

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 6) (2021) 963-966 DOI: 10.22060/mej.2021.18182.6756

Non-destructive evaluation of internal cracks in glass fiber-reinforced polymers using digital shearing interferometry

F. Banakar, D. Akbari*

Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

ABSTRACT: Shearography is one of the advanced methods of non-destructive techniques based on the interference of laser beams that have been reflected from the surface of the specimen. This method, which has high speed and accuracy, can evaluate the displacement derivative on the sample surface at once. In this paper, the possibility of sub-surface cracks detection with different lengths and angles in composite samples was investigated by shearography method and thermal stimulation system. For this purpose, in composite samples, controlled cracks were created with different lengths and angles. After calibration of the performance of the shearography setup, two heat sources of radiation were used to load samples. Loading quantity, the amount and direction of the shear, the cracks length, and their angles were chosen as the studied parameters. The results of this paper showed that the optimum loading amount plays a more critical role in the quality of the results than shear amount, and this value is related to the materials of the samples. To achieve the best results in crack detection on the selected specimens, optimum thermal loading was obtained between 12 and 15 seconds from in front of the specimen. Also, the optimum shear amount in the composite specimens was estimated at about 0.1 image width recorded by the camera. With the optimized values, all sub-surface cracks were identified.

Review History:

Received: Apr. 04, 2020 Revised: Jan. 18, 2021 Accepted:Feb. 25, 2021 Available Online: Mar. 14, 2021

Keywords:

Laser shearing interferometry Shearography Non-destructive test Composite Crack detection

1-Introduction

Recent studies show that many parts that suddenly break down, initially have small defects such as cracks and small holes in them. If these small and seemingly insignificant defects are not properly identified, they will spread and cause damage to the parts [1].

Laser shearography is a non-contact and full-field method to carry on non-destructive tests on different objects. It can directly measure the surface displacement derivatives in both cases of in-plane and out-of-plane [2]. This method is based on the interference of two light beams reflected from the surface of the samples [3]. To provide proper interference, a single-color laser light responsible for lighting up the surface is used. As a result, the spot patterns are formed on the surface. The spot patterns could be moved horizontally or vertically by the shearing device to create two identical but moved interfering patterns [4]. There are different methods for interfering and separating the light beam, which in this paper the Michelson interferometer is used.

The present paper utilizes thermal loading by two ceramic heaters in digital shearography to detect subsurface cracks with different lengths and angles in glass fiber-reinforced composites. The optimal values for loading magnitude and shear amount parameters were extracted in these samples. Also, the effect of each of these parameters on the quality of crack results was investigated.

2- Methodology

In the shearography configuration, a single-color laser with a power of 50 mW was used to illuminate the surface of the sample. Two flat mirrors, one fixed and the other rotating horizontally and vertically, were utilized to shear the images. A 3.2-MP CCD camera is utilized to investigate the sample surface. It should be noted that the location of the camera relative to the surface of the sample is such that it records an area of 90×90 mm2. Loading on the samples was done by two ceramic heaters with a power of 500 W and a maximum temperature of 350-400°C. After loading, for all designed experiments, 20 images were captured from the surface of the sample at one-second intervals.

In this paper, the hand layup technique was used to prepare the composite panels. The LY-113 epoxy resin and RE-165 woven glass fibers are used to make composite panels with the layup configuration of $[0 \times 90]12s$. Six samples were cut out using water jet apparatuses with the width, length, and thickness of 100, 40, and 3 mm, respectively. After that, 4 vertical cracks with a length of 2, 5, 10, 15 mm on two samples and 3 angled cracks with 0, 30 and 60 degrees were created by a 0.3 mm thick shear blade on three other samples. The depth of each crack is about 1 mm from the surface.

Considering the Taguchi method, the three parameters of crack size, loading magnitude and shear amount in different modes were compared with each other. In this method,

*Corresponding author's email: daakbari@modares.ac.ir



Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

 Table1. levels of the investigated parameters

Parameters	Level 1	Level 2	Level 3	Level 4
Crack length (mm)	2	5	10	15
Thermal loading (s)	9	12	15	18
Shear amount (mm)	7	10	13	16

4 levels were considered for each parameter, then 16 experiments were introduced to investigate the parameters, which the detectability of the cracks was introduced as the output. The levels of the examined parameters are shown in Table 1.

The output of the experiments is the ability of the method to detect different cracks. Signal-to-Noise Ratio (SNR) was used to evaluate the results. This ratio was indicative of the sensitivity of the output to the examined parameters. The higher signal-to-noise ratio means that better detection of cracks.

3- Result and Discussion

According to the results of parameter analysis, 15 and 10 mm cracks were identified much more easily than the other two cracks. In the SNR diagram, the optimal shear amount is about 10 mm and the optimal loading magnitude is about 12 to 15 seconds. Fig. 1 depicts the SNR diagrams for analysis parameters. According to the significant change of shear amount in SNR from 4 mm to 10 mm, it is clear that a small change in shear can greatly alter the quality of the fringes and the sensitivity of the method. Also, due to the greater difference in SNR in the loading magnitude diagram than in the shear amount, it is concluded that the change in the loading parameters plays a more important role than the shear amount in the quality of the results

As the load increased, the fringes became denser and more numerous, but there was no change in the location of the fringe center. Also, by increasing the shear amount at a constant load, the fringes became more interconnected and the best shear amount for crack detection was observed about 10 mm. As the amount of shear increased, the density of the fringes increased so that many fringes formed at short distances from each other. Also, by reducing the amount of shear from 10 mm, the number of fringes became less and it was difficult to identify the crack location. The reason for this is due to the main equations of shearography. In these relationships, with constant wavelengths and phase differences, increasing the shear amount, increases the outof-plane displacement gradient. Similarly, with decreasing shear amount, the displacement gradient decreases. Therefore, the selection of the optimal shear is necessary to achieve the optimal out-of-plane displacement gradient and thus the best fringe patterns.

The shear amount in these samples was directly related to the width of the image recorded by the camera and it was concluded that the optimal shear amount of the discussed composites was estimated to be 10% of the image width recorded by the CCD camera. The best results were derived when the shear direction was perpendicular to the crack direction. To detect angular cracks, a combination of horizontal and vertical shearing was used. In this case, the shearing direction was measured at 30 and 60 degrees relative to the horizontal line.



Fig. 1. SNR diagram for analysis of crack length, loading magnitude and shear amount parameters

4- Conclusions

In this paper, the method of digital shearography by thermal loading was used to detect cracks on samples of composite materials reinforced with glass fibers. Also, the parameters of loading magnitude, shear amount and direction, which are the basic parameters [5] in defect detection, were examined and the optimal value was obtained for them. Finally, thermal loading as a suitable method and efficient in detecting cracks on these materials was introduced. The loading magnitude parameter has a more important role in the quality of the results than the shear amount. For the investigated composite samples, the best results were obtained at the loading time between 12 to 15 seconds (about 57-50 °C). Due to the sensitivity of the shearography to the out-of-plane displacement gradient, the loading should be applied uniformly and smoothly on the surface to avoid excessive strain on the sample surface. Also, the best results were derived when the shear direction was perpendicular to the crack direction.

References

- Y. Hung, H. Ho, Shearography: An optical measurement technique and applications, Materials science and engineering: R: Reports, 49(3) (2005) 61-87.
- [2] Y. Hung, Applications of digital shearography for testing of composite structures, Composites Part B: Engineering, 30(7) (1999) 765-773.
- [3] D. Francis, R. Tatam, R. Groves, Shearography technology and applications: a review, Measurement science and technology, 21(10) (2010) 102001.
- [4] Z. Liu, J. Gao, H. Xie, P. Wallace, NDT capability of digital shearography for different materials, Optics and Lasers in Engineering, 49(12) (2011) 1462-1469.
- [5] L. Yang, F. Chen, W. Steinchen, M.Y. Hung, Digital shearography for nondestructive testing: potentials, limitations, and applications, Journal of Holography and Speckle, 1(2) (2004) 69-79.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

F. Banakar, D. Akbari, Non-destructive evaluation of internal cracks in glass fiber-reinforced polymers using digital shearing interferometry, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 6) (2021) 963-966.

