



اندازه‌گیری غیرمخرب عیوب داخلی با استفاده از روش تداخل سنجی لیزری برشی

سینا صباغی فرشی^۱، داود اکبری^{۲*}، نوید صابری نصرآباد^۳

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی ۱۱۱-۱۵۱۱۵، daakbari@modares.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۱۵ بهمن ۱۳۹۷

پذیرش: ۲۴ تیر ۱۳۹۸

ارائه در سایت: فروردین ۱۳۹۹

کلیدواژگان:

برش‌نگاری دیجیتالی

عیوب صفحه‌ای

اندازه برش

اندازه عیب

برش‌نگاری دیجیتالی روشی مبتنی بر تداخل سنجی لیزری است که در تشخیص و اندازه‌گیری عیوب به صورت غیر مخرب کاربرد دارد. در این پژوهش روش جدیدی برای اندازه‌گیری عیوب داخلی صفحه‌ای در قطعات به روش برش‌نگاری ارائه شد. به منظور صحت‌سنجی روش ارائه شده و مطالعه اثر عمق عیب و اندازه برش بر دقت اندازه‌گیری آن در مجموع ۱۶ آزمون برش‌نگاری با تغییر اندازه عیب در چهار سطح و عمق عیب و اندازه برش در دو سطح صورت گرفت. اندازه عیوب در شرایط مختلف اندازه‌گیری شده و خطای تخمین اندازه در هر مورد به دست آمد. روش ارائه شده با دقت خوبی قادر به تخمین اندازه عیب بود و کمترین درصد خطا در آزمون برش‌نگاری عیب ۱۵ میلی‌متر در عمق ۰/۵ میلی‌متر با اندازه برش ۱۵ میلی‌متر به دست آمد. نتایج به دست آمده نشان داد که با نزدیک شدن اندازه برش به اندازه عیب درصد خطا کاهش می‌یابد و بیشترین دقت تخمین اندازه عیب زمانی حاصل می‌شود که اندازه برش برابر با اندازه عیب باشد. همچنین تغییر عمق عیب باعث تغییر خطای تخمین اندازه عیب شده و در اغلب موارد تخمین اندازه عیوب با عمق ۱ میلی‌متر به دلیل وضوح بهتر هاله‌های تشکیل شده، با دقت بیشتری همراه بود.

Non-destructive measurement of internal defects using shear laser interferometry method

Sina Sabbaghi Farshi, Davood Akbari*, Navid Saberi Nasrabad

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

* P.O.B. 14115-111 Tehran, Iran daakbari@modares.ac.ir

Article Information

Original Research Paper
Received 4 February 2019
Accepted 15 July 2019
Available March 2020

Keywords:

Digital shearography
Planar defects
Shear size
Defect size

Abstract

Digital shearography is a laser interferometry method that is used to detect and measure defects non-destructively. In this study, a new approach was presented to measure internal planar defects using digital shearography method. A total of 16 shearography tests were carried out in order to verify the proposed method and study the effect of shear size and depth of defect on measurement accuracy. Defect size was varied in four level and depth of defect and shear size were changed in two levels. The defects size were measured in different conditions and the estimation error was obtained in each case. The proposed method was able to predict defect size with good precision and the lowest error percentage was obtained in 15 mm size 0.5 mm depth defect at shear size of 15 mm. The results showed that as the shear size is approached the defect size, the error percentage is reduced and the maximum accuracy of prediction is obtained when the shear size is equal to the size of the defect. Also, varying the depth of defect led to variation of estimation error, and in most cases the prediction of defect size with a depth of 1 mm was more precisely due to the better shape of the shearography fringes.

۱- مقدمه

مغناطیسی را در تشخیص عیوب این گونه مواد محدود و در مواردی ناممکن می‌سازد. از این رو در سال‌های اخیر، روش‌های جدیدی توسعه یافته‌اند که علاوه بر قابلیت تشخیص عیوب در مواد مرکب از سرعت عملکردی بالایی نیز برخوردارند [۱].

روش‌های نوری نظیر هولوگرافی^۱، تداخل سنجی الگوی لکه‌ای^۲ و برش‌نگاری دیجیتالی^۳ از جمله این روش‌ها هستند که

قطعات ساخته شده از مواد مرکب و پلیمری نقش بسیار مهمی در صنعت دارند. از این رو، شناسایی، تشخیص و ارزیابی اندازه، شکل و ماهیت عیوب در این قطعات بدون ایجاد تغییر و وارد کردن آسیب، از اهمیت بالایی برخوردار است. از طرف دیگر خواصی همچون ناهمگنی، عدم رسانایی الکتریکی و عدم مغناطیس بودن، امکان استفاده از روش‌های سنتی آزمون‌های غیرمخرب همانند آزمون فراصوتی، جریان‌های گردابی و ذرات

¹ Holography² Electronic Speckle Pattern Interferometry³ Digital Shearography

Please cite this article using:

S. Sabbaghi Farshi, D. Akbari, N. Saberi Nasrabad, Non-destructive measurement of internal defects using shear laser interferometry method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 7, No. 1, pp. 45- 52, 2020 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

روش برش‌نگاری دیجیتال به دلیل حساسیت کمتر به ارتعاشات محیط، عدم نیاز به انتقال نور مرجع جهت ایجاد تداخل و اندازه‌گیری مستقیم کرنش (مشق اول جابه‌جایی سطح) امکان انجام آزمون در محیط صنعتی را فراهم می‌کند [۲].

