

ارزیابی عیوب در قطعات پلیمری تحت بار با استفاده از سیستم تحریک گرمایی به کمک روش برشنگاری

احسان آقاجعفری^{*} دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، a.aghajafari@gmail.com
داود اکبری^{*} استادیار، مهندسی ساخت و تولید، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، daakbari@modares.ac.ir

چکیده

تداخل سنجی لیزری برشی یکی از روش‌های نوین در انجام آزمون‌های غیرمخرب برای مواد مرکب و پلیمری می‌باشد. در این روش از طریق اندازه‌گیری گرادینان‌های جابجایی بسیار کوچک سطح، عیوب احتمالی مورد بررسی قرار می‌گیرد. از عمده مزایای این روش می‌توان به بررسی محدوده گسترده‌ای از سطح جسم به طور همزمان اشاره نمود. علی‌رغم مزایای عمده این روش در انجام آزمون‌های غیرمخرب صنعتی به خصوص برای مواد مرکب و مواد پلیمری، پیاده‌سازی این روش نیازمند شناسایی پارامترهای موثر و نحوه انتخاب و کنترل آن‌ها به منظور دستیابی به نتایج مطلوب می‌باشد. از جمله پارامترهای موثر در این روش می‌توان به اندازه برش و میزان بارگذاری بر روی نمونه اشاره کرد. در این مقاله، پس از معرفی اصول روش تداخل سنجی لیزری، تاثیر کمتی پارامترهای مذکور در تشخیص عیوب صفحه‌ای در مواد پلیمری مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، پس از بررسی عملکرد صحیح چیدمان، نمونه‌هایی از جنس پلیمر دارای عیوب با اندازه‌های مختلف تحت آزمون و بررسی قرار می‌گیرند. با بررسی نتایج حاصله، اندازه بار مناسب برای تشخیص عیوب تعیین شده و سپس با بررسی اثر اندازه برش، مقدار مناسب آن بیان شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که بهترین نتایج زمانی حاصل می‌گردد که اندازه برش در محدوده اندازه عیب صفحه‌ای باشد.

واژه‌های کلیدی: تداخل سنجی لیزری، آزمون غیرمخرب، مواد پلیمری، عیوب صفحه‌ای، سیستم تحریک گرمایی.

Evaluation of the defects in the underload polymers using shearography method by thermal excitation

E. Aghajafari
D. Akbari

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

Abstract

Laser interferometry is one of the novel methods for performing nondestructive testing for composites and polymer materials. In this method, probable defects are investigated by measuring the very small surface displacement gradients. One of the major advantages of this method is the examination of a wide range of body surfaces simultaneously. Despite the major advantages of this method in performing non-destructive industrial tests, especially for composites and polymer materials, the implementation of this method requires identifying effective parameters and how to select and control them in order to achieve optimal results. Among the effective parameters in this method, the shear amount and loading value can be mentioned. In this paper, after introducing the principles of laser interferometry, the quantitative effect of these parameters on the detection of plate defects in polymer materials has been investigated. For this purpose, after examining the proper operation of the shearography system, samples of polymer with different size of plate defects are tested. By discussing the results, the appropriate load value and proper shear amount for determining the defects would be investigated. Investigations show that the best results are obtained when the shear amount is within the range of the defect size of the plate.

Keywords: Laser interferometry, Nondestructive Tests, Polymers, Plate Defects, Thermal Excitation System.

مواد نیازمند ایجاد و توسعه روش‌های نوین می‌باشد. از جمله روش‌های پرکاربرد برای این مواد، روش‌های نوری و بویژه روش تداخل سنجی لیزری یا برشنگاری می‌باشد.

برشنگاری دیجیتالی روشی نوین مبتنی بر تداخل امواج نور لیزر می‌باشد. این روش با استفاده از تداخل پرتوهای بازتابی از سطح قطعه به صورت غیرتماسی و غیرمخرب عیوب سطحی و زیرسطحی قطعه مورد بررسی قرار می‌گیرد. از آنجاکه وجود عیوب در قطعه، موجب تمرکز موضعی کرنش می‌شود، به کمک روش برشنگاری می‌توان اثر این تمرکز کرنش را اندازه‌گیری نمود و محل عیب را مشخص کرد. برشنگاری یا تداخل سنجی برشی مزایای ویژه تداخل سنجی تمام میدانی گرادینان جابجایی با مقاومت بیشتر در برابر اغتشاشات و ارتعاشات محیطی را در مقایسه با سایر روش‌ها همچون تداخل سنجی

۱- مقدمه

امروزه مواد پلیمری کاربردهای گوناگونی در صنایع مختلف از جمله خودروسازی، صنایع هوایی و هوافضا، نظامی، صنایع پزشکی و غیره دارند. گسترش کاربرد این مواد، نیاز به بازرسی این قطعات را به منظور بررسی وجود عیوب احتمالی به طور پیوسته افزایش می‌دهد. این موضوع منجر به توجه ویژه به آزمون‌های ارزیابی قطعات به خصوص آزمون‌های غیرمخرب در سال‌های اخیر شده است. به طور کلی مواد پلیمری قابلیت بازرسی پایینی با روش‌های سنتی همچون ذرات مغناطیسی^۱ یا فراصوت^۲ دارند. به همین دلیل، بازرسی اینگونه

^۱ Magnetic Particles Test

^۲ Ultrasonics

الگوی لکه‌ای الکترونیکی^۱ را دارد. عدم نیاز به پرتو نور مرجع، حساسیت روش به نویزهای محیطی را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد و این مساله امکان کاربرد برشنگاری در محیط‌های صنعتی را نیز فراهم می‌کند. از دیگر مزایای این روش می‌توان به سرعت بازرسی بالا، غیرتماسی بودن آن و زمان کمتر مورد نیاز برای تفسیر نتایج اشاره نمود.

برشنگاری از تداخل‌سنجی الگوی لکه‌ای قطعه برای بررسی عیوب احتمالی آن استفاده می‌کند. در این روش از یک منبع لیزر با پرتو هم‌دوس^۲ برای تداخل‌سنجی استفاده می‌شود. پرتوی بازتاب شده از سطح قطعه پس از عبور از مجموعه تداخل‌سنج وارد مجموعه تصویربرداری شده و سپس تصویر آن در یک رایانه ذخیره می‌شود. این تصویر، الگوی لکه‌ای نامیده می‌شود. سپس قطعه تحت بارگذاری قرار می‌گردد و مجدداً تداخل پرتوهای بازتابی از سطح آن توسط دوربین تصویربرداری می‌شود. اعمال بارگذاری بر روی قطعه منجر به تغییر در شدت پیکسل‌های تصویر، قبل و بعد بارگذاری می‌شود. با محاسبه اختلاف شدت پرتوها قبل و بعد از بارگذاری الگوی هاله‌ای^۳ به دست می‌آید. در الگوی هاله‌ای نقاط سیاه و سفیدی وجود دارند که بیانگر تداخل سازنده و مخرب می‌باشند. تفسیر و تحلیل الگوی هاله‌ای عیوب احتمالی موجود در قطعه را آشکار می‌کند.