DOI: 10.22060/mej.2021.18182.6756



This page intentionally left blank

نشريه مهندسي مكانيك اميركبير



نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۳ شماره ویژه ۶، سال ۱۴۰۰، صفحات ۴۰۶۳ تا ۴۰۷۸ DOI: 10.22060/mej.2021.18182.6756



فرزاد بناکار، داود اکبری*

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

تاريخچه داوري: **خلاصه:** روش تداخلسنجی برشی لیزری یا برشنگاری، یکی از روشهای نوین آزمونهای غیرمخرب است که بر پایهی تداخل امواج تکرنگ بازتابشده از سطح نمونه میباشد. این روش، با اندازهگیری مستقیم گرادیان جابهجایی خارج از صفحه، قادر است با دقت و سرعت بالایی تمام سطح نمونه را بهطور یکجا مورد ارزیابی قراردهد. در این مقاله امکان تشخیص ترکهای زیرسطحی با طول و زاویههای مختلف در نمونههای کامپوزیتی به کمک روش برش نگاری و سیستم تحریک حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. بهاین منظور، در نمونههای ساختهشده، ترکهای مصنوعی و کنترل شده با طول و زاویههای مختلف ایجاد شد. پس از صحتسنجی عملکرد چیدمان برشنگاری، از دو منبع حرارتی تشعشعی برای اعمال بار روی نمونهها استفاده شد. تاثیر متغیرهای اندازه بارگذاری، اندازه و جهت برش، طول ترک و زاویهی آنها بر روی کیفیت نتایج، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان میدهد که تغییر در اندازهی بارگذاری، نقش مهمتری را نسبت به تغییر در اندازهی برش در تشخیص صحیح ترک دارد. برای دستیابی به بهترین نتایج در تشخیص ترک بر روی نمونههای انتخابشده، بارگذاری بهینه در حالت حرارتی برابر ۱۲ و ۱۵ ثانیه از جلوی نمونه بدست آمد. همچنین اندازه بهینهی برش در نمونههای کامپوزیتی مورد بررسی، حدود ده درصد عرض تصویر ثبتشده توسط دوربین تخمین زدهشد. به کمک این مقادیر بهینه شده، تمامی ترکهای زیرسطحی شناسایی شدند.

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۶ بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۷ ارائه أنلاين: ١٣٩٩/١٢/٢۴

> كلمات كليدى: تداخلسنجي برشي آزمون غيرمخرب مواد مر کب تشخيص ترک

۱ – مقدمه

در سالهای اخیر استفاده از مواد مرکب به دلیل ویژگیهای خاص آنها از جمله نسبت بالای استحکام به وزن و همچنین برخی خصوصیات فیزیکی منحصر به فرد نظیر پایین بودن ضریب انتقال حرارت نسبت به فلزات، در صنایع مختلف از جمله سازههای هوایی کاربرد بسیار گستردهای پیدا کرده است. از طرفی، نحوهی ساخت این مواد به گونهای است که دارای خواص نامطلوبی نظیر ناهمگنی و چندساختاریبودن میباشند. از همین رو پتانسیل ایجاد عیوب مختلف نظیر ترکخوردگی، ایجاد حفره و لایه لایه شدن در اینگونه مواد، بیشتر از مواد همگن نظیر فلزها و مواد پلیمری است [1]. علاوهبراین، ویژگیهای دیگری نظیر عدم رسانایی الکتریکی و مغناطیسی در این مواد باعث شدهاست که استفاده از روشهای سنتی آزمونهای غیرمخرب نظیر آزمون فراصوتی، ذرات مغناطیسی و جریان گردابی بسیار دشوار و در برخی موارد ناممکن باشد [۲]. به همین دلیل برای بررسی عیوب

هریک از قطعات کامپوزیتی باید روشی مناسب و قابل اطمینان به کارگرفته شود.

بررسی ها نشان میدهد بسیاری از قطعاتی که به طور ناگهانی دچار شکست و تخریب می شوند، در ابتدا عیب کوچکی نظیر ترک و حفرههای ریز در آنها وجود داشته است. اگر همان عیبهای کوچک و به ظاهر کم اهمیت به درستی تشخیص دادهنشوند، گسترش می یابند و باعث شکست و تخریب قطعات میشوند. در این میان وجود ترکهای زیرسطحی در بارگذاریهای سیکلی و دینامیکی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است و می بایست به سرعت جهت تشخيص و رفع آنها اقدام شود تا از گسترشيافتن آنها جلوگیری شود [۳].

روش برشنگاری' دیجیتالی یکی از روشهای بازرسی لیزری غیرتماسی در آزمونهای غیرمخرب قطعات میباشد. در این روش پرتو لیزر به سطح نمونه تابانیده شده و بازتاب آن به صورت الگوی تداخلی در دوربین ثبت می گردد. با تفسیر تغییرات الگوی تداخلی به برخی ویژگیهای

^{*} نویسنده عهدهدار مکاتبات: daakbari@modares.ac.ir

Shearography

حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

برای نخستین بار در سال ۱۹۸۰، ناکاداتا و یاتاگایی [۲۱] در برشنگاری به جای استفاده از فیلمهای عکاسی جهت ثبت تصاویر، از دوربین الکترونیکی و تصویر دیجیتالی استفاده کردند و از آن به بعد از این روش در آزمونهای غیرمخرب استفاده شد. در ادامه به بررسی مهمترین پژوهشهای انجامشده در زمینهی مرتبط با این مقاله پرداخته شده است. در زمینهی تشخیص ترک در مواد کامپوزیتی، محمدی و همکاران [۲۲] ترکهای عرضی با طول و عمقهای متفاوت را با سیستم تحریک مکانیکی و دستگاه کشش مورد ارزیابی قراردادند و روشی را برای تخمین طول و عمق ترک به کمک تعداد و تراکم هالههای تشکیل شده بر روی مواد کامپوزیتی ارائه کردند. در مقالهای دیگر اکبری و همکاران [۲۳] با اعمال بارگذاری کششی بر روی نمونههای کامپوزیتی تقویتشده با الیاف شیشه و بررسی نتایج، پارامترهای اندازهی برش و مقدار نیروی اعمالی را برای تشخیص ترک به کمک روش برشنگاری، موردبررسی قراردادند. آنها پارامتر بیبعدی به نام ضریب بار را برای بیان حالتهای مختلف بارگذاری در منطقهی کشسان تعریف کردند. سپس بر اساس اندازه برشهای ۵ و ۸ و ۱۰ میلیمتر، مناطق قابل تشخیص ترک را نسبت به طول ترک و ضریب بار، مشخص کردند. لیو و همکاران [۲۴] از روش برشنگاری و بارگذاری ارتعاشی به کمک پیزوالکتریک، برای تشخیص ترک روی نمونههای فلزی استفاده کردند. آنها نشان دادند که اگر فرکانس ارتعاشات به فرکانس تشدید پیزوالکتریک نزدیک باشد، بهترین نتایج حاصل می شود. پتزونی و همکاران [۲۵] بر روی نمونه های از جنس كامپوزيت تقويتشده با الياف شيشه با ساختار لانه زنبوري، كه در ساخت پرههای انتهایی بالگرد کاربرد دارد، سوراخهایی با اندازه و عمقهای متفاوت ایجاد کردند و با استفاده از سیستم تحریک حرارتی به کمک برشنگاری مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که برشنگاری میتواند به راحتی تمام سطح نمونه را به طور یکجا مورد بررسی قرار دهد و عیوب را شناسایی کند. علاوه بر این، قسمتی از پرهی بالگرد را در بارگذاری خستگی قرار دادند تا عیوب احتمالی ایجادشده در آن به وسیلهی برشنگاری تشخیص داده شود. آنها به این نتیجه دست پیدا کردند که با توجه به ویژگی غیرتماسیبودن برشنگاری، برخلاف روشهای سنتی، میتوان قطعه را حین بارگذاری خستگی و بدون متوقف کردن بارگذاری مورد ارزیابی قرار داد که نکتهی بسیار مهمی در بررسی غیرمخرب قطعات صنعتی میباشد. چوی و همکاران [۲۶] با قراردادن تفلون با ابعاد مختلف در بین لایههای کامپوزیتهای تقویت شده با الیاف کربن و کامپوزیت های با ساختار لانه زنبوری، عیب جدایش بین لایهای را به طور مصنوعی شبیه سازی کردند. سپس با استفاده

