DOI: 10.30494/JNDT.2021.275937.1057 Received: March 02, 2021 - Accepted: May 16, 2021

# Evaluation of X-Ray Radiography, Laser Shearography and I. R. Thermography in Defect Detection in Carbon Reinforced Polymer Composite Panels

**Amjad Sazgar*, Morteza Amiri, Mohammad Soleymany Natanzi**

Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, Tehran, Iran
*asazgar@aeoi.org.ir

**Abstract**

Carbon fiber reinforced polymers, or so-called CFRPs, are widely used in different industries due to their unique properties, such as high strength-to-weight ratio. A common example of application of this material are composite planels that are used in the construction of composite panels curved and flats surfaces. Despite the excellent properties of these materials, a variety of defects such as fiber disbonding or matrix cracks, affect their final performance. Therefore, the development of non-destructive inspection methods to identify defects in the parts made of this material is very important. In this paper, samples of carbon fiber composites have been tested by X-ray radiography method. The results have been compared with two new NDT methods of digital shearography and infrared thermography. The results show that thermography is more successful in detecting many internal defects than the traditional X-ray radiography and shearography. The results also show that in the curved geometry, which is not possible to complete the radiography test due to a limitation of some X-ray sources, the thermography method presents very acceptable results. It is also possible in many cases to use shearography method in flat samples to identify some kinds of defects, more successfully.

**Keywords:** Carbon reinforced composites, Digital shearography, Thermography, X-ray radiography.

DOI: 10.30494/JNDT.2021.275937.1057

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۱۲ - تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۲/۲۶

# ارزیابی روش‌های جدید پرتونگاری، برش‌نگاری لیزری و حرارت‌نگاری فروسرخ در عیب‌یابی غیرمخرب پوسته‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن

**امجد سازگار*، مرتضی امیری، محمد سلیمانی نطنزی**

پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران

*asazgar@aeoi.org.ir

## چکیده

پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف کربن یا در اصطلاح کامپوزیت‌های الیاف کربن، از جمله موادی هستند که به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد ازجمله نسبت استحکام به وزن بسیار بالا، مورد توجه بسیاری از صنایع در ساخت قطعات مختلف هستند. نمونه‌های بسیار رایج این ماده، ورق‌های کامپوزیتی با ضخامت میلی‌متری است که در ساخت برخی از انواع پنل‌ها و یا سطوح منحنی و لوله کاربرد دارد. با وجود ویژگی‌های ممتاز این مواد، انواع عیوب نظیر جدایش الیاف و یا ترک زمینه پلیمری، کارکرد نهایی آنها را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ازاین‌رو، توسعه روش‌های بازرسی غیرمخرب برای شناسایی عیوب قطعات ساخته‌شده با الیاف کربن بسیار پراهمیت است. در این مقاله، نمونه‌های ورق کامپوزیتی الیاف کربن با روش پرتونگاری آزمایش‌شده و نتایج آن با دو روش جدید برش‌نگاری دیجیتالی و حرارت‌نگاری فروسرخ مقایسه شده است. نتایج نشان‌دهندهٔ موفقیت بالاتر روش حرارت‌نگاری در تشخیص بسیاری از عیوب داخلی و همچنین روش برش‌نگاری در تشخیص جدایش لایه‌ای در این نمونه‌ها نسبت به روش آزمون سنتی پرتونگاری است. همچنین، نتایج نشان می‌دهد در هندسهٔ خمیده و لوله که به دلیل محدودیت دسترسی در روش پرتونگاری، امکان تکمیل آزمون‌ها وجود ندارد، روش حرارت‌نگاری نتایج بسیار قابل قبولی را ارائه می‌دهد. علاوه‌براین، می‌توان در بسیاری از موارد از روش جدید برش‌نگاری در نمونه‌های تخت برای شناسایی عیوب جدایش به‌طور موفق‌تر استفاده کرد.

