

Non-destructive Testing of Planar Defects Using Shearography Method with Modulated Ultrasonic Excitation

Sina Sabbaghi Farshi¹  | Davood Akbari² 

1. Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2. Faculty of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran. E-mail: daakbari@modares.ac.ir

Article Information:

Research Article

Received 06 Dec. 2023

Revised 30 January 2024

Accepted 05 Feb. 2024

Keywords:

Digital Shearography,
Composites,
Non-destructive Test,
Piezoelectric,
Modulation Frequency.

ABSTRACT

Early detection of subsurface defects is very important in the maintenance and development of structures made of composite materials. Therefore, it becomes necessary to use non-destructive tests to improve system reliability and prevent untimely failure of components during operation. However, due to the multi-component nature of the configuration, its complexity, and the extent of various defects in these materials, the detection of defects in composite materials is always difficult. Shearography with internal excitation of the defect is one of the novel methods of non-destructive testing of subsurface defects, which detects defects by receiving the defect's surface response to the loading. In this article, a glass fiber-reinforced polymer specimen was subjected to non-destructive inspection using shearography with modulated ultrasonic loading. The parameters influencing the detectability of plane defects were studied, and the obtained results were compared with the usual constant-amplitude ultrasonic loading. In shearography tests using the amplitude modulation technique, in contrast to the constant amplitude ultrasonic loading, the defect was easily detected at all three excitation frequencies and through the phase and amplitude images. Additionally, the highest resolution of defect detection was achieved at the 43 kHz excitation frequency. The amplitude image results showed that the defect has highest detectability at lowest modulation frequency, regardless of the piezoelectric stimulation frequency. Furthermore, the phase difference changes and defect detectability in the phase images are not significantly affected by the piezoelectric excitation frequency, demonstrating the independence of the phase image and the modulating method from the loading conditions.

Cite this article: Farshi, S.S., Akbari, D. (2023). Non-destructive Testing of Planar Defects Using Shearography Method with Modulated Ultrasonic Excitation. *Journal of Nondestructive Testing Technology*, 3 (3), 84-95. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2024.424255.1133>

بازرسی غیرمخرب عیوب صفحه‌ای به روش برش‌نگاری با تحریک فراصوتی مدوله شده

سینا صباغی فرشی^۱ | داود اکبری^۲ ✉

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

۲. دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، رایانامه: daakbari@modares.ac.ir

چکیده:

تشخیص زودهنگام عیوب زیرسطحی در نگهداری و توسعه سازه‌های ساخته شده از مواد مرکب بسیار حائز اهمیت است. لذا بهره‌گیری از آزمون‌های غیرمخرب برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم و جلوگیری از شکست نابه‌هنگام اجزا در حین کارکرد، ضرورت پیدا می‌کند. با این حال تشخیص عیب در مواد مرکب، به دلیل چندجزئی بودن و پیچیدگی پیکربندی و نیز گستردگی عیوب مختلف در این مواد، همیشه چالش‌برانگیز است. برش‌نگاری با تحریک داخلی عیب یکی از روش‌های نوین بازرسی غیرمخرب عیوب زیرسطحی است که با دریافت پاسخ سطحی عیب نسبت به بارگذاری صورت گرفته به تشخیص عیوب می‌پردازد. در این پژوهش، برش‌نگاری با بارگذاری فراصوتی مدوله شده در بازرسی غیرمخرب نمونه‌ای از جنس ماده مرکب زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه به کار رفته و پارامترهای موثر بر تشخیص‌پذیری عیب صفحه‌ای مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به دست آمده با روش معمول با بارگذاری فراصوتی دامنه ثابت مقایسه شد. در انجام آزمون برش‌نگاری با تکنیک مدوله کردن دامنه، برخلاف بارگذاری فراصوتی دامنه ثابت، عیب در هر سه فرکانس تحریک و از طریق تصاویر فاز و دامنه به آسانی تشخیص داده شد. همچنین عیب در فرکانس تحریک ۴۳ کیلوهرتز با بیش‌ترین وضوح تشخیص داده شد. نتایج حاصل از بررسی اثر فرکانس مدولاسیون بر تشخیص‌پذیری عیب در تصویر دامنه نشان داد مستقل از فرکانس تحریک پیزوالکتریک، عیب در پایین‌ترین فرکانس مدولاسیون بیشترین قابلیت تشخیص را دارد. همچنین فرکانس تحریک پیزوالکتریک، اثر معناداری بر تغییرات اختلاف فاز و قابلیت تشخیص عیب در تصاویر فاز ندارد که می‌توان آن را نشان دهنده استقلال تصویر فاز از شرایط بارگذاری دانست.

اطلاعات مقاله:

مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت:

۱۴۰۲/۰۹/۱۵

تاریخ بازنگری:

۱۴۰۲/۱۱/۱۰

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۱۱/۱۶

کلیدواژگان:

برش‌نگاری دیجیتال،

مواد مرکب،

آزمون غیرمخرب،

پیزوالکتریک،

فرکانس مدولاسیون.

استناد: صباغی فرشی، سینا؛ اکبری، داود. (۱۴۰۲). بازرسی غیرمخرب عیوب صفحه‌ای به روش برش‌نگاری با تحریک فراصوتی مدوله شده. مجله

فناوری آزمون‌های غیرمخرب، ۳ (۳)، ۸۴-۹۵. <http://doi.org/10.30494/JNDT.2024.424255.1133>

۱- مقدمه

مواد مرکب تقویت شده با الیاف به دلیل دارا بودن مزایای قابل توجه، به طور گسترده در صنایع مختلفی همچون هوافضا، خودروسازی و کاربردهای دریایی مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱، ۲]. سختی و استحکام ویژه بالا، مقاومت خوردگی بالا، خواص خستگی بهتر نسبت به فلزات و ویژگی عایق حرارتی خوب از مزایای اصلی این مواد می‌باشند. در حال حاضر، مواد مرکب بیش از ۵۰ درصد وزن آخرین مدل‌های هواپیماهای باری و مسافربری را تشکیل می‌دهند [۳]. برخلاف مواد فلزی، مواد مرکب به دلیل ساختار پیچیده‌ای که دارند مستعد ایجاد انواع عیوب بیشتری هستند. پیدایش عیوبی مانند عدم چسبندگی طی فرآیند ساخت و یا عیوبی نظیر جدایش بین لایه‌ای و شکست الیاف، در حین سرویس دهی قطعه ممکن است خواص و یکپارچگی ساختاری مواد مرکب را به شدت تقلیل دهند و در نهایت سلامت و عملکرد سیستم را با مشکل مواجه کنند [۴]. با وجود این که اغلب این عیوب به صورت سطحی ظاهر می‌شوند، ولی برخی از عیوب مانند جدایش بین لایه‌ای ممکن است در لایه‌های عمیق‌تر نیز رشد کنند. چنین آسیب‌های پنهانی، پس از مدتی منجر به ترک‌های قابل مشاهده در سطح می‌شوند. بنابراین تشخیص زود هنگام عیوب زیرسطحی در نگهداری و توسعه سازه‌های ساخته شده از مواد مرکب بسیار حائز اهمیت است. لذا بهره‌گیری از آزمون‌های غیرمخرب برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم و جلوگیری از شکست نابهنگام اجزا در حین کارکرد، ضرورت پیدا می‌کند.