سطحی نظیر جابجایی و عیوب می توان پی برد. برخلاف بیشتر روشهای سنتی که تنها قسمت کوچکی از نمونه را در هر لحظه مورد ارزیابی قرار میدهند، برشنگاری دارای ویژگی تمامصفحهای میباشد به گونهای که سطح وسيعي از نمونه را به طور كامل و در يک مرحله بررسي مي کند و نتايج را نمایش میدهد. به علاوه، در این روش برخلاف سایر روشهای نوری و لیزری، به دلیل این که پرتوهای بازتاب شده از سطح نمونه که ایجاد تداخل میکنند، مسیری تقریبا مشابه را طی میکنند، حساسیت چیدمان نسبت به ارتعاشات محیط بسیار کاهش یافتهاست [۴]. برشنگاری قادر است گرادیان جابهجایی سطح نمونه را در دو حالت خارج صفحه و داخل صفحه به طور مستقیم اندازه گیری کند. محققان از اندازه گیری گرادیان جابه جایی داخل صفحه با استفاده از روش برشنگاری برای اندازه گیری مستقیم کرنش و تنش باقیمانده در قطعات [۷–۵] و از حالت خارج صفحه در تستهای غیرمخرب و پیداکردن عیوب داخلی قطعات مختلف [۸, ۹] استفاده کردهاند. در حوزه عيبيابى اين روش براى بررسى كيفيت تايرهاى لاستيكى جهت تشخيص عيوب جدايش بين لاستيک و فلز [١١, ١٠] و همچنين تحليل پوشش رنگ در آثار هنری [۱۲] مورد استفاده قرارگرفتهاست. همچنین تحقیقات گذشته نشان میدهد که از روش برشنگاری در موارد گوناگونی نظیر تعیین عیوب روی سطوح منحنی [۱۳] و اندازه گیری تغییر شکل سطح نمونه [۱۴] استفاده شدهاست. بسیاری از تحقیقات گذشته در حوزه بهبود تکنیکهای عملیاتی روش برشنگاری توسعه یافته است. استخراج فاز از تصویرهای بدست آمده و تحلیل فازهای واپیچیده^۴ [۱۵]، اندازه گیری شیب و گرادیان سطح جسم [۱۸–۱۶]، اندازه گیری کرنش سطوح نظیر نقاط جوش خورده [۱۹]، از جمله ی پژوهشهای انجام گرفته در زمینهی بررسی و تحلیل کمّی تصاویر حاصل از برشنگاری میباشند. از آنجایی که برشنگاری کرنشهای غیرعادی روى سطح نمونه را كه ناشى از وجود عيب زيرسطحي است به طور مستقيم اندازه گیری می کند، آزمون برشنگاری موفق و قابل اطمینان، به ابعاد عیب و عمق أن از سطح، اندازه و نوع بارگذاری، اندازه و جهت برش بستگی دارد [۲۰]. از طرفی عیب عمده ی این روش، تغییر پارامترهای اساسی برای تشخیص عیب در جنسهای مختلف میباشد. به گونهای که با تغییر جنس نمونه، باید پارامترهای لازم نظیر اندازهی بارگذاری و اندازه و جهت برش، متناسب با جنس موردنظر بهینه شوند.

¹ Full-field

² Out-of plane

³ In-plane

⁴ Un-wrapped

از روش برشنگاری آنها را مورد ارزیابی قرار دادند. آنها توانستند علاوه بر تشخیص مکان عیبها، اندازهی کمی آنها را با استفاده از الگوهای هالهای تخمین بزنند و برشنگاری را به عنوان روشی مناسب در ارزیابی کمی و کیفی عیب لایه لایه شدن در نمونه های کامپوزیتی معرفی کردند. هوانگ و همکاران [۲۷] به بررسی عیبهای زیرسطحی در نمونههایی از جنس پی وی سی، فولاد و بتن تقویتشده با الیاف که در ساخت پلها کاربرد دارد، پرداختند. عیوب درنظر گرفته شده از نوع حفره و ترک زیرسطحی بودند. آنها از سیستم تحریک حرارتی به کمک لامپ فلش تناوبی با توان بالا برای ایجاد کرنش روی سطح استفاده کردند. روش پیشنهادی آنها برای تحریک نمونه، از جریان گرمای انرژی بالا استفاده میکند و تغییر شکل حرارتی را با استفاده از تنظیمات برشی غیرمعمول تشخیص میدهد. آنها توانستند تمامی عیوب را به طور واضح به کمک این نوع بارگذاری شناسایی کنند. چهرقانی و همکاران [۲۸] عیبهای مصنوعی زیرسطحی را به صورت حفرههایی با ابعاد و عمقهای مختلف روی نمونههای ألومینیومی ایجاد کردند و به کمک روش برشنگاری و سیستم تحریک حرارتی مورد ارزیابی قراردادند. آنها به این نتیجه رسیدند که در تعیین عیوب زیرسطحی، نسبت قطر به عمق عیبها از اهمیت بالایی برخوردار است و کمینهی قطر عیب قابل شناسایی را در حدود ۵/۲ برابر عمق آن گزارش کردند. اکبری و همکاران [۲۹] قابلیت روش برشنگاری را برای تشخیص عیوب صفحهای در نمونههای پلیمری مورد ارزیابی قرار دادند. جنس نمونههای مورد ارزیابی از پلیاتیلن، بارگذاری به صورت حرارتی دوطرفه و عیبها به صورت حفرههایی با اندازههای متفاوت بود. آنها نشان دادند که انجام بارگذاری حرارتی به صورت دوطرفه، اثرات خمش ثانویه را خنثی کرده و منجر به ایجاد هالههای واضحتری می شود. همچنین در مقالهای دیگر از همین نویسندگان، آنها پارامترهای موثر و اساسی را برای تشخیص ترک روی مواد مرکب به کمک روش برشنگاری، مورد بررسی قرار دادند. آنها پارامتر بیبعدی به نام ضریب بار را برای بیان حالتهای مختلف بارگذاری در منطقهی کشسان تعریف کردند. علاوهبراین، اثر اندازهی برش و زاویهی قرارگیری ترک را مورد بررسی قراردادند [۳۰]. لیو و همکاران [۳۱] قابلیت روش برشنگاری را برای تشخیص عیب روی نمونههایی ازجنس فلز و پلیمر مورد بررسی قرار دادند. در این کار بارگذاری به صورت حرارتی و عیوب تشخیص داده شده از نوع حفره و ترک بود. آن ها نواحی قابل تشخیص را برای عیبهایی با عمقهای مختلف روی نمودار نشان دادند.

در پژوهش پیشین، کلیهی جزئیات روش برشنگاری و همچنین چگونگی اعمال بارگذاری بر روی نمونههای مختلف به همراه مهمترین مقالههای چاپشده در این زمینه، در قالب مقالهی ترویجی گردآوری شد [۳۲]. در پژوهشی دیگر، از روش برشنگاری و سیستم تحریک حرارتی به کمک پروژکتور نوری با توان ۱۰۰۰ وات، جهت تشخیص ترکهای عرضی در مواد پلیمری نظیر پلیاتیلن و تفلون استفاده شد [۳۳]. در راستای بررسی دقیق تر روش برشنگاری، گام بعدی بررسی ترکهای زاویهدار و مقایسهی بارگذاری حرارتی و کششی و همچنین تغییر در جنس نمونهها به مواد کامپوزیتی که کاربرد بسیار مهم تری نسبت به مواد پلیمری دارند، تعیین شد.

در کلیهی تحقیقات انجامشده بر روی بررسی ترکها در کامپوزیت، از بارگذاری مکانیکی برای تشخیص ترک استفاده شده است. با این حال به دلیل مزایای عمده ی بارگذاری حرارتی لازم است عملکرد این روش تحریک نیز در تشخیص ترک مورد بررسی قرار گیرد. در این مقاله از روش برشنگاری دیجیتال با استفاده از بارگذاری حرارتی برای تشخیص ترکهای زیرسطحی با اندازه و زاویههای مختلف در مواد کامپوزیتی استفاده شده است. از این رو با تاکید بر جنس مورد بررسی، تشخیص ترک روی مواد کامپوزیتی با استفاده از بارگذاری حرارتی توسط هیترهای سرامیکی بدون ایجاد نور اضافی برخلاف پروژکتورهای نوری و می باشد که در کارهای پیشین از بارگذاری مکانیکی برای تشخیص ترک استفاده شدهبود. با توجه به مزایای بارگذاری حرارتی نظیر سادگی اعمال بار و کنترل بهتر، توسعه این روش در تشخیص ترک در مواد کامپوزیتی و استخراج پارامترهای اصلی آن هدف اصلی مقاله حاضر است. لذا پس از معرفی چیدمان و اطمینان از صحت عملکرد آن، از بارگذاری حرارتی توسط دو منبع تشعشعی سرامیکی جهت ایجاد کرنش روی سطح نمونه استفاده شد. با ایجاد ترکهای مختلف در نمونههای کامپوزیتی، کارایی برشنگاری در تشخیص آنها مورد بررسی قرار گرفت. علاوهبراین مقدار بهینهای برای اندازهی بارگذاری و اندازهی برش در این نمونهها استخراج شد. همچنین اثر هریک از این پارامترها در کیفیت نتایج ترکها مورد بررسی قرار گرفت. به این ترتیب علاوه بر رفع بسیاری از محدودیتهای بارگذاری مکانیکی نظیر نیازمندی به چیدمان پیچیده بارگذاری و همچنین ایجاد نویز و ارتعاش مکانیکی، با کمترکردن تعداد پارامترهای مستقل، دسترسی به یک محدوده بهینه برای تشخیص پذیری ترکها با سهولت بیشتری انجام می گیرد.



