http://mme.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

تیر ۱۳۹۲، دوره ۱۳ شماره ٤ ص ص ۳۶-٤۵

مقاله پژوهشی کامل
تاریخ دریافت ۹۱/۱۰/۱۰
تاریخ پذیرش ۹۱/۱۱/۱۸
ارائه در سایت ۹۱/۲/۳۰

استفاده از روش برش‌نگاری دیجیتالی در انجام آزمون‌های غیر مخرب به کمک بارگذاری حرارتی

داود اکبری[۱*]، ناصر سلطانی[۲]، فرشید رشادی[۳]

۱- مربی مهندسی مکانیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران
۲- استاد مهندسی مکانیک، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، تهران
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشکده فنی دانشگاه تهران، تهران
* تهران، صندوق پستی ۶۱۱۱۴۰۵۵، daakbari@ut.ac.ir

چکیده- برش‌نگاری دیجیتالی یکی از روش‌های نوری اندازه‌گیری کرنش‌های سطحی است که می‌توان از آن به طور مؤثری در انجام آزمون‌های غیر مخرب برای شناسایی عیوب در مواد مختلف به خصوص مواد مرکب و پلیمری بهره برد. در این مقاله، روش تجربی برش‌نگاری دیجیتالی و کاربرد آن در تشخیص عیوب داخلی در قطعات پلیمری، با استفاده از بارگذاری حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور پس از معرفی روش برش‌نگاری و روابط مربوطه، یک چیدمان مطلوب جهت انجام آزمون‌های غیر مخرب معرفی و ایجاد شده است و با انجام آزمون‌های مختلف بر روی یک نمونه از جنس پلی اتیلن سبک، عملکرد چیدمان مورد نظر ارزیابی شده است. پس از تأیید کارایی روش در تشخیص عیوب، اثر تغییر نحوه بارگذاری حرارتی و اندازه برش در نتایج حاصل از آزمون بررسی شده است. نتایج نشان می‌دهند که انجام بارگذاری حرارتی به صورت دو طرفه، اثرات خمش ثانویه را خنثی کرده و منجر به ایجاد هاله‌های واضح‌تری می‌شوند. از طرفی با انتخاب اندازه برش در محدودهٔ تقریبی برابر با اندازه عیوب، بهترین نتایج هم از لحاظ کمی و هم از لحاظ کیفی حاصل می‌شود.

کلیدواژگان: برش‌نگاری دیجیتالی، آزمون‌های غیر مخرب، اندازه برش، بارگذاری حرارتی.

Application of digital shearography for non destructive testing of materials with thermal loading

D. Akbari[1*], N. Soltani[2], F. Reshadi[3]

1- Instructor, Mech. Eng., Islamic Azad University, Central Branch, Tehran, Iran.
2- Prof., Mech. Eng., Tehran Univ., Tehran, Iran.
3- MSc. Student, Mech. Eng., Tehran Univ., Tehran, Iran.
* P. O. B. 61114055 Tehran, Iran. Daakbari@ut.ac.ir

Abstract- Shearography has proved to be a highly effective nondestructive testing (NDT) method, especially when it comes to composite and polymer materials used in automotive, aerospace engineering, nuclear and oil industries. Although its application in material testing and material research already has achieved acceptance in research, its applications need a highly considerations in limitations and its parameters. In this paper the application of digital shearography in the defect detection of polymer materials is studied. In this regard, a proper set-up of shearography is presented. A polyethylene plate with several defects in different sizes and depths have been made and tested with the presented set-up. The shearograms then have been compared to evaluate the shearographic system in defect detection. The effects of shear size and system of thermal loading have also been studied.

Keywords: Digital Shearography, Non Destractive Testing, Sheare Size, Thermal Loading.

۱- مقدمه

وجود انواع عیوب در مجموعه‌ها و قطعات مهندسی، یکی از دلایل عمده شکست نابهنگام و تخریب تجهیزات در حین کارکرد آنها است. در ماده یا قطعه درحین ساخت، انواع عیوب با اندازه‌های مختلف ممکن است ایجاد شود که ماهیت و اندازه آنها، بر کارکرد آتی قطعه تأثیر گذار است. عیوب دیگری مانند ترک‌های ناشی از خستگی و خوردگی، در حین کارکرد قطعه نیز ممکن است بوجود آید. تشخیص و ارزیابی اندازه، شکل و موقعیت این عیوب در کنترل کارکرد صحیح قطعات اهمیت بسیار زیادی دارد.

تجهیزات کاملی برای روش‌های مختلف بازرسی، در طول سال‌ها به‌وجود آمده و گسترش یافته است. روش‌های جدیدی نیز برای کمک به فرایند تشخیصی قطعات و مجموعه‌های سالم و قابل اعتماد درحال تکوین است. از روش‌های سنجش و آزمون غیرمخرب برای بررسی کیفی تولیدات و همچنین به عنوان بخشی از برنامه‌های بازرسی در تعمیرات عادی قطعات در حین کار به طور گسترده در صنعت استفاده می‌شود. یکی از انواع این روش‌ها، روش‌هایی هستند که مبتنی بر قوانین نوری تنش و کرنش می‌باشند. در این روش‌ها با اعمال بارگذاری بر روی نمونه مورد بازرسی، و با بررسی نواحی که در آن تمرکز کرنش ایجاد می‌شود، محل و بعضاً اندازه و نوع عیوب تعیین می‌شوند. این روش‌ها عبارتند از: فتوالاستیسیته[1]، موری[2]، هولوگرافی[3]، تداخل‌سنجی دیجیتالی[4] و برش‌نگاری[5].

برش‌نگاری یک روش نوری غیرمخرب و غیرتماسی است که با بررسی میدان کرنش ایجاد شده در قطعه، عیوب موجود در منطقه بازرسی را به یک باره تعیین می‌کند. به علاوه در این روش بر خلاف سایر روش‌های نوری، به دلیل اینکه پرتوهایی که ایجاد تداخل می‌کنند مسیری تقریبا مشابه را طی می‌کنند، حساسیت سیستم نسبت به ارتعاشات بسیار کاهش یافته است.

روند رو به رشد استفاده از مواد غیر فلزی نظیر مواد مرکب و مواد پلیمری در صنایع، از جمله صنایع حساسی چون صنایع هوا- فضا، صنایع نیروگاهی و صنایع هسته‌ای، لزوم توسعه روش‌های مناسب جهت انجام آزمون‌های غیرمخرب را در این صنایع به خوبی روشن می‌سازد. از طرفی به دلیل برخی خواص این مواد مانند ناهمگن بودن و محدودیت‌هایی مانند غیرمغناطیس و نارسانا بودن، به‌کارگیری بسیاری از روش‌های انجام آزمون‌های غیرمخرب در این گونه مواد بسیار محدود و در برخی موارد ناممکن است. از طرفی به دلیل مزایای روش برش‌نگاری، نظیر امکان انجام آزمون با روش غیرتماسی، سرعت بالا، هزینه‌های کمتر و همچنین امکان به‌کارگیری این روش در انواع مواد، انجام آزمون غیرمخرب با روش‌های نوری اهمیت زیادی پیدا کرده و در سال‌های اخیر تحقیقات فراوانی برای به‌کار گیری این روش‌ها انجام شده است.

