



ارزیابی غیرمخرب ترک‌های داخلی در مواد مرکب تقویت‌شده با الیاف شیشه به کمک روش تداخل‌سنجی برشی

فرزاد بناکار، داود اکبری*

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۱۶
بازنگری: ۱۳۹۹/۱۰/۲۹
پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۰۷
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۱۲/۲۴

کلمات کلیدی:

تداخل‌سنجی برشی
آزمون غیرمخرب
مواد مرکب
تشخیص ترک

خلاصه: روش تداخل‌سنجی برشی لیزری یا برش‌نگاری، یکی از روش‌های نوین آزمون‌های غیرمخرب است که بر پایه‌ی تداخل امواج تک‌رنگ بازتاب‌شده از سطح نمونه می‌باشد. این روش، با اندازه‌گیری مستقیم گرادیان جابه‌جایی خارج از صفحه، قادر است با دقت و سرعت بالایی تمام سطح نمونه را به‌طور یکجا مورد ارزیابی قرار دهد. در این مقاله امکان تشخیص ترک‌های زیرسطحی با طول و زاویه‌های مختلف در نمونه‌های کامپوزیتی به کمک روش برش‌نگاری و سیستم تحریک حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور، در نمونه‌های ساخته‌شده، ترک‌های مصنوعی و کنترل‌شده با طول و زاویه‌های مختلف ایجاد شد. پس از صحت‌سنجی عملکرد چیدمان برش‌نگاری، از دو منبع حرارتی تشعشعی برای اعمال بار روی نمونه‌ها استفاده شد. تاثیر متغیرهای اندازه بارگذاری، اندازه و جهت برش، طول ترک و زاویه‌ی آن‌ها بر روی کیفیت نتایج، مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله نشان می‌دهد که تغییر در اندازه‌ی بارگذاری، نقش مهم‌تری را نسبت به تغییر در اندازه‌ی برش در تشخیص صحیح ترک دارد. برای دستیابی به بهترین نتایج در تشخیص ترک بر روی نمونه‌های انتخاب‌شده، بارگذاری بهینه در حالت حرارتی برابر ۱۲ و ۱۵ ثانیه از جلوی نمونه بدست آمد. همچنین اندازه بهینه‌ی برش در نمونه‌های کامپوزیتی مورد بررسی، حدود ده درصد عرض تصویر ثبت‌شده توسط دوربین تخمین زده شد. به کمک این مقادیر بهینه‌شده، تمامی ترک‌های زیرسطحی شناسایی شدند.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از مواد مرکب به دلیل ویژگی‌های خاص آن‌ها از جمله نسبت بالای استحکام به وزن و همچنین برخی خصوصیات فیزیکی منحصر به فرد نظیر پایین بودن ضریب انتقال حرارت نسبت به فلزات، در صنایع مختلف از جمله سازه‌های هوایی کاربرد بسیار گسترده‌ای پیدا کرده است. از طرفی، نحوه‌ی ساخت این مواد به گونه‌ای است که دارای خواص نامطلوبی نظیر ناهمگنی و چندساختاری بودن می‌باشند. از همین رو پتانسیل ایجاد عیوب مختلف نظیر ترک خوردگی، ایجاد حفره و لایه‌لایه شدن در اینگونه مواد، بیشتر از مواد همگن نظیر فلزها و مواد پلیمری است [۱]. علاوه بر این، ویژگی‌های دیگری نظیر عدم رسانایی الکتریکی و مغناطیسی در این مواد باعث شده است که استفاده از روش‌های سنتی آزمون‌های غیرمخرب نظیر آزمون فراصوتی، ذرات مغناطیسی و جریان گردابی بسیار دشوار و در برخی موارد ناممکن باشد [۲]. به همین دلیل برای بررسی عیوب

هریک از قطعات کامپوزیتی باید روشی مناسب و قابل اطمینان به کار گرفته شود.

بررسی‌ها نشان می‌دهد بسیاری از قطعاتی که به طور ناگهانی دچار شکست و تخریب می‌شوند، در ابتدا عیب کوچکی نظیر ترک و حفره‌های ریز در آن‌ها وجود داشته است. اگر همان عیب‌های کوچک و به ظاهر کم‌اهمیت به درستی تشخیص داده نشوند، گسترش می‌یابند و باعث شکست و تخریب قطعات می‌شوند. در این میان وجود ترک‌های زیرسطحی در بارگذاری‌های سیکلی و دینامیکی از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است و می‌بایست به سرعت جهت تشخیص و رفع آن‌ها اقدام شود تا از گسترش یافتن آن‌ها جلوگیری شود [۳].

روش برش‌نگاری^۱ دیجیتالی یکی از روش‌های بازرسی لیزری غیرتماسی در آزمون‌های غیرمخرب قطعات می‌باشد. در این روش پرتو لیزر به سطح نمونه تابانیده شده و بازتاب آن به صورت الگوی تداخلی در دوربین ثبت می‌گردد. با تفسیر تغییرات الگوی تداخلی به برخی ویژگی‌های

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: daakbari@modares.ac.ir



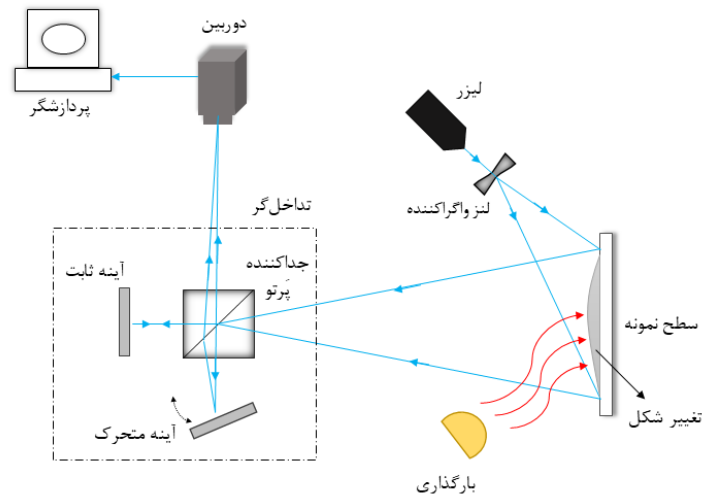
برای نخستین بار در سال ۱۹۸۰، ناکاداتا و یاتاگایی [۲۱] در برش‌نگاری به جای استفاده از فیلم‌های عکاسی جهت ثبت تصاویر، از دوربین الکترونیکی و تصویر دیجیتال استفاده کردند و از آن به بعد از این روش در آزمون‌های غیرمخرب استفاده شد. در ادامه به بررسی مهمترین پژوهش‌های انجام شده در زمینه‌ی مرتبط با این مقاله پرداخته شده‌است. در زمینه‌ی تشخیص ترک در مواد کامپوزیتی، محمدی و همکاران [۲۲] ترک‌های عرضی با طول و عمق‌های متفاوت را با سیستم تحریک مکانیکی و دستگاه کشش مورد ارزیابی قرار دادند و روشی را برای تخمین طول و عمق ترک به کمک تعداد و تراکم هاله‌های تشکیل شده بر روی مواد کامپوزیتی ارائه کردند. در مقاله‌ی دیگر اکبری و همکاران [۲۳] با اعمال بارگذاری کششی بر روی نمونه‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه و بررسی نتایج، پارامترهای اندازه‌ی برش و مقدار نیروی اعمالی را برای تشخیص ترک به کمک برش‌نگاری، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پارامتر بی‌بعدی به نام ضریب بار را برای بیان حالت‌های مختلف بارگذاری در منطقه‌ی کشسان تعریف کردند. سپس بر اساس اندازه برش‌های ۵ و ۸ و ۱۰ میلی‌متر، مناطق قابل تشخیص ترک را نسبت به طول ترک و ضریب بار، مشخص کردند. لیو و همکاران [۲۴] از روش برش‌نگاری و بارگذاری ارتعاشی به کمک پیزوالکتریک، برای تشخیص ترک روی نمونه‌های فلزی استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که اگر فرکانس ارتعاشات به فرکانس تشدید پیزوالکتریک نزدیک باشد، بهترین نتایج حاصل می‌شود. پتزونو و همکاران [۲۵] بر روی نمونه‌های از جنس کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه با ساختار لانه زنبوری، که در ساخت پرده‌های انتهایی بالگرد کاربرد دارد، سوراخ‌هایی با اندازه و عمق‌های متفاوت ایجاد کردند و با استفاده از سیستم تحریک حرارتی به کمک برش‌نگاری مورد ارزیابی قرار دادند. آنها نتیجه گرفتند که برش‌نگاری می‌تواند به راحتی تمام سطح نمونه را به طور یکجا مورد بررسی قرار دهد و عیوب را شناسایی کند. علاوه بر این، قسمتی از پرده‌ی بالگرد را در بارگذاری خستگی قرار دادند تا عیوب احتمالی ایجاد شده در آن به وسیله‌ی برش‌نگاری تشخیص داده شود. آن‌ها به این نتیجه دست پیدا کردند که با توجه به ویژگی غیرتماسی بودن برش‌نگاری، برخلاف روش‌های سنتی، می‌توان قطعه را حین بارگذاری خستگی و بدون متوقف کردن بارگذاری مورد ارزیابی قرار داد که نکته‌ی بسیار مهمی در بررسی غیرمخرب قطعات صنعتی می‌باشد. چوی و همکاران [۲۶] با قراردادن تفلون با ابعاد مختلف در بین لایه‌های کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن و کامپوزیت‌های با ساختار لانه زنبوری، عیب جدایش بین لایه‌ای را به طور مصنوعی شبیه‌سازی کردند. سپس با استفاده