اساس روش برش‌نگاری دیجیتال بر دریافت پاسخ عیب نسبت به بارگذاری صورت گرفته استوار است. بدین صورت که هنگامی که قطعه معیوب از طریق بارگذاری تحریک می‌شود، وجود عیب سبب توزیع کرنش موضعی ناهمگن در محل عیب می‌گردد. آزمون برش‌نگاری دیجیتال با استفاده از این ناهمگنی و از طریق تشخیص الگوی کرنش ایجاد شده در سطح قطعه می‌تواند به وجود عیب پی ببرد [۳].

علی‌رغم مزایای عمده روش برش‌نگاری، در اکثر سیستم‌های عیب‌یابی از طریق این روش، صرفاً شناسایی وجود یا عدم وجود عیوب مدنظر بوده و تحلیل کمی از اندازه و شکل عیب وجود ندارد. پژوهش‌های صورت گرفته در این زمینه هم اغلب به بررسی کیفی عیوب پرداخته‌اند و مطالعات صورت گرفته در زمینه تحلیل کمی عیوب بسیار اندک است. لیو و همکاران [۴] به بررسی توانایی روش برش‌نگاری در تشخیص عیوب ترک و سوراخ در نمونه‌های آلومینیومی و پلیمری پرداختند و بر اساس نتایج به دست آمده، قانون تجربی را بیان کردند که کمترین قطر عیب قابل تشخیص توسط روش برش‌نگاری را بسته به عمق عیب و جنس نمونه نشان می‌داد. کیم و همکاران [۵] به بررسی آسیب‌های ضربه سرعت پایین در لمینت‌های کامپوزیتی از طریق برش‌نگاری دیجیتال پرداختند و نشان دادند که توانایی روش برش‌نگاری در تشخیص عمق عیوب به دلیل عدم تشخیص عیب در پشت قطعه پایین است. اکبری و همکاران [۶] اثر پارامترهای بارگذاری حرارتی و مکانیکی را در روش برش‌نگاری مورد مطالعه قرار دادند و نشان دادند که افزایش اندازه برش، افزایش کیفیت هاله‌ها و کاهش دقت آن‌ها را در پی دارد، لذا برای حصول الگوهای هاله‌ای با دقت و کیفیت بالا، اندازه برش را به صورت درصدی از اندازه تصویر پیشنهاد دادند. اکبری و سلطانی [۷] به بررسی اثر پارامترهای بارگذاری مکانیکی در تشخیص ترک‌های داخلی کامپوزیت پلیمری به روش برش‌نگاری پرداختند و به این نتیجه رسیدند که در آزمون برش‌نگاری برای دست‌یابی به نتایج مناسب پارامتر نسبت بارگذاری نیز از اهمیت بالایی برخوردار می‌باشد. پنگ و همکاران [۸] مدل مکانیکی را در روش برش‌نگاری با بارگذاری خلاء نسبی برای تعیین عمق عیوب بر اساس شرایط بارگذاری، جابه‌جایی خارج از صفحه و شعاع عیب ارائه نمودند. نتایج

تجربی این پژوهش نشان داد مقادیر اندازه‌گیری شده با این مدل کمتر از ۱۰ درصد خطا داشته و به خوبی قادر به اندازه‌گیری عمق عیب می‌باشد. لی و همکاران [۹] در پژوهشی به تشخیص و اندازه‌گیری عیوب در محل اتصال بتن به کامپوزیت در نمونه‌های بتنی تقویت شده با کامپوزیت کربنی (CFRP) از طریق روش برش‌نگاری پرداختند. نتایج به دست آمده از این پژوهش نشان داد که روش برش‌نگاری اندازه عیوب را با خطای ۹/۴٪ بیشتر از اندازه واقعی تخمین می‌زند. محمدی و اکبری [۱۰] به مطالعه کمی اندازه و عمق ترک در نمونه‌های کامپوزیتی به روش عددی و تجربی پرداختند. آن‌ها در این پژوهش با استفاده از روش المان محدود به شبیه‌سازی هاله‌های فازی پرداخته رابطه‌ای را بر اساس تعداد و تراکم هاله‌ها و نیروی بارگذاری ارائه دادند که قادر به اندازه‌گیری اندازه و عمق عیب بود. بوچتا و همکاران [۱۱] از طریق ترکیب شبیه‌سازی المان محدود و روش برش‌نگاری به تخمین اندازه و عمق عیوب در آثار هنری چوبی پرداختند. آن‌ها نمونه‌هایی با عیوب در عمق‌های مختلف را مدل‌سازی کرده و تحت بارگذاری حرارتی مشابه با شرایط نمونه تجربی قرار دادند و از طریق محاسبه اختلاف فاز واپیچیده نمونه‌های شبیه‌سازی شده با نمونه تجربی، عمق عیب را پیش‌بینی کردند. مطالعه پژوهش‌های پیشین صورت گرفته نشان می‌دهد بررسی کمی عیوب از طریق روش برش‌نگاری کمتر مورد توجه قرار گرفته و اندازه‌گیری عیوب با در نظر گرفتن تأثیر پارامترهای برش‌نگاری بر دقت اندازه‌گیری مورد مطالعه قرار نگرفته است. از طرف دیگر تخمین اندازه عیوب در کنار شناسایی آن‌ها می‌تواند در تصمیمات مربوط به رد یا پذیرش قطعه براساس عمر کارکرد آن و نیز ملاحظات طراحی آن تأثیرگذار باشد. هدف پژوهش حاضر اندازه‌گیری عیوب صفحه‌ای در مواد پلیمری در شرایط مختلف و بررسی نحوه تأثیر عمق عیب و اندازه برش بر دقت اندازه‌گیری عیوب است.