**کلمات کلیدی:** کامپوزیت‌های الیاف کربن، پرتونگاری ایکس، حرارت‌نگاری فروسرخ، برش‌نگاری دیجیتالی.

## ۱- مقدمه

پلیمرهای تقویت‌شده با الیاف کربن به دلیل دارا بودن مزایای بسیار مانند نسبت استحکام به وزن بالا، نسبت سفتی به وزن بالا و همچنین قابلیت شکل‌گیری و تولید هندسه‌های مختلف، کاربردهای وسیعی پیداکرده‌اند. بااین‌حال، ایجاد عیوبی نظیر ناپیوستگی‌های داخلی، تخلخل تصادفی و وجود مواد نامطلوب در بین لایه‌ها و یا بین الیاف کامپوزیت، امری اجتناب‌ناپذیر است. در این راستا، طی سال‌های اخیر، به‌منظور ارتقای کیفی و افزایش قابلیت عملکردی و قابلیت اطمینان این قطعات، برخی روش‌های آزمون‌های غیرمخرب نوین توسعه داده‌شده و عملکرد آنها در بسیاری از موارد به اثبات رسیده است. به‌عنوان‌مثال از روش‌های نوین توسعه داده‌شده برای ارزیابی عیوب در مواد مرکب می‌توان به روش حرارت‌نگاری فروسرخ[1][۱]، روش برشنگاری دیجیتالی[2][۲]، روش برهم‌نگاری تصاویر دیجیتالی[۳] و برخی روش‌های توسعه داده‌شده از روش‌های سنتی همچون پرتونگاری دیجیتال[3] و یا روش آزمون التراسونیک C-Scan اشاره نمود[۴]. بااین‌حال، به‌دلیل سهولت انجام و همچنین در دسترس‌بودن تجهیزات آزمون سنتی نظیر پرتونگاری و فراصوتی، بسیاری از این روش‌ها نیز به‌طور وسیعی در تست نمونه‌های کامپوزیتی کاربرد دارند.

در میان روش‌های نوین ارزیابی غیرمخرب، روش‌های حرارت‌نگاری فروسرخ و روش برشنگاری دیجیتالی به دلیل ویژگی‌هایی چون غیرتماسی‌بودن، سرعت بالای تست، ایمنی بالا و همچنین امکان انجام آزمون برای

[1] Infrared Thermography

[2] Digital Shearography

[3] Digital Radiography

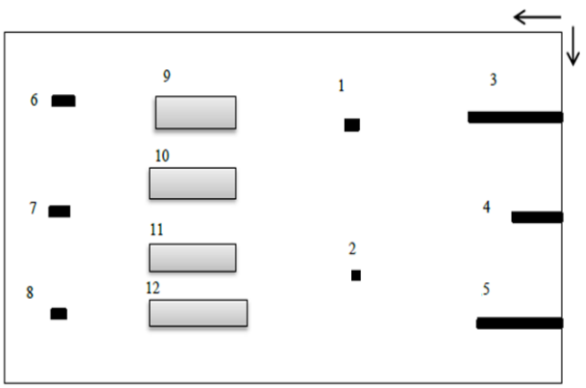
ضخامت‌های کم (پوسته‌ها) در صورت اثبات کارایی در نمونه‌های خاص، به‌خوبی می‌توانند جایگزین بسیاری از روش‌های سنتی شوند. آزمون حرارت‌نگاری بر اساس میزان تشعشع امواج الکترومغناطیس بازتاب شده از اجسام در درجه حرارت‌های مختلف است که این تشعشع توسط دوربین حرارت‌نگاری دریافت و توسط پردازنده تحلیل می‌شود[۵]. ونگاس و همکاران آزمون حرارت‌نگاری مادون‌قرمز را با اعمال الگوریتم پردازش داده‌ها و تصاویر روی نمونه‌های مواد مرکب ساندویچی موردبررسی قرار داده و عیوب را شناسایی و دسته‌بندی نمودند[۶]. در حوزه آزمون حرارت‌نگاری فعال فعالیت‌های زیادی نیز درخصوص الگوریتم‌های پردازش یا شیوه و میزان بارگذاری در این روش انجام‌شده است[۷]. روش برشنگاری دیجیتالی نیز به‌عنوان یکی دیگر از روش‌های نوین، قابلیت ارزیابی مواد کامپوزیتی را به‌خصوص در عیوبی مانند عدم چسبندگی و جدایش لایه‌ای افزایش داده است. در سال‌های اخیر، تحقیقاتی بر روی روش برشنگاری در راستای بهبود و توسعه کاربردهای آن در عیب‌یابی انجام‌شده است. در بیشتر این تحقیقات، قابلیت های عیب‌یابی قطعات در شرایط خاص مدنظر قرارگرفته است. به‌عنوان‌مثال اکبری و همکاران در سال ۲۰۱۳ از روش بارگذاری حرارتی برای تشخیص عیوب در پلیمرها استفاده کردند[۸]. ایشان در کار دیگری با استفاده از مدل سازی نرم‌افزاری هاله‌های برشنگاری، معیاری برای میزان بارگذاری موردنیاز در عیب‌یابی ارایه دادند[۹]. در بسیاری از تحقیقات قبلی انجام‌شده، روش برشنگاری در نمونه‌های کامپوزیتیِ دارای عیوب به‌عنوان یک روش مکمل ولی با قابلیت بالا معرفی‌شده است.

