ISSN: 2476-6909; Modares Mechanical Engineering. 2022;22(05):311-322

Non-destructive Inspection of Subsurface Cracks in Carbon-fiber and Glass-fiber Reinforced Polymeric Materials Using Digital Shearography Method

ARTICLEINFO

Article Type
Original Research

Authors
Tizmaghz Nejad M. [1*],
Akbari D. [1]

How to cite this article
Tizmaghz Nejad M, Akbari D, Non-destructive Inspection of Subsurface Cracks in Carbon-fiber and Glass-fiber Reinforced Polymeric Materials Using Digital Shearography Method. Modares Mechanical Engineering. 2022;22(05):311-322.

[1] Faculty of Mechanical engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Correspondence
Address: Faculty of Mechanical engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

m.tizmaghz@modares.ac.ir

Article History
Received: September 11, 2021
Accepted: October 23, 2021
ePublished: March 20, 2022

ABSTRACT

Digital Shearography is one of the new methods of non-destructive testing based on the laser beam which is used to measure the surface displacement derivatives. In this method, relying on the interference of two laser waves reflected from the object surface, the displacement gradient of the deformed sample can be measured directly. So that it is possible to evaluate the industrial parts in a non-contact and full-field way with a high speed and accuracy. One of the significant advantages of this method is the ability to detect subsurface discontinuities in different materials, including composites. In this paper, samples with subsurface cracks made of composite materials reinforced with glass fibers and carbon fibers have been inspected by Digital Shearography testing. Also, the optimal values of each main parameter such as shear distance and loading size for each material have been obtained using the Taguchi experiment design. The results show that for each type of material there is an optimal amount of loading amount and shear distance, which if applied, the best test results are obtained.

Keywords Laser interferometry, Composites, Carbon fiber, Glass fiber, Crack defect

CITATIONLINKS

[1] Analysis of Laser Interfrometry Parameters in the Evaluation of Defects in the Polymer Matrix Composites [2] Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites [3] Shearography technology and applications [4] Nondestructive Testing Using Shearography [5] Numerical and experimental investigation of defect detection in polymer materials by ... [6] An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments [7] Application of shearography in nondestructive testing of composite plates [8] Shearography for non-destructive evaluation of composite structures [9] NDT capability of digital shearography for different materials [10] A new technique to detect defect size and depth in composite structures using digital shearography and ... [11] Nondestructive Evaluation of Internal Defects for Composite Materials by Using Shearography [12] Investigation of loading parameters in detection of internal cracks of composite material with digital shearography [13] Evaluation of sub-surface cracks in polymer matrix composites with laser interferometric method [14] Non-destructive evaluation of internal cracks in glass fiber-reinforced polymers using digital shearing interferometry [15] Investigation of Plane Defects in Carbon Fiber Reinforced Polymers Using Digital Shearography [16] Digital Shearography for Nondestructive Testing: Potentials, Limitations, and Applications [17] Non-destructive testing of aerospace composite materials using digital shearography [18] Simultaneous dual directional strain measurement using spatial phase-shift digital shearography [19] Simultaneous dual directional strain measurement using spatial phase-shift digital shearography [20] Application of Digital Shearography Technique for Crack Inspection in Carbon-Fiber and Glass-Fiber Reinforced Polymers [21] Localization of damage with speckle shearography and higher order spatial derivatives

Copyright© 2020, TMU Press. This open-access article is published under the terms of the Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License which permits Share (copy and redistribute the material in any medium or format) and Adapt (remix, transform, and build upon the material) under the Attribution-NonCommercial terms.

بازرسی غیرمخرب ترک‌های زیرسطحی در مواد مرکب زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف کربن و الیاف شیشه به کمک روش برشنگاری دیجیتالی

محمد تیزمغزنژاد*
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران
داود اکبری
دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

چکیده
برش‌نگاری دیجیتالی یکی از روش‌های نوین آزمون‌های غیرمخرب مبتنی بر نور لیزر است که برای اندازه‌گیری مشتق جابه‌جایی سطوح مورد استفاده قرار گرفته و به‌سرعت درحال توسعه و توانمندسازی می‌باشد. در این روش با تکیه بر تداخل امواج لیزر بازتاب شده از سطح جسم، گرادیان جابه‌جایی نمونه تغییرشکل یافته تحت نوعی از بارگذاری، به‌طور مستقیم اندازه‌گیری می‌شود. لذا امکان ارزیابی غیرتماسی و تمام میدانی قطعه با سرعت و دقت بالا فراهم می‌گردد. یکی از مزایای عمده این روش، توانایی آن در شناسایی عیوب زیرسطحی در مواد مختلف از جمله کامپوزیت‌ها است. در این مقاله نمونه‌های دارای ترک زیرسطحی از جنس مواد مرکب تقویت شده با الیاف شیشیه و الیاف کربن به کمک آزمون برش‌نگاری دیجیتالی مورد بازرسی قرار گرفته‌اند. همچنین مقادیر بهینه هر یک از پارامترهای اصلی برش‌نگاری شامل اندازه بارگذاری و فاصله برش، برای هر جنس با استفاده از طراحی آزمایش به روش تاگوچی بدست آمده است. نتایج نشان می‌دهد که برای هر نوع ماده‌ای یک مقدار بهینه از بارگذاری و اندازه برش وجود دارد که در صورت اعمال آن‌ها بهترین نتایج آزمون حاصل می‌گردد.

کلیدواژه‌ها: تداخل‌سنجی لیزری برشی، مواد مرکب، الیاف کربن، الیاف شیشه، عیب ترک

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۶/۲۰
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۸/۰۱
*نویسنده مسئول: m.tizmaghz@modares.ac.ir

۱- مقدمه
در سال‌های اخیر مواد مرکب به دلیل ویژگی‌های منحصر به‌فرد در صنایع مختلف از جمله صنایع هوایی، دفاعی و نیروگاهی به‌طور چشمگیری مورد توجه و توسعه قرار گرفته‌اند. مواد مرکب زمینه پلیمیری تقویت شده با الیاف باتوجه به خواص مکانیکی ویژه از جمله نسبت استحکام به وزن بالا، از رایج‌ترین مواد کامپوزیتی مورد استفاده در صنعت می‌باشند. این مواد به سبب ماهیت ناهمگن، چندساختاری بودن و شرایط خاص تولیدشان مستعد ایجاد انواع عیوب شامل خلل و فرج، لایه‌لایه شدن، عدم چسبنگی و انواع ترک‌ها، بیش از سایر مواد مهندسی نظیر فلزات و پلیمرها هستند. این عیوب ممکن است حین تولید و یا در حین کارکرد قطعه در لایه‌های داخلی ماده به صورتی که غیرقابل رویت باشد به وجود آمده و عملکرد قطعه را تحت تاثیر قرار دهد. از این رو بررسی و توسعه روش‌های بازرسی غیرمخرب مخصوص مواد مرکب، از اهمیت فراوانی برخوردار است. از طرفی خواصی همچون ناهمگنی و نارسانایی الکتریکی و مغناطیسی، ارزیابی مواد مرکب به‌وسیله آزمون‌های غیرمخرب مرسوم نظیر ذرات مغناطیسی، جریان‌های گردابی و فراصوتی را دشوار و ناممکن نموده است [1].

تداخل‌سنجی لیزری برشی یا برش‌نگاری، یکی از روش‌های نوین آزمون‌های غیرمخرب است که برای بازرسی و ارزیابی مواد مرکب مناسب می‌باشد. این روش که بر پایه نور لیزر و اصول تداخل‌سنجی استوار است، قابلیت ارزیابی ناحیه بزرگی از سطح مورد بازرسی را به صورت یکجا و در یک مرحله فراهم می‌نماید، لذا از مزایای عمده این روش می‌توان به غیرتماسی بودن، تمام‌ناحیه‌ای بودن، سرعت و دقت بالای آن اشاره کرد [2, 4]. همچنین از برتری‌های این روش نسبت به سایر روش‌های تداخل‌سنجی مانند تمام‌نگاری (Holography) و تداخلس‌سنجی الگوهای لکه‌ای (ESPI) می‌توان عدم نیاز به نور مرجع جهت ایجاد تداخل، کاهش طول همدوسی موردنیاز برای لیزر، محاسبه مستقیم کرنش‌های سطحی و در نتیجه کاهش حساسیت نسبت به ارتعاشات محیطی را نام برد که همین امر موجب استفاده روزافزون از این روش در محیط‌های صنعتی شده است [5, 6].

در برش‌نگاری با استفاده از تداخل امواج نور لیزر بازتاب شده از سطح جسم مورد آزمایش، یک تصویر لکه‌ای قبل و بعد از بارگذاری از سطح جسم ثبت می‌شود. شدت نور ثبت شده از سطح جسم تغییرشکل یافته بر اثر بارگذاری نمونه، نسبت به حالت اولیه اندکی تغییر خواهد کرد. با محاسبه تفاضل شدت نور این تصاویر یک الگوی هاله‌ای از سطح جسم بدست می‌آید که با تفسیر این الگوها می‌توان به سالم و یا معیوب بودن جسم موردنظر پی‌برد.

برش‌نگاری توسط لیندرتز (Leendertz) بر اساس تحقیقات وی در راستای توسعه روش تمام‌نگاری در سال ۱۹۷۰ معرفی شد و در ابتدا تداخل‌سنجی الگوی لکه‌ای تصویر برشی نام داشت. وی از این روش جهت محاسبه مشتقات جابه‌جایی سطح در راستای عمود بر صفحه استفاده نمود [1]. در سال ۱۹۷۳ برای نخستین بار لیندرتز و باترز (Butters) از این روش جهت اندازه‌گیري ممان خمشی در تیر استفاده کردند. در این کار آن‌ها ابتدا میزان شیب سطح را با استفاده از این روش تعیین کرده و سپس مقدار ممان خمشی در یک سطح نازک را به دست آوردند. نکته قابل توجه در این پژوهش، استفاده از تداخلگر مایکلسون برای ایجاد تصویر برشی بود [6].

