



کاربرد روش تداخل‌سنجی لیزری برشی در بازرسی غیر مخرب و تخمین اندازه عیوب صفحه‌ای

سینا صباغی فرشی^۱ و داود اکبری^{۲*}

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

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

مقاله مستقل؛ تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۱/۲۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۸/۰۶/۱۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۱۱/۱۹

چکیده

تداخل‌سنجی لیزری برشی یا برش‌نگاری یکی از روش‌های نوین بازرسی غیر مخرب است که در تشخیص و تخمین اندازه عیوب زیر سطحی کاربرد دارد. در این پژوهش روش جدیدی برای تخمین اندازه عیوب صفحه‌ای در قطعات با این روش ارائه شده است. به‌منظور صحت‌سنجی و مقایسه روش ارائه شده با روش‌های مرسوم و مطالعه اثر عمق عیب و اندازه برش بر دقت اندازه‌گیری، عیوب صفحه‌ای با اندازه و عمق‌های مختلف و با پارامتر اندازه برش متفاوت آزموده شدند. اندازه عیوب در شرایط مختلف تعیین شده و خطای پیش‌بینی اندازه عیب در هر مورد به دست آمد؛ همچنین شبیه‌سازی اجزای محدود به‌منظور بررسی تأثیر میزان بارگذاری بر دقت تخمین اندازه عیوب مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان داد، روش ارائه شده قادر به پیش‌بینی اندازه عیب با دقت بیشتری نسبت به روش مرسوم است؛ همچنین تأثیر نسبت اندازه برش و اندازه عیب بر خطای تخمین در روش ارائه شده کمتر بوده و بیشترین دقت پیش‌بینی اندازه عیب زمانی حاصل می‌شود که اندازه برش برابر با اندازه عیب باشد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود نشان داد، در روش ارائه شده برخلاف روش مرسوم، افزایش زمان بارگذاری بر دقت تخمین اندازه عیب بی‌تأثیر بوده و پارامترهای اندازه‌گیری آن به میزان بارگذاری بستگی ندارد.

کلمات کلیدی: تداخل‌سنجی لیزری برشی؛ روش المان محدود؛ اندازه برش؛ اندازه عیب.

Application of Laser Shearing Interferometry in Non-Destructive Inspection and Size Estimation of Plane Defects

S. Sabbaghi Farshi¹, D. Akbari^{2,*}

¹ Ph.D. Student, Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

² Asst. Prof., Mech. Eng., Tarbiat Modares Univ., Tehran, Iran.

Abstract

Laser shear interferometry or shearography is one of the novel NDE methods that is used to inspect and estimate the size of subsurface defects. In this research, a new method for estimating the size of plane defects was presented. In order to verify and compare the proposed method with conventional methods and studying the effect of defect depth and shear size on the accuracy of the measurements, different plane defects were tested. The size of the defects was measured in different conditions and the estimation error was reached in each case. Also, Finite element simulation was used to study the effect of loading time estimation error. The results showed that the proposed method was able to predict the defect more accurately than the conventional method. Also, the effect of shear size and defect size on the estimation error is less in the presented method and the lowest estimation error is obtained when the shear size is equal to the size of the defect. The results of the finite element simulation showed that in the proposed method, unlike the conventional method, increasing loading time does not affect the accuracy of estimation and its measurement parameters do not depend on the loading time.

Keywords: Laser Shear Interferometry; FEM; Shear Size; Defect Size.

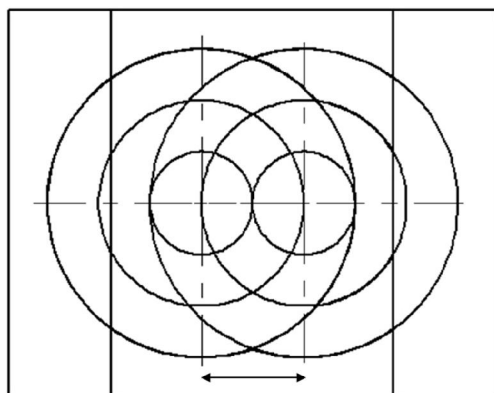
۱- مقدمه

مواد مرکب زمینه پلیمری به دلیل مزایایی نظیر نسبت استحکام به وزن بالا و مقاومت خوردگی خوب، به‌صورت گسترده در صنایع مختلف نظیر، هوافضا، خودروسازی و انرژی کاربرد دارند. این قطعات در شرایط سرویس‌دهی عموماً تحت بارگذاری‌های شدید نظیر، بارهای خستگی، سیکل‌های رطوبتی-حرارتی و یا خوردگی قرار می‌گیرند. چنین شرایط کارکردی نیازمند بازه‌های زمانی دقیق برای بازرسی و تعمیر است [۱]. از طرفی، این مواد به دلیل ویژگی‌هایی نظیر، ناهمگنی و چند ساختاری، در مقایسه با سایر مواد بیشتر مستعد ایجاد عیوب هستند. از این‌رو، شناسایی، تشخیص و ارزیابی اندازه، شکل و ماهیت عیوب در این قطعات به‌صورت غیر مخرب از اهمیت بالایی برخوردار است؛ همچنین، وجود خواصی نظیر، ناهمگنی، عدم رسانایی الکتریکی و عدم مغناطیس بودن، منجر به عدم کارایی مناسب بسیاری از روش‌های سنتی آزمون‌های غیر مخرب در تشخیص عیوب این‌گونه مواد می‌شود. از این‌رو در سال‌های اخیر، روش‌های جدیدی توسعه یافته‌اند که علاوه بر قابلیت تشخیص عیوب در مواد مرکب از سرعت عملکردی بالایی نیز برخوردارند [۲]. روش‌های نوری نظیر هالوگرافی^۱، تداخل‌سنجی الگوی لکه‌ای^۲ و برش‌نگاری دیجیتال^۳ از جمله این روش‌ها هستند. در این بین روش برش‌نگاری دیجیتال به دلیل حساسیت کمتر به ارتعاشات محیط، عدم نیاز به انتقال نور مرجع جهت ایجاد تداخل و اندازه‌گیری مستقیم کرنش (مشتق اول جابه‌جایی سطح) امکان انجام آزمون در محیط صنعتی را فراهم می‌کند [۳].

اساس روش برش‌نگاری دیجیتال بر پایه دریافت پاسخ سطحی عیب نسبت به بارگذاری استوار است. بدین‌صورت هنگامی که قطعه معیوب از طریق بارگذاری تحریک می‌شود، وجود عیب سبب توزیع کرنش موضعی ناهمگن در محل عیب می‌گردد. در آزمون برش‌نگاری دیجیتال با استفاده از این ناهمگنی و از طریق تشخیص الگوی کرنش متمرکز ایجاد شده در سطح قطعه می‌توان به وجود عیب پی برد [۴].

