



## کاربرد روش برش‌نگاری لیزری با استفاده از بارگذاری حرارتی مدوله شده در بازرسی غیرمخرب عیوب صفحه‌ای

سینا صباغی فرشی<sup>۱</sup>، داود اکبری<sup>۲\*</sup>

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

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

\* تهران، صندوق پستی ۱۱۱-۱۴۱۱۵، daakbari@modares.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: ۲۶ دی ۱۴۰۰

داوری اولیه: ۲۴ بهمن ۱۴۰۰

پذیرش: ۱۳ اسفند ۱۴۰۰

### کلیدواژگان:

برش‌نگاری دیجیتال

بارگذاری حرارتی مدوله شده

عیوب صفحه‌ای

بازرسی غیرمخرب

برش‌نگاری دیجیتال یکی از روش‌های بازرسی غیرمخرب مبتنی بر تداخل‌سنجی لیزری است که از طریق اندازه‌گیری پاسخ مکانیکی قطعه به بارگذاری انجام شده، به تشخیص عیوب آن می‌پردازد. در این تحقیق، با استفاده از اعمال بارگذاری حرارتی به صورت متناوب، قابلیت تشخیص عیوب با اندازه و عمق‌های مختلف در روش برش‌نگاری دیجیتالی بهبود یافت. در این راستا، آزمون برش‌نگاری با بارگذاری مدوله شده و با فرکانس مدولاسیون و تعداد سیکل‌های بارگذاری متفاوت بر روی نمونه پلیمری با ۹ عیب مختلف در اندازه و عمق‌های متفاوت انجام شده و نتایج به دست آمده، با برش‌نگاری حرارتی معمول مقایسه شد. نتایج نشان می‌دهند که در روش برش‌نگاری معمول، تنها ۴ عیب از ۹ عیب ایجاد شده در نمونه شناسایی شدند در حالی که با اعمال تحریک به صورت متناوب با فرکانس مدولاسیون ۰/۰۲ هرتز، هر ۹ ناحیه عیب آشکار شدند. نتایج به دست آمده نشان داد افزایش تعداد سیکل بارگذاری تأثیر قابل‌توجهی بر ظرفیت شناسایی عیوب نمی‌گذارد. همچنین شناسایی عیوب عمیق‌تر نیازمند اعمال فرکانس‌های مدولاسیون پایین‌تر است و قابلیت شناسایی عیوب با کاهش فرکانس مدولاسیون افزایش می‌یابد، به طوری که میانگین اختلاف فاز با کاهش فرکانس مدولاسیون از ۰/۱ به ۰/۰۲ هرتز، تا ۲/۱ برابر بیشتر می‌شود.

## Application of lock-in shearography in non-destructive testing of planar defects

Sina Sabbaghi Farshi, Davood Akbari\*

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: 16 January 2022  
First Decision: 13 February 2022  
Accepted: 5 March 2022

### Keywords:

Digital Shearography  
Lock-in Method  
Planar Defects  
NDT

### Abstract

Digital shearography, as a non-destructive testing method is based on laser interferometry, which detects defects by measuring the mechanical response of the specimen to the external loading. In this study, thermal loading was applied in an alternating way to the conventional shearography method in order to investigate its effect on the defects ascertainability in different sizes and depths. A total of 15 lock-in shearography tests with different modulation frequency and loading cycle were carried out on a polymer specimen with 9 planar defects in different sizes and depths and the results were compared with conventional shearography. In the conventional method, only 4 out of 9 defect areas were detected in the specimen, while by applying lock-in stimulation with a modulation frequency of 0.02 Hz, all of 9 defect areas were revealed. The results showed that increasing the number of loading cycles does not have a significant effect on the detection capacity of defects. Also, detection of deeper defects requires the implementation of lower modulation frequencies, and defects detectability is improved with decreasing modulation frequency, so that the mean phase difference increases 2.1 times by reducing the modulation frequency from 0.1 to 0.02 Hz

### ۱- مقدمه

عیوب نظیر جدایش بین‌لایه‌ای در قطعات کامپوزیتی یا ترک‌های ناشی از خستگی و خوردگی قطعه، ممکن است در حین سرویس‌دهی قطعه به وجود آیند که در نتیجه آن عملکرد سیستم با مشکل مواجه خواهد شد. لذا شناسایی و تشخیص این عیوب، بدون آن‌که آسیبی بر قطعه وارد شود، بر ادامه کارکرد صحیح قطعات تأثیر بسیار زیادی خواهد داشت. در طول سال‌ها،

وجود عیب در قطعات و سیستم‌های مختلف مکانیکی، ممکن است به شکست نابه‌هنگام این اجزا در حین کارکرد آن‌ها بیانجامد. عیوب با اندازه و شکل‌های مختلف ممکن است طی فرآیند ساخت قطعه ایجاد گردند که ماهیت و ابعاد آن‌ها بر کارکرد قطعه در ادامه تأثیر خواهند داشت. از طرف دیگر برخی

Please cite this article using:

S. Sabbaghi Farshi, D. Akbari, Application of lock-in shearography in non-destructive testing of planar defects, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 9, No. 1, pp. 1- 9, 2022 (in Persian), <https://www.doi.org/10.22034/IJME.2022.155981>

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ممکن است بسیار کوچکتر از تغییرات کل قطعه یا سیگنال نویز پس‌زمینه تصویر باشد که منجر به کاهش ظرفیت شناسایی آن خواهد شد. همچنین شناسایی و تحلیل کمی در این روش به عمق عیب وابسته است [۳] و ظرفیت آشکارسازی در عیوب با عمق‌های بیشتر کاهش می‌یابد که این امر کاربرد آن در برخی از صنایع را ناممکن می‌سازد.