همچنین تاکنون تحقیقاتی بر روی تشخیص عیوب در مواد پلیمری و کامپوزیت‌ها انجام پذیرفته است. توه و همکاران از روش برش‌نگاری برای تخمین ابعاد و عمق عیوب در مواد پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه استفاده نمودند. در این تحقیق آن‌ها نمونه را تحت بارگذاری از نوع خلاء قرار داده و گرادیان جابه‌جایی ایجاد شده در سطح را بررسی کردند. تشکیل گرادیان شدید جابه‌جایی سطحی در اطرف عیب، منشاء اصلی کاربرد روش برش‌نگاری

در یافتن عیوب توسط این محققین و سایر پژوهشگران بعد از ایشان می‌باشد. لذا با تحریک نمونه دارای عیب و بررسی گرادیان-های جابه‌جایی خارج از صفحه، عیوب نهفته در آن خود را به شکل هاله‌های فشرده در تصاویر هاله‌ای برش‌نگاری نشان می‌دهند [7].

هانگ و همکاران در خلال پژوهش جامعی که در سال ۱۹۹۶ بر روی بازرسی غیرمخرب عیوب گوناگون در مواد مرکب به‌وسیله برش-نگاری انجام دادند، علاوه بر عیوب رایج صفحه‌ای، در بخشی از تحقیقشان عیب ترک را در پره‌های توربین ساخته شده از کامپوزیت‌های حاوی ماتریس گرافیتی، شناسایی نمودند. همچنین ترک ماتریسی را در یک نمونه کامپوزیتی دیگر با موفقیت تشخیص دادند. لازم به ذکر است در این فعالیت‌ها از بارگذاری حرارتی جهت تحریک نمونه موردنظر استفاده کرده‌اند [8].

امکان بازرسی ترک و سوراخ‌های کف تخت در مواد پلیمري و فلزي به کمک بارگذاري حرارتی با استفاده از روش برش‌نگاري توسط لیو و همکاران بررسی شد. آنها با انجام آزمون‌هاي تجربی، حداقل نسبت قطر به عمق را براي قابل تشخیص بودن سوراخ موجود در صفحه آلومینیومی و پلیمري به‌وسیله روش برش‌نگاري بدست آوردند. همچنین بر اساس نتایج آنان چنانچه جهت برش عمود بر جهت ترک باشد، حساسیت برش‌نگاری به تشخیص ترک بیشتر است [9].

دی‌آنجلس و همکاران از بارگذاری دینامیکی ارتعاشی برای آشکار کردن سوراخ‌های کف تخت ایجادشده در اندازه‌ها و عمق‌های مختلف ورق‌های پلاستیکی تقویت شده با الیاف کربن استفاده کردند. در این مقاله به کمک ارائه یک روش تجربی عددی، با اندازه‌گیری پاسخ دینامیکی هر نقص به تنش‌های ارتعاشی اعمال شده، توانایی تشخیص عیوب با بکارگیری روش برش‌نگاری مورد بررسی قرار گرفت. آنها ثابت کردند که با افزایش عمق و کاهش قطر سوراخ‌ها فرکانس تشدید نمونه‌ها افزایش می‌یابد [10].

طی پژوهشی توسط چوی و همکاران، تشخیص عیوب لایه‌لایه شدن و عدم چسبندگی در عمق‌ها و لایه‌های مختلف ساختارهای کامپوزیتی الیاف کربنی بررسی شد. آن‌ها حدقل اندازه عیب و حداکثر عمق قابل تشخیص را تعیین نموده و روشی را برای تخمین اندازه عیب‌ها پیشنهاد نمودند [11].

اکبري و همکاران در پژوهشی به بررسی تشخیص ترك‌هاي زیرسطحی در کامپوزیت‌هاي شیشه اپوکسی با استفاده از بارگذاري مکانیکی به کمک روش برش‌نگاري پرداختند. آن‌ها نسبت بی-بعدي از بارگذاری به نمونه و استحکام تسلیم آن معرفی نمودند و محدوده بار مورد نیاز براي واضح و قابل تشخیص ساختن هاله-هاي تشکیل شده در آزمون برش‌نگاري را مشخص کردند [12].

همچنین در خلال پژوهشی که توسط محمدی و اکبری صورت گرفت، آنها به کمک آزمایشات تجربی و طراحی آزمایش و همچنین یک روش عددی، روش جدیدی را برای تخمین اندازه و عمق ترک‌ها در مواد پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه ارائه نمودند [13]. همچنین در پژوهشی دیگر توسط بناکار و اکبری، ارزیابی ترک‌های داخلی موجود در مواد مرکب تقویت شده با الیاف شیشه به کمک روش برش‌نگاری با استفاده از بارگذاری حرارتی بررسی شده است [14].

در پژوهشی توسط تیزمغزنژاد و همکاران، آن‌ها با بکارگیری روش برش‌نگاری دیجیتالی، عیوب صفحه‌ای به شکل سوراخ‌های کف تخت با قطرهای متفاوت و در عمق‌های مختلف را در مواد مرکب تقویت شده با الیاف کربن ارزیابی نمودند [15]. در مقاله دیگری توسط آن‌ها، ترک‌های داخلی موجود در پلیمرهای یکپارچه از جنس پی‌وی‌سی سبک در اندازه‌ها و زاویه‌های مختلف به‌وسیله روش برش‌نگاری دیجیتالی و بارگذاری حرارتی مورد بررسی قرار گرفتند.

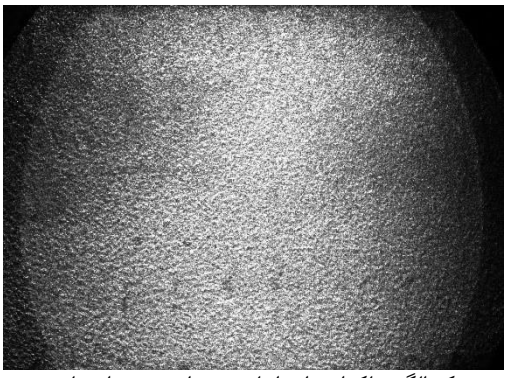
آن‌ها نشان دادند که برای ترک‌های زاویه‌دار بهتر است که جهت برش را به صورت ترکیبی از جهت‌های x و y در نظر گرفت [16]. در مقاله حاضر سعی برآن است که ضمن بهینه‌سازی پارامترهای اصلی برش‌نگاری شامل اندازه بارگذاری و فاصله برش، مقایسه‌ای بین نتایج بدست آمده برای هر دو جنس مواد مرکب تقویت شده با الیاف کربن و الیاف شیشه صورت بپذیرد.

با مطالعه پیشینه پژوهش‌ها می‌توان در یافت که بیشتر کارهای گذشته بر شناسایی عیوب صفحه‌ای و مواد مرکب تقویت شده با الیاف شیشه تمرکز داشته‌اند و لذا کمتر به بررسی ترک‌ها و حضور آن‌ها در مواد مرکب تقویت شده با الیاف کربن پرداخته شده است. از این رو، مقاله حاضر با تکیه بر اهمیت تشخیص و ارزیابی ترک‌ها در دو نوع ماده مرکب تقویت شده با الیاف‌های شیشه و کربن که بیشترین کاربرد را در صنایع حساس از جمله هوافضا و صنایع نظامی دارند، به بررسی این عیوب در مواد مذکور پرداخته است.

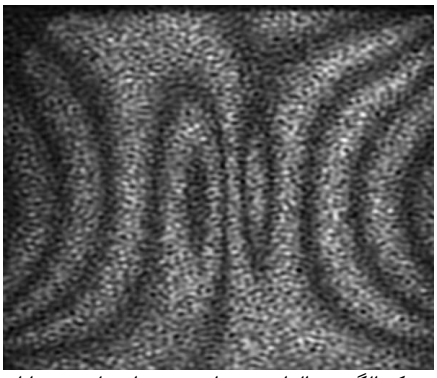
۲- اصول و مبانی برش‌نگاری

۲-۱- شرح روش

برش‌نگاري یکی از روش‌هاي تداخل‌سنجی لیزري است که بر مبنای تداخل دو جبهه نور لیزر بازتاب شده از سطح جسم عمل می‌کند و حاصل آن یک الگوی هاله‌ای (Fringe Pattern) بدست آمده از عملیات پردازش تصویر بر روی الگوهای تداخلی برشی (Speckle Pattern) از سطح جسم می‌باشد. تداخل موردنظر توسط یک دستگاه تداخل‌سنج مایکلسون ایجاد می‌شود که منجر به ایجاد یک تصویر لکه‌ای یا برشی حاصل از برهم‌نهی دو تصویر کاملا مشابه از سطح نمونه با اندکی جابه‌جایی عرضی نسبت به هم می-باشد. در شکل ۱ نمونه‌ای از یک الگوی تداخلی برشی یا تصویر لکه‌ای که حاوی نقاط تاریک و روشن است، مشاهده می‌شود. فرایند آزمون برش‌نگاری بدین‌گونه است که یک تصویر لکه‌ای قبل و یک تصویر لکه‌ای دیگر بعد از تغییرشکل ناشی از بارگذاری نمونه از سطح جسم تهیه می‌شود. با تفاضل ماتریس تصاویر لکه‌ای از



شکل ۱) تصویر یک الگوی لکه‌ای یا تداخلی مربوط به نمونه‌ای پلیمری دارای ترک زیرسطحی



شکل ۲) تصویر یک الگوی هاله‌ای مربوط به نمونه‌ای پلمیری دارای ترک زیرسطحی

یکدیگر در نرم‌افزار مناسب، یک الگوی هاله‌ای سیاه و سفید مطابق شکل ۲ تشکیل می‌گردد که نقاط روی هر هاله نشان دهنده نواحی همکرنش و دارای فاز یکسان است که با هاله مجاور خود به اندازه 2π رادیان اختلاف فاز دارد [17]. در نقاطی که عیب و یا ناپیوستگی وجود دارد، تمرکز تنش به‌وجود آمده و سبب افزایش گرادیان‌های جابه‌جایی صفحه‌ای در آن ناحیه می‌شود. در نتیجه از آنجا که برش‌نگاری کرنش‌های صفحه‌ای را ثبت می‌کند، با مشاهده و تفسیر الگوهای هاله‌ای می‌توان به وجود و یا عدم وجود عیب در قطعات موردنظر پی‌برد. از این رو، برش‌نگاری را می‌توان به‌طور موثر در شناسایی ترک‌های زیرسطحی به‌کار برد.