برای نخستین بار در سال ۱۹۷۳ ، لیندرتز و باترز از روش برش‌نگاری جهت یافتن ممان خمشی استفاده کردند [۱]. در این روش آنها ابتدا میزان شیب سطح را با استفاده از این روش تعیین کرده و میزان ممان خمشی در یک سطح نازک را بدست آوردند. هونگ وتیلور نیز مشتقات جابجایی داخل صفحه را با استفاده از این روش در همان سال بدست آوردند [۲]. برای اولین بار در سال ۱۹۸۰، ناکاداتا و یا تاگایی به جای استفاده از تصاویری که روی فیلم‌های عکاسی ثبت می‌شد در برش‌نگاری از دوربین الکترونیکی و تصویر دیجیتالی استفاده کردند [۳]. تو و همکاران در سال ۱۹۹۰ توانستند با استفاده از برش‌نگاری در صفحات کامپوزیتی که با الیاف شیشه‌ای تقویت شده بودند، اندازه و عمق ناپیوستگی‌ها را محاسبه کنند[۴]. بدین ترتیب که از مرزهای الگوهای هاله‌ای ناهنجار ناپیوستگی‌ها واز شماره هاله‌ها عمق ناپیوستگی‌ها را به دست آوردند. هونگ و همکاران در سال ۱۹۹۶ با استفاده از روش جابجایی فاز ۲ پرتوئی، توانستند کرنش‌های درون صفحه‌ای را محاسبه کنند [۵]. استینشن در سال ۱۹۹۹ با استفاده از روش جابجایی فاز در برش‌نگاری توزیع کرنش در مواد همگن و غیرهمگن را محاسبه نمود [۶]. گروز و همکاران در سال ۲۰۰۴ با بدست آوردن میدان‌های کرنش در اطراف یک ترک خستگی با استفاده از روش برش‌نگاری عیوب یک قطعه در ماشینکاری دوار را بررسی نمودند، آنها برای این کار از یک منبع لیزر با تابش چند مرحله‌ای استفاده کردند تا در هر مرحله بارگذاری، از شیئی یک تصویر ثابت تهیه کنند[۷]. چن و همکاران در سال ۲۰۰۶ با استفاده از برش‌نگاری عیوب سازه‌های ساندویچی را با روش جابجایی فاز بدست آوردند، تا از این طریق بار بحرانی جهت

1. Photoelasticity
2. Moiré Interferometry
3. Holography
4. Speckle Pattern Interferometry
5. Shearography

کمانش این سازه‌ها را بیابند [۸]. در سال ۲۰۰۷ لیوینگ استون و همکارانش با استفاده از روش برش‌نگاری به عنوان یک روش آزمون غیرمخرب، عمق، اندازه و جهت رشد ترک‌ها در بتون‌ها و سازه‌های بتونی را بدست آوردند [۹]. در سال ۲۰۰۹ ژو و همکارانش برای اولین بار از روش برش‌نگاری و روش جابجایی فاز برای یافتن عیوب در سازه‌ها و صفحه‌های چوبی استفاده کردند [۱۰]. حمیدی و سلطانی در سال ۲۰۰۹ برای محاسبه ضریب شدت تنش در مود بازشوندگی در ترک‌های لبه‌ای یک نمونه ماده مرکب از روش برش‌نگاری دیجیتالی استفاده کردند [۱۱]. تحقیقاتی نیز برای بررسی و معرفی سیستم‌ها و چیدمان‌های مناسب برای بهینه‌سازی روش برش‌نگاری در تشخیص و تعیین عیوب و ترک‌ها صورت گرفته است. در یک نمونه، سانتوز و همکارانش یک چیدمان مناسب برای یافتن عیوب ایجاد شده در مواد مرکب پیشنهاد کرده‌اند. در این کار، آنها از بارگذاری گذرا جهت تحریک عیوب و ایجاد جابجایی و در نهایت ثبت دیجیتالی تمرکز کرنش در اطراف عیوب استفاده کردند [۱۲].

در مقاله حاضر از برش‌نگاری دیجیتالی برای تشخیص عیوب معرفی و استفاده شده است. در این راستا، در ابتدا با بررسی کلیات و تئوری روش برش‌نگاری دیجیتالی، کارکرد این روش در تشخیص نواحی دارای تمرکز کرنش تعیین شده است. با ایجاد ارتباط مستقیمی بین تمرکز کرنش و عیوب، با استفاده از تحریک ناپیوستگی‌ها با اعمال بارگذاری حرارتی در قطعات، نواحی دارای عیب به صورت هاله‌های هم کرنش مشاهده می‌شوند. با ایجاد عیوب نمونه‌ای در یک قطعه پلیمری از جنس پلی‌اتیلن سبک، کارایی این روش در تشخیص عیوب با اندازه و عمق‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته است. همچنین با بررسی پارامترهایی نظیر اندازه برش در چیدمان برش‌نگاری و همچنین نحوه بارگذاری حرارتی، اثر این پارامترها در کیفیت و وضوح هاله‌های برش‌نگاری ارزیابی شده است.

۲- تئوری برش‌نگاری

اساس روش برش‌نگاری بر مبنای تداخل دو جبهه نور بازتابش شده از سطح جسم است که در معرض تابش نور لیزر قرار دارد. تصویر حاصل یک تصویر لکه‌دار است که با کم کردن شدت نور ذخیره شده قبل و بعد از تغییر شکل، برهم نهی و پردازش تصویر یک تصویر هاله‌دار از سطح ایجاد می‌شود که نشان دهنده نواحی هم کرنش در سطح جسم می‌باشند. در سال‌های اخیر با پیشرفت‌های صورت گرفته در حوزه نرم افزار و امکان ثبت تصاویر با کیفیت بالا توسط دوربین‌های CCD، برش‌نگاری به صورت دیجیتالی انجام می‌گیرد.

چیدمان برش‌نگاری دیجیتالی در شکل ۱ نشان داده شده است. در حین انجام آزمون، نمونه مورد آزمایش توسط نور تکرنگ لیزر روشن می‌شود و نور بازتابیده شده از سطح جسم توسط دوربین CCD ثبت می‌شود.