۲- تئوری برش‌نگاری

برش‌نگاری یکی از روش‌های تداخلسنجی لیزری است که با اندازه‌گیری تغییرات شدت نور بازتابی از سطح ناشی از تغییر بارگذاری، قادر است اطلاعاتی در خصوص گرادیان جابه‌جایی سطح بدهد. با تشخیص نقاطی که در اثر بارگذاری اعمالی دچار تمرکز کرنش سطحی می‌شوند، می‌توان به وجود عیوب و یا ناپیوستگی‌های زیرسطحی در قطعه پی برد. از این رو، می‌توان روش برش‌نگاری را به طور موثر در تشخیص غیرمخرب عیوب و ترک‌ها به کار برد. برش‌نگاری برای ایجاد تداخل همراه با برش

در این صورت شدت نور ثبت شده در دوربین پس از تداخل دو تصویر از رابطه (۱) به دست می‌آید [۱۲]:

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

که در آن I شدت نور تداخلی، I_0 شدت نور متوسط پرتوهای نور برش خورده، γ مدول تداخل و φ اختلاف فاز تصادفی بین دو تصویر برش خورده است. مطابق شکل ۱ شدت نور روی دوربین^۱ CCD حاصل بازتاب از نقاط A و B روی سطح نمونه است که از طریق فاصله برش δx از هم جدا شده‌اند.

هرگونه جابه‌جایی سطحی در نمونه، با ایجاد اختلاف در مسیر موج تا صفحه دوربین، باعث اختلاف فاز امواج رسیده در هر نقطه شده و تغییر شدت نور تصویر را در پی دارد. شدت نور تداخلی در هر نقطه از الگوی لکه‌ای پس از اعمال بارگذاری و تغییر شکل سطحی در نمونه، به صورت رابطه (۲) خواهد بود:

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

که در آن $\varphi'(x + y) = \varphi(x + y) + \Delta$ اختلاف فاز تصاویر برش خورده پس از بارگذاری نمونه و $\Delta = \varphi'(x + y) - \varphi(x + y)$ تغییر شکل نسبی است. در شکل ۱ بازتاب نور از سطح نمونه بارگذاری شده با خط چین نشان داده شده است.

با محاسبه اختلاف شدت نور قبل و بعد از بارگذاری، شدت نور هاله‌های برش‌نگاری به صورت رابطه (۳) به دست می‌آید:

$$I_s = I' - I = 4I_0\gamma[\cos(\varphi + \Delta) - \cos \varphi] \\ = 4I_0\gamma \left[\sin\left(\varphi + \frac{\Delta}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta}{2}\right) \right] \quad (3)$$

اگر $\Delta = 2N\pi$ باشد که در آن $N = 0, 1, 2, \dots$ شماره هاله را مشخص می‌کند، مقدار I_s صفر شده و هاله‌های تاریک مشاهده می‌گردند. بین دو هاله تاریک متوالی، منطقه روشن ایجاد می‌گردد ($\Delta = (2N + 1)\pi$) که در نتیجه الگوی حاصل، یک الگوی روشن و تاریک متوالی خواهد بود. از طرفی وجود مقدار $\sin\left(\varphi + \frac{\Delta}{2}\right)$ در رابطه که فاز تصادفی ناشی از تداخل اولیه است، باعث به وجود آمدن نویز شدیدی در الگوی هاله‌ها در ایجاد شده می‌گردد. وجود نویز باعث کاهش کیفیت هاله‌ها در نقاط حساس شده و تشخیص الگوهای اصلی دشوار خواهد بود. با این حال مقداری از این نویز ایجاد شده را می‌توان با استفاده از روش‌های مختلف پردازش تصویر کاهش داد.

اگر زوایای تابش و بازتابش تقریباً هم‌راستا بوده و عمود بر سطح نمونه باشند، سیستم برش‌نگاری تنها به گرادیان جابه‌جایی خارج از صفحه حساس خواهد بود. در این حالت

تصویر، از دستگاه برشگر استفاده می‌کند. دستگاه برشگر مابین سطح موردنظر و دوربین قرار گرفته و دو تصویر کاملاً مشابه روی هم افتاده ولی با جابه‌جایی عرضی را ایجاد می‌کند. متداول‌ترین روش برای ایجاد تصاویر برش خورده در برش‌نگاری استفاده از سیستم تداخل‌گر مایکلسون اصلاح شده می‌باشد. در این حالت با چرخاندن و ایجاد زاویه در یکی از آینه‌های تداخل‌گر، پرتوی منعکس شده از سطح آن آینه دچار جابه‌جایی عرضی می‌گردد. شکل ۱ نحوه چیدمان نوری روش برش‌نگاری را با استفاده از سیستم تداخل‌گر مایکلسون اصلاح‌شده نشان می‌دهد. در حالت اول، پرتو نور حاصل از لیزر روی سطح نمونه تابانده می‌شود و پرتوهای بازتابی از سطح نمونه پس از عبور از تداخل‌گر مایکلسون اصلاح شده، در صفحه تصویر دوربین تصویر می‌شوند. تصویر حاصل به دلیل چرخش یکی از آینه‌های تداخل‌گر، شامل دو تصویر مشابه ولی با جابه‌جایی جانبی خواهد بود (شکل ۲) و به صورت الگوی لکه‌ای مشاهده خواهد شد که در آن نقاط روشن و تاریک نشان دهنده تداخل نقطه به نقطه دو تصویر روی هم افتاده (برش خورده) است.