۲-۲- چیدمان و تجهیزات

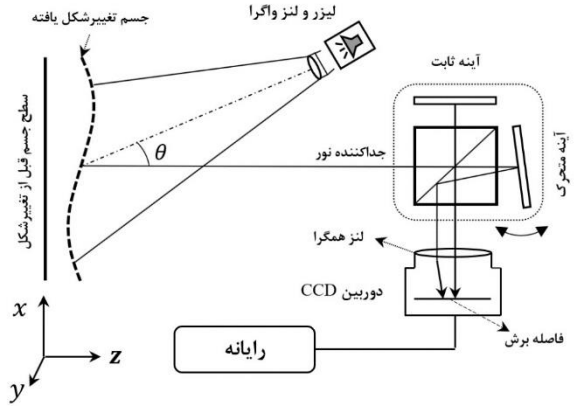
سیستم برش‌نگاری از کنار هم قرار گرفتن مجموعه ای از اجزاء مکانیکی و اپتیکی تشکیل شده است. به طوری که هر کدام از این اجزا به نوعی در فرایند تداخل پرتوها و ضبط تصاویر شرکت می‌کنند تا در نهایت یک الگوی هاله‌ای به دست آید. مکانیزم این مجموعه به این شکل است که ابتدا یک دسته نور همدوس و موازی از لیزر بر روی سطح نمونه تابانیده می‌شود، سپس امواج نور بارتاب شده از سطح جسم نسبت به نور تابیده شده اختلاف فاز پیدا می‌کند. این امواج پراکنده شده که همچنان به حالت همدوس باقی مانده‌اند، درحالت ناهم‌فاز تداخل سازنده و در حالت هم‌فاز تداخل ویرانگر ایجاد می‌نمایند. نور برگشتی لیزر حاصل از سطح نمونه، وارد مجموعه نوری موردنظر می‌شود که تداخل‌سنج مایکلسون (Michelson Interferometer) نام دارد. این مجموعه از یک مکعب شیشه‌ای جداکننده که پرتو نور را به دو قسمت تقسیم می‌کند و همچنین دو آینه تخت که یکی از آن‌ها ثابت و دیگری متحرک است تشکیل شده است. اندازه فاصله برش و جهت برش، به کمک دوران آینه متحرک حول محورهای x و y قابل تنظیم است. چیدمان برش‌نگاری مورد استفاده در پژوهش حاضر شامل یک دوربین CCD با رزولوشن ۳/۲ مگاپیکسل، تداخل‌سنج مایکلسون، یک عدد لیزر تک رنگ با طول موج ۶۵۵ نانومتر و توان ۳۵ میلی‌وات و همچنین یک سیستم رایانه به‌منظور ذخیره و پردازش تصاویر می‌باشد. تصاویر حاصل از مکانیزمی که شرح داده شد، همانطور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، یک تصویر لکه‌ای یا الگوی تداخلی برشی حاوی نقاط تیره و روشن است که بیانگر تداخل نقطه به نقطه دو تصویر روی هم افتاده یا به اصطلاح برش خورده می‌باشد. لذا به همین دلیل برش‌نگاری را تداخل‌سنجی لیزری برشی نیز می‌نامند. این الگوهای تداخلی حاصل ترکیب دو تصویر کاملا مشابه منتها با کمی جابه‌جایی عرضی نسبت به هم می‌باشد که به کمک تنظیم میزان فاصله برش توسط آینه متحرک موجود در مجموعه تداخل‌سنج مایکلسون انجام می‌گیرد. شکل ۳ شماتیکی از چیدمان کلی روش برش‌نگاری دیجیتالی را ارائه می‌دهد.

۲-۳- معادلات حاکم

برش‌نگاری با ثبت تغییرات شدت نور بازتابی از سطح جسم که ناشی از بارگذاري و تغییرشکل آن و متعاقبا تغییر مسیر نوری لیزر است، قادر است اطلاعاتی در خصوص گرادیان جابه‌جایی سطح ارائه دهد. همانطور که ذکر شد برای ایجاد الگوی هاله‌ای موردنیاز لازم است دو تصویر لکه‌ای قبل و بعد از تغییرشکل سطح جسم تهیه شود، لذا شدت نور ثبت شده در دوربین CCD پس از تداخل دو تصویر از رابطه زیر بدست می‌آید[3, 18] :

$$I = 2I_0[1 + \gamma . \cos\varphi(x,y)] \quad (۱)$$

که در آن I شدت نور تداخلی، I_0 شدت نور متوسط زمینه، γ مدول



شکل ۳) شماتیک چیدمان و نحوه قرار گرفتن اجزاء نوری در تداخل‌سنجی لیزری

تداخل و φ اختلاف فاز تصادفی بین تصاویر برش خورده در هر نقطه می‌باشد. شدت نور ثبت شده توسط حسگر دوربین CCD ، مطابق شکل ۳ حاصل بازتاب امواج نوری بازتابی از دو نقطه روی سطح نمونه است که به اندازه فاصله برش از یکدیگر جدا شده‌اند. هرگونه تغییرشکل ناشی از اعمال بارگذاری بر روی نمونه منجر به ایجاد جابه‌جایی سطحی در نمونه خواهد شد. لذا ایجاد اختلاف در مسیر موج نور از سطح جسم تا صفحه دوربین، باعث اختلاف فاز امواج رسیده به هر نقطه شده و تغییر شدت نور تصویر را در پی دارد. شدت نور تداخلی در هر نقطه از الگوي لکه‌اي پس از اعمال بارگذاري و تغییرشکل سطحی در نمونه، به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$I' = 2I_0[1 + \gamma . \cos(\varphi'(x,y) + \Delta)] \quad (۲)$$

که در آن $\varphi'(x,y)$ اختلاف فاز تصاویر برش خورده پس از بارگذاری نمونه و Δ تغییرفاز هر نقطه ناشی از تغییرشکل نسبی می‌باشد. با محاسبه اختلاف بین شدت نور قبل و بعد از بارگذاری، هاله‌های برش‌نگاری با شدت نور جدید به صورت زیر محاسبه می‌گردد:

$$I_s = I' - I = 4I_0\gamma\left[sin\left(\varphi + \frac{\Delta}{2}\right) + sin\left(\frac{\Delta}{2}\right)\right] \quad (۳)$$

که در آن شدت نور (I_s) در هر پیکسل اندازه‌گیری می‌شود و بر اساس آن جابه‌جایی سطح بدست خواهد آمد. از آنجا که تصویر نمی‌تواند مقادیر روشنایی منفی اختیار کند، قدرمطلق I_s برای نمایش الگوی هاله‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد [21]. چنانچه $\Delta =$ $2n\pi$ باشد که در آن $n = 0,1,2, \dots$ شماره هاله‌ها را مشخص می‌کند، اگر مقدار I_s صفر شود، هاله‌های تاریک مشاهده می‌گردد. بین هر دو هاله تاریک متوالی، یک منطقه روشن ایجاد می‌شود که در نتیجه آن، یک الگوی هاله‌ای روشن و تاریک متوالی تشکیل می‌شود. از طرفی وجود مقدار $sin\left(\varphi + \frac{\Delta}{2}\right)$ در معادله (۳) که فاز تصادفی ناشی از تداخل اولیه می‌باشد، باعث پدید آمدن نویز شدیدی در الگوها می‌شود. کاهش کیفیت هاله‌ها در نقاط حساس، باعث ایجاد دشواری در تشخیص الگوهای اصلی می‌گردد. مقداری از نویز ایجاد شده را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف پردازش تصاویر مانند فیلترینگ کاهش داد.

اگر زوایای تابش و بازتابش تقریبا هم‌راستا بوده و عمود بر سطح نمونه باشند، سیستم برش‌نگاری تنها به مشتقات جابه‌جایی خارج از صفحه حساس خواهد بود. در این حالت مشتق جابه‌جایی خارج از صفحه برابر خواهد بود با:

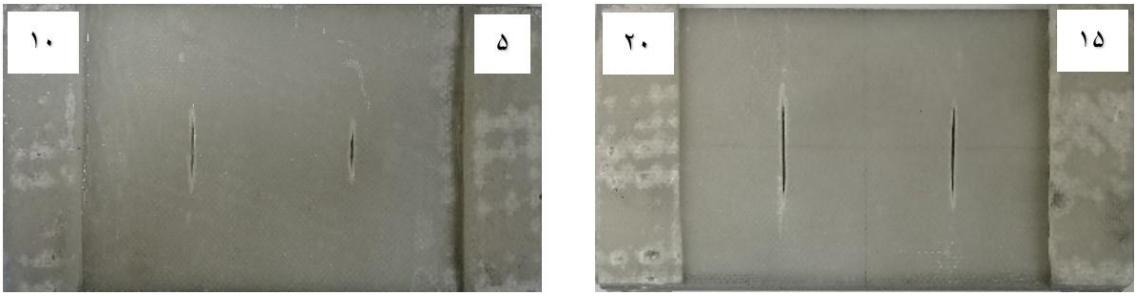
$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda\Delta}{4\pi\delta x} \quad (۴)$$

بنابراین در این حالت می‌توان با اعمال بارگذاری مناسب خارج از صفحه، گرادیان خارج از صفحه مناسب برای تشخیص‌پذیر نمودن عیوب زیرسطحی را ایجاد کرد. تحلیل کمی هاله‌های برش‌نگاری و گرادیان خارج از صفحه ایجاد شده، می‌تواند معیاری برای اندازه-گیری و یا پیش‌بینی مقدار بارگذاری لازم باشد.

