

## به‌کارگیری دمانگاری فعال به‌منظور ارزیابی غیرمخرب عیوب مختلف در ورق پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن با هندسه تخت و منحنی

امجد سازگار<sup>۱\*</sup>، مرتضی امیری<sup>۲</sup>

۱. پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۱۳۶۵-۸۴۸۶، تهران-ایران

۲. سازمان انرژی اتمی ایران، صندوق پستی: ۱۳۳۹-۱۴۱۵۵، تهران-ایران

\*Email: asazgar@aeoi.org.ir

مقاله‌ی پژوهشی

تاریخ دریافت مقاله: ۹۹/۸/۲۴ تاریخ پذیرش مقاله: ۴۰۰/۴/۲۷

### چکیده

استفاده از پلیمرهای تقویت‌شده با استفاده از الیاف امروزه در صنایع مختلف به امری پرکاربرد و بهینه تبدیل شده است. پلیمرهای تقویت‌شده با استفاده از الیاف کربن (CFRP) به‌طور وسیعی در صنایع هوافضا، هسته‌ای، انرژی‌های تجدیدپذیر، معماری و صنایع دریایی استفاده می‌شود. پیچیدگی فرایند ساخت این قطعات، همواره با شکل‌گیری و ایجاد انواع مختلف عیوب ساختی در آن‌ها همراه می‌باشد. وجود ساختار غیرهمگن در این قطعات، استفاده از روش‌های کلاسیک در بازرسی آن‌ها را با محدودیت‌های متعددی روبه‌رو کرده است. استفاده از روش دمانگاری فعال با استفاده از امواج فرسرخ، امروزه به‌عنوان یکی از روش‌های مطرح در بازرسی کامپوزیت‌ها به‌کار گرفته می‌شود. در این مقاله، با استفاده از تکنیک پالسی، یک نمونه ورق تخت و یک نمونه ورق انحنا دار پلیمری تقویت‌شده با استفاده از الیاف کربن تحت آزمون قرار گرفته‌اند. عیوبی مشخص از چند نوع مختلف، با ابعاد مختلف به‌صورت دستی در این قطعات ایجاد شده و بازرسی با استفاده از روش دمانگاری برای شناسایی این عیوب انجام شد. بررسی‌های انجام شده نشان داد که استفاده از تحریک حرارتی تابشی با تکنیک عبوری می‌تواند به‌خوبی عیوب داخلی نمونه‌ها را آشکار کند. وجود رسانایی حرارتی متفاوت عیوب فلزی سوزنی شکل با قطر ۰.۲ mm، ذرات خارجی به قطر ۲ mm و جدایش صفحه‌ای با ابعاد  $10 \times 10 \text{ mm}^2$ ، منجر به آشکار شدن این عیوب در نمونه‌های تخت و منحنی شد.

**کلیدواژه‌ها:** آزمون غیرمخرب، کامپوزیت، دمانگاری، پلیمر تقویت‌شده با فیبر کربن

## Employment of active thermography for nondestructive evaluation of different defect types in carbon fiber reinforced polymer composite panels with flat and curved geometry

A. Sazgar<sup>\*1</sup>, M. Amiri<sup>2</sup>

1. Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOL, P.O.Box: 11365-8486, Tehran-Iran

2. AEOL, P.O.Box: 14155-1339, Tehran-Iran

Research Article

Received 14.11.2020, Accepted 18.7.2021

### Abstract

Recently, the use of fiber-reinforced polymers has become widely used in various industries. Carbon fiber reinforced polymers (CFRP) are commonly used in the aerospace, nuclear, renewable energy, architecture, and marine industries. The complexity of the manufacturing process of these parts is always associated with the formation of various types of manufacturing defects. The existence of non-homogeneous structures in these parts has faced several limitations using classical NDT methods in the inspection process. The active thermography method using infrared waves is today considered one of the proposed methods in the inspection of composites. In the present work, samples with flat sheet geometry and curve sheet geometry of carbon fiber-reinforced polymer were tested using a pulse technique. Several different types of defects with different dimensions were manually created in these parts, and inspection was performed using the thermography method. The results have shown that the use of radiant thermal stimulation with the transmission technique can reveal the samples' internal defects. The presence of different thermal conductivity of needle-shaped metal defects with 0.2 mm diameter, foreign particles with 2 mm diameter, and  $10 \times 10 \text{ mm}^2$  delamination led to the appearance of these defects in flat and curved samples.

**Keywords:** Non-destructive test, Composite, Thermography, Carbon fiber reinforced polymer



## ۱. مقدمه

عددی و هم به صورت عملی انجام شد. نمونه‌های مورد آزمایش از جنس فولاد و پلی‌استر بودند. این پژوهش‌گران موفق شدند امکان‌پذیری دمانگاری را برای شناسایی عیوب داخل مواد و هندسه آن‌ها اثبات کنند. از آن زمان تا به امروز، پژوهش‌های متعددی در این زمینه انجام شده است [۵]. در این پژوهش با استفاده از روش دمانگاری فرسوخ، موقعیت و اندازه ناحیه خرابی در نمونه‌های ورق تخت و انحنا دار از جنس کربن/اپوکسی دارای عیب‌های مختلف بررسی شده است. به کارگیری تکنیک دمانگاری برای شناسایی هم‌زمان سه نوع عیوب از نوع ذرات خارجی با رسانایی بالاتر از نمونه، ذرات خارجی با رسانایی پایین‌تر از نمونه و وجود جدایش بین لایه‌های نوآوری این کار به‌شمار می‌رود. استفاده از سیستم تحریک حرارتی هالوژنی با پالس زمانی کنترل‌شده در تکنیک دمانگاری عبوری در این پژوهش، نوآوری در جهت کاهش زمان انجام بازرسی است.

## ۲. اصول تئوری آزمون غیرمخرب دمانگاری

امروزه روش بازرسی غیرمخرب دمانگاری، که به نام روش دمانگاری نیز شناخته می‌شود، به‌عنوان یکی از روش‌های بسیار پرکاربرد در صنایع مختلف به کار می‌رود. بازرسی غیرمخرب مواد با سیستم عکس‌برداری فرسوخ یا دمانگاری اساساً شامل بررسی دمای سطحی جسم (تحت آزمایش) و بررسی تغییرات دمایی سطح آن در فاز حرارتی و بروندی گذرا می‌شود. تجزیه و تحلیل‌ها به نسبت آخرین مورد در رسانش گرمایی در جامدات نمایش داده می‌شوند. وجود یک ناهمگونی درون یک ماده در انتشار گرما تأثیر گذاشته و موجب تغییرات دمایی یک ناحیه از سطح می‌شود.

