



Comparison of Stroboscopic Shearography and Time-Average Shearography Methods for Nondestructive Testing

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Asemani H.^{*1} MSc,
Soltani N.¹ PhD

How to cite this article

Asemani H, Soltani N. Comparison of Stroboscopic Shearography and Time-Average Shearography Methods for Nondestructive Testing. Modares Mechanical Engineering, 2020;20(4):1089-1098.

ABSTRACT

Shearography is a powerful optics method, which is capable of measuring derivatives of displacement, surface strains, and nondestructive testing. Time-average shearography and stroboscopic shearography have been developed for full-field vibration analysis. In this paper, the capability of time-average shearography and stroboscopic shearography for nondestructive testing has been compared using a proposed shearography configuration. In order to generate vibration, the proposed experimental system was equipped with a piezoelectric excitation mechanism. The time-average and stroboscopic shearography inspections were carried out by sweeping the excitation frequency of the piezoelectric. Stroboscopic shearography successfully detected the defect in the frequency ranges of 1300-1600, 6000-8000 Hz and 12600-13300 Hz, while time-average shearography detected the defect only in the frequency ranges of 6000-8000 Hz, and 12900-13100 Hz. The results of inspections of propylene specimen with a 10 mm circular hole indicated that stroboscopic shearography provides a more reliable assessment than time-average shearography. Compared to time-average shearography, stroboscopic shearography gives more clear fringes in the all frequency range. In addition, stroboscopic shearography could recognize the defect in wider frequency ranges.

Keywords Nondestructive Testing; Stroboscopic Shearography; Time-Average Shearography; Piezoelectric Excitation System

CITATION LINKS

[1] Application of digital shearography for nondestructive testing of materials with thermal loading [2] Analysis of laser interferometry parameters in the evaluation of defects in the polymer matrix composites [3] Development of PZT-excited stroboscopic shearography for full-field nondestructive evaluation [4] Vibration analysis by means of digital shearography [5] Depth assessment of defects in composite plates combining shearography and vibration excitation [6] non-destructive testing of large area aluminum plate using stroboscopic shearography [7] Acoustic shearography for crack detection in metallic plates [8] Directed acoustic shearography for crack detection around fastener holes in aluminum plates [9] Speckle-shearing interferometric camera: A tool for measurement of derivatives of surface-displacement [10] Vibration analysis by digital shearography [11] Time-averaged phase-stepped ESPI with CO2 laser and shearography in the visible for identification of vibration mode shapes [12] Time-average shearography in vibration analysis [13] Flaw detection in composites using time-average shearography [14] Vibration analysis and non-destructive testing with real-time shearography [15] Electronic shearography applied to static and vibrating objects [16] Digital shearography and vibration excitation for NDT of aircraft components [17] Additive-subtractive phase-modulated shearography with synchronized acoustic stressing [18] The effectiveness of laser shearography for the inspection of wall thinning in a large aluminum plate [19] Application of electronic speckle pattern shearing interferometry with high-speed camera in vibration analysis of piezoelectric transducer [20] Stroboscopic digital speckle pattern interferometry for vibration analysis of microsystem [21] Stroboscopic digital shearographic system for vibration analysis of large-area object [22] Defect detection using stroboscopic shearography [23] The applications of shearography method for nondestructive testing and vibration analysis [24] Stress-strain time-dependent behavior of A356.0 aluminum alloy subjected to cyclic thermal and mechanical loadings [25] Inspection of defects of composite materials in inner cylindrical surfaces using endoscopic shearography [26] An automated shearography system for cylindrical surface inspection

¹School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

*Correspondence

Address: School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
Phone: -
Fax: -
h.asemani@ut.ac.ir

Article History

Received: July 4, 2019
Accepted: October 9, 2019
ePublished: April 17, 2020

مقایسه روش‌های برشنگاری استروبوسکوپیک و برشنگاری زمان میانگین در ارزیابی غیر مخرب

حمیدرضا آسمانی^{*} MSc

دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

ناصر سلطانی PhD

دانشکده مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده

روش برشنگاری روش نوری قدرتمندی است که قابلیت محاسبه مشتقات جابجایی، کرنش‌های سطحی و بازرسی غیر مخرب را در انواع مواد داراست. روش‌های برشنگاری زمان میانگین و برشنگاری استروبوسکوپیک از روش‌های آزمایشگاهی هستند که به منظور مطالعه تمام‌میدانی مودهای ارتعاشی توسعه داده شده‌اند. در این مقاله با توسعه چیدمان برشنگاری با امکان بازرسی غیر مخرب به روش‌های برشنگاری زمان میانگین و برشنگاری استروبوسکوپیک به مقایسه قابلیت‌های این روش‌ها در تشخیص عیوب پرداخته شده است. به منظور اعمال بارگذاری ارتعاشی، چیدمان ارائه شده به سیستم تحریک پیزوالکتریک مجهز شده است. بازرسی غیر مخرب به روش‌های برشنگاری زمان میانگین و برشنگاری استروبوسکوپیک با تغییر فرکانس تحریک پیزوالکتریک انجام شد. روش برشنگاری استروبوسکوپیک در بازه‌های فرکانسی بین ۱۳۰۰ تا ۱۶۰۰ هرتز، ۶۰۰۰ تا ۸۰۰۰ هرتز و ۱۲۶۰۰ تا ۱۳۳۰۰ هرتز عیب را با موفقیت آشکارسازی نمود، در حالی که برشنگاری زمان میانگین فقط در بازه‌های ۶۰۰۰ تا ۸۰۰۰ هرتز و ۱۲۹۰۰ تا ۱۳۱۰۰ هرتز توانایی تشخیص عیب را داشت. بررسی و مقایسه نتایج روی قطعه پروپلینی با عیبی با قطر ۱۰ میلی‌متر توانمندی و قابلیت روش برشنگاری استروبوسکوپیک را نسبت به برشنگاری زمان میانگین در بازرسی غیر مخرب نشان می‌دهد. وضوح هاله‌های روش برشنگاری استروبوسکوپیک در تمامی فرکانس‌های تحریک بالاتر از روش زمان میانگین است و روش استروبوسکوپیک قابلیت تشخیص عیب در بازه‌های فرکانسی بسیار گسترده‌تری را داراست که باعث می‌شود ریسک عدم تشخیص عیب در کاربردهای صنعتی بسیار کاهش یابد.

کلیدواژه‌ها: بازرسی غیر مخرب، برشنگاری استروبوسکوپیک، برشنگاری زمان میانگین، سیستم تحریک پیزوالکتریک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۴/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۷/۱۴

*نویسنده مسئول: h.asemani@ut.ac.ir

مقدمه

با گسترش تکنولوژی و رقابتی شدن بازار محصولات ارابه شده توسط کارخانجات صنعتی، تولید محصولات دارای عمر محدود، به علت قیمت مقرون به صرفه آنها افزایش یافته است. در این شرایط نیاز اساسی به داشتن درک صحیح در مورد کیفیت قطعات، عوامل موثر بر کیفیت و نیز اطمینان کافی از یکپارچگی سازه‌های تولیدی وجود دارد. انجام بازرسی از محصولات در مراحل مختلف تولید، پس از تولید و در حین سرویس دهی، امری است که توجه بسیاری از مراکز تحقیقاتی و صنعتی را به خود معطوف کرده

است. گسترش کاربرد مواد مرکب در صنایع حساسی همچون صنایع نظامی، هوافضا، صنایع نیروگاهی و غیره، نیاز به روش قدرتمند، سریع و دقیق برای بازرسی این مواد را تشدید می‌کند.

در میان تکنیک‌های آزمایشگاهی که برای مطالعه و تحلیل خواص مکانیکی و همچنین آگاهی از کیفیت مواد به کار می‌روند، روش‌های نوری غیر مخرب گروه عمده‌ای را تشکیل می‌دهند و نقش بسیار مهمی در کاربردهای صنعتی دارند. هولوگرافی (تمام‌نگاری)، برشنگاری، سایه‌نگاری، کشسان‌نگاری و موری از جمله روش‌های نوری مورد استفاده برای بررسی غیر مخرب مواد و محاسبه جابجایی‌های سطحی هستند. امکان انجام آزمایش و اندازه‌گیری بدون نیاز به تماس با جسم، سرعت بالا و هزینه‌های پایین از مزایای استفاده از روش‌های نوری نسبت به بسیاری از روش‌های دیگر است [1].

