵ سانتی متر

۵- نتیجه‌گیری

یکی از عیب‌های رایج در مواد مرکب، ترک زیر سطحی می‌باشد که به دلایل مختلف در قطعات بوجود می‌آید. برای شناسایی عیب ترک با ابعاد مختلف به کمک روش حرارت‌نگاری مادون قرمز با کمک هدایت الکتریکی با مشخصات بهینه جریان ۱.۶ آمپر، ولتاژ ۵ ولت و زمان اعمال جریان ۱ ثانیه، یک سری نمونه کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن را با دو فرآیند مختلف HLP و VIP ساخته شد. در نمونه‌های ساخته شده به روش HLP از ۸ لایه الیاف کربن با بافت ۲ جهته و در روش VIP از ۱۲ لایه الیاف کربن استفاده شد که این نمونه‌ها در نهایت توسط واترجت به ابعاد ۵×۵ سانتی‌متر مربع برش داده شدند. در نمونه‌های ساخته شده به روش HLP ترک‌هایی با ابعاد ۰.۲، ۱.۵ و ۱ سانتی‌متر تعبیه شد که فقط ابعاد ۰.۲ و ۱.۵ سانتی‌متر توسط دوربین قابل مشاهده بود و ترک با طول ۱ سانتی‌متر با وجود تغییرات ایجاد شده در پارامترهای جریان ورودی قابل مشاهده نبود. اما در نمونه‌های ساخته شده به روش VIP بدلیل کیفیت بالاتر فرآیند، فشردگی بیشتر لایه و عدم وجود لایه هوا بین ساختار نمونه، ترک‌های زیر سطحی با طول ۱ سانتی‌متر نیز توسط دوربین قابل مشاهده بود. در نمونه‌های VIP ترک‌های ایجاد شده دارای ابعاد ۰.۲، ۱.۵، ۱ و ۰.۵ سانتی‌متر می‌باشند. که بجز ترک با طول ۰.۵ سانتی‌متر بقیه ترک‌های توسط دوربین قابل مشاهده بود. در نهایت با استناد به نتایج بدست آمده از این مقاله و با توجه به نتایج بدست آمده از تحقیقات قبلی که اغلب عیوب بین لایه‌ای و حفره مورد بررسی قرار گرفته و عیب ترک قابل تشخیص و شناسایی نبوده، روش غیرمخرب حرارت‌نگاری مادون قرمز به کمک هدایت الکتریکی را می‌توان، یک روش

physics damage sensing in nano-engineered structural composites." *Nanotechnology* 22.18 (2011): 185502.