در سال ۱۹۷۰ لیندرتز به منظور توسعه و بهبود روش هولوگرافی، مطالعاتی انجام داد که منجر به معرفی روش برشنگاری شد. در آن سال، لیندرتز به محاسبه مشتقات جابجایی عمود بر صفحه نمونه پرداخت [۱]. همچنین در سال ۱۹۷۳ لیندرتز و باترز با استفاده از روشی به نام تداخل‌سنجی الگوی لکه‌ای برشی، به محاسبه ممان خمشی یک تیر پرداختند [۲]. در این مقاله، آنها ابتدا شیب سطح نمونه را مورد اندازه‌گیری قرار دادند و سپس به کمک آن، ممان خمشی در یک سطح نازک را اندازه‌گیری کردند و نتایج حاصله را با روش هولوگرافی مقایسه کردند. همچنین در سال ۱۹۷۴ هانگ با استفاده از تداخل‌سنج برشی لکه‌ای و به کمک تداخل‌سنج مایکلسون به محاسبه مشتقات جابجایی صفحه پرداخت [۳]. در سال ۱۹۸۲ نیز هانگ به معرفی روش برشنگاری به عنوان روشی جدید برای اندازه‌گیری کرنش و انجام تست‌های غیرمخرب پرداخت و این روش را با سایر روش‌های تست‌های غیرمخرب موجود در آن زمان مقایسه کرد [۴]. در طی سال‌های پس از آن نیز تحقیقات گسترده‌ای بر روی روش برشنگاری، توسعه و قابلیت روش برای مواد مختلف انجام گرفت.

در سال ۱۹۹۹ میلادی، هانگ به بررسی قابلیت روش برشنگاری برای بررسی عیوب در مواد مرکب پرداخت. در این مطالعه، عیوب موجود در یک پنل کامپوزیت گرافیت را به کمک روش‌های برشنگاری و فراصوتی سی-اسکن مورد مطالعه قرار داد [۵]. در سال ۲۰۰۴، چوی و لی به ارزیابی عیوب داخل مواد مرکب با استفاده از برشنگاری پرداختند [۶]. همچنین در سال ۲۰۱۱ لیو و همکاران به بررسی توانایی برشنگاری در تشخیص سوراخ‌ها و ترک‌ها در مواد پلیمری و آلومینیومی به کمک تحریک حرارتی پرداختند [۷].

در سال ۲۰۱۳ اکبری و همکاران به بررسی تجربی و عددی تشخیص عیوب در مواد پلیمری با استفاده از روش برشنگاری دیجیتال و به کمک تحریک گرمایی پرداختند [۸]. در این تحقیق اثر پارامترهای بارگذاری گرمایی در نتایج تست بر روی یک نمونه از جنس پلکسی گلس از طریق تحلیل المان حدود و آزمایشات تجربی مورد بررسی قرار گرفت. در سال ۲۰۱۶ نیز برموز و همکاران کامپوزیت‌های چوب پلاستیک را به کمک برشنگاری مورد مطالعه قرار دادند [۹]. همچنین در سال ۱۳۹۶ اکبری و همکاران پارامترهای آزمون تداخل-سنجی لیزری برای بررسی عیوب در مواد مرکب با زمینه پلیمری را مورد بررسی قرار دادند [۱۰]. آنها در این تحقیق به بررسی ترک‌ها و تعیین محدوده مجاز برای بارگذاری کششی به منظور تشخیص ترک‌ها در مواد مرکب زمینه پلیمری پرداختند.

به طور کلی در روش برشنگاری مهم‌ترین عامل در تشخیص عیوب احتمالی روش و پارامترهای بارگذاری می‌باشد. پارامترهایی همچون اندازه برش و اندازه بارگذاری و موقعیت عیب از جمله پارامترهای تاثیرگذار بر روی نتایج حاصل از روش برشنگاری می‌باشند. اگرچه انتخاب این پارامترها تا حد زیادی بستگی به تجربه کاربر دارد، اما تا کنون در مقالات توجه ویژه‌ای به این پارامترها نشده است.

در این مقاله، پس از بیان اصول روش تداخل‌سنجی لیزری، نسبت به عملکرد صحیح چیدمان برشنگاری حاضر اطمینان حاصل می‌گردد. پس از آن به کمک دستگاه کشش حاضر، نمونه‌ها به منظور مدلسازی تحت بار بودن، تحت بارگذاری کششی محوری قرار می‌گیرند و آزمون غیرمخرب برشنگاری بر روی نمونه‌ها به وسیله سیستم تحریک گرمایی انجام می‌پذیرد. در پایان محدوده تشخیص‌پذیری عیوب و اثر اندازه برش و اندازه بار نیز بررسی خواهد شد.

۲- اصول روش برشنگاری

برشنگاری دیجیتالی بر مبنای تابش و بازتابش نور لیزر از سطح جسم می‌باشد. در شکل ۱ (الف) طرحواره روش برشنگاری و شکل ۱ (ب) چیدمان آزمایشگاهی روش نشان داده شده است. در این چیدمان، با استفاده از یک لنز واگراکننده، نور لیزر تکرنگ با پرتو هم‌دوس بر روی سطح نمونه مورد آزمایش تابانده می‌شود و کل سطح را پوشش می‌دهد. در مقابل نمونه، مجموعه برشی و دوربین سی‌سی‌دی^۴ قرار دارد. پرتوهای بازتابی از سطح قطعه به مجموعه برشی یا همان تداخل-سنج مایکلسون وارد می‌شوند. تداخل‌سنج مایکلسون شامل دو آینه و یک منشور تفکیک‌کننده پرتو^۵ می‌باشد. به دلیل زاویه اندک آینه شماره ۱ در مقایسه با آینه شماره ۲، پرتوی بازتابی از سطح آینه شماره ۱ با زاویه‌ای اندک منحرف می‌گردد. بنابراین دو تصویر بر روی سطح حسگر دوربین با یکدیگر فاصله خواهند داشت. به این فاصله اندازه برش می‌گویند. در شکل ۱ (ج) نمونه برش خورده با اندازه برش مشخص نشان داده شده است. با تنظیم کردن آینه شماره ۱ می‌توان اندازه و جهت برش را تنظیم نمود. دو پرتو بازتابی از سطح آینه‌ها در تداخل-سنج مایکلسون، به دلیل تفاوت در مسیرهای نوری طی شده با یکدیگر