سطحی نظیر جابجایی و عیوب می‌توان پی برد. برخلاف بیشتر روش‌های سنتی که تنها قسمت کوچکی از نمونه را در هر لحظه مورد ارزیابی قرار می‌دهند، برش‌نگاری دارای ویژگی تمام‌صفحه‌ای^۱ می‌باشد به گونه‌ای که سطح وسیعی از نمونه را به طور کامل و در یک مرحله بررسی می‌کند و نتایج را نمایش می‌دهد. به علاوه، در این روش برخلاف سایر روش‌های نوری و لیزری، به دلیل این که پرتوهای بازتاب شده از سطح نمونه که ایجاد تداخل می‌کنند، مسیری تقریباً مشابه را طی می‌کنند، حساسیت چیدمان نسبت به ارتعاشات محیط بسیار کاهش یافته‌است [۴]. برش‌نگاری قادر است گرادیان جابه‌جایی سطح نمونه را در دو حالت خارج صفحه^۲ و داخل صفحه^۳ به طور مستقیم اندازه‌گیری کند. محققان از اندازه‌گیری گرادیان جابه‌جایی داخل صفحه با استفاده از روش برش‌نگاری برای اندازه‌گیری مستقیم کرنش و تنش باقیمانده در قطعات [۷-۵] و از حالت خارج صفحه در تست‌های غیرمخرب و پیدا کردن عیوب داخلی قطعات مختلف [۸، ۹] استفاده کرده‌اند. در حوزه عیب‌یابی این روش برای بررسی کیفیت تاپرهای لاستیکی جهت تشخیص عیوب جدایش بین لاستیک و فلز [۱۰، ۱۱] و همچنین تحلیل پوشش رنگ در آثار هنری [۱۲] مورد استفاده قرار گرفته‌است. همچنین تحقیقات گذشته نشان می‌دهد که از روش برش‌نگاری در موارد گوناگونی نظیر تعیین عیوب روی سطوح منحنی [۱۳] و اندازه‌گیری تغییر شکل سطح نمونه [۱۴] استفاده شده‌است. بسیاری از تحقیقات گذشته در حوزه بهبود تکنیک‌های عملیاتی روش برش‌نگاری توسعه یافته‌است. استخراج فاز از تصویرهای بدست آمده و تحلیل فازهای واپیچیده^۴ [۱۵]، اندازه‌گیری شیب و گرادیان سطح جسم [۱۶-۱۸]، اندازه‌گیری کرنش سطوح نظیر نقاط جوش خورده [۱۹]، از جمله‌ی پژوهش‌های انجام گرفته در زمینه‌ی بررسی و تحلیل کمی تصاویر حاصل از برش‌نگاری می‌باشند. از آنجایی که برش‌نگاری کرنش‌های غیرعادی روی سطح نمونه را که ناشی از وجود عیب زیرسطحی است به طور مستقیم اندازه‌گیری می‌کند، آزمون برش‌نگاری موفق و قابل اطمینان، به ابعاد عیب و عمق آن از سطح، اندازه و نوع بارگذاری، اندازه و جهت برش بستگی دارد [۲۰]. از طرفی عیب عمده‌ی این روش، تغییر پارامترهای اساسی برای تشخیص عیب در جنس‌های مختلف می‌باشد. به گونه‌ای که با تغییر جنس نمونه، باید پارامترهای لازم نظیر اندازه‌ی بارگذاری و اندازه و جهت برش، متناسب با جنس مورد نظر بهینه شوند.

- 1 Full-field
- 2 Out-of plane
- 3 In-plane
- 4 Un-wrapped

در پژوهش پیشین، کلیه‌ی جزئیات روش برش‌نگاری و همچنین چگونگی اعمال بارگذاری بر روی نمونه‌های مختلف به همراه مهمترین مقاله‌های چاپ‌شده در این زمینه، در قالب مقاله‌ی ترویجی گردآوری شد [۳۲]. در پژوهشی دیگر، از روش برش‌نگاری و سیستم تحریک حرارتی به کمک پروژکتور نوری با توان ۱۰۰۰ وات، جهت تشخیص ترک‌های عرضی در مواد پلیمری نظیر پلی‌اتیلن و تفلون استفاده شد [۳۳]. در راستای بررسی دقیق‌تر روش برش‌نگاری، گام بعدی بررسی ترک‌های زاویه‌دار و مقایسه‌ی بارگذاری حرارتی و کششی و همچنین تغییر در جنس نمونه‌ها به مواد کامپوزیتی که کاربرد بسیار مهم‌تری نسبت به مواد پلیمری دارند، تعیین شد. در کلیه‌ی تحقیقات انجام‌شده بر روی بررسی ترک‌ها در کامپوزیت، از بارگذاری مکانیکی برای تشخیص ترک استفاده شده است. با این حال به دلیل مزایای عمده‌ی بارگذاری حرارتی لازم است عملکرد این روش تحریک نیز در تشخیص ترک مورد بررسی قرارگیرد. در این مقاله از روش برش‌نگاری دیجیتال با استفاده از بارگذاری حرارتی برای تشخیص ترک‌های زیرسطحی با اندازه و زاویه‌های مختلف در مواد کامپوزیتی استفاده شده است. از این رو با تاکید بر جنس مورد بررسی، تشخیص ترک روی مواد کامپوزیتی با استفاده از بارگذاری حرارتی توسط هیترهای سرمایی بدون ایجاد نور اضافی برخلاف پروژکتورهای نوری و می باشد که در کارهای پیشین از بارگذاری مکانیکی برای تشخیص ترک استفاده شده بود. با توجه به مزایای بارگذاری حرارتی نظیر سادگی اعمال بار و کنترل بهتر، توسعه این روش در تشخیص ترک در مواد کامپوزیتی و استخراج پارامترهای اصلی آن هدف اصلی مقاله حاضر است. لذا پس از معرفی چیدمان و اطمینان از صحت عملکرد آن، از بارگذاری حرارتی توسط دو منبع تشعشعی سرمایی جهت ایجاد کرنش روی سطح نمونه استفاده شد. با ایجاد ترک‌های مختلف در نمونه‌های کامپوزیتی، کارایی برش‌نگاری در تشخیص آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. علاوه‌براین مقدار بهینه‌ای برای اندازه‌ی بارگذاری و اندازه‌ی برش در این نمونه‌ها استخراج شد. همچنین اثر هر یک از این پارامترها در کیفیت نتایج ترک‌ها مورد بررسی قرار گرفت. به این ترتیب علاوه بر رفع بسیاری از محدودیت‌های بارگذاری مکانیکی نظیر نیازمندی به چیدمان پیچیده بارگذاری و همچنین ایجاد نویز و ارتعاش مکانیکی، با کمترکردن تعداد پارامترهای مستقل، دسترسی به یک محدوده بهینه برای تشخیص‌پذیری ترک‌ها با سهولت بیشتری انجام می‌گیرد.

از روش برش‌نگاری آن‌ها را مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها توانستند علاوه بر تشخیص مکان عیب‌ها، اندازه‌ی کمی آن‌ها را با استفاده از الگوهای هاله‌ای تخمین بزنند و برش‌نگاری را به عنوان روشی مناسب در ارزیابی کمی و کیفی عیب لایه‌لایه‌شدن در نمونه‌های کامپوزیتی معرفی کردند. هوانگ و همکاران [۲۷] به بررسی عیب‌های زیرسطحی در نمونه‌هایی از جنس پی وی سی، فولاد و بتن تقویت‌شده با الیاف که در ساخت پل‌ها کاربرد دارد، پرداختند. عیوب در نظر گرفته‌شده از نوع حفره و ترک زیرسطحی بودند. آن‌ها از سیستم تحریک حرارتی به کمک لامپ فلش تناوبی با توان بالا برای ایجاد کرنش روی سطح استفاده کردند. روش پیشنهادی آن‌ها برای تحریک نمونه، از جریان گرمای انرژی بالا استفاده می‌کند و تغییر شکل حرارتی را با استفاده از تنظیمات برشی غیرمعمول تشخیص می‌دهد. آن‌ها توانستند تمامی عیوب را به طور واضح به کمک این نوع بارگذاری شناسایی کنند. چهرقانی و همکاران [۲۸] عیب‌های مصنوعی زیرسطحی را به صورت حفره‌هایی با ابعاد و عمق‌های مختلف روی نمونه‌های آلومینیومی ایجاد کردند و به کمک روش برش‌نگاری و سیستم تحریک حرارتی مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها به این نتیجه رسیدند که در تعیین عیوب زیرسطحی، نسبت قطر به عمق عیب‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است و کمینه‌ی قطر عیب قابل شناسایی را در حدود $5/2$ برابر عمق آن گزارش کردند. اکبری و همکاران [۲۹] قابلیت روش برش‌نگاری را برای تشخیص عیوب صفحه‌ای در نمونه‌های پلیمری مورد ارزیابی قرار دادند. جنس نمونه‌های مورد ارزیابی از پلی‌اتیلن، بارگذاری به صورت حرارتی دوطرفه و عیب‌ها به صورت حفره‌هایی با اندازه‌های متفاوت بود. آن‌ها نشان دادند که انجام بارگذاری حرارتی به صورت دوطرفه، اثرات خمش ثانویه را خنثی کرده و منجر به ایجاد هاله‌های واضح‌تری می‌شود. همچنین در مقاله‌ای دیگر از همین نویسندگان، آن‌ها پارامترهای موثر و اساسی را برای تشخیص ترک روی مواد مرکب به کمک روش برش‌نگاری، مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها پارامتر بی‌بعدی به نام ضریب بار را برای بیان حالت‌های مختلف بارگذاری در منطقه‌ی کشسان تعریف کردند. علاوه‌براین، اثر اندازه‌ی برش و زاویه‌ی قرارگیری ترک را مورد بررسی قرار دادند [۳۰]. لیو و همکاران [۳۱] قابلیت روش برش‌نگاری را برای تشخیص عیب روی نمونه‌هایی از جنس فلز و پلیمر مورد بررسی قرار دادند. در این کار بارگذاری به صورت حرارتی و عیوب تشخیص داده‌شده از نوع حفره و ترک بود. آن‌ها نواحی قابل تشخیص را برای عیب‌هایی با عمق‌های مختلف روی نمودار نشان دادند.