علی‌رغم مزایای عمده روش برش‌نگاری، در اکثر سامانه‌های عیب‌یابی با 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 [۵]، به بررسی توانایی روش برش‌نگاری در تشخیص عیوب ترک و سوراخ در نمونه‌های آلومینیومی و پلیمری پرداختند و بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، 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 [۶]، 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، کمتر است. اکبری و همکاران [۷]، 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 به‌صورت درصدی از اندازه تصویر پیشنهاد دادند. اکبری و سلطانی [۸] 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 دقیق، پارامتر نسبت بارگذاری نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. پنگ و همکاران [۹]، مدل مکانیکی را در روش برش‌نگاری با بارگذاری خلأ 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 به‌خوبی قادر به اندازه‌گیری عمق عیب است. لی و همکاران [۱۰]، در پژوهشی به تشخیص و اندازه‌گیری عیوب در محل اتصال بتن به کامپوزیت در نمونه‌های بتنی تقویت شده با کامپوزیت کربنی از طریق روش برش‌نگاری پرداختند. نتایج به‌دست‌آمده از این پژوهش نشان داد که روش برش‌نگاری اندازه عیوب را با خطای ۹/۴٪ بیشتر از اندازه واقعی تخمین

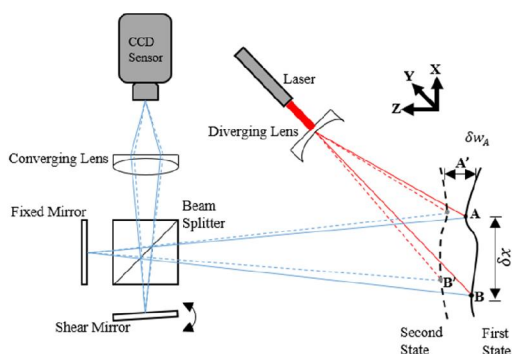
¹ Holography² Electronic Speckle Pattern Interferometry³ Digital Shearography



Δx

شکل ۱- نمای شماتیک تصویر برش خورده

متداول‌ترین روش برای ایجاد تصاویر برش خورده در برش‌نگاری، استفاده از سیستم تداخلگر مایکلسون برشی است. در این حالت با چرخاندن و ایجاد زاویه در یکی از آینه‌های تداخلگر، پرتوی منعکس شده از سطح آن دچار جابه‌جایی عرضی می‌شود. شکل ۲ نحوه چیدمان نوری روش برش‌نگاری را با استفاده از سیستم تداخلگر مایکلسون برشی 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 تداخل‌سنج مایکلسون برشی، در صفحه دوربین تصویر می‌شوند. تصویر حاصل به دلیل چرخش یکی از آینه‌های تداخل‌سنج شامل دو تصویر مشابه، ولی با جابجایی جانبی خواهد بود و به‌صورت الگوی لکه‌ای مشاهده خواهد شد که در آن نقاط روشن و تاریک نشان‌دهنده تداخل نقطه‌به‌نقطه دو تصویر روی هم افتاده (برش خورده) است.



شکل ۲- چیدمان نوری روش برش‌نگاری به‌صورت شماتیک

می‌زند. محمدی و اکبری [۱۱] 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 تخمین اندازه و عمق عیب بود. بوچتا و همکاران [۱۲]، از طریق ترکیب شبیه‌سازی المان محدود و روش برش‌نگاری به تخمین اندازه و عمق عیوب در آثار هنری چوبی پرداختند. آن‌ها 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. هدف پژوهش حاضر ارائه روشی جدید برای تخمین اندازه عیوب صفحه‌ای و بررسی نحوه تأثیر عمق عیب و اندازه برش بر دقت اندازه‌گیری عیوب است.

۲- تئوری تداخل‌سنجی لیزری برشی

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 این‌رو، می‌توان روش برش‌نگاری را به‌طور مؤثر در تشخیص غیر مخرب عیوب و ترک‌ها به کار برد. برش‌نگاری برای ایجاد تداخل همراه با برش تصویر^۱، 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 (شکل ۱).

^۱ Image Shearing

با توجه به روابط بالا، مزیت عمده روش برش‌نگاری در مقابل سایر روش‌های نوری مشخص می‌شود که آن قابلیت تنظیم حساسیت اندازه‌گیری به وسیله تغییر آسان فاصله برش است [۱۳].

۲-۱- تحلیل کمی اندازه عیوب

نتایج حاصل از آزمون برش‌نگاری شامل الگوهای هاله‌ای است که شکل کلی آن‌ها در تمام نمونه‌ها به یک صورت است. باین وجود، با بررسی دقیق‌تر و انجام تحلیل‌های کمی می‌توان در برخی موارد، اندازه و حتی عمق عیب را تعیین نمود. میشل و همکاران [۱۴]، روشی را برای تعیین اندازه عیوب از طریق شناسایی مرز هاله‌ها در الگوهای فازی برش‌نگاری پیشنهاد کردند. این مرزها در نمودار تغییرات فاز واپیچیده Δx و یا معادل آن، گرادیان تغییر شکل $\frac{\partial w}{\partial x}$ نسبت به فاصله نیز قابل تشخیص بوده و می‌تواند یک معیار اولیه برای تعیین محدوده و مرز عیوب باشد (شکل ۳). بر این اساس، معیار تعیین اندازه عیب $L(x)$ از طریق رابطه (۵) به دست می‌آید:

$$L(x) = x_s - x_f - \delta x \quad ; x_f > x_s \quad (5)$$

که در آن x_s و x_f مختصات طولی نقاط شروع و پایان الگوهای فازی و δx اندازه برش است.

تعیین اندازه به این روش اگرچه تا حد زیادی به اندازه واقعی عیب نزدیک است، ولی به دلیل دشواری شناسایی مرز هاله‌های ایجاد شده، مختصات x_s و x_f به‌سادگی قابل تشخیص نیستند. این مسأله خصوصاً در مواردی که کیفیت الگوهای فازی پایین‌تر بوده و یا چند عیب نزدیک یکدیگر قرار داشته باشند، بسیار دشوار و عملاً غیرممکن است. 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 به‌روشنی است، از این‌رو تعیین یک نقطه دقیق برای تشخیص محل شروع و پایان ناپیوستگی عملاً امکان‌پذیر نیست. محدودیت دیگر در استفاده از این روش، در مورد عیوب با عمق بیشتر است که به دلیل تأثیر گذاشتن روی نواحی اطراف، هاله‌های وسیع‌تری را ایجاد کرده و باعث تخمین اشتباه اندازه عیب (عموماً بزرگ‌تر از اندازه واقعی) می‌شود. در ادامه روشی جدیدی برای تعیین اندازه عیوب معرفی می‌گردد.

در این صورت شدت نور ثبت شده در دوربین پس از تداخل دو تصویر از رابطه (۱) به دست می‌آید [۱۳]:

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

که در آن I شدت نور تداخلی، I_0 شدت نور متوسط پرتوهای برش‌خورده، γ مدول تداخل و φ اختلاف فاز تصادفی بین دو تصویر برش‌خورده است. مطابق شکل ۲ شدت نور روی حس‌گر 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 به 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، به‌صورت زیر خواهد بود:

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

که در آن $\varphi'(x + y)$ اختلاف فاز تصاویر برش‌خورده پس از بارگذاری نمونه و Δ تغییر فاز هر نقطه ناشی از تغییر شکل نسبی است. در شکل ۲ بازتاب نور از سطح نمونه بارگذاری شده با خط‌چین نشان داده شده است.