یک سیستم دمانگاری اساساً شامل یک دوربین و یک پردازنده است که با توجه به نوع ساختار دوربین، ممکن است داخل خود آن قرار گیرد. البته مرکز دوربین دارای یک شناساگر فرسوخ است که انرژی فرسوخ گسیل شده توسط جسم را دریافت می‌کند (دمای سطح اندازه‌گیری می‌شود). در واقع هر سطحی که در دمای بالای صفر مطلق باشد، انرژی گرمایی گسیل می‌کند. این انرژی توسط حسگر فرسوخ دریافت می‌شود و به یک سیگنال الکترونیکی ویدیویی و سرانجام به یک نقشه دمایی تبدیل می‌شود. در واقع هر سطح انرژی (دما) توسط یک رنگ نمایش داده می‌شود و در انتها نقشه‌ای به نام گرمانگاره یا عکس گرمایی به دست می‌آید. طرح‌واره فرایند بازرسی به روش دمانگاری در شکل ۱ نمایش داده شده است [۶].

امروزه پلیمرهای تقویت‌شده با الیافی نظیر شیشه<sup>۱</sup> و کربن<sup>۲</sup> به دلیل دارا بودن مزایای بسیار مانند پایین‌بودن هزینه، وزن سبک، نسبت استحکام به وزن بالا و نسبت سفتی به وزن بالا، کاربردهای وسیعی پیدا کرده‌اند. رخداد ضعف‌هایی نظیر ناپیوستگی بین‌لایه‌ای، تخلخل تصادفی و وجود مواد نامطلوب در بین لایه‌های کامپوزیت‌ها امری اجتناب‌ناپذیر است. در همین راستا طی سال‌های اخیر، به‌منظور بهبود کیفی و افزایش قابلیت عملکردی این قطعات کامپوزیتی، استفاده از آزمون‌های غیرمخرب بر روی آن‌ها به‌منظور شناسایی و مشاهده عیوب مورد توجه زیادی قرار گرفته است [۱].

روش‌های آزمون غیرمخرب متعددی برای بازرسی کامپوزیت‌ها وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به آزمون‌های امواج فراصوت<sup>۳</sup>، بازرسی گسیل صوتی<sup>۴</sup>، بازرسی با شبکه فیبر نوری براگ<sup>۵</sup>، بازرسی با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی<sup>۶</sup> یا شدت جریان القایی<sup>۷</sup>، بازرسی با استفاده از امواج مایکروویو، اشعه ایکس، تداخل‌سنجی برشی<sup>۸</sup>، برشنگاری<sup>۹</sup> و دمانگاری فرسوخ اشاره نمود [۲]. روش مناسب آزمون غیرمخرب نه تنها باید موقعیت ناپیوستگی یا عیب را مشخص نماید؛ بلکه، می‌بایست برای تعیین مشخصات عیب از جمله شکل، اندازه و جهت قرارگیری آن نیز قابل استفاده باشد. در بین روش‌های موجود، استفاده از سیستم غیرتماسی دمانگاری فرسوخ برای عیب‌یابی کامپوزیت‌ها به دلیل مزایای منحصربه‌فرد این روش مورد توجه فراوانی قرار گرفته است. از جمله این مزایا می‌توان به سرعت بالای بازرسی، تماس نداشتن ابزار حرارتی با نمونه مورد بازرسی، ایمنی از لحاظ فقدان پرتوهای مضر، آسانی روش و ساده‌بودن تصویر و محدوده وسیع کاربرد اشاره کرد. البته این روش دارای محدودیت‌هایی نیز می‌باشد که مهم‌ترین آن‌ها محدودیت در اعمال سریع مقدار بالای انرژی به‌صورت یکنواخت بر روی سطح نمونه، تأثیر تلفات حرارتی و هزینه بالای تجهیزات می‌باشد [۲].

برای اولین بار دمانگاری برای انجام آزمون غیرمخرب توسط کارلومگنو و براردی استفاده شد [۴]. آن‌ها تغییرات دمای سطح را در طول زمان بررسی کردند. آزمایش آن‌ها هم به‌صورت

1. Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP)
2. Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP)
3. Ultrasonic Testing (UT)
4. Acoustic Emission (AE)
5. Fiber Bragg Grating (FBG)
6. Electrical Resistivity Measurement (ERM)
7. Eddy Current (ET)
8. Speckle Shearing Interferometry
9. Shearography



سیاه در دما و طول موج یکسان را گسیل می‌کند. با توجه به این کمیت، رابطه زیر حاصل می‌شود:

$$\varepsilon_{\lambda} = \frac{E_{\lambda}}{E_{\lambda b}} \quad (۴)$$

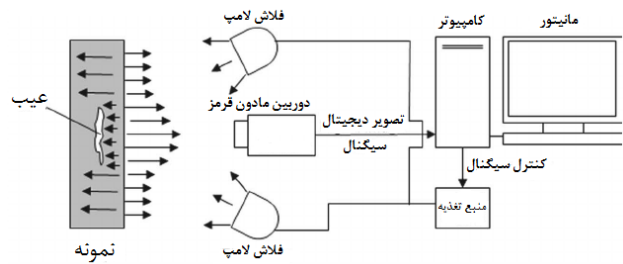
که این مشخصه ضریب صدور نامیده می‌شود. فناوری فروسرخ بر این اصل استوار است که همه اجسام از خود انرژی گسیل می‌کنند.

بازرسی به روش دمانگاری به دو روش بازرسی فعال و غیرفعال تقسیم می‌شود [۸]. در بازرسی دمانگاری فعال، تحریک حرارتی جسم برعهده کاربر است و کاربر با ایجاد یک گرادیان دمایی بین جسم و محیط و ایجاد حالت انتقال حرارت گذار بین این دو، نحوه پاسخ جسم را به این شرایط بررسی می‌کند. در بازرسی دمانگاری غیرفعال به دلیل شرایط کاری جسم، این گرادیان دمایی به‌طور طبیعی وجود دارد و کاربر تنها به دریافت تابش‌های فروسرخ و تحلیل آن‌ها اکتفا می‌کند [۹].