روش دمانگاری مادون قرمز روش نوری دیگری است که در ارزیابی غیرمخرب عیوب در مواد پلیمری و کامپوزیتی کاربرد دارد. این روش بر اساس تفاوت دمایی ناشی از تحریک حرارتی بین ناحیه سالم و معیوب قطعه، قادر به شناسایی عیوب زیرسطحی است. با این حال در دمانگاری با تحریک پالسی<sup>۶</sup>، اختلاف دمایی تنها در اثر عیوب زیرسطحی رخ نمی‌دهد، بلکه ممکن است در اثر تغییرات موضعی قابلیت انتشار حرارت و نیز بارگذاری حرارتی غیریکنواخت ایجاد شود. این امر موجب کاهش قابل توجه تباین<sup>۷</sup> تصاویر حاصله می‌شود. از این رو تحریک به روش مدوله‌شده یا قفل شونده<sup>۸</sup> برای اولین بار روی دمانگاری مادون قرمز اعمال شد تا حساسیت تشخیص عیوب در این روش افزایش یابد [۴]. در روش دمانگاری مدوله شده قطعه به صورت متناوب تحریک می‌شود و عیوب در قالب دو تصویر فاز و دامنه مستقیماً شناسایی می‌شوند. وو و بوسه [۵] دمانگاری با تحریک مدوله شده را برای بازرسی مواد مختلف به کار گرفتند و نشان دادند که این روش قادر است تمامی مشکلات دمانگاری پالسی از جمله بازتاب‌های نوری مجاور، تغییرات موضعی ضریب انتشار مادون قرمز و میزان جذب نور در سطح قطعه و روشنایی ناهمگن توسط منبع حرارتی را از بین ببرد.

پژوهش‌های صورت گرفته نشان می‌دهند که استفاده از تحریک مدوله‌شده، قابلیت شناسایی عیوب توسط روش دمانگاری را افزایش می‌دهد. از این رو، این شیوه بارگذاری بر روش‌های مبتنی بر تداخل‌سنجی نوری نیز اعمال شد. گرهارد و بوسه [۶] این شیوه را در روش تداخل‌سنجی الگوی لکه‌ای الکترونیکی<sup>۹</sup> اعمال کردند و نشان دادند که نسبت سیگنال به نویز تصویر قطعات معیوب به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. دولینکو و همکاران [۷] تحریک حرارتی را به شکل خاصی از موج مثلی بر روش تداخل‌سنجی الگوی لکه‌ای زمانی<sup>۱۰</sup> اعمال کردند و با تعریف یک پارامتر برای کمی‌سازی قابلیت تشخیص عیوب نشان دادند که تشخیص عیوب پنهان در صفحات فلزی از این

روش‌های بازرسی غیرمخرب مختلفی به وجود آمده و گسترش یافته است. با وجود کاربرد گسترده این روش‌ها، محدودیت آن‌ها در تشخیص عیوب برخی از مواد از جمله مواد مرکب و پلیمری و نیز سرعت پایین اجرای آن‌ها سبب گردیده است تا روش‌های جدیدی توسعه یابند. دمانگاری مادون قرمز<sup>۱</sup>، تداخل‌سنجی نوری<sup>۲</sup>، نشر صوتی<sup>۳</sup> و روش‌های جدید مبتنی بر فراصوتی از جمله این روش‌ها هستند که هر یک مزایا و معایب خاص خود را دارا می‌باشند.

از میان روش‌های نوین، می‌توان به روش برش‌نگاری دیجیتال به عنوان یکی از تکنیک‌های رایج در ارزیابی غیرمخرب<sup>۴</sup> قطعات اشاره کرد که مبتنی بر تداخل‌سنجی نوری برای اندازه‌گیری گرادیان جابجایی می‌باشد. روش برش‌نگاری برای اولین بار در سال ۱۹۷۳ توسط لیندرتز و باترز [۱] برای یافتن گشتاور خمشی در یک تیر مورد استفاده قرار گرفت. ویژگی اصلی این روش عدم نیاز به تماس مستقیم با سطح نمونه و قابلیت تشخیص عیوب در بسیاری از مواد از جمله مواد مرکب می‌باشد. از طرف دیگر بر خلاف روش‌های سنتی که سیستم تشخیص عیوب در آن‌ها به صورت نقطه به نقطه است، روش برش‌نگاری امکان بررسی تمام‌میدانی<sup>۵</sup> قطعه مورد نظر را میسر می‌سازد. در این روش نمونه تحت بارگذاری حرارتی یا مکانیکی قرار می‌گیرد و عیوب موجود در آن از طریق ارزیابی پاسخ نمونه به تحریک آشکار می‌گردند. مزیت اصلی این روش نسبت به سایر روش‌های مبتنی بر تداخل‌سنجی، حساسیت کمتر به ارتعاشات محیط و نویزهای صوتی است که استفاده از آن را در محیط‌های صنعتی امکان‌پذیر می‌کند. با این حال، به دلیل وابستگی نتایج آن به شدت تحریک قطعه، محدودیت‌های زیادی در تحلیل دقیق داده‌های مربوط به اندازه و عمق عیب دارد. به طوری که نتایج حاصل از روش برش‌نگاری ممکن است تحت تأثیر بارگذاری غیریکنواخت قرار بگیرند که این امر سبب می‌شود احتمال تشخیص عیب کاهش یابد. اکبری و سلطانی [۲] با بررسی اثر پارامترهای بارگذاری مکانیکی در تشخیص ترک‌های داخلی کامپوزیت پلیمری به روش برش‌نگاری دیجیتال به این نتیجه رسیدند که در آزمون برش‌نگاری برای دست‌یابی به نتایج مناسب، در کنار عواملی هم‌چون میزان برش و جهت قرارگیری عیوب، مقدار بارگذاری نیز از اهمیت بالایی برخوردار است. علاوه بر این، سیگنال ناشی از تغییرشکل ناحیه عیب

<sup>6</sup> Pulsed thermography

<sup>7</sup> Contrast

<sup>8</sup> Lock-in technique

<sup>9</sup> Electronic Speckle Pattern Interferometry

<sup>10</sup> Temporal Speckle Pattern Interferometry

<sup>1</sup> Infrared thermography

<sup>2</sup> Optical interferometry

<sup>3</sup> Acoustic emission

<sup>4</sup> NDE

<sup>5</sup> Full-field

## ۲- تئوری روش برش‌نگاری

### ۲-۱- تئوری برش‌نگاری دیجیتالی

اساس روش برش‌نگاری برپایه اندازه‌گیری تغییرات شدت نور بازتابی از سطح قطعه در اثر تحریک قطعه با کمک نوعی از بارگذاری روی آن است که حاصل آن اطلاعاتی در خصوص گرادیان جابه‌جایی سطح می‌باشد. با تشخیص نقاطی که در اثر بارگذاری اعمالی دچار تمرکز کرنش سطحی می‌شوند، می‌توان به وجود عیوب و یا ناپیوستگی‌های زیرسطحی در قطعه پی‌برد. برش‌نگاری برای ایجاد تداخل همراه با برش تصویر<sup>۱</sup>، 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 افقی یا عمودی را ایجاد می‌کند (شکل ۱).