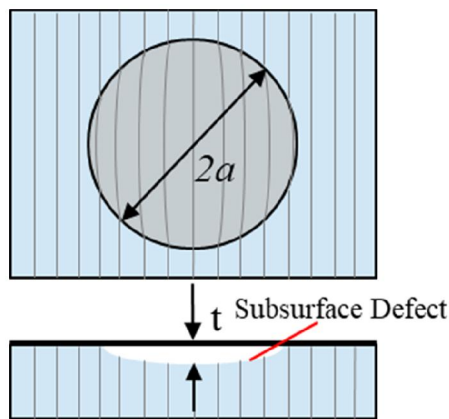
با محاسبه تفاضل شدت نور قبل و بعد از بارگذاری، شدت نور هاله‌های برش‌نگاری به‌صورت زیر به دست می‌آید:

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

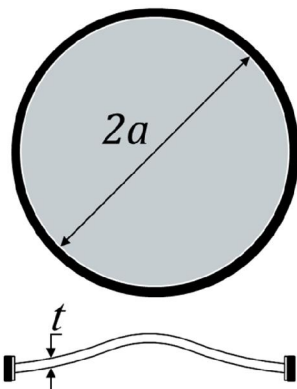
اگر $\Delta = 2N\pi$ باشد که در آن $N = 0, 1, 2, \dots$ شماره هاله را مشخص می‌کند، مقدار I_s صفر شده و هاله‌های تاریک مشاهده می‌گردند. بین دو هاله تاریک متوالی، ناحیه روشن ایجاد می‌شود ($\Delta = (2N + 1)\pi$) که در نتیجه الگوی حاصل، یک الگوی روشن و تاریک متوالی خواهد بود. از طرفی وجود مقدار $\sin\left(\varphi + \frac{\Delta}{2}\right)$ در رابطه که فاز تصادفی ناشی از تداخل اولیه است، باعث به وجود آمدن نویز در الگوی هاله‌ای ایجاد شده می‌گردد.

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 مشتق جابه‌جایی خارج از صفحه برابر خواهد بود با:

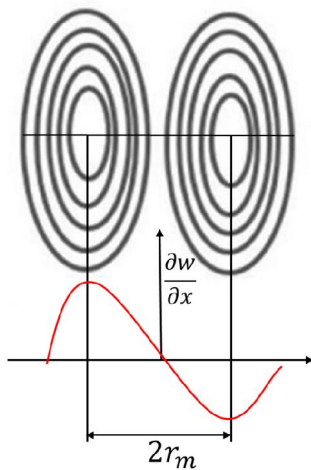
$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta}{4\pi \delta x} \quad (4)$$



(الف)

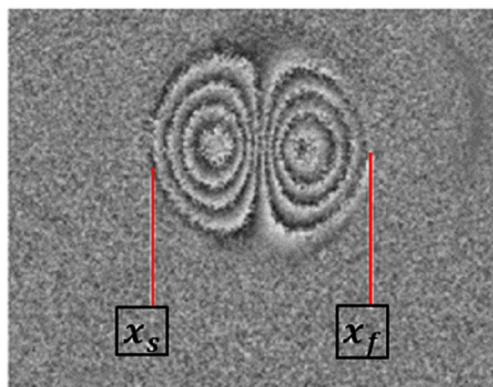


(ب)

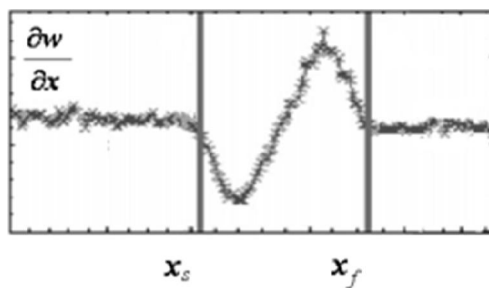


(ج)

شکل ۴- الف) عیب زیر صفحه‌ای، ب) مدل معادل آن و ج) گرادینان جابه‌جایی خارج از صفحه $\frac{\partial w}{\partial x}$ و نحوه اندازه‌گیری r_m



(الف)



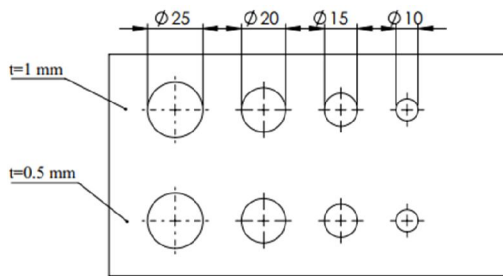
(ب)

شکل ۳- الف) الگوی فازی (ب) نمودار تغییرات گرادینان جابه‌جایی در مرکز عیب [۱۴]

۲-۲- معرفی روشی برای اندازه‌گیری عیوب صفحه‌ای

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 این‌گونه 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 آن است (شکل ۴ الف و ب). 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. با استفاده از تئوری الاستیک صفحات در مختصات قطبی، اندازه جابه‌جایی خارج از صفحه ایجاد شده در اثر اعمال بارگذاری یکنواخت بر صفحه دایره‌ای که از اطراف به‌طور کامل مقید شده است، به صورت رابطه (۶) ارائه می‌شود:

صورت گرفت. بدین منظور، عیوب صفحه‌ای در نمونه پلیمری از جنس تفلون (PTFE^۱) با ایجاد سوراخ‌های کور در یک سمت نمونه، مدل‌سازی شدند. سوراخ‌ها با استفاده از فرز انگشتی کف تخت به نحوی ایجاد شدند که کف سوراخ‌ها کاملاً موازی سطح قطعه باشند. اندازه عیب در ۴ سطح و عمق عیب از سطح نمونه و اندازه برش در ۲ سطح تغییر داده شدند (جدول ۱). شکل ۵ نمونه مورد استفاده و اندازه و عمق عیوب ایجاد شده در آن را نشان می‌دهد.