برشنگاری روشی نوری غیر مخرب برای اندازه‌گیری مستقیم مشتقات جابجایی یا کرنش‌های سطحی است. این روش با داشتن قابلیت‌های فراوان نظیر قابلیت اندازه‌گیری کرنش‌های بسیار کوچک، ایجاد امکان استفاده از طول هم‌دوسی کوتاه لیزر و همچنین عدم حساسیت زیاد به شرایط محیطی و لرزش، برای بازرسی قطعات مختلف بسیار مناسب به نظر می‌رسد [2]. از جمله قابلیت‌های منحصر به فرد روش برشنگاری امکان استفاده از این روش برای بازرسی و تحلیل مکانیکی انواع مواد مانند مواد کامپوزیتی و پلیمری است که به علت ساختار غیر فلزی و پیچیده آنها، نمی‌توان از دیگر روش‌های معمول برای بازرسی آنها استفاده نمود [3].

بارگذاری ارتعاشی مخصوصاً برای مواردی که نیاز به انجام آزمون غیر مخرب در موقعیت کارکرد قطعه است یک بارگذاری مناسب و تکرار پذیر برای تحریک قطعه می‌باشد. بارگذاری ارتعاشی عیوب را تحریک نموده آنها را وادار می‌کند با دامنه نوسان خاصی ارتعاش کنند. دامنه ارتعاش عیوب تحریک شده با دامنه ارتعاش قطعه متفاوت است. اگر فرکانس ارتعاشات اعمالی نزدیک به فرکانس تحریک عیوب باشد این پدیده تشدید می‌شود. حساسیت بالای روش برشنگاری به گرادیان جابجایی موجود در سطح جسم، قابلیت تشخیص اختلاف دامنه ارتعاشات ناشی از وجود عیوب را در این روش ایجاد می‌کند [4-6]. بارگذاری اکوستیک نیز از دیگر روش‌های بارگذاری متناوب است که موجب تحریک عیوب می‌شود. تشخیص اثر بارگذاری اکوستیک بر عیوب با استفاده از روش برشنگاری مورد توجه بسیاری از محققین بوده است [7, 8].

با توجه به مطالب بیان شده و قابلیت‌های روش برشنگاری به وفور از این روش به منظور مطالعه مودهای ارتعاشی و عیب‌یابی حین بارگذاری ارتعاشی استفاده شده است. روش برشنگاری زمان میانگین در سال ۱۹۷۴ توسط هانگ و همکارانش به منظور مطالعه ارتعاشات جسم تحت بارگذاری سینوسی حالت پایدار توسعه داده شد [9]. سال‌ها بعد روش برشنگاری زمان میانگین به منظور بازرسی غیر مخرب نیز مورد استفاده قرار گرفت [10, 11].

بارگذاری استاتیکی یا دینامیکی دارا است [20].
ژو و همکاران در تحقیقی در سال ۲۰۱۴ سیستم برشنگاری استروبوسکوپیک را توسعه دادند که برای آنالیز ارتعاشات اجسام با سطح بزرگ (Large-area) مناسب است. آنها در این تحقیق با استفاده از چیدمان اپتیکی خاصی در تداخلگر مایکلسون موفق شدند بر محدودیت زاویه دید در ساختار برشنگاری غلبه نمایند. سیستم ارایه شده توسط آنها محدوده سطح قابل مطالعه در آنالیز ارتعاشات را از سطح ۵۰ میلیمتر در ۵۰ میلیمتر در تحقیقات قبل به سطحی بزرگتر از یک متر در یک متر افزایش می‌دهد. در این تحقیق از هر دو روش برشنگاری زمان میانگین و برشنگاری استروبوسکوپیک برای محاسبه موده‌های ارتعاشی استفاده شده است [21].

مطالعه ادبیات موضوعی نشان می‌دهد که تحقیقات انجام شده در زمینه برشنگاری زمان میانگین و برشنگاری استروبوسکوپیک بیشتر معطوف به مطالعه موده‌های ارتعاشی بوده است. در سال‌های اخیر گروه ما روش عیب‌یابی بر پایه برشنگاری استروبوسکوپیک را ارایه داده است که با به کارگیری تابش پالسی بسیاری از محدودیت‌های عیب‌یابی به روش برشنگاری زمان میانگین را مرتفع ساخته است [3, 6, 18, 22, 23].

در تحقیق حاضر به مقایسه نتایج عیب‌یابی با استفاده از روش‌های برشنگاری زمان میانگین و برشنگاری استروبوسکوپیک پرداخته شده است. برای این منظور قطعه پلیمری مستطیلی شکلی شامل عیب مصنوعی ساخته شده و با استفاده از روش‌های برشنگاری زمان میانگین و استروبوسکوپیک تحت بازرسی قرار گرفته است. در این تحقیق برای تحریک قطعه و ایجاد بارگذاری ارتعاشی از یک محرک پیزوالکتریک نازک استفاده شده است. عملیات بازرسی غیر مخرب با استفاده از روش‌های برشنگاری زمان میانگین و برشنگاری استروبوسکوپیک تحت فرکانس‌های تحریک مختلف انجام گرفته است. سپس نتایج الگوی هاله‌ای بدست آمده مورد مطالعه قرار گرفته و محدوده‌هایی که عیب در نتایج برشنگاری قابل تشخیص است مشخص شده است. در نهایت نتایج و محدوده‌های قابل تشخیص بدست آمده از روش برشنگاری زمان میانگین و برشنگاری استروبوسکوپیک با هم مقایسه شده‌اند.

مواد و روش‌ها

برشنگاری زمان میانگین

به‌طور معمول از روش برشنگاری زمان میانگین به عنوان ابزار بازرسی غیر مخرب قطعات با بارگذاری ارتعاشی استفاده می‌شود. بارگذاری ارتعاشی عیوب را تحریک نموده آنها را وادار می‌کند با دامنه نوسان خاصی ارتعاش کنند. روش برشنگاری زمان میانگین قادر است تفاوت در دامنه ارتعاشات ناشی از وجود عیب را با هاله‌های برشنگاری آشکارسازی نماید.

شکل ۱ چیدمان معمول روش برشنگاری زمان میانگین را نشان

توه و همکاران از روش برشنگاری زمان میانگین برای تحلیل موده‌های ارتعاشات استفاده نمودند. آنها نشان دادند نتایج برشنگاری زمان میانگین توزیع دامنه‌های نوسانات را نمایان می‌سازد. هاله‌های روشن موقعیت ارتعاش با بیشترین دامنه را برای تیر در حال ارتعاش نشان می‌دهند. این موضوع دقیقا بر خلاف نتایج روش تمام‌نگاری است که هاله‌های روشن موقعیت نقاط با جابجایی صفر (گره‌ها) را نمایش می‌دهند [12].

توه و همکاران در تحقیقی دیگر به عیب‌یابی کامپوزیت‌های پلاستیکی با الیاف شیشه با استفاده از روش برشنگاری زمان میانگین پرداختند. در تحقیق آنها تورق و عدم چسبندگی بین لایه‌های کامپوزیتی با موفقیت تشخیص داده شدند. بر اساس تحقیق آنها برای تشخیص راحت‌تر عیوب، قطعه مورد مطالعه می‌بایست در فرکانس‌های تشدید عیوب تحریک شود. همچنین برای تشخیص عیوب کوچکتر نیاز به فرکانس‌های تحریک بالاتر است [13].

سیم و همکاران طی تحقیقی نشان دادند که برشنگاری زمان میانگین روشی مناسب برای بازرسی غیر مخرب و همچنین تعیین موده‌های ارتعاشی است [14]. موهان و همکاران توانستند برشنگاری زمان واقعی را برای اجسام استاتیکی و در حال ارتعاش به کار برند. کامپیوتر میزبان مورد استفاده آنها به طور آبی جمع آثار تصاویر برشنگاری را محاسبه و هاله‌های برشنگاری را بر روی نمایشگر نمایان می‌ساخت [15].

فیندیس و همکارش با استفاده از روش برشنگاری زمان میانگین به بازرسی غیر مخرب قطعات کامپوزیتی پره بالگرد تحت بارگذاری متناوب پرداختند. آنها توانستند تعداد ۹ عیب مصنوعی ایجاد شده در پره روتور را با موفقیت آشکارسازی کنند. با این وجود در این تحقیق عیوب مصنوعی در پانل کامپوزیتی مستطیلی شکل با استفاده از روش برشنگاری زمان میانگین با موفقیت آشکارسازی نشد [16].