با این حال، تشخیص عیب در مواد مرکب همیشه چالش برانگیز است. دلیل این امر چندجزئی بودن و پیچیدگی پیکربندی و نیز گستردگی عیوب مختلف در این مواد است. تست فراصوتی و پرتونگاری پرتو ایکس از شناخته شده ترین روش‌های تست غیرمخرب در تشخیص عیوب در مواد مختلف هستند. اگرچه آزمون فراصوتی برای مدت طولانی و به طور گسترده در بازرسی‌های صنعتی مورد

استفاده قرار گرفته است، ولی تضعیف، پراکندگی و بازتاب‌های متعدد سیگنال می‌تواند تشخیص عیب در مواد مرکب را با چالش مواجه کند. علاوه بر این، روبش کامل کل سازه نیز می‌تواند بسیار زمان‌بر باشد. در مورد روش پرتونگاری با استفاده از پرتو ایکس نیز چالش اصلی این روش در تشخیص عیوب در جهت ضخامت است و همچنین خطرات مرتبط با پرتو ایکس نیز می‌تواند برای انسان مشکل‌ساز باشد [۵]. از طرف دیگر شناسایی عیوب در مواد مرکب پلیمری به دلیل وجود خواصی نظیر ناهمگنی، عدم رسانایی الکتریکی و عدم مغناطیس بودن، منجر به عدم کارایی سایر روش‌های سنتی آزمون‌های غیرمخرب در تشخیص عیوب این گونه مواد می‌گردد. 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 [۶]. روش‌های نوری نظیر هولوگرافی^۱، تداخل سنجی الگوی لکه‌ای الکترونیکی^۲ و برش‌نگاری دیجیتال^۳ از جمله این روش‌ها هستند که روش برش‌نگاری دیجیتال به دلیل حساسیت بسیار پایین به ارتعاشات (اختلالات) محیطی، غیرتماسی بودن و قابلیت اندازه‌گیری تمام میدانی^۴ و بلادرنگ^۵، امکان انجام آزمون در محیط صنعتی را فراهم می‌کند [۷]. این روش که برای نخستین بار در سال ۱۹۷۳ توسط لیندرتز و باترز [۸] برای یافتن گشتاور خمشی در یک تیر مورد استفاده قرار گرفت، می‌تواند ناحیه بزرگی را در چند ثانیه بازرسی کند و حساسیت آن با قطعه بازرسی شده قابل تطبیق دادن است. اساس روش برش‌نگاری دیجیتال بر پایه دریافت پاسخ سطحی عیب نسبت به بارگذاری صورت گرفته استوار است که این امر از طریق اندازه‌گیری مستقیم کرنش (مشتق اول جابه‌جایی سطح) انجام می‌گیرد. بدین صورت که 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 الگوی هاله‌ای^۶ یا نقشه فازی^۷ می‌توان به وجود عیب پی برد [۹، ۱۰].

⁵ Real-time measurement⁶ Fringe pattern⁷ Phase map¹ Holography² Electronic Speckle Pattern Interferometry³ Digital Shearography⁴ Full field measurement

هاله‌ها در روش استروبوکوپیک در تمامی فرکانس‌های تحریک بالاتر از روش زمان میانگین است.

همانگونه که گفته شد، زمانی تشخیص عیب موفقیت‌آمیز خواهد بود که سیگنال مربوط به آن به اندازه کافی برای تشخیص برش‌نگاری بزرگ باشد (مثلاً نسبت سیگنال عیب به سیگنال پس‌زمینه بیشتر از دو باشد). علاوه بر این، برای بازرسی دقیق‌تر می‌توان سیگنال پس‌زمینه را با استفاده از روش‌هایی حذف یا کاهش داد. یکی از این روش‌های شناخته شده استفاده از روشهای مدولاسیون و تبدیل فوریه گسسته است. گرهارد و بوسه [۱۸] این شیوه را در روش تداخل‌سنجی الگوی لکه‌ای الکترونیکی اعمال کردند و نشان دادند که نسبت سیگنال به نویز تصویر قطعات معیوب به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. دولینکو و همکاران [۱۹] تحریک حرارتی را به شکل خاصی از موج مثلثی بر روش تداخل‌سنجی الگوی لکه‌ای زمانی^۲ اعمال کردند و با تعریف یک پارامتر برای کمی‌سازی قابلیت تشخیص عیوب نشان دادند که تشخیص عیوب پنهان در صفحات فلزی از این طریق بهبود می‌یابد. گرهارد و بوسه [۲۰] 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 [۲۱] روش تحریک مدوله‌شده مرسوم در روش حرارت‌نگاری را به روش برش‌نگاری اضافه کرده و با بازرسی قطعات از جنس مواد مرکب تقویت شده با الیاف شیشه نشان دادند استفاده از تحریک مدوله‌شده می‌تواند به افزایش نسبت سیگنال به نویز تصاویر برش‌نگاری منجر شود.

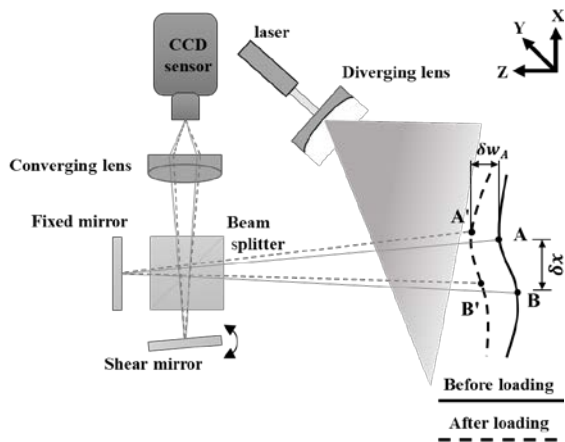
روش مدولاسیون به دلیل کاهش پهنای باند، امکان کاهش نویز را فراهم می‌کنند. مدولاسیون دامنه موج فراصوتی منجر به تولید گرمای دوره‌ای می‌شود به طوری که عیب به یک فرستنده موج حرارتی موضعی تبدیل می‌شود. این بارگذاری دوره‌ای در ناحیه عیب علاوه بر نمود حرارتی، نمود دیگری نیز دارد که شامل تغییرات جابه‌جایی یا کرنش در این ناحیه است. انتشار این موج حرارتی از طریق مدولاسیون دما در سطح نمونه و با استفاده از حرارت‌نگاری

روشهای بارگذاری مورد استفاده در برش‌نگاری شامل حرارت، خلاء نسبی، کشش یا فشار، ارتعاش، امواج مایکروویو و غیره می‌باشد [۱۱]. از آنجایی که برش‌نگاری می‌تواند تغییرات گرادیان جابه‌جایی سطح را در محدوده میکروکرنش تشخیص دهد، تنش اعمال شده لازم نیست خیلی زیاد باشد (برای مثال گرم کردن در حد چند درجه سانتی‌گراد). لازم به ذکر است که نکته کلیدی یک بازرسی برش‌نگاری موفق در برجسته کردن سهم تغییر شکل ناشی از عیب نسبت به تغییر شکل کلی قطعه است.