شکل ۵- اندازه و عمق عیوب ایجاد شده در نمونه تفلونی

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

پارامتر	سطح			
	۱	۲	۳	۴
اندازه عیب (میلی‌متر)	10	15	20	25
عمق عیب (میلی‌متر)	0.5	1	-	-
اندازه برش (میلی‌متر)	10	15	-	-

به‌منظور انجام آزمون‌های برش‌نگاری از چیدمانی مطابق شکل ۶ استفاده شد. لیزر قرمز رنگ با توان ۵۰ میلی وات و طول موج ۶۳۵ نانومتر برای روشن کردن سطح نمونه و حس گر CCD با سرعت ۱۵ فریم بر ثانیه برای ثبت تصاویر به کار گرفته شدند. انجام فرآیند کم کردن تصاویر از یکدیگر و اعمال الگوهای پردازش تصویر از طریق نرم‌افزار متلب صورت گرفت. اعمال بارگذاری از طریق روش حرارتی صورت گرفت. در این روش سطح قطعه تحت آزمون با استفاده از یک المان حرارتی نظیر لامپ حرارتی و یا یک المان برقی گرم می‌شود

^۱ Polytetrafluoroethylene

$$w(r) = \frac{3q(1-v^2)}{16Et^3}(a^2-r^2)^2 \quad (۶)$$

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

$$\frac{\partial w(r)}{\partial r} = \frac{3q(1-v^2)}{4Et^3}(a^2-r^2)r \quad (۷)$$

در روش برش‌نگاری، گرادیان تغییر شکل خارج از صفحه نسبت به راستای برش تعیین می‌گردد. از آنجا که تغییر شکل صفحه مورد نظر به صورت متقارن محوری است، گرادیان جابه‌جایی خارج از صفحه برای برش در هر جهتی برابر است با:

$$\frac{\partial w(r)}{\partial r} = \frac{3q(1-v^2)}{4Et^3}(a^2-r^2)r \quad (۷)$$

بر این اساس و مطابق شکل ۴ (ج) 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:

$$\frac{\partial^2 w(r)}{\partial r^2} = \frac{3q(1-v^2)}{4Et^3}(a^2-3r^2) \quad (۸)$$

بنابراین خواهیم داشت:

$$\frac{\partial^2 w(r_m)}{\partial r^2} = 0 \Rightarrow r_m = \pm \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (۹)$$

از طرفی بر اساس شکل ۴ (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 محاسبه 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 شود؛ لذا اندازه عیب با رابطه (۱۰) پیشنهاد می‌شود:

$$2a = 2\sqrt{3}r_m - \delta x \quad (۱۰)$$

۳- آزمون تجربی

به منظور ارزیابی رابطه ارائه شده و مقایسه آن با روش میشل و همکاران [۱۴]، آزمون‌های تجربی روی نمونه پلیمری

می‌گردد، لذا کنترل و تنظیم مقدار حرارت اعمالی به نمونه در آزمون‌های تجربی بسیار سخت است. از این رو برای مطالعه دقیق‌تر تأثیر میزان بارگذاری بر دقت تخمین عیب، فرایند تشکیل هاله‌های برش‌نگاری با بارگذاری حرارتی از طریق روش المان محدود شبیه‌سازی شد. بدین منظور، نمونه با عیب صفحه‌ای به قطر ۲۰ میلی‌متر و عمق ۰/۵ میلی‌متر در نرم‌افزار تجاری آباکوس مدل‌سازی شده و تحت بارگذاری حرارتی قرار گرفت و از طریق روش حل کوپل حرارت-جابه‌جایی مورد تحلیل قرار گرفت.

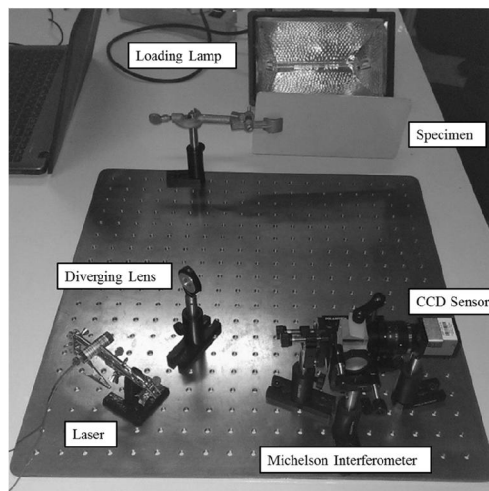
همان‌گونه که در تئوری برش‌نگاری اشاره شد، روش برش‌نگاری توانایی اندازه‌گیری گرادبان جابه‌جایی خارج از صفحه را دارد. از آنجایی که اغلب نرم‌افزارهای تجاری مشتقات جابه‌جایی خارج از صفحه را محاسبه نمی‌کنند، برای رسیدن به این منظور از یک برنامه جانبی نوشته شده در نرم‌افزار متلب استفاده شد. به منظور بررسی تأثیر میزان بارگذاری، نمونه تحت شار حرارتی به مدت‌زمان‌های مختلف مطابق جدول ۲ قرار گرفت و سپس مقادیر گرادبان جابه‌جایی محاسبه شد. شکل ۷ مدل استفاده شده در شبیه‌سازی المان محدود را نشان می‌دهد. در شرایط مرزی مشابه آزمون‌های تجربی، قطعه دارای یک صفحه تقارن است که به موجب آن نصف قطعه مدل‌سازی شد و در وجه oabdefg قید تقارن در راستای محور Y اعمال شد؛ همچنین مدل از وجه oaijz به‌طور کامل مهار شد. اطلاعات مربوط به خواص مکانیکی و حرارتی مدل مطابق نمونه مورد استفاده و جدول ۳ اعمال شد و بارگذاری از طریق اعمال یک شار حرارتی به سطح abefhi صورت گرفت.

جدول ۲- مقادیر بارگذاری حرارتی در شبیه‌سازی المان

محدود				
سطح				پارامتر
4	3	2	1	
1.5	1.25	1	0.75	مدت‌زمان بارگذاری (ثانیه)

المان‌های انتخابی از نوع چهاروجهی خطی کوپل جابه‌جایی-حرارت بودند. شکل ۸ نحوه مش‌بندی مدل را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است، به‌منظور کاهش زمان حل و

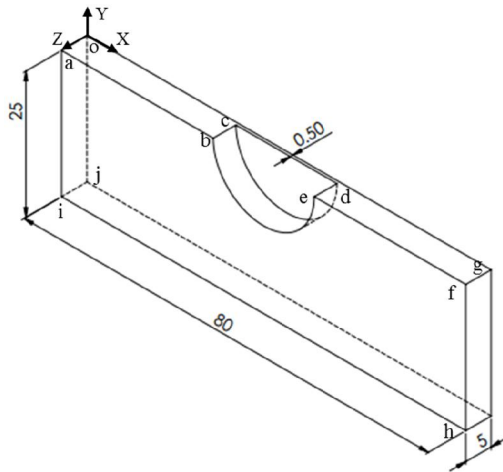
و انبساط حرارتی ایجاد شده در قطعه باعث ایجاد تغییر شکل جزئی در سطح نمونه می‌شود. در این بین چنانچه نقطه ناپیوستگی نظیر یک عیب صفحه‌ای نزدیک سطح قطعه وجود داشته باشد، انبساط حرارتی ایجاد شده در نزدیکی عیب متفاوت از نقاط اطراف بوده و ناپیوستگی انبساطی موجب ایجاد هاله‌های برش‌نگاری در مناطق معیوب می‌شود. بدین منظور، یک لامپ تنگستنی با توان ۱۰۰۰ وات استفاده شد. نمونه در فاصله ۲۰ سانتی‌متری از منبع نور، به مدت ۳ ثانیه تحت تابش مستقیم قرار گرفته و تصاویر تداخلی از سطح قطعه در حین خنک شدن با فاصله زمانی یک ثانیه ثبت شدند. در این حالت، میزان بارگذاری از طریق تغییر 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 بارگذاری بیشتر می‌شود. در این پژوهش، فرایند کم کردن تصاویر از هم با فاصله زمانی ۵ ثانیه صورت گرفت.