انواع معمولی دمانگاری فعال عبارتند از دمانگاری پالسی<sup>۱</sup>، دمانگاری پله‌ای<sup>۲</sup> [۱۰]، دمانگاری لاک-این<sup>۳</sup> یا دمانگاری مدوله‌شده<sup>۴</sup> [۱۱]، دمانگاری فازی-پالسی<sup>۵</sup> [۱۲، ۱۳] و دمانگاری فرکانس مدولاسیون‌شده<sup>۶</sup> [۱۴، ۱۵]. روش استفاده شده در این پژوهش روش دمانگاری پالسی می‌باشد که در ادامه در خصوص اصول این روش توضیحاتی ارائه شده است.

## ۱.۲ دمانگاری پالسی

در دمانگاری پالسی، از یک پالس حرارتی برای بررسی مواد بهره گرفته می‌شود. در این روش با استفاده از یک پالس انرژی کوتاه‌مدت، نمونه تحریک می‌شود و هم‌زمان اندازه‌گیری دما برحسب زمان با استفاده از یک دوربین فروسرخ، همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، انجام می‌گیرد. تصویربرداری مطابق با خط‌چین در شکل ۲، تا مدت‌زمانی پس از اعمال تحریک حرارتی انجام می‌گیرد تا امکان مشاهده نقایص زیرسطحی توسط این روش فراهم شود [۱۶]. تعیین مدت زمان پالس تحریک و مدت زمان تصویربرداری دو کمیتی هستند که متناسب با جنس و کیفیت سطح قطعه کار و توان منبع تحریک حرارتی به‌صورت تجربی در فرایند بازرسی تعیین می‌گردند.



شکل ۱. طرح‌واره فرایند بازرسی به روش دمانگاری.

مقدار انرژی گسیل شده نه‌تنها به دمای جسم، بلکه به ضریب صدور سطح تحت اندازه‌گیری و دمای محیط نیز بستگی دارد. این قانون که توزیع طیفی شدت تابندگی از جسم سیاه را بیان می‌کند، توسط پلانک به‌دست آمده است [۷]:

$$E_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \left( e^{\frac{C_2}{\lambda T}} - 1 \right)} \quad (۱)$$

که در آن  $E_{\lambda}$  شدت تابندگی جسم سیاه،  $C_1$  و  $C_2$  به‌ترتیب اولین و دومین ثابت‌های تابندگی،  $\lambda$  طول موج تابندگی مورد آزمایش و  $T$  دمای جسم سیاه برحسب کلوین است. با مشتق‌گیری از رابطه پلانک و با توجه به مقدار  $\lambda$  (برحسب  $\mu\text{m}$ ) و شدت تابندگی بیشینه، رابطه وین به‌دست می‌آید:

$$\lambda_{\max} = \frac{2898}{T} \quad (۲)$$

این رابطه به‌صورت ریاضی بیان‌گر مشاهدات عمومی است که زمانی که دمای تابندگی گرمایی افزایش می‌یابد، رنگ‌ها از قرمز به نارنجی و سپس به زرد تغییر می‌کنند. با انتگرال‌گیری از رابطه پلانک برای کل طیف ( $\lambda = 0 - \infty$ )، شدت تابندگی کلی نیم‌کره‌ای به‌دست می‌آید:

$$E_b = \sigma T^4 \quad (۳)$$

که در آن  $\sigma$  ثابت استفان بولتزمن است. باید به این نکته توجه کرد که معادله اولیه، تابندگی صادر شده از جسم سیاه را بیان می‌کند. این مقدار، بیش‌ترین مقدار تابیده‌شده توسط یک جسم در آن دما است. اجسام حقیقی هیچ‌گاه از این قانون پیروی نمی‌کنند، اما ممکن است از رفتار جسم سیاه در بازه‌های مشخص طیفی تبعیت کنند. یک جسم حقیقی به‌طور کلی تنها قسمتی از  $E_{\lambda}$  تابیده شده توسط جسم

1. Pulsed Thermography (PT)
2. Stepped Thermography (ST)
3. Lock-In Thermography (LT)
4. Modulated Thermography (MT)
5. Pulsed Phase Thermography (PPT)
6. Frequency Modulated Thermography (FMT)



### ۳. نمونه سازی و انجام آزمایش‌ها

نمونه‌های آزمون شامل نمونه‌هایی با هندسه ورق تخت و ورق انحنادار از جنس کامپوزیت الیاف کربن می‌باشند. کامپوزیت در دمای  $23^{\circ}\text{C}$  برای یک روز و دمای  $100^{\circ}\text{C}$  برای ۴ ساعت پخت گردید. به منظور ارزیابی قدرت شناسایی عیوب با روش دمانگاری پالسی به کار گرفته شده در این پژوهش، در گام نخست، نمونه‌هایی با عیوب مصنوعی مشخص ساخته شد. در این نمونه‌ها، عیوب متفاوتی نظیر ذرات خارجی با هدایت حرارتی پایین و بالا، جدایش لایه‌ای و جدایش سوزنی به صورت دست‌ساز ایجاد گردید. عیوب ایجاد شده به صورت زیر نام‌گذاری شدند:

۴-۱: ذره خارجی از جنس آلومینیم به قطر  $2\text{ mm}$

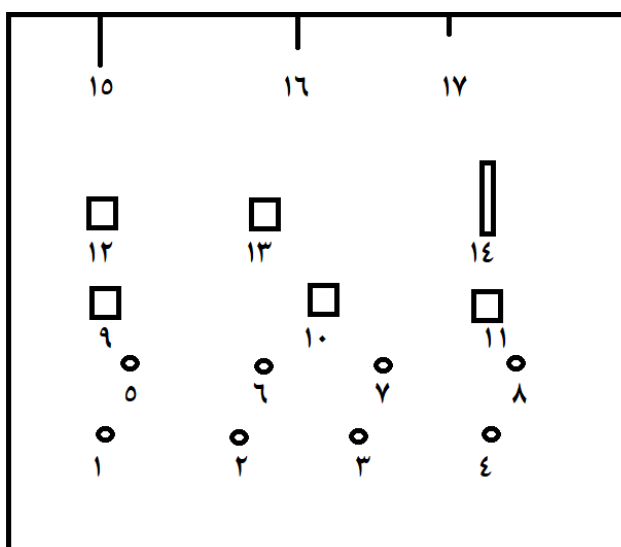
۵-۸: ذره خارجی از جنس تفلون به ابعاد قطر  $2\text{ mm}$

