

## Application of the Laser Shearography in the Nondestructive Evaluation of the Defects in the Flat and Curved Surfaces Made of Carbon Fiber Composites

Amjad Sazgar<sup>1\*</sup>, Morteza Amiri<sup>2</sup>

1- Nuclear Fuel Cycle Research School, Nuclear Science and Technology Research Institute, AEOI.

2- Researcher at AEOI.

\*aszgar@aeoi.org.ir

### Abstract

Laser shearing interferometry or Shearography is one of the new optic methods for calculating the very small surface displacement derivatives in order of microns. Shearography can be beneficially used in the non-destructive testing of materials, especially in composites. In this paper, laser shearography is used to detect some kinds of defects like cavities, solid inclusions and matrix cracks in both flat and curved furnaces made of carbon fiber reinforced composites. As the system parameters and loading amount are the most important factors affecting defect detection ability in this technique, the test scenarios including all these factors have been compiled for both flat and curved surfaces. The shearography tests are performed to get the best results of defect detectability in the test specimens. The results show that the best responses are observed with a shear size of one half the approximated defect sizes. The thermal loading range of 3kW and 1kW in the 0.5 and 1 seconds should be used as the best choices in the flat sheet and curved sheet specimens respectively.

**Keywords:** Laser Shearing interferometry, Digital shearography, Non-destructive inspection, Polymer matrix material, Sub-surface defects

## به کارگیری روش تداخل سنجی برشی لیزری در تشخیص و ارزیابی غیرمخرب عیوب در ورق‌ها و سطوح منحنی ساخته شده از مواد مرکب

امجد سازگار<sup>۱\*</sup>، مرتضی امیری<sup>۲</sup>

۱- پژوهشکده چرخه سوخت هسته‌ای، پژوهشگاه علوم و فنون هسته‌ای، سازمان انرژی اتمی ایران،

۲- پژوهشگر سازمان انرژی اتمی ایران.

\*aszgar@aeoi.org.ir

### چکیده

تداخل سنجی برشی لیزری یا در اصطلاح برشنگاری دیجیتال، یکی از روش‌های نوین لیزری برای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌های سطحی در مواد مختلف است که قادر است جابه‌جایی‌هایی در ابعاد میکرومتر را اندازه‌گیری و محدوده گسترده‌ای از سطح جسم را در یک لحظه مورد مطالعه قرار دهد. یکی از قابلیت‌های ویژه این روش، توانایی تشخیص نواحی معیوب در مواد با استفاده از تعیین تمرکز جابه‌جایی‌های سطحی با اعمال نوعی از بارگذاری مناسب است. در این مقاله، با معرفی یک سیستم غیرمخرب فعال مبتنی بر روش مذکور، برای عیب‌یابی نمونه‌های پلیمری تقویت شده با الیاف کربن، عیوبی نظیر ذرات خارجی، ترک در ماتریس و حفره‌های هوایی داخلی در دو هندسه ورق تخت و ورق انحنا دار شناسایی و ارزیابی شده است. از آنجاکه توسعه کاربردی این روش در مواد کامپوزیتی، وابسته به شناخت پارامترها و کمی‌سازی نتایج تحلیل است، تأثیر کمی پارامترها در شناسایی عیوب مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصله، نشان‌دهنده محدودیت کاربردی این روش در شناسایی ترک‌ها و عیوب با طول‌های حداقلی به اندازه ۵۰٪ اندازه برش در نمونه‌های تخت و انحنا دار است. همچنین نتایج برشنگاری در هندسه ورق انحنا دار، نشان دادند که تنها در راستای عمود بر محور ورق انحنا دار قابلیت شناسایی عیوب وجود دارد. بارگذاری حرارتی با توان ۳ کیلووات به مدت ۰/۵ ثانیه و ۱ کیلووات به مدت ۱ ثانیه بهترین نتایج را به ترتیب در ورق‌های با هندسه تخت و انحنا دار ایجاد کرد. تحلیل نتایج نشان می‌دهند که عیوب با دقت بالایی بدرستی تشخیص داده می‌شوند.

**واژگان کلیدی:** تضعیف موج، امواج فراصوتی، عدم قطعیت، آزمون غوطه‌وری.

### ۱- مقدمه

می‌شوند. از این رو، توسعه روش‌های بازرسی مخصوص مواد مرکب، بسیار پراهمیت است. در این میان، آزمون‌های غیرمخرب نقش بسیار مهمی را در بررسی یکپارچگی سازه‌های کامپوزیتی دارا هستند. از طرفی به دلیل ماهیت ناهمگن، غیر مغناطیس بودن و همچنین نارسایی بسیاری از انواع مواد مرکب، استفاده از روش‌های معمول آزمون‌های غیرمخرب در این گونه مواد محدودیت دارد.

روش برشنگاری<sup>۱</sup> یا تداخل سنجی لکه‌ای برشی<sup>۲</sup> یکی از روش‌های غیرمخرب نوین است که قابلیت تشخیص انواع عیوب در سطوح داخلی مواد مرکب را ایجاد می‌کند [۱]. این روش با رفع محدودیت روش هولوگرافی، حساسیت به ارتعاش مجموعه را کاهش داده و محاسبه مستقیم

مواد مرکب با زمینه پلیمری از رایج‌ترین مواد کامپوزیتی مورد استفاده در صنایع هستند که در آن‌ها پلیمرهایی نظیر اپوکسی، پلی‌استر و اورتان با الیاف کم قطر شیشه، گرافیت، آرامید و بور تقویت می‌شوند. هزینه کم، استحکام بالا و روش‌های ساخت آسان باعث رواج هرچه بیشتر این نوع کامپوزیت‌ها شده است. با وجود مزایای عمده این گونه مواد، ماهیت ناهمگن و شرایط ویژه تولید، احتمال وجود عیوبی نظیر خلل و فرج، عدم چسبندگی، لایه‌ای شدن و همچنین ایجاد انواع ترک‌ها را در این مواد بیشتر می‌کند. این عیوب ممکن است در لایه‌های داخلی ماده ایجاد گردند. همچنین گاهی به دلیل ابعاد کوچک عیوب و یا زیرسطحی بودن آن‌ها، در بازرسی‌های چشمی به خوبی قابل مشاهده نبوده و باعث کاهش چشمگیر قابلیت‌های کارکردی ماده مرکب