متداول‌ترین روش برای ایجاد تصاویر برش‌خورده 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 آینه دچار جابه‌جایی عرضی می‌گردد. شکل ۲ نحوه چیدمان نوری روش برش‌نگاری را با استفاده از سیستم تداخل‌گر مایکلسون 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 تداخل‌سنج، شامل دو تصویر مشابه ولی با جابه‌جایی جانبی خواهد بود 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.

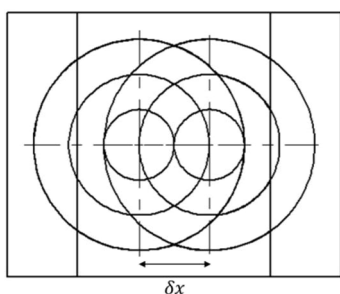


Fig. 1 Sheared image

شکل ۱ طرح‌واره تصویر برش‌خورده

در این صورت شدت نور ثبت شده در دوربین پس از تداخل دو تصویر از رابطه (۱) به دست می‌آید [۱۱]:

طریق بهبود می‌بخشد. گرهارد و بوسه [۸] در پژوهش دیگری نشان دادند که تحریک قطعه با فرکانس‌های مختلف برهم‌نهاد به صورت همزمان، مدت زمان تشخیص عیوب با عمق‌های متفاوت را کاهش می‌دهد. کیم و همکاران [۹] تکنیک تحریک مدوله‌شده مرسوم در روش حرارت‌نگاری را به روش برش‌نگاری اضافه کرده و با استفاده از آن قطعات از جنس کامپوزیت با الیاف شیشه را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج به‌دست‌آمده نشان داد استفاده از تحریک مدوله‌شده می‌تواند به افزایش نسبت سیگنال به نویز تصاویر برش‌نگاری منجر شود. بوچتا و همکاران [۱۰] در پژوهشی امکان استفاده از روش برش‌نگاری با تکنیک تحریک حرارتی مدوله‌شده را برای اندازه‌گیری عمق عیوب در نمونه‌هایی از جنس چوب مورد بررسی قرار دادند. در این پژوهش که از طریق شبیه‌سازی عددی صورت گرفت، نشان داده شد که تباین فازی تصاویر برش‌نگاری به شدت به عمق عیوب مورد بررسی وابسته است.

همان‌گونه که عنوان شد، پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهند که نتایج حاصل از روش برش‌نگاری دیجیتالی، به شدت تحت تأثیر بارگذاری غیریکنواخت قرار می‌گیرند که این امر احتمال تشخیص عیوب را کاهش می‌دهد. علاوه‌براین ممکن است تغییرات سیگنال ناشی از عیب بسیار کوچکتر از تغییرات کل قطعه یا سیگنال نویز پس‌زمینه تصویر باشد که در این صورت نیز منجر به کاهش ظرفیت شناسایی آن خواهد شد. از این رو به کارگیری ظرفیت و قابلیت بارگذاری مدوله شده، کمک زیادی به کاهش سیگنال‌های زاید و افزایش کیفیت نتایج خواهد شد. دلیل این امر این است که تنها یک تصویر برای ارزیابی داده مورد استفاده قرار نمی‌گیرد، بلکه ممکن است بسته به اندازه آرایه دوربین، صدها تصویر هاله‌ای متفاوت مورد استفاده قرار گیرند. همچنین اعمال این روش سبب از بین رفتن اثر تغییر شکل کلی سطح قطعه می‌شود که همین امر احتمال تشخیص عیب را افزایش می‌دهد [۶]. از طرف دیگر تحریک مدوله‌شده به عنوان یک روش موثر شناخته شده در افزایش نسبت سیگنال به نویز در روش‌هایی نظیر دمانگاری به دفعات استفاده شده است، لکن در برش‌نگاری دیجیتالی کمتر مورد توجه قرار گرفته است. لذا در این پژوهش به منظور رفع برخی محدودیت‌ها، روش برش‌نگاری با تحریک مدوله‌شده بررسی شده و با روش برش‌نگاری معمولی مقایسه شده است. همچنین مزایا و پارامترهای موثر روش بر تشخیص پذیری عیوب، به صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است.

<sup>۱</sup> Image shearing

$$I_s = I' - I = 4I_0\gamma[\cos(\varphi + \Delta) - \cos \varphi]$$

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

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 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:

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

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 ساده فاصله برش می‌باشد [۱۱].

## ۲-۲- برش‌نگاری با تحریک مدوله‌شده

به منظور عبور از محدودیت‌های مورد بحث و افزایش ظرفیت تشخیص عیوب، می‌توان تکنیک مدوله‌کردن را به روش برش‌نگاری دیجیتالی اعمال کرد. برای رسیدن به نتایج مورد پذیرش در برش‌نگاری مدوله‌شده، لازم است اطلاعات گرادیان جابه‌جایی مدوله شود. این امر با تحریک قطعه به صورت متناوب و ایجاد پاسخ‌های مدوله‌شده امکان‌پذیر خواهد بود. پاسخ قطعه به صورت یک سیگنال متناوب<sup>۲</sup> خواهد بود که امکان فیلتر کردن آن در فرکانس تحریک و کاهش طیف نویز متناظر آن را فراهم می‌سازد [۷]. اصول کار و چیدمان ترسیم برش‌نگاری مدوله‌شده در شکل ۳ نشان داده شده است.

برش‌نگاری مدوله شده، برش‌نگاری معمولی را با تحریک متناوب و تحلیل فوریه ادغام می‌کند. با گرم کردن متناوب سطح قطعه با استفاده از منبع حرارتی (لامپ هالوژنی)، شدت نور مدوله شده و یک موج حرارتی به سوی قطعه تابانده می‌شود. اگر عمق نفوذ این موج به حدی باشد که بتواند به عیب برسد،

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

که در آن  $I$  شدت نور تداخلی،  $I_0$  شدت نور متوسط پرتوهای نور برش خورده،  $\gamma$  مدول تداخل و  $\varphi$  اختلاف فاز تصادفی بین دو تصویر برش خورده است. مطابق شکل ۲ شدت نور روی دوربین CCD<sup>۱</sup> حاصل بازتاب از نقاط A و B روی سطح نمونه است که از طریق فاصله برش  $\delta x$  از هم جدا شده‌اند.