۹-۱۳: ورق نازک  $0.2\text{ mm}$  از جنس تفلون به ابعاد  $10 \times 10\text{ mm}^2$

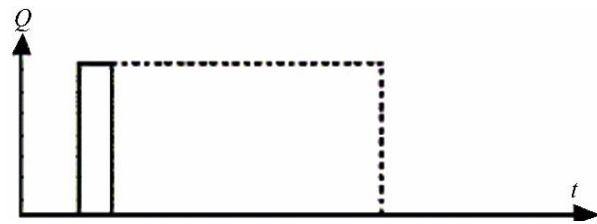
۱۴: ورق نازک  $0.1\text{ mm}$  از جنس تفلون به ابعاد  $1 \times 15\text{ mm}^2$

۱۵-۱۷: سوزن استیل به قطر  $0.4\text{ mm}$  و طول ۵، ۱۰ و  $15\text{ mm}$

در شکل ۳ طرح‌واره‌ی عیوب در نمونه تخت نشان داده شده است.



شکل ۳. طرح‌واره عیوب در نمونه تخت.



شکل ۲. نمودار تابع تحریک پالسی.

دمای مواد پس از شوک حرارتی اولیه به سرعت تغییر می‌کند، زیرا جبهه حرارتی با انتشار در زیر سطح، گسترش می‌یابد. حضور نقص موجب کاهش میزان انتشار می‌شود، به طوری که هنگام مشاهده دمای سطح، اختلاف حرارتی بین عیوب و مناطق عاری از آن‌ها مشاهده می‌شود. در واقع، زمان مشاهده  $t$ ، یک تابع (در تقریب اول) مربع عمق  $Z$  است و از دست‌دادن تضاد  $C$  متناسب با معکوس مکعب عمق  $Z$  [۱۷] است:

$$C \approx \frac{1}{Z^3} \quad t \approx \frac{Z^2}{\alpha} \quad (5)$$

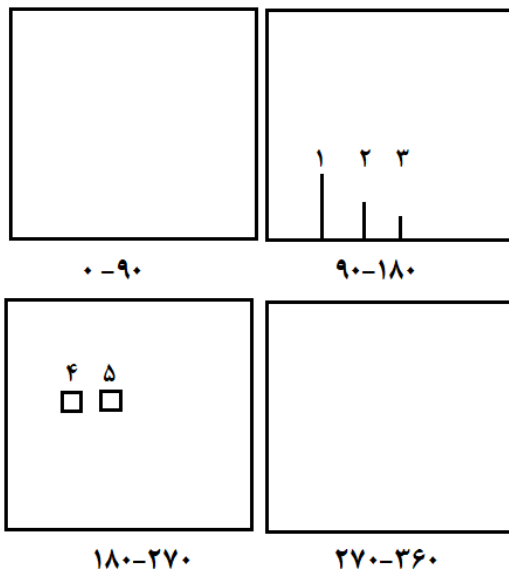
که در آن  $\alpha$  انتشار حرارتی است. این دو رابطه، دو محدودیت دمانگاری پالسی را نشان می‌دهند. نقص‌های قابل مشاهده به طور کلی کم عمق می‌باشند و تضاد ضعیف است. یک قانون تجربی می‌گوید که شعاع کوچک‌ترین نقص قابل شناسایی باید حداقل یک تا دو برابر بزرگ‌تر از عمق آن باشد. علاوه بر این، گرادیان درجه حرارت سطح نه تنها ناشی از نقص‌های پنهان است، بلکه تحت تأثیر تغییرات محلی انتشار در سطح مواد و همچنین ناشی از افزایش حرارت غیریکنواخت است.

برتری اصلی روش دمانگاری پالسی، استفاده از توزیع دمای گذرا بلافاصله پس از قطع تحریک حرارتی برای شناسایی عیوب می‌باشد. هرچه توزیع دمایی نمونه به سمت حالت پایدار پیش رود، احتمال محو شدن مرز عیوب در تصاویر دمانگاری افزایش می‌یابد. با ایجاد تحریک حرارتی به صورت یک پالس کوتاه، جریانی از انرژی داخل ماده ایجاد می‌شود که یک توزیع دمایی غیریکنواخت متناسب با شکل و هندسه عیوب را آشکار می‌سازد.

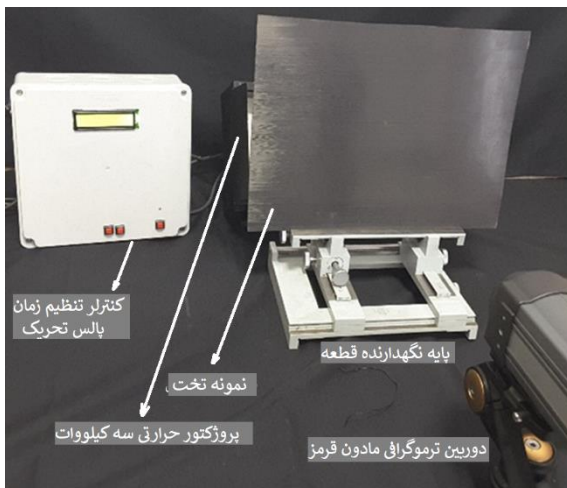
استفاده از روش دمانگاری پالسی، یک بازه زمانی محدود را ایجاد می‌کند که در آن، توزیع دمایی غیریکنواخت در نمونه، بیشترین تضاد را برای آشکارسازی عیوب فراهم می‌کند.

#### 1. Contrast





شکل ۴. طرح‌واره عیوب در نمونه منحنی.



شکل ۵. چیدمان آزمون نمونه ورق با هندسه تخت.