بارگذاری داخلی به عنوان یکی دیگر از روش‌های مورد استفاده برای تحریک قطعه، شامل روشهایی است که عیب منحصر و به صورت انتخاب شده پاسخ تحریک را می‌دهد، به گونه‌ای که تصویر حاصل تنها نمایانگر عیب است و پس‌زمینه مزاحم ناحیه سالم نادیده گرفته می‌شود. ناحیه عیب به دلیل ماهیت مکانیکی متفاوتش با ناحیه سالم ممکن است موجب تمرکز کرنش شود و یا تحت بارگذاری‌های دوره‌ای، اثرات پسماند^۱ یا اصطکاک در آن ناحیه ایجاد شود. از آنجایی که عیوب مناطقی می‌باشند که در آن میرایی مکانیکی افزایش می‌یابد، بارگذاری با امواج الاستیک عمدتاً در این نواحی به گرما تبدیل می‌شود [۱۲]. هانگ و همکاران [۱۳] با استفاده از برش‌نگاری و بارگذاری ارتعاشی با جاروب فرکانس چندگانه به بررسی سلامت اتصال سطوح پرداختند. فیندیس و گریزاگوریدیس [۱۴] عیوب موجود در قطعات ساخته شده از مواد مرکب در بدنه هواپیما را از طریق چسباندن پیزوالکتریک به پشت قطعه و اعمال بارگذاری ارتعاشی شناسایی کردند. لیو و همکاران [۱۵] ترک‌های خستگی ایجاد شده در حاشیه سوراخ در قطعه آلومینیومی را از طریق بارگذاری ارتعاشی به وسیله ترانسدیسوسرهای پیزوالکتریک مورد بازرسی قرار دادند و نشان دادند شناسایی ترک‌هایی که عمود بر جهت انتشار امواج باشند دشوارتر است. آن‌ها در پژوهش دیگری [۱۶] نشان دادند استفاده از ترانسدیسوسر آرایه فازی با کنترل جهت امواج می‌تواند قابلیت شناسایی ترک را تا حد زیادی افزایش دهد. آسمانی و سلطانی [۱۷] برش‌نگاری با بارگذاری ارتعاشی استروبوکوپیک و زمان میانگین را در بازرسی نمونه پروپیلنی مورد مقایسه قرار دادند و نشان دادند وضوح

² Temporal Speckle Pattern Interferometry

¹ Hysteresis



شکل ۱) سیستم برش‌نگاری مبتنی بر تداخل‌سنج مایکلسون

لاک-این^۱ تنظیم شده با فرکانس مدولاسیون دامنه تشخیص داده می‌شود [۲۲-۲۴]. تغییرات کرنش ناحیه عیب را نیز می‌توان از طریق مدولاسیون گرادیان جابه‌جایی در سطح نمونه تشخیص داد، که تحلیل آن توسط برش‌نگاری لاک-این تنظیم شده با فرکانس مدولاسیون دامنه انجام می‌شود [۲۵]. در این پژوهش مدوله کردن به روش برش‌نگاری با بارگذاری فراصوتی اعمال شده و پارامترهای موثر بر تشخیص‌پذیری عیب صفحه‌ای مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به دست آمده با روش معمول بارگذاری فراصوتی مقایسه شد.

۲- تئوری برش‌نگاری

تشخیص عیب توسط برش‌نگاری از طریق مقایسه دو حالت از تغییر شکل قطعه انجام می‌گیرد (تصاویر مرجع و سیگنال). تصویر مرجع را می‌توان قبل یا بعد از بارگذاری ثبت کرد و تصاویر سیگنال پس از بارگذاری گرفته می‌شوند. با کم کردن تصاویر مرجع و سیگنال و محاسبه اختلاف فاز آن‌ها، اختلاف فاز $\Delta\varphi$ به دست می‌آید که به عنوان الگوی هاله‌ای شناخته می‌شود:

$$\Delta\varphi = \varphi' - \varphi \quad (2)$$

لازم به ذکر است که $\Delta\varphi$ نمایانگر اختلاف فاز نوری حاصل از تحریک قطعه است که با شیب جابجایی در جهت برش متناسب است.

اگر زوایای تابش و بازتابش تقریباً هم‌راستا بوده و عمود بر سطح قطعه باشند و اندازه برش در جهت محور x مقدار کوچکی داشته باشد، مقدار تغییر فاز نوری هر نقطه ناشی از تغییر شکل نسبی از طریق رابطه زیر به گرادیان جابه‌جایی خارج از صفحه در جهت x مرتبط می‌شود:

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial w}{\partial x} \delta x \quad (3)$$

که در آن λ برابر با طول موج لیزر آشکار ساز است. با توجه به این رابطه مشخص می‌شود که در الگوی هاله‌ای حاصل از برش‌نگاری، عیوب به صورت نواحی ناسازگار در میدان کرنش خارج از صفحه آشکار می‌شوند. لازم به ذکر است که در صورتی که برش تصویر در جهت y (δy) صورت گیرد، گرادیان خارج از صفحه در جهت y ($\frac{\partial w}{\partial y}$) در رابطه (۴) قرار می‌گیرد.

شکل ۱ تصویر طرح‌نمایی از یک سیستم برش‌نگاری مبتنی بر تداخل‌سنج مایکلسون را نشان می‌دهد. این چیدمان برش‌نگاری برای اندازه‌گیری گرادیان جابه‌جایی سطح خارج از صفحه تنظیم شده است، زیرا انتظار می‌رود عیب لایه‌لایه شدن و سوراخ‌های کف صاف بر تغییر شکل خارج از صفحه تأثیر بگذارند. هنگام بازرسی به روش برش‌نگاری، از پرتو لیزر برای روشن کردن سطح قطعه استفاده می‌شود که این پرتو پس از عبور از دستگاه برش‌گر به ایجاد یک الگوی لکه‌ای روی نمایشگر دوربین CCD^۲ می‌انجامد. در این حالت با زاویه دادن به آینه برش، نور پراکنده شده از دو موقعیت همسایه روی سطح ناهموار جسم را می‌توان به صورت دو تصویر یکسان اما برش خورده قرار داد تا یک تصویر لکه‌ای تداخل یافته ایجاد کند. در این صورت شدت نور ثبت شده الگوی لکه‌ای در دوربین از رابطه زیر به دست می‌آید [۲۶]:

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

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 نقطه A و B در همسایگی همدیگر است که از طریق اندازه برش δx از هم جدا شده‌اند.