شکل ۱. چیدمان نوری برشنگاری بر پایه تداخل گر مایکلسون در بارگذاری حرارتی

Fig. 1. Optical schematic of shearography based on Michelson interferometer in thermal loading

۲- مواد و روش تحقیق

۲- ۱- اصول و مبانی برشنگاری

اساس کار برشنگاری بر پایهی تداخل دو جبهه نور بازتابشده از سطح نمونه می باشد. برای ایجاد تداخل مناسب، از نور لیزر تکرنگ استفاده می شود که وظیفه ی روشن کردن سطح نمونه را به عهده دارد. روش های متفاوتی برای ایجاد تداخل نور لیزر و جداکردن پرتو نور وجود دارد که در این مقاله از تداخل گر مایکلسون استفاده شده است. تداخل گر مایکلسون از یک مکعب شیشهای جداکننده که پرتو نور را به دو قسمت تقسیم میکند و دو آینهی تخت که یکی از آنها ثابت و دیگری متغیر میباشد، تشکیل شده است. شکل ۱ چیدمان کلی روش برشنگاری را نشان میدهد. به کمک آینههای تعبیهشده در چیدمانمیتوان اندازه و جهت برش را به طور دلخواه تنظیم کرد. به گونهای که با ثابتنگهداشتن یکی از آنها و تغییر در جهت آیینهی دیگر ، میتوان برش مناسب را اعمال کرد. جهت برش میتواند در راستای افقی، عمودی و یا ترکیبی از آنها باشد. به دلیل چرخش یکی از آینههای تداخل گر، تصویر حاصل شامل دو تصویر مشابه ولی با جابهجایی جانبی خواهد بود. سپس بار گذاری روی نمونه انجام می شود و توسط دوربین عکسهایی از نمونه ثبت می شود که تصویر سطح نمونه را قبل و بعد از بارگذاری نشان میدهند. این عکسها همان الگوهای تداخلی هستند که نقاط روشن و تاریک آن، نشاندهندهی تداخل نقطهبهنقطهی دو تصویر

برشخورده است اما هرکدام از آنها بهتنهایی هیچ اطلاعاتی از چگونگی تغییر شکل نمونه نمیدهند. با کمکردن تصاویر از هم توسط نرمافزار مناسب، الگوی تیره و روشنی بدست میآید که به آن الگوی هالهای^۲ گفته میشود. در الگوی هالهای نقاط روی هر هاله دارای فاز یکسان می باشند و با هالهی کنار خود به اندازهی ۲π رادیان اختلاف فاز دارد [۳۴].

در کلی ترین حالت، اختلاف فاز نوری زمانی که مقدار برش کوچک باشد از رابطهی (۱) بدست می آید [۳۵]:

$$\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} k_y \frac{\partial v}{\partial x} k_z \frac{\partial w}{\partial x} \right) dx \tag{1}$$

در رابطهی (۱)، (k_x, k_y, k_z) مولفههای بردار حساسیت میباشند و بستگی به جهت روشنشدن نمونه توسط لیزر و جهت مشاهده پرتوهای بازتابشده توسط دوربین دارد. همچنین (φ) فاز تصویرو k_x مولفههای بازتابشده توسط دوربین دارد. همچنین (φ) فاز تصویرو و x به اندازهای کوچک باشند که بتوان از آنها صرفنظر کرد، سیستم به طور کامل نسبت به مشتق جابهجایی خارج صفحه حساس میشود. در این صورت اگر جهت پرتوهای تابیده به نمونه و پرتوهای ثبتشده توسط دوربین روی یک خط راست باشد، رابطه گرادیان جابهجایی خالص خارج صفحه از رابطهی (۲) (برای برش در راستای X) و معادلهی (۳) (برای برش در راستای

¹ Beam splitter

² Fringe pattern



شکل ۲. تجهیزات برشنگاری مورد استفاده Fig. 2. Shearography setup used

 $(\Delta \varphi)$ بدست می آید. در رابطههای (۲) و (۳)، (λ) طول موج لیزر، (ψ) (y) بدست می اندازه می اندازه می باشد.

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta \varphi}{4\pi dx} \tag{(Y)}$$

$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\lambda \Delta \varphi}{4\pi dy} \tag{(7)}$$

۲-۲- تجهیزات و چیدمان

تجهیزات برشنگاری به کاررفته در این مقاله به منظور تشخیص ترک مطابق شکل ۲ می باشد. در این چیدمان از یک عدد لیزر دیودی تکرنگ با توان ۵۰ میلی وات جهت روشننمودن نمونهی تحت آزمایش استفاده شد. از دو آینهی تخت که یکی از آنها ثابت و دیگری قابلیت چرخش در جهت افقی و عمودی را دارد برای ایجاد برش روی تصاویر استفاده گردید. اندازه گیری مقدار برش با استفاده از صفحهی درجهبندی شده در جهات X و y که در جلوی سطح نمونه قرار می گرفت انجام شد. دوربین مورد استفاده جهت ثبت تصاویر از نوع سی سی دی^۲ با کیفیت تصویر ۲/۳ مگاپیکسل هر یک ثانیه یکبار، عکسی از نمونه ثبت مینمود.

1 Charge Coupled Device (CCD)

نکتهی مهم در چیدمان برشنگاری، نحوهی قرارگرفتن و فاصلهی اجزا از یکدیگر میباشد. برای اطمینان از صحت عملکرد چیدمان و کالیبره کردن آن، ارزیابی اولیه با جهتهای برش متفاوت روی نمونهی پلکسی گلس^۲ به ضخامت ۲ و قطر ۱۰۰ میلیمتر انجام شد که نتایج الگوها مطابق شکل ۳ میباشد.

بارگذاری در این نمونه به صورت فشاری و توسط میکرومتر تعبیه شده در پشت نمونه صورت گرفت. لازم به ذکر است که عرض تصویر ثبت شده توسط دوربین ۹۰ میلیمتر بود که در بدست آوردن اندازهی برش بهینه موثر میباشد. در بررسی عملکرد چیدمان، از اندازه برش های مختلف استفاده شد.

همانطور که ذکر شد، دوربین برش نگاری، عکسهایی قبل و بعد از بارگذاری ثبت می کند و پس از چند مرحله پردازش تصویر، الگوهای هالهای حاصل می شوند. انواع مختلفی از بارگذاری جهت ایجاد کرنش بر روی سطح نمونه وجود دارد از جمله: بارگذاری کششی، حرارتی، ارتعاشی، خلاء نسبی، فشاری، که هرکدام از آنها متناسب با نوع جنس و شرایط دسترسی به نمونه انتخاب می شوند. در این مقاله از بارگذاری حرارتی از جلوی نمونه در شناسایی ترک در مواد کامپوزیتی استفاده شد.

