



به کارگیری روش بارگذاری ارتعاشی در انجام آزمون غیر مخرب قطعات پلیمری به روش تداخل سنجی لیزری

نوید صابری نصرآباد^۱، داود اکبری^{۲*} و محمدرضا کرفی^۳

^۱دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس تهران

^۲استادیار، دانشگاه تربیت مدرس تهران

^۳استادیار، دانشگاه تربیت مدرس تهران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۱۲؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۰۴/۰۸؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۷/۱۹

چکیده

در این مقاله روش تداخل‌سنجی لیزری برشی به عنوان یکی از روش‌های نوین در انجام آزمون‌های غیر مخرب (NDT) با به کارگیری بارگذاری ارتعاشی مورد بررسی قرار گرفته است. از روش‌های مرسوم بارگذاری در این روش، می‌توان به بارگذاری به روش خلاء نسبی، بارگذاری حرارتی و بارگذاری با استفاده از امواج صوتی اشاره کرد. در این مقاله روش بارگذاری ارتعاشی غیرتماسی برای تحریک و شناسایی عیوب توسعه یافته است. از این روش، روش مرسوم بارگذاری حرارتی با روش بارگذاری با استفاده از امواج صوتی معرفی شده در این مقاله، روی قطعاتی از جنس پلی‌اتیلن سبک و تفلون دارای عیوب ساختگی با یکدیگر مقایسه شده است؛ همچنین تاثیر نوع بارگذاری بر توانایی شناسایی عیوب و همچنین کیفیت نتایج مورد ارزیابی قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند در تست نمونه‌های مورد نظر، بارگذاری حرارتی نیاز به زمان آزمون بیشتری داشته و کیفیت نسبتاً پایینی دارند؛ درحالی‌که با استفاده از روش معرفی شده، علاوه بر مزایایی نظیر، سرعت و دقت بالاتر، کیفیت نتایج برای نمونه‌ها بهبود قابل توجهی پیدا کرده است. در نهایت با جمع بندی نتایج حاصله، محدوده شناسایی و پارامترهای مناسب در این روش معرفی شده است.

کلمات کلیدی: آزمون غیر مخرب؛ برش‌نگاری دیجیتال؛ بارگذاری ارتعاشی؛ بارگذاری حرارتی.

Application of vibration loading method for non-destructive testing of polymer Material by Means of Laser Shear Interferometry

N. Saberi Nasrabad¹, D. Akbari², M.R. Karafi³

¹ Masters Student, Tarbiat Modares University.

² Assistant Professor, Tarbiat Modares University.

³ Assistant Professor, Tarbiat Modares University.

Abstract

In this paper, shearography or speckle pattern shearing interferometry, which is one of the optical and non-contact methods in non-destructive testings (NDT), is investigated. Some of the conventional loading methods are relative vacuum loading, thermal loading, and Acoustic Loading. In this paper, The Acoustic loading method has been developed to stimulate and identify the defects. Two methods of thermal loading and Acoustic loading were compared on polyethylene and Teflon pieces with Delamination created behind them, thereafter, The effect of the type of loading on the capability to identify defects, as well as the quality of scanning results, have been examined. The results show that thermal loading requires more time for testing and has relatively low quality. In conclusion, using the Acoustic method not only has accuracy and speed but also the quality of the results has improved significantly for the samples.

Keywords: Non-Destructive Test; Digital Shearography; Acoustic Loading; Thermal Loading.

۱- مقدمه

یکی از عواملی که باعث شکست و تخریب قطعات و مجموعه‌ها می‌شود، وجود انواع عیوب در قطعات است که در حین ساخت یا کارکرد ایجاد می‌شوند. شناسایی و بررسی این عیوب بدون وارد کردن آسیب به قطعات دارای اهمیت زیادی است. به همین خاطر انجام آزمون‌های غیر مخرب (NDT^۱) به صورت دوره‌ای برای شناسایی و بررسی عیوب احتمالی در قطعات و مجموعه‌ها لازم و ضروری است. روش‌های سنتی آزمون‌های غیر مخرب مانند، آزمون‌های فراصوتی، جریان‌های گردابی و ذرات مغناطیسی با توجه به خواص ویژه مواد پلیمری و کامپوزیتی مانند، ناهمگنی، عدم رسانایی الکتریکی و عدم قابلیت مغناطیسی، کاربرد زیادی برای این مواد ندارند؛ به همین خاطر از روش‌های نوین انجام آزمون‌های غیر مخرب که عمدتاً سرعت و دقت بیشتری نیز نسبت به روش‌های سنتی دارند، برای بررسی و شناسایی عیوب در این مواد استفاده می‌شود. از جمله روش‌های نوین آزمون‌هایی غیر مخرب، می‌توان به روش هولوگرافی^۲، تداخل سنجی الگوی لکه‌های^۳ و برش‌نگاری^۴ دیجیتال اشاره کرد. روش برش‌نگاری دیجیتال، یک روش غیر تماسی و نوری است که در آن از نور لیزر تک رنگ استفاده می‌شود و همچنین به دلیل حساسیت کمتر به ارتعاشات محیط و دقت و سرعت بالا، یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای شناسایی و بررسی عیوب در قطعات پلیمری است.

روش برش‌نگاری برای اولین بار در سال ۱۹۷۳ توسط لیندرتر^۵ و باترز [۱] برای پیدا کردن ممان خمشی در تیرها استفاده شد. هانگ^۶ [۲] تحقیقات گسترده‌ای در زمینه تئوری برش‌نگاری و برخی کاربردهای آن به خصوص در صنایع لاستیک سازی ارائه کرد. وی در چندین مقاله مروری، اصول تشکیل هاله‌های برش‌نگاری، روش اندازه‌گیری کرنش‌های سطحی و همچنین کاربرد این روش در انجام آزمون‌های غیرمخرب در صنایع لاستیک سازی و صنایع هوافضا را مطرح کرد. او همچنین در پژوهش دیگری [۳] به

مقایسه کامل روش‌های برش‌نگاری و هولوگرافی پرداخت و نشان داد که در انجام آزمون‌های غیرمخرب، روش برش‌نگاری مزایای بسیاری نسبت به روش هولوگرافی دارد.

برای اولین بار در سال ۱۹۸۰، تاکادانا^۷ و یاتاگایی [۴]، به جای ثبت تصاویر روی فیلم‌های عکاسی، از دوربین الکترونیکی و تصویر دیجیتالی استفاده نمودند. استفاده از ثبت دیجیتالی تصاویر و پردازنده‌های رایانه‌ای برای تحلیل و پردازش تصاویر، برش‌نگاری سنتی را به سمت برش‌نگاری دیجیتالی سوق داد.

در پژوهش که در سال ۱۹۹۱ توسط تیم‌توه و همکاران [۵] انجام شده، از روش برش‌نگاری زمان میانگین برای شناسایی عیوب مواد مرکب استفاده شده است. موهان و همکاران [۶] توانستند، روش برش‌نگاری زمان واقعی در قطعات را به کار گیرند. سیم و همکاران [۷] نشان دادند، روش برش‌نگاری زمان واقعی، روش مناسبی برای انجام آزمون‌های غیر مخرب و همچنین تعیین مودهای ارتعاشی است.

