



ارزیابی ترک‌های زیرسطحی در مواد مرکب زمینه پلیمری با استفاده از روش تداخل‌سنجی لیزری

مهران محمدی¹، داود اکبری^{2*}

1- کارشناس ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران

* تهران، صندوق پستی 143-14115، daakbari@modares.ac.ir

کلیدواژگان

آزمون غیر مخرب
برش‌نگاری دیجیتال
کامپوزیت
اندازه‌گیری ترک زیر سطحی

چکیده

برش‌نگاری دیجیتالی یکی از روش‌های نوری مبتنی بر تداخل‌سنجی لیزری است که به کمک آن می‌توان گرادین‌های جابجایی سطحی اجسام را اندازه‌گیری کرد. از این روش می‌توان به عنوان ابزاری در آزمون غیرمخرب استفاده نمود. در این پژوهش روشی جهت تخمین طول و عمق ترک‌های زیر سطحی در صفحات کامپوزیتی شیشه-اپوکسی بر پایه روش برش‌نگاری دیجیتالی ارائه شده است. بدین منظور، برش‌نگاری دیجیتالی قطعه مورد مطالعه به وسیله نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس و برنامه جانبی نوشته شده در نرم‌افزار متلب، شبیه‌سازی شد. جهت صحت‌سنجی شبیه‌سازی انجام شده، چیدمان برش‌نگاری برای انجام آزمون‌های تجربی راه‌اندازی شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی‌ها با آزمون‌های تجربی، صحت شبیه‌سازی‌های انجام شده را تأیید کرد. سپس به کمک روش طراحی آزمایش، آزمون برش‌نگاری قطعه مورد مطالعه با هندسه‌های مختلف ترک و نیروی آزمون، شبیه‌سازی و تعداد و تراکم هاله‌های ایجاد شده در هر آزمون بدست آمد. با برازش داده‌های بدست آمده، روابطی جهت تخمین عمق و طول ترک ارائه شد. صحت‌سنجی روابط ارائه شده با نتایج تجربی، نشان دهنده دقت قابل قبول روابط و الگوریتم مورد استفاده در تخمین عمق و طول ترک در صفحات کامپوزیتی می‌باشد.

Evaluation of sub-surface cracks in polymer matrix composites with laser interferometric method

Mehran Mohammadi, Davood Akbari*

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

* P.O.B. 14115-143, Tehran, Iran, daakbari@modares.ac.ir

Keywords

Nondestructive test
Digital shearography
Composite
Sub-surface crack measurement

Abstract

Digital shearography is an optical method based on LASER interferometry can be used to determine the displacement gradients of surface of materials. This approach can be used as a tool for non-destructive testing. In this research, a method based on digital shearography is provided to estimate the depth and length of sub-surface cracks in glass-epoxy composite plates. Hence, the digital shearography of the studied specimen was simulated by Abaqus finite element software and a secondary program written in Matlab; A shearography setup established in order to verify the simulation. Comparing results of simulations to experiments confirmed the accuracy of simulations. Then, by design of experiment method, shearography of studied specimen with different crack geometry and testing load was simulated and number and density of fringes were extracted in each test. The equations to estimate the depth and length of crack were provided by curve fitting of obtained data. Validation of provided equations with experimental results shows acceptable accuracy of the equations and algorithm used to estimate the depth and length of cracks in composite plates.

1- مقدمه

در سال‌های اخیر، استفاده از مواد کامپوزیتی در صنایع مختلف خصوصاً صنایع هوایی و نیروگاهی، به دلیل نسبت استحکام به وزن بالا، مورد توجه قرار گرفته است. به دلیل ویژگی‌هایی نظیر ناهمگنی و چندساختاری بودن، پتانسیل ایجاد عیوب در

این‌گونه مواد بیشتر از مواد همگن نظیر فلزات و پلیمرها است. از طرفی خواصی نظیر ناهمگنی، عدم رسانایی الکتریکی و مغناطیسی، استفاده از روش‌های سنتی آزمون‌های غیر مخرب نظیر آزمون فراصوتی، جریان‌های گردابی و ذرات مغناطیسی در این‌گونه مواد را بسیار دشوار و در مواردی ناممکن کرده است [1].

Please cite this article using:

M. Mohammadi, D. Akbari, Evaluation of sub-surface cracks in polymer matrix composites with laser interferometric method, *Iranian Journal of Manufacturing Engineering*, Vol. 2, No. 3, pp. 11-23, 2015 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

همچنین نتایج آن‌ها نشان داد، زمانی که جهت برش تصویر بر راستای ترک عمود نباشد، حساسیت تشخیص ترک نسبت به زمانی که تصویر در راستای ترک برش بخورد، بیشتر است. دانگلیس و همکاران [8] از بارگذاری دینامیکی و ارتعاشی برای تشخیص عیب در ورق‌های کامپوزیتی و آلومینیومی دارای سوراخ‌های با کف تخت⁵، به روش برش‌نگاری استفاده کردند. آن‌ها نشان دادند که با افزایش عمق و کاهش قطر عیب در نمونه، فرکانس تشدید نمونه افزایش می‌یابد و با اندازه‌گیری فرکانس تشدید نمونه‌ها می‌توان با دقت بالایی ابعاد عیب موجود را تخمین زد.