در بارگذاریهای حرارتی معمولاً از یک پروژکتور نوری با توان بالا جهت تحریک نمونه استفاده می شود. نتایج حاصل از این بارگذاری کیفیت نسبتاً مناسبی دارند ولی عیب اصلی آن این است که چون در هنگام بارگذاری

2 Plexiglass



y شکل ۳. الگوهای هالهای نمونه پلکسی گلس جهت کالیبرهکردن چیدمان. (الف) برش در جهت x، (ب) برش در جهت y Fig. 3. Plexiglas fringe patterns to calibrate the setup. A) shear in the X direction. B) shear in the Y direction



شکل ۴. کاربرد دو هیتر سرامیکی با پایههای قابل تنظیم در زاویههای مختلف برای اعمال بارگذاری حرارتی

Fig. 4. Application of two ceramic heaters with adjustable bases at different angles for thermal loading

خنکشدن نمونه انجام شد که بهترین نتایج زمانی بودند که از نمونه در حال سردشدن، عکسبرداری شدهبود و در انتها مقدار بهینه برای اندازهی بارگذاری حرارتی استخراج شد. انبساط حرارتی ایجادشده در نمونه تحت تأثیر بارگذاری حرارتی، باعث ایجاد تغییر شکل جزئی در سطح نمونه میشود. در این حالت اگر نقطهی ناپیوستگی نظیر یک عیب یا نقص در زیرسطح نمونه وجود داشته باشد، ناپیوستگی انبساطی و درنتیجه ناپیوستگی کرنشی، موجب شکل گیری الگوهای هالهای برشنگاری در منطقههای معیوب میشود. عامل دیگری که در ارزیابی توسط بارگذاری حرارتی اهمیت دارد زمان خنکشدن نمونه میباشد که رابطهی مستقیمی با میزان تغییر

پروژکتور روشن است، دوربین نمیتواند همزمان با اعمال بار، عکسبرداری انجام دهد و فقط زمانی که پروژکتور خاموش است و در زمان خنکشدن قطعه عکسبرداری انجام میشود. برای حل این مشکل مطابق شکل ۴ چیدمان حرارتدهی تشعشعی ساخته شد. برای این منظور از دو هیتر سرامیکی با توان ۵۰۰ وات و حداکثر دمای ۳۵۰–۴۰۰ درجهی سانتیگراد استفاده شد. دو پایهی متحرک در زیر آنها تعبیه شد که به کمک آن هیترها در زاویه دلخواه نسبت به نمونه قرار داده شدند. به دلیل اینکه هیترها حین گرمشدن هیچگونه نور اضافی از خود ساطع نمیکنند، عکسبرداری، هم در زمان اعمال بار یعنی گرمشدن نمونه و هم در زمان باربرداری یعنی



شکل ۵. استفاده از حرارتسنج غیرتماسی جهت تعیین سطح دمای نمونه در هر لحظه

Fig. 5. Use the non-contact thermometer to investigate the sample temperature at any moment

شکل نمونه دارد. به گونهای که هرچه زمان خنک شدن بیشتر شود، تغییر شکل و جابه جایی خارج صفحه نمونه نیز بیشتر می شود. از این رو، پس از اعمال بارگذاری برای کلیه ی آزمایش های طراحی شده، تعداد ۲۰ عکس به فاصله ی زمانی یک ثانیه از سطح نمونه گرفته شد، به گونه ای که بعد از اعمال بار توسط هیترها، عکس برداری به مدت ۲۰ ثانیه از نمونه انجام گردید. در این حالت می توان تمام ۲۰ عکس را با یکدیگر مقایسه کرد چون در هر حالت تغییر کرنش کوچکی روی نمونه ایجاد شده است.

مطابق شکل ۵، برای ارزیابی میزان حرارتدهی به نمونه و تحلیل نتایج بر اساس اندازهی بارگذاری، از یک حرارتسنج غیرتماسی در هر لحظهی باردهی به نمونه استفاده شد. به کمک این تجهیز، دمای نمونه در هر لحظه قابل اندازه گیری بود. حرارتدهی از دمای اتاق حدود ۲۵ درجه تا ۶۱ درجهی سانتیگراد (۱۸ ثانیه حرارت دهی در بیشترین حالت) روی نمونه اعمال شد. لازم به ذکر است که در هنگام اعمال بارگذاری، نمونه از هرطرف مقید شدهبود و هیچ گونه ارتعاشی نداشت. در ادامه به بررسی بهترین حالت بارگذاری برای دستیابی به بهترین نتایج، پرداخته شد.

جدول ۱. مشخصات مکانیکی نمونههای کامپوزیتی

Table 1. Mechanical properties of the composite samples

الياف	ماتريس	مشخصه
Y) /Y	۳/۲ ۱	مدول الاستيك (GPa)
۲۸/۹	١/٢	مدول برشی (GPa)
•/۲۴	٠ /٣٣	ضريب پواسون
104.	17	چگالی (kg/m ³)
۳۵	۶۵	نسبت حجمی (%)
•/٨	• / ٨	ضریب نشر حرارتی

۲- ۳- جنس نمونهها و مشخصات ترکها

برای ساخت نمونههای کامپوزیتی، از رزین اپوکسی ال وای ۱۱۳ به عنوان ماتریس و از الیاف ریز بافت شیشه با زاویه یقرارگیری صفر و ۹۰ درجه استفاده شد. نسبت وزنی مخلوطشدن رزین و سخت کننده ۱۰۰ به ۲۰ و مدت زمان پخت آنها ۴۸ ساعت در نظر گرفته شد. دو صفحه به ابعاد ۲۰۰۰×۲۰۰ و ضخامت ۳ میلیمتر تشکیل شده از ۲۴ لایه الیاف شیشه، به روش لایه چینی دستی ساخته شد. سپس ۵ نمونه به ابعاد ۳×۴۰×۱۰۰ میلیمتر مکعب توسط واترجت از صفحه های ساخته شده جدا شد. به جهت اطمینان از صحت ساخت نمونههای کامپوزیتی و بدون عیب بودن آنها، هر کدام به طور مجزا توسط دوربین و بارگذاری حرارتی مورد بررسی قرار گرفتند.

در این حالت تنها هالههای نمونهی تحت بار به طور موازی با یکدیگر مشاهده شد که حاکی از بیعیببودن نمونهها بود. جدول ۱ مشخصات مکانیکی نمونههای تحت ارزیابی را نشان میدهد. ۴ ترک عرضی به طول ۲، ۵، ۱۰، ۱۵ میلیمتر روی دو نمونه و ۳ ترک زاویهدار صفر و ۳۰ و ۶۰ درجه توسط تیغهی برشی به ضخامت ۳/ ۰ میلیمتر بر روی سه نمونهی دیگر ایجاد شد. عمق هریک از ترکها نیز در حدود ۱ میلیمتر میباشد. در روش برشنگاری چنانچه یکی از ابعاد عیب نسبت به سایر ابعاد بسیار کوچکتر باشد، بعد کوچکتر اثر زیادی بر روی نتایج نخواهد داشت. عرض ترک به دلیل کوچکبودن نسبت به طول آن، به عنوان فاکتور مهم برای اندازه گیری و بررسی قرار نمی گیرد. شکل ۶۰ اندازهی ترکها و زاویهی قرار گیری آنها را نشان میدهد.



شکل ۶. اندازه و موقعیت قرارگیری ترکها در پشت نمونه

Fig. 6. Size and position of the cracks behind the specimens

۲- ۴- طراحی آزمایش

در این مقاله علاوه بر قابلیت تشخیص پذیری ترکها توسط روش برش نگاری، پارامترهای موثر در نتایج نیز مورد بررسی قرار گرفتند. میزان حرارت دهی توسط هیترهای سرامیکی به نمونه از ۲۵ درجه تا حدود ۶۱ در جه ی سانتیگراد بود. سطحهای در نظر گرفته شده برای اندازه ی بارگذاری در طراحی آزمایش، برابر ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸ ثانیه انتخاب گردید که به ترتیب دمای نمونه را از دمای محیط تا ۲۸، ۵۲، ۵۷، ۶۱ درجه ی سانتیگراد افزایش می داد. هرچه زمان باردهی روی نمونه بیشتر بود متناسب با آن، دمای نمونه نیز بیشتر می گردید، بدین معنی که بارگذاری بیشتری روی آن صورت گرفته است.

دمای سطحی در تمامی آزمایشها با استفاده از حرارتسنج غیرتماسی با دقت نمایش ٪۰/۱ ± دمای خواندهشده و همچنین ثابت زمانی ۵۰۰ میلی ثانیه اندازه گیری و تغیرات کنترل شد. در هرکدام از تکرارها اختلاف قابل ملاحظه ای در نتایج دمایی سطح نمونه ها مشاهده نشد. از آنجا که هیترها به اندازه ی مشخصی گرم می شوند و سایر پارامترها نظیر فاصله هیترها تا سطح و شرایط سطحی نمونه ها تغییر نمی کند، تنها پارامتر موثر مدت زمان باردهی به نمونه ها است که دمای سطح را تعیین می کند. زمان باردهی به طور دقیقی برای همه آزمایش ها کنترل شد.