² Charge-coupled device

¹ Lock-in Thermography

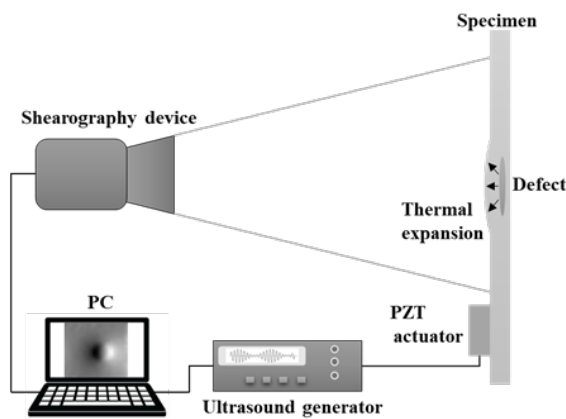
دست می‌آید [۲۷]:

$$K = N \frac{f_e}{f_s} + 1 \quad (5)$$

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 ϕ مرتبط با فرکانس مدولاسیون به ازای هر پیکسل از تصاویر فوریه استخراج می‌شوند [۲۷]:

$$A = \sqrt{\text{Re}[FT(\omega)]^2 + \text{Im}[FT(\omega)]^2} \quad (6)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{\text{Im}[FT(\omega)]}{\text{Re}[FT(\omega)]} \right) \quad (7)$$



شکل ۲) چیدمان برش‌نگاری با تحریک فراصوتی مدوله شده

۳- آزمون‌های تجربی

به منظور بررسی کارایی روش برش‌نگاری با بارگذاری فراصوتی مدوله شده، آزمون‌های تجربی بر روی نمونه‌ای از جنس ماده مرکب زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه انجام شد. نمونه به روش خلاء و در ۸ لایه با چینش [0/+45/90/-45] ساخته شد. عیوب صفحه‌ای با ایجاد سوراخ‌های کور در یک سمت نمونه و با رعایت توازی کف و سطح نمونه مدل‌سازی شد. شکل ۳ ابعاد نمونه و جایگاه عیب و نیز محل اتصال عملگر پیزوالکتریک را نشان می‌دهد.

همانگونه که گفته شد به منظور عبور از محدودیت‌های مورد بحث و افزایش ظرفیت تشخیص عیوب، می‌توان روش مدوله‌کردن را به برش‌نگاری دیجیتال اعمال کرد. برای رسیدن به برش‌نگاری مدوله‌شده، لازم است که اطلاعات گرادیان جلبه‌جایی مدوله شود. این امر با تحریک قطعه به صورت دوره‌ای و ایجاد پاسخ‌های مدوله‌شده امکان‌پذیر خواهد بود. پاسخ قطعه به صورت یک سیگنال متناوب (AC signal) خواهد بود که امکان فیلتر کردن آن در فرکانس تحریک و کاهش طیف نویز متناسط آن را فراهم می‌سازد [۱۹].

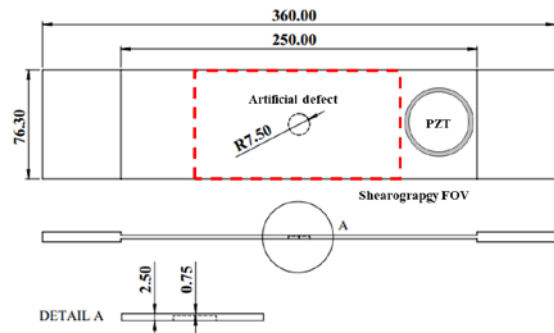
شکل ۲ چیدمان طرح کلی برش‌نگاری با تحریک فراصوتی مدوله شده را نشان می‌دهد. در برش‌نگاری مدوله شده، چیدمان برش‌نگاری معمولی با تحریک متغیر دوره‌ای و تحلیل فوریه ادغام می‌شود. مبدل فراصوتی در یک نقطه ثابت از نمونه وصل می‌شود که از آنجا امواج صوتی در کل حجم نمونه انتشار می‌یابند و پس از چندین بار منعکس شدن، ترجیحاً در یک عیب میرا شده و گرما ایجاد می‌کنند. فرکانس بالای این امواج در ایجاد گرمایش بسیار کارآمد است زیرا سیکل‌های هیستریزس زیادی در هر ثانیه انجام می‌شود. گرمایش انتخابی همراه با انبساط حرارتی منجر به پدیدار شدن یک برآمدگی کوچک در بالای عیب می‌شود و آن را برای سیستم تداخل‌سنجی آشکار می‌کند. این برآمدگی سطحی (شکل ۲) از الگوی تحریک با تابع انتقال خاص خود پیروی می‌کند و می‌تواند از مجموعه متوالی تصاویر برش‌نگاری با تبدیل فوریه در هر پیکسل استخراج شود که در نهایت داده‌ها را به دو تصویر فاز و دامنه خلاصه می‌کند. مجموعه تصاویر متوالی ثبت شده، تغییرات دوره‌ای گرادیان جلبه‌جایی را به ازای دریافت بارگذاری مدوله‌شده نشان می‌دهند. سپس سیگنال $F_n(x, y)$ به دست آمده برای هر پیکسل از تصویر، با استفاده از تبدیل فوریه گسسته به فضای فرکانسی انتقال می‌یابد [۲۷]:

$$F_K(x, y) = \sum_{n=0}^{N-1} F_n(x, y) \cdot \exp \left(-j \frac{2\pi K n}{N} \right) \quad (4)$$

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

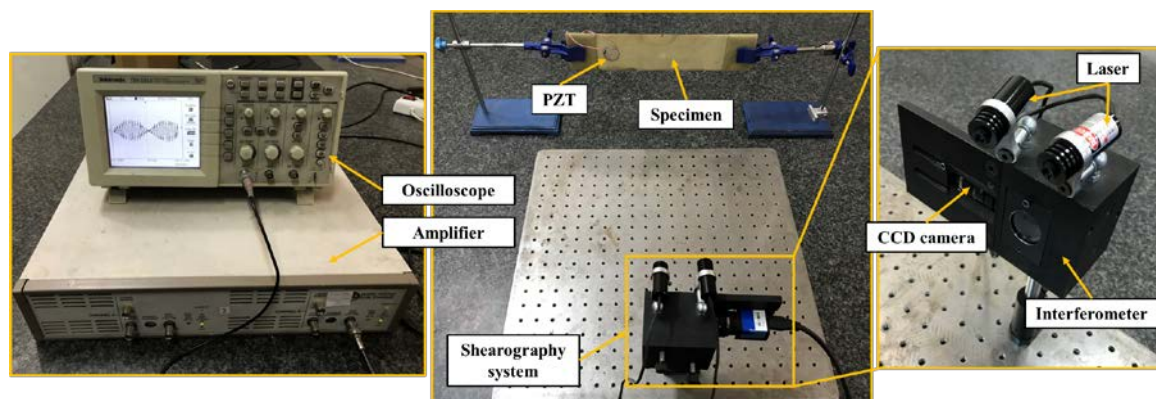
که در آن $F_n(x, y)$ مجموعه تصاویر ثبت شده و $F_K(x, y)$ تبدیل فوریه آن‌ها، N تعداد تصویر در هر دوره بارگذاری و K فرکانس دیجیتال است که از رابطه زیر به