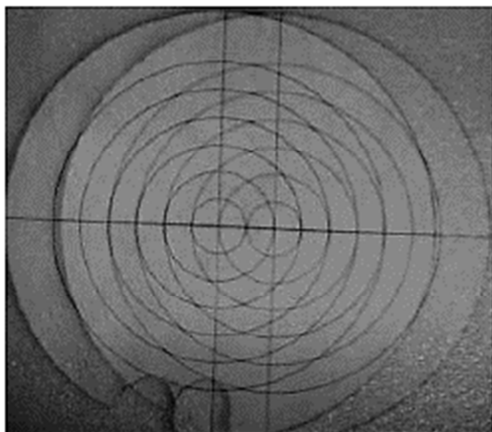
¹ Electronic Speckle Pattern Interferometry

² Coherence Beam

³ Fringe Pattern

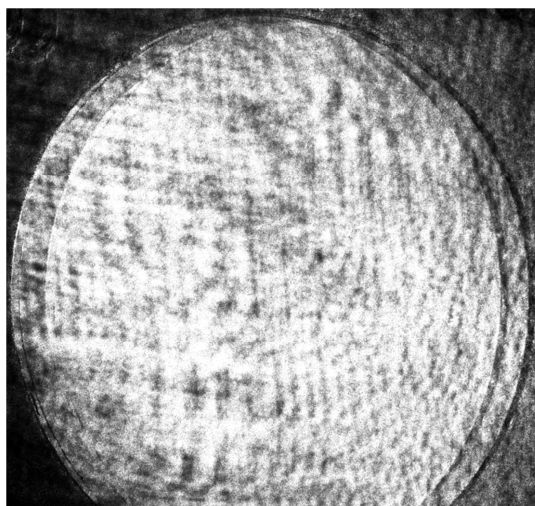
⁴ CCD Sensor

⁵ Beam Splitter

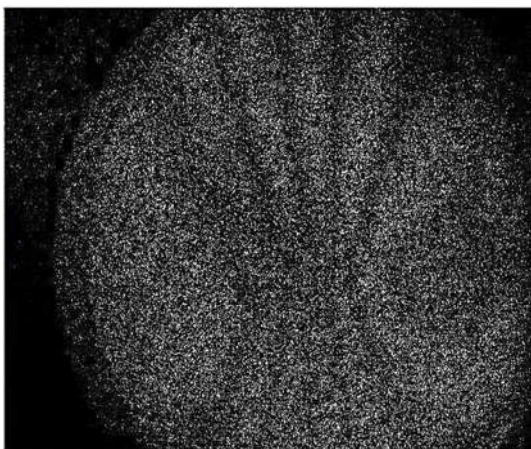


(ج)

شکل ۱- (الف) طرحواره برشنگاری (ب) چیدمان برشنگاری (ج) تصویر برش خورده

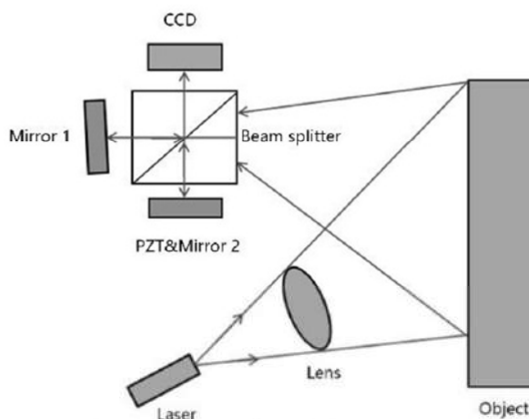


شکل ۲- الگوی تداخل لکه‌ای یک نمونه تحت بارگذاری نقطه‌ای



شکل ۳- الگوی هاله‌ای یک نمونه از جنس پلکسی گلس تحت بارگذاری مکانیکی

اختلاف فاز خواهند داشت. پرتوی بازتابی از سطح آینه شماره ۲ نیز بدون تغییر به منشور باز می‌گردد. پرتوهای بازتابی از سطح آینه‌ها بر روی سطح حسگر دوربین با یکدیگر تداخل می‌کنند و این مساله منجر به دستیابی به الگوی تداخل لکه‌ای می‌شود. در شکل ۲ نمونه‌ای از الگوی تداخل لکه‌ای یک نمونه تحت بارگذاری مکانیکی نشان داده شده است. توزیع نقاط تیره و روشن در تصویر به دلیل ناصافی سطوح نمونه‌ها نسبت به اندازه طول موج لیزر، به صورت تصادفی خواهد بود. پس از آنکه نمونه تحت بارگذاری قرار گیرد، به دلیل گرادیان جابجایی ایجاد شده در سطح، الگوی تداخل لکه‌ای دچار تغییر در توزیع نقاط تیره و روشن می‌شود. با محاسبه اختلاف الگوهای تداخل لکه‌ای قبل و بعد از بارگذاری، الگوی هاله‌ای یا تصویر برشی به دست می‌آید.



(الف)



(ب)

شکل ۳ نشان‌دهنده گرادپان‌های جابجایی سطح نمونه، تحت بارگذاری نقطه‌ای از مرکز نمونه می‌باشد. در صورت وجود عیب بر روی سطح یا زیرسطح نمونه الگوی هاله‌ای حاصل از تست نمونه دچار تغییراتی خواهد شد که با مشاهده و محاسبه این تغییرات عیوب احتمالی موجود در نمونه شناسایی می‌گردد.

۳- نظریه برشنگاری

برای الگوی لکه‌ای شدت نور از طریق رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

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

که در آن I توزیع شدت نور الگوی لکه‌ای در صفحه دوربین، I_0 شدت متوسط نور زمینه، γ مدول تداخل و φ اختلاف فاز تصادفی بین پرتوهای برشی یا همان پرتوهای بازتابی از سطح آینه‌ها می‌باشد. زمانی که قطعه تحت بارگذاری قرار بگیرد الگوی لکه‌ای آن نیز تغییر می‌یابد. تغییر در شدت نور الگوی لکه‌ای با استفاده از رابطه (۲) بیان می‌شود:

$$I' = 2I_0[1 + \cos(\varphi + \Delta)] \quad (2)$$

که در آن I' توزیع شدت نور الگوی لکه‌ای پس از بارگذاری و Δ تغییر فاز هر نقطه از نمونه تحت اثر بارگذاری می‌باشد. با محاسبه اختلاف شدت پرتوها قبل و بعد از بارگذاری، شدت نور الگوی هاله‌ای مطابق رابطه (۳) بیان می‌گردد:

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

در این رابطه فاز φ موجب ایجاد نویزهای شدیدی بر روی تصویر می‌گردد که با استفاده از روش‌های پردازش تصاویر تا حدود زیادی می‌توان این نویزها را کاهش داد. فاز مورد نظر برای دستیابی به اطلاعات گرادپان جابجایی قطعه تحت بارگذاری، همان فاز Δ می‌باشد که روش‌های متفاوتی برای استخراج آن وجود دارد. این اختلاف فاز ناشی از تفاوت در مسیرهای نوری پرتوهای بازتابی از سطح قطعه می‌باشد.