هانگ^۸ و همکاران [۸]، از دو روش بارگذاری ارتعاشی و خلاء نسبی برای شناسایی و بررسی عیوب استفاده کردند. نتیجه‌ای که در این پژوهش به دست آمد نشان می‌دهد، از بارگذاری ارتعاشی می‌توان در یافتن عیوب با مرزهای بسته^۹ مرزهای باز^{۱۰} استفاده کرد، در حالی که با استفاده از روش بارگذاری خلاء نسبی فقط می‌توان عیوب با مرزهای بسته را شناسایی کرد و مرزهای باز را نمی‌توان با این نوع بارگذاری شناسایی کرد. در پژوهشی دیگر هانگ و همکاران [۹]، اثر بارگذاری حرارتی روی مواد با جنس‌های مختلف در روش برش‌نگاری دیجیتال را بررسی کردند. ابتدا با استفاده از روش‌های اجزا محدود^{۱۱} اثر حرارت بر تغییر شکل در منطقه معیوب را بررسی و با نتایج آزمون عملی مقایسه کردند.

در سال ۲۰۱۳ اکبری و همکاران [۱۰]، اثر پارامترهای بارگذاری حرارتی و مکانیکی را در روش برش‌نگاری مورد مطالعه قرار دادند. نتایج به دست آمده نشان داد که افزایش

⁷ S. Nakadate

⁸ Y.H.Huang

⁹ Closed Boundaries

¹⁰ Opened Boundaries

¹¹ Finite Elements Method

¹ Non Destructive Testing

² Holography

³ Electronic Speckle Pattern Interferometry

⁴ Shearography

⁵ J. Leendertz

⁶ Y. Hung

ترک‌های خستگی ایجاد شده روی قطعات آلومینیومی به تحریک و اعمال بارگذاری ارتعاشی قطعات با ترانسیدوسرهای آرایه فازی پرداختند. نتیجه گرفتند، با استفاده از ترانسیدوسرهای آرایه فازی در بارگذاری ارتعاشی حساسیت روش بالا رفته و می‌توان ترک‌های با عمق بیشتر را به راحتی شناسایی کرد.

با توجه به سابقه انجام روش‌های بارگذاری مرسوم در برش‌نگاری دیجیتالی، بارگذاری به روش خلاء نسبی به دلیل هزینه بالا و همچنین عدم قابلیت استفاده از این روش در قطعات و سطوح بزرگ و عدم شناسایی عیوب با مرزهای باز، کاربرد کمتری نسبت به دو روش دیگر، یعنی بارگذاری حرارتی و بارگذاری ارتعاشی دارد. با توجه به مطالعات انجام گرفته، توانایی دو روش بارگذاری حرارتی و ارتعاشی در شناسایی عیوب صفحه‌ای موجود در قطعات با یکدیگر مقایسه و مورد بررسی قرار نگرفته است. درحالی‌که مزایای روش ارتعاشی می‌تواند این روش را جایگزینی مناسب برای بارگذاری حرارتی در بسیاری مواد کند. در مقاله حاضر کاربرد روش برش‌نگاری دیجیتالی با بارگذاری حرارتی و ارتعاشی روی قطعاتی از جنس پلی‌اتیلن سبک و تفلون با عیوب صفحه‌ای، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته است. به همین منظور، ابتدا کلیات و تئوری روش برش‌نگاری دیجیتالی بیان شده و سپس تشخیص عیوب و همچنین کیفیت هاله‌ها با استفاده از این دو روش بارگذاری، مورد بررسی قرار گرفته است. با تمرکز بر بارگذاری ارتعاشی، کاربرد و قابلیت این روش در شناسایی عیوب در نمونه‌های مذکور، مورد توجه قرار گرفته است.

۲- تئوری برش‌نگاری

کلیات روش برش‌نگاری بر مبنای تداخل دو جبهه نور بازگشتی از سطح قطعه‌ای استوار است که توسط نور تک رنگ لیزر روشن شده است. وقتی که دو موج نور تک رنگ با شدت I_1 و I_2 در نقطه‌ای با هم تداخل کنند، شدت نور ناشی از تداخل دو موج برابر خواهد بود با:

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi \quad (1)$$

که در آن φ اختلاف فاز دو موج در نقطه تداخل است که ناشی از اختلاف مسیرهای نوری است. در سیستم‌های

اندازه برش، افزایش کیفیت هاله‌ها و کاهش دقت آنها را در پی دارد، لذا برای حصول الگوهای هاله‌ای با دقت و کیفیت بالا، بهتر است، اندازه برش درصدی از اندازه تصویر باشد.

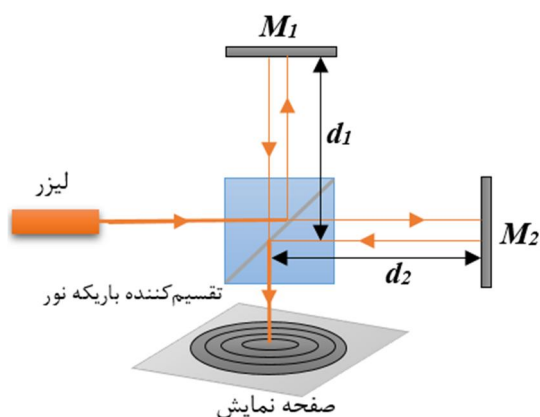
در سال ۲۰۱۴ دیرک و همکاران [۱۱]، برای شناسایی عیوب موجود در قطعات کامپوزیتی بدنه هواپیماها از روش بارگذاری ارتعاشی استفاده کردند. در این پژوهش به منظور انجام بارگذاری ارتعاشی از المان‌های پیزوالکتریک که به پشت قطعه چسبانده می‌شود، استفاده و عیوب موجود با عمق‌ها و قطرهای مختلف شناسایی شده است.

یانگ و همکاران [۱۲]، در پژوهشی دیگر در سال ۲۰۱۷ به بررسی پارامترهای مهم و تاثیرگذار در روش برش‌نگاری دیجیتالی مانند، نوع بارگذاری، اندازه بارگذاری، جهت برش، اندازه برش و اندازه و موقعیت عیب پرداختند. آنها در این پژوهش با استفاده از نرم افزار شبیه سازی انسیس^۱ و نرم‌افزار متلب^۲ پارامترهای اشاره شده را بررسی و مورد آزمایش قرار دادند که در پارامتر انتخاب بهترین روش بارگذاری روش‌های فشار نقطه‌ای و بارگذاری حرارتی و خلاء نسبی را روی قطعه‌ای دایره‌ای شکل از جنس آلومینیوم با عیب ساختگی در آن مورد آزمایش قرار دادند.