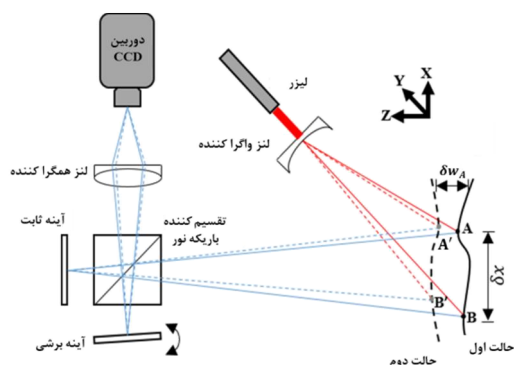


Fig. 2 Schematic of shearography setup

شکل ۲ چیدمان روش برش‌نگاری به صورت ترسیمی

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 تحریک نمونه از طریق اعمال بارگذاری و تغییر شکل سطحی در آن، به صورت 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 برش خورده پس از بارگذاری نمونه و  $\Delta$  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.

در هنگام اندازه‌گیری، دوربین CCD ابتدا شدت نور هر نقطه روی نمونه را برای حالت اول (قبل از تحریک) ثبت می‌کند، یعنی شدت  $I$  در معادله (۱). این تصویر ثبت شده از توزیع شدت نور، تصویر مرجع نامیده می‌شود. پس از آن که نمونه تحت بارگذاری قرار گرفت، شدت نور هر نقطه که مطابق با  $I'$  در معادله (۲) است، توسط دوربین CCD ثبت می‌شود. با محاسبه تفاضل دیجیتالی بین شدت‌های  $I$  و  $I'$  در هر پیکسل، توزیع شدت نور هاله‌های برش‌نگاری به صورت زیر به دست می‌آید:

<sup>2</sup> AC signal

<sup>1</sup> Charge-coupled device

می‌شوند [۱۲]:

$$A = \sqrt{\text{Re}[FT(\omega)]^2 + \text{Im}[FT(\omega)]^2} \quad (7)$$

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}[FT(\omega)]}{\text{Re}[FT(\omega)]} \right) \quad (8)$$

اعمال این تبدیل فوری، فاز و دامنه جابه‌جایی مدوله شده را استخراج می‌کند و مجموعه تصاویر ثبت شده را به تنها دو تصویر کاهش می‌دهد: ۱- تصویر دامنه که ارتفاع موضعی اثر مدوله کردن را نشان می‌دهد و ۲- تصویر فاز که تاخیر زمانی بین تحریک و پاسخ قطعه را نمایان می‌کند. نحوه شناسایی عیوب از این طریق را می‌توان این‌گونه توضیح داد که در یک قطعه بدون عیب با ضخامت ثابت، تمامی قسمت‌های قطعه به صورت یکنواخت تغییر شکل می‌دهند، بنابراین مقدار فاز تصویر ثابت باقی می‌ماند. در نواحی که عیب وجود دارد، بازتاب موج حرارتی بر فاز موضعی تأثیر می‌گذارد و امکان تشخیص عیب در سیگنال ثابت تصویر پس‌زمینه را آسان‌تر می‌کند.

همان‌گونه که اشاره شد، در برش‌نگاری مدوله‌شده لازم است که اطلاعات مربوط به گرادیان جابه‌جایی مدوله شود. بدین منظور باید تصاویر فاز و پیچیده از تصاویر برش‌نگاری ثبت شده در طول بارگذاری مدوله‌شده استخراج شوند. بررسی پژوهش‌های پیشین نشان می‌دهد که روش‌های مختلفی برای محاسبه فاز الگوهای هاله‌ای و سپس استخراج فاز و پیچیده از آن وجود دارد. در این میان، استفاده از روش‌های نرم‌افزاری به دلیل هزینه کمتر و سرعت بالاتر به خصوص در محیط‌های غیرآزمایشگاهی ترجیح داده می‌شوند. در این پژوهش برای محاسبه فاز از روش فوری دوبعدی [۱۳] و برای استخراج فاز و پیچیده از روش حداقل مربعات [۱۴] بهره گرفته شد و الگوریتم مربوط به آن در نرم‌افزار متلب پیاده‌سازی شد. شکل ۴ تصویر فاز پیچیده استخراج شده از یک الگوی هاله‌ای را با استفاده از این روش نشان می‌دهد.

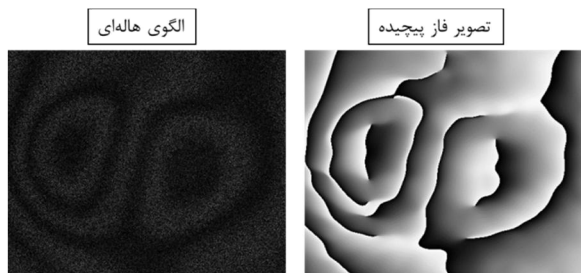


Fig. 4 Resultant wrapped phase and speckle pattern images from shearography with thermal loading

شکل ۴ تصویر الگوی هاله‌ای و فاز پیچیده حاصل از برش‌نگاری حرارتی

قسمتی از موج حرارتی به دلیل خواص حرارتی متفاوت در ناحیه معیوب، بازتاب می‌شود. موج بازتاب شده با موج ورودی در سطح قطعه ترکیب شده و دامنه و فاز آن را تغییر می‌دهد.

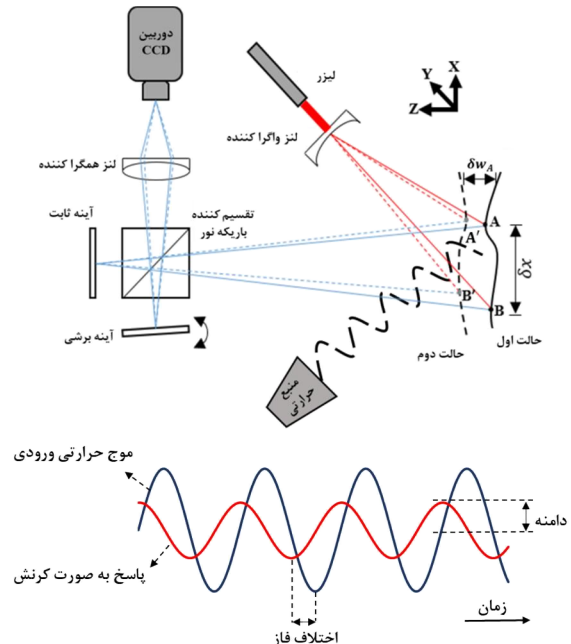


Fig. 3 Setup and description of lock-in shearography method

شکل ۳ چیدمان و توصیف روش برش‌نگاری مدوله‌شده

در حین بارگذاری متناوب قطعه با موج حرارتی، مجموعه‌ای از تصاویر برش‌نگاری طی یک یا چند سیکل و به صورت پیوسته ثبت می‌شوند. این تصاویر، تغییرات دوره‌ای گرادیان جابه‌جایی را به ازای دریافت موج حرارتی مدوله‌شده نشان می‌دهند. سپس سیگنال  $F_n(x, y)$  به دست آمده برای هر پیکسل از تصویر، با استفاده از تبدیل فوری گسسته (DFT) به فضای فرکانسی انتقال می‌یابد:

$$F_K(x, y) = \sum_{n=0}^{N-1} F_n(x, y) \cdot \exp\left(-j \frac{2\pi Kn}{N}\right) \quad (5)$$