روش برشنگاری استروبوسکوپیک (Stroboscopic) برای اولین بار در سال ۱۹۹۳ توسط چاترز و همکاران به منظور بررسی موده‌های ارتعاشی اجسام حین ارتعاش توسعه داده شد [17]. برشنگاری استروبوسکوپیک در دیگر تحقیقات نیز همواره به‌عنوان ابزاری برای آنالیز کمی ارتعاشات مطرح بوده است [18, 19].

یانگ و همکاران از دو روش برشنگاری زمان میانگین و برشنگاری استروبوسکوپیک برای تحلیل ارتعاشات استفاده نمودند. در این تحقیق که از بنیادی‌ترین و کامل‌ترین تحقیقات در زمینه برشنگاری همراه با بارگذاری ارتعاشی است روش برشنگاری زمان میانگین برای تحلیل کیفی موده‌های ارتعاشی استفاده شده است [4].

یانگ و همکاران در تحقیقی دیگر در سال ۲۰۰۹ با استفاده از روش برشنگاری استروبوسکوپیک به اندازه‌گیری و آنالیز ارتعاشات میکرو سیستم‌ها پرداختند. سیستم برشنگاری ارایه شده در این تحقیق قابلیت اندازه‌گیری جابجایی داخل صفحه و خارج از صفحه را در

دوربین تحریک شود و نوسان کند، تصویر ثبت شده در این حالت از میانگین شدت روشنایی در طی تعداد زیادی از نوسانات جسم تشکیل می‌شود. میزان شدت روشنایی ثبت شده در این فریم برابر است با انتگرال توزیع روشنایی $I(x, y)$ در مدت زمان تصویربرداری فریم. این معادله در واقع برگرفته از اصل برهم نهی زمان میانگین است و به صورت زیر قابل بیان می‌باشد.

$$I_{ave}(x, y) = \frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} 2I_0 \{1 + \mu \cos[\phi(x, y + \Delta(x, y, t))]\} dt \quad ۳$$

در معادله ۳ T_f بازه زمانی تصویربرداری را بیان می‌کند. با استفاده از زاویه‌های تابش و دید برابر و نزدیک به عمود، تغییر فاز نسبی فقط از $\Delta(x, y, t)$ فقط از جابجایی‌های خارج از صفحه تاثیر می‌گیرد. برای ارتعاشات حالت پایدار با تحریک سینوسی جابجایی خارج از صفحه هر نقطه از قطعه را می‌توان با معادله ۴ بیان نمود.

$$w(x, y, t) = A(x, y) \sin(\omega t) \quad ۴$$

که در آن $A(x, y)$ نمایانگر دامنه ارتعاشات هر نقطه از جسم و ω نشان دهنده فرکانس ارتعاشات است. از طرفی مطابق مطالب بیان شده در مرجع [۴] برای تغییر فاز نسبی داریم:

$$\Delta(x, y, t) = \frac{4\pi}{\lambda} \delta x \left(\frac{\partial A(x, y)}{\partial x} \right) \sin(\omega t) \quad ۵$$

حال با قرار دادن $\Delta(x, y, t)$ بدست آمده از معادله ۵ در معادله انتگرالی ۳ این معادله را می‌توان به صورت زیر بازنویسی نمود.

$$I_{ave}(x, y) = 2I_0 + 2I_0 \mu \frac{1}{T_f} \int_0^{T_f} \cos[\phi(x, y) + \left(\delta x \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial A(x, y)}{\partial x} \right) \sin(\omega t)] dt = 2I_0 + 2I_0 \mu \cos\phi(x, y) J_0 \left(\delta x \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial A(x, y)}{\partial x} \right) \quad ۶$$

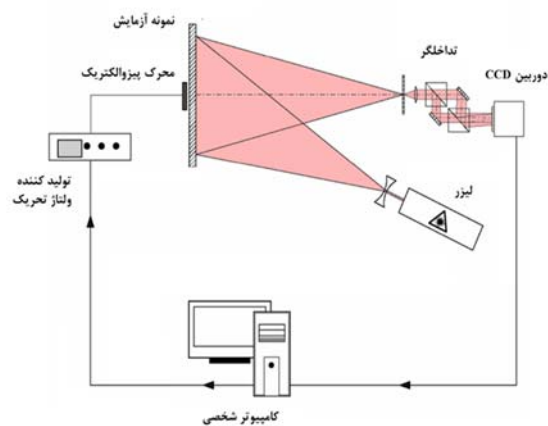
در این معادله J_0 تابع بسل مرتبه صفر از نوع اول است. از لحاظ تئوری معادله ۶ نمایانگر یک الگوی هاله‌ای است. اگرچه به دلیل وجود ترم ثابت $2I_0$ وضوح هاله‌های برهم نهی زمان میانگین بسیار کم است و هاله‌های به ندرت قابل تشخیص می‌باشند. برای حذف ترم ثابت تفاضل فریم میانگین و فریم مرجع که در حالت استاتیکی جسم گرفته شده محاسبه می‌شود.

$$I_s(x, y) = I_r(x, y) - I_{ave}(x, y) = 2I_0 \mu \cos\phi(x, y) \left[1 - J_0 \left(\delta x \frac{4\pi}{\lambda} \frac{\partial A(x, y)}{\partial x} \right) \right] \quad ۷$$

که در این معادله $I_s(x, y)$ شدت روشنایی تصویر نهایی است. همان طور که در معادله ۷ مشخص است ترم ثابت از معادله ۶ حذف شده است. بنابراین با محاسبه تفاضل شدت روشنایی دو تصویر فریم میانگین و فریم مرجع الگوی هاله‌ای قابل رویت تشکیل خواهد شد.

با استفاده از روش برشنگاری زمان میانگین به راحتی می‌توان فرکانس‌های تشدید اجسام مورد مطالعه را محاسبه نمود. الگوی هاله‌ای برشنگاری زمان میانگین مشتقات دامنه ارتعاشات را در هر نقطه از سطح جسم نمایش می‌دهند. روشن‌ترین هاله‌های برشنگاری زمان میانگین زمانی تشکیل می‌شوند که Ω برابر صفر است. در این حالت مشتقات دامنه نوسانات برابر صفر می‌شود.

می‌دهد. این چیدمان در واقع شبیه چیدمان حساس به جابجایی خارج از صفحه است با این تفاوت که تجهیزات اعمال بارگذاری ارتعاشاتی سینوسی حالت پایدار به آن افزوده شده است. معادلات حاکم بر روش برشنگاری زمان میانگین بر پایه عملکرد تصویربرداری دوربین‌ها بنا نهاده شده است. تصویر ثبت شده در حسگر دوربین‌ها در واقع میانگین توزیع روشنایی است از زمانی که دریاچه تصویربرداری دوربین باز می‌شود تا زمانی که دریاچه بسته می‌شود. اگر جسم در حالت استاتیکی باشد میانگین توزیع روشنایی تقریباً با توزیع روشنایی لحظه‌ای برابر است. اما زمانی که جسم در حالت حرکت است تمام اطلاعات توزیع روشنایی جسم حین حرکت در مدت زمانی که دریاچه تصویربرداری باز است در سنسور دوربین ثبت می‌شود.