به دلیل قرارگیری یک تداخلگر مایکلسون در مسیر نور، تصویر در مسیر بازتابش دچار یک برش جانبی می‌شود و بنابراین تصویر ثبت شده در دوربین به صورت دوتایی مشاهده می‌شود.

شدت نور ثبت شده در صفحه دوربین (I)، ناشی از تداخل دو تصویر برش خورده برابر خواهد بود با [۱]:

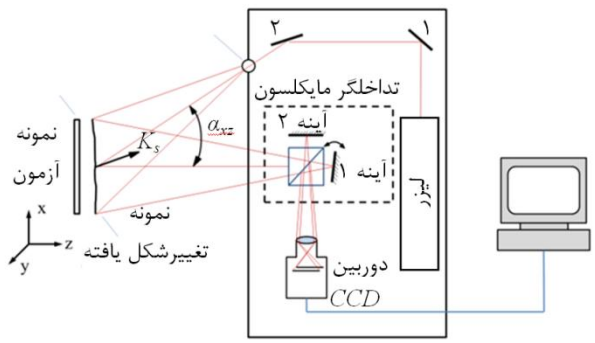
$$I = 2I_0\left[1+\gamma\cos\varphi\right] \qquad (۱)$$

که در آن I شدت نور تداخلی، I_0 شدت نور متوسط زمینه، γ مدول تداخل و φ اختلاف فاز تصادفی بین تصاویر برش خورده در هر نقطه است.

پس از اعمال تنش و درنتیجه ایجاد تغییر شکل در نمونه، شدت نور تداخلی در هر نقطه به صورت رابطه (۲) تغییر می‌کند:

$$I' = 2I_0\left[1+\gamma\cos\left(\phi+\Delta\right)\right] \qquad (۲)$$

که در این رابطه Δ تغییر فاز هر نقطه در اثر تغییرشکل نسبی ناشی از تنش اعمالی است.



شکل ۱ چیدمان برش‌نگاری دیجیتالی

با محاسبه اختلاف بین شدت نور قبل و بعد از بارگذاری،

هاله‌های برش‌نگاری با شدت نور جدیدی به صورت رابطه (۳) حاصل می‌شود.

$$I^{'} - I = 2I_0\gamma\left[\cos\left(\phi+\Delta\right)-\cos\phi\right] \qquad (۳)$$

چنانچه $\Delta = 2N\pi$ که N=0,1,2,.. شماره هاله را مشخص می‌کند، مقدار $I^{'} - I$ صفر شده و هاله‌های تاریک مشاهده می‌شود. بنابراین واضح است که می‌توان اختلاف فاز بین هاله‌ها را از شماره و تعداد هاله‌ها تعیین کرد.

از آنجا که اختلاف فاز نسبی Δ ناشی از اختلاف مسیر نوری هر پرتو تابیده شده از سطح جسم تا صفحه دوربین است، می‌توان با ایجاد ارتباط بین این اختلاف مسیر با جابجایی سطحی جسم، ارتباط مقدار کرنش سطحی با اختلاف فاز را محاسبه کرد. اگر نور لیزر در صفحه xoz قرار داشته باشد، چنانچه برش جانبی در راستای x با اندازه δxاعمال شود، تغییر فاز نسبی Δ برابر خواهد بود با [۱۳]:

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda}\left[\frac{\partial u}{\partial x}\sin\alpha_{xoz} + \frac{\partial w}{\partial x}\left(1+\cos\alpha_{xoz}\right)\right]\delta x \qquad (۴)$$

که در آن λ طول موج لیزر، α زاویه تابش لیزر، u و w اجزای جابجایی در راستای x و z هستند.

چنانچه برش در جهت y با اندازه δy اعمال شود، تغییر فاز نسبی Δ از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda}\left[\frac{\partial u}{\partial y}\sin\alpha_{xoz} + \frac{\partial w}{\partial y}\left(1+\cos\alpha_{xoz}\right)\right]\delta y \qquad (۵)$$

اگر تابش نور لیزر در صفحه yoz قرار داشته باشد، برای برش جانبی در راستای x و y تغییر فاز نسبی Δ به ترتیب از روابط (۶) و (۷) به دست می آیند.

در حالتی‌که نور لیزر در راستای عمود بر سطح نمونه تابانده شود، زاویه α برابر صفر شده و برای برش در راستای x، معادله به صورت رابطه (۸) خلاصه می‌شود.

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda}\left[\frac{\partial v}{\partial x}\sin\alpha_{yoz} + \frac{\partial w}{\partial x}\left(1+\cos\alpha_{yoz}\right)\right]\delta x \qquad (۶)$$

$$\Delta = \frac{2\pi}{\lambda}\left[\frac{\partial v}{\partial y}\sin\alpha_{yoz} + \frac{\partial w}{\partial y}\left(1+\cos\alpha_{yoz}\right)\right]\delta y \qquad (۷)$$

$$\Delta = \frac{4\pi}{\lambda}\left(\frac{\partial w}{\partial x}\right)\delta x \qquad (۸)$$

رابطه اخیر نشان می‌دهد که مشتق جابجایی خارج از صفحه در این روش برش‌نگاری به طور مستقیم با اختلاف فاز هاله‌ها ارتباط دارد و از این رو می‌توان با مشاهده و تحلیل هاله‌های به دست آمده، شیب ایجاد شده ناشی از بارگذاری را در نقاط مختلف جسم مشاهده و اندازه‌گیری کرد.

۳- استفاده از برش‌نگاری در انجام آزمون‌های غیرمخرب

از ایده برش‌نگاری دیجیتالی برای انجام آزمون غیر مخرب و عیب‌یابی در قطعات مختلف می‌توان استفاده کرد. اعمال بارگذاری در قطعات، باعث ایجاد تمرکز تنش و کرنش در نقاط ناپیوستگی می‌شود. چنانچه تأثیرات این تمرکز به گونه‌ای باشد که اثر آن در سطح جسم قابل مشاهده باشد، می‌توان با ارزیابی مناطق دارای تمرکز تنش، محل و حتی اندازه و نوع عیب را تعیین کرد. در حقیقت هرچه هاله‌های کرنش ایجاد شده نزدیک‌تر و متراکم‌تر باشد، اندازه عیب بزرگ‌تر و یا عمق آن کمتر است. انواع ترک‌ها، ناپیوستگی‌های زیر سطحی، سوراخ‌های داخلی و مک‌ها از انواع عیوبی هستند که می‌توان به کمک برش‌نگاری دیجیتالی آنها را تشخیص داد.