$K = 1, 2, \dots, N$

که در آن  $F_n(x, y)$  مجموعه تصاویر ثبت شده و  $F_K(x, y)$  تبدیل فوری آن‌ها،  $N$  تعداد تصویر در هر دوره بارگذاری و  $K$  فرکانس دیجیتال است که از رابطه زیر به دست می‌آید [۱۲]:

$$K = N \frac{f_e}{f_s} + 1 \quad (6)$$

به طوری که  $f_e$  و  $f_s$  به ترتیب فرکانس مدولاسیون و فرکانس تصویربرداری می‌باشند. به منظور تشخیص عیوب قطعه، مقادیر مربوط به دامنه  $A$  و فاز  $\Phi$  مرتبط با فرکانس تحریک به ازای هر پیکسل از تصاویر فوری گرادیان جابه‌جایی استخراج

## ۲- آزمون‌های تجربی

متفاوت از نقاط اطراف بوده و ناپیوستگی انبساطی موجب ایجاد هاله‌های برش‌نگاری در مناطق معیوب می‌گردد. بدین منظور از یک لامپ تنگستنی با توان ۴۰۰ وات استفاده شد. به منظور اعمال بارگذاری نوسانی از ماژول مدوله‌کننده ولتاژ به صورت موج سینوسی و با قابلیت تنظیم فرکانس تا ۰/۰۲ هرتز استفاده شد. تحریک نمونه به صورت نوسانی با استفاده از منبع حرارتی مستلزم آن است که فاصله نمونه تا منبع به حدی باشد که فرصت کافی برای تغییر دما در سطح نمونه و تحریک نوسانی وجود داشته باشد [۱۲]. بدین منظور و نیز برای جلوگیری از تداخل نور منبع حرارتی با نور لیزر، منبع حرارتی درون یک محفظه و با فاصله ۸۰ سانتی‌متر از نمونه قرار داده شد و ماژول برش‌نگاری نیز در فاصله ۸۰ سانتی‌متری از سطح نمونه قرار گرفت. به منظور بررسی تأثیر فرکانس مدولاسیون بر قابلیت شناسایی عیوب در روش معرفی شده، آزمون‌ها در پنج فرکانس مختلف صورت گرفت و با حالت برش‌نگاری مرسوم مورد مقایسه قرار گرفت. برای رسیدن به نتایج مطلوب لازم است که فرکانس مدولاسیون بسیار پایین‌تر از فرکانس تشدید نمونه باشد (کمتر از ۱ هرتز). دلیل این امر این است که در چنین فرکانس پایینی، تغییر شکل در همه نقاط نمونه به جز نواحی مرزی مانند عیب‌ها به طور همزمان اتفاق می‌افتد که در نهایت منجر به تفاوت فاز تغییر شکل می‌شود.

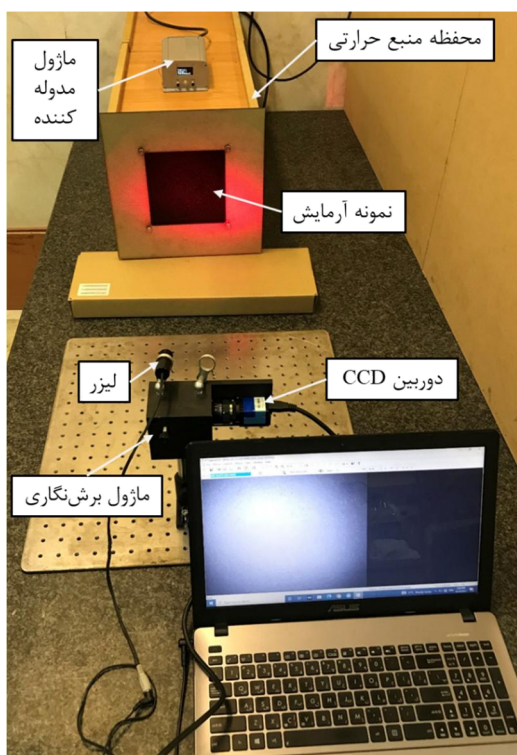


Fig. 6 Experimental setup in experiments

شکل ۶ چیدمان مورد استفاده در انجام آزمون‌های تجربی

به منظور بررسی کارایی روش برش‌نگاری با بارگذاری مدوله شده و مقایسه آن با روش معمول، آزمون‌های تجربی بر روی نمونه‌ای با عیوب صفحه‌ای مختلف انجام شد. در شکل ۵ نمونه مورد استفاده در این آزمایش به همراه اندازه و عمق عیوب مصنوعی ایجاد شده در آن نشان داده شده است. به طور کلی ۹ نمونه عیب بر روی ورق پلیمری از جنس پی‌وی‌سی سبک با ایجاد سوراخ‌های کور در یک سمت نمونه، مدل‌سازی شدند. لازم به ذکر است که همه سوراخ‌ها با رعایت توازی کف و سطح نمونه و با استفاده از فرز انگشتی کف تخت ایجاد شدند. شماره مربوط به هر عیب به صورت آرایه سطر-ستون ماتریسی در شکل ۵ مشخص شده است.