برای جهت برش در راستای x اختلاف فاز بر اساس جابجایی در راستاهای x ، y و z از رابطه (۴) بدست می‌آید:

$$\Delta_x = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \left[A \frac{\partial u}{\partial x} + B \frac{\partial v}{\partial x} + C \frac{\partial w}{\partial x}\right] \delta x \quad (4)$$

که در آن λ طول موج لیزر، u ، v و w به ترتیب جابجایی در راستاهای x ، y و z و δx اندازه برش می‌باشد. ضرایب A ، B و C نیز بیانگر اعضای بردار حساسیت می‌باشند.

در صورتی که چیدمان برشنگاری به صورتی باشد که اعضای بردار حساسیت در راستاهای x و y برابر صفر باشند، سیستم برشنگاری فقط به جابجایی‌های در راستای z حساس خواهد بود و رابطه (۴) به صورت رابطه (۵) ساده می‌شود:

$$\Delta_x = \left(\frac{2\pi}{\lambda}\right) \left(C \frac{\partial w}{\partial x}\right) \delta x \quad (5)$$

بنابراین با ساده‌سازی برای گرادپان جابجایی خواهیم داشت:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta_x}{4\pi \delta x} \quad (6)$$

رابطه (۶) بیانگر ارتباط گرادپان جابجایی قطعه تحت بارگذاری و اختلاف فاز هاله‌های برشنگاری حاصل می‌باشد. بنابراین با استخراج و بررسی الگوی هاله‌ای نمونه تحت بررسی، می‌توان گرادپان یا شیب خارج از صفحه نمونه تحت بارگذاری مورد نظر را اندازه گرفت.

۴- آزمایش تجربی

چیدمان آزمون برشنگاری برای انجام تست بر روی نمونه‌ها طراحی و ساخته شد. مشخصات بخشهای مختلف این چیدمان شامل موارد زیر می‌باشد.

قطعات نوری شامل:

- جداکننده پرتو از نوع مکعبی از نوع BK7، صافی سطح $\lambda/10$ و ابعاد $20\text{ mm} \times 20\text{ mm} \times 20\text{ mm}$

- آینه ثابت و دوار با پوشش Al و صافی سطح $\lambda/10$ ، قطر 1 in و ضخامت 9 mm

- نگهدارنده آینه دوار از نوع Standa -5MBM21 با قابلیت ایجاد دوران در دو محور برای ایجاد برش در هر دو راستا

سیستم تصویربرداری شامل:

سنسور ۱،۹ مگاپیکسل ساخته شده توسط شرکت سونی با قابلیت تصویربرداری ۲۰ فریم بر ثانیه و از لنز با حداقل فاصله همگرایی ۳۵ میلیمتری.

سیستم نوردهی لیزری:

شامل لیزر دیودی با توان ۵۰ میلی‌وات با طول موج ۶۳۲،۸ نانومتر توضیح اینکه در آزمونهای کالیبراسیون اولیه از لیزر ۵ میلی وات استفاده شد اما در آزمونهای نهایی به دلیل محدودیت نزدیکی فاصله تا نمونه‌ها از لیزر ۵۰ میلی وات به شرح فوق استفاده شد.

در این مقاله به کمک برشنگاری دیجیتالی، عیوب صفحه‌ای در قطعات پلیمری تحت بار مورد بررسی قرار گرفته است. در مرحله اول به منظور بررسی صحت عملکرد چیدمان برشنگاری موجود، نمونه‌ای از جنس پلکسی‌گلاس تحت بارگذاری نقطه‌ای قرار گرفت. نتایج حاصل از این آزمون که در شکل ۳ نشان داده شده است، بیانگر صحیح چیدمان برشنگاری حساس نسبت به جابجایی خارج از صفحه می‌باشد. پس از آن به منظور بررسی عیوب دایره‌ای در مواد پلیمری، نمونه‌هایی از جنس‌های پلی‌اتیلن سبک و پلکسی‌گلاس تهیه گردید. شکل ۴ نشان دهنده قطعه ساخته شده از جنس پلی‌اتیلن سبک با ضخامت ۸ میلیمتر و حاوی ۶ عیب صفحه‌ای در اندازه و عمق‌های مختلف می‌باشد. با بررسی نتایج این نمونه، اثر اندازه عیب در دو عمق متفاوت مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در بخش دیگر با استفاده از نمونه پلکسی‌گلاس دارای ۴ عیب صفحه‌ای با اندازه یکسان و در عمقهای مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مجموع عیوب با اندازه ۵، ۷، ۱۰، ۱۲ و ۱۵ میلیمتر در عمق ۰،۱ و ۰،۳ میلیمتری ایجاد شدند. با بررسی نتایج آزمون غیرمخرب برشنگاری دیجیتالی بر روی این نمونه، اثر عمق عیب بر روی تشخیص‌پذیری عیوب صفحه‌ای در این ماده مشخص خواهد شد. در شکل ۵ نمونه از جنس پلکسی‌گلاس نشان داده شده است.

برشنگاری یا تداخل‌سنجی لیزری قابلیت بازرسی قطعات رنگ شده را نیز دارا می‌باشد. به منظور بهبود بازتاب نور از سطح نمونه‌ها و جلوگیری از پخش شدن آنها و در نتیجه کاهش کیفیت الگوهای لکه‌ای، سطح نمونه‌ها به کمک رنگ طوسی مات مورد رنگ‌آمیزی قرار می‌گیرد.

اندازه برش نیز یکی دیگر از پارامترهای مهم و تاثیرگذار در نتایج آزمون برشنگاری می‌باشد. به طور کلی هرچه اندازه برش مورد استفاده به اندازه عیب احتمالی موجود نزدیک‌تر باشد، نتایج حاصله دقیق‌تر و با کیفیت‌تر می‌باشند. در این آزمون از اندازه برش‌های مختلف برای بررسی اثر آن بر روی نتایج استفاده شده است. در جدول ۱ شرایط انجام آزمون بر روی نمونه‌ها بیان شده است.