در مواد مرکب از برش‌نگاری می‌توان برای تشخیص عیوبی مانند جدایش لایه‌ها، عدم چسبندگی الیاف به رزین و برخی از ترک‌ها استفاده کرد. تشخیص نوع عیب با استفاده از الگوی هاله‌ای ایجاد شده در بسیاری از موارد کار دشواری است، اما با ایجاد یک پایگاه داده‌ای کامل از عیوب و هاله‌های منتج از آن می‌توان تا حدودی برخی از مشخصات عیوب را تشخیص داد. در این مقاله با ایجاد عیوب ساختگی با اندازه‌های مختلف و عمق‌های متفاوت، توان و کارایی روش برش‌نگاری دیجیتالی در اندازه‌گیری عمق و اندازه عیب در نوعی ماده مرکب ارزیابی می‌شود.

۳-۱- ایجاد و تنظیم چیدمان برش‌نگاری

چیدمان برش‌نگاری دیجیتالی شامل آینه‌ها، عدسی، جداکننده نور[1] و مجموعهٔ نگهدارنده‌ها است که بر روی میز اپتیک ضد ارتعاش نصب می‌شوند. چیدمان انتخابی برای طرح حاضر، استفاده از تداخلگر مایکلسون است. یکی از مزایای عمده تداخلگر مایکلسون نسبت به سایر روش‌های ایجاد تداخل، توانایی و سادگی این نوع تداخلگر در تنظیم مقدار برش به اندازه دلخواه و در هر دو جهت است. این کار با تغییر زاویه یکی از آینه‌های تداخل‌گر حول محور تقارن آن انجام می‌گیرد.

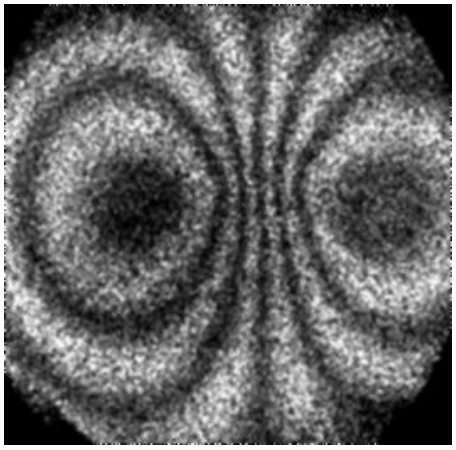
1. Beam Splitter

لیزر مورد استفاده در این طرح، از نوع هلیوم نئون و با طول موج ۶۳۲۸ آنگستروم و با توان ۳۰mW است که برای باز کردن پرتو و روشن کردن بخش مورد بازرسی نمونه، از یک عدسی واگرا کننده در مسیر نور لیزر استفاده شده است. صافی سطح قطعات اپتیکی به کار رفته در آزمایش با دقت $\lambda/10$ می‌باشد.

برای انجام آزمون‌های غیر مخرب، عموماً از چیدمان برش‌نگاری خارج از صفحه استفاده می‌شود. مزیت این چیدمان، ایجاد حساسیت مضاعف و توان استفاده از بارگذاری حرارتی برای تعیین عیوبی نظیر جدایش لایه‌ای، خلل و فرج و مک‌های داخلی است. همچنین در روش به‌کار گرفته شده در این مقاله از تنها یک تصویر قبل و بعد از بارگذاری می‌توان عیوب را مشخص کرد. برای آزمایش صحت عملکرد چیدمان و تنظیم پارامترها، یک سیستم بارگذاری مکانیکی مطابق شکل ۲ برای ایجاد جابجایی خالص خارج از صفحه ساخته شد. قطعه دایروی به طور کامل از اطراف گیردار شده و بارگذاری به کمک یک میکرومتر از پشت انجام می‌گیرد.

با انجام بارگذاری خارج از صفحه در یک صفحه از جنس پلکسی گلاس با قطر ۱۰۰mm و ضخامت ۲mm به اندازه ۱۰میکرومتر هاله‌های ایجاد شده ناشی از جابجایی خارج از صفحه، پس از انجام فیلترینگ برای کاهش نویزها در شکل ۳ مشاهده می‌گردد. هاله‌های ایجاد شده در شکل ۳ مشتق جابجایی‌های خارج از صفحه نسبت به جهت برش می‌باشند.
هاله‌های به دست آمده در شکل ۳، تنها ناشی از اختلاف عددی اندازه شدت نور قبل و بعد از بارگذاری است که مطابق رابطه (۳) بدست می‌آید.

شکل ۲ فیکسچر بارگذاری خالص خارج از صفحه



شکل ۳ هاله‌های برش‌نگاری ناشی از جابجایی خالص خارج از صفحه

از آنجا که دوربین CCD تنها می‌تواند شدت نور را ثبت کند و از طرفی مقادیر منفی برای شدت نور وجود ندارد، با ساده کردن رابطه (۳) داریم:

$$|I' - I_0| = 2I_0\gamma\left[\sin\left(\phi+\frac{\Delta}{2}\right)\sin\left(\frac{\Delta}{2}\right)\right] \qquad (۹)$$

واضح است که در $\Delta = 2N\pi$ که N=0,1,2,.. شدت نور اختلافی صفر شده و هاله‌های تاریک مشاهده می‌شود. در این آزمایش اندازه برش برابر ۵mm و در جهت x تنظیم شده است. بنابراین بر اساس معادله (۸) اختلاف کرنش خارج از صفحه برای هر دو هاله متوالی برابر خواهد بود با:

$$\Delta = \frac{4\pi}{\lambda}\frac{\partial w}{\partial x}\delta x \Rightarrow \frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\Delta\lambda}{4\pi\delta x}$$

$$= \frac{2\pi\times 632\times 10^{-6}}{4\pi\times 5} = 63.2\mu$$

بر این اساس در محل‌هایی که تمرکز هاله‌ها بیشتر است، مؤلفه کرنش w_x که همان شیب در جهت x است بزرگتر خواهد بود.

وجود تابع سینوسی در رابطه (۹) که در آن فاز تصادفی φ ناشی از تداخل اولیه است، باعث پدید آمدن نویز شدیدی در الگوی هاله‌ای ایجاد شده می‌شود. برای اجتناب از این حالت و بالاتر بردن کیفیت تصاویر چند روش مرسوم وجود دارد:

- پیدا کردن فاز

از آنجا که کرنش‌ها به طور مستقیم با اختلاف فاز نسبت دارد (معادلات (۴) تا (۸)) در این روش با یافتن فاز Δ قبل و بعد از بارگذاری و محاسبه اختلاف این فازها، می‌توان الگوی فاز را به دست آورد که در آن با بی‌اثر شدن فاز تصادفی φ کیفیت هاله‌ها افزایش می‌یابد.

برای پیدا کردن فاز تصاویر روش‌های متعددی استفاده می‌شود که از آن جمله می‌توان به روش‌های انتقال فاز [۱۳] و جابجایی فاز فضایی [۱۴] اشاره کرد. اشکال عمده این روش‌ها، نیاز به تجهیزات خاص و یا چیدمان خاص برای ایجاد جابجایی فاز و یا تولید موج‌های حامل [۱۵] می‌باشد.