در این مقاله با توجه به مزایای روش‌های نوین ذکرشده، قابلیت‌های این روش‌ها در عیب‌یابی نمونه‌های کامپوزیتی الیاف کربن موردتوجه قرارگرفته است. ازاین‌رو، عیوب مصنوعی روی نمونه‌های کامپوزیتی ایجاد گردید و با استفاده از روش حرارت‌نگاری و برشنگاری آزموده شده است. از طرفی برای ایجاد امکان مقایسه با روش‌های سنتی، این نمونه‌ها با روش پرتونگاری نیز تحت آزمون قرارگرفته و قابلیت هر سه روش مقایسه شده است. با توجه به محدودیت هندسه در استفاده از تجهیزات روش پرتونگاری، این روش در نمونه‌ای از جنس الیاف کربن و با هندسه تخت آزموده شده و با دو روش حرارت نگاری و برشنگاری مقایسه شده است. همچنین، روش‌های حرارت‌نگاری و برشنگاری در هندسهٔ منحنی شکل نیز آزمایش‌شده و قابلیت آنها در عیب‌یابی هندسه غیرتخت نیز بررسی و مقایسه شده است.

## ۲- آماده‌سازی نمونه‌های آزمون

به‌منظور ارزیابی قابلیت روش‌های مختلف غیرمخرب، نمونه‌هایی از جنس صفحات تخت پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن و با دو هندسه تخت و صفحهٔ انحنادار با ضخامت نازک (پوسته) به‌وسیله فرآیند رشته‌پیچی تهیه شدند.

برای بررسی قابلیت تشخیص‌پذیری ناپیوستگی در نمونه‌های ذکرشده، عیوب متفاوتی نظیر ذرات خارجی، حباب، جدایش لایه‌ای و جدایش سوزنی به‌صورت دست‌ساز در این نمونه‌ها قرار داده‌شده است. به‌این‌منظور، جرم‌های تفلون، سوزن، سیم فولادی، و ناخالصی‌های آلومینیمی برای ایجاد عیوب در نقاط خاص استفاده شدند. شکل۱ طرحوارهٔ نمونه صفحه تخت کامپوزیتی آزمایش‌شده را به همراه عیوب مصنوعی ایجادشده در آن نشان می‌دهد.

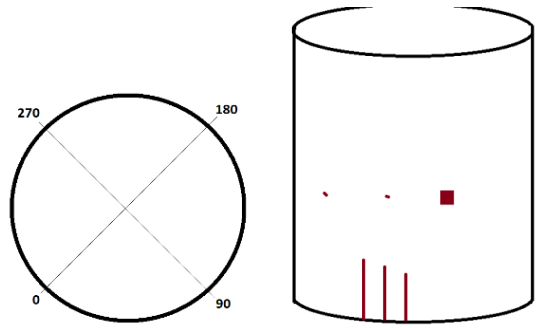



**شکل ۱- طرحوارهٔ نمونه صفحه تخت با انواع عیوب مصنوعی ایجادشده**

در مجموع تعداد ۱۲ عیب مصنوعی در نمونه صفحهٔ تخت ایجادشده است.

نمونهٔ دوم صفحهٔ انحنادار کامپوزیتی از جنس الیاف کربن است که مشابه نمونه تخت ساخته‌شده است. در این نمونه نیز برای بررسی قابلیت روش‌های ذکرشده در تشخیص عیوب در سطوح منحنی، عیوب مصنوعی شامل ذرات

خارجی، حفره و لایه‌های تفلون که مدل‌کننده عیب عدم چسبندگی هستند، قرار داده‌شده است. به دلیل محدودیت هندسه در این نمونه، محیط صفحهٔ انحنادار به چهار بخش ۹۰ درجه تقسیم‌بندی و آزمون حرارت‌نگاری و برشنگاری در تمامی این چهار بخش انجام شد. شکل ۲طرحوارهٔ صفحهٔ انحنادار کامپوزیتی دارای عیوب ساختگی را نشان می‌دهد. تمامی عیوب در محدودهٔ پایینی صفحهٔ انحنادار قرار داده‌شده است.




**شکل ۲- طرحوارهٔ نمونه صفحهٔ انحنادار با انواع عیوب مصنوعی**

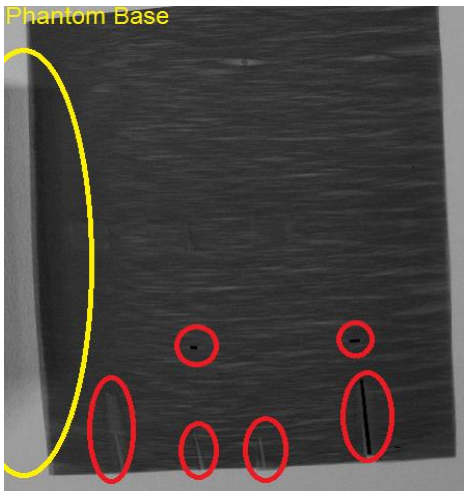
## ۳- انجام آزمون‌ها و مشاهده نتایج

سه روش پرتونگاری، حرارت‌نگاری و برشنگاری دیجیتالی برای عیب‌یابی نمونه‌های کامپوزیتی به‌کار گرفته شد.