جدول ۱- شرایط انجام آزمون بر روی نمونه‌های پلیمری از جنسهای

پلی اتیلن و پلیکسی گلاس		
جنس	مدت زمان تحریک S	اندازه برش mm
پلی اتیلن	۵، ۴، ۳، ۲، ۱	۱۵، ۱۲، ۸
پلی اتیلن	۵، ۳، ۲	۱۰، ۷، ۵
پلیکسی گلاس	۵، ۲	۱۲، ۱۰، ۸

۵- ارزیابی نتایج

پس از آماده‌سازی چیدمان، نمونه‌ها به منظور مدلسازی تحت بار بودن قطعه به وسیله دستگاه کشش تحت بارگذاری کششی قرار گرفت. پس از تابش پرتوی لیزر بر روی سطح نمونه تصویر تداخلی اول که با نام تصویر مرجع یا الگوی لکه‌ای برشی مرجع شناخته می‌شود، اخذ می‌گردد. پس از آن نمونه به وسیله پروژکتور تحت تابش قرار می‌گیرد و تصویر تداخلی ثانویه اخذ می‌گردد. حرارت تابانده شده به نمونه منجر به انبساط و در نتیجه جابجایی سطح آن می‌شود و در نتیجه، در نقاطی که عیب وجود داشته باشد تمرکز کرنش ایجاد می‌گردد. از طریق محاسبه تفاضل شدت نور تصاویر تداخلی مرجع و ثانویه، هاله‌های برشنگاری حاصل می‌شود. با بررسی و تحلیل این هاله‌ها عیوب احتمالی موجود از نظر موقعیت و اندازه قابل شناسایی می‌باشند.

هاله‌های حاصل از آزمون برشنگاری دارای نویزهای شدیدی می‌باشند. به منظور بهبود کیفیت هاله‌ها می‌توان از فیلترهای نرم‌افزاری رایج استفاده نمود. در این مقاله از فیلتر یکسان سازی باند هیس‌توگرام^۱ و همچنین فیلترینگ با الگوریتم سابل برای بهبود لبه‌های تصاویر استفاده شده است. یکی دیگر از راه‌های بررسی نتایج آزمون برشنگاری استفاده از نقشه فاز هاله‌های برشنگاری می‌باشد. نقشه فاز حاوی اطلاعات جابجایی نقاط سطح نمونه می‌باشد که با استخراج آن می‌توان گرادینان جابجایی سطح را مستقیماً مورد محاسبه قرار داد. نقشه فازی در مقایسه با هاله برشنگاری نیاز به زمان بیشتری برای پردازش تصاویر و استخراج دارد. در صورتی که هاله اولیه یا نسخه فیلتر شده آن کیفیت مناسبی داشته باشد از نقشه فازی صرف نظر می‌شود.

با افزایش میزان بارگذاری بر روی نمونه‌ها در یک اندازه برش ثابت، تعداد هاله‌های برشنگاری افزایش می‌یابد که این مساله به تشخیص بهتر عیوب احتمالی کمک می‌کند. اما در صورت که هاله‌ها بیش از اندازه زیاد شوند، در هم فرو رفته و محو می‌شوند و بنابراین عیب غیرقابل تشخیص می‌شود.



شکل ۴- نمونه پلی اتیلن



شکل ۵- نمونه از جنس پلیکسی گلاس

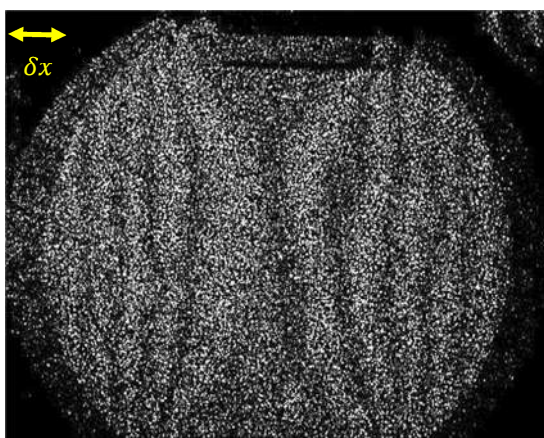
پس از تابش پرتوی لیزر به سطح نمونه، پرتوی بازتابی از سطح وارد مجموعه تداخل‌سنج مایکلسون می‌شود. پرتوهای تداخلی خروجی توسط مجموعه تصویربرداری اخذ می‌شوند. نیم‌آینه‌های مورد استفاده در مجموعه تداخل‌سنج نیز دارای سطح پوشیده از نقره می‌باشند.

برای منبع نور نیز از یک لیزر دیودی ۵۰ میلی‌واتی با طول موج ۶۳۲،۸ نانومتر استفاده شده است. پرتو نور لیزر توسط یک لنز واگراکننده بر روی سطح نمونه تابانده می‌شود. در انتخاب لیزر بایستی به توان آن دقت نمود. هرچه توان لیزر بالاتر باشد، سطح بیشتری از نمونه توسط آن روشن می‌شود. از طرفی اگر توان لیزر بیش از حد بالا باشد تداخل پرتوهای بازتابی با مشکل مواجه شده و تصویر اصطلاحاً سفید می‌گردد. یکی از مهم‌ترین مسائل در انجام آزمون غیرمخرب برشنگاری، انتخاب سیستم تحریک به منظور آشکارسازی عیوب مورد نظر می‌باشد. برای بررسی عیوب صفحه‌ای در مواد پلیمری سیستم‌های تحریک خلانسیبی و گرمایی بهترین نتایج را حاصل می‌کنند. در این مقاله با استفاده از یک پروژکتور با لامپ مدادی نمونه‌های مورد نظر تحت تحریک حرارتی قرار می‌گیرند. انتخاب مدت زمان تحریک و جهت تحریک نمونه از مهم‌ترین چالش‌ها در استفاده از سیستم تحریک گرمایی می‌باشد. برای بررسی این پارامترها نمونه‌های حاضر از دو جهت مقابل و پشت تحت حرارت‌دهی در مدت زمان‌های مختلف قرار گرفته و نتایج حاصل با یکدیگر مقایسه می‌شود.

¹ Histogram equalization

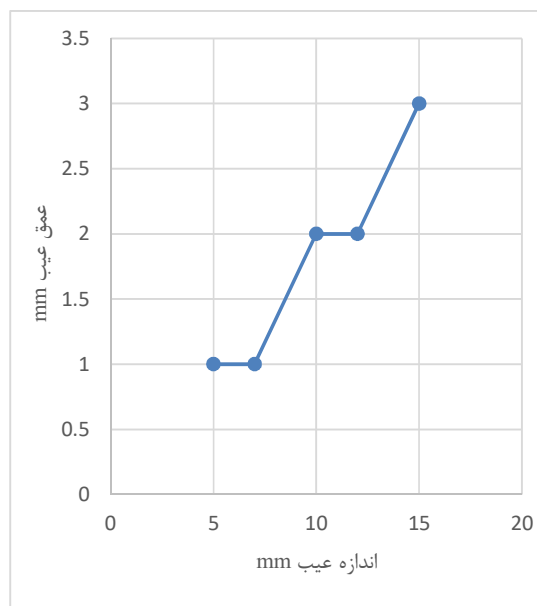
است که این مساله تشخیص عیب را آسان تر می کند. با افزایش عمق نمونه تشخیص پذیری عیوب با قطر کوچک تر کاهش می یابد. به گونه ای که عیب با قطر ۸ میلیمتر در عمق ۲ میلیمتری هاله واضحی در نتایج نشان نمی دهد و این مساله تشخیص آن را با دشواری همراه می کند. در شکل ۶ محدوده تشخیص پذیری عیوب صفحه ای در ماده پلی اتیلن بر اساس آزمون های صورت گرفته نشان داده شده است.