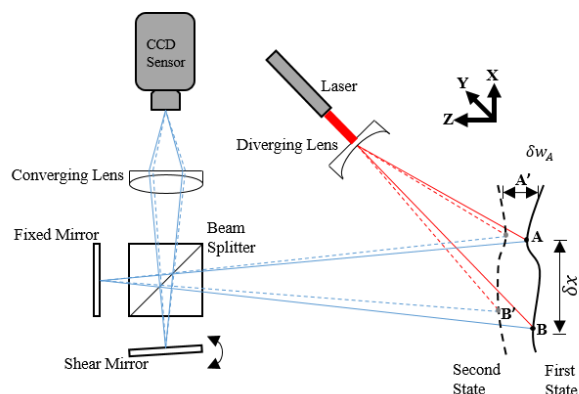


Fig. 1 Schematic of shearography setup

شکل ۱ چیدمان روش برش‌نگاری به صورت شماتیک

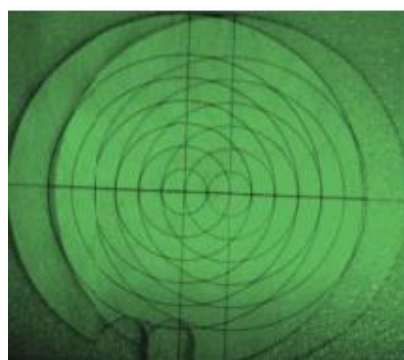


Fig. 2 Sheared image

شکل ۲ تصویر برش خورده

¹ Charge-coupled device

که در آن r فاصله از مرکز عیب، q پارامتر بارگذاری، U ضریب پواسون و E مدول الاستیک ماده است. در برش‌نگاری، گرادیان تغییر شکل خارج از صفحه نسبت به راستای برش تعیین می‌گردد. از آن‌جا که تغییر شکل موردنظر متقارن محوری است، گرادیان جابه‌جایی خارج از صفحه برای برش در هر جهتی برابر است با:

$$\frac{\partial w(r)}{\partial r} = \frac{3q(1-v^2)}{4Et^3}(a^2 - r^2)r \quad (6)$$

بر این اساس و مطابق شکل ۳ (ب) گرادیان جابه‌جایی ماکزیمم در دو طرف مرکز عیب و در فاصله $\pm r_m$ رخ می‌دهد. برای پیدا کردن این فاصله باید مشتق دوم جابه‌جایی نسبت به r محاسبه شود:

$$\frac{\partial^2 w(r_m)}{\partial r^2} = 0 \Rightarrow r_m = \pm \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

از طرفی براساس شکل ۳ (ج) نقاط $\pm r_m$ متناسب با محل تمرکز هاله‌ها در دو طرف الگوی فازی هستند. این اندازه را می‌توان از روی تصویر فازی حاصل از بازرسی نمونه معیوب و یا با اندازه‌گیری فاصله قله‌ها در نمودار تغییرات گرادیان جابه‌جایی اندازه‌گیری کرد. به دلیل برش تصاویر، ابعاد عیب به اندازه یک طول برش بزرگتر از اندازه واقعی تعیین می‌شود که لازم است طول برش از مقدار محاسبه شده کسر گردد. لذا اندازه عیب با رابطه (۸) پیشنهاد می‌گردد:

$$2a = 2\sqrt{3}r_m - \delta x \quad (8)$$

۳- آزمون‌های تجربی

به منظور ارزیابی رابطه ارایه شده، آزمون‌های تجربی روی نمونه پلیمری صورت گرفت. بدین منظور، عیوب صفحه‌ای در نمونه پلیمری از جنس تفلون (PTFE) با ایجاد سوراخ‌های راه‌به‌در در یک سمت نمونه، مدل‌سازی شدند. سوراخ‌ها با استفاده از تیغ فرز انگشتی تخت به نحوی ایجاد شدند که کف سوراخ‌ها کاملاً موازی سطح قطعه باشند تا بدین ترتیب نشانگر نوعی از عیوب صفحه‌ای باشند. اندازه عیب در ۴ سطح و عمق عیب از سطح و اندازه برش نیز در ۲ سطح تغییر داده شدند (جدول ۱). شکل ۴ نمونه مورد استفاده و اندازه و عمق عیوب ایجاد شده در آن را نشان می‌دهد.

به منظور انجام آزمون‌های برش‌نگاری از چیدمانی مطابق شکل ۵ استفاده شد. لیزر قرمز رنگ با توان ۵۰ میلی‌وات و طول موج ۶۳۵ نانومتر برای روشن کردن سطح نمونه و سنسور CCD

مشتق جابه‌جایی خارج از صفحه برابر خواهد بود با [۱۲]:

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

۲-۱- تحلیل کمی اندازه عیوب

عیوب صفحه‌ای نظیر جدایش بین لایه‌ای و یا عدم پیوستگی به صورت بخشی از ماده جدا شده در سطح قطعه هستند که پیوستگی خود با نواحی اطراف را تنها از طریق مرزهای ناپیوستگی حفظ می‌کنند. در صورتی که عمق عیب t نسبت به اندازه برش بسیار کوچکتر باشد، می‌توان این گونه عیوب را در محل تشکیل با یک صفحه به قطر $2a$ و ضخامت t مدل کرد که در آن $2a$ معادل قطر عیب و t عمق عیب آن است (شکل ۳ الف). در حین بارگذاری فشاری و یا حرارتی، سطح معیوب قطعه به صورت یکنواخت تحت کرنش قرار گرفته و برآمدگی پیوسته‌ای روی سطح آن ایجاد می‌شود. اندازه جابه‌جایی خارج از صفحه ایجاد شده در اثر بارگذاری یکنواخت در صفحه دایره‌ای که از اطراف به طور کامل مفید شده است، با استفاده از تئوری الاستیک صفحات در مختصات قطبی به صورت زیر ارائه می‌شود:

$$w(r) = \frac{3q(1-v^2)}{16Et^3}(a^2 - r^2)^2 \quad (5)$$

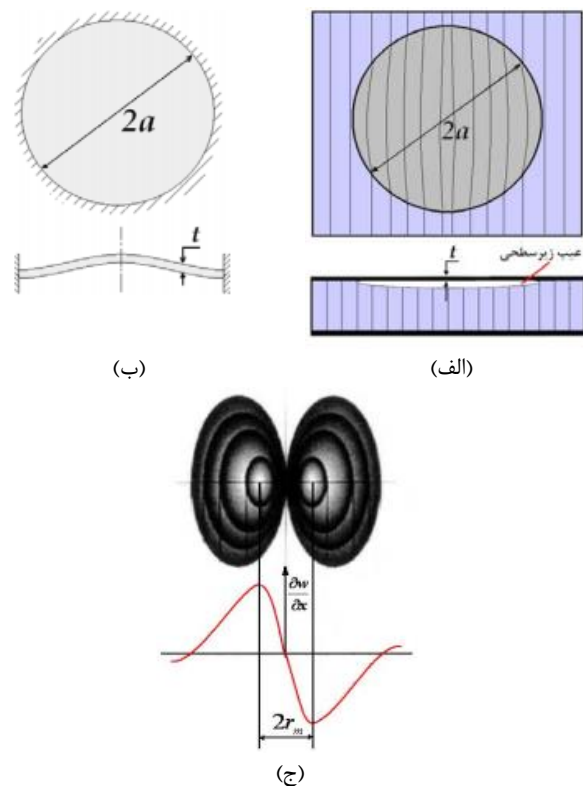


Fig. 3 (a) Subsurface defect, (b) its equivalent model, and (c) the out of plane displacement gradient $\frac{\partial w}{\partial x}$ and how to measure r_m

شکل ۳ الف) عیب زیر صفحه‌ای، (ب) مدل معادل آن و (ج) گرادیان

جابه‌جایی خارج از صفحه $\frac{\partial w}{\partial x}$ و نحوه اندازه‌گیری r_m

¹ Polytetrafluoroethylene

لامپ حرارتی و یا یک المان برقی گرم می‌شود و انبساط حرارتی ایجاد شده در قطعه باعث ایجاد تغییر شکل جزئی در سطح نمونه می‌گردد. در این بین چنانچه نقطه ناپیوستگی نظیر یک عیب صفحه‌ای نزدیک سطح قطعه وجود داشته باشد، انبساط حرارتی ایجاد شده در نزدیکی عیب متفاوت از نقاط اطراف بوده و ناپیوستگی انبساطی موجب ایجاد هاله‌های برش‌نگاری در مناطق معیوب می‌گردد. بدین منظور از یک پروژکتور با توان ۱۰۰۰ وات استفاده شد. نمونه به مدت ۳ ثانیه تحت تابش مستقیم نور پروژکتور به فاصله ۲۰ سانتی‌متر از آن قرار گرفته و سپس در حین خنک شدن هر ۱ ثانیه تصویر تداخلی از سطح قطعه گرفته شد. در این روش میزان بازگذاری از طریق تنظیم زمان بین دو تصویر ثبت شده متوالی در حین خنک شدن نمونه تنظیم گردید، به طوری که با گذشت زمان و خنک شدن سطح قطعه اختلاف تصاویر مرجع و سطح تغییر شکل یافته افزایش یافته و میزان بازگذاری بیشتر می‌گردد.

۴- نتایج و بحث

همان‌گونه که ذکر گردید در مجموع ۱۶ آزمایش صورت گرفت و در همه آن‌ها به جز دو مورد (اندازه برش ۱۵ میلی‌متر در عیب ۱۰ میلی‌متری)، عیوب ایجاد شده به خوبی توسط آزمون برش‌نگاری آشکار شدند. دلیل عدم تشکیل هاله‌های برش‌نگاری در این دو مورد، اندازه برش بیشتر از اندازه عیب می‌باشد که قابل انتظار بود. هاله‌های برش‌نگاری به دست آمده در اندازه برش ۱۰ میلی‌متر در شکل ۶ نشان داده شده است. سپس تصاویر ثبت شده از طریق الگوریتم‌های پردازش تصویر فیلتر شده و پارامترهای روش ارائه شده اندازه‌گیری شدند. نتایج به دست آمده در جدول ۲ ارائه شده است. پارامترهای اندازه‌گیری روش ارائه شده در این پژوهش برای تشخیص اندازه عیوب صفحه‌ای، به میزان بازگذاری اعمالی وابسته نبوده و محل تمرکز هاله‌ها با تغییر میزان بازگذاری ثابت خواهد بود. با این حال به دلیل تأثیرپذیری نوع و شکل هاله‌ها از اندازه و عمق عیوب، جنس ماده، اندازه برش و دقت تصویر برداری، تعیین اندازه عیب در این روش نیز همواره با مقداری خطا همراه خواهد بود. درصد خطای اندازه‌گیری تخمین قطر عیب به صورت رابطه (۹) تعریف شد:

$$\frac{d_{est} - d_0}{d_0} \times 100 \quad (9)$$

که در آن d_{est} قطر تخمین زده شده و d_0 اندازه قطر عیب است.