شکل ۱) چیدمان معمول برشنگاری زمان میانگین

برای اندازه‌گیری ارتعاشات و بازرسی غیر مخرب با استفاده از روش برشنگاری زمان میانگین ابتدا باید توزیع شدت روشنایی مربوط به حالت ساکن جسم مورد مطالعه در یک فریم دوربین تصویربرداری ثبت شود. توزیع شدت روشنایی این فریم ثبت شده که فریم مرجع نامیده می‌شود با استفاده از معادله ۱ قابل بیان است.

$$I_r(x, y) = 2I_0 \{1 + \mu \cos[\phi(x, y)]\} \quad ۱$$

که در آن $I_r(x, y)$ توزیع شدت روشنایی فریم مرجع، I_0 میانگین شدت روشنایی دو تصویر برش یافته، μ مدول الگوی لکه‌ای تداخلی و $\phi(x, y)$ اختلاف فاز تصادفی بین دو تصویر برش یافته هستند. وقتی که جسم مورد مطالعه با بارگذاری ارتعاشاتی تحریک می‌شود، توزیع شدت روشنایی الگوی لکه‌ای به مقدار اندکی تغییر می‌کند و با استفاده از معادله زیر تعیین می‌شود.

$$I(x, y) = 2I_0 \{1 + \mu \cos[\phi(x, y) + \Delta(x, y, t)]\} \quad ۲$$

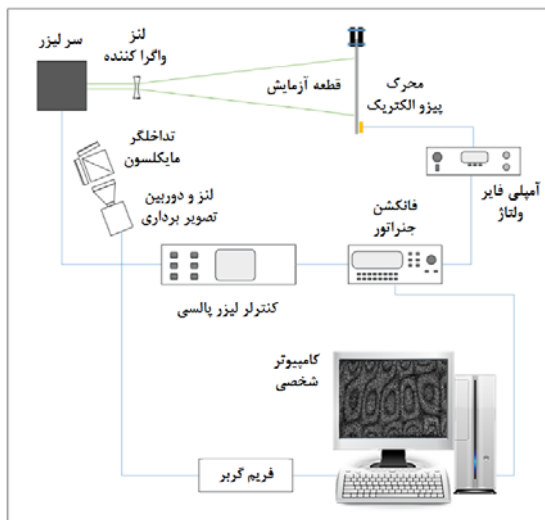
در این معادله $\Delta(x, y, t)$ تغییر فاز نسبی به وجود آمده به دلیل ارتعاش جسم مورد مطالعه را نشان می‌دهد. اگر جسم با ارتعاشات حالت پایدار با فرکانس بسیار بالاتر از نرخ تصویربرداری

جابجایی دامنه ارتعاشات بین این دو وضعیت از سطح جسم به راحتی قابل محاسبه خواهد بود.

در حرکت نوسانی متناوب حالت قرارگیری هر ذره از جسم تابعی از زمان و موقعیت آن ذره در جسم است. روش برشنگاری استروبوکوپیک توانایی فریز کردن جابجایی‌های متناوب را دارا است و بدین ترتیب تأثیر زمان را در حالت قرارگیری هر ذره حذف می‌کند. در واقع برشنگاری استروبوکوپیک یک رویکرد استاتیکی برای مطالعه پدیده‌های نوسانی متناوب را ارائه می‌دهد.

چیدمان برشنگاری ارایه شده با تحریک پیزوالکتریک برای بازرسی غیر مخرب میدانی

چیدمان ترکیبی سیستم برشنگاری با تحریک پیزوالکتریک استفاده شده در این تحقیق که قابلیت انجام بازرسی غیر مخرب به روش برشنگاری زمان میانگین و همچنین برشنگاری استروبوکوپیک را داراست در شکل ۳ نمایش داده شده است. نوسانات سینوسی حالت پایدار با استفاده از یک سیستم تحریک پیزوالکتریک به جسم اعمال شد. از مزایای سیستم تحریک پیزوالکتریک عبارتند از: قابلیت کنترل فرکانس تحریک، پاسخ فرکانسی سریع، اعمال نیروی محرک قدرتمند، نسبت وزن به حجم کم و عدم انبساط حرارتی در حین کارکرد [3].



شکل ۳) چیدمان استفاده شده در تحقیق حاضر با قابلیت بازرسی غیر مخرب به روش‌های برشنگاری زمان میانگین و برشنگاری استروبوکوپیک

در این چیدمان از یک لیزر Q-switched Nd-YAG با طول موج ۵۳۲ نانومتر و نور سبز و یک لنز واگرا کننده برای روشن کردن سطح نمونه استفاده شده است. توان لیزر ۱/۵ وات و پهنای پالس پرتو لیزر ۱۰ نانو ثانیه می‌باشند. این لیزر قابلیت ارسال پرتو نوری در حالت پیوسته و پالسی را داراست. بنابراین برای استفاده در بازرسی غیر مخرب به روش‌های برشنگاری زمان میانگین و برشنگاری استروبوکوپیک مناسب است. برای اعمال بارگذاری نوسانی از یک عملگر پیزوالکتریک استفاده

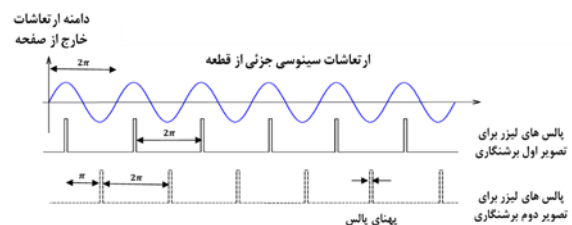
بنابراین روشن‌ترین هاله‌ها موقعیت ماکزیمم دامنه را نمایش می‌دهند [4].

برشنگاری استروبوکوپیک

برشنگاری استروبوکوپیک در واقع ترکیب روش برشنگاری به همراه تابش استروبوکوپیک یا تابش پالسی است. این روش قابلیت استفاده برای مطالعه پدیده‌های متناوب را دارا است. از اجزا حیاتی این روش لیزر با توانایی تابش پرتو پالسی است. برای روشن‌سازی پروسه تولید الگوی هاله‌ای به روش برشنگاری استروبوکوپیک، نوسانات سینوسی یک جزء کوچک از قطعه مورد مطالعه را مشابه شکل ۲ در نظر بگیرید. مطابق شکل تحریک ارتعاشی پیزو الکتریک و تابش پالسی لیزر با هم همگام‌سازی شده‌اند. برای فریم اول برشنگاری پالس‌های لیزر سطح قطعه را فقط در لحظه‌هایی که ذره مورد نظر در ماکزیمم دامنه نوسان خود است روشن می‌کنند و در مابقی دوره نوسانی جزء مورد نظر، سطح جسم تاریک می‌ماند [3].

نرخ تصویربرداری دوربین بسیار پایین تر از نوسانات جسم است. در این شرایط تصویر ثبت شده میانگینی از شدت روشنایی سطح قطعه در طول مدت تصویربرداری خواهد بود. در این مدت جسم بارها و بارها نوسان کرده است ولی سطح قطعه فقط در زمان‌هایی که ذره مورد نظر در ماکزیمم دامنه نوسان خود است روشن شده است. این پدیده باعث می‌شود که تصویر ثبت شده دوربین فقط سطح قطعه در ماکزیمم دامنه نوسان نشان دهد. به عبارت دیگر این روش حرکت سطح جسم را در زمان خاصی فریز می‌نماید. بدین ترتیب تصویر اول برشنگاری از سطح جسم گرفته می‌شود. با اعمال اختلاف فاز معین بین پرتوهای پالسی لیزر و نوسانات جسم می‌توان حالت‌های مختلف از نوسان جسم را فریز و از آنها تصویربرداری نمود.

برای گرفتن تصویر دوم باید بین سیگنال تحریک ارتعاشات و پالس‌های لیزر اختلاف فاز ۱۸۰ درجه یا π رادیان اعمال شود. در این حالت سطح قطعه زمانی روشن می‌شود که ذره مورد نظر در مینیمم دامنه نوسان خود است. بنابراین دامنه نوسان مینیمم دامنه نوسان از جسم توسط تابش پالسی ثابت می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲) شماتیک از نحوه همگام‌سازی تابش استروبوکوپیک و جابجایی نوسانی (سینوسی) خارج از صفحه یک جزء از سطح قطعه مورد مطالعه

با انجام این فرآیند دو تصویر لازم برشنگاری از دو وضعیت متفاوت برای جسم در حین نوسان مهیا می‌شود و مشتقات

منطقه مورد مطالعه با استفاده از نور لیزر کاملاً روشن و توسط دوربین CCD تصویربرداری شد. این منطقه دارای سطح ۱۲۰ میلیمتر در ۴۰ میلیمتر بود که در شکل ۴ نشان داده شده است. اجزای چیدمان برشنگاری طوری قرار گرفتند که با تقریب خوبی چیدمان حساس به جابجایی‌ها خارج از صفحه باشد.

بازرسی غیر مخرب با تغییر فرکانس تحریک عملگر پیزوالکتریک انجام گرفته شد. فرکانس‌های تحریک ابتدا با گام ۱۰۰۰ هرتز تغییر داده شدند. بعد از پیدا کردن فرکانس‌های تشدید برای تعیین بازه‌های آن، گام تغییر فرکانس در نزدیکی فرکانس تشدید عیب با ۱۰۰ هرتز تغییر داده شد.