### ۳-۱- آزمون پرتونگاری

برای انجام آزمون پرتونگاری، از پرتوهای ایکس در محدودهٔ انرژی ۲۰ تا ۶۰ کیلوالکترون ولت استفاده شد. پس از تمیزکاری نمونه‌ها با محلول استون، آزمون پرتونگاری با استفاده از دستگاه مولد اشعه ایکس با جریان ۳ میلی‌آمپر آزموده شد. تصویر فیلم پس از پردازش، با استفاده از یک اسکنر دیجیتال با مقدار وضوح ۶۰۰ dpi برای مشاهده مناطق آسیب‌دیده اسکن و ثبت شد.

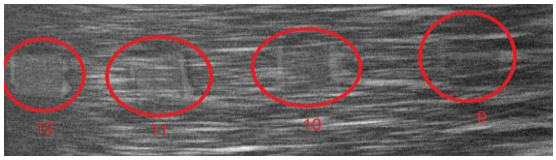
در شکل ۳، نتایج آزمون پرتونگاری از نمونهٔ تخت با انرژی ۲۰ کیلوالکترون ولت نشان داده‌شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، عیوبی که در آنها یک جنس خارجی به‌صورت ماده ناخالص در نمونه گنجانده‌شده است به‌وضوح قابل‌تشخیص است. مشاهده می‌گردد که هرچقدر چگالی عیب نسبت به ماده زمینه بیشتر باشد، عیب واضح‌تر است. به‌نحوی‌که ناخالصی فلزی و سوزن‌های قرار داده‌شده داخل ماده به‌خوبی شناسایی شدند.




**شکل ۳- نتیجه آزمون پرتونگاری با استفاده از اشعه X روی نمونه تخت کامپوزیتی الیاف کربن در انرژی ۲۰ کیلوالکترون ولت**

به‌منظور افزایش دقت نتایج، از تکنیک پنجره‌بندی برای نمایش سایر عیوب در تصویر استفاده‌شده است. در شکل۴، عیوب شماره ۶ تا ۱۲ نشان داده‌شده‌اند.

(الف)




(ب)

**شکل ۴- نتایج پرتونگاری و تشخیص عیوب شماره ۶ تا ۱۲ در نمونه آزمون صفحهٔ تخت**

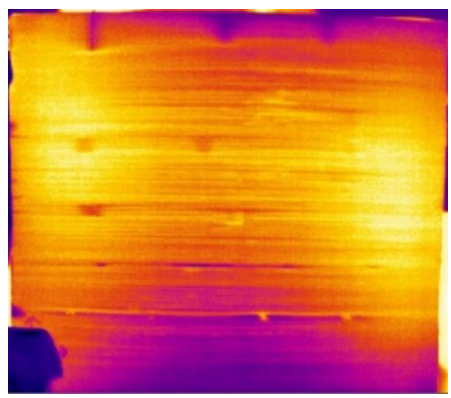
همان‌طور که در نتایج نشان داده‌شده است، جهت‌گیری الیاف کربن در نمونه قابل‌مشاهده است؛ بنابراین، به دلیل تباین کم بین عیوب و زمینه، تشخیص‌پذیری این عیوب با دشواری قابل‌تأیید است. این درصورتی است که چنانچه جسم خارجی تفلون یا سوزن فلزی در داخل نمونه وجود نداشته باشد و عیوب صرفاً شامل جدایش باشند، شناسایی نخواهند شد.

### ۲-۳- آزمون حرارت نگاری فروسرخ

روش بازرسی غیرمخرب حرارت‌نگاری فروسرخ یا همان روش ترموگرافی، امروزه به‌عنوان یکی از روش‌های بسیار پرکاربرد در صنایع مختلف در حال استفاده است. بازرسی غیرمخرب مواد با سیستم عکس‌برداری فروسرخ اساساً بررسی دمای سطحی جسم (تحت آزمایش) و بررسی تغییرات دمایی سطح آن در فاز حرارتی گذرا را شامل می‌شود. وجود ناپیوستگی درون ماده، در انتشار گرما تأثیر می‌گذارد و موجب تغییرات دمایی یک ناحیه از سطح می‌شود. در نمونه‌های موردنظر در این مقاله، از روش حرارت‌نگاری فعال با سیستم حرارت‌دهی تابشی با انرژی‌دهی ۳kW و سیستم کنترل پالسی استفاده شد. چیدمان بازرسی نمونه با هندسه تخت در شکل ۵ نشان داده‌شده است.