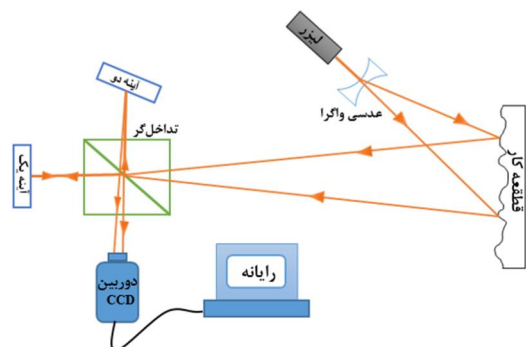
آسمانی و همکاران [۱۳]، در پژوهشی در سال ۲۰۱۷ به بررسی و توسعه روش برش‌نگاری دیجیتالی استروبسکوپیک با استفاده از بارگذاری ارتعاشی پرداختند. هوجون و همکاران [۱۴]، در سال ۲۰۱۸ با پژوهش روی قطعات فلزی به بررسی و شناسایی ترک روی قطعه‌ای از جنس آلومینیوم پرداختند و توانستند، ترک‌های که به صورت مصنوعی در قطعه‌ای از جنس آلومینیوم T351_2024 ایجاد شده بود را شناسایی کنند؛ همچنین آنها اثر دامنه‌های ارتعاشی مختلف را در شناسایی عیوب مورد بررسی قرار دادند و دامنه ارتعاشی مناسب برای شناسایی ترک در قطعات آلومینیومی را به دست آوردند و سپس به بررسی چند ترک با جهت‌های مختلف با استفاده از یک پیزوالکتریک پرداختند و نتیجه گرفتند، ترک‌های که عمود بر جهت انتشار امواج می‌باشند را نمی‌توان به راحتی شناسایی کرد. در پژوهش دیگر در همان سال هوجون و همکاران [۱۵]، به منظور شناسایی و بررسی

¹ ANSYS

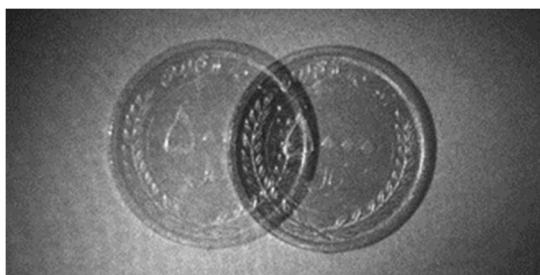
² MATLAB



شکل ۱- شماتیک سیستم تداخل سنج مایکلسون



شکل ۲- چیدمان شماتیک روش برش نگاری با تداخل سنج مایکلسون



شکل ۳- نمای از یک تصویر برش خورده

در این صورت شدت نور ثبت شده در دوربین پس از تداخل دو تصویر از رابطه زیر به دست می آید [۱۶]:

$$I = 2I_0[1 + \gamma \cos(\varphi)] \quad (3)$$

که در آن I شدت نور تداخلی، I_0 شدت نور متوسط پرتوهای نور برش خورده، γ مدول تداخل و φ اختلاف فاز تصادفی بین دو تصویر برش خورده است. هرگونه جابه جایی سطحی در نمونه، با ایجاد اختلاف در مسیر موج تا صفحه دوربین، باعث

تداخل سنجی از روش های مختلفی برای ایجاد دو جبهه موج جدا از هم استفاده می شود. یکی از پرکاربردترین سیستم های تداخل سنجی، تداخل سنج مایکلسون است که نحوه عملکرد آن در شکل ۱ نشان داده شده است. این سیستم از دو آینه با قدرت بازتابندگی زیاد (M_1 و M_2) و یک تقسیم کننده باریکه نور^۱ تشکیل شده است. همان گونه که در شکل مشخص است، بخشی از پرتو نور حاصل از لیزر پس از برخورد با تقسیم کننده باریکه نور به آینه M_1 و بخشی از آن به آینه M_2 می رسد. سپس مقداری از بازتاب این دو پرتو مجدداً در تقسیم کننده باریکه نور ترکیب می شوند و به سمت صفحه نمایش گسیل کرده الگوی تداخلی روی صفحه نمایان می شود [۱۶].

اختلاف فاز ناشی از تداخل این دو جبهه نور برابر است [۱۶]:

$$\varphi = 2\pi \frac{2d_1 - 2d_2}{\lambda} \quad (2)$$

همان گونه که اشاره شد، در برش نگاری، برای ایجاد تداخل همراه با برش از دستگاه برش گر استفاده می شود. دستگاه برش گر بین سطح مورد نظر و دوربین قرار گرفته و دو تصویر کاملاً مشابه روی هم افتاده، ولی با جابه جایی عرضی را ایجاد می کند. متداول ترین روش برای ایجاد تصاویر برش خورده در برش نگاری، استفاده از سیستم تداخل سنج مایکلسون اصلاح شده است. در این حالت با چرخاندن و ایجاد زاویه در یکی از آینه های تداخل سنج مایکلسون، پرتوی منعکس شده از سطح آن آینه دچار جابه جایی عرضی می شود. شکل ۲ نحوه چیدمان نوری روش برش نگاری را با استفاده از سیستم تداخل گر مایکلسون نشان می دهد. پرتو نور حاصل از لیزر روی سطح نمونه تابانده می شود و پرتوهای بازتابی از سطح نمونه پس از عبور از تداخل سنج مایکلسون اصلاح شده، در صفحه تصویر دوربین تصویر می شوند. تصویر حاصل به دلیل چرخش یکی از آینه های تداخل سنج، شامل دو تصویر مشابه ولی با جابه جایی جانبی خواهد بود. نمونه ای از تصویر برش خورده شده در شکل ۳ نشان داده شده است. تصویر حاصل، همراه با تداخل لکه ای خواهد بود که در آن نقاط روشن و تاریک، نشان دهنده تداخل نقطه به نقطه دو تصویر روی هم افتاده (برش خورده) است.

^۱ Beam Splitter

ارتعاشات، روی میز صفحه صافی گرانیته آماده شده است. با استفاده از بارگذار نقطه‌ای روی قطعه‌ای از جنس پلکسی‌گلس با ضخامت ۲ میلی‌متر به وسیله یک میکرومتر که در پشت آن قرار داده شده است، بارگذاری به صورت فشاری به قطعه‌کار اعمال می‌شود.

مکانیزم بارگذاری نقطه‌ای با استفاده از میکرومتر و تغییر شکل‌های ناشی از فشار نقطه‌ای توسط میکرومتر به صورت هاله‌های برش‌نگاری در شکل ۴ مشاهده می‌شود. به عبارتی این هاله‌ها نشان‌گر کالیبره بون و همچنین صحت عملکرد چیدمان حاضر است.

۳-۲- ساخت نمونه آزمایشی

قطعه‌کارهایی از جنس پلی‌اتیلن سبک و تفلون با ضخامت ۴ میلی‌متر و با ابعاد ۱۰۰*۲۰۰ میلی‌متر آماده و به منظور مدل کردن عیوب در این قطعات، سوراخ‌هایی دایره‌ای کور با قطرهای ۲۵، ۲۰، ۱۵، ۱۰ و ۵ میلی‌متر در دو عمق مختلف به گونه‌ای ایجاد شد که از سطح جسم عیوبی با عمق‌های ۰/۵ و ۱ میلی‌متر تشکیل شود. شکل ۵ ابعاد و اندازه عیوب ایجاد شده در قطعه‌کار را نشان می‌دهد؛ همچنین به منظور مدل‌سازی عیوب صفحه‌ای در مواد پلیمری و جدایش بین‌لایه‌ای^۲ در کامپوزیت‌ها کف سوراخ‌ها کاملاً صاف و تخت در نظر گرفته و با استفاده از دستگاه فرز CNC^۳ و تیغه فرز انگشتی کف تخت عملیات سوراخ‌کاری انجام گرفته است. ایجاد عیوب به این شکل در تمامی فعالیت‌های بررسی شده متداول است [۱۸].