- فیلتراسیون هاله‌ها

با پیشرفت الگوهای نرم‌افزاری پردازش تصاویر دیجیتالی و امکان به‌کار گیری الگوریتم‌های مختلف، کیفیت هاله‌های بدست آمده از برش‌نگاری را می‌توان تاحدی بهبود داد [۱۶]. روش‌های مختلفی برای انجام فیلتراسیون هاله‌ها و جود دارد که عمدتاً بر پایه ضرب یک ماتریس n×n در هر پیکسل برای حذف نویزهای فرکانس بالا و یا فرکانس پایین در تصاویر نهایی است. این روش‌ها، با الگوریتم‌های فیلتراسیون متعددی معرفی شده است که معروفترین آنها روش فیلتراسیون پایین‌گذر[1] و بالاگذر[2]، است. در انجام فیلتراسیون هاله‌ها، توجه به این نکته ضروری است که استفاده متعدد از الگوهای نویزگیری، اگرچه منجر به افزایش کیفیت هاله‌ها می‌شود، می‌تواند اطلاعات فازها را از بین برده و یا غیر معتبر کند. بنابراین در به‌کار بردن این الگوریتم‌ها باید ملاحظات ویژه مدنظر قرار گیرد.

۳-۲- انجام آزمون‌ها

پس از تنظیم و کنترل چیدمان برش‌نگاری، برای ارزیابی توانایی روش در تشخیص عیوب در مواد مرکب، نمونه آزمون ساخته شده و با استفاده از چیدمان معرفی شده آزمایش انجام شد.

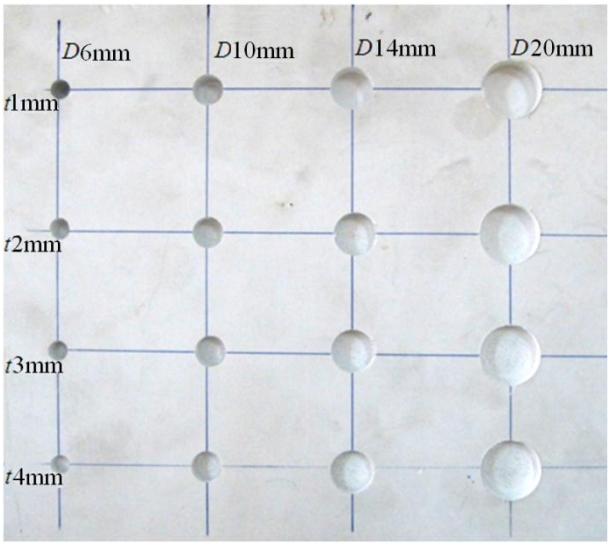
۳-۲-۱- ساخت نمونه آزمون

نمونه آزمایش از یک صفحه پلیمری از جنس پلی اتیلن سبک با ضخامت ۸mm و با ابعاد ۳۰×۳۰mm ساخته شد. برای مدل کردن عیوب داخلی با اندازه‌ها و فاصله‌های مختلف از سطح، سوراخ‌های کور در یک سمت صفحه مذکور ایجاد شد. قطر سوراخ‌ها ۶، ۱۰، ۱۴ و ۲۰ میلی‌متر با عمق‌های ۴، ۵، ۶ و ۷ میلی‌متر در نظر گرفته شد. بنابراین از سمت دیگر صفحه عیوبی با اندازه های عنوان شده در عمق‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ میلی‌متری از سطح ایجاد می‌شود. سوراخ‌ها با استفاده از تیغ فرز انگشتی کف تخت به نحوی ایجاد شد که کف سوراخ‌ها کاملاً تخت و موازی سطح قطعه باشد. بنابراین می‌توان این سوراخ‌ها را مدلی از عیوب جدایش بین لایه‌ای در مواد مرکب لایه‌ای در نظر گرفت. موقعیت، اندازه و عمق سوراخ‌ها در شکل ۴ نشان داده شده است.

۳-۲-۲- بارگذاری

همان‌گونه که در بخش‌های قبل عنوان شد برای تشخیص عیوب به روش برش‌نگاری دیجیتالی، بایستی قطعه دارای عیب را تحت نوعی از بارگذاری گذاشت به نحوی که تأثیر تمرکز کرنش ناشی از بارگذاری در سطح جسم قابل مشاهده باشد. انواع بارگذاری معمول در انجام این آزمون‌ها، بارگذاری کششی یا فشاری، بارگذاری حرارتی، بارگذاری ارتعاشی، ایجاد فشار داخلی (در لوله‌ها و مخازن) و خلأ نسبی می‌باشد. در این مقاله از بارگذاری حرارتی با استفاده از یک لامپ حرارتی با توان ۲۵۰ آمپر برای انجام آزمون استفاده شده است. مزایای عمده بارگذاری حرارتی عبارت است از عدم ایجاد لرزش و جابجایی صلب در حین اعمال بار، سادگی تجهیزات و امکان بارگذاری موضعی در تجهیزات بزرگ.

نمونه مورد آزمایش در نمونه به مدت ۴ ثانیه تحت تابش از فاصله ۱۰cm قرار گرفته و سپس در حین خنک شدن نمونه، هر ۱ ثانیه تصاویری تداخلی از سطح قطعه گرفته می‌شود.