شکل ۱. چیدمان نوری برش‌نگاری بر پایه تداخل‌گر مایکلسون در بارگذاری حرارتی

Fig. 1. Optical schematic of shearography based on Michelson interferometer in thermal loading

۲- مواد و روش تحقیق

۲-۱- اصول و مبانی برش‌نگاری

اساس کار برش‌نگاری بر پایه تداخل دو جبهه نور بازتاب‌شده از سطح نمونه می‌باشد. برای ایجاد تداخل مناسب، از نور لیزر تک‌رنگ استفاده می‌شود که وظیفه‌ی روشن کردن سطح نمونه را به عهده دارد. روش‌های متفاوتی برای ایجاد تداخل نور لیزر و جداکردن پرتو نور وجود دارد که در این مقاله از تداخل‌گر مایکلسون استفاده شده است. تداخل‌گر مایکلسون از یک مکعب شیشه‌ای جداکننده^۱ که پرتو نور را به دو قسمت تقسیم می‌کند و دو آینه‌ی تخت که یکی از آن‌ها ثابت و دیگری متغیر می‌باشد، تشکیل شده است. شکل ۱ چیدمان کلی روش برش‌نگاری را نشان می‌دهد. به کمک آینه‌های تعبیه‌شده در چیدمان می‌توان اندازه و جهت برش را به طور دلخواه تنظیم کرد. به گونه‌ای که با ثابت‌نگه‌داشتن یکی از آن‌ها و تغییر در جهت آینه‌ی دیگر، می‌توان برش مناسب را اعمال کرد. جهت برش می‌تواند در راستای افقی، عمودی و یا ترکیبی از آن‌ها باشد. به دلیل چرخش یکی از آینه‌های تداخل‌گر، تصویر حاصل شامل دو تصویر مشابه ولی با جابه‌جایی جانبی خواهد بود. سپس بارگذاری روی نمونه انجام می‌شود و توسط دوربین عکس‌هایی از نمونه ثبت می‌شود که تصویر سطح نمونه را قبل و بعد از بارگذاری نشان می‌دهند. این عکس‌ها همان الگوهای تداخلی هستند که نقاط روشن و تاریک آن، نشان‌دهنده‌ی تداخل نقطه‌به‌نقطه‌ی دو تصویر

برش‌خورده است اما هرکدام از آن‌ها به‌تنهایی هیچ اطلاعاتی از چگونگی تغییر شکل نمونه نمی‌دهند. با کم کردن تصاویر از هم توسط نرم‌افزار مناسب، الگوی تیره و روشنی بدست می‌آید که به آن الگوی هاله‌ای^۲ گفته می‌شود. در الگوی هاله‌ای نقاط روی هر هاله دارای فاز یکسان می‌باشند و با هاله‌ی کنار خود به اندازه‌ی 2π رادیان اختلاف فاز دارد [۳۴].

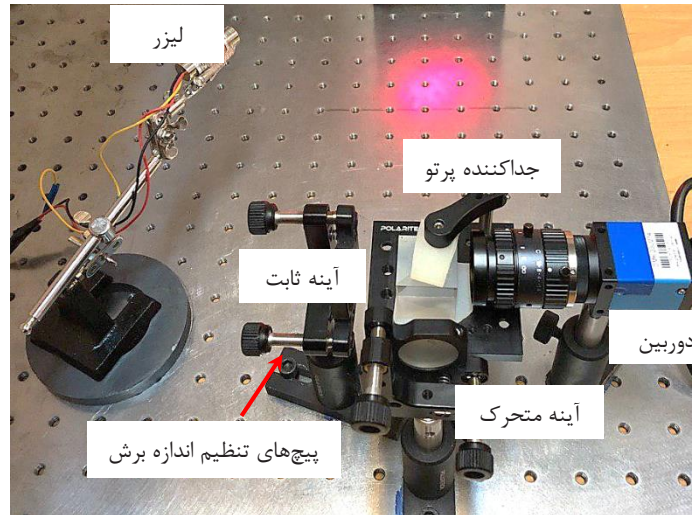
در کلی‌ترین حالت، اختلاف فاز نوری زمانی که مقدار برش کوچک باشد از رابطه‌ی (۱) بدست می‌آید [۳۵]:

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \left(k_x \frac{\partial u}{\partial x} k_y \frac{\partial v}{\partial x} k_z \frac{\partial w}{\partial x} \right) dx \quad (1)$$

در رابطه‌ی (۱)، $k = (k_x, k_y, k_z)$ مولفه‌های بردار حساسیت می‌باشند و بستگی به جهت روشن شدن نمونه توسط لیزر و جهت مشاهده پرتوهای بازتاب‌شده توسط دوربین دارد. همچنین (φ) فاز تصویر (u, v, w) جابه‌جایی در راستای X و Y و Z می‌باشند. اگر مولفه‌های k_x و k_y به اندازه‌ای کوچک باشند که بتوان از آنها صرف‌نظر کرد، سیستم به طور کامل نسبت به مشتق جابه‌جایی خارج صفحه حساس می‌شود. در این صورت اگر جهت پرتوهای تابیده به نمونه و پرتوهای ثبت‌شده توسط دوربین روی یک خط راست باشد، رابطه گرادیان جابه‌جایی خالص خارج صفحه از رابطه‌ی (۲) (برای برش در راستای X) و معادله‌ی (۳) (برای برش در راستای

2 Fringe pattern

1 Beam splitter



شکل ۲. تجهیزات برش‌نگاری مورد استفاده

Fig. 2. Shearography setup used

نکته‌ی مهم در چیدمان برش‌نگاری، نحوه‌ی قرار گرفتن و فاصله‌ی اجزا از یکدیگر می‌باشد. برای اطمینان از صحت عملکرد چیدمان و کالیبره کردن آن، ارزیابی اولیه با جهت‌های برش متفاوت روی نمونه‌ی پلکسی گلس^۲ به ضخامت ۲ و قطر ۱۰۰ میلی‌متر انجام شد که نتایج الگوها مطابق شکل ۳ می‌باشد.

بارگذاری در این نمونه به صورت فشاری و توسط میکرومتر تعبیه‌شده در پشت نمونه صورت گرفت. لازم به ذکر است که عرض تصویر ثبت‌شده توسط دوربین ۹۰ میلی‌متر بود که در بدست‌آوردن اندازه‌ی برش بهینه موثر می‌باشد. در بررسی عملکرد چیدمان، از اندازه برش‌های مختلف استفاده شد. همانطور که ذکر شد، دوربین برش‌نگاری، عکس‌هایی قبل و بعد از بارگذاری ثبت می‌کند و پس از چند مرحله پردازش تصویر، الگوهای هاله‌ای حاصل می‌شوند. انواع مختلفی از بارگذاری جهت ایجاد کرنش بر روی سطح نمونه وجود دارد از جمله: بارگذاری کششی، حرارتی، ارتعاشی، خلاء نسبی، فشاری، که هر کدام از آنها متناسب با نوع جنس و شرایط دسترسی به نمونه انتخاب می‌شوند. در این مقاله از بارگذاری حرارتی از جلوی نمونه در شناسایی ترک در مواد کامپوزیتی استفاده شد.