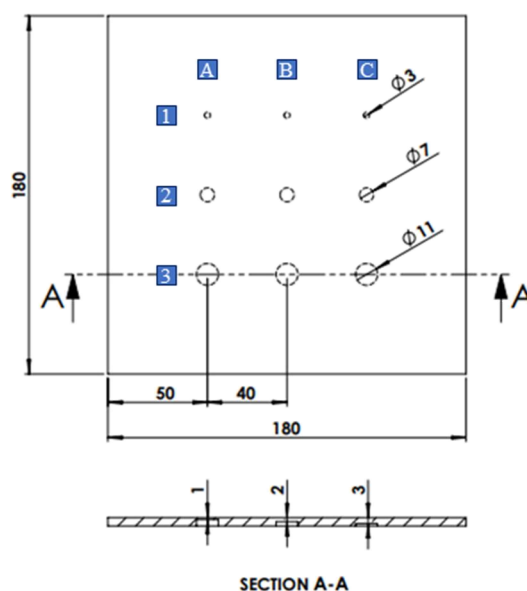


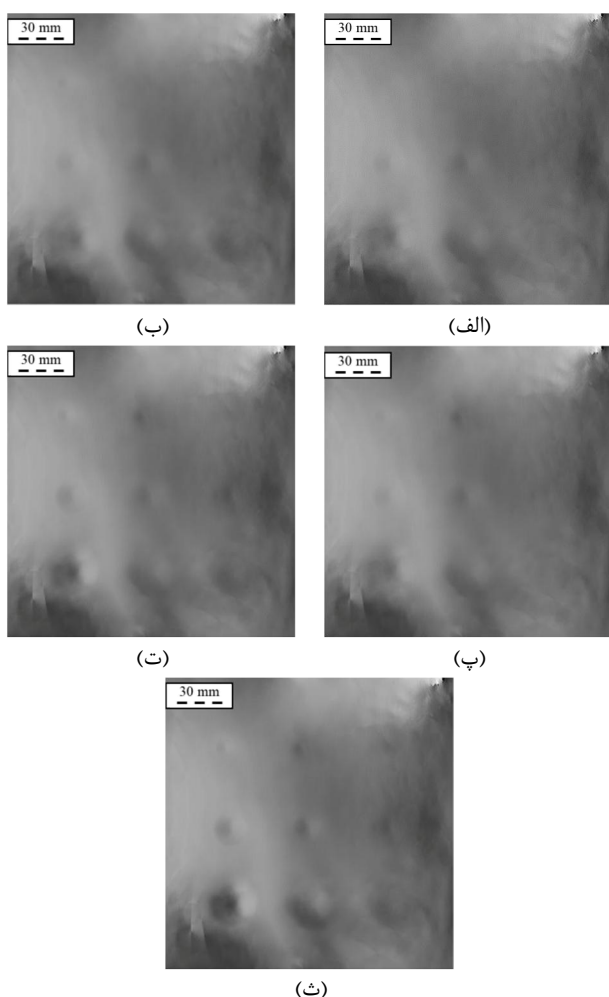
Fig. 5 The size and depth of artificial defects created in the polymer specimen

شکل ۵ اندازه و عمق عیوب مصنوعی ایجاد شده در نمونه پلیمری

آزمون‌های برش‌نگاری با استفاده از چیدمانی مطابق شکل ۶ انجام شد. در چیدمان ذکر شده از یک لیزر قرمز رنگ با حداکثر توان ۵۰ میلی‌وات و طول موج ۶۳۵ نانومتر برای روشن کردن سطح نمونه و از یک دوربین CCD با سرعت تصویر برداری ۲۰ فریم بر ثانیه برای ثبت تصاویر استفاده شد. تحریک نمونه از طریق روش حرارتی صورت گرفت. در این روش سطح قطعه تحت آزمون، با استفاده از یک المان حرارتی نظیر لامپ حرارتی گرم شده 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



در تحلیل نتایج برش‌نگاری مدوله شده، می‌توان از تصویر فازی و یا تصویر دامنه برای نمایش نتایج بهره برد؛ اما به طور کلی، تصویر فاز به دلیل ارایه واضح‌تر عیوب به تصویر دامنه ترجیح داده می‌شود [۵]. دلیل این امر عدم حساسیت آن به گرمایش غیریکنواخت و تغییرات موضعی انتشار حرارت در سطح نمونه است. در تصویر فاز، تغییر موضعی رنگ در یک ناحیه، نشانگر تغییر موضعی زاویه فاز و در نتیجه، تغییر موضعی خواص ماده در آن ناحیه است. در شکل ۸ تصاویر فاز حاصل از روش برش‌نگاری با تحریک مدوله شده در فرکانس‌های مختلف و پس از یک سیکل بارگذاری نشان داده شده است.



**Fig. 8** Phase image of lock-in shearography for frequency of (a) 0.1, (b) 0.08, (c) 0.06, (d) 0.04, (e) 0.02 Hz

شکل ۸ تصویر فاز حاصل از روش برش‌نگاری با تحریک مدوله شده در فرکانس (الف) ۰/۱، (ب) ۰/۰۸، (پ) ۰/۰۶، (ت) ۰/۰۴ و (ث) ۰/۰۲ هرتز

مشاهده می‌شود که تصاویر فاز در فرکانس‌های مختلف، نتایج متفاوتی از کیفیت شناسایی عیوب را نشان می‌دهند. در آزمون‌های انجام شده با فرکانس‌های بالا، تنها عیوب با عمق کم

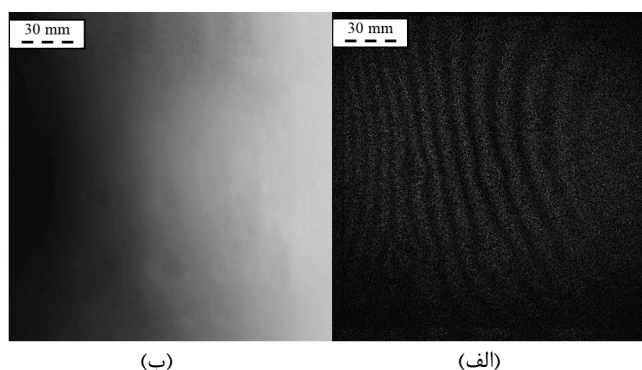
در جدول ۱ شرایط انجام آزمون‌ها مشخص معرفی شده است. تعداد سیکل بارگذاری، مدت زمانی است که ثبت تصاویر برش‌نگاری بسته به فرکانس مدولاسیون طول می‌کشد. همچنین اندازه برش با توجه به عرض تصویر و اندازه کوچکترین عیب، ۳ میلی‌متر انتخاب شد [۱۵].