در ابتدا به انجام بازرسی غیر مخرب با استفاده از روش برشنگاری زمان میانگین پرداخته شد. برای این منظور تصویر اول برشنگاری در حالت استاتیک و بدون اعمال ارتعاشات در قطعه گرفته شد. سپس با اعمال ولتاژ تحریک به محرک پیزوالکتریک و اعمال ارتعاشات حالت پایدار به قطعه، تصاویر دوم برشنگاری گرفته شد. در مرحله بعد آزمون‌های برشنگاری استروبوکوپیک انجام شد. تصویر اول برشنگاری با همگام‌سازی سیگنال تحریک سینوسی و سیگنال راه انداز فانکشن جنراتور، حین ارتعاشات حالت پایدار نمونه گرفته شد. برای ایجاد اختلاف فاز ۱۸۰ درجه ای بین پالس‌های لیزر و فرکانس تحریک می‌بایست این اختلاف فاز بین سیگنال تحریک سینوسی و سیگنال راه انداز (TTL) اعمال شود. این وظیفه با معکوس کردن فرکانس تحریک در فانکشن جنراتور انجام می‌شود. اعمال اختلاف فاز ۱۸۰ درجه ای بین سیگنال تحریک سینوسی و سیگنال راه انداز فانکشن جنراتور باعث می‌شود که موقعیت‌هایی از نمونه که در حین نوسان روشن می‌شدند از یک قله به قله دیگر و از ماکزیمم به مینیمم و برعکس انتقال یابند (شکل ۲). این حالت از چیدمان برای تصویر دوم برشنگاری مناسب است، بنابراین در این حالت تصویر دوم برشنگاری از نمونه گرفته شد.

با تفاضل تصاویر برشنگاری اول و دوم تصویر الگوی هاله‌ای برشنگاری بدست می‌آید. هاله‌های تیره برشنگاری در واقع مناطقی را نشان می‌دهند که مشتقات جابجایی یکسانی دارند. برای تشخیص عیوب می‌بایست تغییرات ناگهانی و ناهمگنی در توزیع هاله‌های برشنگاری که نشان‌دهنده محل‌هایی با تمرکز جابجایی‌اند مشخص شود. این پدیده در واقع به دلیل اختلاف دامنه ارتعاشات ناشی از وجود ناهمگنی در قطعه به وجود می‌آید. هر دو روش برشنگاری زمان میانگین و برشنگاری استروبوکوپیک از طریق آشکارسازی ناهمگنی در دامنه ارتعاشات ناشی از وجود عیب قابلیت تشخیص عیوب را دارا هستند.

بحث

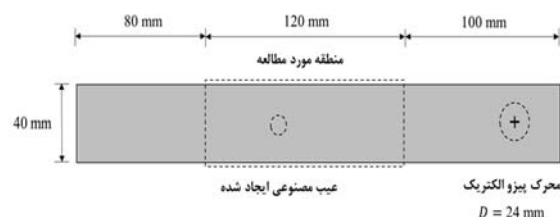
شکل‌های ۵ (الف)-(و) نتیجه بازرسی غیر مخرب را با استفاده از روش برشنگاری زمان میانگین در شش فرکانس تحریک متفاوت یعنی ۶۰۰۰ هرتز، ۶۴۰۰ هرتز، ۶۸۰۰ هرتز، ۷۲۰۰ هرتز، ۷۶۰۰ هرتز و

شده که به پشت سطح جسم چسبانده شده است. از یک فانکشن جنراتور برای تولید سیگنال تحریک سینوسی استفاده شده است. سیگنال سینوسی تولید شده قبل از ورود به عملگر پیزوالکتریک با استفاده از یک آمپلی فایر چندین برابر قدرتمند می‌شود.

در بازرسی غیر مخرب به روش برشنگاری استروبوکوپیک برای همگام‌سازی تابش پالسی پرتو لیزر و نوسانات جسم از سیگنال راه انداز (TTL) استفاده می‌شود. این سیگنال توسط فانکشن جنراتور تولید شده و به کنترلر لیزر پالسی وارد می‌شود و دستور ارسال پرتوهای پالسی را صادر می‌نماید. اختلاف فاز بین سیگنال تحریک کننده عملگر پیزوالکتریک و سیگنال راه انداز (TTL) باید به نحوی تنظیم شود که نوسانات جسم در ماکزیمم دامنه و تابش لیزر در یک زمان اتفاق بیافتند. تصاویر برشنگاری در این چیدمان با استفاده از دوربین تصویربرداری CCD با وضوح بالا ایمپرکس (High-resolution IMPERX) با وضوح تصویر ۲۳۳۶ پیکسل در ۱۷۵۲ پیکسل گرفته شده است. تمامی آزمایش‌های چیدمان برشنگاری بر روی میز اپتیکی ضد ارتعاش انجام شده است. دوربین تصویربرداری CCD با استفاده از یک فریم گریب (Frame Grabber) به کامپیوتر شخصی منتقل شده و در آن ذخیره می‌شود.

روند آزمون‌ها

نمونه طراحی شده برای آزمون بازرسی غیر مخرب با استفاده از برشنگاری همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است یک ورق با ابعاد ۳۰۰ میلیمتر در ۴۰ میلیمتر ساخته شده از پروپیلین با ضخامت ۵ میلیمتر است. مواد مختلف در تحقیقات مختلف مورد بررسی قرار گرفته‌اند در این تحقیق پروپیلین، رایج‌ترین ماده مورد استفاده در ماتریس مواد مرکب زمینه پلیمری، به عنوان ماده مورد مطالعه انتخاب شده است [24-26].



شکل ۴) شماتیک نمونه استفاده‌شده برای آزمون بازرسی غیر مخرب با استفاده از برشنگاری

یک عیب مصنوعی با قطر ۱۰ میلیمتر و عمق ۳ میلیمتر در نمونه ایجاد شد. برای تحریک و بارگذاری ارتعاشی از یک محرک پیزوالکتریک با قطر ۲۴ میلیمتر و فرکانس تشدید اسمی ۳ کیلو هرتز استفاده شد. لبه‌ی سمت چپ نمونه با قید محکم بسته شد. ولتاژ اعمالی به محرک پیزوالکتریک یک موج سینوسی با دامنه ۱۰ ولت بود. اندازه برش مناسب برای این آزمایش بعد از بررسی اندازه برش‌های متفاوت با کمک تداخلگر مایکلسون ۱۰ میلیمتر در راستای محور X ها تنظیم شد.

موفقیت توسط هاله‌های تو در تو آشکارسازی شده است (شکل ۷). همانطور که در شکل ۷ نمایان است هاله‌های برشنگاری مربوط به امواج پایا در این فرکانس ناپدید شده‌اند. علت این پدیده کاهش دامنه ارتعاشات حالت پایدار جسم در این فرکانس تحریک به پایین تر از حساسیت روش برشنگاری زمان میانگین است.

دامنه ارتعاشات عیب در این فرکانس تحریک بیشتر از نواحی اطراف عیب بوده و در محدوده حساسیت روش برشنگاری زمان میانگین قرار می‌گیرد. بنابراین مطابق شکل ۷ در تصویر برشنگاری فقط هاله‌های مربوط به وجود عیب تشکیل شده‌اند و هاله‌های نشان دهنده نوسانات پایدار جسم محو شده‌اند. در این تصویر پدیده آشکارسازی عیب به صورت ایده‌آل انجام شده است ولی دستیابی به این تصویر برشنگاری زمان میانگین در بازه فرکانسی خاصی امکان‌پذیر است و یافتن این فرکانس تحریک بسیار دشوار و زمان بر خواهد بود. در آزمون برشنگاری زمان میانگین آشکارسازی عیب به صورت ایده‌آل در محدوده فرکانسی ۱۲۹۰۰ هرتز تا ۱۳۱۰۰ هرتز انجام شد.