پژوهش‌های پیشین اثبات کرده‌اند که محرک‌های پیزوالکتریک سرامیکی کوچک کم‌توان (کمتر از ۵۰ وات) می‌توانند به طور موثر برای تشخیص عیوب لایه‌لایه شدن ناشی از ضربه در صفحات ساخته شده از مواد مرکب مورد استفاده شوند [۲۳، ۲۸]. بنابراین، عملگر مورد نظر از نوع سرامیکی با قطر ۳۰ میلی‌متر، ضخامت ۴ میلی‌متر و با فرکانس تشدید ۴۵ کیلوهرتز انتخاب شد. به منظور تقویت دامنه ولتاژ امواج تولیدی از آمپلی فایر با برند Trek-PZD700 استفاده شد. با توجه ابعاد ناحیه مورد بررسی نمونه و میدان دید دوربین CCD، دستگاه برش‌نگاری نیز در فاصله ۶۰ سانتی‌متری از سطح نمونه قرار گرفت. به منظور ایجاد موج با دامنه مدوله شده (AM)، از کارت پردازشی مبتنی بر $FPGA^1$ دارای تراشه از نوع Kintex-7 ساخت شرکت Xilinx استفاده شد که به منظور امکان ایجاد امواج سینوسی با فرکانس سیگنال در محدوده ۰.۰۱ تا ۱ هرتز و فرکانس حامل در محدوده ۵ تا ۱۰۰ کیلوهرتز برنامه‌نویسی شد.



شکل ۳) ابعاد نمونه و جایگاه عیب و محل اتصال عملگر پیزوالکتریک (ابعاد بر حسب میلی‌متر)

آزمون‌های برش‌نگاری با استفاده از چیدمانی مطابق شکل ۴ و بر روی میز ضد ارتعاش انجام شد. در چیدمان ذکر شده از دو 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 اتصال یک عملگر پیزوالکتریک روی نمونه صورت گرفت.

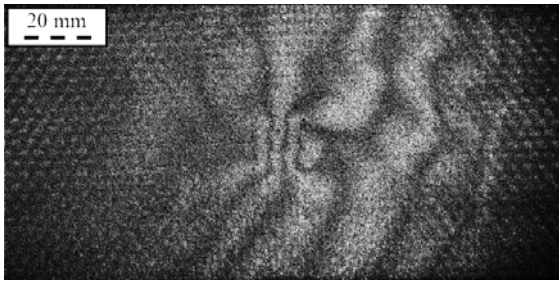


شکل ۴) چیدمان مورد استفاده در آزمون‌های تجربی

عیب‌ها به طور همزمان اتفاق می‌افتد که در نهایت منجر به تفاوت فاز تغییر شکل می‌شود. همچنین اندازه برش با توجه به عرض تصویر و اندازه عیب، ۵ میلی‌متر انتخاب شد [۲۹]. ابتدا آزمون‌های برش‌نگاری با تحریک ارتعاشی با دامنه ثابت انجام گرفت. بدین منظور تصویر مرجع در حالت بدون بارگذاری و تصویر سیگنال پس از تحریک نمونه ثبت شد. برای انجام آزمون‌های برش‌نگاری با دامنه مدوله شده نیز ابتدا تصویر مرجع در حالت سکون ثبت شده و پس از اعمال

به منظور بررسی تاثیر فرکانس مدولاسیون بر قابلیت شناسایی عیوب در روش معرفی شده، آزمون‌ها در فرکانس‌های مدولاسیون مختلف صورت گرفت و با نتایج برش‌نگاری با دامنه ثابت 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

¹ Field-programmable gate array



(ب)



(ج)

شکل ۵) الگوی هاله‌ای به دست آمده در آزمون برش‌نگاری با تحریک فراصوتی با فرکانس (الف) ۲۱، (ب) ۴۰ و (ج) ۴۳ کیلوهرتز

به منظور بررسی دقیق‌تر اثر فرکانس تحریک بر تشخیص‌پذیری عیب، می‌توان از پارامترهای کمی برای مقایسه تصاویر حاصله استفاده کرد. مقایسه کمی تصاویر برش‌نگاری نیازمند استخراج مقادیر فاز نوری واپیچیده و استفاده از نمودار تغییرات گرادیان جابه‌جایی است. در این حالت، مقدار قدر مطلق اختلاف گرادیان جابه‌جایی خارج از صفحه در نقاط مرکز هاله‌ها را می‌توان به عنوان پارامتر کمی تشخیص‌پذیری عیب در نظر گرفت [۲۹]. بدین منظور نمودار گرادیان جابه‌جایی مطابق شکل ۶ در راستای خط مرکزی عیب استخراج شده و قدر مطلق اختلاف گرادیان جابه‌جایی خارج از صفحه یا شیب در نقاط اکسترمم (ΔS) به عنوان پارامتر کمی تشخیص‌پذیری در نظر گرفته شد. جدول ۱ مقادیر ΔS محاسبه شده برای هاله‌های به دست آمده در این سه فرکانس را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که بیش‌ترین مقدار اختلاف شیب در تحریک با فرکانس ۴۳ کیلوهرتز به دست می‌آید که این امر با توجه به تشخیص کیفی آسان‌تر عیب در این فرکانس قابل پیش‌بینی بود. در مجموع می‌توان گفت با وجود شناسایی عیب توسط روش دامنه ثابت، نویز هاله‌های تشکیل شده زیاد است و تشخیص عیب نیازمند انجام آزمون‌های متعدد است.

ولتاژ به محرک پیزوالکتریک به صورت موج AM، ثبت مجموعه تصاویر سیگنال در طی سیکل‌های مدولاسیون انجام می‌گیرد. لازم به ذکر است که در هر دو نوع تحریک، ثبت تصاویر سیگنال پس از گذشت ۱۲۰ ثانیه از اعمال بارگذاری آغاز شد. این مدت زمان بارگذاری لازم است تا ناحیه عیب به محل ایجاد گرما و جابه‌جایی موضعی تبدیل شود.