<sup>1</sup>Shearography

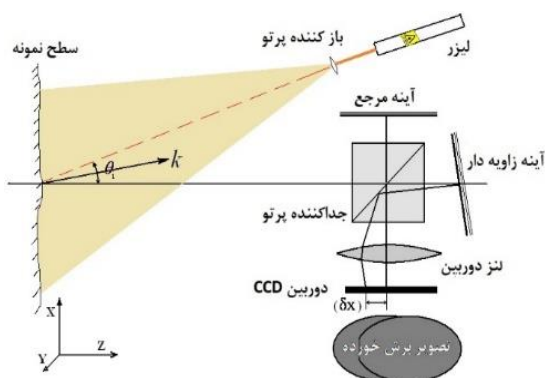
<sup>2</sup>Speckle pattern shearing interferometry

ایجاد شده و با تغییر اندازه برش مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نکته مهم و قابل توجه در این مقاله استفاده از بارگذاری حرارتی به صورت پالس برای تشخیص پذیری انواع عیوب است که با موفقیت نتایج، روش ساده‌ای را برای یک سیستم عیب‌یابی مناسب معرفی می‌نماید. همچنین استفاده از سیستم معرفی شده در هندسه منحنی شکل، با وجود تغییر اندازه برش در راستای محیط از ویژگی‌های مهم و قابل توجه در سیستم عیب‌یابی مزبور است. با تعیین محدوده مناسب بارگذاری، می‌توان تشخیص‌پذیر بودن عیوب را در روش مورد مطالعه تضمین کرد و یک الگوی بهینه از ترکیب بار- اندازه برش برای تشخیص سایر ترک‌های احتمالی پیش‌بینی نمود.

## ۲- اصول برشنگاری

### ۲-۱- چیدمان برشنگاری

اساس روش برشنگاری بر مبنای تداخل دو جبهه نور بازتابش شده از سطح جسم است که در معرض تابش یک نور تک‌رنگ قرار گرفته‌اند. در شکل ۱ چیدمان روش برشنگاری نشان داده شده است. سطح نمونه با استفاده از نور لیزر روشن شده و نور بازتاب‌شده پس از عبور از تداخلگر وارد حس‌گر دوربین می‌شود. تصویر حاصل یک الگوی لکه‌دار<sup>۱</sup> است که با کم کردن شدت نور ذخیره شده قبل و بعد از تغییر شکل، برهم‌نهی و پردازش تصاویر، یک تصویر هاله‌دار از سطح ایجاد می‌گردد. هاله‌های ایجاد شده نشان‌دهنده نواحی هم‌کرنش در سطح می‌باشند. محاسبه کمی ارتباط هاله‌های ایجاد شده با کرنش‌های سطحی، نیازمند شناخت روابط حاکم در برشنگاری است.



شکل ۱- چیدمان تداخل سنج برشی لیزری بر پایه تداخلگر مایکلسون.

<sup>۱</sup>Speckle Pattern

کرنش‌های سطحی را امکان پذیر نموده است [۲]. این مزایا موجب افزایش روزافزون استفاده از این روش در عیب‌یابی و بازرسی غیرمخرب صنعتی شده است.

برشنگاری اولین بار توسط لیندرتز در سال ۱۹۷۰ برپایه توسعه روش هولوگرافی شکل گرفت و برای محاسبه مشتقات جابه‌جایی سطح و سپس برای محاسبه ممان خمشی در یک تیر به کار برده شد [۳]. از روش برشنگاری در ارزیابی‌های غیرمخرب نیز به شکلهای مختلف استفاده شده است. به عنوان مثال توه و همکاران از آن برای مشخص کردن عیوب در ورق‌های کامپوزیتی پلاستیکی تقویت‌شده با الیاف شیشه استفاده نمودند [۴]. ایده اصلی کاربرد برشنگاری در عیب‌یابی، ایجاد تمرکز جابه‌جایی سطحی در مناطق معیوب با استفاده از یک روش بارگذاری است.

بیشتر تحقیقات اخیر انجام گرفته بر روی روش برشنگاری، متمرکز بر بهبود و توسعه کاربردهای آن در عیب‌یابی نمونه‌های خاص و یا توسعه سیستم‌های بارگذاری متناسب با شرایط ویژه قطعات بوده است. اکبری و همکاران در سال ۲۰۱۳ روش بارگذاری حرارتی را برای تشخیص عیوب در پلیمرها بررسی کردند [۵]. محمدی و اکبری در کار دیگری با استفاده از مدل‌سازی هاله‌های برشنگاری معیاری برای میزان بارگذاری مورد نیاز در عیب‌یابی ارائه کردند [۶].

با بررسی‌های صورت گرفته، مواد مرکب تقویت‌شده با الیاف کربن به دلیل ماهیت استحکامی بالاتر در الیاف قابلیت ارتجاعی بسیار کم، کم‌تر مورد توجه محققان این حوزه بوده و پارامترهای مؤثر بر عیب‌یابی در این روش در کامپوزیت‌های الیاف کربن؛ به‌ویژه برای وجود ترک مورد توجه چندانی قرار نگرفته است. همچنین پارامترهای روش آزمون برشنگاری، اندازه برش، نوع و اندازه بارگذاری لازم از پارامترهای بسیار مهم در تعیین و تفسیر نتایج است که در اکثر تحقیقات انجام‌گرفته، برابر مقدار ثابتی در نظر گرفته شده و اثر آن در نظر گرفته نشده است.