**شکل ۵- چیدمان آزمون حرارت‌نگاری فروسرخ در نمونه آزمون صفحهٔ تخت**

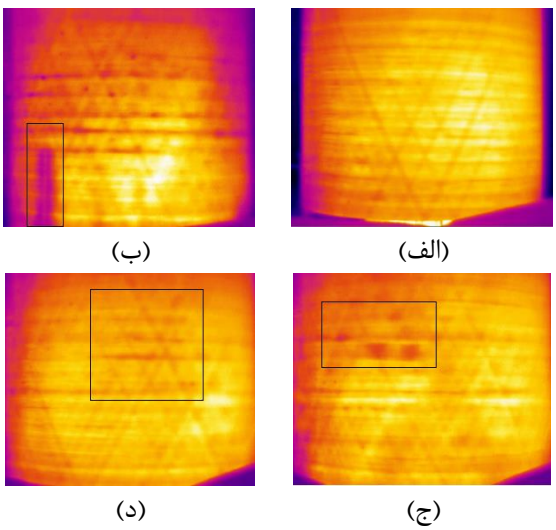
نتایج انجام آزمون حرارت‌نگاری در نمونه تخت در شکل ۶ نشان داده‌شده است.



**شکل ۶- نتایج آزمون حرارت‌نگاری نمونه صفحهٔ تخت کامپوزیتی دارای عیوب مصنوعی**

همان‌گونه که مشاهده می‌شود، همه عیوب ایجادشده در نمونه به‌خوبی در تصاویر حرارتی دیده می‌شوند. نکته قابل‌توجه در فرآیند آزمون حرارت‌نگاری، قابلیت انجام آزمون و کیفیت مناسب نتایج آزمون کل نمونه است که در یک مرحله انجام می‌گردد، به‌نحوی‌که محل و اندازه کلی عیوب با یک‌بار آزمایش در تمام سطح قابل‌تشخیص است.

نتایج تست نمونه صفحه انحنادار در شکل ۷ نشان داده‌شده است. ازآنجاکه در نمونهٔ منحنی، امکان گرفتن تصویر حرارتی از تمام نمونه به‌صورت یک‌باره وجود ندارد، محیط نمونه به چهار بخش تقسیم‌شده و آزمایش در هریک از این چهار بخش با یک سناریوی مشابه انجام‌شده است.




**شکل ۷- نتایج آزمون حرارت‌نگاری نمونه صفحهٔ منحنی کامپوزیتی دارای عیوب مصنوعی**

همان‌گونه که در تصاویر حرارتی قابل‌مشاهده است، عیوب در هر یک از بخش‌های چهارگانه نمونه به‌صورت تباین تصویر حرارتی قابل‌تشخیص است. مناطق تیره‌تر به معنی دمای پایین‌تر و یا وجود مانعی در مقابل انتقال آزاد حرارت تفسیر می‌شوند. به‌این صورت که انتقال حرارت در راستای عمق نمونه با وجود یک ناپیوستگی در زیرسطح مختل شده است. این ناپیوستگی در مناطق علامت‌گذاری شده، وجود عیوبی دست‌ساز را نشان می‌دهد. همچنین، در بخش‌های دیگر نمونه، جهت‌گیری الیاف کامپوزیت با خطوط تیره به‌وضوح قابل‌تشخیص است.

### ۳-۳- آزمون برشنگاری لیزری

اساس روش برشنگاری بر مبنای تداخل دو جبهه نور بازتابش شده از سطح جسم است که در معرض تابش یک نور تک‌رنگ قرارگرفته‌اند. تصویر حاصل از آزمون برشنگاری، یک الگوی هاله‌ای است که نشان‌دهنده نواحی هم‌کرنش در سطح قطعه می‌باشند. برای تشخیص‌پذیر نمودن عیوب در روش برشنگاری، باید به قطعه نوع مناسبی از بارگذاری اعمال گردد؛ بنابراین، انتخاب یک سیستم بارگذاری مناسب و اعمال صحیح بار، اهمیت فوق‌العاده‌ای در کارایی سیستم تشخیص عیوب دارد. برای انجام آزمون برشنگاری در قطعات موردنظر در این مقاله، از سیستم برشنگاری مبتنی بر تداخل‌گر مایکلسون استفاده‌شده است. این مجموعه با داشتن قابلیت‌های بسیار بالا، انعطاف‌پذیری لازم را برای شناسایی عیوب در قطعات و سازه‌ها با هندسه‌های مختلف دارد.