محیط انجام آزمایش یک اتاق عادی بوده است. رطوبت و ذرات معلق هوایی تأثیر مشهودی بر نتایج ندارند چراکه این روش بر پایه تفاوت دمایی نقاط پایه‌ریزی شده است و متأثر از دمای مطلق نقاط نیست. برای انجام آزمون از دوربینی با حسگر فرورسرخ با حساسیت  $0.3^{\circ}\text{C}$  استفاده شده است. از آنجا که کلیه تفسیرها و نتایج بر تفاوت دمایی در نقاط مختلف قطعه متمرکز می‌باشد، تعیین دقیق درجه حرارت و یا به عبارتی کالیبراسیون دمایی سیستم اثری بر کیفیت نتایج و تحلیل‌ها ندارد و در واقع این مسئله یکی از امتیازات ذاتی این روش عیب‌یابی غیرمخرب است. وجود فاصله متفاوت نقاط از نمونه، منجر به ایجاد یک گرادیان حرارتی خطی یکنواخت در نمونه شده و اثری بر شناسایی عیوب در این روش ندارد، چراکه مرز عیوب با ایجاد اختلاف دمایی بین نقاط مرزی آشکار می‌شود [۱۸].

در نمونه انحنادار نیز عیوب مشابهی قرار داده شد. در شکل ۴ طرح‌واره‌ی عیوب در نمونه منحنی نشان داده شده است. عیوب ایجاد شده به صورت زیر نام‌گذاری شدند:

- ۱: سوزن استیل به قطر  $0.5\text{ mm}$  و طول  $15\text{ mm}$ .
- ۲-۳: سوزن استیل به قطر  $0.2\text{ mm}$  و طول  $10\text{ mm}$  و  $5\text{ mm}$ .
- ۴-۵: ورق نازک  $0.2\text{ mm}$  از جنس تفلون به ابعاد  $10 \times 10\text{ mm}^2$ .

در روش دمانگاری فعال، استاتیک، صفحه‌ای با حرارت‌دهی نوری با پالس پله‌ای برای انجام بازرسی قطعات ورق با هندسه تخت و انحنادار انتخاب شد. از آنجا که ضخامت نمونه در همه آزمون‌ها پایین بوده و برابر با  $1\text{ mm}$  است، روش آزمون از نوع عبوری انتخاب شده است. یکی از ویژگی‌های بسیار مهم در آزمون دمانگاری کامپوزیت‌های الیاف کربن، هدایت حرارتی بسیار زیاد نمونه‌ها است که بسیاری از پارامترهای آزمون نظیر زمان باردهی، انرژی ورودی و سرعت تصویربرداری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. از این رو، در انتخاب و تهیه سامانه آزمون بایستی از سرعت نسبتاً بالای داده‌برداری ( $30$  فریم در ثانیه) استفاده شود. این موضوع یکی از چالش‌های اساسی در انتخاب و تأمین تجهیزات دمانگاری در این پژوهش بود. در آزمایش نمونه‌ها، از سیستم انرژی‌دهی  $3\text{ kW}$  تابشی با سیستم کنترل پالسی استفاده شد. در خصوص انتخاب بازه زمانی تحریک حرارتی یا به عبارتی طول پالس، لازم است که حرارت در حدی باشد که طیف دمایی ایجاد شده در قطعه، از دمای زمینه قطعه فاصله بگیرد. پایین بودن بیش از حد مدت زمان پالس، تضاد دمایی لازم برای آشکارسازی عیوب را فراهم نمی‌کند. در مقابل اگر طول مدت زمان تحریک بالا باشد، اختلاف دمایی نقاط در مرز عیوب منجر به کاهش وضوح عیوب می‌شود. تعیین مدت زمان طول پالس تحریک در این پژوهش، با انجام آزمون‌های اولیه و با استفاده از پالس‌هایی از  $0.5$  تا  $4\text{ s}$  انجام گرفت. پالس استفاده شده در این آزمون یک پالس پله‌ای به مدت  $1\text{ s}$  بوده است.

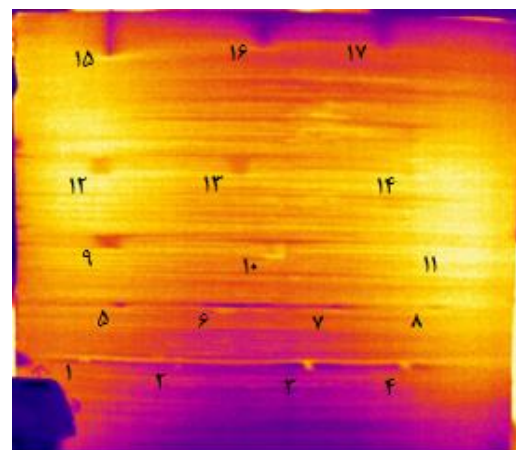
سیستم بازرسی قطعات ورق با هندسه تخت کامپوزیتی در شکل ۵ نشان داده شده است. دوربین دمانگاری فرورسرخ با رزولوشن  $240 \times 320$  پیکسل در این پژوهش به کار گرفته شد.



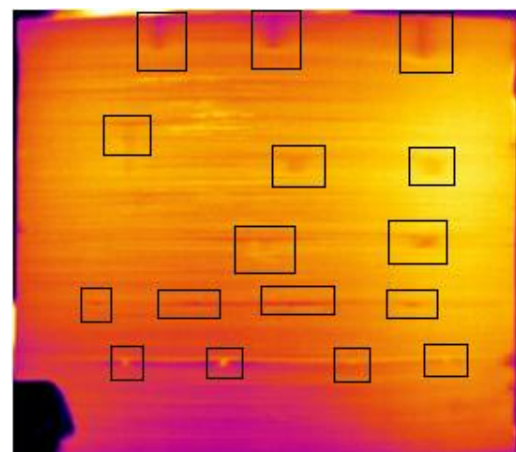


#### ۴. ارایه نتایج و بحث

براساس برنامه معرفی شده آزمون دمانگاری در بخش قبل، بازرسی نمونه‌ها انجام شد. نتایج انجام آزمون در ادامه ارایه شده است (شکل ۶). شکل ۶: الف نمای روبه‌روی قطعه و شکل ۶: ب نمای پشتی قطعه را نشان می‌دهد. به‌منظور حذف اثرات سطحی در نتایج حاصله، تصویربرداری از سمت کاملاً صاف قطعه انجام شد. از طرف دیگر، با پوشش‌دهی سطح قطعه با رنگ سیاه مات، اثرات ناصافی سطحی بر تابش امواج فرسرخ و هم‌چنین اثرات بازتابش سطح به حداقل رسانده شد. تفاوت دمایی در دو سوی قطعه ناشی از غیریکنواختی فاصله منبع حرارتی با سطح قطعه کار و هم‌چنین انتقال حرارت متفاوت در لبه نمونه است. همان‌طور که قبلاً ذکر شد، این روش بر پایه تفاوت دمایی نقاط پایه‌ریزی شده است و متأثر از دمای مطلق نقاط نیست. وجود یک گرادیان حرارتی یکنواخت در نمونه اثری بر شناسایی عیوب در این روش ندارد [۱۹].