به منظور بررسی اثر نحوه تحریک بر روی نتایج آزمون، نمونه از جنس پلکسی گلاس از دو سمت پشت و مقابل تحت تحریک حرارتی قرار می گیرد. سمت مقابل قطعه جهتی است که تصویر برداری از آن سمت انجام می گیرد. با تحریک گرمایی نمونه از یک سمت، عیوبی که به سمت تحت تابش نزدیک تر باشند شناسایی می گردد. در حالیکه چنانچه دسترسی مناسبی به سمت دیگر قطعه وجود داشته باشد، می توان با انجام بارگذاری از سمت مقابل (مثلا در لوله ها بارگذاری از داخل لوله)، نتایج بهتری را به دست آورد. نتایج حاصل از این دو استراتژی در نمونه های مورد نظر در این مقاله، دو حالت در اندازه برش و مدت زمان تحریک یکسان در شکل ۷ نشان داده شده است. همانطور که از تصاویر مشاهده می گردد، زمانی که نمونه از سطح مقابل (جهت تصویر برداری) تحت تحریک گرمایی قرار می گیرد، هاله های برشنگاری به خوبی در نتیجه آزمون نمایان نمی شود. در مقابل با تحریک نمونه از پشت هاله های با کیفیت تری ظاهر می گردد و تشخیص اندازه و عمق عیب نیز ساده تر می گردد. تخمین اندازه عیب به صورت تقریبی و با تشخیص رمز هاله های متمرکز شده امکان پذیر است. باعث اختلاف گرادیان جابجایی بیشتری در سطح نمونه و در نتیجه نمایان شدن هاله های برشنگاری بهتر می گردد. این مساله در تحریک نمونه های پلی اتیلن نیز صادق می باشد.



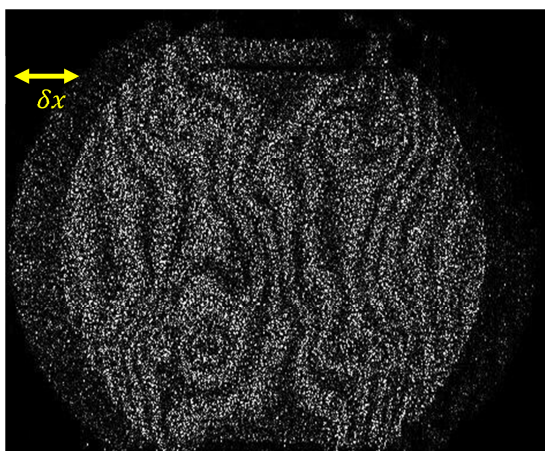
(الف)

اندازه برش نیز تأثیری مشابه بر روی نتایج آزمون دارد. بر اساس رابطه (۶) در بار ثابت، مشتق جابجایی ثابت خواهد بود. با افزایش اندازه برش در بار ثابت، فاز تصویر افزایش می یابد. به بیان دیگر تعداد هاله های برشنگاری در بار ثابت با افزایش اندازه برش، افزایش می یابد. براساس شرایط مختلف آزمون که در جدول ۱ عنوان شد، آزمون ها انجام و نتایج آنها به صورت هاله های برشنگاری استخراج و ارزیابی شد. در هر مورد محدوده تشخیص پذیری شامل محدوده ای است که با بارگذاری کمتر، هاله ها به صورت مناسب تشکیل نشده و عیوب تشخیص داده نمی شود. در نمونه هایی که هاله تشکیل نمی شود، تصویر شبیه شکل ۲ و به صورت لکه ای (و نه الگوی هاله ای) مشاهده می گردد. همچنین بارگذاری بزرگتر از این محدوده با ایجاد هاله های اضافی، تشخیص پذیری را از بین می برد. در شکل ۶ نتایج کلی آزمون بر روی نمونه تحت بارگذاری های مختلف نشان داده شده است. نقاط این نمودار نشان دهنده تشخیص پذیر بودن عیب با اندازه ذکر شده در عمق مربوطه هستند. همچنین نمونه نتایج و هاله های به دست آمده در ادامه و در شکل های ۸، ۷ و ۹ نشان داده شده است. مطابق با انتظار، با تغییر در اندازه برش یا مدت زمان تحریک می توان عیوب موجود در نمونه را مشاهده نمود. این کار با تغییرات اندازه برش و بارگذاری در محدوده های ذکر شده انجام شد.

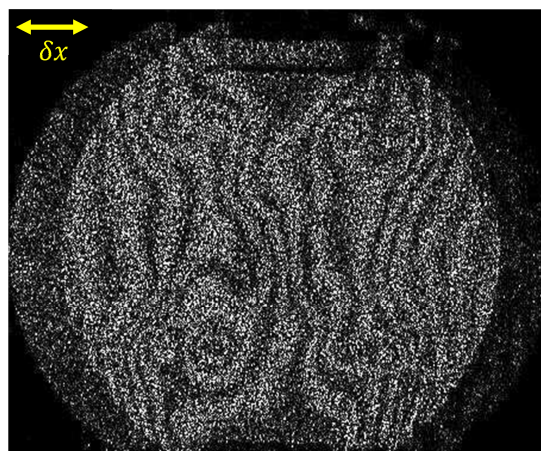


شکل ۶- محدوده تشخیص پذیری عیوب بر اساس آزمون غیرمخرب برشنگاری بر روی نمونه از جنس پلی اتیلن

برای بررسی حد تشخیص پذیری عیوب در نمونه مورد آزمون، نمونه تحت اندازه برش و مدت زمان های تحریک مختلف، مورد ارزیابی غیرمخرب قرار می گیرد. نتایج حاکی از آن است که عیوب موجود در نزدیکی سطح به خوبی قابل تشخیص می باشند. در شکل ۷ نتایج حاصل از انجام آزمون بر روی نمونه پلی اتیلن نشان داده شده است. همانطور که در تصویر مشاهده می گردد، عیب موجود در عمق ۱ میلیمتری به خوبی قابل تشخیص می باشد. در بین عیوب موجود در این عمق نیز، عیب با اندازه بزرگتر هاله های بزرگتری نیز تشکیل داده