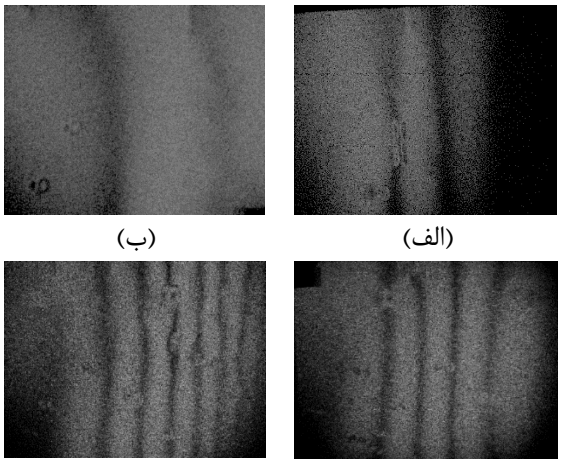
در انجام آزمون برشنگاری دیجیتالی، لازم است در ابتدا سناریوی تست انتخاب و آزمون براساس سناریوی انتخابی انجام گیرد. بنابراین، بر اساس تجربیات قبلی و پس از انجام تعداد زیادی تست اولیه، سناریوی آزمون مورداستفاده برای انجام تست نمونه تخت به‌صورت بارگذاری حرارتی تابشی با انرژی 3kW در مدت‌زمان 0.5s با برش افقی در جهت x به‌اندازه 5mm انجام شد:

همچنین سناریوی آزمون مورداستفاده برای تست نمونه صفحهٔ انحنادار به‌صورت مشابه ولی با انرژی 1kW صورت گرفت.

در شکل ۸ نمونهٔ صفحهٔ تخت کامپوزیتی به‌همراه فیکسچر تست و سیستم بارگذاری حرارتی ۳ کیلووات نشان داده‌شده است.

**شکل۸- نمونه صفحهٔ تخت کامپوزیتی به‌همراه سیستم بارگذاری ۳ کیلووات در آزمون برشنگاری لیزری**

بعد از آماده‌سازی چیدمان و انجام تست، تصویر گرفته‌شده از سطح جسم که حاوی اطلاعات قبل و بعد از جابه‌جایی‌های سطحی نمونه است، پردازش شد و نتایج به‌صورت الگوی هاله‌ای قابل‌مشاهده است. تصاویر برشنگاری مربوط به بخش‌های نمونه آزمون تخت، در شکل ۹ نشان داده‌شده است.

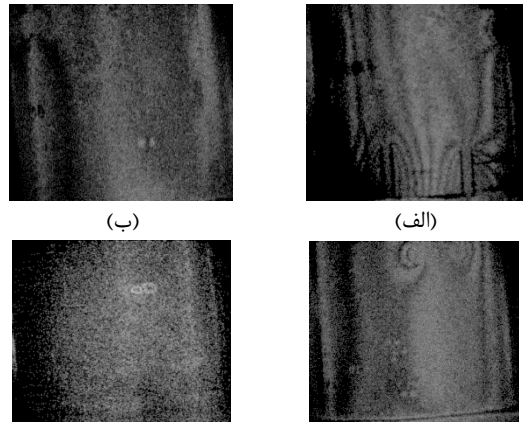


(الف) (ب) (ج) (د)

**شکل ۹- نتایج آزمون برشنگاری نمونهٔ صفحهٔ تخت کامپوزیتی دارای عیوب در قطاع‌های چهارگانه نمونه (الف) تا (د)**

همان‌گونه که مشخص است، در این روش مناطق معیوب به‌صورت تمرکز هاله‌های برشنگاری در بخش‌هایی از سطح صفحه تشخیص داده می‌شوند. بااین‌حال تفکیک دقیق عیوب مستلزم فرآیند پردازش ویژه تصویر است که پیچیدگی‌های زیادی داشته و مستلزم انجام آزمون‌های تکمیلی است. نتایج آزمون برشنگاری روی نمونه صفحهٔ انحنادار در شکل ۱۰ نشان داده‌شده است.

در برشنگاری سطح انحنادار نیز همان‌گونه که در تصاویر بالا مشخص است، برخی از عیوب به‌صورت تمرکز هاله‌ای تشخیص داده‌شده‌اند. بااین‌حال، به‌دلیل محدودیت برشنگاری در میدان دید در منحنی‌ها برای نتیجه‌گیری بهتر، لازم است زاویهٔ میدان دید کوچکتر شود که این محدودیت بزرگی در سرعت تست و همچنین کنترل و ثابت نگه‌داشتن شرایط تست ایجاد می‌کند. از طرفی، نتایج نشان دادند برشنگاری در این هندسه قابلیت ویژه‌ای در تشخیص‌پذیری ایجاد نمی‌کند و برخی از عیوب در بستر لکه‌های زمینه غیرقابل تشخیص هستند.