(الف)



(ب)

شکل ۶: نتایج آزمون دمانگاری نمونه ورق تخت کامپوزیتی؛ (الف) نمای روبه‌رو؛ (ب) نمای پشت.

عیوب شماره‌های ۱-۴ و ۵-۸ دو نوع عیب نقطه‌ای هستند که با قرار دادن یک ذره خارجی در بین لایه‌ها ایجاد شده‌اند. ذرات به‌کار رفته در ایجاد عیوب ۱-۴ دارای رسانایی حرارتی بالا هستند و ذرات به‌کار رفته در ایجاد عیوب ۵-۸ از رسانایی پایینی برخوردارند. همه عیوب ذکر شده (۱ تا ۸) به‌خوبی در تصاویر حرارتی دیده می‌شوند. عیوب نقطه‌ای ۱-۴ به‌دلیل رسانایی بالاتر از نمونه باعث ایجاد افزایش دما شده‌اند. این درحالی است که عیوب ۵-۸ به‌دلیل رسانایی کم‌تر به‌صورت افت حرارتی دیده می‌شوند.

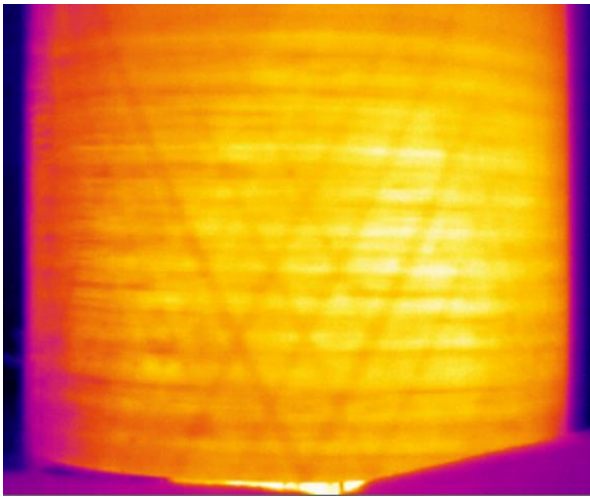
عیوب شماره ۹-۱۳ عیوب مربعی شکل از نوع جدایش بین‌لایه‌ای هستند. برای ایجاد این عیوب از دو لایه ورق نازک عایق برای ایجاد جدایش بین لایه‌ها استفاده شده است. عیوب ۹، ۱۰، ۱۲ و ۱۳ به‌خوبی در تصویر حرارتی دیده می‌شوند. اندازه اثر حرارتی مشاهده شده با ابعاد عیب ایجاد شده مطابقت بسیار خوبی دارد. عیب شماره ۱۱ علی‌رغم شرایط یکسان نسبت به سایر عیوب، در تصاویر حرارتی به‌سختی دیده می‌شود. دلیل این مسئله را می‌توان به نفوذ رزین در بین لایه‌های عایق دانست. این مسئله می‌تواند با تسهیل انتقال حرارت بین لایه‌ها، منجر به تضعیف اثرات حرارتی این عیب شود [۵].

عیب شماره ۱۴، یک عیب از نوع تفلون نازک بوده است که به‌صورت باریکه‌ای در میان لایه‌ها قرار داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به‌دلیل عرض ۱ میلی‌متری این عیب، اثر مشاهده شده نسبت به عیب سوزنی فلزی با تمایز بسیار پایین‌تری دیده می‌شود. استفاده از روش‌های بازسازی تصاویر حرارتی، می‌تواند به بهبود تضاد عیب منجر شود که از برنامه‌های آتی پژوهشی می‌باشد [۱۹].

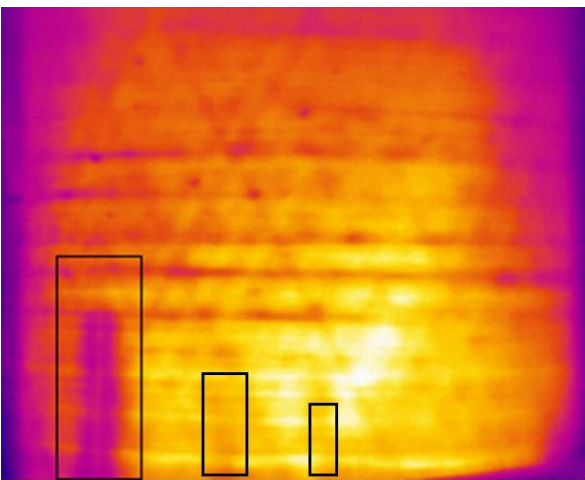
در قسمت بالایی نمونه تخت، سه عیب از نوع جسم خارجی به شکل سوزن با سه طول مختلف در داخل نمونه از پیش قرار داده شده است (عیوب ۱۵-۱۷). مقایسه کیفی در این خصوص اثبات نمود که هر سه سوزن، علی‌رغم قطر پایین سوزن‌ها، به‌خوبی در تصاویر حرارتی دیده می‌شوند.

در ادامه نتایج بازرسی حرارتی نمونه ورق انحنا دار نمایش داده شده است. به‌دلیل محدودیت هندسه، طبیعتاً سطح دید دوربین بخش محدودی از دیواره نمونه ورق انحنا دار (حدود ۹۰ درجه) را پوشش می‌دهد. از این‌رو در آزمون نمونه ورق انحنا دار، محیط نمونه مطابق با شکل ۷ به چهار بخش ۹۰ درجه تقسیم شده و آزمون دمانگاری در تمامی این چهار بخش، که از نظر کیفیت دارای شرایط متفاوتی نیز می‌باشند، انجام شد [۱۸].