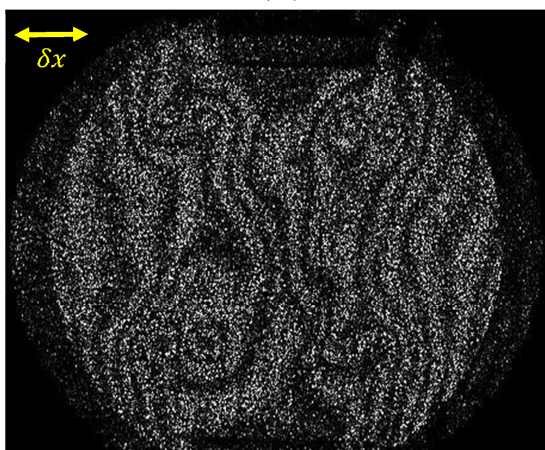


(الف)

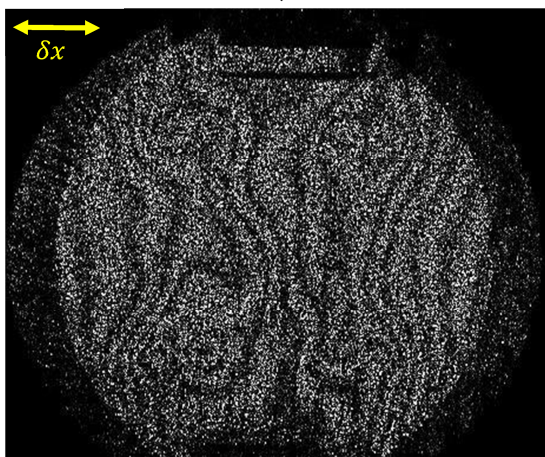


(ب)

شکل ۷- بررسی اثر نحوه تحریک در نمونه پلی اتیلن (الف) تحریک از مقابل (ب) تحریک از پشت نمونه



(ب)



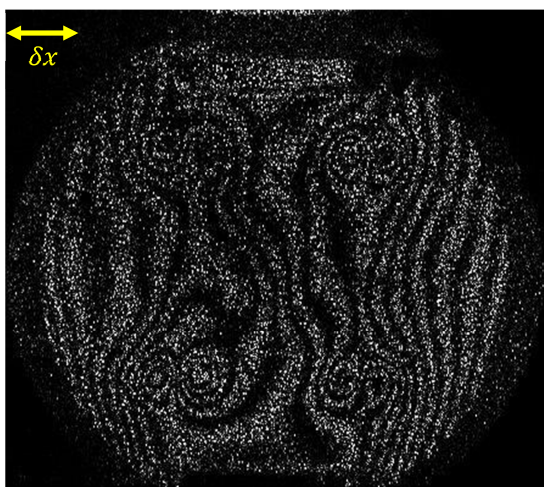
(ج)

شکل ۸- بررسی اثر اندازه برش بر روی نتایج نمونه پلکسی گلاس
(الف) اندازه برش ۸ میلیمتر (ب) ۱۰ میلیمتر (ج) ۱۲ میلیمتر

پارامتر دیگری که مورد بررسی قرار می‌گیرد اندازه برش می‌باشد. اندازه برش، پارامتر بسیار مهمی در آزمون برشنگاری است که دقت و حساسیت اندازه‌گیری به شدت به آن وابسته است. به طور کلی برای به دست آوردن دقت بالا در اندازه‌گیری شیب یا گرادیان جابجایی و یا کرنش‌ها، اندازه برش بایستی بسیار کوچک انتخاب گردد تا تخمین $\frac{\delta w}{\delta x}$ به $\frac{\partial w}{\partial x}$ نزدیک شو. از طرفی انتخاب اندازه برش کوچک، منجر به تفکیک پذیری کم هاله-های برشنگاری و کاهش وضوح تصاویر می‌گردد. از این رو در آزمون‌های برشنگاری انتخاب اندازه مناسب برش که همزمان با کاهش خطا و افزایش دقت، نتایجی با کیفیت قابل قبول ایجاد کند بسیار مهم است.

به منظور بررسی اثر این پارامتر بر روی نتایج آزمون برشنگاری، نمونه از جنس پلکسی‌گلاس در سه اندازه برش متفاوت با مدت زمان تحریک یکسان مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. نتایج حاصل از این آزمون در شکل ۸ نشان داده شده است. همانطور که از نتایج نشان داده شده در شکل ۸ مشاهده می‌گردد، با افزایش اندازه برش، تعداد هاله‌های برشنگاری افزایش می‌یابد. این مساله به تشخیص عیوب احتمالی کمک می‌کند، اما از طرفی باعث پایین آمدن دقت روش و دشواری تشخیص اندازه عیب خواهد شد.

از این رو و با توجه به شکلهای نتیجه گرفته می‌شود که هرچه اندازه برش بزرگتر باشد، هاله‌های پروانه‌ای شکل بزرگتر می‌شوند و از طرفی اندازه برش روی حساسیت چیدمان تاثیرگذار می‌باشد. با بررسی و جمع بندی نتایج به دست آمده از آزمون‌های برشنگاری صورت گرفته، تخمین زده می‌شود که اندازه برش بایستی در حدود اندازه عیب



(ب)

شکل ۹- بررسی اثر مدت زمان تحریک بر روی نمونه پلکسی گلاس
(الف) ۲ ثانیه (ب) ۵ ثانیه

از این رو می‌توان نتیجه گرفت که اندازه بهینه بارگذاری نیاز است تا علاوه بر آشکار پذیرسازی عیوب، از ایجاد تداخل هاله‌ها و از بین رفتن کیفیت نتایج جلوگیری شود. این میزان بارگذاری در نمونه‌های مورد نظر در این مقاله حداقل ۲ و حداکثر ۵ ثانیه برآورد می‌شود. لکن برای هر نمونه آزمون بایستی با در نظر گرفتن جنس و شرایط تحریک، مدت زمان مناسب استخراج گردد. این کار نیازمند انجام آزمونهای کالیبراسیون اولیه برای هر جنس است.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله قابلیت روش تداخل‌سنجی لیزری یا برشنگاری در تشخیص عیوب صفحه‌ای در مواد پلیمری مورد بررسی قرار گرفت. توانایی روش‌های نوین آزمون غیرمخرب به خصوص روش‌های نوری باعث شده است که امروزه در صنایع مختلف توجه ویژه‌ای به این روش‌ها گردد.