۳-۳- انجام بارگذاری

اساس روش برش‌نگاری بر مبنای تغییرات ایجاد شده در سطح جسم در اثر بارگذاری است. به این صورت که قطعه‌کار تحت نوعی از بارگذاری قرار گرفته و تصویر قبل و بعد از بارگذاری توسط دوربین CCD^۴ ثبت شده و با استفاده از روش‌های پردازش تصویر پردازش و عیوب شناسایی می‌شود. به طور کلی در این روش، قطعه‌کار تحت تنش^۵ و

اختلاف فاز امواج رسیده در هر نقطه شده و تغییر شدت نور تصویر را در پی دارد. شدت نور تداخلی در هر نقطه از الگوی لکه‌ای پس از اعمال بارگذاری و تغییر شکل سطحی در نمونه، به صورت رابطه (۴) خواهد بود:

$$I' = 2I0 \gamma [1 + \gamma \cdot \cos(\varphi'(x+y) + \Delta)] \quad (4)$$

$\varphi'(x+y) = \varphi(x+y) + \Delta$ اختلاف فاز تصاویر برش خورده پس از بارگذاری نمونه و $\Delta = \varphi'(x+y) - \varphi(x+y)$ تغییر فاز هر نقطه ناشی از تغییر شکل نسبی است. تصویر حاصل از اختلاف شدت نور در دوربین پس از انجام پردازش‌های ذکر شده، تبدیل به تصاویر هاله‌های ناشی از تداخل امواج خواهد شد. در مناطقی که تغییر شکل‌های بزرگتری رخ دهد، این هاله‌ها متمرکزتر بوده و وجود یک منطقه تمرکز کرنش را گزارش می‌کند. از این رو از روش برش‌نگاری دیجیتال می‌توان برای تشخیص و ارزیابی عیوب در قطعات مختلف استفاده کرد. در این روش قطعه‌کار تحت نوعی از بارگذاری قرار گرفته که این بارگذاری باعث تمرکز تنش و کرنش در محل عیوب می‌شود. اگر تاثیر این تمرکز تنش و کرنش به گونه‌ای باشد که اثر آن در سطح جسم قابل مشاهده باشد، می‌توان علاوه بر محل عیب اندازه و نوع آن را نیز تعیین کرد. به عبارت دیگر، با توجه به تعداد هاله‌های ایجاد شده می‌توان اندازه و عمق عیوب را به دست آورد. به این صورت که اگر هاله‌ها متراکم‌تر باشند، یعنی عیب دارای اندازه بزرگ و یا این که دارای عمق کمتری است. از روش برش‌نگاری دیجیتال می‌توان برای شناسایی ترک‌ها و انواع عیوب زیر سطحی استفاده کرد [۱۷].

۳- آزمایش‌های تجربی

در این قسمت، نمونه‌های آزمایشی آماده شده برای انجام آزمون‌های برش‌نگاری، معرفی و نوع و نحوه ایجاد عیوب ساختگی در آنها بیان شده است؛ همچنین روش‌های مختلف بارگذاری به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱- ایجاد چیدمان عملی برش‌نگاری

چیدمان برش‌نگاری شامل، بردبرد^۱ اپتیکی، آینه‌ها، تداخل‌گر مایکلسون، دوربین CCD و لیزر که به منظور حذف

² Delamination

³ Computer Numerical Contro

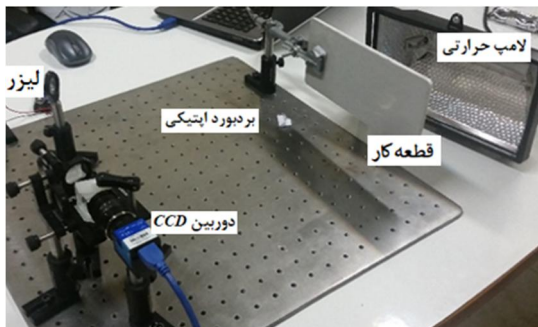
⁴ Charge-Coupled Device

⁵ Stress

¹ Breadboard

۳-۴- بارگذاری حرارتی

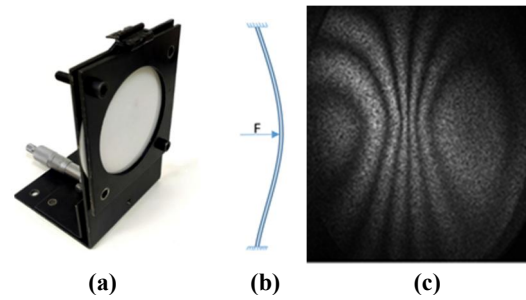
بارگذاری حرارتی در این آزمایش توسط یک لامپ حرارتی با توان ۱۰۰۰ وات انجام گرفت. منبع حرارتی در فاصله ۳۰ سانتی متری از پشت قطعه کار قرار گرفته و به مدت ۲ ثانیه روشن شده و قطعه کار تحت تابش قرار می گیرد. پس از خاموش شدن لامپ حرارتی و در حین سرد شدن قطعه کار، دوربین CCD با فاصله زمانی ۱ ثانیه شروع به گرفتن تصویر داخلی از سطح قطعه کار می کند. تصویر اول با بیشترین دما به عنوان تصویر مرجع و سپس تصویر بعدی به عنوان تصویر تغییر شکل قطعه کار در نظر گرفته می شود. با استفاده از روش های پردازش تصویر، تصویر مرجع با تصویر تغییر شکل مقایسه و عیوب شناسایی می شود. مقدار بارگذاری با فاصله زمانی تصویر مرجع و تصویر تغییر شکل تنظیم می شود. به عبارتی هرچقدر فاصله زمانی تصویر مرجع و تغییر شکل افزایش یابد، مقدار بارگذاری بیشتر می شود. چیدمان حرارتی استفاده شده در انجام آزمایشات در شکل ۶ مشاهده می شود.