در بارگذاری‌های حرارتی معمولاً از یک پروژکتور نوری با توان بالا جهت تحریک نمونه استفاده می‌شود. نتایج حاصل از این بارگذاری کیفیت نسبتاً مناسبی دارند ولی عیب اصلی آن این است که چون در هنگام بارگذاری

(y) بدست می‌آید. در رابطه‌های (۲) و (۳)، طول موج لیزر، $(\Delta\varphi)$ اختلاف فاز تصویر و (d_x, d_y) اندازه‌ی برش می‌باشد.

$$\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta\varphi}{4\pi dx} \quad (2)$$

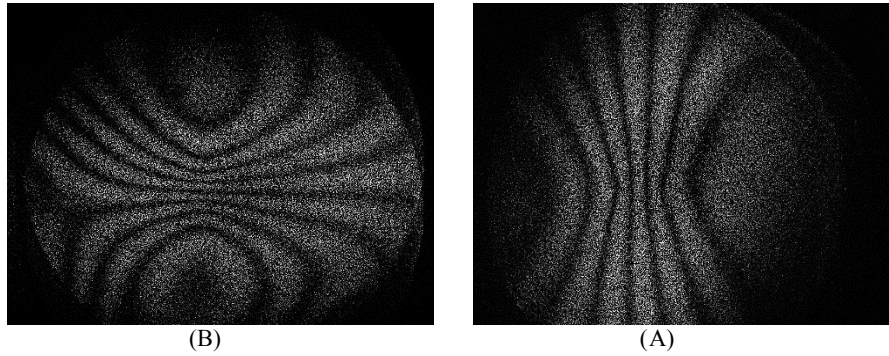
$$\frac{\partial w}{\partial y} = \frac{\lambda \Delta\varphi}{4\pi dy} \quad (3)$$

۲-۲- تجهیزات و چیدمان

تجهیزات برش‌نگاری به‌کاررفته در این مقاله به منظور تشخیص ترک مطابق شکل ۲ می‌باشد. در این چیدمان از یک عدد لیزر دیودی تک‌رنگ با توان ۵۰ میلی‌وات جهت روشن‌نمودن نمونه‌ی تحت آزمایش استفاده شد. از دو آینه‌ی تخت که یکی از آن‌ها ثابت و دیگری قابلیت چرخش در جهت افقی و عمودی را دارد برای ایجاد برش روی تصاویر استفاده گردید. اندازه‌گیری مقدار برش با استفاده از صفحه‌ی درجه‌بندی‌شده در جهات X و Y که در جلوی سطح نمونه قرار می‌گرفت انجام شد. دوربین مورد استفاده جهت ثبت تصاویر از نوع سی سی دی^۱ با کیفیت تصویر ۲/۳ مگاپیکسل هر یک ثانیه یکبار، عکسی از نمونه ثبت می‌نمود.

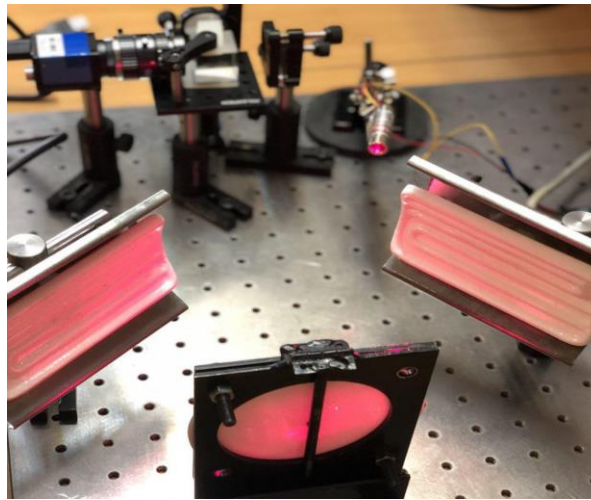
2 Plexiglass

1 Charge Coupled Device (CCD)



شکل ۳. الگوهای هاله‌ای نمونه پلکسی گلس جهت کالیبره کردن چیدمان. (الف) برش در جهت x ، (ب) برش در جهت y

Fig. 3. Plexiglas fringe patterns to calibrate the setup. A) shear in the X direction. B) shear in the Y direction



شکل ۴. کاربرد دو هیتر سرامیکی با پایه‌های قابل تنظیم در زاویه‌های مختلف برای اعمال بارگذاری حرارتی

Fig. 4. Application of two ceramic heaters with adjustable bases at different angles for thermal loading

خنک شدن نمونه انجام شد که بهترین نتایج زمانی بودند که از نمونه در حال سرد شدن، عکسبرداری شده بود و در انتها مقدار بهینه برای اندازه‌ی بارگذاری حرارتی استخراج شد. انبساط حرارتی ایجاد شده در نمونه تحت تأثیر بارگذاری حرارتی، باعث ایجاد تغییر شکل جزئی در سطح نمونه می‌شود. در این حالت اگر نقطه‌ی ناپیوستگی نظیر یک عیب یا نقص در زیرسطح نمونه وجود داشته باشد، ناپیوستگی انبساطی و در نتیجه ناپیوستگی کرنشی، موجب شکل‌گیری الگوهای هاله‌ای برش‌نگاری در منطقه‌های معیوب می‌شود. عامل دیگری که در ارزیابی توسط بارگذاری حرارتی اهمیت دارد زمان خنک شدن نمونه می‌باشد که رابطه‌ی مستقیمی با میزان تغییر

پروژکتور روشن است، دوربین نمی‌تواند همزمان با اعمال بار، عکسبرداری انجام دهد و فقط زمانی که پروژکتور خاموش است و در زمان خنک شدن قطعه عکسبرداری انجام می‌شود. برای حل این مشکل مطابق شکل ۴ چیدمان حرارت‌دهی تشعشعی ساخته شد. برای این منظور از دو هیتر سرامیکی با توان ۵۰۰ وات و حداکثر دمای ۳۵۰-۴۰۰ درجه‌ی سانتیگراد استفاده شد. دو پایه‌ی متحرک در زیر آن‌ها تعبیه شد که به کمک آن هیترها در زاویه دلخواه نسبت به نمونه قرار داده شدند. به دلیل اینکه هیترها حین گرم شدن هیچگونه نور اضافی از خود ساطع نمی‌کنند، عکسبرداری، هم در زمان اعمال بار یعنی گرم شدن نمونه و هم در زمان باربرداری یعنی

جدول ۱. مشخصات مکانیکی نمونه‌های کامپوزیتی

Table 1. Mechanical properties of the composite samples

الیاف	ماتریس	مشخصه
۷۱/۷	۳/۲۱	مدول الاستیک (GPa)
۲۸/۹	۱/۲	مدول برشی (GPa)
۰/۲۴	۰/۳۳	ضریب پواسون
۲۵۴۰	۱۲۰۰	چگالی (kg/m^3)
۳۵	۶۵	نسبت حجمی (%)
۰/۸	۰/۸	ضریب نشر حرارتی



شکل ۵. استفاده از حرارت‌سنج غیرتماسی جهت تعیین سطح دمای نمونه در هر لحظه

Fig. 5. Use the non-contact thermometer to investigate the sample temperature at any moment

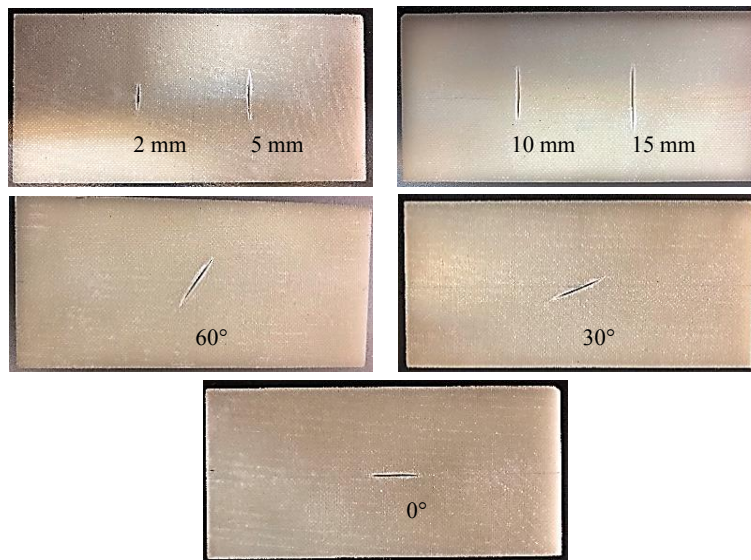
۲-۳- جنس نمونه‌ها و مشخصات ترک‌ها

برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی، از رزین اپوکسی ال وای ۱۱۳ به عنوان ماتریس و از الیاف ریز بافت شیشه با زاویه‌ی قرارگیری صفر و ۹۰ درجه استفاده شد. نسبت وزنی مخلوط‌شدن رزین و سخت‌کننده ۱۰۰ به ۲۰ و مدت زمان پخت آن‌ها ۴۸ ساعت در نظر گرفته‌شد. دو صفحه به ابعاد 200×200 و ضخامت ۳ میلیمتر تشکیل شده از ۲۴ لایه الیاف شیشه، به روش لایه‌چینی دستی ساخته‌شد. سپس ۵ نمونه به ابعاد $100 \times 40 \times 3$ میلیمتر مکعب توسط واترجت از صفحه‌های ساخته‌شده جدا شد. به جهت اطمینان از صحت ساخت نمونه‌های کامپوزیتی و بدون عیب‌بودن آن‌ها، هر کدام به طور مجزا توسط دوربین و بارگذاری حرارتی مورد بررسی قرار گرفتند.