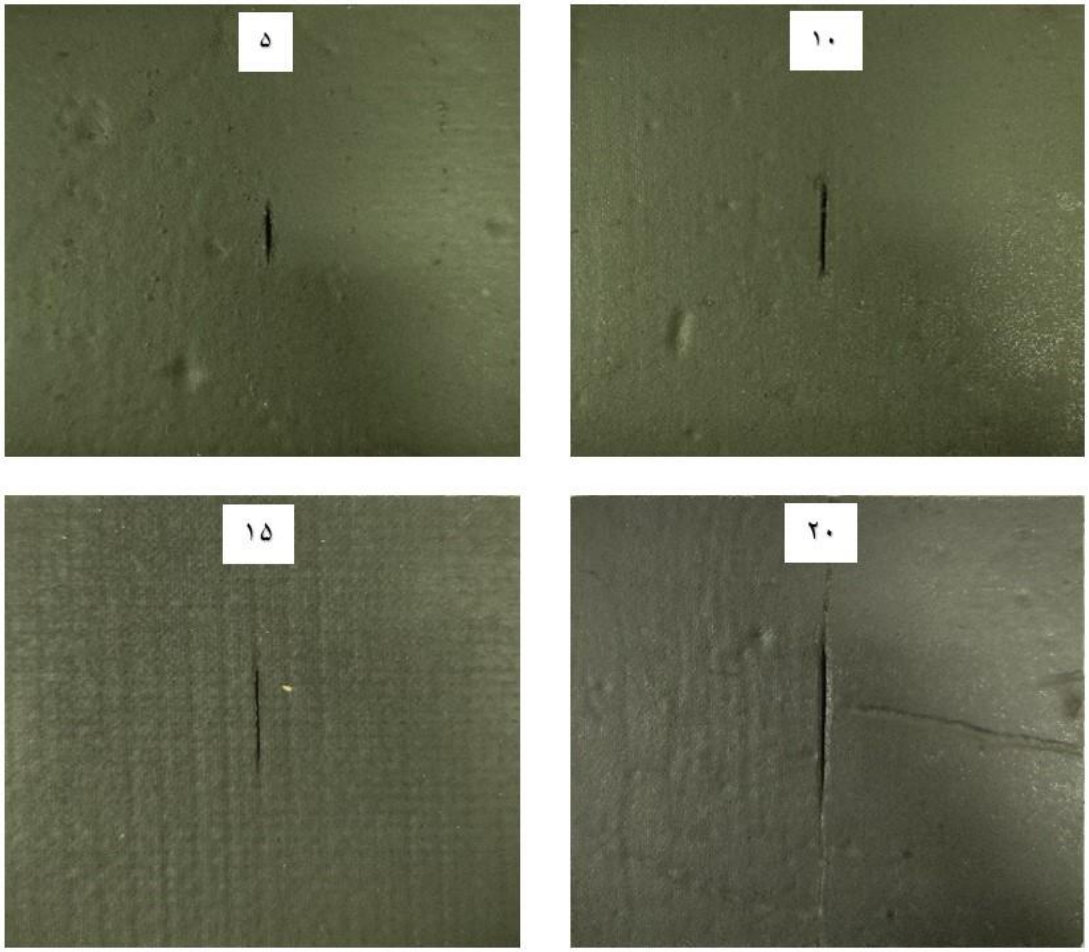
۳- مواد و روش تحقیق

۳-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها و مشخصات ترک‌ها

نمونه‌های مورد نیاز جهت آزمایش از دو جنس مواد پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه و مواد پلیمری تقویت شده با الیاف کربن تهیه شدند. برای ساخت این نمونه‌ها از یک نوع رزین اپوکسی به عنوان ماتریس استفاده شد. نسبت وزنی ترکیب رزین و سخت کننده ۱۰۰ به ۲۰ در نظر گرفته شده است. همچنین روش ساخت برای هر دو جنس لایه‌نشانی دستی درنظر گرفته شد و عملیات پخت آن در هوای آزاد تحت شرایط یکسان انجام پذیرفت. جهت ساخت نمونه‌های تقویت شده با الیاف شیشه از ۲۴ لایه پارچه الیاف ریزبافت شیشه در دو جهت ۰ و ۹۰ درجه استفاده شد و سپس نمونه‌هایی در ابعاد ۳×۴۰×۱۰۰ میلی‌متر مکعب توسط واترجت از قطعه اولیه جدا شد. سپس مطابق شکل ۴، چهار ترک عرضی به طول ۵ ، ۱۰ ، ۱۵ ، ۲۰ میلی‌متر در عمق یکسان حدود ۱ میلی‌متر و بر روی دو نمونه مستقل ایجاد گردید. برای ساخت نمونه‌های تقویت شده با الیاف کربن نیز از ماده زمینه یکسان و همچنین روش و شرایط تولید مشابه استفاده شد، با این تفاوت که در این نمونه‌ها ۱۰ لایه پارچه الیاف کربن تک جهته مورد استفاده قرار گرفت. مطابق شکل ۵، ترک‌های عرضی به طول ۵ ، ۱۰ ، ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر و در عمق حدود ۱ میلی‌متری بر روی چهار نمونه به ابعاد ۳×۷۰×۷۰ میلی‌متر مکعب ایجاد شدند. برای ایجاد تمام ترک‌ها، از یک تیغه برشی به ضخامت ۰/۳ میلی‌متر استفاده شد. لازم به ذکر است که در پژوهش‌های قبلی، بازرسی ترک در مواد مرکب تقویت شده با الیاف شیشه مورد مطالعه گرفته است. لذا در پژوهش حاضر تمرکز اصلی بر شناسایی ترک‌ها در مواد مرکب تقویت شده با الیاف کربن می‌باشد [1, 12-15]. در جدول ۱ مشخصات مکانیکی نمونه‌های مذکور نشان داده شده است.



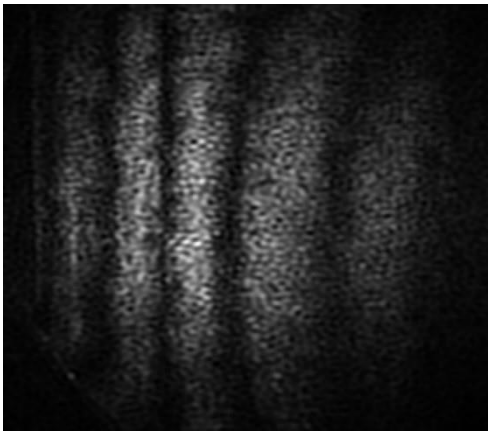
شکل ۴) نمونه‌های دارای ترک زیرسطحی از جنس مواد مرکب تقویت شده با الیاف شیشه



شکل ۵) نمونه‌های دارای ترک زیرسطحی از جنس مواد مرکب تقویت شده با الیاف کربن

جدول ۱) خواص مکانیکی نمونه‌های مواد مرکب تقویت شده با الیاف شیشه و الیاف کربن

ویژگی	ماتریس	الیاف شیشه	الیاف کربن
مدول الاستیک (GPa)	۳/۲۱	۷۱/۷	۲۳۵
مدول برشی (GPa)	۱/۲	۲۸/۹	۱۵
ضریب پواسون	۰/۳۳	۰/۲۴	۰/۲۷
چگالی (Kg/m3)	۱۲۰۰	۲۵۴۰	۱۸۰۰
نسبت حجمی (%)	۶۵	۳۵	۳۵



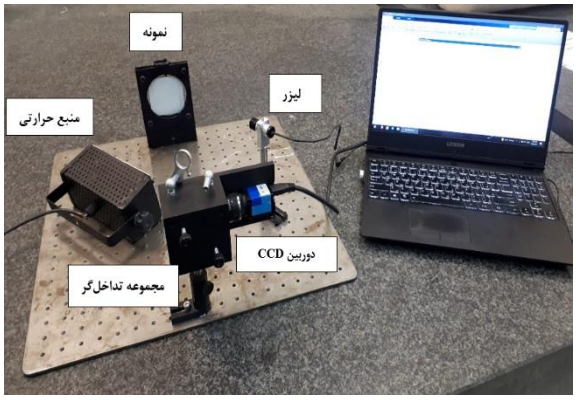
شکل ۶) تصویر یک الگوی هاله‌ای حاصل از یک نمونه سالم از جنس کامپوزیت الیاف کربن

به جهت اطمینان از سالم بودن نمونه‌های اولیه کامپوزیتی، هرکدام از نمونه‌ها قبل از ترک‌دار شدن به طور مجزا توسط دو روش حرارت‌نگاری و برش‌نگاری تحت بارگذاری حرارتی مورد بازرسی قرارگرفتند. در هیچ کدام از روش‌های مذکور نشانه‌ای از وجود عیب مشاهده نشد و در تصاویر برش‌نگاری تنها هاله‌های موازی که حاکی از سالم بودن نمونه است ملاحظه گردید. شکل زیر الگوی هاله‌ای حاصل از یک نمونه سالم از جنس کامپوزیت الیاف کربن را نشان می‌دهد.