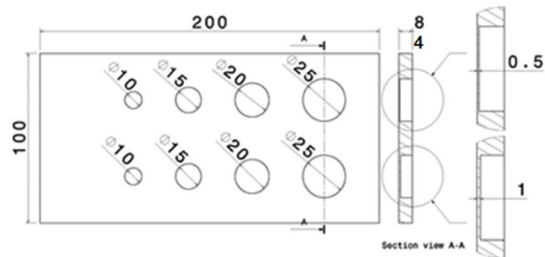
شکل ۶- چیدمان برش نگرایی دیجیتالی با بارگذاری توسط لامپ حرارتی با توان ۱۰۰۰ W

۳-۵- بارگذاری با امواج صوتی (ارتعاشی)

بارگذاری ارتعاشی در این آزمایش با استفاده از موج سینوسی با فرکانس و دامنه های ارتعاشی متفاوت انجام گرفت که توسط فانکشن ژنراتور^۲ دیجیتال (G305) ایجاد و با استفاده از یک آمپلی فایر^۳ ۵۰ وات تقویت می شود. امواج تقویت شده توسط یک مکانیزم طراحی و ساخته شده به قطعه کار منتقل



شکل ۴- (a) مکانیزم بارگذاری نقطه ای، (b) شماتیک عمل جابجایی به صفحه دایره ای توسط میکرومتر و (c) هاله های برش نگرایی ناشی از فشار میکرومتر



شکل ۵- شکل و اندازه عیوب ایجاد شده روی قطعه ای از جنس پلی اتیلن سبک و تفلون

کرنش^۱ قرار گرفته و در اثر تمرکز تنش و کرنش در محل عیب می توان آن را شناسایی کرد. انتخاب یک سیستم بارگذاری مناسب و اعمال صحیح بار، اهمیت فوق العاده ای در کارایی سیستم تشخیص عیوب دارد. برخی از انواع بارگذاری ممکن است، تنها بخشی از عیوب موجود را نمایان سازد و برخی نه تنها به تشخیص عیوب منجر نشود، بلکه با ایجاد نشانه های گمراه کننده، باعث معیوب نشان دادن قطعات سالم شود. از بارگذاری های که در روش برش نگرایی دیجیتالی مرسوم می باشند، می توان به روش های بارگذاری مکانیکی، خلاء نسبی، فشار داخلی در لوله ها و مخازن، بارگذاری حرارتی و ارتعاشی اشاره کرد. در این مقاله دور روش بارگذاری حرارتی و ارتعاشی با یکدیگر روی قطعاتی از جنس پلی اتیلن سبک و تفلون مقایسه شده است که دارای عیوب صفحه ای می باشند.

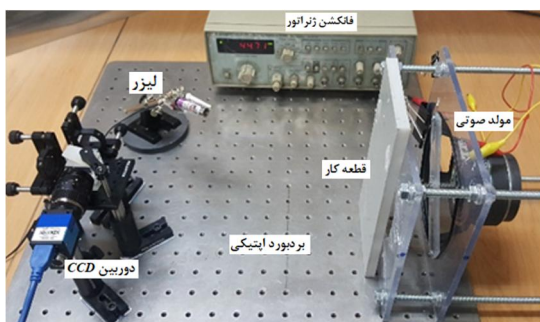
² Function Generator

³ Amplifier

¹ Strain

در شکل ۹ عیوب شناسایی شده با قطر ۱۵ و ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر با عمق ۰/۵ میلی‌متر روی قطعه‌ای از جنس تفلون با استفاده از بارگذاری حرارتی مشاهده می‌شود که در آن عیب با قطر ۱۵ میلی‌متر و اندازه برش ۱۰ میلی‌متر شناسایی شده است شکل ۹-a؛ ولی همین عیب با اندازه برش ۱۲ میلی‌متر شناسایی نشده و هاله مناسبی مشاهده نمی‌توان کرد شکل ۹-b.

به منظور عیب‌یابی با استفاده از بارگذاری ارتعاشی چیدمان برش‌نگاری تنظیم و امواج سینوسی توسط فانکشن ژنراتور با فرکانسی در حدود ۴۴/۱۳ کیلوهرتز و دامنه ۸/۲۶ ولت با استفاده از یک سیستم ارتعاشی به قطعه‌کار منتقل شد. هم زمان با ارتعاش قطعه‌کار تصاویر تداخلی توسط دوربین از سطح قطعه‌کار گرفته می‌شود. با مقایسه دو تصویر مرجع و تغییر شکل یافته با یک دیگر می‌توان عیوب را شناسایی کرد. در شکل ۱۰ عیوب شناسایی شده با قطر ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر در دو عمق ۰/۵ میلی‌متر در سمت راست تصویر

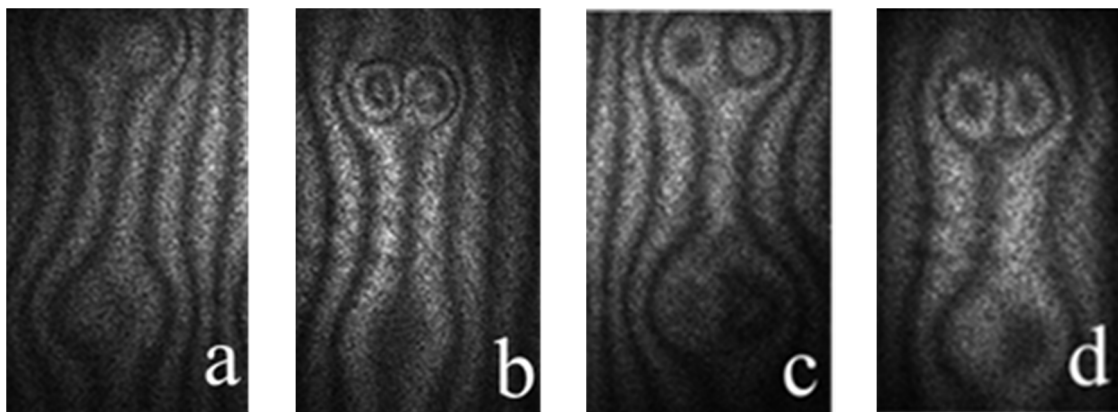


شکل ۷- چیدمان برش‌نگاری دیجیتال با بارگذاری ارتعاشی

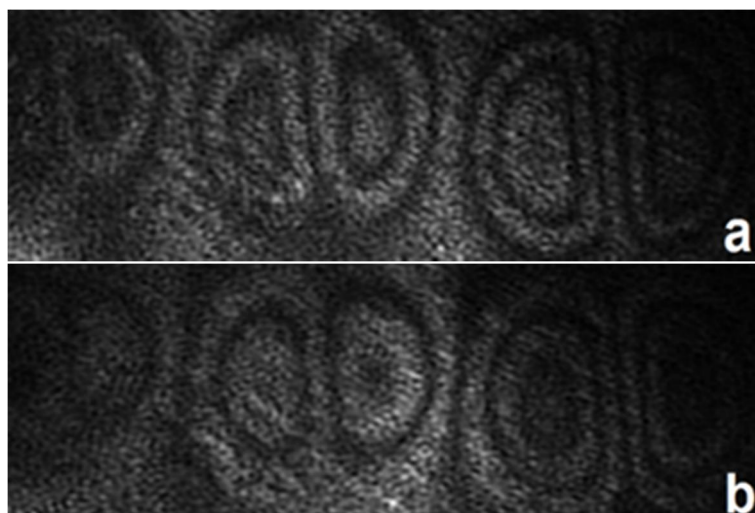
و تصویر تداخلی هم زمان با بارگذاری با فاصله زمانی ۱ ثانیه از سطح قطعه‌کار توسط دوربین CCD ثبت می‌شود. تصویر اول به عنوان تصویر مرجع در نظر گرفته شده و تصاویر دیگر با دامنه‌های متفاوت به عنوان تصویر تغییر شکل در نظر گرفته می‌شود و با استفاده از روش‌های پردازش تصویر، تصویر مرجع و تصاویر تغییر شکل با هم مقایسه و عیوب شناسایی می‌شود. چیدمان برش‌نگاری با بارگذاری ارتعاشی در شکل ۷ مشاهده می‌شود.