در این حالت تنها هاله‌های نمونه‌ی تحت بار به طور موازی با یکدیگر مشاهده شد که حاکی از بی‌عیب‌بودن نمونه‌ها بود. جدول ۱ مشخصات مکانیکی نمونه‌های تحت ارزیابی را نشان می‌دهد. ۴ ترک عرضی به طول ۲، ۵، ۱۰، ۱۵ میلیمتر روی دو نمونه و ۳ ترک زاویه‌دار صفر و ۳۰ و ۶۰ درجه توسط تیغه‌ی برشی به ضخامت $0/3$ میلیمتر بر روی سه نمونه‌ی دیگر ایجاد شد. عمق هر یک از ترک‌ها نیز در حدود ۱ میلیمتر می‌باشد. در روش برشنگاری چنانچه یکی از ابعاد عیب نسبت به سایر ابعاد بسیار کوچکتر باشد، بعد کوچکتر اثر زیادی بر روی نتایج نخواهد داشت. عرض ترک به دلیل کوچک‌بودن نسبت به طول آن، به عنوان فاکتور مهم برای اندازه‌گیری و بررسی قرار نمی‌گیرد. شکل ۶ اندازه‌ی ترک‌ها و زاویه‌ی قرارگیری آن‌ها را نشان می‌دهد.

شکل نمونه دارد. به‌گونه‌ای که هرچه زمان خنک‌شدن بیشتر شود، تغییر شکل و جابه‌جایی خارج صفحه نمونه نیز بیشتر می‌شود. از این رو، پس از اعمال بارگذاری برای کلیه‌ی آزمایش‌های طراحی‌شده، تعداد ۲۰ عکس به فاصله‌ی زمانی یک ثانیه از سطح نمونه گرفته شد، به گونه‌ای که بعد از اعمال بار توسط هیت‌رها، عکس‌برداری به مدت ۲۰ ثانیه از نمونه انجام گردید. در این حالت می‌توان تمام ۲۰ عکس را با یکدیگر مقایسه کرد چون در هر حالت تغییر کرنش کوچکی روی نمونه ایجاد شده‌است.

مطابق شکل ۵، برای ارزیابی میزان حرارت‌دهی به نمونه و تحلیل نتایج بر اساس اندازه‌ی بارگذاری، از یک حرارت‌سنج غیرتماسی در هر لحظه‌ی باردهی به نمونه استفاده شد. به کمک این تجهیز، دمای نمونه در هر لحظه قابل اندازه‌گیری بود. حرارت‌دهی از دمای اتاق حدود ۲۵ درجه تا ۶۱ درجه‌ی سانتیگراد (۱۸ ثانیه حرارت دهی در بیشترین حالت) روی نمونه اعمال شد. لازم به ذکر است که در هنگام اعمال بارگذاری، نمونه از هر طرف مقید شده‌بود و هیچ‌گونه ارتعاشی نداشت. در ادامه به بررسی بهترین حالت بارگذاری برای دستیابی به بهترین نتایج، پرداخته‌شد.



شکل ۶. اندازه و موقعیت قرارگیری ترک‌ها در پشت نمونه

Fig. 6. Size and position of the cracks behind the specimens

جدول ۲. سطوح پارامترهای مورد بررسی

Table 2. levels of the investigated parameters

سطح ۴	سطح ۳	سطح ۲	سطح ۱	پارامتر
۱۵	۱۰	۵	۲	طول ترک (mm)
۱۸	۱۵	۱۲	۹	اندازه بارگذاری (S)
۱۶	۱۳	۱۰	۷	اندازه برش (mm)

با در نظر گرفتن طراحی آزمایش به روش تاگوچی^۱ در نرم‌افزار مینی‌تب^۲، سه پارامتر اندازه‌ی ترک، اندازه‌ی بارگذاری و اندازه‌ی برش در حالت‌های مختلف نسبت به یکدیگر مورد مقایسه قرار گرفتند. در این روش برای هر پارامتر ۴ سطح در نظر گرفته‌شد، سپس ۱۶ آزمایش برای بررسی پارامترها معرفی شد که پس از انجام آزمایش‌ها، میزان تشخیص‌پذیری ترک‌ها به عنوان خروجی معرفی شد. جدول ۲ مشخصات ترک‌ها و اندازه‌ی بارگذاری و برش‌های مختلف را نشان می‌دهد. علاوه‌براین، جهت برش نیز متناسب با جهت قرارگیری ترک‌ها، در راستای افقی و عمودی و ترکیبی از آن‌ها اعمال شد.

۲-۴- طراحی آزمایش

در این مقاله علاوه بر قابلیت تشخیص‌پذیری ترک‌ها توسط روش برش‌نگاری، پارامترهای موثر در نتایج نیز مورد بررسی قرار گرفتند. میزان حرارت‌دهی توسط هیترهای سرامیکی به نمونه از ۲۵ درجه تا حدود ۶۱ درجه‌ی سانتیگراد بود. سطح‌های در نظر گرفته‌شده برای اندازه‌ی بارگذاری در طراحی آزمایش، برابر ۹، ۱۲، ۱۵، ۱۸ ثانیه انتخاب گردید که به ترتیب دمای نمونه را از دمای محیط تا ۴۸، ۵۲، ۵۷، ۶۱ درجه‌ی سانتیگراد افزایش می‌داد. هرچه زمان باردهی روی نمونه بیشتر بود متناسب با آن، دمای نمونه نیز بیشتر می‌گردید، بدین معنی که بارگذاری بیشتری روی آن صورت گرفته است.

دمای سطحی در تمامی آزمایش‌ها با استفاده از حرارت‌سنج غیرتماسی با دقت نمایش $\pm 0.1\%$ دمای خوانده‌شده و همچنین ثابت زمانی ۵۰۰ میلی ثانیه اندازه‌گیری و تغیرات کنترل شد. در هرکدام از تکرارها اختلاف قابل ملاحظه‌ای در نتایج دمایی سطح نمونه‌ها مشاهده نشد. از آنجا که هیترها به اندازه‌ی مشخصی گرم می‌شوند و سایر پارامترها نظیر فاصله هیترها تا سطح و شرایط سطحی نمونه‌ها تغییر نمی‌کند، تنها پارامتر موثر مدت زمان باردهی به نمونه‌ها است که دمای سطح را تعیین می‌کند. زمان باردهی به طور دقیقی برای همه آزمایش‌ها کنترل شد.

1 Taguchi
2 Minitab

جدول ۳. آزمایش‌های طراحی شده

Table 3. Design of experiments

شماره آزمایش	طول ترک (mm)	اندازه بارگذاری (s)	اندازه برش (mm)	نسبت سیگنال به نویز
۱	۲	۹	۴	۰
۲	۲	۱۲	۷	۱۵/۵۶
۳	۲	۱۵	۱۰	۱۹/۰۸
۴	۲	۱۸	۱۳	۱۲/۰۴
۵	۵	۹	۷	۶/۰۲
۶	۵	۱۲	۴	۹/۵۴
۷	۵	۱۵	۱۳	۱۸/۰۶
۸	۵	۱۸	۱۰	۱۹/۰۸
۹	۱۰	۹	۱۰	۶/۰۲
۱۰	۱۰	۱۲	۱۳	۱۸/۰۶
۱۱	۱۰	۱۵	۴	۱۲/۰۴
۱۲	۱۰	۱۸	۷	۱۵/۵۶
۱۳	۱۵	۹	۴	۶/۰۲
۱۴	۱۵	۱۲	۷	۲۰
۱۵	۱۵	۱۵	۱۳	۱۶/۹۰
۱۶	۱۵	۱۸	۱۰	۹/۵۴

۲-۵- پردازش تصویر

تصاویر هاله‌ای اولیه‌ی بدست‌آمده از قطعه دارای کیفیت پایینی می‌باشند و باید طی چند مرحله پردازش تصویر و به‌کاربردن فیلترهای مناسب، کیفیت آن‌ها بهبود یابد. برای کم‌کردن تصاویر از یکدیگر از کد نرم افزار متلب^۳ استفاده شد. سپس فیلترهایی متناسب با کیفیت هرکدام به‌کارگرفته‌شد. مراحل پردازش تصویر انجام‌شده به صورت زیر می‌باشد:

الف) استفاده از فیلتر کرنل کانولوشن^۴ 5×5 : این فیلتر که یک ماتریس مربعی مرتبه ۵ می‌باشد، با توجه به عدد میانی آن می‌تواند وضوح تصاویر را بالا ببرد و قسمت‌های محوشده را آشکار کند. در این فرایند از مقادیر وزن‌داده‌شده‌ی پیکسل‌های همجوار، برای محاسبه‌ی مقدار جدید یک پیکسل استفاده می‌شود. عدد میانی در این ماتریس، ۲۱ در نظر گرفته‌شد.