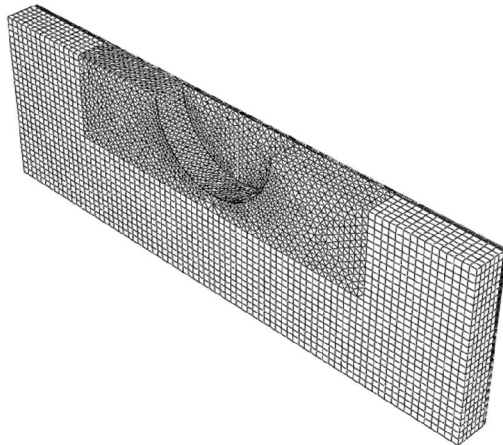
شکل ۶- چیدمان مورد استفاده در انجام آزمون‌های تجربی

۴- شبیه‌سازی المان محدود

همان‌گونه که اشاره شد، تحریک نمونه از طریق بارگذاری حرارتی صورت گرفت. اندازه بارگذاری در این حالت بسیار کم و تغییر دمایی در حد چند درجه سانتی‌گراد است. از طرف دیگر این تغییر دمایی با سرعت بسیار بالا به نمونه اعمال



شکل ۷- مدل به کاررفته در شبیه‌سازی المان محدود



شکل ۸- مش‌بندی به کار رفته در مدل المان محدود

که در آن d_{est} قطر تخمین زده شده و d_0 اندازه قطر عیب است. روش ارائه شده توانست با دقت خوبی اندازه عیوب را پیش‌بینی کند. کمترین درصد خطای پیش‌بینی ۰/۶ بود که در آزمون برش‌نگاری عیب با قطر ۱۵ میلی‌متر، در عمق ۰/۵ میلی‌متر و با اندازه برش ۱۵ میلی‌متر مشاهده گردید؛ درحالی‌که کمترین درصد خطا در روش اول ۱۲/۸٪ بود که در آزمون برش‌نگاری عیب با قطر ۱۵ میلی‌متر در عمق ۱ میلی‌متر و با اندازه برش ۱۵ میلی‌متر حاصل شد. شکل ۱۱ نمودار مربوط به درصد خطای پیش‌بینی اندازه عیوب با استفاده از دو روش و در شرایط مختلف را نشان می‌دهد. در تمامی آزمون‌ها مشاهده می‌شود که تخمین اندازه عیب با

افزایش دقت محاسبات، ناحیه اطراف سوراخ به صورت ریز^۱ مش‌بندی شد.

جدول ۳- خواص موادی تفلون PTFE

مقدار	واحد	خواص
2200	Kg/m^3	چگالی
0.25	$W/m.K$	ضریب هدایت گرمایی
0.00012	mm/mm	ضریب انبساط حرارتی
970000000	$J/Kg^{\circ}C$	ظرفیت گرمای ویژه
2250	MPa	مدول الاستیک
0.42	-	ضریب پواسون

۵- نتایج و بحث

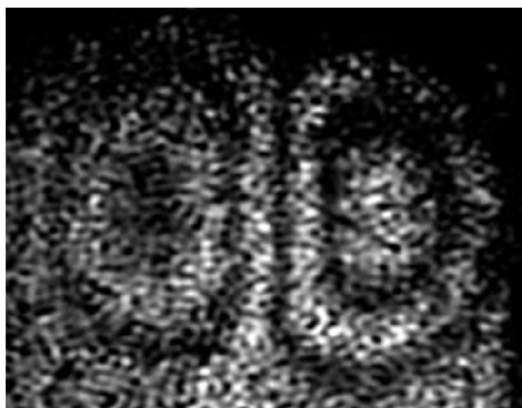
همان‌گونه که در جدول طراحی آزمایش ذکر گردید، در مجموع ۱۶ آزمایش صورت گرفت و در همه آن‌ها به جز دو مورد (آزمایش با اندازه برش ۱۵ میلی‌متر در عیوب با ۱۰ میلی‌متر)، عیوب ایجاد شده به خوبی توسط آزمون برش‌نگاری آشکار شدند. دلیل عدم تشکیل هاله‌های برش‌نگاری در این دو مورد، اندازه برش بیشتر از اندازه عیب است که قابل انتظار بود. هاله‌های برش‌نگاری به دست آمده در اندازه برش ۱۰ میلی‌متر در شکل ۹ نشان داده شده است. شکل ۱۰ نیز الگوهای هاله‌ای ثبت شده از عیب با قطر ۲۵ میلی‌متر در دو اندازه برش مختلف را نشان می‌دهد. در ادامه تصاویر ثبت شده از طریق الگوریتم‌های پردازش تصویر فیلتر شده و پارامترهای مورد اشاره در دو روش تخمین اندازه عیب، اندازه‌گیری شد؛ نتایج به دست آمده در جدول ۴ ارائه شده است. لازم به ذکر است که درصد خطای اندازه‌گیری تخمین قطر عیب به صورت رابطه (۱۲) تعریف شد:

$$\frac{d_{est} - d_0}{d_0} \times 100 \quad (12)$$

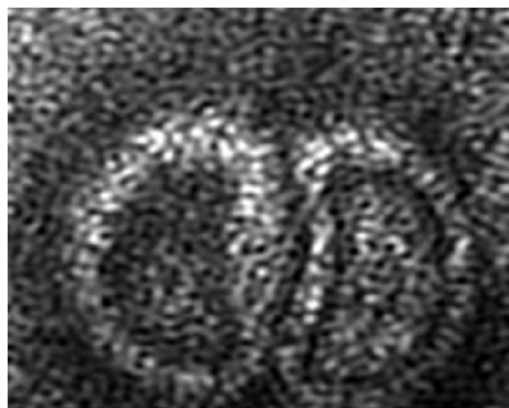
¹ Fine Mesh

می‌شود که خطای تخمین روش اول در مورد عیوب با عمق ۱ میلی‌متر بیشتر از عمق ۰/۵ میلی‌متر است که در برخی آزمون‌ها تا ۴/۵٪ هم می‌رسد. دلیل این امر تأثیرپذیری نواحی اطراف و ایجاد هاله‌های وسیع‌تر است که عملاً باعث تخمین اشتباه اندازه عیب (عموماً بزرگ‌تر از اندازه واقعی) می‌شود [۱۵]. با این حال در روش دوم، پیش‌بینی اندازه عیوب با عمق ۱ میلی‌متر با دقت بیشتری (تا ۱۳٪ 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. با وجود اینکه عمق عیب در روابط ارائه شده به صورت مستقیم در پیش‌بینی اندازه عیب تأثیر ندارد،

روش پیشنهادی به روش میشل [۱۴] دقیق‌تر است. تعیین اندازه عیب به روش میشل [۱۴] اگرچه تا حد زیادی به اندازه واقعی نزدیک است، ولی تشخیص مرز هاله‌های ایجاد شده در برش‌نگاری به‌سادگی امکان‌پذیر نیست. 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 خواهد بود. 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 به‌روشنی است، از این‌رو تعیین یک نقطه دقیق برای تشخیص محل شروع و پایان ناپیوستگی امکان‌پذیر نیست؛ همچنین با توجه به شکل ۱۱ مشاهده