جدول ۲. سطوح پارامترهای مورد بررسی

 Table 2. levels of the investigated parameters

سطح ۴	سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	پارامتر
۱۵	١٠	۵	٢	طول ترک (mm)
١٨	۱۵	١٢	٩	اندازه بارگذاری (S)
18	١٣	١٠	٧	اندازه برش (mm)

با درنظرگرفتن طراحی آزمایش به روش تاگوچی^۱ در نرمافزار مینی *تب^۲*، سه پارامتر اندازهی ترک، اندازهی بارگذاری و اندازهی برش در حالتهای مختلف نسبت به یکدیگر مورد مقایسه قرارگرفتند. در این روش برای هر پارامتر ۴ سطح در نظر گرفتهشد، سپس ۱۶ آزمایش برای بررسی پارامترها معرفی شد که پس از انجام آزمایشها، میزان تشخیص پذیری ترکها به عنوان خروجی معرفی شد. جدول ۲ مشخصات ترکها و اندازهی بارگذاری و برشهای مختلف را نشان میدهد. علاوهبراین، جهت برش نیز متناسب با جهت قرارگیری ترکها، در راستای افقی و عمودی و ترکیبی از آنها اعمال شد.

¹ Taguchi

² Minitab

جدول ۳. آزمایشهای طراحی شده

نسبت سیگنال به نویز	اندازه برش (mm)	اندازه بارگذاری (s)	طول ترک (mm)	شماره
				آزمايش
•	۴	٩	٢	١
10/08	٧	١٢	٢	۲
۱۹/۰۸	١.	۱۵	٢	٣
17/•4	١٣	١٨	٢	۴
۶/+۲	٧	٩	۵	۵
٩/۵۴	۴	١٢	۵	۶
۱۸/•۶	١٣	۱۵	۵	٧
۱۹/۰۸	١.	١٨	۵	٨
۶/•۲	۱.	٩	١.	٩
۱۸/•۶	١٣	١٢	١.	١٠
17/•4	۴	۱۵	١.	11
10/08	٧	١٨	١.	١٢
۶/•۲	۴	٩	۱۵	١٣
۲.	٧	١٢	۱۵	14
18/9.	١٣	۱۵	۱۵	۱۵
٩/۵۴	١.	١٨	۱۵	18

Table 3. Design of experiments

جدول ۳ آزمایش های طراحی شده را نشان می دهد. خروجی آزمایش ها میزان توانایی روش در تشخیص ترک های مختلف می باشد. برای بررسی نتایج از نسبت سیگنال به نویز استفاده شد. این نسبت، نمایانگر میزان حساسیت خروجی به پارامترهای بررسی شده بود. هرچه نسبت سیگنال به نویز بیشتر باشد، به این معنی است که ترک به خوبی شناسایی شده است زیرا مقدار بیشتر سیگنال به نویز،

نشاندهندهی مقادیر کمتر واریانس حاصل شده از نتایج پیرامون مقدار هدف میباشد. ویژگی انتخاب شده در این آزمایش ها مقادیر بزرگتر –بهتر^۲ در نمودار نسبت سیگنال به نویز انتخاب گردید. همانطور که مشخص است مقدار سیگنال به نویز بزرگتر نشاندهندهی تشخیص بهتر ترک میباشد. با تحلیل نتایج این آزمایش ها و بررسی کیفیت هاله های ایجاد شده، می توان به مقداری بهینه برای اندازهی بارگذاری و برش روی نمونه ها دست یافت که در ادامه نتایج ارائه شده است.

۲– ۵– پردازش تصویر

تصاویر هالهای اولیهی بدستآمده از قطعه دارای کیفیت پایینی می باشند و باید طی چند مرحله پردازش تصویر و بهکاربردن فیلترهای مناسب، کیفیت آنها بهبود یابد. برای کمکردن تصاویر از یکدیگر از کد نرم افزار متلب^۳ استفاده شد. سپس فیلترهایی متناسب با کیفیت هرکدام بهکارگرفتهشد. مراحل پردازش تصویر انجامشده به صورت زیر می باشد:

الف) استفاده از فیلتر کرنل کانولوشن^۴ ۵×۵ : این فیلتر که یک ماتریس مربعی مرتبه ۵ میباشد، با توجه به عدد میانی آن میتواند وضوح تصاویر را بالا ببرد و قسمتهای محوشده را آشکار کند. در این فرایند از مقادیر وزندادهشدهی پیکسلهای همجوار، برای محاسبهی مقدار جدید یک پیکسل استفاده میشود. عدد میانی در این ماتریس، ۲۱ درنظر گرفتهشد.

 ب) فیلتر میانی⁶ : این فیلتر قسمتهای تیره را تیرهتر و قسمتهای روشن را روشنتر میکند. به کمک این فیلتر می توانیم گوشههای هر قسمت را با وضوح بالاتری تشخیص دهیم.

³ Matlab

⁴ Kernel convolution

⁵ Median

¹ Signal to noise

² Larger is better



شکل ۷. نمودار نسبت سیگنال به نویز، برای تحلیلی پارامترهای طول ترک، اندازه بارگذاری، اندازه برش

Fig. 7. SNR diagram for analysis of crack length, loading magnitude and shear amount parameters

ج) فیلتر لبههای تیز : برای افزایش تشخیص پذیری لبهها و توانایی شناسایی ابتدا و انتهای هالهها از این فیلتر استفاده شد.

د) نزدیک کردن هیستو گرام^۲ به عدد ۲۵۵ : با افزایش تضاد تصاویر و روشن کردن قسمتهای تیره می توان یستو گرام را که فراوانی قسمتهای روشن و تیره است کنترل کرد. به دلیل اینکه تصاویر اولیهی ثبتشده کمی تاریک و با وضوح پایین بودند، اعمال فیلتر روی آنها به گونهای بود که فراوانی قسمتهای روشن روی نمودار هیستو گرام گسترش یابد.

۳- نتايج و بحث

سه پارامتر اندازهی بارگذاری و همچنین اندازه و جهت برش، از ویژگیهای بسیار مهم در تشخیص عیوب مختلف در قطعات به کمک روش برشنگاری می باشند. با آزمایش های متعدد، تمامی ترکهای ایجادشده روی نمونه ی کامپوزیتی با اندازه و زاویه های مختلف، به کمک بارگذاری حرارتی تشخیص داده شدند. با توجه به نحوه ی قرارگیری هیترها نسبت به مکان نمونه، بارگذاری از جلوی نمونه در حالت خنک شدن، بهترین نتایج را حاصل کرد. از آن جایی که حساسیت روش برش نگاری به تغییرات بسیار اندک در کرنش های سطحی و در حد میکرون بسیار زیاد است، بارگذاری باید کاملاً کنترل شده و آرام روی نمونه اعمال شود. با توجه به این نکته که در اندازه ی بارگذاری ثابت، با افزایش اندازه ی برش و همچنین در اندازه ی برش ثابت،

با افزایش اندازهی بارگذاری، تعداد و تراکم هالهها افزایش مییابد [۳۶]، این نتیجه حاصل میشود که اعمال بارگذاری کم بر روی نمونه، باعث عدم ایجاد هالههای برشنگاری و در نتیجه عدم تشخیص عیب میشود. از طرفی اعمال بارگذاری بیش از حد نیز باعث ایجاد هالههای متراکم میشود که تشخیص محل عیب را با مشکل مواجه میکند.