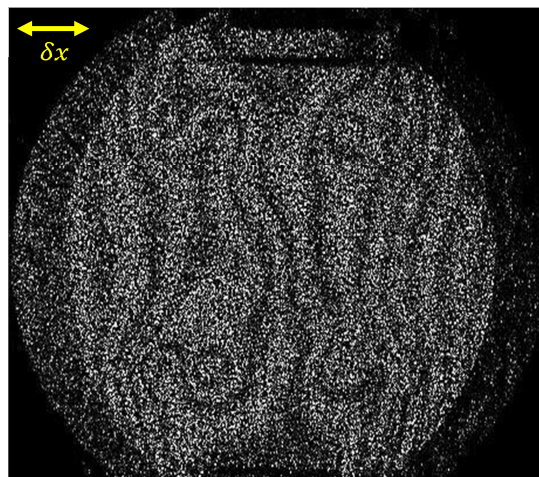
بر اساس تحقیقات صورت گرفته در این مقاله، تداخل‌سنجی لیزری یا برشنگاری روشی کارآمد برای ارزیابی عیوب صفحه‌ای در مواد پلیمری می‌باشد. با استفاده از سیستم تحریک حرارتی عیوب موجود در نمونه‌های پلی‌اتیلن و پلکسی گلاس به خوبی مورد تشخیص و ارزیابی قرار گرفت. هرچه عیوب به سطح نمونه نزدیک‌تر یا اندازه آنها بزرگتر باشد، قابلیت تشخیص بالاتری توسط برشنگاری برای تشخیص آنها وجود خواهد داشت. در بین پارامترهای موثر، وابستگی تشخیص‌پذیری عیوب به عمق آنها بیشتر از وابستگی به اندازه آنها می‌باشد.

در سیستم تحریک حرارتی برای شناسایی عیوب، بهترین نتایج با زمان خنک شدن چند ثانیه‌ای حاصل می‌گردد. همچنین افزایش زمان گرمادهی نیز منجر به افزایش تعداد هاله‌ها می‌گردد. بهتر است زمان گرمادهی محدودتر باشد. تحریک نمونه از پشت در مقایسه با تحریک از مقابل نتایج بهتری حاصل نمود. لذا در نمونه‌هایی که دسترسی به هر دو سمت قطعه وجود دارد بهتر است آزمون از هر دو سمت انجام گیرد. به طور کلی تحریک از هر دو طرفه هاله‌های با کیفیت‌تری حاصل می‌-

احتمالی باشد تا بهترین و با کیفیت‌ترین نتایج از آزمون حاصل گردد. نوع و عمق عیوب اثر زیادی بر روی اندازه برش ندارد و همچنین از آنجا که در ابتدا اندازه عیوب مشخص نیست، بهتر است آزمون با اندازه برشهای مختلف تکرار شود تا محدوده وسعتی از عیوب پوشش داده شوند.

اندازه بار گرمایی یا همان مدت زمان تحریک نیز یکی از پارامترهای بسیار مهم در انجام آزمون برشنگاری می‌باشد. در سیستم تحریک گرمایی، اندازه بار بیانگر مدت زمان تحریک می‌باشد. از طرفی در زمان تصویربرداری هر چه فاصله زمانی بین تصویر مرجع (تصویر اولیه قبل از بارگذاری) و تصویر ثانویه (تصویر در زمان بارگذاری) بیشتر باشد، اندازه جابجایی سطح بیشتر خواهد بود. این مساله به صورت افزایش هاله‌های برشنگاری در نتایج ظاهر می‌گردد. از این رو انتخاب مدت زمان تحریک مناسب در نتایج حاصل از آزمون تاثیر به سزایی دارد.

در شکل ۹ نتایج آزمون برشنگاری بر روی نمونه پلکسی گلاس تحت دو اندازه بار متفاوت و با سایر پارامترهای یکسان نشان داده شده است. شکل ۹ الف مربوط به تابش گرمایی ۲ ثانیه‌ای و شکل ۹ ب مربوط به تابش ۵ ثانیه‌ای می‌باشد. تصویر مرجع و ثانویه در زمان‌های یکسانی برای دو حالت اخذ شده‌اند. همانطور که از تصاویر مشاهده می‌گردد، افزایش اندازه بار در زمان تصویربرداری مشابه، منجر به افزایش تعداد هاله‌های برشنگاری می‌گردد. این افزایش بار بایستی به گونه‌ای باشد که تعداد مناسبی از هاله‌ها برای تشخیص عیب تشکیل گردد. بر اساس نتایج آزمون‌های صورت گرفته تخمین زده می‌شود که در حالت کلی هرچه عیوب موجود در نمونه عمیق‌تر باشند، به مدت زمان تحریک بیشتری برای آشکارسازی آنها نیاز می‌باشد. از طرفی هرچه عیوب در سطحی تر باشند، با تحریک گرمایی کمتری می‌توان هاله‌های برشنگاری مربوط به عیب را در تصاویر مشاهده نمود.



(الف)

کند. همچنین دقت اندازه گیری عیوب به اندازه برش وابسته است. بهترین نتایج زمانی حاصل شدند که اندازه عیب تقریباً با اندازه برش برابر در نظر گرفته می شود.

۷- مراجع

- [1] Leendertz J., Interferometric displacement measurement on scattering surfaces utilizing speckle effect, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 3, No. 3, p. 214, 1970.
- [2] Leendertz J. and Butters J., An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments, *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, Vol. 6, no. 11, p. 1107, 1973.
- [3] Hung Y. Y., A speckle-shearing interferometer: a tool for measuring derivatives of surface displacements, *Optics Communications*, Vol. 11, No. 2, pp. 132-135, 1974.
- [4] Hung Y., Shearography: a new optical method for strain measurement and nondestructive testing, *Optical Engineering*, Vol. 21, No. 3, p. 213391, 1982.
- [5] Hung Y., Applications of digital shearography for testing of composite structures, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 30, No. 7, pp. 765-773, 1999.
- [6] Choi S. W. and Lee J. H., Nondestructive evaluation of internal defects for composite materials by using shearography, *Key engineering materials*, 2004, Vol. 270: Trans Tech Publ, pp. 781-786 .
- [7] Liu Z., Gao J., Xie H. and Wallace P., NDT capability of digital shearography for different materials, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 49, No. 12, pp. 1462-1469, 2011.
- [8] Akbari D., Soltani N. and Farahani M., 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.
- [9] Barmouz M., Behraves A. H., Reshadi F. and Soltani N., Assessment of defect detection in wood-plastic composites via shearography method, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 29, No. 1, pp. 28-36, 2016.
- [10] Akbari D. and Asemani H., Analysis of laser interferometry parameters in the evaluation of defects in the polymer matrix composites, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 9, pp. 372-380, 2017.