۴- نتایج و بحث

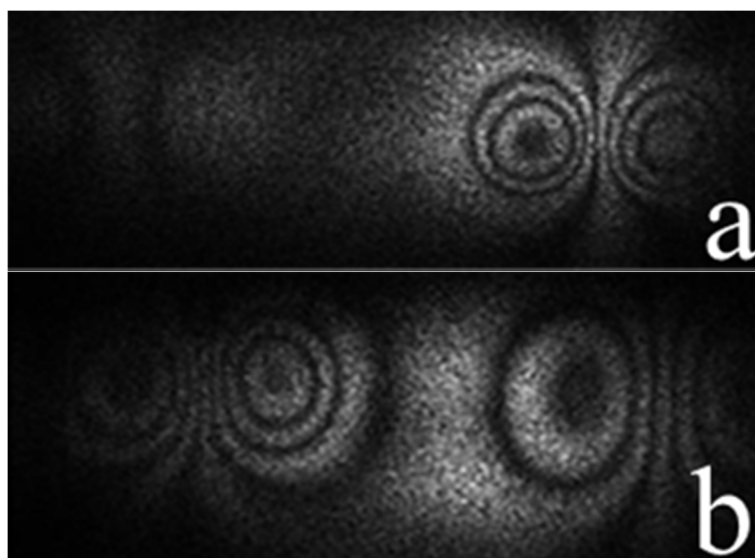
با انجام مراحل نرم‌افزاری پردازش تصاویر، عیوب به صورت هاله‌های برش‌نگاری ظاهر می‌شوند که با توجه به تعداد هاله‌ها و فشردگی آنها نسبت به هم می‌توان اندازه و عمق عیب را به دست آورد. به منظور محاسبه ابعاد و اندازه عیب از روی هاله‌های برش‌نگاری نیاز به اندازه‌گیری فاصله هاله‌ها است. از این رو کیفیت هاله و همچنین حذف هاله‌های مزاحم تاثیر به سزایی بر دقت فرآیند خواهد داشت. یکی از مهمترین پارامترهایی که بر کیفیت هاله‌ها تاثیر گذار است، نوع و میزان بارگذاری است. در شکل ۸ عیوب شناسایی شده با قطر ۲۰ و ۲۵ میلی‌متر و دو عمق ۰/۵ میلی‌متر در بالای تصویر و عمق ۱ میلی‌متر در پایین تصویر روی قطعه‌ای از جنس پلی‌اتیلن سبک با استفاده از بارگذاری حرارتی مشاهده می‌شود که در آن علاوه بر هاله‌های عیب، هاله‌های ناخواسته قطعه‌کار نیز ایجاد شده است که این هاله‌ها باعث ایجاد خطا در تشخیص و شناسایی عیوب قطعه‌کار می‌شود.



شکل ۸- (a) عیوب با قطر ۲۰ و اندازه برش ۱۵ میلی‌متر، (b) عیوب با قطر ۲۰ و اندازه برش ۲۰ میلی‌متر، (c) عیوب با قطر ۲۵ و اندازه برش ۱۵ میلی‌متر، (d) عیوب با قطر ۲۵ و اندازه برش ۲۰ میلی‌متر



شکل ۹- (a) عیب با قطر ۲۵، ۲۰، ۱۵ و اندازه برش ۱۰ میلی‌متر و (b) عیب با قطر ۲۵، ۲۰، ۱۵ و اندازه برش ۱۲ میلی‌متر



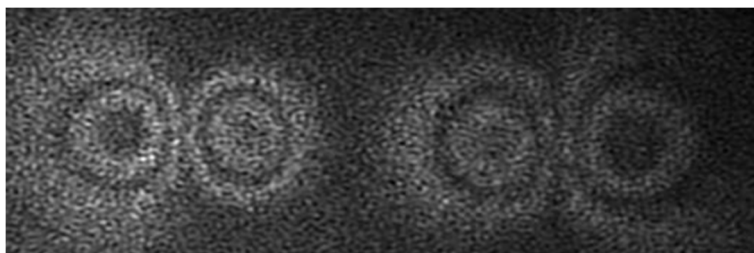
شکل ۱۰- (a) عیوب با قطر ۲۰ و اندازه برش ۱۵ میلی‌متر، (b) عیوب با قطر ۲۵ و اندازه برش ۱۵ میلی‌متر

تصویر با عمق ۰/۵ میلی‌متر و اندازه برش ۱۰ میلی‌متر روی قطعه‌ای از جنس تفلون مشاهده می‌شود.

به طور کلی کیفیت هاله‌های برش‌نگاری در شناسایی عیوب با بارگذاری ارتعاشی بهتر از روش بارگذاری حرارتی است؛ چرا که در روش بارگذاری حرارتی، تنش حرارتی به کل سطح قطعه اعمال شده و تغییر شکل در کل سطح قطعه ایجاد می‌شود. تغییر شکل‌های ایجاد شده در کل سطح قطعه باعث ایجاد هاله‌های ناخواسته و اضافی می‌شود. همان طور که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، عیوب روی قطعه‌ای از جنس

و عمق ۱ میلی‌متر در سمت چپ تصویر روی قطعه‌ای از جنس پلی‌اتیلن سبک با استفاده از بارگذاری ارتعاشی مشاهده می‌شود که در آن فقط هاله‌های خود عیب به صورت با کیفیت و واضح مشاهده می‌شود و هاله‌های اضافی قطعه کار حذف شده است که به عنوان نويز در بررسی و شناسایی عیوب تلقی می‌شود.

در شکل ۱۱ عیوب شناسایی شده با قطر ۲۰ میلی‌متر در سمت چپ تصویر و عیب قطر ۲۵ میلی‌متر در سمت راست



شکل (۱۱) عیب با قطر ۲۰ میلی‌متر (سمت چپ تصویر) و عیب با قطر ۲۵ میلی‌متر (سمت راست تصویر) و اندازه برش ۱۰ میلی‌متر

با بارگذاری ارتعاشی قابل شناسایی نمی‌باشد؛ همچنین عیب با قطر کمتر از ۱۰ میلی‌متر روی قطعه‌کار آماده شده در این آزمایش (پلی‌اتیلن سبک و تفلون) با هیچ یک از روش‌های بارگذاری (حرارتی و ارتعاشی) شناسایی نشده است؛ همچنین برای شناسایی عیوب در روش برش‌نگاری اندازه برش باید کمتر از اندازه عیب در نظر گرفته شود.