۴- نتایج و بحث

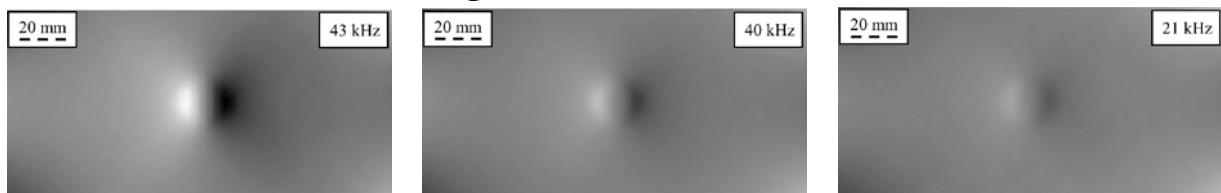
همان‌گونه که اشاره شد، ابتدا آزمون‌های برش‌نگاری با تحریک ارتعاشی با دامنه ثابت انجام گرفت. محدوده تنظیم فرکانس برای عملگر پیزوالکتریک براساس شبیه‌سازی عددی صورت گرفته در نرم‌افزار آباکوس برای به دست آوردن فرکانس تشدید ناحیه عیب انتخاب شد. با تغییر فرکانس تحریک در محدوده مقادیر حاصل از شبیه‌سازی، شناسایی عیب صورت گرفت. شکل ۵ الگوی هاله‌ای به دست آمده در آزمون برش‌نگاری با تحریک فراصوتی با فرکانس ۲۱، ۴۰ و ۴۳ کیلوهرتز و با دامنه ولتاژ در محدوده ۷۰-۸۵ ولت را می‌دهد. این تصاویر پس انجام فرایندهای پردازش به دست آمده‌اند. مشاهده می‌شود که تشخیص عیب در فرکانس ۲۱ کیلوهرتز به سختی انجام می‌گیرد. با این حال در فرکانس ۴۳ کیلوهرتز تشخیص آن آسان‌تر است. به نظر می‌رسد تحریک نمونه در این فرکانس ناحیه عیب را بیشتر تحت تاثیر قرار داده و به دلیل زاویه تلفات مکانیکی یا تمرکز تنش بیشتر در این ناحیه، جابه‌جایی خارج از صفحه آن به شکل قابل توجهی بیشتر از نواحی سالم اطراف است. هاله‌های ایجاد شده در فرکانس ۴۰ کیلوهرتز نیز به دلیل تداخل با تغییر شکل کلی نمونه و نیز نویز پس‌زمینه به صورت کامل تشکیل نشده‌اند که ممکن است تشخیص عیب را دشوارتر کند.



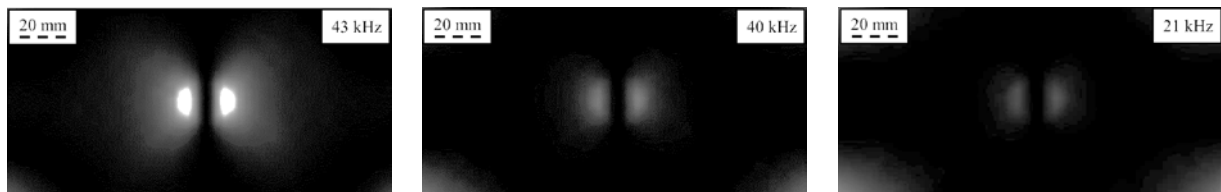
(الف)

تصویر فاز و یا تصویر دامنه برای نمایش نتایج بهره برد. تصویر دامنه، تغییر شکل‌های موضعی قطعه را در فرکانس مدولاسیون نشان می‌دهد و تصویر فاز تاخیر زمانی بین تحریک و پاسخ قطعه را نمایان می‌سازد. در تصویر فاز، تغییر موضعی رنگ در یک ناحیه، نشانگر تغییر موضعی فاز و در نتیجه، تغییر موضعی خواص ماده در آن ناحیه است.

شکل ۷ تصاویر فاز و دامنه حاصل از آنالیز فوری به ترتیب در فرکانس تحریک ۲۱، ۴۰ و ۴۳ کیلوهرتز نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که عیب در هر سه فرکانس تحریک به آسانی تشخیص داده می‌شود. در سیستم‌های عیب‌یابی به کمک تحریک حرارتی، تصویر فاز به دلیل عدم حساسیت به گرمایش غیریکنواخت و تغییرات موضعی انتشار حرارت در سطح نمونه، عیوب را واضح‌تر از رایبه داده و به تصویر دامنه ترجیح داده می‌شود [۳۰]. با این حال به نظر می‌رسد با تحریک موضعی عیب از طریق امواج فراصوتی، پاسخ عیب به صورت موضعی بوده و از طریق تصویر دامنه نیز با تباین خوبی قابل تشخیص است. همچنین مقایسه تصاویر فاز و دامنه در فرکانس‌های مختلف عملگر پیزوالکتریک، آشکار می‌سازد که، همانند نتایج برش‌نگاری با تحریک ارتعاشی با دامنه ثابت، عیب در فرکانس تحریک ۴۳ کیلوهرتز بیش‌ترین قابلیت تشخیص را دارد. همچنین استفاده از بارگذاری مدوله شده و آنالیز فوری امکان تشخیص آسان‌تر عیب در فرکانس ۲۱ کیلوهرتز را نسبت به تحریک ارتعاشی با دامنه ثابت فراهم می‌کند. به طوری که با حذف نویز پس‌زمینه باعث افزایش نرخ سیگنال به نویز (SNR) می‌شود.



(الف)

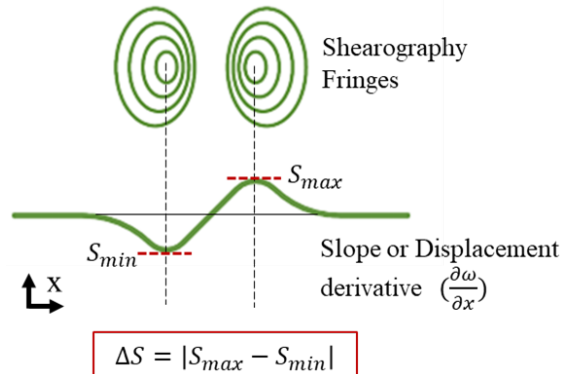


(ب)

شکل ۷ (الف) تصاویر فاز و (ب) دامنه آنالیز فوری با فرکانس مدولاسیون ۰/۰۱ هرتز

جدول ۱) مقادیر قدر مطلق اختلاف گرادیان جبهه‌جایی خارج از صفحه در فرکانس‌های تحریک مختلف