۳-۲- بارگذاری

نوع و شرایط بارگذاری یکی از عوامل مهم در روش‌های غیرمخرب مبتنی بر تداخل‌سنجی است. در مطالعات قبلی اغلب از بارگذاری مکانیکی جهت تحریک نمونه‌های دارای ترک استفاده شده است و بارگذاری حرارتی برای عیوب ریز مانند ترک کمتر مورد توجه قرار گرفته است. بارگذاری مکانیکی به دلیل نیازمندی به فیکسچربندی صحیح و همچنین عدم امکان کنترل مناسب، عموما در تست‌های عملیاتی گرینه مناسبی نمی‌باشد. لذا در این مقاله جهت رفع برخی از این محدودیت‌ها از بارگذاری به روش حرارتی استفاده شده است. از اصلی‌ترین مزایای این روش می‌توان به سهولت و غیرتماسی بودن آن اشاره کرد. همچنین در تحریک مکانیکی جهت

بارگذاری به عنوان یک عامل موثر دیگر در نتایج آزمون، بر پیچیدگی کار می‌افزاید. بدین منظور مطابق شکل ۷ یک لامپ هالوژنی ۱۰۰۰ واتی جهت اعمال بارگذاری حرارتی، مورد استفاده قرار گرفته است. منبع حرارتی مورد استفاده قادر است که در یک ثانیه دمای نمونه کامپوزیتی الیاف شیشه را از دمای محیط به ۲۷ درجه و دمای نمونه کامپوزیتی الیاف کربن را به ۲۹ درجه ارتقا دهد. لازم به ذکر است که با توجه به حساسیت بالای چیدمان برش‌نگاری نسبت به جابه‌جایی‌ها، این روش قادر به ثبت کوچک‌ترین تغییرات در جابه‌جایی سطح می‌باشد و لذا زمان و شرایط بارگذاری حرارتی باید کاملا کنترل شده و آهسته باشد.



شکل ۷) چیدمان حرارتی روش برش‌نگاری مورد استفاده

۳-۳- طراحی آزمایش:

در مقاله حاضر علاوه بر ارزیابی و بررسی ترک‌های داخلی در مواد مرکب تقویت شده با الیاف کربن برای اولین بار، سعی بر آن است که مقایسه‌ای بین تاثیر جنس الیاف مورد استفاده در ساخت ماده مرکب بر پارامترهای اصلی برش‌نگاری شامل مقدار بارگذاری و اندازه فاصله برش انجام گیرد. بدین منظور ابتدا محدوده‌ای از مقادیر باگذاری و فاصله برش برای هر یک از ترک‌ها با طول‌های متفاوت در کامپوزیت‌های الیاف شیشه‌ای و الیاف کربنی مشخص شد. به‌منظور تعیین میزان تشخیص‌پذیری هر ترک در هر جنس و همچنین بهینه‌سازی دو پارامتر قابل کنترل اصلی شامل میزان بارگذاری و فاصله برش، از طراحی آزمایش به روش تاگوچی در نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شد. در این روش سه عامل موثر و اصلی طول ترک، میزان بارگذاری و اندازه فاصله برش به عنوان متغیرهای اصلی نسبت به هم مورد مقایسه قرار گرفتند. مطابق جدول ۲ و ۳ برای هر پارامتر ٤ سطح در نظر گرفته شد، سپس تعدادی آزمایش تحت شرایط مشخص برای هر جنس معرفی شد. با توجه به عرضی بودن همه ترک‌ها، بدیهی است که جهت برش در راستای x و عمود بر جهت ترک‌ها انتخاب شد چراکه طبق پژوهش‌های قبلی هرچه زاویه جهت عیب و جهت برش برهم عمودتر باشند حساسیت برش‌نگاری به تشخیص عیب بیشتر می‌شود [1, 16, 19].

جدول ۲) سطوح پارامترهای مورد بررسی برای نمونه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
طول ترک (mm)	۵	۱۰	۱۵	۲۰
اندازه برش (mm)	۳	۵	۷	۹
اندازه بارگذاری (second)	۲	۳	۴	۵

جدول ۳) سطوح پارامترهای مورد بررسی برای نمونه‌های کامپوزیتی الیاف کربن

پارامتر	سطح ۱	سطح ۲	سطح ۳	سطح ۴
طول ترک (mm)	۵	۱۰	۱۵	۲۰
اندازه برش (mm)	۳	۵	۷	۹
اندازه بارگذاری (second)	۲	۴	۶	۸

جدول ٤ فهرست آزمایش‌های طراحی شده را نشان می‌دهد. خروجی آزمایش‌ها میزان توانایی روش در تشخیص ترک از روی تصاویر هاله‌ای حاصل از هر آزمایش در نظر گرفته شد. بدین معنی که هرچه تشخیص ترک از طریق تصویر هاله‌ای موردنظر راحت‌تر و واضح‌تر باشد، تشخیص‌پذیری و کیفیت هالهٔ موردنظر بیشتر می‌باشد. بدین منظور از نسبت سیگنال به نویز جهت بررسی و تحلیل نتایج و خروجی‌ها استفاده شد. این نسبت بیانگر میزان حساسیت خروجی به پارامترهای بررسی شده می‌باشد. در همین راستا ویژگی انتخاب شده در نرم‌افزار مینی‌تب جهت تحلیل خروجی آزمایش‌های موردنظر، از نوع مقادیر بزرگتر-بهتر در نمودار نسبت سیگنال به نویز انتخاب شد. با توجه به اینکه مقدار بیشتر نسبت سیگنال به نویز، نشان دهنده مقادیر کمتر واریانس حاصل شده از نتایج پیرامون مقدار هدف می‌باشد، هرچه این نسبت بیشتر باشد، به این معنی است که ترک موردنظر بهتر تشخیص داده شده است. درنتیجه بدیهی است که مقدار سیگنال به نویز بزرگتر نمایان‌گر تشخیص‌پذیری بیشتر است. پس از انجام تمام آزمایش‌های جدول ٤، نمودار نسبت سیگنال به نویز برای هر پارامتر بدست آمد و مقدار بهینه پارامترهای قابل تنظیم اندازه بارگذاری و فاصله برش تعیین شد.

۴- نتایج و بحث

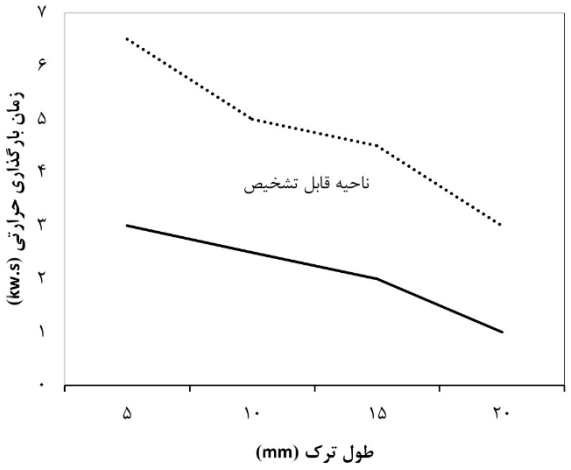
در تداخل‌سنجی لیزری، چهار پارامتر اصلی اندازه عیب، میزان بارگذاری، فاصله برش و جهت برش از اصلی‌ترین عوامل موثر در نتایج هستند. در این مقاله با عرضی در نظر گرفتن تمام ترک‌ها و ثابت نگه‌داشتن جهت برش در راستای عمود بر آن‌ها، عملا جهت برش به عنوان یکی از متغیرهای اصلی حذف شد. از این رو، دو پارامتر مهم اندازه بارگذاری و فاصله برش به عنوان متغیرهای قابل کنترل به‌وسیله چیدمان برش‌نگاری مورد تحلیل و بررسی قرار گرفتند. بر اساس نتایج تجربی میزان بارگذاری اگر بیش از حد اعمال شود، کرنش‌های سطحی زیادی در ناحیه عیب آزاد می‌شود و لذا فشردگی و تعداد هاله‌ها افزایش یافته و تشخیص ترک دشوار

جدول ۴) فهرست آزمایش‌های طراحی شده

مقادیر ثابت			کامپوزیت‌های الیاف شیشه			کامپوزیت‌های الیاف کربن		
طول ترک (mm)	اندازه برش (mm)	شماره آزمایش (L)	اندازه بارگذاری (s)	نسبت سیگنال به نویز (SNR)	شماره آزمایش (L)	اندازه بارگذاری (s)	نسبت سیگنال به نویز (SNR)
۵	۳	L۱	۲	۱۹/۰۸۴۹	L۱	۲	۱۵/۵۶۳۰
۵	۵	L۲	۳	۲۲/۲۷۸۹	L۲	۴	۲۰/۰۰۰۰
۵	۷	L۳	۴	۲۲/۹۲۲۶	L۳	۶	۹/۵۴۲۴
۵	۹	L۴	۵	۲۰/۸۲۷۹	L۴	۸	۶/۰۲۰۶
۱۰	۳	L۵	۳	۲۰/۸۲۷۹	L۵	۴	۲۰/۰۰۰۰
۱۰	۵	L۶	۲	۲۳/۵۲۱۸	L۶	۲	۲۰/۸۲۷۹
۱۰	۷	L۷	۵	۲۳/۵۲۱۸	L۷	۸	۱۹/۰۸۴۹
۱۰	۹	L۸	۴	۲۲/۲۷۸۹	L۸	۶	۲۱/۵۸۳۶
۱۵	۳	L۹	۴	۲۲/۲۷۸۹	L۹	۶	۲۳/۵۲۱۸
۱۵	۵	L۱۰	۲	۲۳/۵۲۱۸	L۱۰	۸	۲۲/۹۲۲۶
۱۵	۷	L۱۱	۵	۲۳/۵۲۱۸	L۱۱	۲	۲۲/۲۷۸۹
۱۵	۹	L۱۲	۳	۲۴/۰۸۲۴	L۱۲	۴	۲۱/۵۸۳۶
۲۰	۳	L۱۳	۵	۲۱/۵۸۳۶	L۱۳	۸	۲۱/۵۸۳۶
۲۰	۵	L۱۴	۴	۲۲/۹۲۲۶	L۱۴	۶	۲۳/۵۲۱۸
۲۰	۷	L۱۵	۳	۲۴/۶۰۹۰	L۱۵	۴	۲۴/۰۸۲۴
۲۰	۹	L۱۶	۲	۲۶/۰۲۰۶	L۱۶	۲	۲۴/۳۴۹۷