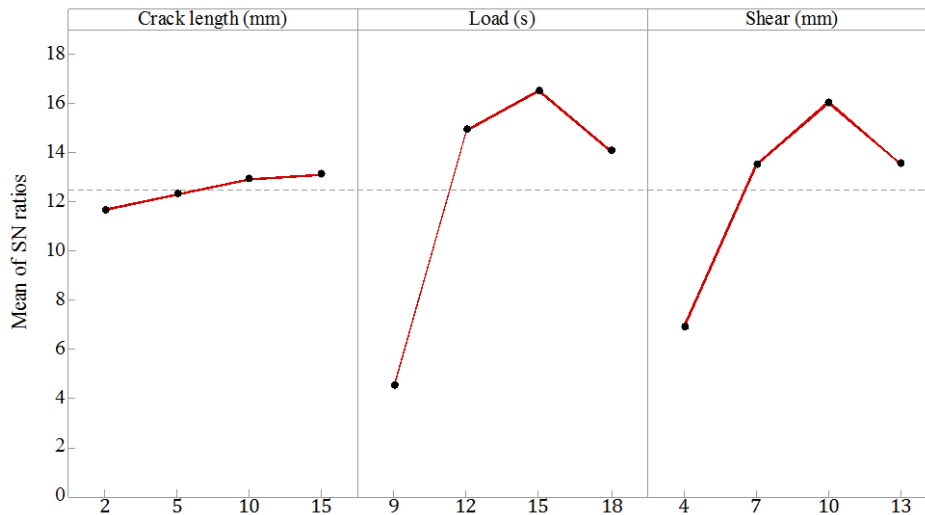
ب) فیلتر میانی^۵: این فیلتر قسمت‌های تیره را تیره‌تر و قسمت‌های روشن را روشن‌تر می‌کند. به کمک این فیلتر می‌توانیم گوشه‌های هر قسمت را با وضوح بالاتری تشخیص دهیم.

جدول ۳ آزمایش‌های طراحی‌شده را نشان می‌دهد. خروجی آزمایش‌ها میزان توانایی روش در تشخیص ترک‌های مختلف می‌باشد. برای بررسی نتایج از نسبت سیگنال به نویز^۱ استفاده شد. این نسبت، نمایانگر میزان حساسیت خروجی به پارامترهای بررسی‌شده بود. هرچه نسبت سیگنال به نویز بیشتر باشد، به این معنی است که ترک به خوبی شناسایی شده‌است زیرا مقدار بیشتر سیگنال به نویز،

نشان‌دهنده‌ی مقادیر کمتر واریانس حاصل‌شده از نتایج پیرامون مقدار هدف می‌باشد. ویژگی انتخاب‌شده در این آزمایش‌ها مقادیر بزرگتر-بهرتر^۲ در نمودار نسبت سیگنال به نویز انتخاب گردید. همانطور که مشخص است مقدار سیگنال به نویز بزرگتر نشان‌دهنده‌ی تشخیص بهتر ترک می‌باشد. با تحلیل نتایج این آزمایش‌ها و بررسی کیفیت هاله‌های ایجادشده، می‌توان به مقداری بهینه برای اندازه‌ی بارگذاری و برش روی نمونه‌ها دست یافت که در ادامه نتایج ارائه شده‌است.

3 Matlab
4 Kernel convolution
5 Median

1 Signal to noise
2 Larger is better



شکل ۷. نمودار نسبت سیگنال به نویز، برای تحلیلی پارامترهای طول ترک، اندازه بارگذاری، اندازه برش

Fig. 7. SNR diagram for analysis of crack length, loading magnitude and shear amount parameters

با افزایش اندازه‌ی بارگذاری، تعداد و تراکم هاله‌ها افزایش می‌یابد [۳۶]، این نتیجه حاصل می‌شود که اعمال بارگذاری کم بر روی نمونه، باعث عدم ایجاد هاله‌های برش‌نگاری و در نتیجه عدم تشخیص عیب می‌شود. از طرفی اعمال بارگذاری بیش از حد نیز باعث ایجاد هاله‌های متراکم می‌شود که تشخیص محل عیب را با مشکل مواجه می‌کند.

با استناد به نتایج به‌دست‌آمده از آزمایش‌های انجام‌شده، پارامتر نسبت سیگنال به نویز به‌عنوان معیاری برای قابل‌تشخیص‌بودن ترک معرفی شد. هر ۱۶ آزمایش طراحی‌شده به روش تاگوچی، ۳ مرتبه تکرار شدند تا صحت‌سنجی چیدمان و بارگذاری تا حد امکان سنجیده شوند. خروجی این آزمایش‌ها، به‌عنوان میزان تشخیص‌پذیری ترک در نظر گرفته‌شد. به‌گونه‌ای که با بررسی کیفی الگوهای هاله‌ای به‌دست‌آمده از هریک از آزمون‌ها، تصاویری که به‌طور کامل و با هاله‌های مشخص مکان ترک را تشخیص دادند ضریب سیگنال به نویز بیشتر و در نتیجه نسبت سیگنال به نویز بالاتری دارند که با استفاده از این عامل می‌توان مقدار بهینه برای بارگذاری حرارتی را مشخص کرد. بهترین نتایج در بارگذاری بین ۱۲ تا ۱۵ ثانیه (حدود ۵۷ - ۵۰ درجه سانتیگراد) بر روی نمونه‌ها استخراج شد. لازم به ذکر است که حرارت سنج غیرتماسی در هر لحظه دمای نمونه را مشخص می‌کرد به گونه‌ای که مطابق سطوح ذکرشده برای اندازه‌ی بارگذاری در روش تاگوچی، ۹ ثانیه حرارت دهی دمای نمونه را به ۴۸ درجه‌ی سانتیگراد، ۱۲ ثانیه ۵۲ درجه، ۱۵ ثانیه ۵۷ درجه و ۱۸ ثانیه ۶۱ درجه‌ی سانتیگراد افزایش داد.

نتایج تحلیل پارامترها در شکل ۷ نشان‌دهنده نسبت سیگنال به نویز در

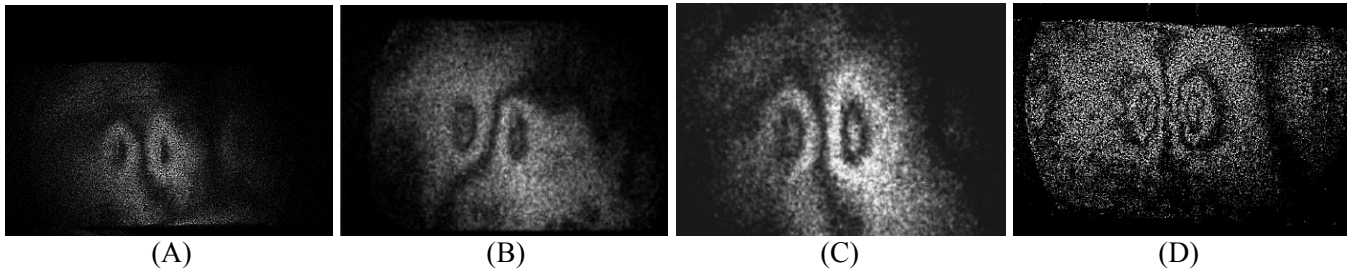
(ج) فیلتر لبه‌های تیز^۱: برای افزایش تشخیص‌پذیری لبه‌ها و توانایی شناسایی ابتدا و انتهای هاله‌ها از این فیلتر استفاده شد.

(د) نزدیک‌کردن هیستوگرام^۲ به عدد ۲۵۵: با افزایش تضاد تصاویر و روشن‌کردن قسمت‌های تیره می‌توان هیستوگرام را که فراوانی قسمت‌های روشن و تیره است کنترل کرد. به دلیل اینکه تصاویر اولیه‌ی ثبت‌شده کمی تاریک و با وضوح پایین بودند، اعمال فیلتر روی آن‌ها به گونه‌ای بود که فراوانی قسمت‌های روشن روی نمودار هیستوگرام گسترش یابد.

۳- نتایج و بحث

سه پارامتر اندازه‌ی بارگذاری و همچنین اندازه و جهت برش، از ویژگی‌های بسیار مهم در تشخیص عیوب مختلف در قطعات به کمک روش برش‌نگاری می‌باشند. با آزمایش‌های متعدد، تمامی ترک‌های ایجادشده روی نمونه‌ی کامپوزیتی با اندازه و زاویه‌های مختلف، به کمک بارگذاری حرارتی تشخیص داده‌شدند. با توجه به نحوه‌ی قرارگیری هیترها نسبت به مکان نمونه، بارگذاری از جلوی نمونه در حالت خنک‌شدن، بهترین نتایج را حاصل کرد. از آنجایی که حساسیت روش برش‌نگاری به تغییرات بسیار اندک در کرنش‌های سطحی و درحد میکرون بسیار زیاد است، بارگذاری باید کاملاً کنترل‌شده و آرام روی نمونه اعمال شود. با توجه به این نکته که در اندازه‌ی بارگذاری ثابت، با افزایش اندازه‌ی برش و همچنین در اندازه‌ی برش ثابت،

- 1 Sharp edge
- 2 Histogram



شکل ۸. الگوهای هاله‌ای نمونه‌های ترک‌دار عرضی با ۱۲ ثانیه بارگذاری حرارتی. الف) ترک ۲ میلی‌متر، ب) ترک ۵ میلی‌متر، ج) ترک ۱۰ میلی‌متر، د) ترک ۱۵ میلی‌متر

Fig. 8. Fringe patterns of vertical cracked specimens with 12 seconds of thermal loading. A) 2mm crack. B) 5mm crack. C) 10mm crack. D) 15mm crack

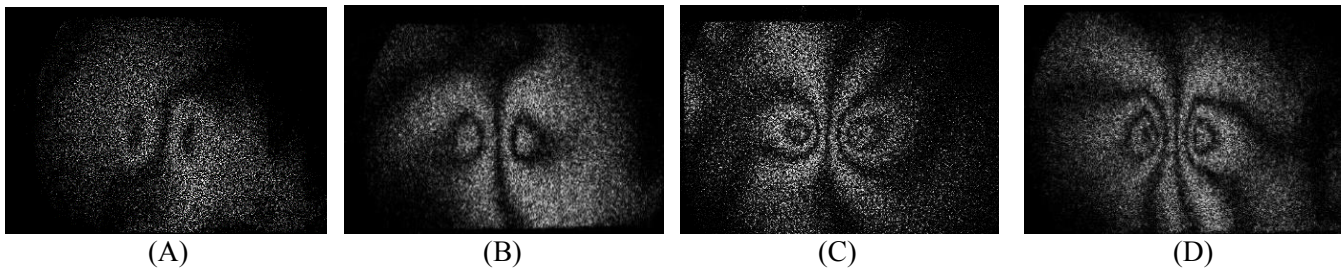
دست‌یافتن به گرادیان جابه‌جایی خارج سطح بهینه و در نتیجه الگوهای هاله‌ای با کیفیت، الزامی می‌باشد.