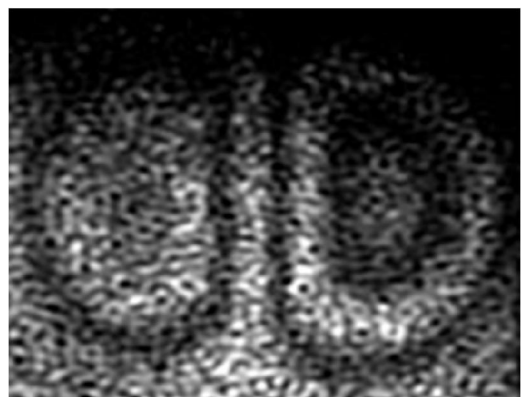


(ب)

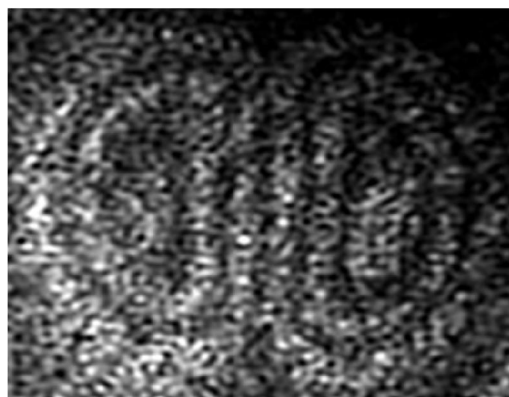


(الف)

شکل ۹- هاله‌های برش‌نگاری در آزمون عیب با اندازه ۲۰ میلی‌متر و عمق الف) ۰/۵ و ب) ۱ میلی‌متر با اندازه برش ۱۰ میلی‌متر



(ب)



(الف)

شکل ۱۰- هاله‌های برش‌نگاری در آزمون عیب با اندازه ۲۵ میلی‌متر و عمق الف) ۰/۵ و ب) ۱ میلی‌متر با اندازه برش ۱۰ میلی‌متر

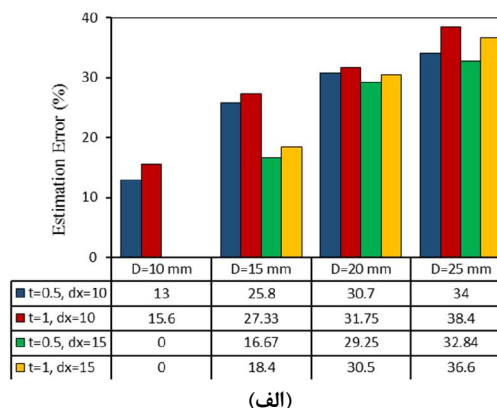
جدول ۴- نتایج پیش‌بینی اندازه عیوب با دو روش در شرایط مختلف آزمون‌های تجربی

d=25 mm	d=20 mm	d=15 mm	d=10 mm	اندازه برش	عمق عیب	روش تخمین اندازه عیب
33.50	26.14	18.87	11.30	10	t = 0.5 mm	روش میشل [۱۴]
32.21	25.85	17.50	-	15		
34.60	26.35	19.10	11.56	10	t = 1 mm	
34.15	26.10	17.76	-	15		
29.37	23.43	17.11	10.78	10	t = 0.5 mm	روش معرفی شده
16.70	14.10	13.58	-	15		
28.80	22.75	16.45	10.61	10	t = 1 mm	
20.20	18.20	16.80	-	15		

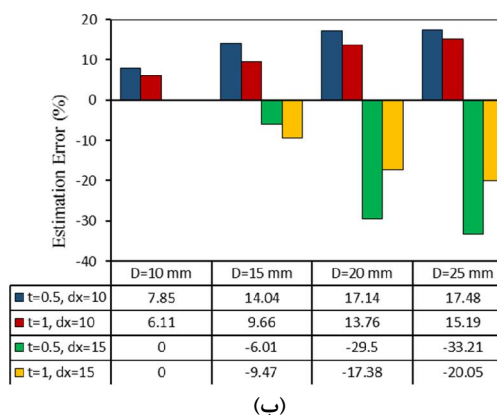
ولی با توجه به تأثیرپذیری نوع و شکل هاله‌ها از عمق عیوب، ملاحظه می‌شود که تغییر عمق عیب باعث تغییر در خطای پیش‌بینی اندازه عیب می‌شود.

اندازه برش عامل تأثیرگذار دیگری است که بر دقت پیش‌بینی اندازه عیب تأثیر می‌گذارد. با وجود اینکه در هیچ‌کدام از روش‌های یاد شده پارامتر اندازه برش به‌طور مستقیم تأثیر ندارد، ولی همانند پارامتر عمق عیب روی هاله‌های تشکیل شده تأثیرگذار بوده و برای تشکیل هاله‌های واضح و با کمترین خطا لازم است، متناسب با اندازه عیب باشد [۷]. این موضوع در شکل ۱۲ نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که تخمین اندازه عیب در هر دو روش زمانی با کمترین خطا همراه می‌شود که اندازه برش نزدیک به اندازه عیب باشد.

همان‌گونه که اشاره شد، تأثیر میزان بارگذاری روی دقت تخمین عیوب از طریق روش المان محدود مورد مطالعه قرار گرفت. شکل ۱۳ الگوی هاله‌ای به‌دست‌آمده از روش المان محدود و روش تجربی را در آزمون برش‌نگاری عیب با قطر ۲۰ میلی‌متر و عمق ۰/۵ میلی‌متر و با استفاده از اندازه برش ۱۰ میلی‌متر و پس از یک ثانیه بارگذاری نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که شکل کلی هاله‌های ایجاد شده از طریق دو روش تا حدود زیادی یکسان است. با این حال تفاوت‌هایی در مرز هاله‌های ایجاد شده مشاهده می‌شود که می‌تواند



(الف)



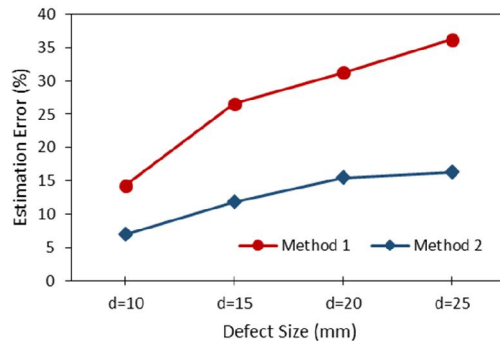
(ب)

شکل ۱۱- خطای به‌دست‌آمده در پیش‌بینی اندازه عیوب با روش (الف) میشل [۱۴] و (ب) پیشنهادی