**شکل ۱۰- نتایج آزمون برشنگاری نمونه صفحهٔ انحنادار کامپوزیتی دارای عیوب در قطاع‌های چهارگانه ۹۰درجه (الف) تا (د)**

## ۴- ارزیابی نتایج و مقایسه روش‌ها

سه روشِ پرتونگاری، حرارت‌نگاری و برشنگاری در نمونه‌های تخت و انحنادار کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف کربن انجام گردید و نتایج به‌صورت تصاویر رادیوگرافی، دمانگاری و هاله‌های برشنگاری استخراج و مشاهده شد. نتایج تصاویر پرتونگاری نشان می‌دهند که این روش برای تشخیص حضور ذرات خارجی با یک جنس متفاوت در داخل کامپوزیت بسیار مناسب است. در نمونه آزمون تخت، وجود سوزن فلزی و یا براده فلز داخل لایه‌ها، با کیفیت بسیار بالایی شناسایی شد. حضور ورق‌های تفلون در داخل این نمونه نیز با محدودکردن میدان دید و انرژی منبع امکان‌پذیر است. بااین‌حال، چنانچه عیوب از جنس عدم پیوستگی بدون وجود یک عنصر خارجی باشد، پرتونگاری روش بهینه‌ای نخواهد بود. از طرفی در نمونه‌هایی که محدودیت هندسی مانند گوشه‌ها و یا داخل لوله‌های با قطر کوچک دارند، پرتونگاری نیازمند دسترسی به منابع اشعه مناسب است که یکی دیگر از محدودیت‌های این روش را بیان می‌کند.

روش حرارت‌نگاری با سناریوی تست فعال با انرژی تابشی، در نمونه آزمون تخت به‌خوبی تمامی عیوب را مشخص کرد. بااین‌حال به دلیل حساسیت بالای این روش به کیفیت بازتاب حرارتی در سطح نمونه؛ برای حصول نتایج بهتر، لازم است آماده‌سازی سطحی با ایجاد یک‌لایه پوشش رنگ حساس به حرارت انجام گیرد. زاویهٔ دید دوربین حرارتی و محل قرارگیری تجهیزات تابش‌دهی نیز از پارامترهای مهم در این آزمون هستند. بااین‌حال در نمونه آزمون تخت، تمامی عیوب به‌یک‌باره و در یک مرحله با کیفیت قابل قبولی با روش حرارت‌نگاری تشخیص داده شدند. این روش در تشخیص عیوب در نمونه منحنی نیز خوب عمل کرد و علاوه‌بر تشخیص مناطق معیوب با تباین حرارتی بالا، جهت‌گیری الیاف داخلی را نیز آشکار ساخت. می‌توان چنین جمع‌بندی نمود که در میان سه روش آزموده شده در این مقاله، حرارت‌نگاری بهترین نتایج را در تشخیص عیوب در صفحهٔ انحنادار و همچنین صفحهٔ تخت داشت.

نتایج روش برشنگاری، نشان‌دهندهٔ حساسیت بسیار بالای روش به تغییرات شکل سطحی و آشکارپذیری هرگونه ناپیوستگی زیرسطحی است. ۸۰ درصد از عیوب مصنوعی ایجاد شده در نمونه صفحهٔ تخت با روش برشنگاری تشخیص داده شد. بااین‌حال، به دلیل ایجاد هاله‌های زائد، برخی مناطق سالم نمونه نیز معیوب یا مشکوک تشخیص داده شد. این مسأله، قابلیت اطمینان تست و همچنین تکرارپذیری نتایج را کاهش می‌دهد. در آزمون نمونهٔ صفحهٔ انحنادار به‌روش برشنگاری، محدودیت‌های هندسی و همچنین محدودیت میدان دید سیستم برشنگاری، باعث حصول نتایج ضعیفتر نسبت به‌روش حرارت‌نگاری شد.

در حوزهٔ اندازه‌گیری کمی عیوب؛ روش پرتونگاری، به دلیل ایجاد مرزهای بسیار واضحتر، نسبت به دو روش دیگر (به‌ویژه برشنگاری) اولویت دارد. در پرتونگاری با قراردادن یک شاخص کیفیت تصویر سیمی از جنس استیل[1] و مقایسه کمی این شاخص، ابعاد عیب قابل تشخیص خواهد بود. همچنین، روش حرارت‌نگاری نیز با افزایش سرعت باردهی و تصویربرداری تعیین کمّی عیوب را افزایش می‌دهد. بااین‌حال، برشنگاری در تشخیص ابعاد عیوب بسیار محدودیت داشته و عملاً یک روش تشخیص کیفی محسوب می‌گردد.