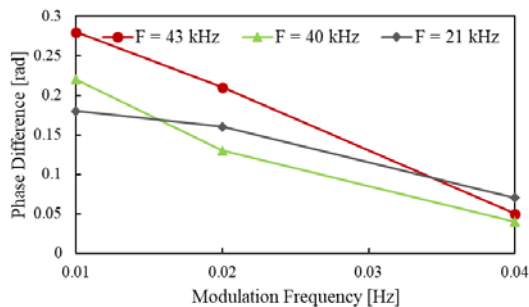
فرکانس [kHz]	اختلاف گرادیان جابه‌جایی ΔS [$\times 10^{-6}$]
۲۱	۰/۲۰۱
۴۰	۰/۴۳۸
۴۳	۰/۵۶۶



شکل ۶) نحوه محاسبه اختلاف گرادیان جابه‌جایی خارج از صفحه

در ادامه آزمون برش‌نگاری با تحریک نمونه به صورت مدوله شده انجام گرفت. در این نوع بارگذاری، دامنه ولتاژ عملگر پیزوالکتریک در محدوده ۷۰-۸۰ ولت تنظیم شده و فرکانس عملگر پیزوالکتریک (فرکانس حامل) در سه سطح ۲۱، ۴۰ و ۴۳ کیلوهرتز تغییر داده شد. مقدار فرکانس مدولاسیون (فرکانس سیگنال) نیز برابر با ۰/۰۱ هرتز تنظیم شد. در تحلیل نتایج برش‌نگاری مدوله شده، می‌توان از

صورت تابعی از فرکانس مدولاسیون نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در شرایط فرکانس تحریک پیزوالکتریک یکسان، مدولاسیون بارگذاری با پایین‌ترین فرکانس نتایج بهتری از تشخیص عیب را در پی دارد و می‌تواند به تشخیص آسان‌تر عیب منجر شود. از طرف دیگر، با توجه به این نکته که تصویر فاز نشان دهنده اختلاف فاز بین بارگذاری صورت گرفته و پاسخ نمونه و عیب به این بارگذاری است، فرکانس تحریک پیزوالکتریک، اثر معناداری بر تغییرات اختلاف فاز و قابلیت تشخیص عیب ندارد. در واقع تصویر فاز از طریق اختلاف زمانی بین پاسخ عیب و پاسخ کل نمونه به بارگذاری متناوب صورت گرفته، وجود عیب را آشکار می‌سازد. بنابراین، برای تشخیص عیب از این طریق کافی است شرایط بارگذاری در حدی باشد که عیب تحریک شود و پاسخ آن قابل ثبت شدن باشد. در این حالت، برخلاف تصویر دامنه، تغییر شرایط بارگذاری تاثیری بر افزایش قابلیت تشخیص عیب در تصویر فاز نخواهد داشت. به عبارت دیگر، این امر نشان دهنده استقلال روش مدوله کردن و تصویر فاز از شرایط بارگذاری است.

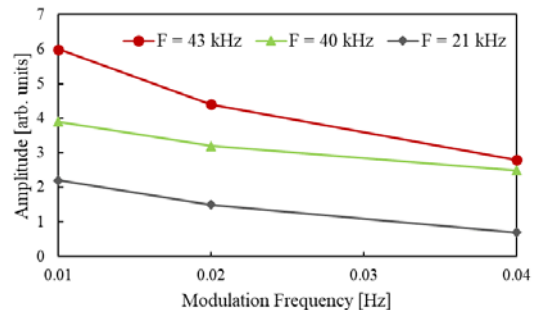


شکل ۹) تغییرات اختلاف فاز نسبت به فرکانس مدولاسیون

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تکنیک مدوله کردن دامنه به روش برش‌نگاری با بارگذاری فراصوتی اعمال شده و در بازرسی غیرمخرب عیب صفحه‌ای روی نمونه از جنس ماده مرکب پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه به کار گرفته شد. پارامترهای موثر بر تشخیص‌پذیری عیب شامل فرکانس

به منظور بررسی تاثیر فرکانس مدولاسیون بر تشخیص‌پذیری عیب در تصویر دامنه، عیب یابی با تغییر فرکانس مدولاسیون در سه سطح ۰/۰۱، ۰/۰۲ و ۰/۰۴ هرتز انجام شد. مقدار میانگین شدت تصویر در ناحیه عیب، به عنوان پارامتر موثر در تشخیص‌پذیری در تصویر دامنه در نظر گرفته شده و مقادیر آن در تمامی فرکانس‌های مدولاسیون اندازه‌گیری شد. شکل ۸ تغییرات مقدار دامنه را نسبت به مقادیر مختلف فرکانس‌های مدولاسیون را نمایش می‌دهد. با توجه به این شکل می‌توان دریافت که مستقل از فرکانس تحریک پیزوالکتریک، تشخیص عیب در پایین‌تر فرکانس مدولاسیون آسان‌تر است. دلیل این امر افزایش مدت زمان هر سیکل بارگذاری و افزایش شدت پاسخ عیب به تحریک صورت گرفته است [۲۳]. همچنین مشاهده می‌شود که در تمامی فرکانس‌های مدولاسیون، ناحیه عیب در فرکانس تحریک ۴۳ کیلوهرتز بیشترین شدت تصویر را دارد. این امر نشان می‌دهد که فرکانس ۴۳ کیلوهرتز نزدیک به فرکانس تشدید عیب بوده و بیشترین پاسخ حرارتی و جابه‌جایی موضعی در ناحیه عیب در این فرکانس اتفاق می‌افتد.



شکل ۸) تغییرات شدت تصویر دامنه در ناحیه عیب نسبت به فرکانس مدولاسیون

به منظور بررسی اثر فرکانس مدولاسیون بر شناسایی عیب در تصاویر فاز، مقدار اختلاف فاز بین ناحیه عیب و ناحیه سالم اطراف محاسبه شده و به عنوان پارامتر موثر بر تشخیص‌پذیری در نظر گرفته شد. لازم به ذکر است که به منظور کاهش نویز و خطا در اندازه‌گیری، مقدار فاز هر ناحیه به صورت میانگین مقدار فاز نقاط آن ناحیه تعیین شد. شکل ۹ تغییرات اختلاف فاز در فرکانس‌های تحریک مختلف را به