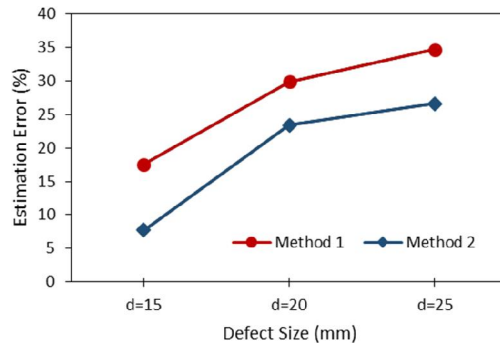
شکل ۱۴ الگوهای فازی به دست آمده از روش المان محدود را در شرایط بارگذاری مختلف نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش زمان حرارت‌دهی نمونه، تعداد هاله‌های ایجاد شده افزایش پیدا می‌کند. لازم به ذکر است که در زمان بارگذاری کمتر از ۰/۷۵ ثانیه هاله‌های ایجاد شده به صورت کامل شکل نمی‌گیرند و نمی‌توان اندازه عیب را از طریق روش پیشنهادی تخمین زد؛ همچنین با افزایش زمان بارگذاری به بیش از ۱/۵ ثانیه تعداد هاله‌ها به حدی افزایش پیدا می‌کند، استفاده از روش میشل [۱۴] بسیار دشوار می‌شود. هرچند که در شرایط مشابه تجربی نیز تشخیص عیب با این میزان بارگذاری به دلیل عدم مشخص بودن مرز هاله‌ها عملاً امکان‌پذیر نخواهد بود [۷].

شکل ۱۵ تأثیر افزایش زمان بارگذاری بر دقت تخمین اندازه عیب را به دو روش نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در روش اول، افزایش زمان بارگذاری سبب افزایش خطای تخمین اندازه عیب می‌شود. دلیل این امر افزایش تعداد هاله‌ها و فاصله بسیار کم مرز هاله‌هاست که سبب عدم امکان تشخیص دقیق مرز هاله‌ها برای اندازه‌گیری پارامترهای مربوطه می‌شود. با این حال در روش پیشنهاد شده افزایش زمان بارگذاری تأثیر چندانی بر دقت تخمین اندازه عیب نداشته و مقدار اختلاف خطای تخمین در مقادیر مختلف زمان بارگذاری کمتر از ۲/۵ درصد است. با توجه به این موارد می‌توان گفت که 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 [۱۴] 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 نبوده و محل تمرکز هاله‌ها با تغییر میزان بارگذاری ثابت خواهد بود. با این حال به دلیل تأثیرپذیری نوع و شکل هاله‌ها از اندازه و عمق عیوب، جنس ماده، اندازه برش و دقت تصویربرداری، تعیین اندازه عیب در این روش نیز همواره با مقداری خطا همراه خواهد بود.

ناشی از عدم کنترل کامل شرایط بارگذاری در آزمون تجربی باشد. از طرف دیگر، عدم تابش تور لیزر به صورت کاملاً عمود بر سطح نمونه و خطای ناشی از دوتایی شدن تصویر و نیز عدم اعمال منابع اتلاف حرارت از جمله انتقال حرارت از طریق تابش یا مجموعه نگه‌دارنده نمونه در تحلیل المان محدود می‌تواند از سایر دلایل تفاوت هاله‌ها باشد.

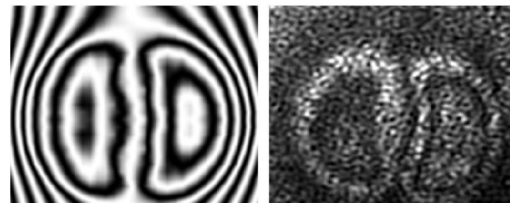


(الف)



(ب)

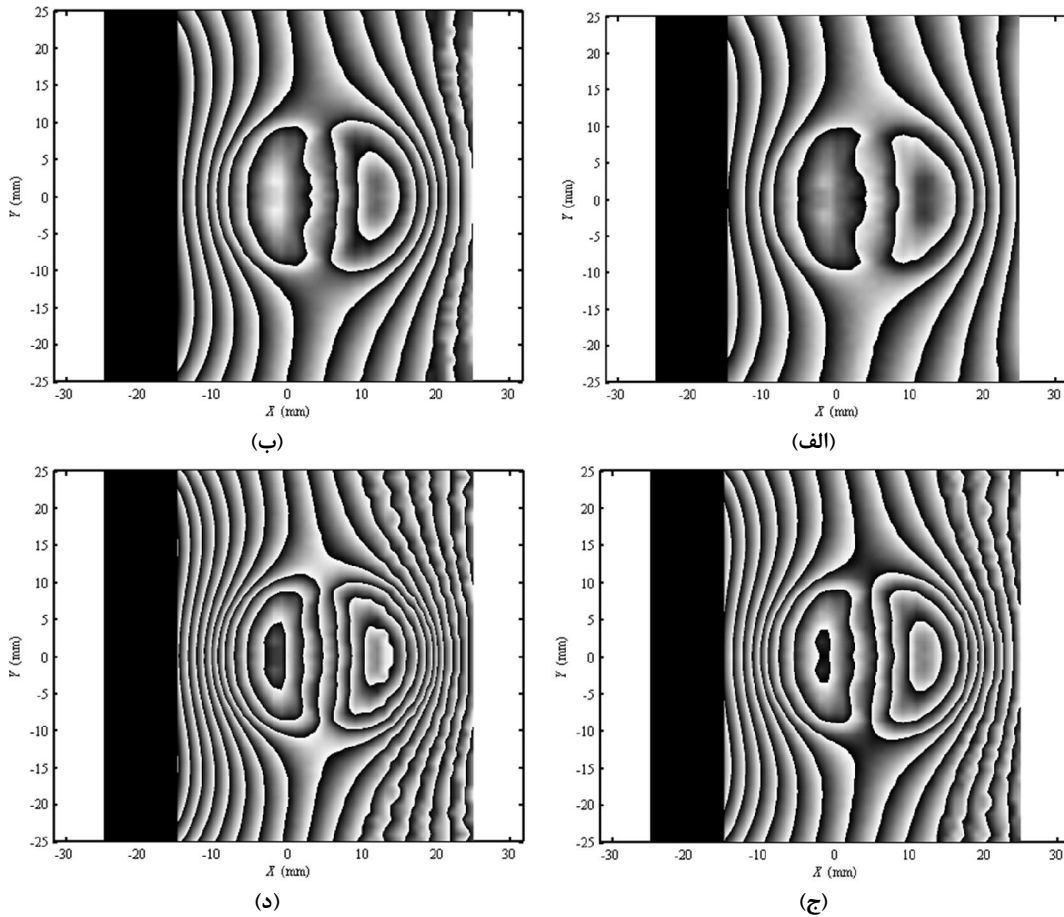
شکل ۱۲- تغییرات خطای تخمین اندازه عیب در عیوب مختلف و در اندازه برش الف) ۱۰ و ب) ۱۵ میلی‌متر