## ۵- جمع بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله سه روش پرتونگاری، حرارت‌نگاری و برشنگاری در نمونه‌های کامپوزتی تقویت شده با الیاف کربن در دو هندسه صفحهٔ تخت و انحنادار انجام و نتایج عیب‌یابی به‌صورت مقایسه‌ای بررسی شد. عیوب مصنوعی

[1] IQI-Image Quality indicator

شامل ذرات خارجی و ناپیوستگی‌های داخلی، در مرحله ساخت در نمونه‌ها ایجاد و جهت ارزیابی قابلیت‌های روش‌های مختلف آزمون غیرمخرب، به صورت تجربی تست و مقایسه شد. در مجموع توانایی‌ها و محدودیت‌های روش‌های ذکر شده در شناسایی عیوب در نمونه‌های تخت و منحنی موردبررسی در این مقاله را می‌توان به شکل جدول ۱ خلاصه نمود.

**جدول ۱- جمع‌بندی نتایج آزمون‌های پرتونگاری، حرارت‌نگاری و برشنگاری نمونه‌های ورق تخت و منحنی شکل کامپوزیتی دارای عیوب**

| | پرتونگاری ایکس | | حرارت‌نگاری فروسرخ | | برشنگاری دیجیتالی | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | نمونه تخت | نمونه منحنی | هندسه تخت | هندسه منحنی | هندسه تخت | هندسه منحنی |
| ***تشخیص ذرات خارجی*** | بسیار خوب | نیازمند تجهیزات خاص | خوب | خوب | متوسط | ضعیف |
| ***تشخیص ناپیوستگی*** | ضعیف | نیازمند تجهیزات خاص | بسیار خوب | بسیار خوب | بسیار خوب | خوب |
| ***سرعت و دقت آزمون*** | خوب | نیازمند تجهیزات خاص | بسیار خوب | بسیار خوب | خوب | خوب |
| ***اندازه‌گیری کمّی عیوب*** | بسیار خوب | نیازمند تجهیزات خاص | خوب | خوب | ضعیف | ضعیف |
| ***تکرارپذیری*** | بسیار خوب | نیازمند تجهیزات خاص | بسیار خوب | بسیار خوب | متوسط | ضعیف |
| ***سهولت و ایمنی*** | ضعیف | نیازمند تجهیزات خاص | بسیار خوب | بسیار خوب | بسیار خوب | متوسط |
| ***کیفیت کلی نتایج*** | خوب | نیازمند تجهیزات خاص | بسیار خوب | بسیار خوب | خوب | ضعیف |

براساس مشاهده نتایج و در یک جمع‌بندی کلی، می‌توان روش حرارت‌نگاری فروسرخ را در هر دو هندسه تخت و منحنی به‌عنوان یک روش مناسب جایگزین روش‌های سنتی در نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن ارزیابی نمود. بااین‌حال چنانچه عیوب موردنظر بیشتر به شکل نفوذ و حضور ذرات خارجی باشند، همچنان روش پرتونگاری روش مناسبتری است. از طرفی در هندسه‌های پیچیده یا داخل لوله و غیره، روش پرتونگاری نیازمند تجهیزات خاص پرتودهی است که روش حرارت‌نگاری در این زمینه محدودیت کمتری دارد.

## ۶- منابع


[1] Lizaranzu M., Lario A., Chiminelli A., Amenabar I., 2015, "Non-destructive testing of composite materials by means of active thermography-based tools", *Infrared Physics & Technology*, Vol. 71, pp 113-120.

[2] Hung Y.Y., 1996., "Shearography for non-destructive evaluation of composite structures", *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 24, pp 161-182.

[3] KALARIYA Y., KASHFUDDOJA M., KHEDKAR S., UBAID J. and RAMJI M., 2014, "Applications of Digital Image Correlation Technique in Composite Research", *9th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanic*, 1-6 November, 2014, New Delhi, India.

[4] Onur Kas Y., Kaynak C., 2005, "Ultrasonic (C-scan) and microscopic evaluation of resin transfer molded epoxy composite plates", *Polymer Testing*, Vol. 24, pp. 114-120.

[5] H. A. Thajeel, 2014, Numerical modeling of infrared thermography techniques via ANSYS: *Missouri University of Science and Technology.*

[6] P. VENEGAS, R. USAMENTIAGA, L. VEGA, J. GUEREDIAGA, I. JORGE, I. LÓPEZ, I. S. DE OCÁRIZ, Image and Data Processing Techniques Applied to Infrared Thermographic Non-Destructive Inspections of Aeronautical Composite Components.

[7] C. Ibarra-Castanedo and X. Maldague, Review of pulse phase thermography, in: (SPIE Sensing Technology+ Applications, International Society for Optics and Photonics, 2015), pp. 94850T-94850T-94810.

[8] D. Akbari, N. Soltani, F. Reshadi, Application of digital shearography for non-destructive testing of materials with thermal loading, Modares Mechanical Engineering, 13 [4], 36 (2013). (in Persian)

[9] M. Mohamadi, D. Akbari, Evaluation of sub-surface cracks in polymer matrix composites with laser interferometric method, International Journal of Manufacturing Engineering, 2 [3], 11 (2015). (in Persian)