اندازه‌ی برش در این نمونه‌ها رابطه‌ی مستقیمی با عرض تصویر ثبت‌شده توسط دوربین داشت و این نتیجه بدست آمد که بهینه‌ترین حالت اندازه‌ی برش برابر ۱/۰ عرض تصویر است. همانطور که ذکر شد، عرض تصویر ثبت‌شده توسط دوربین برابر ۹۰ میلی‌متر بود. شکل ۸ و ۹ الگوهای هاله‌ای ترک‌های مختلف را در اندازه‌ی برش بهینه و اندازه‌ی بارگذاری حرارتی ۱۲ و ۱۵ ثانیه را که بهینه‌ترین حالت برای حرارت دهی است نشان می‌دهند. مطابق این شکل‌ها تمامی ترک‌ها به خوبی شناسایی شدند.

با توجه به بررسی نتایج حاصل از پژوهش ليو و همکاران در تشخیص ترک روی نمونه‌های آلومینیومی، جهت برش موازی با جهت عیب می‌تواند قدرت تشخیص ترک را افزایش دهد [۳۱]. این در حالی است که نتایج بدست‌آمده از تحلیل جهت برش تصویر در مقاله‌ی حاضر، حاکی از آن است که هرچه جهت برش در راستای عمود بر جهت ترک باشد، نسبت به حالتی که در راستای جهت ترک باشد، نتایج بهتری را به دست می‌دهد. برای تشخیص ترک‌های زاویه‌دار، از جهت برش ترکیبی در راستای افقی و عمودی استفاده شد. در این حالت جهت برش به اندازه‌ی ۳۰ و ۶۰ درجه نسبت به خط افقی اندازه‌گیری شد. شکل ۱۰ نتایج الگوهای هاله‌ای را روی نمونه کامپوزیتی با ترک‌های طولی و زاویه‌دار نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، با تغییر زاویه‌ی قرارگیری ترک، زاویه‌ی هاله‌ها نیز تغییر کرده‌است. این درحالی است که در بارگذاری مکانیکی به صورت کششی که

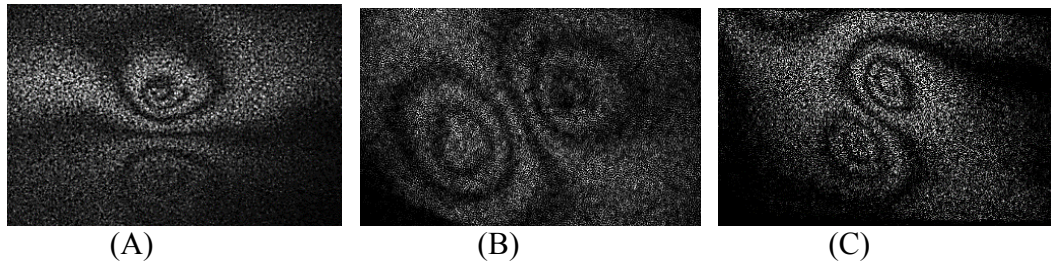
آزمایشات می‌باشد. ترک ۱۵ و ۱۰ میلی‌متری به مراتب ساده‌تر از دو ترک دیگر شناسایی شدند. در این نمودارها مقدار برش بهینه حدود ۱۰ میلی‌متر و اندازه‌ی بارگذاری بهینه حدود ۱۲ تا ۱۵ ثانیه مشخص می‌باشند. با توجه به تغییر قابل‌ملاحظه‌ی مقدار سیگنال به نویز از اندازه برش ۴ میلی‌متر به ۱۰ میلی‌متر، مشخص می‌شود که تغییر کوچکی در اندازه‌ی برش می‌تواند کیفیت هاله‌ها و حساسیت روش را به میزان زیادی تغییر دهد. همچنین به علت بیشتربودن اختلاف ضریب سیگنال به نویز در نمودار اندازه‌ی بارگذاری نسبت به نمودار اندازه‌ی برش، این نتیجه بدست می‌آید که تغییر در پارامتر اندازه‌ی بارگذاری نقش مهم‌تری را نسبت به اندازه‌ی برش در کیفیت نتایج ایفا می‌کند.

با افزایش بارگذاری، هاله‌ها متراکم‌تر و تعداد آن‌ها بیشتر شد ولی تغییری در مکان مرکز هاله‌ها ایجاد نشد. همچنین با افزایش اندازه‌ی برش در یک بارگذاری ثابت، هاله‌ها به هم پیوسته‌تر شدند و بهترین اندازه‌ی برش برای تشخیص ترک روی نمونه‌ها حدود ۱۰ میلی‌متر مشاهده شد. با بیشترکردن مقدار برش، تراکم هاله‌ها زیاد گردید به گونه‌ای که هاله‌های زیادی با فاصله‌ی کم از یکدیگر تشکیل شدند. همچنین با کمترکردن مقدار برش از ۱۰ میلی‌متر، تعداد هاله‌ها کمتر و تشخیص محل ترک مشکل گردید. دلیل این نکته با توجه به معادله‌ی (۲) و (۳) توجیه می‌شود. در این روابط با ثابت‌بودن طول موج و اختلاف فاز، افزایش اندازه‌ی برش باعث افزایش گرادیان جابه‌جایی خارج صفحه می‌شود. به همین ترتیب با کاهش اندازه‌ی برش، گرادیان جابه‌جایی کاهش می‌یابد. از این رو انتخاب برش بهینه برای



شکل ۹. الگوهای هاله‌ای نمونه‌های ترک‌دار عرضی با ۱۵ ثانیه بارگذاری حرارتی. الف) ترک ۲ میلی‌متر، ب) ترک ۵ میلی‌متر، ج) ترک ۱۰ میلی‌متر، د) ترک ۱۵ میلی‌متر

Fig. 9. Fringe patterns of vertical cracked specimens with 15 seconds of thermal loading. A) 2mm crack. B) 5mm crack. C) 10mm crack. D) 15mm crack



شکل ۱۰. الگوهای هاله‌ای نمونه‌های ترک‌دار زاویه‌ای. الف) صفر درجه، ب) ۶۰ درجه، ج) ۳۰ درجه

Fig. 10. Fringe patterns of the specimens with angled cracks. A) 0°. B) 60°. C) 30°

روش طراحی آزمایش مناسب، امکان شناسایی ترک‌ها و پارامترهای اندازه‌ی بارگذاری و اندازه و جهت برش مورد ارزیابی و مقایسه قرارگرفت و در انتها، بارگذاری حرارتی به عنوان روشی مناسب و کارآمد در تشخیص ترک روی این مواد، معرفی شد. نتایج کلی حاصل شده به قرار زیر می‌باشد:

- بارگذاری از جلوی نمونه و همچنین ثبت تصویر از آن در حال خنک‌شدن، نتایج به مراتب مطلوب‌تری را نسبت به ثبت تصویر در حین گرم‌شدن نمونه بدست می‌دهد.

- پارامتر اندازه‌ی بارگذاری و تغییر در آن، نقش مهم‌تری را در کیفیت نتایج نسبت به اندازه‌ی برش دارد.

- هرچه جهت برش به زاویه‌ی ۹۰ درجه نسبت به راستای ترک نزدیک‌تر باشد، نتایج بدست‌آمده بسیار واضح‌تر خواهد بود.

- اندازه‌ی برش بهینه برابر ۰/۱ عرض تصویر ثبت‌شده توسط دوربین تخمین زده‌شد.