نتایج برشنگاری استروبوکوپیک در محدوده فرکانسی ۱۳ کیلو هرتز در شکل ۸ نشان داده شده است. در این تصاویر نیز عیب مصنوعی با هاله‌های تو در تو برشنگاری آشکارسازی شده است. همانطور که در شکل ۸ (الف) نشان داده شده است در فرکانس ۱۳۰۰۰ هرتز دامنه نوسانات عیب نسبت به فرکانس‌های تحریک ۱۲۶۰۰ هرتز (شکل ۸ (ب)) و ۱۳۳۰۰ هرتز (شکل ۸ (ج)) بیشتر است و در نتیجه هاله‌های برشنگاری بیشتری در محل عیب ایجاد شده است. بر خلاف روش برشنگاری زمان میانگین در فرکانس تحریک ۱۳۰۰۰ هرتز دامنه ارتعاشات پایدار جسم نیز در محدوده حساسیت روش برشنگاری استروبوکوپیک قرار می‌گیرد. بنابراین هاله‌های مربوط به ارتعاشات پایدار جسم به همراه هاله‌های ناشی از وجود عیب در نتایج این روش مشاهده می‌شود. وجود هاله‌های مربوط به امواج پایا ایجاد شده در جسم در فرکانس ۱۳۰۰۰ هرتز نشان دهنده حساسیت بالاتر و توانمندی روش برشنگاری استروبوکوپیک در به تصویر کشیدن دامنه ارتعاشات است.

نتایج روش برشنگاری استروبوکوپیک در این تحقیق نشان دادند که این روش در تمامی بازه فرکانسی ۱۲۶۰۰ هرتز (شکل ۸ (ب)) تا ۱۳۳۰۰ هرتز (شکل ۸ (ج)) عیب را به وضوح آشکارسازی می‌نماید. بنابراین در این روش بازه فرکانسی قابل تشخیص عیب در محدوده فرکانس تحریک ۱۳۰۰۰ هرتز برابر ۷۰۰ هرتز اندازه گیری شد در حالی که بازه فرکانس قابل تشخیص عیب در این محدوده فرکانسی برای برشنگاری زمان میانگین حدود ۲۰۰ هرتز بود. قابلیت و برتری روش برشنگاری استروبوکوپیک در این محدوده فرکانس تحریک نیز کاملاً مشخص است.

آزمون‌های برشنگاری با تغییر فرکانس‌های تحریک تکرار شد و نتایج بدست آمده تحت مطالعه قرار گرفت. روش برشنگاری استروبوکوپیک در محدوده فرکانس ۱۵۰۰ هرتز نیز با موفقیت عیب مصنوعی ایجاد شده را آشکارسازی نمود (شکل ۹ (الف)). همانطور که

۸۰۰۰ هرتز نشان می‌دهند. در این فرکانس‌ها جسم به صورت حالت پایدار به ارتعاش در آمده است و در تصاویر برشنگاری میدان موج پایا قابل مشاهده است.

در تمامی فرکانس‌ها در موقعیت قرار گیری عیب، بی نظمی‌هایی در هاله‌های برشنگاری ایجاد شده است و بدین ترتیب موقعیت عیب با هاله‌های تو در تو برشنگاری قابل تشخیص است. ناهنجاری در هاله‌های برشنگاری به دلیل اختلاف در دامنه ارتعاشات بین منطقه عیب و نواحی اطراف آن به وجود آمده است. بنابراین بازه فرکانسی بین ۶۰۰۰ هرتز تا ۸۰۰۰ هرتز با مرکز فرکانسی ۷۰۰۰ هرتز به عنوان یکی از فرکانس‌ها تشدید عیب مشخص می‌شود. با توجه به ماهیت میانگین‌گیری در تصویربرداری روش برشنگاری زمان میانگین هاله‌های تشکیل شده دارای نویز زیادی هستند و همانطور که در شکل ۵ مشاهده می‌شود در این روش هاله‌های تیره و روشن به طور کامل تشکیل نمی‌شوند. این پدیده باعث دشواری در تشخیص عیب می‌شود.

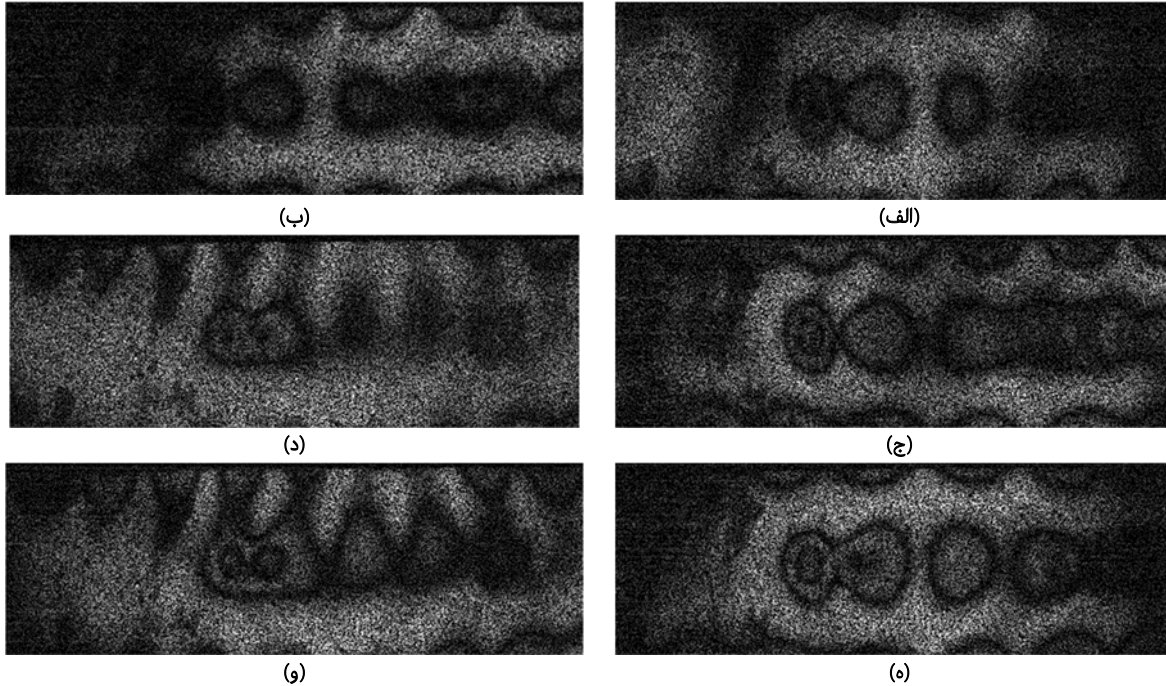
در آزمون بعدی به بازرسی غیر مخرب نمونه مورد مطالعه با استفاده از روش برشنگاری استروبوکوپیک پرداخته شد. شکل‌های ۶ (الف)-(و) نتایج برشنگاری استروبوکوپیک را در فرکانس‌های تحریک مشابه روش برشنگاری زمان میانگین یعنی ۶۰۰۰ هرتز، ۶۴۰۰ هرتز، ۶۸۰۰ هرتز، ۷۲۰۰ هرتز، ۷۶۰۰ هرتز و ۸۰۰۰ هرتز نشان می‌دهند.

در روش برشنگاری استروبوکوپیک استفاده شده در این تحقیق، ارتعاشات در حالت‌های ماکزیمم و مینیمم دامنه فریز شده و نتایج برشنگاری از تفاضل مستقیم تصاویر در این دو حالت فریز شده محاسبه می‌شود. بنابراین مطابق انتظار میزان نویز در نتایج روش برشنگاری استروبوکوپیک کاهش یافته است و هاله‌های تیره و روشن برشنگاری به صورت کامل تشکیل شده‌اند (شکل ۶). میدان موج پایا تشکیل شده در فرکانس‌های مختلف تحریک نمونه، با هاله‌های برشنگاری استروبوکوپیک قابل تشخیص است. هاله‌های تو در تو برشنگاری در محل عیب به وضوح عیب را آشکارسازی نموده‌اند و همانطور که مشاهده می‌شود تشخیص وجود عیب در فرکانس‌های مختلف نسبت به روش برشنگاری زمان میانگین ساده‌تر است. وضوح بیشتر در آشکارسازی عیب توانمندی روش برشنگاری استروبوکوپیک را نسبت به روش برشنگاری زمان میانگین برای بازرسی غیر مخرب نشان می‌دهد. به دلیل محاسبه مستقیم مشتقات جابجایی در روش برشنگاری استروبوکوپیک، حساسیت این روش به دامنه ارتعاشات نسبت به روش برشنگاری زمان میانگین بالاتر است. بنابراین مطابق انتظار در این روش هاله‌های برشنگاری بیشتری در محل عیب تشکیل شده است.