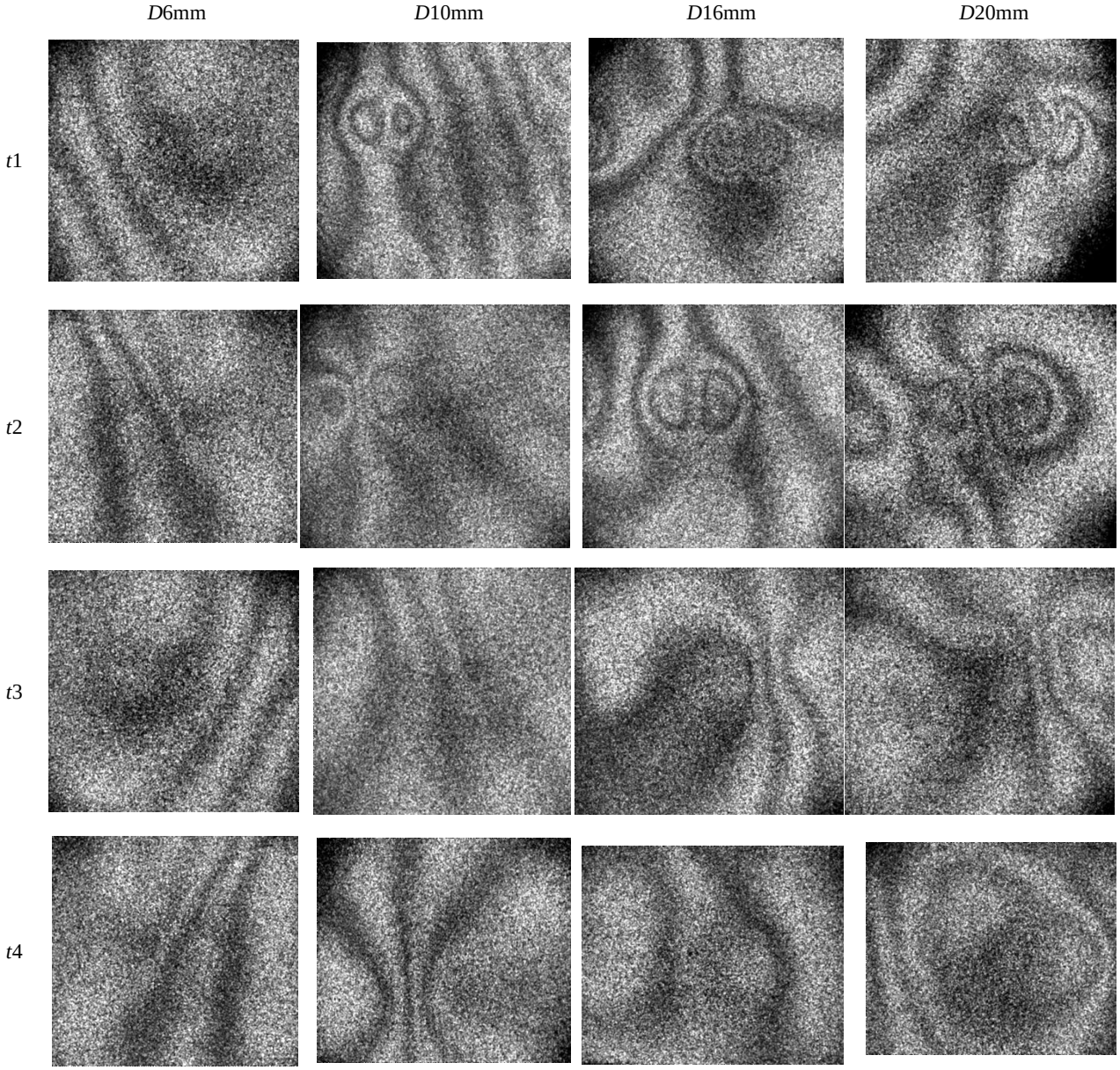
شکل ۴ نمونه آزمون با ایجاد سوراخ‌های کف تخت با اندازه‌ها و عمق‌های متفاوت

1. Low-Pass Filtering
2. High-Pass Filtering

عکس اولیه مربوط به بیشترین دمای سطح به عنوان عکس مرجع در نظر گرفته می‌شود و عکس‌های بعدی به عنوان عکس تغییر شکل قطعه به کار گرفته می‌شود. میزان بارگذاری را می‌توان با تنظیم مدت زمان بین دو عکس متوالی در حین خنک شدن تنظیم کرد، با گذشت زمان و خنک شدن سطح قطعه اختلاف تصاویر مرجع و سطح تغییرشکل یافته افزایش یافته و اندازه بارگذاری بیشتر می‌شود.

مشاهده و بررسی نتایج

از کم کردن شدت نور قبل و بعد از بارگذاری، الگوی هاله‌ای برش‌نگاری حاصل می‌شود. با بررسی تراکم هاله‌ها در سطح نمونه، نواحی دارای عیب تعیین می‌شوند. برای هر سوراخ با توجه به تصاویر متوالی گرفته شده تعدادی الگوی هاله‌دار بدست آمده است و در شکل ۵ بهترین نتایج مشاهده می‌شود. بدیهی است که دو تصویر پشت سر هم به دلیل تغییر شکل ناچیز در بازه زمانی کوتاه، منجر به الگوی هاله‌ای بسیار کم می‌شود.



شکل ۵ نتایج حاصل از برش‌نگاری قطعه دارای عیب به قطر 5mm

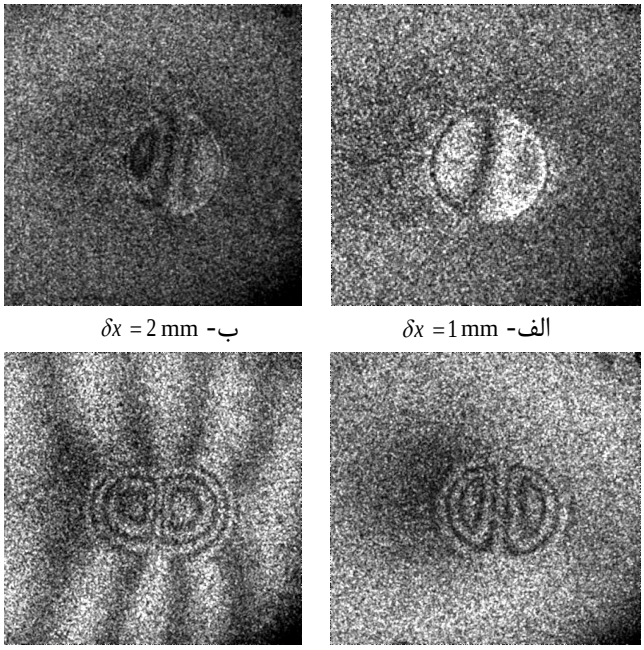
همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، در این نمونه سوراخ *D6* در هر عمق به صورت تمرکز خطوط هاله آشکار شده است. البته در این مورد اندازه قطر سوراخ قابل پیش‌بینی نیست زیرا هاله‌هایی با خطوط منحنی بسته[1] تشکیل نشده‌اند. در مورد بقیه سوراخ‌ها مشاهده می‌شود که وضوح هاله‌ها با افزایش عمق عیب کم می‌شود به نحوی‌که سوراخ D10 در عمق ۳ و ۴ میلی‌متری و سوراخ‌های D16 و D20 در عمق ۴ میلی‌متر قابل تشخیص نیستند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که برای پارامترهای تنظیمی سیستم برش‌نگاری در این آزمایش و در ماده مورد بررسی، عیوب موجود در عمق تا ۲میلی‌متر با اندازه عیب ۱۰میلی‌متر و یا بیشتر قابل تشخیص می‌باشند. از طرفی همان‌گونه که در شکل مشاهده می‌شود، برای عیوب سطحی اندازه عیب تاحدی قابل تشخیص است اما با افزایش فاصله عیب از سطح نمونه، قابلیت تشخیص اندازه عیوب بسیار کاهش پیدا می‌کند. در هر حال به دلیل دوتایی شدن تصویر در برش‌نگاری و همچنین هاله‌های اضافی ایجاد شده در اثر کرنش‌های کلی و موضعی مناطق اطراف عیب، تشخیص اندازه صحیح عیب بسیار دشوار است. لکن با ایجاد یک پایگاه داده‌ای از عیوب نمونه‌ای مشخص و مقایسه نتایج آزمایش با داده‌های قبلی تا حدی می‌توان به اندازه و حتی عمق ناپیوستگی‌ها پی برد.