در این مقاله، روش تداخل‌سنجی برشی لیزری برای تشخیص عیوب داخلی در مواد مرکب تقویت‌شده با الیاف کربن در دو هندسه ورق تخت و ورق منحنی شکل به کار گرفته شده است. مشاهده‌پذیر نمودن عیوب و تأثیر موقیعت قرارگیری آن بر نتایج آزمون غیرمخرب برشنگاری از عمده فعالیت‌های انجام‌شده در این مقاله است. در این راستا، عیوب مختلفی در نمونه‌های آزمون

## ۲-۲- روابط تئوری برشنگاری

در روش برشنگاری، نور گسترده شده لیزر منطقه مورد آزمون در سطح جسم را روشن کرده و پرتوهای بازتابیده شده از سطح جسم پس از عبور از تداخلگر در صفحه تصویر دوربین CCD ثبت می‌گردد. شدت نور به وجود آمده در تصویر دوربین را می‌توان بر اساس رابطه ۱ بیان کرد [۵]:

$$I = I_0 [1 + \mu \cos(\theta)] \quad (1)$$

که در آن  $I$  توزیع شدت نور الگوی هاله‌ای در دوربین،  $I_0$  شدت نور متوسط زمینه،  $\mu$  مدول تداخل و  $\theta$  اختلاف فاز تصادفی بین پرتوهای تصاویر برش خورده در هر نقطه است. با اعمال بارگذاری و تغییر شکل کوچک نمونه، الگوی لکه‌ای نیز تغییر می‌کند که با معادله زیر قابل بیان است:

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

که در آن  $I'$  توزیع جدید شدت نور الگوی هاله‌ای و  $\Delta$  تغییر فاز هر نقطه در اثر تغییر شکل نسبی است. با محاسبه تفاضل شدت نورهای  $I$  و  $I'$ ، شدت نور وابسته به تغییر شکل به روش زیر محاسبه می‌گردد:

$$I_d = 2I_0 \mu \sin\left(\theta + \frac{\Delta}{2}\right) \sin\left(\frac{\Delta}{2}\right) \quad (3)$$

که در آن  $I_d$  شدت نور در هر پیکسل اندازه‌گیری می‌شود و بر اساس آن جابه‌جایی سطح به دست خواهد آمد. اختلاف فاز  $\Delta$  به وجود آمده، ناشی از اختلاف در مسیر نور طی شده از دو نقطه جسم تا صفحه دوربین است. برای جهت برش در راستای  $x$  اختلاف فاز بر اساس جابه‌جایی در راستاهای  $x$ ،  $y$  و  $z$  از رابطه زیر به دست می‌آید [۶]:

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

که در آن  $\lambda$  طول موج لیزر و  $u$ ،  $v$  و  $w$  جابه‌جایی در راستای  $x$ ،  $y$  و  $z$  و  $\delta x$  اندازه برش هستند.

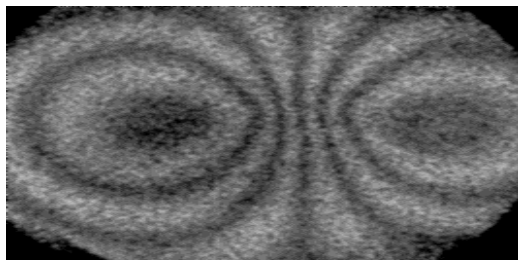
در کاربرد برشنگاری به‌عنوان یک روش آزمون غیرمخرب در مقاله حاضر، فقط محاسبه جابه‌جایی خارج از صفحه ضروری است. لذا در این حالت و در وضعیتی که برش در تداخلگر در جهت  $x$  باشد داریم:

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

بنابراین با ساده‌سازی برای مشتق جابه‌جایی خارج از صفحه  $w$  داریم:

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

این رابطه نشان می‌دهد که گرادیان جابه‌جایی خارج از صفحه به‌طور مستقیم با اختلاف فاز هاله‌ها در برشنگاری ارتباط دارد. از طرفی تمرکز جابه‌جایی و در نتیجه شیب بیشتر در یک منطقه نشانگر وجود ناپیوستگی است. در حقیقت هرچه هاله‌های ایجاد شده نزدیک‌تر و متراکم‌تر باشد، اندازه عیب بزرگتر و یا عمق آن کم‌تر است. در شکل ۲ نمونه‌ای از الگوی هاله‌ای برشنگاری مربوط به یک دیسک دایره‌ای که از مرکز آن بارگذاری خارج از صفحه انجام شده و عموماً برای کالیبراسیون سیستم برشنگاری به‌کاربرده می‌شود، نشان داده شده است.



شکل ۲- نمونه الگوی هاله‌ای برشنگاری مربوط به یک دیسک دایره‌ای تحت بارگذاری خارج از صفحه.

## ۲-۳- روش‌های بارگذاری

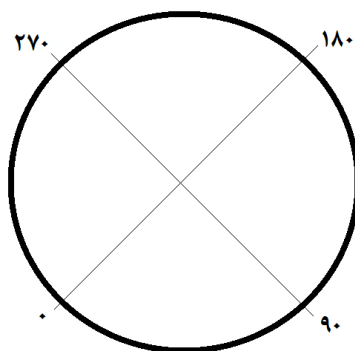
همان‌گونه که در تئوری برشنگاری عنوان شد، برای تشخیص‌پذیر نمودن عیوب، بایستی به قطعه تحت آزمون نوع مناسبی بارگذاری را اعمال نمود. بنابراین، در انجام آزمون غیرمخرب برشنگاری، انتخاب یک سیستم بارگذاری مناسب و اعمال صحیح بار، اهمیت فوق‌العاده‌ای در کارایی سیستم تشخیص عیوب دارد. برخی از انواع بارگذاری ممکن است تنها بخشی از عیوب موجود را نمایان سازد و برخی نه‌تنها به تشخیص عیوب منجر نشود؛ بلکه، با ایجاد نشانه‌های گمراه‌کننده، باعث معیوب نشان‌دادن قطعات سالم شود. از این‌رو، در هر فرآیند آزمون لازم است با توجه به جنس نمونه، شکل هندسی قطعه، عیوب احتمالی موجود در آن و سیستم برشنگاری مورد استفاده از روش بارگذاری ویژه‌ای استفاده گردد. در مجموع، روش‌های

در مجموع تعداد ۱۷ عیب مصنوعی در نمونه ورق تخت ایجاد شده است که اندازه و نوع عیوب در جدول ۱ معرفی شده است.