با استناد به نتایج بهدست آمده از آزمایش های انجام شده، یارامتر نسبت سیگنال به نویز بهعنوان معیاری برای قابلتشخیص بودن ترک معرفی شد. هر ۱۶ آزمایش طراحی شده به روش تاگوچی، ۳ مرتبه تکرار شدند تا صحتسنجی چیدمان و بارگذاری تا حد امکان سنجیده شوند. خروجی این آزمایشها، بهعنوان میزان تشخیص پذیری ترک در نظر گرفته شد. به گونهای که با بررسی کیفی الگوهای هالهای بهدست آمده از هریک از آزمون ها، تصاویری که بهطور کامل و با هالههای مشخص مکان ترک را تشخیص دادند ضریب سیگنال به نویز بیشتر و در نتیجه نسبت سیگنال به نویز بالاتری دارند که با استفاده از این عامل میتوان مقدار بهینه برای بارگذاری حرارتی را مشخص کرد. بهترین نتایج در بارگذاری بین ۱۲ تا ۱۵ ثانیه (حدود ۵۷ – ۵۷ درجه سانتیگراد) بر روی نمونهها استخراج شد. لازم به ذکر است که حرارت سنج غیرتماسی در هر لحظه دمای نمونه را مشخص می کرد به گونهای که مطابق سطوح ذکرشده برای اندازهی بارگذاری در روش تاگوچی، ۹ ثانیه حرارت دهی دمای نمونه را به ۴۸ درجهی سانتیگراد، ۱۲ ثانیه ۵۲ درجه، ۱۵ ثانیه ۵۷ درجه و ۱۸ ثانیه ۶۱ درجهی سانتیگراد افزایش داد. نتایج تحلیل پارامترها در شکل۷ نشاندهنده نسبت سیگنال به نویز در

¹ Sharp edge

² Histogram



شکل ۸. الگوهای هالهای نمونههای ترکدار عرضی با ۱۲ ثانیه بارگذاری حرارتی. الف) ترک ۲ میلیمتر، ب) ترک ۵ میلیمتر، ج) ترک ۱۰ میلیمتر، د) ترک ۱۵ میلیمتر

Fig. 8. Fringe patterns of vertical cracked specimens with 12 seconds of thermal loading. A) 2mm crack. B) 5mm crack. C) 10mm crack. D) 15mm crack

آزمایشات میباشد. ترک ۱۵ و ۱۰ میلیمتری به مراتب سادهتر از دو ترک دیگر شناسایی شدند. در این نمودارها مقدار برش بهینه حدود ۱۰ میلیمتر و اندازهی بارگذاری بهینه حدود ۱۲ تا ۱۵ ثانیه مشخص میباشند. با توجه به تغییر قابلملاحظهی مقدار سیگنال به نویز از اندازه برش ۴ میلیمتر به ۱۰ میلیمتر، مشخص میشود که تغییر کوچکی در اندازهی برش میتواند کیفیت هالهها و حساسیت روش را به میزان زیادی تغییر دهد. همچنین به علت بیشتربودن اختلاف ضریب سیگنال به نویز در نمودار اندازهی بارگذاری نسبت به نمودار اندازهی برش، این نتیجه بدست میآید که تغییر در پارامتر اندازهی بارگذاری نقش مهم تری را نسبت به اندازهی برش در کیفیت نتایج ایفا میکند.

با افزایش بارگذاری، هالهها متراکمتر و تعداد آنها بیشتر شد ولی تغییری در مکان مرکز هالهها ایجاد نشد. همچنین با افزایش اندازهی برش در یک بارگذاری ثابت، هالهها به هم پیوستهتر شدند و بهترین اندازهی برش برای تشخیص ترک روی نمونهها حدود ۱۰ میلیمتر مشاهده شد. با بیشترکردن مقدار برش، تراکم هالهها زیاد گردید به گونهای که هالههای زیادی با فاصلهی کم از یکدیگر تشکیل شدند. همچنین با کمترکردن مقدار برش از ۱۰ میلیمتر، تعداد هالهها کمتر و تشخیص محل ترک مشکل گردید. دلیل این نکته با توجه به معادلهی (۲) و (۳) توجیه میشود. در این روابط با ثابتبودن طول موج و اختلاف فاز، افزایش اندازهی برش باعث افزایش برش، گرادیان جابهجایی خاهش میابد. از این رو انتخاب برش بهینه برای

دستیافتن به گرادیان جابهجایی خارج سطح بهینه و در نتیجه الگوهای هالهای با کیفیت، الزامی می باشد.

اندازهی برش در این نمونه ها رابطه ی مستقیمی با عرض تصویر ثبت شده توسط دوربین داشت و این نتیجه بدست آمد که بهینه ترین حالت اندازه ی برش برابر ۱/ ۰ عرض تصویر است. همانطور که ذکر شد، عرض تصویر ثبت شده توسط دوربین برابر ۹۰ میلیمتر بود. شکل ۸ و ۹ الگوهای هاله ای ترکهای مختلف را در اندازه ی برش بهینه و اندازه ی بارگذاری حرارتی ۱۲ و ۱۵ ثانیه را که بهینه ترین حالت برای حرارت دهی است نشان می دهند. مطابق این شکل ها تمامی ترکها به خوبی شناسایی شدند.

با توجه به بررسی نتایج حاصل از پژوهش لیو و همکاران در تشخیص ترک روی نمونههای آلومینیومی، جهت برش موازی با جهت عیب میتواند قدرت تشخیص ترک را افزایش دهد [۳۱]. این در حالی است که نتایج بدستآمده از تحلیل جهت برش تصویر در مقالهی حاضر، حاکی از آن است که هرچه جهت برش در راستای عمود بر جهت ترک باشد، نسبت به حالتی که در راستای جهت ترک باشد، نتایج بهتری را بهدست میدهد. برای تشخیص ترکهای زاویهدار، از جهت برش ترکیبی در راستای افقی و عمودی استفاده شد. در این حالت جهت برش به اندازهی ۳۰ و ۶۰ درجه نسبت به خط افقی اندازه گیری شد. شکل ۱۰ نتایج الگوهای هالهای را روی نمونه کامپوزیتی با ترکهای طولی و زاویهدار نشان میدهد. همانطور که مشخص است، با تغییر زاویهی قرارگیری ترک، زاویهی هالهها نیز تغییر کردهاست. این درحالی است که در بارگذاری مکانیکی به صورت کششی که



شکل ۹. الگوهای هالهای نمونههای ترکدار عرضی با ۱۵ ثانیه بارگذاری حرارتی. الف) ترک ۲ میلیمتر، ب) ترک ۵ میلیمتر، ج) ترک ۱۰ میلیمتر، د) ترک ۱۵ میلیمتر

Fig. 9. Fringe patterns of vertical cracked specimens with 15 seconds of thermal loading. A) 2mm crack. B) 5mm crack. C) 10mm crack. D) 15mm crack





در پژوهشهای پیشین انجام شدهبود [۲۳]، جهت اعمال بار تأثیر زیادی در جهت گیری هالهها به خصوص در مورد ترکهای زاویهدار خواهد داشت. در بارگذاری حرارتی مورد استفاده در این مقاله، جهت بارگذاری به عنوان یک پارامتر حذف خواهد شد و از این رو با کمترکردن تعداد پارامترها، دستیابی به نتایج بهینه با سهولت بیشتری امکانپذیر شد.

۴- نتیجهگیری

در این مقاله از روش برش نگاری دیجیتالی به کمک بارگذاری حرارتی، برای تشخیص ترک روی نمونههای مواد کامپوزیتی تقویتشده با الیاف شیشه استفاده شد. همچنین پارامترهای اندازهی بار و اندازه و جهت برش نیز که از پارامترهای اساسی در تشخیص ترک هستند، مورد بررسی قرارگرفتند و مقدار بهینهای برای آنها بدست آمد. در ابتدا ترکهایی با ابعاد و زوایای مختلف روی نمونههای مواد کامپوزیتی ایجاد شد و سپس به کمک

روش طراحی آزمایش مناسب، امکان شناسایی ترکها و پارامترهای اندازهی بارگذاری و اندازه و جهت برش مورد ارزیابی و مقایسه قرارگرفت و در انتها، بارگذاری حرارتی به عنوان روشی مناسب و کارآمد در تشخیص ترک روی این مواد، معرفی شد. نتایج کلی حاصلشده به قرار زیر میباشد:

 بارگذاری از جلوی نمونه و همچنین ثبت تصویر از آن در حال خنکشدن، نتایج به مراتب مطلوبتری را نسبت به ثبت تصویر در حین گرمشدن نمونه بدست میدهد.

 پارامتر اندازهی بارگذاری و تغییر در آن، نقش مهم تری را در کیفیت نتایج نسبت به اندازهی برش دارد.

هرچه جهت برش به زاویهی ۹۰ درجه نسبت به راستای ترک
 نزدیکتر باشد، نتایج بدست آمده بسیار واضحتر خواهد بود.

 اندازهی برش بهینه برابر ۱/ ۰ عرض تصویر ثبتشده توسط دوربین تخمین زدهشد. Science and Technology, 18(5) (2007) 1175.