۷- منابع

- [1] W. Staszewski, S. Mahzan, R. Traynor, Health monitoring of aerospace composite structures—Active and passive approach, *Composites Science and Technology*, Vol. 69, No. 11-12, pp. 1678-1685, 2009.
- [2] K. Diamanti, C. Soutis, Structural health monitoring techniques for aircraft composite structures, *Progress in Aerospace Sciences*, Vol. 46, No. 8, pp. 342-352, 2010.
- [3] V. Giurgiutiu, Structural health monitoring of aerospace composites, Vol., No. pp., 2015.
- [4] R. Montanini, F. Freni, Non-destructive evaluation of thick glass fiber-reinforced composites by means of optically excited lock-in thermography, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 43, No. 11, pp. 2075-2082, 2012.
- [5] W. Nsengiyumva, S. Zhong, J. Lin, Q. Zhang, J. Zhong, Y. Huang, Advances, limitations and prospects of nondestructive testing and evaluation of thick composites and sandwich structures: A state-of-the-art review, *Composite Structures*, Vol. 256, No. pp. 112951, 2021.
- [6] 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, No. pp. 139-149, 2013.
- [7] Y. Hung, Shearography: a novel and practical approach for nondestructive inspection, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 8, No. 2, pp. 55-67, 1989.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] S. Sabbaghi Farshi, D. Akbari, Application of laser shearing interferometry in non-destructive inspection and size estimation of plane defects, *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, Vol. 9, No. 4, pp. 1-14, 2019.
- [11] Y. Hung, Applications of digital shearography for testing of composite structures, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 30, No. 7, pp. 765-773, 1999.
- [12] R. Mignogna, R. Green Jr, J. Duke Jr, E.G. Henneke II, K. Reifsnider, Thermographic investigation of high-power ultrasonic heating in materials, *Ultrasonics*, Vol. 19, No. 4, pp. 159-163, 1981.
- [13] Y. Hung, W. Luo, L. Lin, H. Shang, NDT of joined surfaces using digital time-integrated shearography
- تحریک پیزوالکتریک و فرکانس مدولاسیون بارگذاری مورد بررسی قرار گرفت و نتایج به دست آمده از تشخیص عیب با روش بارگذاری فراصوتی دامنه ثابت مقایسه شد. اهم نتایج به دست آمده در ادامه ارایه شده است:
- ۱- در انجام آزمون برش‌نگاری با روش بارگذاری فراصوتی دامنه ثابت، تشخیص عیب در فرکانس ۲۱ کیلوهرتز به دلیل وجود هاله‌های اضافی، به سختی انجام می‌گیرد. با این حال در فرکانس ۴۳ کیلوهرتز تشخیص آن آسان‌تر است.
 - ۲- در انجام آزمون برش‌نگاری با روش مدوله کردن دامنه، عیب در هر سه فرکانس تحریک و از طریق تصاویر فاز و دامنه به آسانی تشخیص داده شد.
 - ۳- در هر دو حالت بارگذاری ارتعاشی با دامنه ثابت و متغیر، عیب در فرکانس تحریک ۴۳ کیلوهرتز با بیش‌ترین وضوح تشخیص داده شد. همچنین با استفاده از بارگذاری مدوله شده و آنالیز فوریه، امکان تشخیص آسان‌تر عیب در فرکانس ۲۱ کیلوهرتز نسبت به تحریک ارتعاشی با دامنه ثابت فراهم شد.
 - ۴- نتایج حاصل از بررسی اثر فرکانس مدولاسیون بر تشخیص‌پذیری عیب در تصویر دامنه نشان داد مستقل از فرکانس تحریک پیزوالکتریک، عیب در پایین‌ترین فرکانس مدولاسیون بیشترین قابلیت تشخیص را دارد.
 - ۵- با بررسی اثر فرکانس مدولاسیون بر تشخیص‌پذیری عیب در تصویر فاز مشاهده شد در شرایط فرکانس تحریک پیزوالکتریک یکسان، مدولاسیون بارگذاری با پایین‌ترین فرکانس نتایج بهتری از تشخیص عیب را در پی دارد.
 - ۶- فرکانس تحریک پیزوالکتریک، اثر معناداری بر تغییرات اختلاف فاز و قابلیت تشخیص عیب در تصاویر فاز ندارد که می‌توان آن را نشان دهنده استقلال تصویر فاز از شرایط بارگذاری دانست.
- ۶- تعارض منافع
هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان وجود ندارد.

- Engineering*, Vol. 9, No. 1, pp. 1-9, 2022.
- [26] D. Francis, R. Tatam, R. Groves, Shearography technology and applications: a review, *Measurement science and technology*, Vol. 21, No. 10, pp. 102001, 2010.
- [27] 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.
- [28] A. Dillenz, T. Zweschper, G. Busse, Burst phase-angle thermography with elastic waves, in: *Thermosense XXIV*, SPIE, 2002, pp. 572-577.
- [29] 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.
- [30] D. Wu, G. Busse, Lock-in thermography for nondestructive evaluation of materials, *Revue générale de thermique*, Vol. 37, No. 8, pp. 693-703, 1998.
- with multiple-frequency sweep, *Optics and lasers in engineering*, Vol. 33, No. 5, pp. 369-382, 2000.
- [14] D. Findeis, J. Gryzagoridis, Digital shearography and vibration excitation for NDT of aircraft components, in: *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics, 2014, pp. 33-38.
- [15] H. Liu, S. Guo, Y.F. Chen, C.Y. Tan, L. Zhang, Acoustic shearography for crack detection in metallic plates, *Smart Materials and Structures*, Vol. 27, No. 8, pp. 085018, 2018.
- [16] H. Liu, M. Liu, L. Zhang, Y.F. Chen, C.Y. Tan, S. Guo, F. Cui, Directed acoustic shearography for crack detection around fastener holes in aluminum plates, *NDT & E International*, Vol. 100, No. pp. 124-131, 2018.
- [17] H. Asemani, N. Soltani, Comparison of Stroboscopic Shearography and Time-Average Shearography Methods for Nondestructive Testing, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp. 1089-1098, 2020.
- [18] H. Gerhard, G. Busse, Lockin-ESPI interferometric imaging for remote non-destructive testing, *NDT & E International*, Vol. 39, No. 8, pp. 627-635, 2006.
- [19] 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.
- [20] H. Gerhard, G. Busse, Thermal Waves for Imaging of Defects with Lockin-Speckle Interferometry, *Strain*, Vol. 43, No. 3, pp. 229-234, 2007.
- [21] 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.
- [22] T. Zweschper, A. Dillenz, G. Riegert, D. Scherling, G. Busse, Ultrasound excited thermography using frequency modulated elastic waves, *Insight-Non-Destructive Testing and Condition Monitoring*, Vol. 45, No. 3, pp. 178-182, 2003.
- [23] J.-C. Krapez, F. Taillade, D. Balageas, Ultrasound-lockin-thermography NDE of composite plates with low power actuators. Experimental investigation of the influence of the Lamb wave frequency, *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, Vol. 2, No. 2, pp. 191-206, 2005.
- [24] A. Dillenz, G. Busse, D. Wu, Ultrasound lock-in thermography: feasibilities and limitations, in: *Diagnostic Imaging Technologies and Industrial Applications*, SPIE, 1999, pp. 10-15.
- [25] S. Sabbaghi Farshi, D. Akbari, Application of lock-in shearography in non-destructive testing of planar defects, *Iranian Journal of Manufacturing*