می‌گردد. همچنین اگر این مقدار کم در نظر گرفته شود تعداد و تراکم هاله‌ها کاهش یافته و تشخیص عیوب امکان‌پذیر نمی‌باشد. فاصله برش نیز اگر بزرگتر از اندازه ترک تنظیم شود، شناسایی آن دشوار شده و گاها غیر ممکن است. بر اساس نتایجی که از تست‌های تجربی بدست آمد، معمولا بهتر است که کمتر از اندازه عیب در نظر گرفته شود. در همین راستا محدوده‌ای به نام ناحیه قابل تشخیص برای هر کدام از پارامترهای بارگذاری و فاصله برش تعیین شد. طبق نمودارهای شکل ۸ و ۹ طی آزمایشات متعدد، محدوده‌ای از بارگذاری یا به‌عبارت دیگر محدوده‌ای قابل تشخیص از بارگذاری برای هر کدام از ترک‌های موجود در نمونه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه و الیاف کربن تعیین شد که در آن ترک موردنظر قابل شناسایی است. همچنین در شکل‌های ۹ و ۱۰ نیز محدوده‌ای مشابه برای اندازه یا فاصله برش تعیین شد که در آن ناحیه تشخیص ترک موردنظر امکان‌پذیر بود. بر اساس نتایج آزمایشگاهی، چنانچه مقادیر مذکور از ناحیه قابل تشخیص تجاوز کند، ترک‌ها در هاله‌های برش‌نگاری آشکار نمی‌شوند.

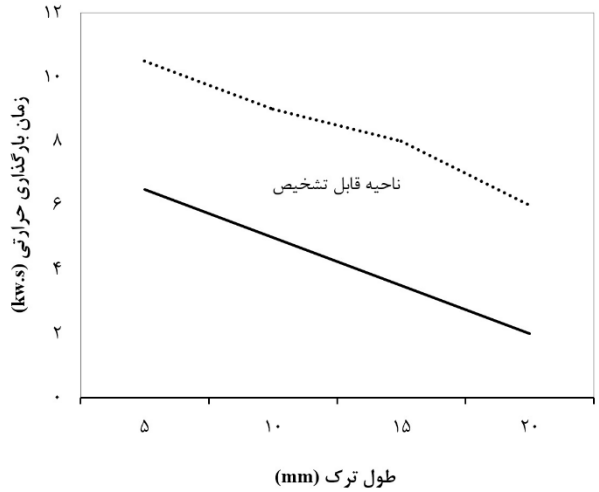
همانطور که از نمودارها به صورت کمی مشاهده می‌شود، نتایج برش‌نگاری برای هر دو جنس مواد مرکب تقویت شده با الیـــاف کربن و الیاف شیشه نشان می‌دهد که ترک‌های با طول بزرگ‌تر در محدوده وسیع‌تری از بارگذاری قابل رویت می‌باشند و همچنین به مقدار بارگذاری کمتری برای آشکارشدن نیاز دارند. در مقابل ترک‌های کوچک‌تر محدوده‌ای کوچک‌تری از بارگذاری را به خود اختصاص داده‌اند و این بدین معنا است که شناسایی آن‌ها دشوارتر است. به عبارت دیگر ترک‌های کوچک‌تر تشخیص‌پذیری کمتری دارند و برعکس. فاصله برش نیز دیگر متغیر مورد بررسی در این مقاله است. طبق نمودارهای ذیل اندازه ترک رابطه



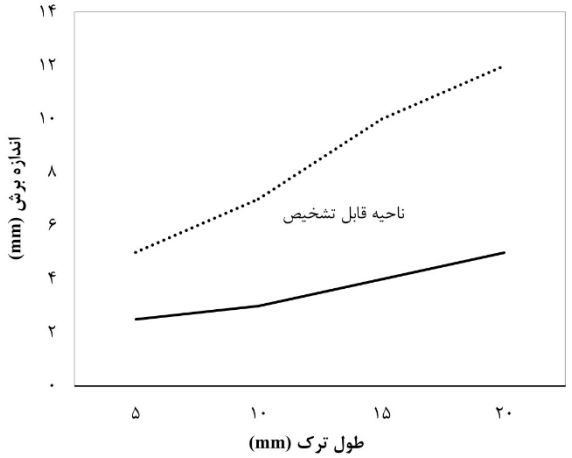
شکل ۸) ناحیه قابل تشخیص اندازه بارگذاری برای ترک‌های موجود در نمونه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه

مستقیمی با فاصله برش دارد، به‌نحوی که هرچه طول ترک بیشتر باشد به مقدار بیشتری از فاصله برش جهت تشخیص عیب نیاز است. بر همین اساس واضح است که محدوده قابل تشخیص برای ترک‌های با طول کمتر، کوچک‌تر می‌باشد و این نیز بدین معنا است که ترک‌های کوچک‌تر تشخیص‌پذیری کمتری دارند.

در برش‌نگاری، جنس نمونه می‌تواند بر پارامترهای روش و متعاقبا بر نتایج آزمایش تاثیرگذار باشد. در مقاله حاضر برای بررسی تاثیر جنس الیاف مورد استفاده در ساخت نمونه‌های کامپوزیتی بر تشخیص‌پذیری ترک‌ها، پارامترهای قابل تنظیم چیدمان برش‌نگاری مورد مقایسه قرار گرفتند. بدین منظور سه پارامتر تاثیرگذار در نتایج از جمله طول ترک، اندازه بارگذاری و فاصله برش بهینه‌سازی شدند. در همین راستا همانطور که در بخش طراحی آزمایش ذکر شد، تعدادی آزمایش در نرم‌افزار مینی‌تب به روش



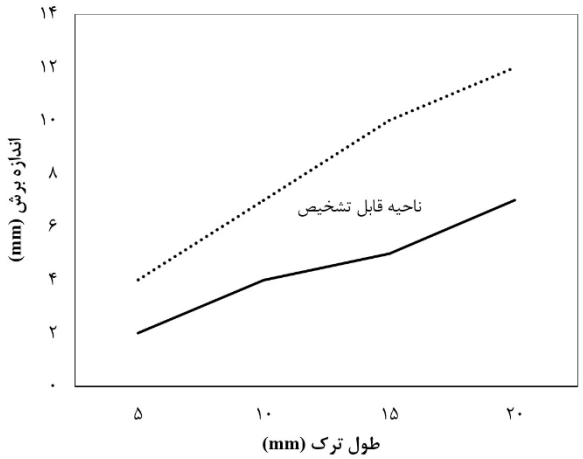
شکل ۹) ناحیه قابل تشخیص اندازه بارگذاری برای ترک‌های موجود در نمونه‌های کامپوزیتی الیاف کربن



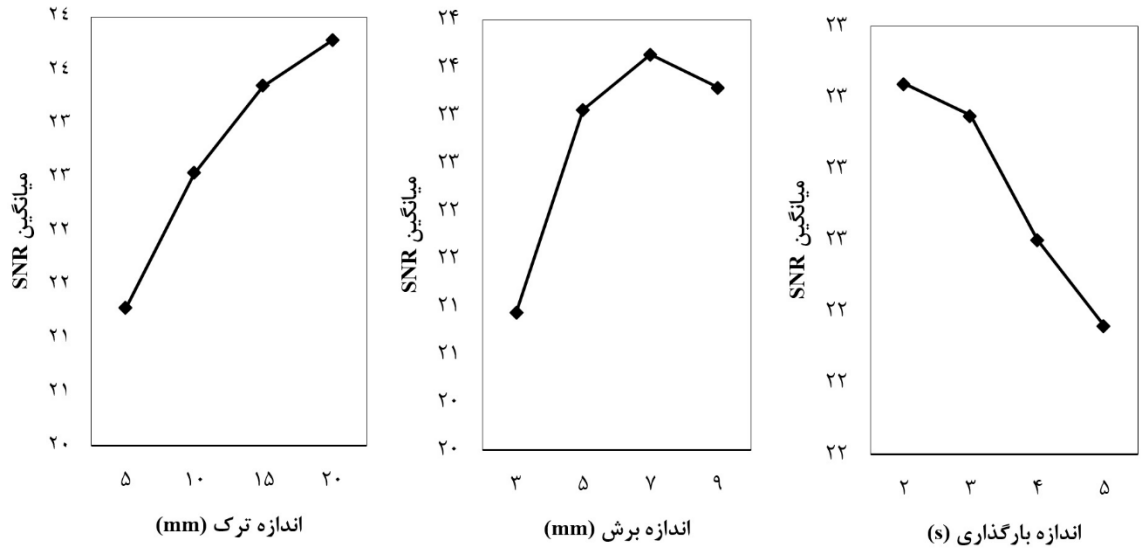
شکل ۱۰) ناحیه قابل تشخیص اندازه برش برای ترک‌های موجود در نمونه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه

تاگوچی طراحی شد. سه پارامتر طول ترک، اندازه بارگذاری و فاصله برش در چهار سطح نسبت به یکدیگر مقایسه شدند و جمعا ۳۲ آزمایش برای نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن و الیاف شیشه معرفی شد. با انجام تمام آزمایش‌ها تشخیص‌پذیری عیوب به عنوان خروجی هر آزمایش در نظر گرفته شد. از نسبت سیگنال به نویز برای تحلیل و بررسی نتایج و بهینه‌سازی پارامترها استفاده شد. به گونه‌ای که هر چه مقدار آن بزرگتر باشد به این معنی است که ترک به خوبی شناسایی شده است. در نهایت نمودارهای نسبت سیگنال به نویز برای هر یک از پارامترهای طول ترک، اندازه بارگذاری و فاصله برش در هر دو جنس کامپوزیت‌های الیاف شیشه‌ای و الیاف کربنی بدست آمد. بر اساس این نمودارها می‌توان مقادیر بهینه برای هر یک از پارامترهای قابل کنترل بارگذاری و فاصله برش را تعیین نمود.