- [7] R.M. Groves, S.W. James, R.P. Tatam, Full surface strain measurement using shearography, in: Optical Diagnostics for Fluids, Solids, and Combustion, International Society for Optics and Photonics, 2001, pp. 142-152.
- [8] H. Asemani, N. Soltani, The Effectiveness of Laser Shearography for the Inspection of Wall Thinning in a Large Aluminum Plate, Journal of Nondestructive Evaluation, 38(2) (2019) 56.
- [9] M. Barmouz, A.H. Behravesh, F. Reshadi, N. Soltani, Assessment of defect detection in wood–plastic composites via shearography method, Journal of Thermoplastic Composite Materials, 29(1) (2016) 28-36.
- [10] B. Liu, X. Guo, G. Qi, D. Zhang, Quality evaluation of rubber-to-metal bonded structures based on shearography, Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 58(7) (2015) 1-8.
- [11] Y. Zhang, T. Li, Q. Li, Defect detection for tire laser shearography image using curvelet transform based edge detector, Optics & Laser Technology, 47 (2013) 64-71.
- [12] R. Groves, B. Pradarutti, E. Kouloumpi, W. Osten, G. Notni, 2D and 3D non-destructive evaluation of a wooden panel painting using shearography and terahertz imaging, Ndt & E International, 42(6) (2009) 543-549.
- [13] N. Sujatha, V. Murukeshan, S. Rajendran, L. Ong, L. Seah, Non-destructive inspection of inner surfaces of technical cavities using digital speckle shearography, Nondestructive testing and evaluation, 20(1) (2005) 25-34.
- [14] X. Xie, N. Xu, J. Sun, Y. Wang, L. Yang, Simultaneous measurement of deformation and the first derivative with spatial phase-shift digital shearography, Optics Communications, 286 (2013) 277-281.
- [15] S. Liu, L.X. Yang, Regional phase unwrapping method based on fringe estimation and phase map segmentation, Optical Engineering, 46(5) (2007) 1-9, 9.
- [16] R.M. Groves, S.W. James, R.P. Tatam, Shape and slope measurement by source displacement in shearography, Optics and lasers in Engineering, 41(4) (2004) 621-634.

 برای نمونههای کامپوزیتی مورد بررسی بهترین نتایج در زمان بارگذاری بین ۱۲ تا ۱۵ ثانیه (حدود ۵۷ – ۵۰ درجه سانتیگراد) بدست آمد.

استفاده از بارگذاری حرارتی به دلیل حذف اثر جهت بار، برای تعیین
 پارامترهای بهینه و تشخیصپذیرکردن عیوب بسیار مناسبتر از بارگذاری
 مکانیکی است.

به دلیل حساسیت برش نگاری به گرادیان خارج صفحه، بارگذاری باید
 به طور یکنواخت و آرام روی سطح اعمال شود تا از ناهمبستگی تصاویر و
 ایجاد کرنش بیش از اندازه بر روی سطح نمونه جلوگیری شود.

٥- فهرست علائم

	علائم يونانى
طول موج	λ
اختلاف فار	$\Delta \varphi$

منابع

- [1] Y. Hung, Applications of digital shearography for testing of composite structures, Composites Part B: Engineering, 30(7) (1999) 765-773.
- [2] R. Růžek, R. Lohonka, J. Jironč, Ultrasonic C-Scan and shearography NDI techniques evaluation of impact defects identification, NDT & E International, 39(2) (2006) 132-142.
- [3] T. Clyne, D. Hull, An introduction to composite materials, Cambridge university press, 2019.
- [4] Y. Hung, H. Ho, Shearography: An optical measurement technique and applications, Materials science and engineering: R: Reports, 49(3) (2005) 61-87.
- [5] D. Francis, S. James, R. Tatam, Surface strain measurement of rotating objects using pulsed laser shearography with coherent fibre-optic imaging bundles, Measurement Science and Technology, 19(10) (2008) 105301.
- [6] R.M. Groves, E. Chehura, W. Li, S.E. Staines, S.W. James, R.P. Tatam, Surface strain measurement: a comparison of speckle shearing interferometry and optical fibre Bragg gratings with resistance foil strain gauges, Measurement

Lasers in Engineering, 47(7-8) (2009) 774-781.

- [28] A. Chehrghani, A. Fotovat, M. Halajian, M. Torkamany, J, S. Nabavi, H, Inspection of metallic samples defects in nondestructive testing by laser shearography with thermal loading, Nondestructive testing techlonogy, 2(2) (2018) 19-25. (in Persian)
- [29] D. Akbari, N. Soltani, F. Reshadi, Application of Digital Shearography for Non Destructive Testing of material with Thermal Loading, Modares Mechanical Engineering, 13(4) (2013) 36-45. (in Persian)
- [30] D. Akbari, N. Soltani, M. Farahani, 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, 227(3) (2013) 430-442.
- [31] Z. Liu, J. Gao, H. Xie, P. Wallace, NDT capability of digital shearography for different materials, Optics and Lasers in Engineering, 49(12) (2011) 1462-1469.
- [32] F. Banakar, D. Akbari, Investigation of Digital Shearography for Defect Detection in Different Materials, Nondestructive testing techlonogy 2(3) (2019) 8-22. (in Persian)
- [33] F. Banakar, D. Akbari, Application of Shearography for the crack detection in polymer materials, 27th Annual international conference of Iranian Society of Mechanical Engineering, 27 (2019) 1679-1673. (in Persian)
- [34] L. Yang, F. Chen, W. Steinchen, M.Y. Hung, Digital shearography for nondestructive testing: potentials, limitations, and applications, Journal of Holography and Speckle, 1(2) (2004) 69-79.
- [35] D. Francis, R. Tatam, R. Groves, Shearography technology and applications: a review, Measurement science and technology, 21(10) (2010) 102001.
- [36] Y. Hung, Y.S. Chen, S. Ng, L. Liu, Y. Huang, B. Luk, R. Ip, C. Wu, P. Chung, Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation, Materials Science and Engineering: R: Reports, 64(5-6) (2009) 73-112.

- [17] Y.M. He, C.J. Tay, H.M. Shang, Digital phaseshifting shearography for slope measurement, Optical Engineering, 38(9) (1999) 1586-1590, 1585.
- [18] J.-R. Huang, H. Ford, R. Tatam, Slope measurement by two-wavelength electronic shearography, Optics and lasers in engineering, 27(3) (1997) 321-333.
- [19] W. Steinchen, G. Kupfer, P. Mäckel, Full field tensile strain shearography of welded specimens, Strain, 38(1) (2002) 17-26.
- [20] D. Akbari, H. Asemani, Analysis of laser interfrometry parameters in the evaluation of defects in the polymer matrix composites, Modares Mechanical Engineering, 17(9) (2017) 372-380. (in Persian)
- [21] S. Nakadate, T. Yatagai, H. Saito, Digital specklepattern shearing interferometry, Applied Optics, 19(24) (1980) 4241-4246.
- [22] M. Mohamadi, D. Akbari, Evaluation of subsurface cracks in polymer matrix composites with laser interferometric method, International Journal of Manufacturing Engineering, 2(3) (2015) 11-23.
- [23] D. Akbari, N. Soltani, Investigation of loading parameters in detection of internal cracks of composite material with digital shearography, World Applied Sciences Journal, 21(4) (2013) 526-535.
- [24] H. Liu, S. Guo, Y.F. Chen, C.Y. Tan, L. Zhang, Acoustic shearography for crack detection in metallic plates, Smart Materials and Structures, 27(8) (2018) 085018/085011-085010.
- [25] R. Pezzoni, R. Krupka, Laser-shearography for non-destructive testing of large-area composite helicopter structures, INSIGHT-WIGSTON THEN NORTHAMPTON-, 43(4) (2001) 244-248.
- [26] S.W. Choi, J.H. Lee, Nondestructive evaluation of internal defects for composite materials by using shearography, in: Key engineering materials, Trans Tech Publ, 2004, pp. 781-786.
- [27] Y. Huang, S. Ng, L. Liu, C. Li, Y. Chen, Y. Hung, NDT&E using shearography with impulsive thermal stressing and clustering phase extraction, Optics and

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم F. Banakar, D. Akbari, Non-destructive evaluation of internal cracks in glass fiber-reinforced polymers using digital shearing interferometry, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 6) (2021) 4063-4078.



DOI: 10.22060/mej.2021.18182.6756

بی موجعه محمد ا