۴- بررسی اثر میزان برش و نحوه بارگذاری

در این بخش اثر دو پارامتر اندازه برش و نحوه بارگذاری بر روی نتایج حاصل از برش‌نگاری بررسی می‌شود. اطلاع از اثر این دو پارامتر مهم از این لحاظ که در هر آزمایش قابل تغییر و کنترل هستند، می‌تواند در بهبود نتایج حاصل از انجام آزمون‌های غیر مخرب بسیار مفید باشد.

۵-۱- اثر اندازه برش

اندازه برش δx همان‌گونه که در رابطه (۸) مشاهده می‌گردد به طور مستقیم با اختلاف فاز ایجاد شده ارتباط دارد، پس بر روی حساسیت چیدمان تأثیرگذار است. با تنظیم اندازه برش به مقدار ۱، ۲، ۵ و۱۰ میلی‌متر، آزمون برش‌نگاری برای سوراخ D5 با عمق ۱mm انجام شد. هاله‌های بدست آمده در شکل ۶ نشان داده شده است.



الف- $\delta x = 1\,\mathrm{mm}$ ب- $\delta x = 2\,\mathrm{mm}$

ج- $\delta x = 5\,\mathrm{mm}$ د- $\delta x = 10\,\mathrm{mm}$

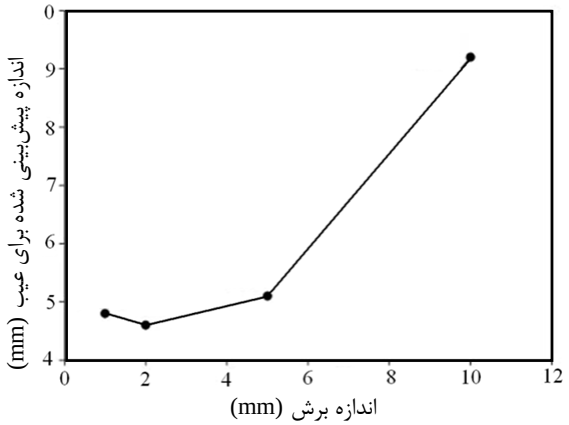
شکل ۶ برش‌نگاری نمونه دارای عیب با اندازه برش‌های مختلف

مشاهده می‌شود که با افزایش اندازه برش، وضوح هاله‌های برش‌نگاری تا حدی بهتر شده است، اما اندازه گستردگی هاله‌ها و بنابراین دقت تشخیص اندازه عیب کاهش می‌یابد. با اندازه‌گیری تقریبی فاصله هاله‌ها در تصاویر و مقایسه با تصویر مدرج ذخیره شده از قبل می‌توان اندازه عیب را تعیین کرد. به این منظور، مرز هاله‌های متمرکز شده به عنوان مرز عیوب تعیین شده و با کم کردن اندازه برش از فاصلهٔ طولی بین مرز هاله‌ها، اندازه عیب تخمین زده می‌شود. در نمونه فوق برش $\delta x = 1\,\mathrm{mm}$ اندازه عیب‌را ۴/۸ میلی‌متر، برش $\delta x = 2$ mm اندازه عیب را ۴/۶ میلی‌متر، برش $\delta x = 5\,\mathrm{mm}$ اندازه عیب را ۵/۱ میلی‌متر و برش $\delta x = 10\,\mathrm{mm}$ اندازه عیب را در حدود ۹/۲ میلی‌متر نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۶ هر چه اندازه برش تصاویر بیشتر شود، فاصله مرکز به مرکز هاله‌های مجاور که معیاری برای پیش‌بینی اندازه عیب است، افزایش می‌یابد. اندازه برش بر روی حساسیت چیدمان تأثیرگذار است.

در شکل ۷ اندازه پیش‌بینی شده برای عیب با توجه به تصاویر شکل ۵ بر حسب اندازه برش آورده شده است. همان طور که مشخص است با بیشتر شدن اندازه برش از اندازه عیب، خطا در محاسبه اندازه عیب بالا می‌رود. اگر اندازه برش کوچکتر از اندازه عیب تنظیم شود، اندازه عیب به خوبی تعیین

1. Closed Fringe Pattern

می‌شود. در حالتی که اندازه برش بیشتر از اندازه عیب باشد، برش‌نگاری اندازه عیب را بیش از حالت واقعی نشان می‌دهد. همچنین از نتایج می‌توان دریافت اندازه عمق سوراخ به اندازه برش وابسته نیست. برای ترک جهت برش بهتر است در راستای ترک تنظیم شود، اما برای سوراخ جهت برش تأثیری در نتایج ندارد.

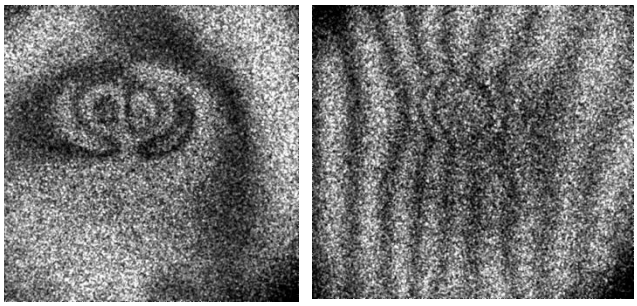


شکل ۷ تأثیر اندازه برش تصویر در اندازه پیش‌بینی شده برای عیب

۵-۲- اثر روش بارگذاری حرارتی

بارگذاری حرارتی روی نمونه آزمون به دو صورت یک طرفه و دوطرفه امکان‌پذیر است. در تابش یک طرفه فقط یک سمت نمونه (طرف بدون عیب) در معرض تابش لامپ حرارتی قرار داده می‌شود و در تابش دو جهته، هر دو طرف نمونه با لامپ‌های یکسان و فاصله مساوی به‌طور همزمان گرم می‌شود. شکل ۸- الف هاله‌های برش‌نگاری در تابش یک‌جهته و شکل ۸- ب هاله‌های ایجاد شده در اثر تابش دو جهته را در محل عیب $D14$ نشان می‌دهد.