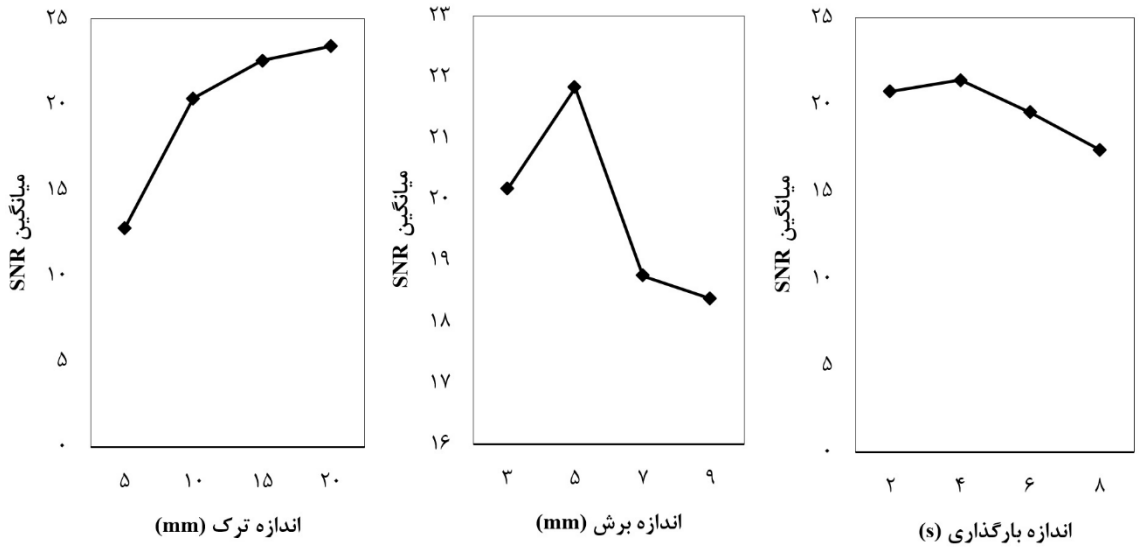
نتایج تحلیل پارامترها در نمودارهای ۱۲ و ۱۳ بیان‌گر نسبت سیگنال به نویز در هر آزمایش است. طبق نتایج حاصل از تحلیل این نمودارها، ترک‌های ۱۵ و ۲۰ میلی‌متر در هر دو جنس از مواد کامپوزتی راحت‌تر و بهتر قابل شناسایی می‌باشند چراکه دارای



شکل ۱۱) ناحیه قابل تشخیص اندازه برش برای ترک‌های موجود در نمونه‌های کامپوزیتی الیاف کربن



شکل ۱۲) نمودار نسبت سیگنال به نویز برای تحلیل و مقایسه پارامترهای طول ترک، فاصله برش و اندازه بارگذاری در نمونه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه



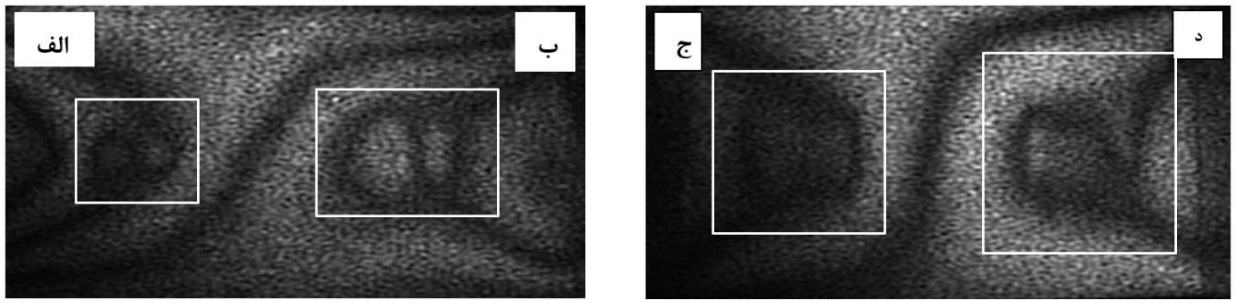
شکل ۱۳) نمودار نسبت سیگنال به نویز برای تحلیل و مقایسه پارامترهای طول ترک، فاصله برش و اندازه بارگذاری در نمونه‌های کامپوزیتی الیاف کربن

نسبت سیگنال به نویز بالاتری می‌باشند. بر همین اساس ترک‌های ۱۰ و ۵ میلی‌متری در نمونه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه تشخیص‌پذیری بیشتری نسبت به نمونه‌های کامپوزیتی الیاف کربن دارند. اندازه بارگذاری یکی از پارامترهای قابل کنترل است که بیشترین وابستگی را به جنس ماده دارد. همانطور که از روی نمودارهای بیهنه‌سازی مشخص است، بیشترین مقدار نسبت سیگنال به نویز در نمونه‌های کامپوزیتی الیاف شیشه زمانی است که میزان بارگذاری ۲ ثانیه باشد. این در حالی است که در نمونه‌های کامپوزیتی الیاف کربن بهترین نتایج زمانی حاصل شد که میزان بارگذاری ٤ ثانیه بود. طبق نتایجی که در پژوهش قبلی حاصل شد، تفاوت در مقادیر بارگذاری جهت بازرسی ترک‌های موجود در کامپوزیت‌های الیاف شیشه و کامپوزیت‌های الیاف کربن قابل پیش‌بینی بود [20].

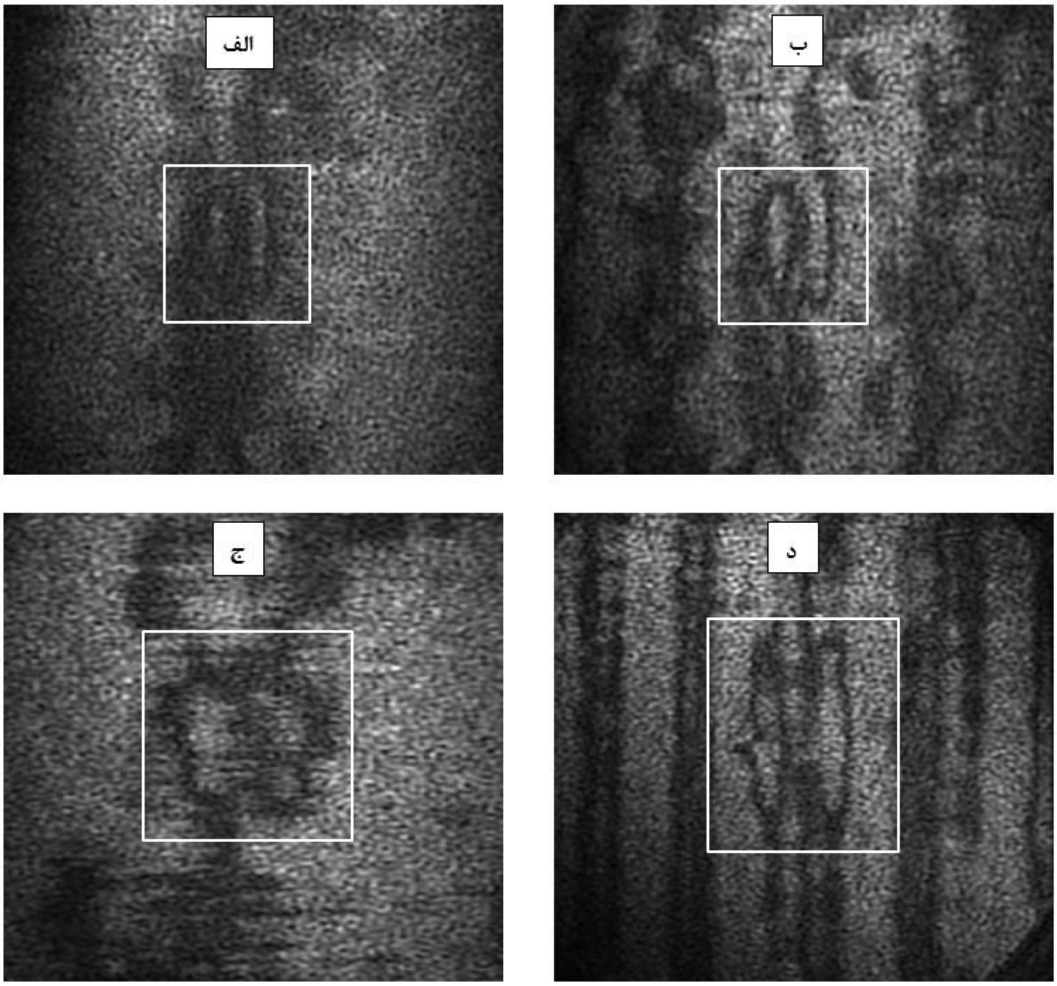
فاصله برش به عنوان دیگر پارامتر قابل تنظیم و تاثیرگذار در نتایج برش‌نگاری بررسی شد، به نحوی که کوچکترین تغییر در آن، تاثیر قابل ملاحظه‌ای در نتایج داشت. آنچنان که از نمودار نسبت سیگنال به نویز مشاهده می‌شود، جنس و نوع الیاف بر روی این پارامتر نیز بی تاثیر نبوده است. به طوری که بهترین حالت برای کامپوزیت‌های الیاف شیشه زمانی است که فاصله برش ۷ میلی‌متر باشد، در حالی که همین مقدار برای کامپوزیت‌های الیاف کربن ۵ میلی‌متر است.