جدول ۱- مشخصات و ابعاد عیوب مصنوعی در نمونه آزمون ورق تخت

توضیحات	ابعاد عیب (mm)	شماره عیوب
ذرات خارجی	-	۱،۲،۳،۴
حفره	-	۵،۶،۷،۸
تفلون مربع شکل	۸/۵×۸/۵×۰/۴۵	۹
تفلون مربع شکل	۸/۵×۸/۵×۰/۱۱	۱۰
تفلون مربع شکل	۸/۵×۸/۵×۰/۰۵	۱۱
نایلون	۵×۰/۲۳	۱۲،۱۳
نایلون	۳۱×۰/۲۳	۱۴
سوزن فلزی	۴۵×۰/۶۳	۱۵،۱۶
سوزن فلزی	۴۰×۰/۵	۱۷

نمونه دوم ورق انحنادار کامپوزیتی از جنس الیاف کربن می باشد که از جنس و ضخامتی مشابه نمونه ورق تخت ساخته شده است. در این نمونه هم جهت بررسی قابلیت روش برشنگاری در تشخیص عیوب در سطوح منحنی، عیوب مصنوعی شامل ذرات خارجی، حفره و لایه های تفلون که مدل کننده عیب عدم چسبندگی هستند قرار داده شده است. در این نمونه به دلیل محدودیت هندسه، طبیعتاً سطح دید دوربین بخش محدودی از دیواره ورق انحنادار (حدود ۹۰ درجه) را در برمی گیرد. از این رو در آزمون نمونه انحنادار، محیط نمونه به چهار بخش ۹۰ درجه تقسیم بندی و آزمون برشنگاری در تمامی این چهار بخش انجام شد. شکل ۴ طرحواره نمونه با هندسه ورق انحنادار کامپوزیتی دارای عیوب ساختگی را نشان می دهد. تمامی عیوب در بخش پایینی ورق انحنادار (حدود ۱۰ cm از انتهای نمونه) قرار داده شده است.



شکل ۴- طرحواره ای از نمونه آزمون با هندسه ورق انحنادار حاوی عیوب مصنوعی جانمایی شده.

معمول بارگذاری در آزمون برشنگاری شامل فشار داخلی، خلأ نسبی، بارگذاری مکانیکی، بارگذاری حرارتی و بارگذاری ارتعاشی است. پس از تعیین نوع بارگذاری، انتخاب پارامتر بارگذاری و زمان بارگذاری اهمیت دارد.

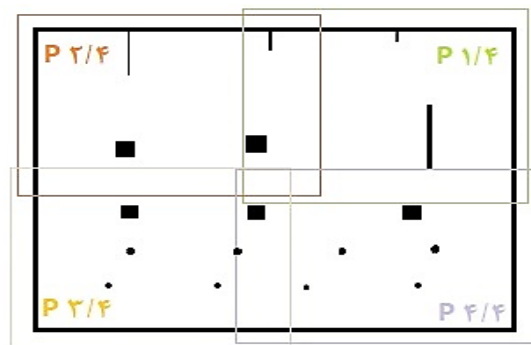
پارامترهای سیستم برشنگاری شامل جهت و اندازه برش در مرحله بعد تعیین می گردند. بسته به هندسه قطعه، جهت و برش به صورت برش در جهت X، جهت Y و یا برش ترکیبی تعیین می گردد. با تعیین پارامترهای بالا، روش انجام آزمون شامل توالی نوع بار، اندازه بار، زمان بار، جهت برش، اندازه برش معرفی می گردد. تعیین روش انجام آزمون مهم ترین مرحله در انتخاب اقلام و طراحی سیستم آزمون غیرمخرب بر اساس برشنگاری است.

### ۳- انجام آزمون های برشنگاری

#### ۳-۱ معرفی نمونه های آزمون

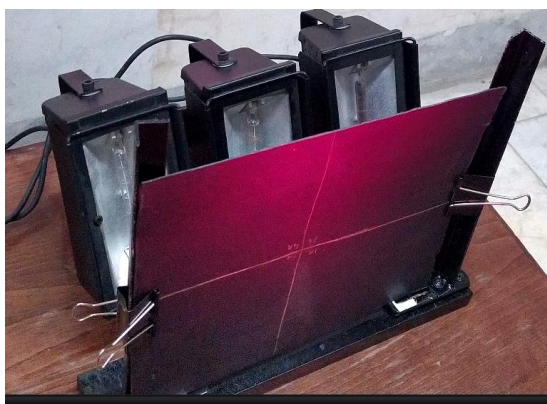
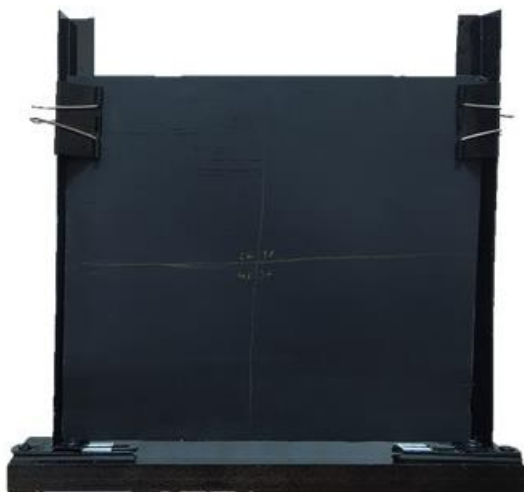
نمونه های آزمون مورد نظر در این مقاله شامل دو نمونه کامپوزیت تقویت شده با الیاف کربن با هندسه ورق تخت و هندسه ورق انحنادار می باشند. برای بررسی قابلیت روش برشنگاری در تشخیص پذیری ناپیوستگی در نمونه های ذکر شده، عیوب متفاوتی نظیر ذرات خارجی، حباب، جدایش لایه ای و جدایش سوزنی به صورت دست ساز قرار داده شده است. همچنین در نمونه با هندسه ورق انحنادار در بخشی از نمونه عیوب دست سازی برای تعیین قابلیت روش معرفی شده در شناسایی عیوب گنجانده شده است.

شکل ۳ طرحواره نمونه ورق تخت کامپوزیتی مورد آزمایش را به همراه عیوب مصنوعی ایجاد شده در آن نشان داده شده است. همان گونه که در شکل مشاهده می گردد، سطح ورق برای ایجاد امکان بررسی دقیق به چهار ناحیه P۱/۴ تا P۴/۴ تقسیم بندی شده است.



شکل ۳- طرحواره ای از نمونه آزمون با هندسه ورق تخت حاوی عیوب مصنوعی جانمایی شده.





شکل ۵- نمونه ورق تخت کامپوزیتی به همراه سیستم بارگذاری ۳ کیلووات.