با سرعت ۱۵ فریم بر ثانیه برای ثبت تصاویر به کار گرفته شد.

جدول ۱ پارامترهای تأثیرگذار بر دقت اندازه‌گیری عیوب (میلی‌متر) به همراه سطوح تغییرات

Table 1 Parameters affecting the measurement accuracy of defects (mm) with the variation levels

پارامتر	سطح			
	۴	۳	۲	۱
اندازه عیب	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰
عمق عیب	-	-	۱	۰/۵
اندازه برش	-	-	۱۵	۱۰

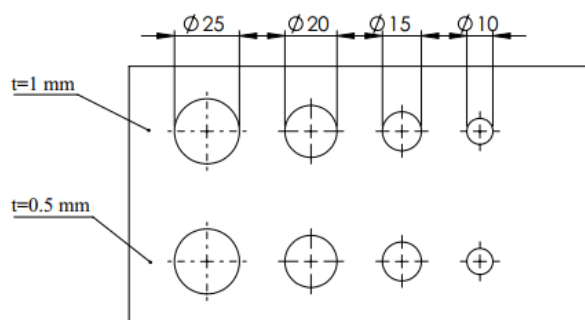


Fig. 3 The size and depth of the defects created in the teflon specimen
شکل ۴ اندازه و عمق عیوب ایجاد شده در نمونه تفلونی

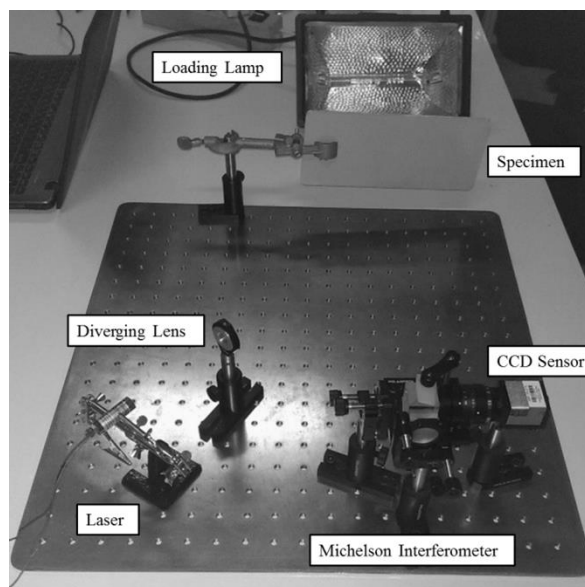


Fig. 5 Experimental setup used in tests

شکل ۵ چیدمان مورد استفاده در انجام آزمون‌های تجربی

انجام فرایند کم کردن تصاویر از یکدیگر و اعمال الگوهای پردازش تصویر از طریق نرم‌افزار متلب صورت گرفت. اعمال بازگذاری از طریق روش حرارتی صورت گرفت. در این روش سطح قطعه تحت آزمون با استفاده از یک المان حرارتی نظیر

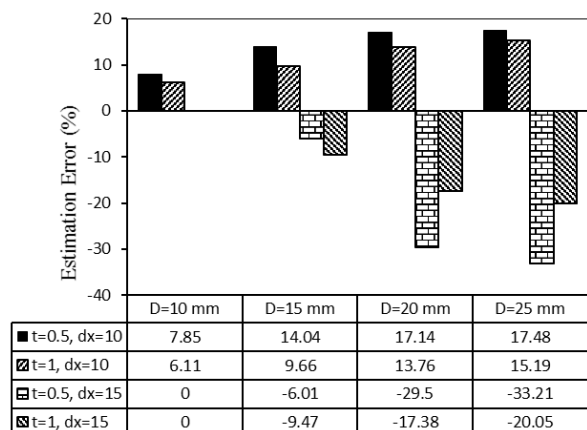


Fig. 7 Defect size estimation error

شکل ۷ مقادیر خطای به دست آمده در پیش‌بینی اندازه عیب

از طرفی مرز هاله‌ها و یا مرز الگوی فاز واپیچیده تنها یک نقطه و یا یک خط مشخص نیست بلکه یک طیف گذر از تیرگی به روشنی است، از این رو تعیین یک نقطه دقیق برای تشخیص محل شروع و پایان ناپیوستگی عملاً امکان‌پذیر نیست. مزیت اصلی روش ارائه شده در این پژوهش برای تشخیص اندازه عیوب صفحه‌ای، عدم وابستگی پارامترهای اندازه‌گیری به میزان بارگذاری اعمالی است، این امر در روش ارائه شده توسط میشل و همکاران [۱۳] با افزایش دامنه مرز هاله‌های ایجاد شده در اثر افزایش بارگذاری سبب کاهش دقت اندازه‌گیری اندازه عیب می‌شود. این در حالی است که در روش معرفی شده اندازه‌گیری عیب به مرز هاله‌ها وابسته نبود و محل تمرکز هاله‌ها با تغییر میزان بارگذاری ثابت خواهد بود.