۴-۱- اثر اندازه برش

اندازه برش یکی از پارامترهای مهم در تشخیص عیوب با روش برش‌نگاری دیجیتالی است. مقدار اندازه برش ارتباط مستقیم با مقدار بارگذاری دارد. به این صورت که اگر اندازه برش افزایش یابد، هاله‌ها متراکم تر شده و تشخیص و بررسی عیوب دشوار می‌شود. برای حل این مشکل می‌توان مقدار

جدول ۱- عیوب شناسایی شده با قطر و عمق‌های مختلف

روی قطعه‌ای از جنس پلی‌اتیلن سبک

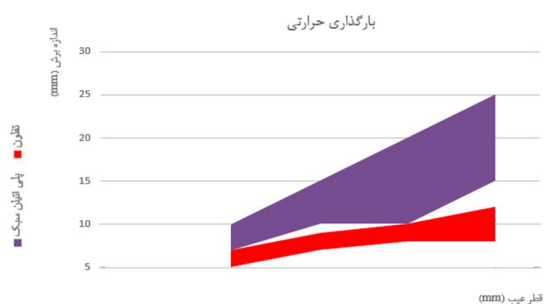
اندازه برش (mm)	۲۵		۲۰		۱۵		۱۰	
	۱	۰/۵	۱	۰/۵	۱	۰/۵	۱	۰/۵
عمق عیب (mm)	*	*	*	*	*	*	*	*
قطر عیب (mm)	#	#	#	#	#	#	#	#
۲۵	*	*	*	*	*	*	*	*
۲۰	#	#	#	#	#	#	#	#
۱۵	-	-	-	-	-	-	-	-
۱۰	-	-	-	-	-	-	-	-
۵	-	-	-	-	-	-	-	-

* عیوب شناسای شده با بارگذاری حرارتی # عیوب شناسایی شده با بارگذاری ارتعاشی

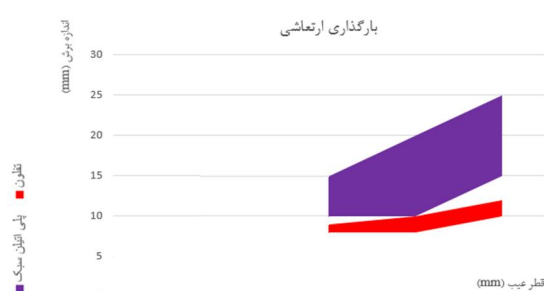
پلی‌اتیلن سبک با استفاده از روش بارگذاری حرارتی در دو عمق ۰/۵ و ۱ میلی‌متر شناسایی شده است؛ ولی هاله‌های برش‌نگاری دارای کیفیت پایین است و مرز بین هاله‌ها به خوبی مشخص نمی‌باشد؛ همچنین علاوه بر هاله‌های عیوب، هاله‌های قطعه‌کار نیز مشاهده می‌شود که باعث ایجاد خطا در تشخیص تعداد هاله‌های عیب و عدم شناسایی دقیق محل عیب می‌شود. این در حالی است که در روش بارگذاری ارتعاشی از آنجایی که فرکانس تحریک قطعه در محدوده فرکانس تشدید عیوب موجود در آن است، دامنه نوسانی محل وجود عیب، بسیار بیشتر از سایر قسمت‌های سالم قطعه است، بر همین اساس هاله‌های برش‌نگاری فقط در محل وجود عیب ایجاد می‌شود. همان طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، هاله‌های اضافی خود قطعه‌کار وجود نداشته و می‌توان به راحتی تعداد و فاصله هاله‌های عیب را تشخیص و محل عیب را به راحتی شناسایی کرد. با این حال، عیب قطر ۲۰ میلی‌متر با عمق ۱ میلی‌متر در اندازه برش ۱۵ میلی‌متر شناسایی می‌شود، ولی هاله آن بسیار ضعیف است. در جدول ۱ عیوب شناسایی شده با قطر و عمق‌های مختلف روی قطعه از جنس پلی‌اتیلن سبک به روش بارگذاری حرارتی و ارتعاشی با اندازه برش‌های مختلف نشان داده شده است.

در جدول ۲ عیوب شناسایی شده با قطر و عمق‌های مختلف روی قطعه از جنس تفلون به روش بارگذاری حرارتی و ارتعاشی با اندازه برش‌های مختلف نشان داده شده است.

همان طور که در جدول ۱ و ۲ مشخص است، توانایی شناسایی عیوب با بارگذاری ارتعاشی تفاوت چندانی با شناسایی عیوب با بارگذاری حرارتی ندارد؛ چرا که تمام عیوبی که با بارگذاری حرارتی شناسایی شده است، با بارگذاری ارتعاشی نیز قابل شناسایی است. البته بجز عیب قطر ۱۰ میلی‌متر که با بارگذاری حرارتی شناسایی شده، ولی



شکل ۱۲- اندازه برش مجاز برای نمونه پلیمری با جنس‌های پلی اتیلن سبک و تفلون با بارگذاری حرارتی



شکل ۱۳- اندازه برش مجاز برای نمونه پلیمری با جنس‌های پلی اتیلن سبک و تفلون با بارگذاری ارتعاشی

جدول ۳- مقدار حداکثر و حداقل اندازه برش مجاز بارگذاری حرارتی

قطر عیب (mm)	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵
حداکثر اندازه برش مجاز پلی اتیلن سبک	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	-
حداقل اندازه برش مجاز پلی اتیلن سبک	۱۵	۱۰	۱۰	۷	-
حداکثر اندازه برش مجاز تفلون	۱۲	۱۰	۹	۷	-
حداقل اندازه برش مجاز تفلون	۸	۸	۷	۵	-

جدول ۴- مقدار حداکثر و حداقل اندازه برش مجاز بارگذاری ارتعاشی

قطر عیب (mm)	۲۵	۲۰	۱۵	۱۰	۵
حداکثر اندازه برش مجاز پلی اتیلن سبک	۲۵	۲۰	۱۵	-	-
حداقل اندازه برش مجاز پلی اتیلن سبک	۱۵	۱۰	۱۰	-	-
حداکثر اندازه برش مجاز تفلون	۱۲	۱۰	۹	-	-
حداقل اندازه برش مجاز تفلون	۱۰	۸	۸	-	-

جدول ۲- عیوب شناسایی شده با قطر و عمق‌های مختلف روی قطعه‌ای از جنس تفلون

اندازه برش (mm)	۶	۸	۱۰	۱۲	عمق عیب (mm)	قطر عیب (mm)
۲۵	۱	۰/۵	۱	۰/۵	*	*
۲۰	-	*	*	*	#	#
۱۵	-	*	*	-	-	-
۱۰	-	*	-	-	-	-
۵	-	-	-	-	-	-

* عیوب شناسایی شده با بارگذاری حرارتی # عیوب شناسایی شده با بارگذاری ارتعاشی

بارگذاری را کاهش داد. از طرفی اگر اندازه برش کم باشد، برای شناسایی عیوب نیاز به بارگذاری بیشتری است. پس تعیین نسبت مناسب اندازه برش و مقدار بارگذاری از اهمیت زیادی برای شناسایی عیوب برخوردار است. تعیین اندازه برش علاوه بر این که ارتباط مستقیم با مقدار بارگذاری دارد. عواملی چون اندازه تصویر و اندازه عیب تاثیر زیادی در انتخاب اندازه برش خواهد داشت. در این مقاله با ثابت گرفتن مقدار بارگذاری و اندازه تصویر ارتباط اندازه برش با جنس قطعه با دو نوع بارگذاری حرارتی و ارتعاشی مورد بررسی قرار گرفت. در نهایت نموداری برای تعیین اندازه برش مناسب مشاهده می‌شود که در شکل ۱۲ برای بارگذاری حرارتی و در شکل ۱۳ برای بارگذاری ارتعاشی با دو جنس پلی اتیلن سبک و تفلون تدوین شد.