#### ۴- مشاهده و بررسی نتایج

##### ۴-۱- نتایج نمونه‌های آزمون ورق تخت

بعد از آماده‌سازی چیدمان و قراردادن قطعات در دستگاه بارگذاری، منبع نور لیزر بر روی موقعیت هر یک از بخش‌های چهارگانه ورق مورد مطالعه تنظیم می‌گردد و بارگذاری از سمت مخالف انجام می‌شود. تصویر گرفته شده الگوی لکه‌ای حاوی اطلاعات قبل از تغییر شکل نمونه می‌باشد. در این الگو، لکه‌ها به صورت تصادفی توزیع شده و حاوی اطلاعات سطح نمونه است. اعمال بار حرارتی به نمونه باعث ایجاد تغییر شکل اندک در آن می‌شود. این تغییر شکل، به علت تمرکز تنش، در نواحی اطراف عیوب بیشتر از بقیه نقاط است. تصویر دوم در این وضعیت از نمونه گرفته می‌شود که حاوی اطلاعات مربوط به جابه‌جایی‌های سطحی نمونه است. با تفاضل مقادیر روشنایی پیکسل به پیکسل تصویر الگوی هاله‌ای

#### ۳-۲- معرفی تجهیزات آزمون برشنگاری

برای انجام آزمون برشنگاری در قطعات، از سیستم مجتمع برشنگاری مبتنی بر تداخلگر مایکلسون استفاده شده است. این مجموعه با داشتن قابلیت‌های بسیار بالا، انعطاف‌پذیری لازم را در شناسایی عیوب در قطعات و مجموعه‌ها با هندسه‌های مختلف را دارد. به دلیل کوچکی و قابل حمل بودن تجهیزات و همچنین به‌کارگیری سیستم بارگذاری غیر متصل به مجموعه، قابلیت آزمون انواع قطعات بدون ارتعاش با سایزهای مختلف را دارا می‌باشد.

ویژگی‌های اصلی سیستم برشنگاری مورد استفاده در این مقاله به شرح زیر است:

- سیستم compact قابل حمل با سیستم بارگذاری مجزا
- توان لیزر:  $2 \times 100 \text{ mW}$
- دوربین تصویربرداری مجهز به حس‌گر ccd
- لنز متناسب با فاصله کانونی  $35 \text{ mm}$  و  $50 \text{ mm}$
- سیستم تداخلگر مایکلسون با اجزای اپتیکی مربوطه

#### ۳-۳- روش انجام آزمون

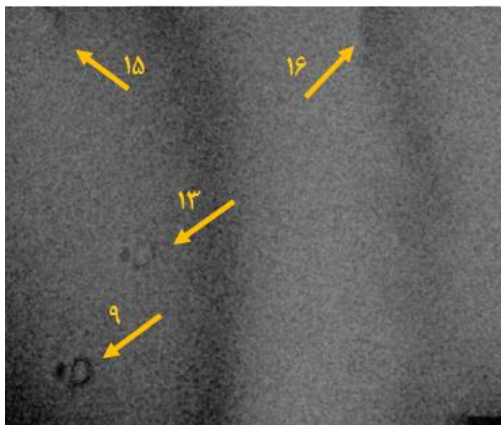
در انجام آزمون تداخل‌سنجی برشی لیزری، لازم است در ابتدا روش انجام آزمون انتخاب و آزمون بر اساس روش انجام انتخابی انجام گیرد. لذا بر اساس توضیحات بیان شده در بخش‌های قبل، تجربیات قبلی و پس از انجام تعداد زیادی آزمون اولیه، روش انجام آزمون مورد استفاده برای انجام آزمون نمونه ورق تخت به صورت زیر تدوین شد:

بارگذاری حرارتی - تابش -  $1 \text{ kW} - 0.5 \text{ s}$  برش افقی (X) -  $5 \text{ mm}$

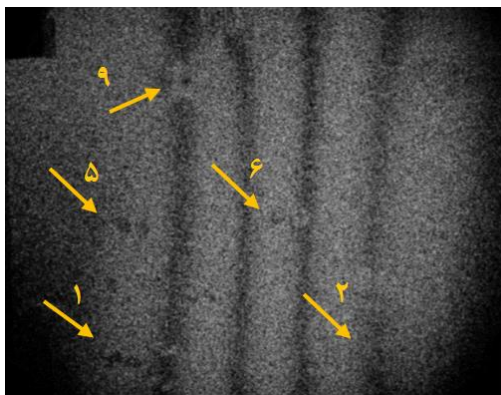
همچنین روش انجام آزمون مورد استفاده برای آزمون نمونه ورق انحنا دار به صورت زیر تدوین شد:

بارگذاری حرارتی - تابش -  $1 \text{ kW} - 1 \text{ s}$  برش افقی (X) -  $5 \text{ mm}$

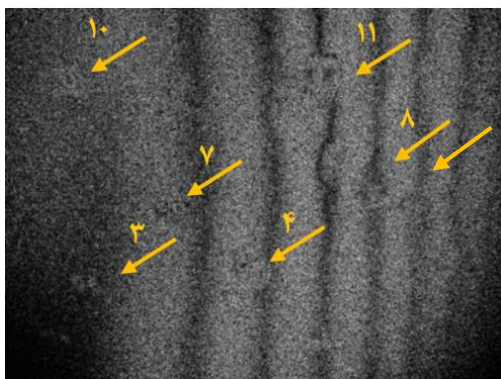
در شکل ۵ نمونه ورق تخت کامپوزیتی به همراه فیکسچر آزمون و سیستم بارگذاری حرارتی ۳ کیلووات نشان داده شده است.