جدول ۱ پارامترهای مورد بررسی شده به همراه سطوح تغییرات

پارامتر	سطح				
	۱	۲	۳	۴	۵
فرکانس مدولاسیون (Hz)	۰/۱	۰/۰۸	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۲
تعداد سیکل بارگذاری	۱	۲	۳	-	-

#### ۴- نتایج و بحث

با توجه به جدول ۱، در مجموع ۱۵ آزمایش با تحریک مدوله شده برای کنترل تمامی سطوح انجام گرفت. بعلاوه، به منظور مقایسه نتایج با روش برش‌نگاری مرسوم، برش‌نگاری سنتی با اعمال بارگذاری حرارتی به مدت ۵ ثانیه و روی نمونه صورت گرفت. شکل ۷ الگوی هاله‌ای و نقشه فازی واپیچیده<sup>۱</sup> را پس از آزمون برش‌نگاری مرسوم (بدون مدولاسیون) نشان می‌دهد. با توجه به شکل مشخص می‌شود که تنها ۴ عیب از ۹ عیب ایجاد شده در نمونه قابل شناسایی هستند. با این حال، موقعیت دقیق این عیوب کاملاً واضح است. روش برش‌نگاری دیجیتال به طور معمول در تحلیل دقیق اطلاعات اندازه و عمق عیب دارای محدودیت‌هایی است چرا که مقدار فاز حاصل از این روش به شدت بارگذاری بستگی دارد [۲].

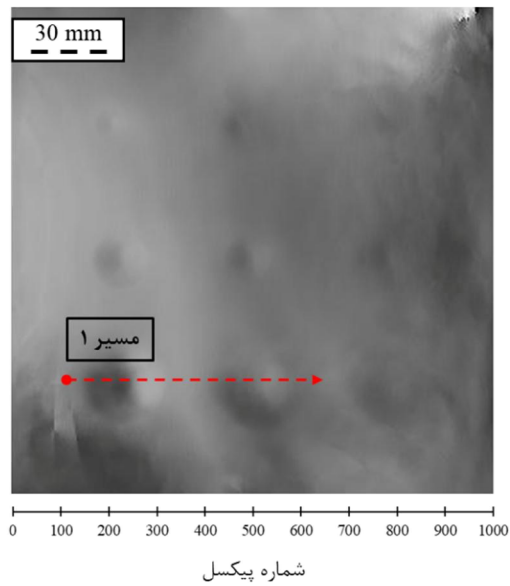


**Fig. 7** (a) Speckle pattern image and (b) unwrapped phase map from conventional shearography test

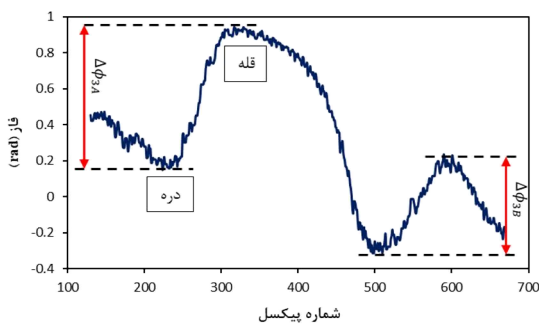
شکل ۷ (الف) الگوی هاله‌ای و (ب) نقشه فازی واپیچیده نمونه پس از آزمون برش‌نگاری معمولی

<sup>۱</sup> Unwrapped phase map

برابر مقدار آن در فرکانس ۰/۱ است.



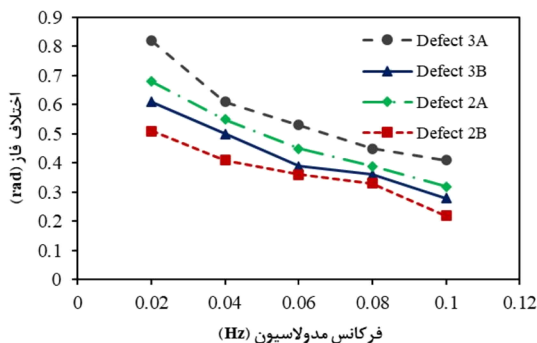
(الف)



(ب)

**Fig. 9** (a) Path through the center of defects 3A and 3B in the resultant phase map of 0.02 Hz and (b) the corresponding phase variations

شکل ۹ (الف) مسیر عبوری از مرکز عیوب 3A و 3B در تصویر فاز با فرکانس مدولاسیون ۰/۰۲ هرتز و (ب) تغییرات فاز مربوطه



**Fig. 10** Phase differences at different frequencies

شکل ۱۰ تغییرات اختلاف فاز نقاط دره و قله ناحیه عیب در فرکانس‌های مختلف

قابل شناسایی هستند (عیوب 2A، 2B، 3A و 3B) و عیوب عمیق‌تر تنها در فرکانس‌های ۰/۰۴ و ۰/۰۲ هرتز شناسایی شدند (عیوب 2C و 3C). از طرف دیگر کوچکترین عیوب با قطر ۳ میلی‌متر در عمق‌های مختلف به ازای فرکانس‌های مختلف شناسایی شدند (عمق‌های ۱ و ۲ و ۳ میلی‌متر به ترتیب در ۰/۰۸، ۰/۰۶ و ۰/۰۲ هرتز). نتایج آزمون برش‌نگاری با تحریک مدوله‌شده نشان می‌دهد قابلیت شناسایی عیوب با عمق بیشتر در فرکانس‌های پایین‌تر، افزایش می‌یابد. دلیل این امر این است که در فرکانس‌های پایین‌تر، دوره زمانی بارگذاری بیشتر بوده و موج حرارتی می‌تواند نفوذ عمیق‌تری در نمونه داشته باشد [۱۶]. همچنین بررسی تصاویر فاز به دست آمده از سیکل‌های بیشتر نشان داد افزایش تعداد سیکل بارگذاری تأثیر قابل‌توجهی بر ظرفیت شناسایی عیوب نمی‌گذارد و به دلیل افزایش مدت زمان محاسبات ناشی از افزایش تعداد نمونه‌ها، کارایی روش را با مشکل مواجه می‌سازد.