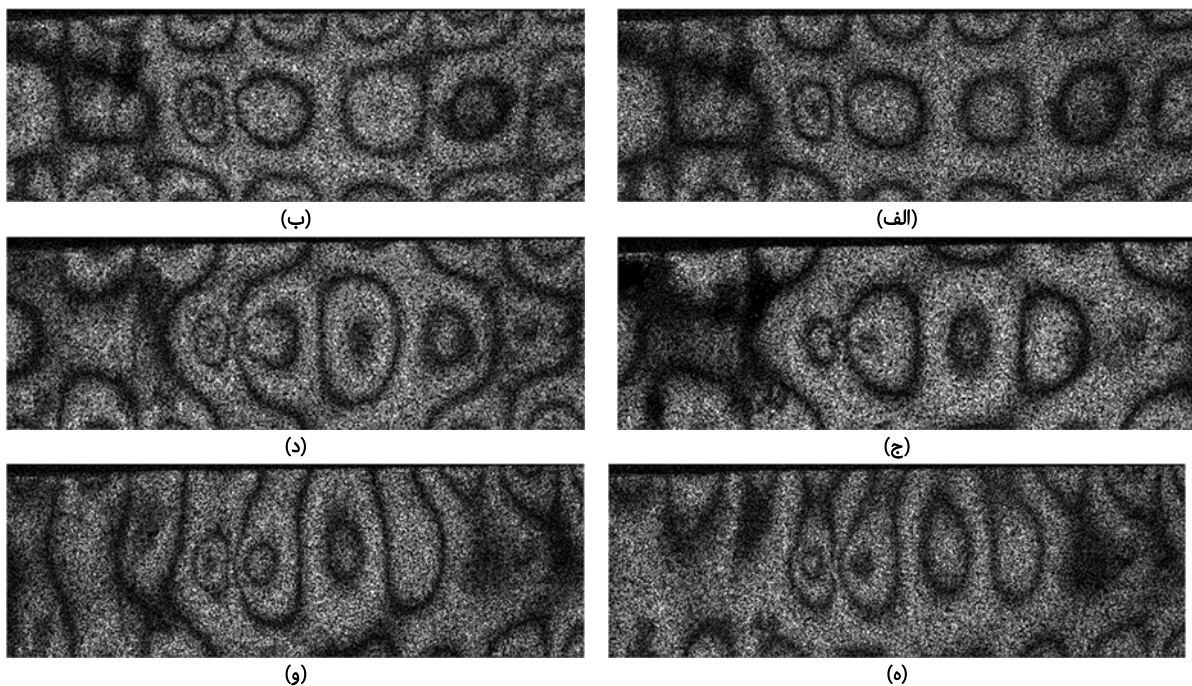
بازرسی غیر مخرب با استفاده از روش‌های برشنگاری استروبوکوپیک و برشنگاری زمان میانگین در دیگر فرکانس‌های تحریک نیز تکرار شد. عیب مصنوعی ایجاد شده با استفاده از روش برشنگاری زمان میانگین در فرکانس تحریک ۱۳ کیلو هرتز نیز با

شکل ۹ (ب) نتیجه روش برشنگاری زمان میانگین در فرکانس ۱۵۰۰ هرتز را نشان می‌دهد. اگر چه نشانه‌هایی از هاله‌های روشن در محل عیب وجود دارد ولی تشخیص وجود عیب با استفاده از برشنگاری زمان میانگین در این فرکانس دشوار است. هاله‌های روشن در برشنگاری زمان میانگین معمولاً نشان‌دهنده محل‌های با بیشینه دامنه ارتعاشات هستند. لذا با مشاهده شکل ۹ (ب) نمی‌توان از وجود عیب آگاهی پیدا کرد.

از شکل ۹ (الف) مشخص است هاله‌های تو در تو ناشی از وجود عیب در این فرکانس بسیار گسترش یافته‌اند. دامنه ارتعاشات عیب در این فرکانس بسیار بیشتر از دامنه ارتعاشات قطعه آزمایش است و این فرکانس را نیز می‌توان فرکانس تشدید عیب نامید. در این تحقیق روش برشنگاری استروبو اسکوپیک قابلیت تشخیص عیب را در بازه فرکانسی بین ۱۳۰۰ هرتز تا ۱۶۰۰ هرتز داشت.



شکل ۵) نتایج بازرسی غیر مخرب با استفاده از برشنگاری زمان میانگین با تحریک پیزوالکتریک برای ورق پروپیلنی در شش فرکانس متفاوت (الف) ۶۰۰ هرتز، (ب) ۶۴۰ هرتز، (ج) ۶۸۰ هرتز، (د) ۷۲۰ هرتز، (ه) ۷۶۰ هرتز، (و) ۸۰۰ هرتز



شکل ۶) نتایج بازرسی غیر مخرب با استفاده از برشنگاری استروبو اسکوپیک با تحریک پیزوالکتریک برای ورق پروپیلنی در شش فرکانس متفاوت (الف) ۶۰۰ هرتز، (ب) ۶۴۰ هرتز، (ج) ۶۸۰ هرتز، (د) ۷۲۰ هرتز، (ه) ۷۶۰ هرتز، (و) ۸۰۰ هرتز

برای این منظور چیدمان ترکیبی سیستم برشنگاری با تحریک پیزوالکتریک با قابلیت انجام بازرسی غیر مخرب به روش برشنگاری زمان میانگین و برشنگاری استروبو اسکوپیک توسعه داده شد. قطعه پروپیلنی با عیب مصنوعی به قطر ۱۰ میلی‌متر به عنوان نمونه آزمایش در نظر گرفته شد. بازرسی غیر مخرب بر روی نمونه با استفاده از هر دو روش برشنگاری زمان میانگین و برشنگاری استروبو اسکوپیک با تغییر فرکانس تحریک پیزوالکتریک انجام شد.

نتایج بدست آمده در این تحقیق توانمندی و قابلیت بالاتر روش برشنگاری استروبو اسکوپیک در مقایسه با روش برشنگاری زمان میانگین در بازرسی غیر مخرب نشان می‌دهند. روش برشنگاری استروبو اسکوپیک از حساسیت بالاتری برای تشخیص دامنه ارتعاشات برخوردار است. این روش در در فرکانس‌های تحریک مشابه در محدوده ۷۰۰۰ هرتز عیب را با وضوح بیشتری آشکارسازی نمود و در محدوده فرکانسی ۱۳۰۰۰ هرتز در بازه فرکانسی بسیار بالاتری قابلیت تشخیص عیب را داشت. همچنین در محدوده فرکانس تحریک ۱۵۰۰ هرتز روش برشنگاری استروبو اسکوپیک با موفقیت عیب را آشکارسازی نمود در حالی که روش برشنگاری زمان میانگین قابلیت تشخیص عیب در این محدوده را نداشت. قابلیت‌های روش برشنگاری استروبو اسکوپیک تشخیص عیوب را تسهیل می‌بخشد و باعث می‌شود ریسک عدم تشخیص عیب در کاربردهای صنعتی بسیار کاهش یابد.

تشکر و قدردانی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

تأییدیه اخلاقی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

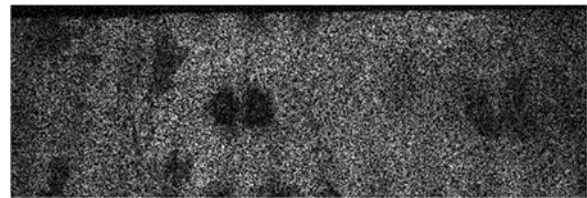
تعارض منافع: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

سهام نویسندگان: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

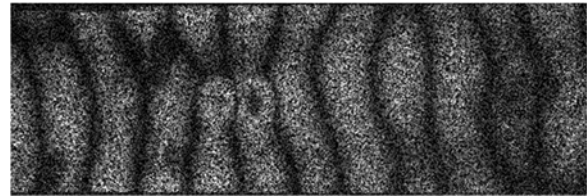
منابع مالی: موردی توسط نویسندگان بیان نشده است.