(الف)



(ب)

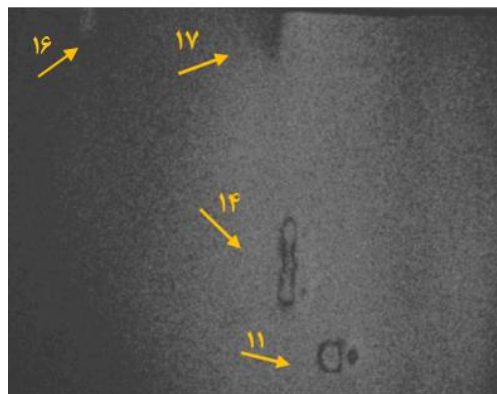


(ج)

شکل ۷- تصویر برشنگاری بخش‌های مختلف نمونه ورق تخت؛  
(الف) بخش P۲/۴؛ (ب) بخش P۳/۴؛ (ج) بخش P۴/۴

همان‌گونه که در روش انجام آزمون این نمونه‌ها عنوان شد، جهت برش در جهت X (مود بر جهت عیوب خطی) در نظر گرفته شده است. تمام بررسی‌ها نشان می‌دهد این جهت، بهترین جهت فرض شده برای ایجاد برش می‌باشد که بهترین نتایج را حاصل می‌کند. اما در مواردی که جهت‌گیری عیوب احتمالی در نمونه‌های واقعی معلوم نباشد، بهتر است آزمون برشنگاری با استفاده از اندازه برش متفاوت و در دو جهت عمود برهم تکرار شوند.

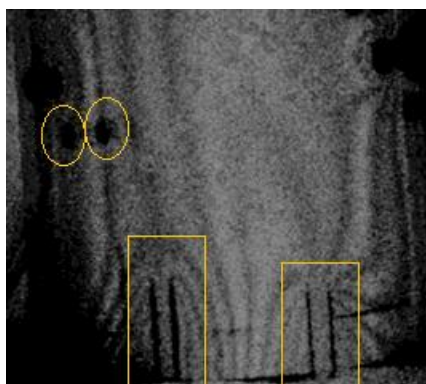
تشکیل می‌شود که روشنایی این تصویر بر اساس رابطه ۳ محاسبه می‌گردد. نمونه الگوی هاله‌ای تشکیل شده در بخش P۱/۴ نمونه تخت، در شکل ۶ نشان داده شده است.



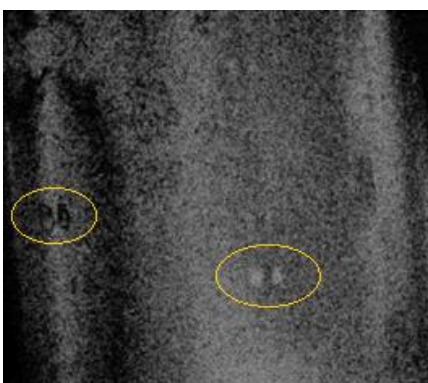
شکل ۶- تصویر برشنگاری بخش P۱/۴ نمونه آزمون ورق تخت.

در شکل ۶ مناطق دارای تمرکز نسبی هاله‌ها مربوط به عیوب ۱۱، ۱۴، ۱۶ و ۱۷ هستند که در شکل ۶ علامت‌گذاری شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌گردد، تصویر هاله‌های عیوب خطی (نظیر عیب شماره ۱۴) به‌گونه‌ای متفاوت شکل می‌گیرد و از روی هاله‌های تشکیل شده می‌توان به اندازه نسبی عیب پی برد. باین حال از آنجا که در مجموع، روش برشنگاری یک روش کیفی محسوب می‌گردد، از این تصاویر اطلاعات دقیقی از ابعاد عیب و عمق آن نمی‌توان استخراج نمود. با همه این موارد روش‌هایی وجود دارد که با کمی‌سازی تعداد و تمرکز هاله‌های برشنگاری، می‌توان تخمین مناسبی از ویژگی‌های کمی عیوب نیز استنتاج نمود.

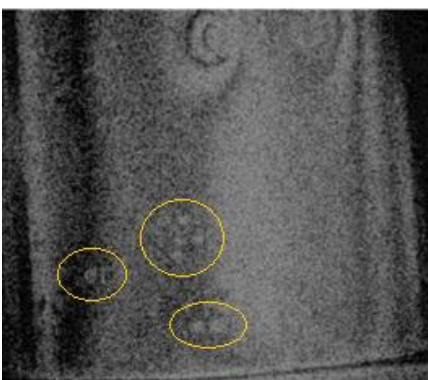
تصاویر برشنگاری مربوط به سایر بخش‌های نمونه آزمون ورق تخت (بخش‌های P۲/۴ تا P۴/۴) در شکل ۷ نشان داده شده است. بر اساس تصاویر، بیشتر عیوب به صورت هاله‌های متمرکز در نقاط مختلف قابل مشاهده است. قابل ذکر است الگوهای هاله‌ای موازی ایجاد شده در زمینه برخی شکل‌ها، ناشی از خمش کلی قطعه تخت بوده و به دلیل قیود فیکسچر و اثرات کلمپینگ ایجاد می‌گردد. این الگوها با انجام بارگذاری دوطرفه (سیستم باردهی از هر دو طرف نمونه) تا حدودی قابل حذف هستند اما از آنجا که در اکثر موارد صنعتی، دسترسی تنها از یک سمت نمونه به‌طور کامل امکان‌پذیر است، معمولاً از وجود این هاله‌های قابل توجیه صرف نظر می‌گردد.



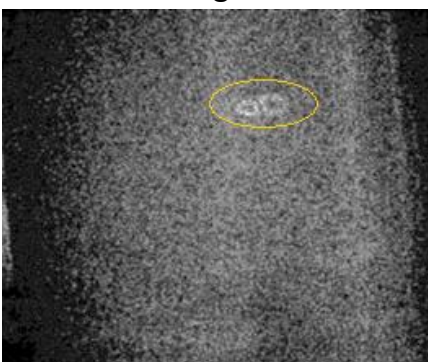
(الف)



(ب)



(ج)



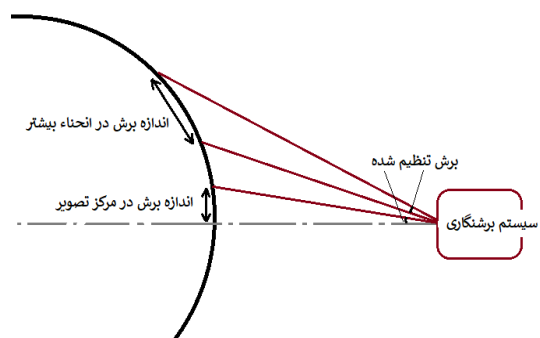
(د)

شکل ۹- تصویر برشنگاری بخش‌های مختلف نمونه ورق انحنادار (الف) بخش ۹۰~۰؛ (ب) بخش ۱۸۰~۹۰؛ (ج) بخش ۲۷۰~۱۸۰؛ (د) بخش ۳۶۰~۲۷۰ درجه.