جدول ۳ و ۴ مقدار حداکثر و حداقل اندازه برش مجاز با دو روش بارگذاری حرارتی و ارتعاشی را در جنس‌های مختلف نشان می‌دهد. همان طور که مشخص است، مقدار اندازه برش بهینه در پلی اتیلن سبک همان قطر عیب است و نوع بارگذاری تاثیری بر مقدار اندازه برش نداشته، چرا که مقدار اندازه برش در دو نوع بارگذاری حرارتی و ارتعاشی تقریباً برابر است، ولی جنس قطعات در مقدار اندازه برش تاثیر گذار است؛ چرا که با تغییر جنس قطعه کار مقدار اندازه برش تغییر زیادی می‌کند.

روش بارگذاری ارتعاشی علاوه بر محل دقیق عیوب، شکل و ابعاد و اندازه آن را نیز تا حدودی تخمین زد.

۶- مراجع

- [1] Leendertz JA, Butters JN (1973) An image-shearing speckle-pattern interferometer for measuring bending moments. *J Phys E Sci Instrum* 6(11): 1107.
- [2] Hung YY (1982) Shearography: A new optical method for strain measurement and nondestructive testing. *Opt Eng* 21(3): 213391.
- [3] Hung YY (1997) Digital shearography versus TV-holography for non-destructive evaluation. *Opt Laser Eng* 26(4-5): 421-436.
- [4] Nakadate S, Yatagai T, Saito H (1980) Digital speckle-pattern shearing interferometry. *Appl Optics* 19(24): 4241-4246.
- [5] Toh SL, Shang HM, Chau FS, Tay CJ (1991) Flaw detection in composites using time-average shearography. *Opt Laser Technol* 23(1): 25-30.
- [6] Rao VV, Mohan NKK (1999) Real-time image subtraction using phase reversal technique. In *Optical Diagnostics for Fluids/Heat/Combustion and Photomechanics for Solids* (Vol. 3783, pp. 288-293). International Society for Optics and Photonics.
- [7] Sim CW, Chau FS, Toh SL (1995) Vibration analysis and non-destructive testing with real-time shearography. *Opt Laser Technol* 27(1): 45-49.
- [8] Hung Y, et al. (2000) NDT of joined surfaces using digital time-integrated shearography with multiple-frequency sweep. *Opt Laser Eng* 33(5): 369-382.
- [9] Huang YH, Ng SP, Liu L, Li CL, Chen YS, Hung YY (2009) NDT&E using shearography with impulsive thermal stressing and clustering phase extraction. *Opt Laser Eng* 47(7-8): 774-781.
- [10] Akbari D, Soltani N, Farahani M (2013) Numerical and experimental investigation of defect detection in polymer materials by means of digital shearography with thermal loading. *P I Mech Eng B-J Eng* 227(3): 430-442.
- [11] Findeis D, Gryzagoridis J (2014) Digital shearography and vibration excitation for NDT of aircraft components. In *AIP Conference Proceedings American Institute of Physics* 1600(1): 33-38.
- [12] Yang F, Ye X, Qiu Z, Zhang B, Zhong P, Liang Z, Zhu S (2017) The effect of loading methods and parameters on defect detection in digital shearography. *Results Phys* 7: 3744-3755.

۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله بارگذاری ارتعاشی در انجام آزمون‌های غیر مخرب به روش تداخل سنجی لیزری برشی دیجیتالی به عنوان یک روش نوری و غیر تماسی برای شناسایی عیوب صفحه‌ای موجود روی قطعاتی از جنس پلی‌اتیلن سبک و تفلون مورد استفاده قرار گرفته است. بعد از بیان تئوری کلی روش چیدمان آزمایشگاهی از آن ایجاد و قابلیت این روش در شناسایی عیوب ایجاد شده با عمق‌ها و قطرهای مختلف با روش بارگذاری حرارتی مقایسه و نتایج حاصل به شرح زیر بیان شده است:

- ✓ روی نمونه‌های حاضر در این پژوهش با بارگذاری حرارتی عیوب با قطر کوچکتر از ۱۰ میلی‌متر و با بارگذاری ارتعاشی عیوب با قطر کوچکتر از ۱۵ میلی‌متر قابل شناسایی نمی‌باشند.
- ✓ از پارمترهای تاثیر گذار بر شناسایی عیوب با روش بارگذاری ارتعاشی می‌توان به اندازه و عمق عیب اشاره کرد که تاثیر و وابستگی عمق عیب نسبت به اندازه عیب بیشتر تشخیص داده شد.
- ✓ مقدار اندازه برش با اندازه عیب در ارتباط بوده و همیشه کمتر از اندازه عیوب احتمالی در قطعه در نظر گرفته می‌شود.
- ✓ جنس قطعه بر تعیین نسبت اندازه برش تاثیر گذار است که در شناسایی عیوب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است؛ به طوری که اندازه برش مناسب در قطعه پی‌وی‌سی سبک همان اندازه عیوب تعیین شد، ولی در قطعه تفلون متفاوت است.
- ✓ سرعت انجام آزمون با استفاده از بارگذاری ارتعاشی نسبت به روش حرارتی بسیار بالا است؛ چرا که ضریب انتقال حرارت پلیمرها و مواد مرکب پایین بوده و گرما در این مواد دیر منتقل می‌شود و همچنین اثر گرما نیز دیر از بین می‌رود و از آنجایی که آزمون پی در پی در بحث آزمون‌های غیر مخرب لازم است، زمان انجام آزمون با این روش نسبتاً بالا خواهد بود.
- ✓ شناسایی و بررسی عیوب با استفاده از بارگذاری ارتعاشی دارای نتایج و هاله‌های با کیفیت‌تر نسبت به روش بارگذاری حرارتی بوده و می‌توان در

- evaluation of defects in composite materials. Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran. (In Persian)
- [17] Hung YY, Chen YS, Ng SP, Liu L, Huang YH, Luk BL, Chung PS (2009) Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation. *Mater Sci Eng R Rep* 64(5-6): 73-112.
- [18] Liu Z, Gao J, Xie H, Wallace P (2011) NDT capability of digital shearography for different materials. *Opt Laser Eng* 49(12): 1462-1469.
- [13] Asemani H, Park J, Lee JR, Soltani N (2017) Development of PZT-excited stroboscopic shearography for full-field nondestructive evaluation. *Rev Sci Instrum* 88(5): 053301.
- [14] Liu H, Guo S, Chen YF, Tan CY, Zhang L (2018) Acoustic shearography for crack detection in metallic plates. *Smart Mater Struct* 27(8): 085018.
- [15] Liu H, Liu M, Zhang L, Chen YF, Tan CY, Guo S, Cui F (2018) Directed acoustic shearography for crack detection around fastener holes in aluminum plates. *NDT&E Int* 100: 124-131.
- [16] Akbari D (2012) Development and application of non destructive testing of digital shearography in