با وجود این که عمق عیب با توجه به رابطه ارائه شده به صورت مستقیم در پیش‌بینی اندازه عیب تأثیر ندارد، ولی با توجه به تأثیرپذیری نوع و شکل هاله‌ها از عمق عیوب، ملاحظه می‌شود که تغییر عمق عیب باعث تغییر خطای پیش‌بینی اندازه عیب شده و پیش‌بینی اندازه عیوب با عمق ۱ میلی‌متر با دقت بیشتری همراه است که دلیل این امر تشکیل هاله‌هایی با وضوح پایین‌تر در عیوب با عمق ۰/۵ میلی‌متر است که سبب کاهش دقت اندازه‌گیری می‌شود. یکی از مزایای اصلی روش ارائه شده برای تشخیص اندازه عیوب صفحه‌ای، عدم وابستگی پارامترهای اندازه‌گیری به میزان بارگذاری اعمالی است، با این حال به دلیل تأثیرپذیری نوع و شکل هاله‌ها از اندازه و عمق عیوب، جنس ماده، اندازه برش و دقت تصویر برداری، تعیین اندازه عیب با مقداری خطا همراه خواهد بود.

اندازه برش عامل تأثیرگذار دیگری است که بر دقت پیش‌بینی اندازه عیب تأثیر می‌گذارد. با وجود این که در رابطه

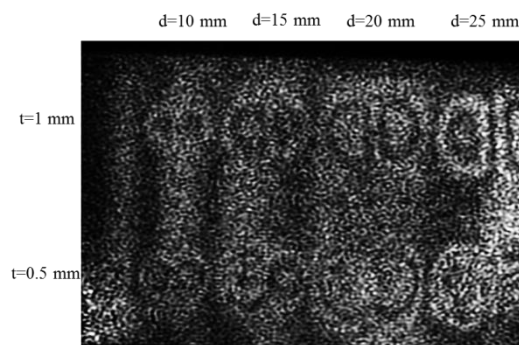


Fig. 6 Shearograms in experiment with shear size of 10 mm

شکل ۶ هاله‌های برش‌نگاری در آزمون با اندازه برش ۱۰ میلی‌متر

جدول ۲ نتایج تخمین اندازه عیوب در شرایط مختلف

Table 1 Results of the defects size prediction in different conditions

D=25 mm	D=20 mm	D=15 mm	D=10 mm	اندازه برش	عمق عیب
۲۹/۳۷	۲۳/۴۳	۱۷/۱۱	۱۰/۷۸	۱۰	t = 0.5 mm
۱۶/۷۰	۱۴/۱۰	۱۳/۵۸	-	۱۵	
۲۸/۸۰	۲۲/۷۵	۱۶/۴۵	۱۰/۶۱	۱۰	t = 1 mm
۲۰/۲۰	۱۸/۲۰	۱۶/۸۰	-	۱۵	

شکل ۷ نمودار مربوط به درصد خطای پیش‌بینی اندازه عیوب را در شرایط مختلف نشان می‌دهد. ملاحظه می‌شود که رابطه ارائه شده توانست با دقت خوبی اندازه عیوب را پیش‌بینی کند و کمترین درصد خطای پیش‌بینی به مقدار ۶٪ به دست آمد که در آزمون برش‌نگاری عیب ۱۵ میلی‌متر در عمق ۰/۵ میلی‌متر و با اندازه برش ۱۵ میلی‌متر مشاهده گردید. همچنین در مورد اندازه برش ۱۵ میلی‌متر، اندازه عیوب کمتر از مقدار واقعی تخمین زده شدند (درصد خطای منفی)، این در حالی است که در اندازه برش ۱۰ میلی‌متر، مقادیر تخمین زده شده شده بیشتر از اندازه عیوب بودند. میشل و همکاران [۱۳] روش دیگری را در سال ۲۰۰۷ برای تعیین اندازه عیوب صفحه‌ای پیشنهاد دادند که پارامترهای اندازه‌گیری آن براساس شناسایی مرز هاله‌ها در الگوهای فازی برش‌نگاری بود. مقایسه نتایج به دست آمده از روش ارائه شده در این پژوهش با مقادیر پیش‌بینی شده حاصل از روش میشل [۱۳] حاکی از دقت بالاتر روش پیشنهادی در تمامی آزمون‌هاست. تعیین اندازه به روش میشل [۱۳] اگرچه تا حد زیادی به اندازه واقعی عیب نزدیک است، ولی شناسایی مرز هاله‌های ایجاد شده به سادگی قابل تشخیص نیستند. این مسئله خصوصاً در مواردی که کیفیت الگوهای فازی پایین‌تر بوده و یا چند عیب نزدیک یکدیگر قرار داشته باشند بسیار دشوار و عملاً غیرممکن است.

اعمالی وابسته نیستند، با این حال به دلیل تأثیرپذیری نوع و شکل هاله‌ها از اندازه و عمق عیوب، جنس ماده، اندازه برش و دقت تصویر برداری، تعیین اندازه عیب با مقداری خطا همراه است.

- روش ارائه شده با دقت خوبی قادر به پیش‌بینی اندازه عیب بود و کمترین درصد خطای پیش‌بینی در آزمون عیب ۱۵ میلی‌متر در عمق ۰/۵ میلی‌متر با اندازه برش ۱۵ میلی‌متر به دست آمد.