به منظور بررسی دقیق‌تر این مطلب، لازم است که پارامتری برای تعیین قابلیت شناسایی عیب تعریف شود. بدین منظور نمودار تغییرات فاز در مسیر عبوری از مرکز عیب ترسیم و اختلاف فاز دو نقطه دره و قله مسیر عبوری از مرکز عیب به عنوان پارامتری برای قابلیت شناسایی عیب در نظر گرفته شده است:

$$\Delta\phi_{\text{Defect center}} = \phi_{\text{peak}} - \phi_{\text{valley}} \quad (9)$$

واضح است که هرچه میزان پارامتر اختلاف فاز بیشتر باشد، شناسایی عیب آسانتر است. در شکل ۹ مسیر عبوری از مرکز عیوب 3A و 3B در تصویر فاز با فرکانس مدولاسیون ۰/۰۲ هرتز و نمودار تغییرات فاز مربوط به آن نشان داده شده است. با توجه به نمودار شکل ۹-ب، دو نقطه دره و قله در محل عیب از نمودار تغییرات فاز مشاهده می‌شوند که به ترتیب نمایانگر محل شروع و پایان عیب هستند. با محاسبه اختلاف مقادیر فاز در این دو نقطه، اختلاف فاز نقاط دره و قله مسیر عبوری از مرکز عیب به دست می‌آید.

لازم به ذکر است که اندازه‌گیری پارامتر اختلاف فاز در عیوبی انجام گرفت که در همه فرکانس‌ها قابل شناسایی بودند (عیوب 2A، 2B، 3A و 3B). شکل ۱۰ روند تغییرات اختلاف فاز با افزایش فرکانس را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نحوه تغییرات اختلاف فاز با فرکانس مدولاسیون در عیوب مختلف یکسان بوده و با افزایش فرکانس مدولاسیون، اختلاف فاز در هر چهار عیب کاهش می‌یابد و امکان تشخیص عیب کاهش می‌یابد، به طوری که میانگین اختلاف فاز در فرکانس ۰/۰۲ هرتز ۲/۱



## ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، آزمون برش‌نگاری دیجیتال با استفاده از تحریک مدوله شده بر روی نمونه پلیمری با ۹ عیب صفحه‌ای در اندازه و عمق‌های مختلف انجام شد و نتایج به دست آمده، از لحاظ قابلیت تشخیص عیب، با آزمون برش‌نگاری معمولی مورد مقایسه قرار گرفت. همچنین به منظور بررسی پارامترهای تأثیرگذار روش بر قابلیت شناسایی عیوب، در مجموع ۱۵ آزمون برش‌نگاری مدوله شده در شرایط متفاوت انجام گرفت. مهم‌ترین نتایج به دست آمده از آن به شرح زیر است:

- در روش برش‌نگاری معمولی، تنها ۴ عیب از ۹ عیب ایجاد شده در نمونه قابل شناسایی هستند، در حالی که با اعمال تحریک مدوله‌شده با فرکانس مدولاسیون ۰/۰۲ هرتز، هر ۹ عیب شناسایی شدند.

- در آزمون‌های انجام شده با فرکانس‌های بالا، تنها عیوب با قطر ۷ و ۱۱ میلی‌متر و عمق ۱ و ۲ میلی‌متر قابل شناسایی هستند و عیوب عمیق‌تر (عمق ۳ میلی‌متر) تنها در فرکانس‌های ۰/۰۴ و ۰/۰۲ هرتز شناسایی شدند. همچنین کوچکترین عیب با قطر ۳ میلی‌متر در عمق‌های ۱ و ۲ و ۳ میلی‌متر به ترتیب به ازای فرکانس‌های ۰/۰۸، ۰/۰۶ و ۰/۰۲ هرتز شناسایی شد.

- افزایش تعداد سیکل بارگذاری تأثیر قابل‌توجهی بر ظرفیت شناسایی عیوب نمی‌گذارد و به دلیل افزایش مدت زمان محاسبات ناشی از افزایش تعداد نمونه‌ها، کارایی روش را با مشکل مواجه می‌سازد.

- قابلیت شناسایی عیوب با کاهش فرکانس مدولاسیون افزایش می‌یابد. به طوری که میانگین اختلاف فاز در فرکانس ۰/۰۲ هرتز ۲/۱ برابر مقدار آن در فرکانس ۰/۱ است.

## ۶- مراجع

- thermography, *Journal of Applied Physics*, Vol. 71, No. 8, pp. 3962-3965, 1992.
- [5] D. Wu, G. Busse, Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials, *Revue générale de thermique*, Vol. 37, No. 8, pp. 693-703, 1998.
- [6] H. Gerhard, G. Busse, Lockin-ESPI interferometric imaging for remote non-destructive testing, *NDT & E International*, Vol. 39, No. 8, pp. 627-635, 2006.
- [7] A.E. Dolinko, G.H. Kaufmann, Enhancement in flaw detectability by means of lockin temporal speckle pattern interferometry and thermal waves, *Optics and lasers in engineering*, Vol. 45, No. 6, pp. 690-694, 2007.
- [8] H. Gerhard, G. Busse, Thermal Waves for Imaging of Defects with Lockin-Speckle Interferometry, *Strain*, Vol. 43, No. 3, pp. 229-234, 2007.
- [9] G. Kim, S. Hong, G.H. Kim, K.-Y. Jhang, Evaluation of subsurface defects in fiber glass composite plate using lock-in technique, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 13, No. 4, pp. 465-470, 2012.
- [10] D. Buchta, C. Heinemann, G. Pedrini, C. Krekel, W. Osten, Lock-in-shearography for the detection of transport-induced damages on artwork, in: *Optics for Arts, Architecture, and Archaeology VI*, International Society for Optics and Photonics, 2017, pp. 103310G.
- [11] D. Francis, R. Tatam, R. Groves, Shearography technology and applications: a review, *Measurement science and technology*, Vol. 21, No. 10, pp. 102001, 2010.
- [12] J. Liu, W. Yang, J. Dai, Research on thermal wave processing of lock-in thermography based on analyzing image sequences for NDT, *Infrared Physics & Technology*, Vol. 53, No. 5, pp. 348-357, 2010.
- [13] M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi, Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry, *JosA*, Vol. 72, No. 1, pp. 156-160, 1982.
- [14] D.C. Ghiglia, L.A. Romero, Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods, *JOSA A*, Vol. 11, No. 1, pp. 107-117, 1994.
- [15] 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.
- [16] P. Menner, G. Busse, Lockin-interferometric imaging of thermal waves for nondestructive testing, in: *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VII*, International Society for Optics and Photonics, 2011, pp. 808223.
- [1] J. Leendertz, J. Butters, An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 6, No. 11, pp. 1107, 1973.
- [2] 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. 526-535, 2013.
- [3] 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.
- [4] G. BuSse, D. Wu, W. Karpen, Thermal wave imaging with phase sensitive modulated