منابع

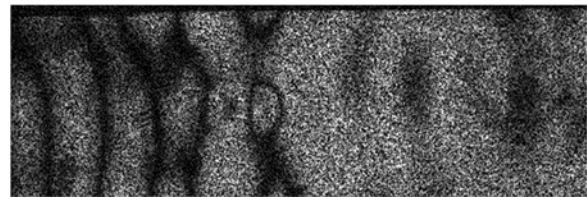
- 1- Akbari D, Soltani N, Reshadi F. Application of digital shearography for nondestructive testing of materials with thermal loading. *Modares Mechanical Engineering*. 2013;13(4):36-45. (in Persian)
- 2- Akbari D, Asemani H, Soltani N. Analysis of laser interferometry parameters in the evaluation of defects in the polymer matrix composites. *Modares Mechanical Engineering*. 2017;17(9):372-380. (in Persian)
- 3- Asemani H, Park J, Lee JR, Soltani N. Development of PZT-excited stroboscopic shearography for full-field nondestructive evaluation. *Review of Scientific Instruments*. 2017;88(5):053301.
- 4- Yang L, Steinchen W, Kupfer G, Mäckel P, Vössing F. Vibration analysis by means of digital shearography. *Optics and Lasers in Engineering*. 1998;30(2):199-212.
- 5- Schöntag J, Willemann D, Gonçalves Jr AA. Depth assessment of defects in composite plates combining shearography and vibration excitation. *Speckle 2010: Optical Metrology*, 2010 September 13-15, Florianopolis, Brazil. Bellingham, Washington: SPIE; 2010.
- 6- Asemani H, Soltani N, Shivaie Kojouri A. non-destructive testing of large area aluminum plate using stroboscopic shearography. *The Biennial International*



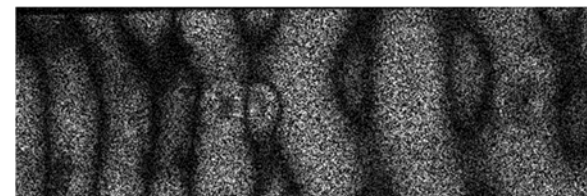
شکل ۷) نتایج بازرسی غیر مخرب با استفاده از برشنگاری زمان میانگین با تحریک پیزوالکتریک برای ورق پروپیلنی در فرکانس تحریک ۱۳ کیلو هرتز



(الف)

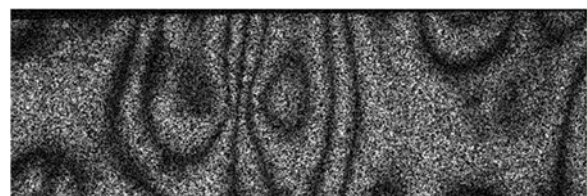


(ب)

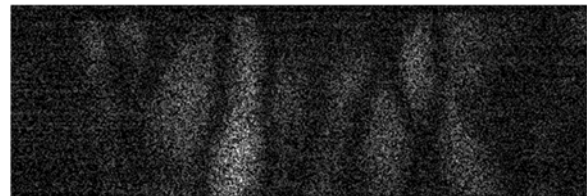


(ج)

شکل ۸) نتایج بازرسی غیر مخرب با استفاده از برشنگاری زمان استروبو اسکوپیک با تحریک پیزوالکتریک برای ورق پروپیلنی در فرکانس‌های تحریک (الف) ۱۳۰۰۰ هرتز، (ب) ۱۲۶۰۰ هرتز، (ج) ۱۳۳۰۰ هرتز



(الف)



(ب)

شکل ۹) نتایج بازرسی غیر مخرب با تحریک پیزوالکتریک برای ورق پروپیلنی در فرکانس‌های تحریک ۱۵۰۰ هرتز با استفاده از روش‌های (الف) برشنگاری استروبو اسکوپیک، (ب) برشنگاری زمان میانگین

نتیجه‌گیری

در این مقاله به بررسی و مقایسه نتایج روش‌های برشنگاری زمان میانگین و برشنگاری استروبو اسکوپیک در عیب یابی پرداخته شد.

- 17- Chatters TC, Pouet BF, Krishnaswamy S. Additive-subtractive phase-modulated shearography with synchronized acoustic stressing. *Experimental Mechanics*. 1995;35(2):159-165.
- 18- Asemani H, Soltani N. The effectiveness of laser shearography for the inspection of wall thinning in a large aluminum plate. *Journal of Nondestructive Evaluation*. 2019;38(2):38-56.
- 19- Asemani H, Soltani N. Application of electronic speckle pattern shearing interferometry with high-speed camera in vibration analysis of piezoelectric transducer. *International Journal of Applied Mechanics*. 2019;11(6):1950056.
- 20- Yang LX, Schuth M, Thomas D, Wang YH, Voelsing F. Stroboscopic digital speckle pattern interferometry for vibration analysis of microsystem. *Optics and Lasers in Engineering*. 2009;47(2):252-258.
- 21- Zhu L, Wu S, Yang L. Stroboscopic digital shearographic system for vibration analysis of large-area object. *Instruments and Experimental Techniques*. 2014;57(4):493-498.
- 22- Asemani H, Park J, Soltani N, Lee JR. Defect detection using stroboscopic shearography. *Conference of the Korean Society for Aeronautical & Space Sciences*; 2016 April; Seorak Daemyung, South Korea: 157-158.
- 23- Asemani H, Park J, Soltani N, Lee JR. The applications of shearography method for nondestructive testing and vibration analysis. *Annual Spring Conference of Korean Society for Nondestructive Testing*; 2016 May; Wonju, South Korea.
- 24- Farrahi GH, Ghodrati M, Azadi M, Rezvani Rad M. Stress-strain time-dependent behavior of A356.0 aluminum alloy subjected to cyclic thermal and mechanical loadings. *Mechanics of Time-Dependent Materials*. 2014;18(3):475-491.
- 25- Macedo FJ, Benedet ME, Fantin AV, Willemann DP, Silva FAA, Albertazzi A. Inspection of defects of composite materials in inner cylindrical surfaces using endoscopic shearography. *Optics and Lasers in Engineering*. 2018;104:100-108.
- 26- Ye Y, Ma K, Zhou H, Arola D, Zhang D. An automated shearography system for cylindrical surface inspection. *Measurement*. 2019;135:400-405.
- Conference on Experimental Solid Mechanics and Dynamics; 2018 February 13-14; Tehran, Iran.
- 7- Liu H, Guo S, Chen YF, Tan CY, Zhang L. Acoustic shearography for crack detection in metallic plates. *Smart Materials and Structures*. 2018;27(8):085018.
- 8- Liu H, Liu M, Zhang L, Chen YF, Tan CY, Guo S, et al. Directed acoustic shearography for crack detection around fastener holes in aluminum plates. *NDT & E International*. 2018;100:124-131.
- 9- Hung YY, Taylor CE. Speckle-shearing interferometric camera: A tool for measurement of derivatives of surface-displacement. *Proceedings of SPIE 0041, Developments in Laser Technology II*, 1974 March 1, Bellingham, Washington.
- 10- Steinchen W, Kupfer G, Mäckel P. Vibration analysis by digital shearography. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2000;108(5):2622.
- 11- Vandenrijt JF, Thizy C, Georges M. Time-averaged phase-stepped ESPI with CO2 laser and shearography in the visible for identification of vibration mode shapes. *Proceeding of the VI International Conference on Speckle Metrology*, 24 August 2015, Guanajuato, Mexico. Bellingham, Washington: SPIE; 2015.
- 12- Toh SL, Tay CJ, Shang HM, Lin QY. Time-average shearography in vibration analysis. *Optics & Laser Technology*, 1995;27(1):51-55.
- 13- Toh SL, Shang HM, Chau FS, Tay CJ. Flaw detection in composites using time-average shearography. *Optics & Laser Technology*. 1991;23(1):25-30.
- 14- Sim CW, Chau FS, Toh SL. Vibration analysis and non-destructive testing with real-time shearography. *Optics & Laser Technology*. 1995;27(1):45-49.
- 15- Mohan NK, Saldner HO, Molin NE. Electronic shearography applied to static and vibrating objects. *Optics Communications*. 1994;108(4-6):197-202.
- 16- Findeis D, Gryzagoridis J. Digital shearography and vibration excitation for NDT of aircraft components. *11th International Conference on Vibration Measurements by Laser and Noncontact Techniques-Aivela 2014: Advances and Applications*, 2014 June 25-27, Ancona, Italy. Maryland, United States: American Institute of Physics; 2014.