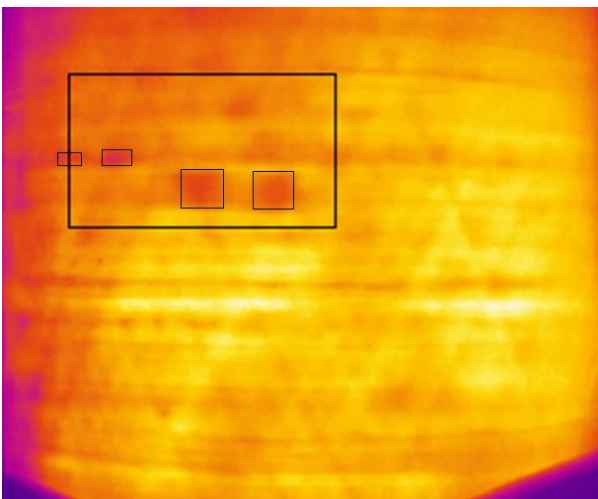




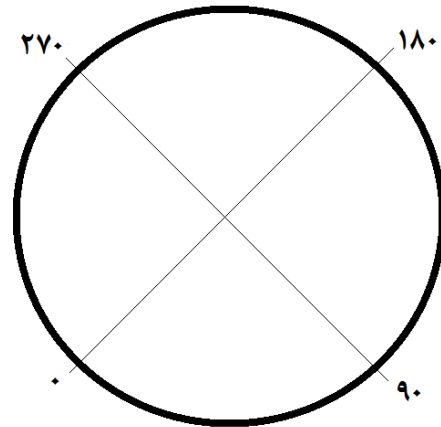
شکل ۸. نتایج آزمون دمانگاری نمونه ورق انحنادار کامپوزیتی - قطاع سالم.



شکل ۹. نتایج آزمون دمانگاری نمونه ورق انحنادار کامپوزیتی - قطاع دوم.



شکل ۱۰. نتایج آزمون دمانگاری نمونه ورق انحنادار کامپوزیتی - قطاع سوم.



شکل ۷. طرح‌واره‌ای از تکنیک به‌کاربرده شده جهت انجام آزمون دمانگاری نمونه ورق انحنادار با تقسیم‌بندی به چهار قطاع ۹۰ درجه.

در شکل ۸ تصویر نتایج دمانگاری برای بخش سالم و همچنین سه قطاع ۹۰ درجه از بخش معیوب نمونه ورق انحنادار نشان داده شده است.

همان‌گونه که در شکل ۹ دیده می‌شود، حساسیت سامانه بازرسی به روش دمانگاری در حدی است که انباشتگی‌های موضعی الیاف و یا کمبود موضعی رزین ناشی از فرایند پیچش و ساخت قطعات با هندسه منحنی را به‌خوبی نمایش می‌دهد. از آنجا که فرایند ساخت ورق تخت به‌صورت لایه‌چینی پارچه بوده و نمونه‌ها یکنواخت‌تر هستند لذا این عیوب در نمونه تخت دیده نشدند.

در قطاع دوم نمونه ورق انحنادار، مجدداً سه عیب از نوع جسم خارجی به شکل سوزن با سه طول مختلف در داخل نمونه از پیش قرار داده شده است. سوزن سمت چپ، دارای قطر بالاتری از دو سوزن دیگر می‌باشد. به‌همین دلیل در تصاویر حرارتی، عیب با وضوح بالاتری دیده می‌شود. البته هر دو عیب سوزنی دیگر نیز در شکل ۹ قابل تشخیص هستند. نازک بودن این سوزن‌های استیل (قطر ۰/۲ mm) باعث شده است که در تصاویر حرارتی، اثر آن‌ها بسیار محدودتر از سوزن ضخیم ۰/۵ mm باشد.

در شکل ۱۰ نتایج دمانگاری قطاع سوم نشان داده شده است. در این قطاع دو عیب از نوع جدایش بین‌لایه‌ای قرار داده شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۰ به‌خوبی مشخص است، این دو عیب بسیار واضح با لبه‌های مشخص دیده می‌شوند. نکته قابل‌توجه، وجود لکه‌های دیگری است که در بالا و سمت چپ این عیب قرار دارند که نشان‌دهنده غیریکنواختی یا ناپیوستگی تصادفی ناشی از فرایند ساخت می‌باشند.

### ۵. جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

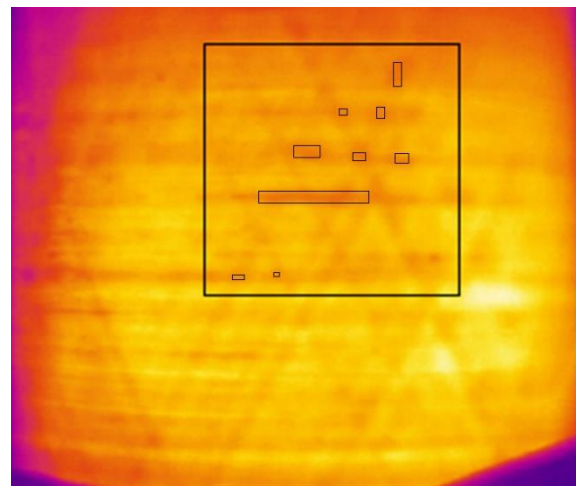
در این پژوهش با استفاده از روش دمانگاری فرسرخ فعال، موقعیت و بزرگی عیوب در نمونه‌های ورق تخت و انحنادار از جنس کربن/ اپوکسی با عیب‌های مختلف بررسی شده است. بررسی‌ها نشان داد برای انجام بازرسی قطعات ورق با هندسه تخت و انحنادار، روش دمانگاری عبوری نتایج مناسبی را ارائه می‌کند. با استفاده از این روش در بیش‌تر عیوب موردنظر، ایجاد تمایز در تصاویر دمایی عیب را آشکار می‌نماید.

استفاده از روش تحریک حرارتی با پالس پله‌ای برای شناسایی هر سه نوع عیب ذرات خارجی با رسانایی بالاتر و کم‌تر از نمونه و هم‌چنین جدایش بین لایه‌ای مناسب بود.

عیب جسم خارجی سوزنی شکل فلزی با تمایز بالایی در تصاویر حرارتی مشاهده شد. مشابهت ویژگی‌های حرارتی جسم خارجی با ماده پایه، شناسایی عیوب را با محدودیت روبه‌رو می‌کند.

حساسیت تکنیک بازرسی به کارگرفته شده در حدی است که انباشتگی‌های موضعی الیاف یا کمبود موضعی رزین ناشی از فرایند پیچش و ساخت ورق انحنادار را به‌خوبی نمایش می‌دهد. این مسئله در نمونه‌های منحنی شکل به‌دلیل غیریکنواختی بالاتر ناشی از فرایند ساخت متفاوت این نمونه در مقایسه با نمونه تخت، بیش‌تر دیده شدند.