## ۴-۲- نتایج نمونه آزمون ورق انحنادار

نمونه با هندسه ورق انحنادار کامپوزیتی، با روش انجام عنوان شده در بخش قبل آزموده شد. از آنجاکه در هندسه منحنی، نیاز به به کارگیری فیکسچر خاصی نیست، آزمایش با قرار دادن منبع تحریک حرارتی پالسی ۱ کیلووات در داخل نمونه انجام شد و تصویربرداری از سطح خارجی نمونه ورق انحنادار صورت پذیرفت.

نکته مهم و قابل توجه در آزمایش برشنگاری در سطوح منحنی، توجه به تغییرات شیب در میدان دید دوربین است. از آنجاکه اندازه برش اعمال شده در آزمون‌ها در جهت +X یعنی عمود بر محور ورق انحنادار است، در یک اندازه برش ثابت، اندازه برش واقعی در بخش‌هایی با انحناء بیشتر مطابق شکل ۸ با فاصله گرفتن از مرکز دید بیشتر خواهد شد.



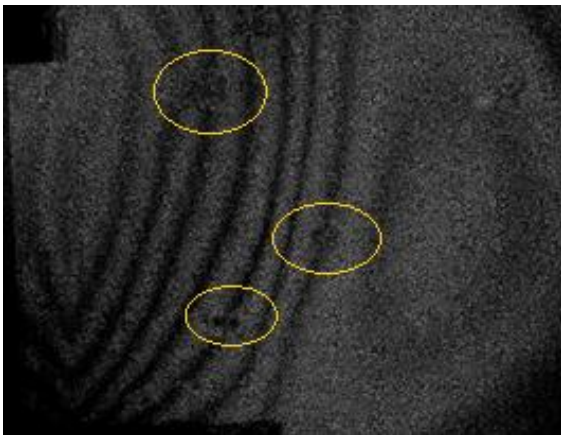
شکل ۸- تغییرات اندازه برش در بخش‌های مختلف نمونه ورق انحنادار.

لذا در عیب‌یابی سطوح منحنی به خصوص در مواردی که قطر نمونه کم و یا انحنای سطح زیاد باشد، لازم است میدان دید محدودتری انتخاب گردد و یا در صورت امکان از اندازه برش کوچک‌تری استفاده شود. در مورد نمونه ورق انحنادار مورد آزمایش در این مقاله، میدان دید به ۹۰ درجه محدود شده و اندازه برش در حد ۵mm تنظیم شده است.

نتایج آزمون برشنگاری در بخش‌های چهارگانه نمونه ورق انحنادار در شکل ۹ نشان داده شده است. در تمامی تصاویر فوق، به منظور پوشش کامل مناطق ۹۰ درجه‌ای از محیط نمونه ورق انحنادار، تصویر از هر طرف حدود ۱۵ درجه بزرگ‌تر گرفته شده است و همان‌گونه که مشخص است، عیوب موجود در حوالی مرکز تصویر و همچنین عیوب در  $45 \pm$  درجه از مرکز به خوبی قابل تشخیص است.



قطعه، پدیده ناهمبستگی<sup>۱</sup> است. بدین صورت که تصاویر قبل از بارگذاری و پس از بارگذاری روی هم منطبق نشده و هاله تشکیل نمی‌گردد. در این مقاله جهت جلوگیری از پدیده ناهمبستگی و مشاهده پذیر نمودن عیوب، علاوه بر انجام آزمون‌های متعدد کالیبراسیون اولیه، اندازه بارگذاری در محدوده چند درجه سانتی‌گراد نگه‌داشته شد. در شکل ۱۰ نمونه تصویر آزمون برشنگاری در نمونه ورق تخت با بارگذاری ۳ کیلووات به مدت ۱ ثانیه نشان داده شده است.



شکل ۱۰- تصویر برشنگاری نمونه ورق تخت با بارگذاری ۳ کیلووات به مدت ۱ ثانیه.

نتایج نشان می‌دهد بارگذاری بزرگ‌تر اگرچه در مشاهده عیوب کوچک‌تر اندکی بهتر عمل کرده است، لکن با ایجاد هاله‌های اضافی و همچنین درهم رفتن هاله‌ها در مورد عیوب بزرگ‌تر، در مجموع قدرت شناسایی و تفکیک پذیری عیوب را کاهش داده است.

در جمع‌بندی بررسی نتایج حاصل از انجام آزمایشات، عیوبی که اندازه اسمی آن‌ها بزرگ‌تر از ۵۰٪ اندازه برش در نمونه ورق تخت و نمونه ورق انحنادار بودند، با کیفیت بالاتری شناسایی شدند. از طرفی عیوب کوچک‌تر نظیر حفرات و ذرات خارجی در هر دو نمونه به صورت کامل و با قابلیت تکرارپذیری مناسب شناسایی نشدند. این مطلب در شکل‌های ۷ (ب) و (ج) و همچنین تمامی تصاویر مربوط به آزمون ورق انحنادار قابل عنوان است.

یکی دیگر از نتایج قابل توجه در آزمون نمونه ورق انحنادار، تشخیص مناسب عیوبی است که هم‌راستا با محور ورق انحنادار ایجاد شده بودند. این مطلب بیانگر این نتیجه است

از آنجاکه سطوح کامپوزیتی ماهیتاً سطوح صاف و یکدست (نظیر فلزات) ندارند، نتایج برشنگاری طبیعتاً دارای نویزها و لکه‌های کوچک ناخواسته می‌باشد. باین حال، مناطق دارای عیوب به شکل هاله‌های قابل تشخیص از مناطق اطراف مجزا شده است. لذا این روش، روشی موفق برای عیوب بزرگ‌تر (در حدود حداقل نصف اندازه برش) ارزیابی می‌گردد.