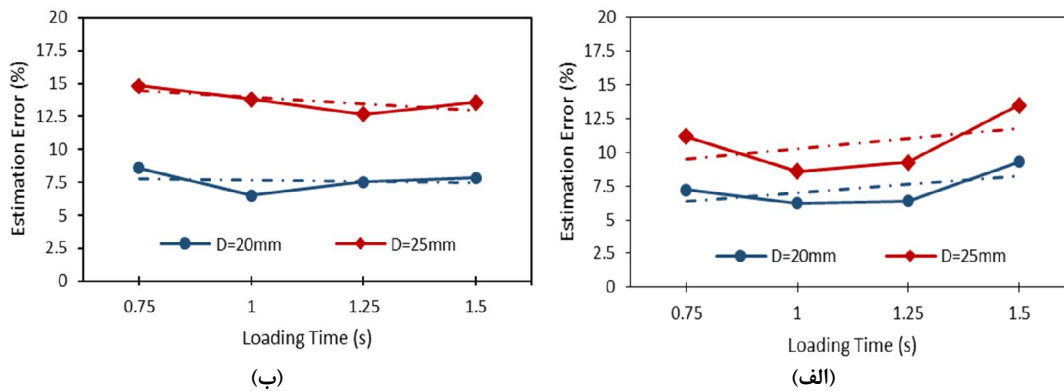
FEM

Experiment

شکل ۱۳- مقایسه الگوی هاله‌ای به دست آمده از نتایج شبیه‌سازی با نتایج تجربی برای عیب با قطر ۲۰ میلی‌متر و عمق ۰/۵ میلی‌متر



شکل ۱۴- هاله‌های فازی به‌دست‌آمده از روش المان محدود در عیب با اندازه ۲۰ میلی‌متر، عمق ۰/۵ میلی‌متر، اندازه برش ۱۰ میلی‌متر و در مقادیر بارگذاری سطح الف) ۱، ب) ۲، ج) ۳ و د) ۴



شکل ۱۵- تغییرات خطای تخمین اندازه عیب با تغییرات بارگذاری با استفاده از الف) روش میشل [۱۴] و ب) پیشنهادی

۶- نتیجه گیری

در این پژوهش روش جدیدی برای پیش‌بینی اندازه عیوب صفحه‌ای به روش برش‌نگاری دیجیتال ارائه شده و با روش ارائه شده توسط پژوهش‌های قبلی مقایسه شد. به‌منظور دقت‌سنجی روش ارائه شده و بررسی پارامترهای تاثیرگذار بر دقت تخمین آن در مجموع ۱۶ آزمون برش‌نگاری صورت گرفت؛ همچنین شبیه‌سازی المان محدود به‌منظور مطالعه تأثیر میزان بارگذاری بر دقت تخمین اندازه عیب مورد استفاده قرار گرفت. مهم‌ترین نتایج این پژوهش به شرح زیر است:

۱- روش ارائه شده توانست با دقت بیشتری نسبت به

روش مرسوم اندازه عیوب را پیش‌بینی کند. 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.

۲- در تخمین اندازه عیب با استفاده از روش مرسوم، افزایش عمق عیب به دلیل ایجاد هاله‌های وسیع‌تر سبب افزایش خطا می‌شود که این افزایش خطا در برخی از آزمون‌ها تا ۴/۵٪ هم می‌رسد. با این حال در روش ارائه شده، پیش‌بینی اندازه عیوب با عمق بیشتر، با کاهش خطا (تا ۱۳٪) همراه است که دلیل این امر تشکیل هاله‌هایی با وضوح پایین‌تر در عیوب با عمق کمتر است که سبب کاهش دقت اندازه‌گیری می‌شود.

۳- تخمین اندازه عیب در هر دو روش، هنگامی با کمترین خطا همراه می‌شود که اندازه برش نزدیک به اندازه عیب باشد.

۴- نتایج حاصل از شبیه‌سازی المان محدود نشان داد، افزایش زمان حرارت‌دهی نمونه، با افزایش تعداد هاله‌های ایجاد شده موجب کاهش دقت تخمین اندازه‌گیری عیب به روش مرسوم تا ۱۴٪ می‌شود. در روش پیشنهاد شده افزایش زمان بارگذاری بر دقت تخمین اندازه عیب بی‌تأثیر بوده و پارامترهای اندازه‌گیری آن به میزان بارگذاری بستگی ندارد.

۷- مراجع

- [1] Duchene P, Chaki S, Ayadi A, Krawczak P (2018) A review of non-destructive techniques used for mechanical damage assessment in polymer composites. *J Mater Sci* 1-24.
- [2] Senthil K, Arockiarajan A, Palaninathan R, Santhosh B, Usha K (2013) Defects in composite structures: Its effects and prediction methods—A comprehensive review. *Compos Struct* 106: 139-149.
- [3] Hung Y (1989) Shearography: A novel and practical approach for nondestructive inspection. *J Nondestruct Eval* 8(2): 55-67.
- [4] Hung Y, Ho H (2005) Shearography: An optical measurement technique and applications. *Mater Sci Eng* 49(3): 61-87.
- [5] Liu Z, Gao J, Xie H, Wallace P (2011) NDT capability of digital shearography for different materials. *Opt Laser Eng* 49(12): 1462-1469.
- [6] Kim G, Hong S, Jhang KY, Kim GH (2012) NDE of low-velocity impact damages in composite laminates using ESPI, digital shearography and ultrasound C-scan techniques. *Int J Precis Eng Man* 13(6): 869-876.
- [7] Akbari D, Soltani N, Farahani M (2013) Numerical and experimental investigation of defect detection in polymer materials by means of digital shearography with thermal loading. *P I Mech Eng B-J Eng* 227(3): 430-442.
- [8] Akbari D, Soltani N (2013) Investigation of loading parameters in detection of internal cracks of composite material with digital shearography. *World Appl Sci J* 21(4): 526-535.
- [9] Peng Y, Liu G, Quan Y, Zeng Q (2017) The depth measurement of internal defect based on laser speckle shearing interference. *Opt Laser Eng* 92: 69-73.
- [10] Lai W, Kou S, Poon C, Tsang W, Ng S, Hung Y (2009) Characterization of flaws embedded in externally bonded CFRP on concrete beams by infrared thermography and shearography. *J Nondestruct Eval* 28(1): 27-35.
- [11] Mohammadi M, Akbari D (2015) Evaluation of sub-surface cracks in polymer matrix composites with laser interferometric method. *Iranian Journal of Manufacturing Engineering* 2(3): 11-23.
- [12] Buchta D, Heinemann C, Pedrini G, Krekel C, Osten W (2018) Combination of FEM simulations and shearography for defect detection on artwork. *Strain* 54(3): e12269.
- [13] Francis D, Tatam R, Groves R (2010) Shearography technology and applications: A review. *Meas Sci Technol* 21(10): 102001.

- [15] Hofmann D, Pandarese G, Revel GM, Tomasini EP, Pezzoni R (2008) Optimization of the excitation and measurement procedures in nondestructive testing using shearography. *Rev Sci Instrum* 79(11): 115105.
- [14] Michel F, Moreau V, Rosso V, Habraken S, Tilkens B (2007) Quantification of defect size in shearing direction by shearography and wavelet transform. in *Proceeding of International Society for Optics and Photonics* 661636.