در شکل ۱۱، تصویر حرارتی قطاع چهارم نمونه ورق انحنادار نشان داده شده است. در این قطاع نیز عیبی به‌صورت دستی قرار داده نشده است، ولی همان‌طور که به‌خوبی در تصویر دیده می‌شود، غیریکنواختی در فرایند پیچش ورق انحنادار و غیریکنواختی نسبت رزین به الیاف منجر به شکل‌گیری نقاطی با دمای متفاوت شده است که نشان‌دهنده غیریکنواختی و عیوب احتمالی ناشی از فرایند ساخت می‌باشد. نکته بسیار مهم و قابل‌توجه در بررسی نتایج این بخش، مشاهده الگوی چیدمان الیاف داخلی نمونه در هر بخش است. بدین‌ترتیب هرگونه عیبی که مربوط به چیدمان درست الیاف و یا پیچیدگی در محل خاصی باشد را می‌توان مشاهده نمود. به‌علاوه در بخش‌هایی که به‌دلیل تجمع الیاف یا رزین تغییرات اندکی در ضخامت ایجاد شده است، این تغییرات به‌صورت تغییر الگوی حرارتی و در تصاویر با ایجاد تضاد، متفاوت دیده می‌شوند. هم‌چنین هرگونه عیبی که اختلالی در انتقال یکنواخت حرارت به سطح نمونه ایجاد کند، به‌صورت تغییرات اندک محلی در الگوی تصویر حرارتی قابل‌مشاهده خواهد بود. با آزمون نمونه‌های مختلف سالم و معیوب، بانک اطلاعاتی مناسبی برای مقایسه نمونه آزمون‌های جدید را می‌توان ایجاد کرد. ایجاد ارتباط بین خواص مکانیکی نمونه ورق انحنادار و غیریکنواختی‌های مشاهده‌شده در تصاویر حرارتی فرسرخ، از اهداف پژوهشی آتی نویسندگان می‌باشد.



شکل ۱۱. نتایج آزمون دمانگاری نمونه ورق انحنادار کامپوزیتی - قطاع چهارم.





## مراجع

- H.T. Bang, et al, *Defect identification of composites via thermography and deep learning techniques*, *Composite Structures*, 112405 (2020).
- B. Wang, et al, *Non-destructive testing and evaluation of composite materials/structures: A state-of-the-art review*, *Advances in Mechanical Engineering*, **12**(4), 1687814020913761 (2020).
- U. Netzelmann, D. Müller, *Modified pulse-phase thermography algorithms for improved contrast-to-noise ratio from pulse-excited thermographic sequences*, *NDT & E International*, **116**, 102325 (2020).
- R. Usamentiaga, et al, *Infrared thermography for temperature measurement and non-destructive testing*, *Sensors*, **14**, 12305–12348 (2014).
- L. Cheng, G.Y. Tian, *Transient thermal behavior of eddy-current pulsed thermography for non-destructive evaluation of composites*, *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **62**, 1215–1222 (2013).
- C. Ibarra-Castanedo, X. Maldague, *Review of pulse phase thermography*, in: *(SPIE Sensing Technology+ Applications, International Society for Optics and Photonics*, p. 94850T-94850T-94810 (2015).
- S. Bagavathiappan, et al, *Infrared thermography for condition monitoring – a review*, *Infrared Phys. Technol.* **60**, 35–55 (2013).
- S. Melnyk, I. Tuluzov, A. Melnyk, *Method of remote dynamic thermographic testing of wind turbine blades*, in: *The 12th International Conference on Quantitative InfraRed Thermography*, (Bordeaux, (2014).
- W. Harizi, et al, *Mechanical damage assessment of glass fiber-reinforced polymer composites using passive infrared thermography*, *Compos Part B – Eng.* **59**, 74–79 (2014).
- A.A. Badghaish, D.C. Fleming, *Non-destructive inspection of composites using step heating thermography*, *J. Compos. Mater.* **42**, 1337–1357 (2008).
- X.P. Maldague, *Theory and practice of infrared technology for non-destructive testing*, *John Wiley Interscience*, New York, (2001).
- X.P. Maldague, S. Marinetti, *Pulsed phase infrared thermography*, *J. Appl. Phys.* **79**, 2694–2698 (1996).
- J.N. Zalameda, P.W. Winfree, *Quantitative thermal non-destructive evaluation using an uncooled microbolometer infrared camera*, in: *Thermosense XXIV, (SPIE, Orlando, 2002)*, pp. 610–617 (2002).
- R. Mulaveesala, S. Tuli, *Theory of frequency modulated thermal wave imaging for nondestructive subsurface defect detection*, *Appl. Phys. Lett.* **89** (2006).
- N. Tabatabaei, A. Mandelis, *Thermal-wave radar: a novel subsurface imaging modality with extended depth-resolution dynamic range*, *Rev. Sci. Instrum.* **80**, 034902 (2009).
- P. Jäckel, U. Netzelmann, *The influence of external magnetic fields on crack contrast in magnetic steel detected by induction thermography*, *Quant. Infrared Thermography J.* **10**, 237–247 (2013).
- R. Yang, et al, *An investigation and review into microwave thermography for NDT and SHM*, in: *IEEE Far East Forum on Nondestructive Evaluation/ Testing (FENDT)*, *IEEE, Zhuhai*, (2015).
- F. Panella, et al, *A brief review and advances of thermographic image-processing methods for irt inspection: a case of study on gfrp plate*, *Experimental Techniques*, 1-15 (2020).
- F. Viegas, et al, *The use of thermography and its control variables: a systematic review*, *Revista Brasileira de Medicina do Esporte*, **26**(1), 82-86, (2020).

## COPYRIGHTS

©2021 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



استناد به این مقاله

امجد سازگار، مرتضی امیری (۱۴۰۰)، به کارگیری دمانگاری فعال به منظور ارزیابی غیرمخرب عیوب مختلف در ورق پلیمری تقویت شده با الیاف کربن با هندسه تخت و منحنی، ۹۷، ۷۰-۷۸

DOI: 10.24200/nst.2021.1298

Url: [https://jonsat.nstri.ir/article\\_1298.html](https://jonsat.nstri.ir/article_1298.html)