مشاهده می‌شود که در تابش دو جهته، هاله‌های بدست آمده در محل عیب از وضوح بیشتری برخوردار است. دلیل اصلی این امر حذف هاله‌های اضافی ناشی از خمش خود نمونه در بارگذاری دوطرفه است. در بارگذاری حرارتی یک جهته، به دلیل ایجاد اختلاف دمایی دو سطح نمونه، کرنش‌های حرارتی کلی در دو طرف برابر نبوده و از این رو نمونه تا حدی دچار خمش می‌شود که باعث ایجاد هاله‌های اضافی و عدم وضوح هاله‌های اصلی ناشی از عیب می‌شود، اما در تابش دوجهته، به دلیل ایجاد تعادل حرارتی در دو سمت نمونه، خمش تا حد زیادی محدود شده و مشکل ایجاد هاله‌های زائد تا حد زیادی حل می‌شود.



الف- تابش تک جهته ب- تابش دو جهته

شکل ۸ تابش یک جهته و دوجهته در نمونه دارای عیب

۵- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله روش برش‌نگاری دیجیتالی به عنوان یک روش نوری در انجام آزمون غیر مخرب در مواد دارای عیب معرفی شده است. این روش دارای دو ویژگی مطلوب غیر تماسی و میدانی بودن است که می‌تواند در تعیین بسیاری از عیوب خصوصاً در موادی که کاربرد سایر روش‌ها در آنها با محدودیت همراه است، صورت گیرد. پس از معرفی و ایجاد چیدمان مناسب برش‌نگاری، با ساخت دستگاه بارگذاری خارج از مرکز و انجام آزمون بر روی یک نمونه دایروی، صحت کارایی سیستم تأیید شد. سپس نمونه آزمون از جنس پلی اتیلن سبک تهیه و نمونه عیوبی با اندازه‌ها و عمق‌های مختلف در آن ایجاد شد. با انجام برش‌نگاری به کمک بارگذاری حرارتی، توانایی روش در تشخیص این عیوب در ماده مورد بررسی، ارزیابی شد. در ادامه با بررسی اندازه برش و نحوه بارگذاری حرارتی، اثر این پارامترها در تشخیص عیوب در نمونه ها بررسی شد. نتایج حاصله را می‌توان به ترتیب زیر خلاصه کرد.

- در نمونه‌های پلیمری مورد بررسی و با پارامترهای تنظیمی، اندازه عیوب کوچکتر از ۱۰ میلی‌متر در سطوح زیرین قابل پیش‌بینی نیستند.

- با تغییر اندازه برش می‌توان حساسیت دستگاه را نسبت به تشخیص اندازه عیوب تغییر داد.

- با فاصله گرفتن عیوب از سطح جسم، توانایی برش‌نگاری در آشکارسازی عیوب در ماده مورد بررسی کاهش می‌یابد.

- با افزایش اندازه برش وضوح هاله‌های برش‌نگاری افزایش می‌یابد.

- در تعیین عیوب در مواد پلیمری مورد آزمایش، چنانچه اندازه برش با اندازه تقریبی عیب برابر باشد، اندازه عیب دقیق‌تر تعیین می‌شود.

- در انجام آزمون برش‌نگاری بر روی ماده پلیمری، در محل‌هایی که دسترسی به هردو سمت نمونه وجود دارد، استفاده از بارگذاری تابشی دو طرفه با حذف هاله‌های اضافی، کیفیت هاله‌های ایجاد شده در محل عیوب را بالاتر می‌برد.

۶- مراجع

[1] Leendertz J., Butters J., "An Image Sharing Speckle Pattern Interferometer for Measuring Bending Moments", *Journal of Physics E*., No. 6, 1973, pp. 1017-1110.

[2] Hung Y., Taylor C., "Speckle Shearing Interferometric Camera A Tool For Measurement of Derivatives of Surface Displacement", *Proceedings of SPIE*, Vol. 41, 1973, pp. 169-175.

[3] Nakadate S., Yatagai T., Saito, "Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry", *Applied Optics*, Vol. 24, 1980, pp. 4241-4246

[4] Toh S., Chau F., Shim V., Tay C., Shang H., "Application of Shearography in Nondestructiv Testing of Composite Plates", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 23, 1990, pp. 267-275.

[5] Hung Y., Wang J., "Dual-Beam Phase Shift Shearography for Measurement of in-Plane Strains", *Optics and Lasers Engineering*, 24, 1996, pp. 403-413,

[6] Steinchen W., Kupfer G., Mackel P., Vossing F., "Determination of Strain Distribution by Means of Digital Shearography", *Measurement*, 26, 1999, pp. 79-90.

[7] Groves R., James S., Barnes S., Fu S., D.Furfari , Irving P., "Mult-Companent Laser Shearography for the Investigation of Defects in Rotating Machinery", *The international society engineering*, No. 5457, 2004, pp. 546-556.

[8] Chen J., Sun C., Qin Y., Ji X., "Damage Evaluation of Subsurface Defect in Sandwich by Phase-Shifting Digital Shearography", *Engineering Materials*, 306-308, 2006, pp. 399-404.

[9] Livingston R., Newman J., Ceesay J., Amde A., " Laser Shearography for Detection of Fine Cracks in Concrete and Masonry ", *International SAMPE Symposium and Exhibition*, 2007, 70280.

[10] Zou G., Lu J., Wang W., "Application of Electronic Shearography Speckle Pattern Interferometry to Nundestructive Testing of Wood Material", *Journal of Harbin Engineering University*, 30, 2009, pp. 357-361.

[11] Hamidi H., Soltani N., "Determination of Stress Intensity Factors in Composite Materials by Means of Optical Experimental Technique of Digital Shearography", *Journal of Mechanic and Aerospace*, 4, 2009, pp. 15-26,.

[12] Santosa F., Vazb M., Monteiro J., "A New Set-Up for Pulsed Digital Shearography Applied to Defect Detection in Composite Structures", *Journal of Optics and Lasers in Engineering*, 42, 2004, pp. 131–140.

[13] Schuth M., Vössing F., Yang L., "A Shearographic Endoscope for Nondestructive Test", *Journal of Holography and Speckle*, 1, 2004, pp. 46-52.

[14] He Y., Tay C., Shang H., "A New Method for Generating and Analysing Digital Speckle Shearing Correlation Fringe Patterns", *Optics & Laser Technology*, 30, 1998, pp. 27-31.

[15] Santosa F., Vazb M., Monteiro J., "A New Set-Up for Pulsed Digital Shearography Applied to Defect Detection in Composite Structures", *Optics and Lasers in Engineering*, 42, 2004, pp. 131-140.

[16] Henga Q., Loua X., Lva N., "Filtering Method Based on Partial Differential Equations for Speckle-Shearing Interferograms", *Procedia Engineering*, 29, 2012, pp. 2342-23