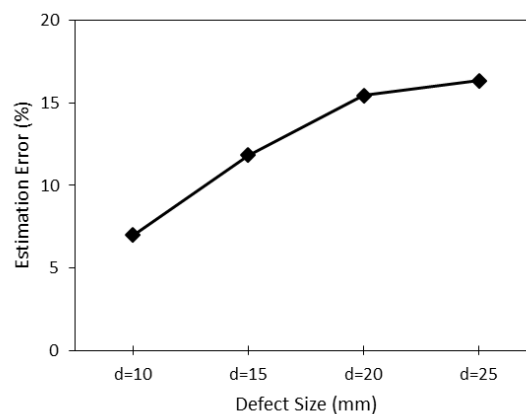
- تغییر عمق عیب باعث تغییر خطای پیش‌بینی اندازه عیب شده و در اغلب موارد پیش‌بینی اندازه عیوب با عمق ۱ میلی‌متر به دلیل وضوح بهتر هاله‌های تشکیل شده، با دقت بیشتری همراه است.

- تخمین اندازه عیب زمانی با کمترین خطا همراه می‌شود که اندازه برش کمترین اختلاف را با اندازه عیب داشته باشد.

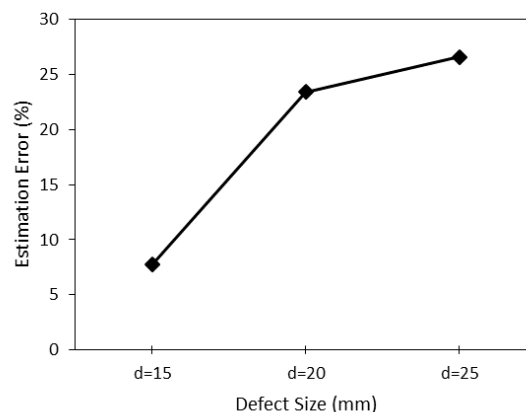
۶- مراجع

- [1] K. Senthil, A. Arockiarajan, R. Palaninathan, B. Santhosh, K. Usha, Defects in composite structures: Its effects and prediction methods—A comprehensive review, *Composite Structures*, Vol. 106, pp. 139-149, 2013.
- [2] Y. Hung, Shearography: a novel and practical approach for nondestructive inspection, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 8, No. 2, pp. 55-67, 1989.
- [3] Y. Hung, H. Ho, Shearography: An optical measurement technique and applications, *Materials science and engineering: R: Reports*, Vol. 49, No. 3, pp. 61-87, 2005.
- [4] Z. Liu, J. Gao, H. Xie, P. Wallace, NDT capability of digital shearography for different materials, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 49, No. 12, pp. 1462-1469, 2011.
- [5] G. Kim, S. Hong, K.-Y. Jhang, G. H. Kim, NDE of low-velocity impact damages in composite laminates using ESPI, digital shearography and ultrasound C-scan techniques, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 13, No. 6, pp. 869-876, 2012.
- [6] 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*, Vol. 227, No. 3, pp. 430-442, 2013.
- [7] D. Akbari, N. Soltani, Investigation of loading parameters in detection of internal cracks of composite material with digital shearography, *World Applied Sciences Journal*, Vol. 21, No. 4, pp. 526-

معرفی شده برای تخمین اندازه عیب، پارامتر اندازه برش به طور مستقیم تأثیر ندارد، ولی همانند پارامتر عمق عیب روی هاله‌های تشکیل شده تأثیرگذار بوده و لازم است برای تشکیل هاله‌های واضح و با کمترین خطا متناسب با اندازه عیب باشد [۶]. این موضوع در شکل ۸ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تخمین اندازه عیب زمانی با کمترین خطا همراه می‌شود که اندازه برش نزدیک به اندازه عیب باشد.



(الف)



(ب)

Fig. 9 Variation of defect size estimation error in different defects and shear size of (a) 10 and (b) 15 mm

شکل ۸ تغییرات خطای تخمین اندازه عیب در عیوب مختلف و در اندازه برش (الف) ۱۰ و (ب) ۱۵ میلی‌متر

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش جدیدی برای پیش‌بینی اندازه عیوب صفحه‌ای به روش برش‌نگاری دیجیتال ارائه شد. به منظور دقت‌سنجی روش ارائه شده و بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر دقت آن در مجموعه ۱۶ آزمون برش‌نگاری صورت گرفت که مهم‌ترین نتایج این پژوهش در ادامه آمده است.

- پارامترهای اندازه‌گیری روش ارائه شده به میزان بارگذاری

- Manufacturing Engineerin*, Vol. 2, No. 3, pp. 11-23, 2015.
- [11] D. Buchta, C. Heinemann, G. Pedrini, C. Krekel, W. Osten, Combination of FEM simulations and shearography for defect detection on artwork, *Strain*, Vol. 54, No. 3, pp. e12269, 2018.
- [12] D. Francis, R. Tatam, R. Groves, Shearography technology and applications: a review, *Measurement science and technology*, Vol. 21, No. 10, pp. 102001, 2010.
- [13] F. Michel, V. Moreau, V. Rosso, S. Habraken, B. Tilkens, Quantification of defect size in shearing direction by shearography and wavelet transform, in *Proceeding of*, International Society for Optics and Photonics, pp. 661636, 535, 2013.
- [8] Y. Peng, G. Liu, Y. Quan, Q. Zeng, The depth measurement of internal defect based on laser speckle shearing interference, *Optics & Laser Technology*, Vol. 92, pp. 69-73, 2017.
- [9] W. Lai, S. Kou, C. Poon, W. Tsang, S. Ng, Y. Hung, Characterization of flaws embedded in externally bonded CFRP on concrete beams by infrared thermography and shearography, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 28, No. 1, pp. 27-35, 2009.
- [10] M. Mohammadi, D. Akbari, Evaluation of sub-surface cracks in polymer matrix composites with laser interferometric method, *Iranian Journal of*