### ۳-۴- بررسی و تحلیل نتایج

هاله‌های تشکیل شده در تداخل سنج برشی لیزری، نشان‌دهنده نقاط هم-کرنش است. بدین معنی که به نقاط موجود در یک هاله، کرنش‌های مشابهی در اثر بارگذاری اعمال شده است. از طرفی اختلاف شیب و یا کرنش بین دو هاله متوالی، ارتباط مستقیمی با پارامترهای برشنگاری نظیر اندازه برش و طول موج لیزر به کار برده شده دارد. بر اساس روابط اولیه برشنگاری، گرادیان جابه‌جایی خالص خارج از صفحه  $\frac{\partial w}{\partial x}$  طبق رابطه ۶ به پارامترهای ذکر شده مرتبط است. از طرفی اختلاف فاز بین هر دو هاله متوالی برابر  $2\pi$  است. با توجه به اینکه برای آزمون انجام شده طول موج لیزر  $(\lambda = 650 \times 10^{-6} \text{ mm})$  و اندازه برش ۵ میلی‌متر است، اختلاف کرنش خارج از صفحه برای هر دو هاله متوالی برابر خواهد بود با:

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\Delta \lambda}{4\pi \delta x} = \frac{2\pi \times 650 \times 10^{-6}}{4\pi \times 5} = 65 \mu \quad (7)$$

از این رو، می‌توان با شمارش تعداد هاله‌های ایجاد شده در الگوی هاله‌ای برشنگاری، اختلاف گرادیان جابه‌جایی بین هر دو نقطه را محاسبه نمود. بنابراین هرچه تعداد هاله‌ها بیشتر بوده و یا هاله‌ها متراکم‌تر باشند، جابه‌جایی کمی ایجاد شده بیشتر و قابل محاسبه خواهد بود.

با توجه به توضیحات فوق نتیجه‌گیری می‌شود که برای ایجاد تراکم بیشتر هاله‌ها و در نتیجه اندازه‌گیری عیوب کوچک‌تر، می‌توان در بارگذاری ثابت، پارامتر اندازه برش را تغییر داد. در اندازه برش ثابت، افزایش بارگذاری راهی برای نمایان ساختن عیوب کوچک‌تر است. محدودیت بزرگ در افزایش اندازه بار، علاوه بر احتمال آسیب دیدگی

<sup>1</sup>Decorrelation

## ۶- علائم و نشانه‌ها

$I$	توزیع شدت نور الگوی هاله‌ای
$I_0$	شدت نور اولیه
$I'$	شدت نور الگوی هاله‌ای پس از تغییر شکل
$u, v, w$	جابجایی در راستای $x, y, z$ و $(mm)$
$\mu$	مدول تداخل
$\Delta$	تغییر فاز در اثر تغییر شکل
$\lambda$	طول موج لیزر $(nm)$
$\emptyset$	اختلاف فاز تصادفی
$\delta x$	اندازه برش $(mm)$

## ۷- مراجع

- [1] N. Xu et al. *Shearography for specular object inspection*, Optics and Lasers in Engineering, 61, 14 (2014).
- [2] D. Akbari, N. Soltani, M. Farahani, *Numerical and experimental investigation of defect detection in polymer materials by means of digital shearography with thermal loading*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 227 [3], 430 (2013).
- [3] J. Leendertz, J. Butters, *An image sharing speckle pattern interferometer for measuring bending moments*, Journal of Physics E., 6 [1], 1017 (1973).
- [4] S. L. Toh et al. *Application of sheagraphy in nondestructive testing of composite plates*, Journal of Materials Processing Technology, 23 [3], 267 (1990).
- [5] D. Akbari, N. Soltani, F. Reshadi, *Application of digital shearography for non-destructive testing of materials with thermal loading*, Modares Mechanical Engineering, 13 [4], 36 (2013). (in Persian)
- [6] M. Mohamadi, D. Akbari, *Evaluation of sub-surface cracks in polymer matrix composites with laser interferometric method*, International Journal of Manufacturing Engineering, 2 [3], 11 (2015). (in Persian)

که در آزمون نمونه با این هندسه، ترک‌های بلندی که در راستای محور ورق انحنادار ایجاد می‌شوند، صرف‌نظر از عرض کوچک ترک قابل تشخیص بودند.

در مجموع و پس از بررسی نتایج آزمون‌ها می‌توان نتیجه‌گیری کرد که روش برشنگاری با تحریک حرارتی و با روش انجام عنوان شده، برای شناسایی برخی عیوب با اندازه اسمی در حد چندین میلی‌متر تا چند سانتیمتر مفید است و در مواردی که حساسیت قطعات و مجموعه بالاست، به‌عنوان یک روش مکمل می‌توان از قابلیت‌های آن استفاده نمود.

## ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

در این مقاله، روش تداخل‌سنجی برشی لیزری برای عیب‌یابی نمونه‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن معرفی و مورد استفاده قرار گرفت. از این روش عیوبی نظیر ذرات خارجی، ترک در ماتریس و حفره‌های هوایی داخلی در دو هندسه ورق تخت و ورق انحنادار ایجاد و با روش مزبور شناسایی و ارزیابی شده است. مهم‌ترین نتایج حاصله به ترتیب زیر خلاصه می‌شود:

- نتایج حاصله نشان‌دهنده محدوده کاربردی این روش در شناسایی ترک‌ها و عیوب با طول‌های حداقلی به‌اندازه ۵۰٪ اندازه برش در نمونه‌های ورق تخت و انحنادار می‌باشد.

- که در هندسه ورق انحنادار، جهت برش تنها در راستای عمود بر محور نمونه قابلیت شناسایی عیوب را ایجاد می‌کند.

- بارگذاری حرارتی با توان ۳ کیلووات به مدت ۰/۵ ثانیه و ۱ کیلووات به مدت ۱ ثانیه بهترین نتایج را به ترتیب در ورق تخت و ورق انحنادار ایجاد نمود.

- برای تحلیل کمی عیوب، می‌توان از روش شمارش هاله‌ها و ایجاد ارتباط با اندازه عیوب در یک پایگاه داده‌ای تجربی بهره برد.

- با افزایش اندازه بارگذاری، تشخیص‌پذیری عیوب کوچک‌تر بهبود و تشخیص‌پذیری عیوب بزرگ‌تر کاهش می‌یابد.

- افزایش اندازه بار حرارتی در حد چندین درجه سانتی‌گراد، موجب ایجاد ناهمبستگی بین تصاویر قبل و بعد از بارگذاری، ایجاد هاله‌های اضافی و کاهش کیفیت تصاویر می‌گردد.