در مرحله آخر پس از بدست آمدن مقادیر بهینه به کمک طراحی آزمایش به روش تاگوچی، تمام نمونه‌ها با استفاده از پارامترهای بهینه مورد آزمایش قرار گرفتند. پارامترهای بهینه‌سازی شده منجر به نتایج مطلوب و قابل قبولی در هر دو جنس شدند، به طوری که شاهد افزایش کیفیت الگوهای هاله‌ای بودیم. شکل ١٤ تصاویر هاله‌ای مربوط به نمونه‌های ترک‌دار از جنس مواد پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه را نشان می‌دهد. در این تصاویر تمام ترک‌ها به خوبی قابل رویت می‌باشند. شکل ۱۵ نیز تصاویر مربوط به الگوهای هاله‌ای نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف کربن را نمایش می‌دهد. حضور ترک‌های ۲۰ ، ۱۵ و ۱۰ میلی‌متری در این نمونه‌ها کاملا از روی الگوهای هاله‌ای قابل رویت است، اما ترک ۵ میلی‌متری به سختی قابل شناسایی می‌باشد و لذا تشخیص آن نیازمند تجربه بیشتر اپراتور و یا کارشناس است.

یکی از موانعی که در بازرسی غیرمخرب مواد مرکب تقویت شده با الیاف کربن وجود دارد، پدیدار شدن جهت الیاف‌های کامپوزیت در تصاویر هاله‌ای است. این پدیده به علت خاصت انتقال حرارت



شکل ١٤) الگوهای هاله‌ای نمونه‌های ترک‌دار از کامپوزیت الیاف شیشه: الف) ۵ میلیمتر ب) ۱۰ میلیمتر ج) ۱۵ میلیمتر د) ۲۰ میلیمتر



شکل ۱۵) الگوهای هاله‌ای نمونه‌های ترک‌دار از کامپوزیت الیاف کربن: الف) ۵ میلیمتر ب) ۱۰ میلیمتر ج) ۱۵ میلیمتر د) ۲۰ میلیمتر

بالای الیاف‌های کربن در مقایسه با ماده زمینه یا ماریس می‌باشد که منجر به دشواری تحلیل و تفسیر تصاویر می‌شود. به دلیل اینکه جهت الیاف‌ها می‌تواند بر توزیع کرنش‌های ناشی از تحریک حرارتی در سطح جسم اثر بگذارد و منجر به تولید هاله‌های اضافی در اطراف عیب گردد، تشخیص‌پذیری این مواد پایین‌تر است. از این رو تشخیص هاله‌های هدف از هاله‌های اضافی در مواد کامپوزیتی الیاف کربن، مهارت بیشتری را می‌طلبد.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، ترک‌های زیرسطحی موجود در نمونه‌هایی از جنس کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه و کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن به کمک تکنیک برش‌نگاری دیجیتالی به صورت غیرمخرب مورد بررسی و آزمایش قرار گرفتند. همچنین ناحیه‌ای به نام محدوده قابل تشخیص برای هر یک از پارامترهای بارگذاری و فاصله برش برای تمام ترک‌ها در هر دو جنس تعریف شد. به‌منظور مقایسه و بهینه‌سازی پارامترهای قابل کنترل در برش‌نگاری، طراحی آزمایش به روش تاگوچی در نرم‌افزار مینی‌تب انجام شد. نتایج بدست آمده حاکی از تاثیر قابل‌توجه جنس الیاف مورد استفاده بر نتایج حاصله می‌باشد. اهم نتایجی که در این مقاله بدست آمد به ترتیب زیر می‌باشد:

- بارگذاری حرارتی به دلیل سهولت و غیرتماسی بودن و حذف پارامتر جهت بارگذاری، یک روش برتر نسبت به بارگذاری مکانیکی می‌باشد. همچنین این روش در بازرسی کامپوزیت‌های دارای ترک زیرسطحی قابل اجرا است.
- محدوده قابل تشخیصی از بارگذاری و فاصله برش برای هر دو نوع کامپوزیت بدست آمد که بر اساس آن کامپوزیت‌های الیاف کربنی به مقدار بیشتری از بارگذاری نیاز دارند.
- جنس الیاف مورد استفاده در مواد مرکب، دارای تاثیر قابل توجهی بر هر دو پارامتر قابل تنظیم اندازه بارگذاری و اندازه برش در برش‌نگاری است.
- تفسیر و تشخیص تصاویر هاله‌ای مربوط به کامپوزیت‌های الیاف کربن به دلیل پدیدار شدن جهت الیاف در تصاویر، دشوارتر است و لذا به مهارت بیشتری نیاز دارد.
- قابلیت تشخیص‌پذیری کامپوزیت‌های الیاف شیشه بیشتر از کامپوزیت‌های الیاف کربن می‌باشد و در نتیجه عیوب ریزتری در آن‌ها قابل شناسایی است.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تاییدیه اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده است. محتوای ادبی مقاله منتج از فعالیت علمی خود نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج و متن مقاله برعهده نویسندگان مقاله است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچگونه تعارض منافعی با پایان نامه/رساله و طرح پژوهشی ندارد.

سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع مالی: منابع مالی توسط نویسندگان تامین شده است.

منابع

1- Akbari D, Asemani H. Analysis of laser interfrometry parameters in the evaluation of defects in the polymer matrix composites. Modares Mechanical Engineering. 2017; (9):372-80.

2- Hung YY, Yang LX, Huang YH. Non-destructive evaluation (NDE) of composites: digital shearography. Non-Destructive Evaluation (NDE) of Polymer Matrix Composites. 2013 :84-115.

3- Francis D, Tatam RP, Groves RM. Shearography technology and applications: a review. Measurement science and technology. 2010 ;21(10):102001.

4- Hung MY. Nondestructive Testing Using Shearography. Recent Advances in Experimental Mechanics. 2002:397-408.

5- Akbari D, Soltani N, Farahani M. Numerical and experimental investigation of defect detection in polymer materials by means of digital shearography with thermal loading. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. 2013 ;227(3):430-42.

6- Leendertz JA, Butters JN. An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments. Journal of Physics E: Scientific Instruments. 1973 ;6(11):1107.

7- Toh SL, Chau FS, Shim VP, Tay CJ, Shang HM. Application of shearography in nondestructive testing of composite plates. Journal of materials processing technology. 1990 ;23(3):267-75.

8- Hung YY. Shearography for non-destructive evaluation of composite structures. Optics and lasers in engineering. 1996 ;24(2-3):161-82.

9- Liu Z, Gao J, Xie H, Wallace P. NDT capability of digital shearography for different materials. Optics and Lasers in Engineering. 2011 ;49(12):1462-9.

10-De Angelis G, Meo M, Almond DP, Pickering SG, Angioni SL. A new technique to detect defect size and depth in composite structures using digital shearography and unconstrained optimization. Ndt & E International. 2012 ;45(1):91-6.

11-Choi SW, Lee JH. Nondestructive evaluation of internal defects for composite materials by using shearography. InKey engineering materials 2004 (Vol. 270, pp. 781-786). Trans Tech Publications Ltd.

12-Akbari D, Soltani N. Investigation of loading parameters in detection of internal cracks of composite material with digital shearography. World Applied Sciences Journal. 2013;21(4):526-35.

13-Mohamadi M, Akbari D. Evaluation of sub-surface cracks in polymer matrix composites with laser interferometric method. International Journal of Manufacturing Engineering. 2015;2(3):11-23.Banakar F, Akbari D. Non-destructive evaluation of internal cracks in glass fiber-reinforced polymers using digital shearing interferometry. Amirkabir Journal of Mechanical Engineering. 2021 ;53(6 (Special Issue)):18-.

14-Nejad, M. T., Akbari, D. (2021). Application of Digital Shearography Technique for Crack Inspection in Carbon-Fiber and Glass-Fiber Reinforced Polymers. The 6th International and 16th National Conference on Manufacturing Engineering.

15-Nejad, M. T., Akbari, D., & Tirband, H. (2020). Investigation of Plane Defects in Carbon Fiber Reinforced Polymers Using Digital Shearography. The 6th Iranian International NDT Conference.

16-Yang L, Chen F, Steinchen W, Hung MY. Digital shearography for nondestructive testing: potentials, limitations, and applications. Journal of Holography and Speckle. 2004 ;1(2):69-79.

17-Steinchen W, Yang L, Kupfer G, Mäckel P. Non-destructive testing of aerospace composite materials using digital shearography. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering. 1998 ;212(1):21-30.

18-Wang Y, Gao X, Xie X, Wu S, Liu Y, Yang L. Simultaneous dual directional strain measurement using spatial phase-shift digital shearography. Optics and Lasers in Engineering. 2016 ;87:197-203.

19-Nejad, M. T., Akbari, D. (2021). Application of Digital Shearography Technique for Crack Inspection in Carbon-Fiber and Glass-Fiber Reinforced Polymers. The 6th International and 16th National Conference on Manufacturing Engineering, 2021

20-Lopes H, Ferreira F, Dos Santos JA, Moreno-García P. Localization of damage with speckle shearography and higher order spatial derivatives. Mechanical Systems and Signal Processing. 2014 Dec 20;49(1-2):24-38.

21-Lopes H, Ferreira F, Dos Santos JA, Moreno-García P. Localization of damage with speckle shearography and higher order spatial derivatives. Mechanical Systems and Signal Processing. 2014 ;49(1-2):24-38.