در پژوهش‌های پیشین انجام شده‌بود [۲۳]، جهت اعمال بار تأثیر زیادی در جهت‌گیری هاله‌ها به خصوص در مورد ترک‌های زاویه‌دار خواهد داشت. در بارگذاری حرارتی مورد استفاده در این مقاله، جهت بارگذاری به عنوان یک پارامتر حذف خواهد شد و از این رو با کمترکردن تعداد پارامترها، دستیابی به نتایج بهینه با سهولت بیشتری امکان‌پذیر شد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله از روش برش‌نگاری دیجیتال به کمک بارگذاری حرارتی، برای تشخیص ترک روی نمونه‌های مواد کامپوزیتی تقویت‌شده با الیاف شیشه استفاده شد. همچنین پارامترهای اندازه‌ی بار و اندازه و جهت برش نیز که از پارامترهای اساسی در تشخیص ترک هستند، مورد بررسی قرارگرفتند و مقدار بهینه‌ای برای آن‌ها بدست آمد. در ابتدا ترک‌هایی با ابعاد و زوایای مختلف روی نمونه‌های مواد کامپوزیتی ایجاد شد و سپس به کمک

Science and Technology, 18(5) (2007) 1175.

- [7] R.M. Groves, S.W. James, R.P. Tatam, Full surface strain measurement using shearography, in: Optical Diagnostics for Fluids, Solids, and Combustion, International Society for Optics and Photonics, 2001, pp. 142-152.
- [8] H. Asemani, N. Soltani, The Effectiveness of Laser Shearography for the Inspection of Wall Thinning in a Large Aluminum Plate, Journal of Nondestructive Evaluation, 38(2) (2019) 56.
- [9] M. Barmouz, A.H. Behraves, F. Reshadi, N. Soltani, Assessment of defect detection in wood-plastic composites via shearography method, Journal of Thermoplastic Composite Materials, 29(1) (2016) 28-36.
- [10] B. Liu, X. Guo, G. Qi, D. Zhang, Quality evaluation of rubber-to-metal bonded structures based on shearography, Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 58(7) (2015) 1-8.
- [11] Y. Zhang, T. Li, Q. Li, Defect detection for tire laser shearography image using curvelet transform based edge detector, Optics & Laser Technology, 47 (2013) 64-71.
- [12] R. Groves, B. Pradarutti, E. Kouloumpi, W. Osten, G. Notni, 2D and 3D non-destructive evaluation of a wooden panel painting using shearography and terahertz imaging, Ndt & E International, 42(6) (2009) 543-549.
- [13] N. Sujatha, V. Murukeshan, S. Rajendran, L. Ong, L. Seah, Non-destructive inspection of inner surfaces of technical cavities using digital speckle shearography, Nondestructive testing and evaluation, 20(1) (2005) 25-34.
- [14] X. Xie, N. Xu, J. Sun, Y. Wang, L. Yang, Simultaneous measurement of deformation and the first derivative with spatial phase-shift digital shearography, Optics Communications, 286 (2013) 277-281.
- [15] S. Liu, L.X. Yang, Regional phase unwrapping method based on fringe estimation and phase map segmentation, Optical Engineering, 46(5) (2007) 1-9, 9.
- [16] R.M. Groves, S.W. James, R.P. Tatam, Shape and slope measurement by source displacement in shearography, Optics and lasers in Engineering, 41(4) (2004) 621-634.

- برای نمونه‌های کامپوزیتی مورد بررسی بهترین نتایج در زمان بارگذاری بین ۱۲ تا ۱۵ ثانیه (حدود ۵۷ - ۵۰ درجه سانتیگراد) بدست آمد.
- استفاده از بارگذاری حرارتی به دلیل حذف اثر جهت بار، برای تعیین پارامترهای بهینه و تشخیص پذیر کردن عیوب بسیار مناسب‌تر از بارگذاری مکانیکی است.
- به دلیل حساسیت برش‌نگاری به گرادیان خارج صفحه، بارگذاری باید به طور یکنواخت و آرام روی سطح اعمال شود تا از ناهمبستگی تصاویر و ایجاد کرنش بیش از اندازه بر روی سطح نمونه جلوگیری شود.

۵- فهرست علائم

علائم یونانی	
λ	طول موج
$\Delta\varphi$	اختلاف فاز

منابع

- [1] Y. Hung, Applications of digital shearography for testing of composite structures, Composites Part B: Engineering, 30(7) (1999) 765-773.
- [2] R. Růžek, R. Lohonka, J. Jironč, Ultrasonic C-Scan and shearography NDI techniques evaluation of impact defects identification, NDT & E International, 39(2) (2006) 132-142.
- [3] T. Clyne, D. Hull, An introduction to composite materials, Cambridge university press, 2019.
- [4] Y. Hung, H. Ho, Shearography: An optical measurement technique and applications, Materials science and engineering: R: Reports, 49(3) (2005) 61-87.
- [5] D. Francis, S. James, R. Tatam, Surface strain measurement of rotating objects using pulsed laser shearography with coherent fibre-optic imaging bundles, Measurement Science and Technology, 19(10) (2008) 105301.
- [6] R.M. Groves, E. Chehura, W. Li, S.E. Staines, S.W. James, R.P. Tatam, Surface strain measurement: a comparison of speckle shearing interferometry and optical fibre Bragg gratings with resistance foil strain gauges, Measurement

- Lasers in Engineering, 47(7-8) (2009) 774-781.
- [28] A. Chehrghani, A. Fotovat, M. Halajian, M. Torkamany, J. S. Nabavi, H. Inspection of metallic samples defects in nondestructive testing by laser shearography with thermal loading, *Nondestructive testing technology*, 2(2) (2018) 19-25. (in Persian)
- [29] D. Akbari, N. Soltani, F. Reshadi, Application of Digital Shearography for Non Destructive Testing of material with Thermal Loading, *Modares Mechanical Engineering*, 13(4) (2013) 36-45. (in Persian)
- [30] 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) (2013) 430-442.
- [31] Z. Liu, J. Gao, H. Xie, P. Wallace, NDT capability of digital shearography for different materials, *Optics and Lasers in Engineering*, 49(12) (2011) 1462-1469.
- [32] F. Banakar, D. Akbari, Investigation of Digital Shearography for Defect Detection in Different Materials, *Nondestructive testing technology* 2(3) (2019) 8-22. (in Persian)
- [33] F. Banakar, D. Akbari, Application of Shearography for the crack detection in polymer materials, 27th Annual international conference of Iranian Society of Mechanical Engineering, 27 (2019) 1679-1673. (in Persian)
- [34] L. Yang, F. Chen, W. Steinchen, M.Y. Hung, Digital shearography for nondestructive testing: potentials, limitations, and applications, *Journal of Holography and Speckle*, 1(2) (2004) 69-79.
- [35] D. Francis, R. Tatam, R. Groves, Shearography technology and applications: a review, *Measurement science and technology*, 21(10) (2010) 102001.
- [36] Y. Hung, Y.S. Chen, S. Ng, L. Liu, Y. Huang, B. Luk, R. Ip, C. Wu, P. Chung, Review and comparison of shearography and active thermography for nondestructive evaluation, *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 64(5-6) (2009) 73-112.
- [17] Y.M. He, C.J. Tay, H.M. Shang, Digital phase-shifting shearography for slope measurement, *Optical Engineering*, 38(9) (1999) 1586-1590, 1585.
- [18] J.-R. Huang, H. Ford, R. Tatam, Slope measurement by two-wavelength electronic shearography, *Optics and lasers in engineering*, 27(3) (1997) 321-333.
- [19] W. Steinchen, G. Kupfer, P. Mäkel, Full field tensile strain shearography of welded specimens, *Strain*, 38(1) (2002) 17-26.
- [20] D. Akbari, H. Asemani, Analysis of laser interferometry parameters in the evaluation of defects in the polymer matrix composites, *Modares Mechanical Engineering*, 17(9) (2017) 372-380. (in Persian)
- [21] S. Nakadate, T. Yatagai, H. Saito, Digital speckle-pattern shearing interferometry, *Applied Optics*, 19(24) (1980) 4241-4246.
- [22] M. Mohamadi, D. Akbari, Evaluation of sub-surface cracks in polymer matrix composites with laser interferometric method, *International Journal of Manufacturing Engineering*, 2(3) (2015) 11-23.
- [23] D. Akbari, N. Soltani, Investigation of loading parameters in detection of internal cracks of composite material with digital shearography, *World Applied Sciences Journal*, 21(4) (2013) 526-535.
- [24] H. Liu, S. Guo, Y.F. Chen, C.Y. Tan, L. Zhang, Acoustic shearography for crack detection in metallic plates, *Smart Materials and Structures*, 27(8) (2018) 085018/085011-085010.
- [25] R. Pezzoni, R. Krupka, Laser-shearography for non-destructive testing of large-area composite helicopter structures, *INSIGHT-WIGSTON THEN NORTHAMPTON-*, 43(4) (2001) 244-248.
- [26] S.W. Choi, J.H. Lee, Nondestructive evaluation of internal defects for composite materials by using shearography, in: *Key engineering materials*, Trans Tech Publ, 2004, pp. 781-786.
- [27] Y. Huang, S. Ng, L. Liu, C. Li, Y. Chen, Y. Hung, NDT&E using shearography with impulsive thermal stressing and clustering phase extraction, *Optics and*

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

F. Banakar, D. Akbari, Non-destructive evaluation of internal cracks in glass fiber-reinforced polymers using digital shearing interferometry, Amirkabir J. Mech Eng., 53(Special Issue 6) (2021) 4063-4078.

DOI: [10.22060/mej.2021.18182.6756](https://doi.org/10.22060/mej.2021.18182.6756)