اکبری و همکاران [4] به بررسی تشخیص ترک‌های زیر سطحی در کامپوزیت‌های شیشه اپوکسی با استفاده از بارگذاری مکانیکی در روش برش‌نگاری پرداختند. آن‌ها نسبت بی‌بعدی از بار وارده به نمونه و استحکام تسلیم آن، معرفی کرده و محدوده بار مورد نیاز برای واضح و قابل تشخیص بودن هاله‌های تشکیل شده در آزمون برش‌نگاری را ارائه کردند. آن‌ها در پژوهش دیگری [9]، به بررسی نحوه بارگذاری حرارتی برای یک نمونه پلیمری دارای سوراخ کف تخت با عمق‌ها و قطرهای مختلف در آزمون برش‌نگاری پرداختند. آن‌ها نشان دادند، با انجام بارگذاری حرارتی دوطرفه، اثر نامتعادل شدن دما در دو طرف نمونه را خنثی کرده و مانع از انحنای کل نمونه به یک طرف می‌شود. این امر مشکل ایجاد هاله‌های زائد را تا حد زیادی برطرف کرده و باعث افزایش وضوح هاله‌ها می‌شود. لوپز و همکاران [2] از تابش نور با زاویای مختلف استفاده کردند و معادلاتی را جهت محاسبه مشتقات مراتب بالاتر از یک جابجایی خارج از صفحه در روش برش‌نگاری، توسعه دادند. آن‌ها نشان دادند، مشتق مرتبه چهارم جابجایی خارج از صفحه، محل عیب در صفحه کامپوزیتی را به خوبی نشان می‌دهد. کرزمین و همکاران [10] جدایش لایه‌ای رنگ در تابلوهای نقاشی قدیمی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها در پژوهش خود از صوت به عنوان بارگذاری و تحریک عیب استفاده کردند. نتایج آن‌ها نشان داد، اندازه عیب موجود در قطعه با فرکانس صوت نسبت معکوس داشته و در فرکانس‌های بالاتر، عیوب کوچکتر نمایان می‌شوند.

در پژوهش حاضر، روشی برای تخمین هندسه ترک زیر سطحی در صفحه⁶ کامپوزیتی شیشه-اپوکسی ارائه شده است. به همین منظور، آزمون برش‌نگاری دیجیتال قطعه مورد مطالعه، شبیه‌سازی شد و اثر هندسه ترک-شامل طول ترک (l) و عمق

در سال‌های اخیر، بکارگیری روش‌های نوری برای آزمون غیر مخرب مواد کامپوزیتی توسعه زیادی یافته است. برخی از این روش‌ها عبارتند از هولوگرافی¹، تداخل‌سنجی الگوی لکه‌ای² و برش‌نگاری دیجیتالی³ که استفاده از روش برش‌نگاری دیجیتالی نسبت به سایر روش‌ها دارای مزایایی همچون حساسیت کمتر به ارتعاشات محیط، عدم نیاز به انتقال نور مرجع جهت ایجاد تداخل، ساده‌تر بودن چیدمان نوری و اندازه‌گیری مستقیم کرنش (مشتق اول جابجایی‌های سطح) می‌باشد [2، 3].

چنانچه یک قطعه معیوب تحت بارگذاری از قبیل حرارتی، مکانیکی یا ارتعاشی قرار گیرد، وجود عیب در آن موجب ناهمگنی موضعی توزیع کرنش و یا ایجاد الگوی خاص جابجایی و کرنش در حوالی آن عیب می‌شود. به وسیله آزمون برش‌نگاری، می‌توان این ناهمگنی را با تشخیص الگوی خاص جابجایی و کرنش ایجاد شده در سطح قطعه اندازه‌گیری و از طریق آن به وجود عیب پی برد [4].

تحقیقاتی در حوزه استفاده از برش‌نگاری در تشخیص عیوب در مواد کامپوزیتی صورت گرفته که عمدتاً بر روی تشخیص کیفی عیوب متمرکز بوده‌اند. توه و همکاران [5] به اندازه‌گیری جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه توسط روش برش‌نگاری پرداختند. آن‌ها برای تحریک عیوب از بارگذاری به کمک خلاء⁴ استفاده کرده و این نوع از بارگذاری را به عنوان روش مناسبی برای تشخیص جدایش بین لایه‌ای در کامپوزیت‌ها معرفی کردند. کیم و همکاران [6] به تشخیص ترک داخلی در لوله‌های تحت فشار از جنس فولاد زنگ نزن، به روش برش‌نگاری پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد، در صورتی که جهت برش تصویر در راستای ترک باشد، اندازه ترک تقریباً به اندازه فاصله قله تا قله هاله‌های ایجاد شده می‌باشد؛ اما در صورتی که اندازه برش، بزرگتر از طول تقریبی ترک شود، این تخمین دچار خطای زیادی شده و ترک را بزرگتر از مقدار واقعی پیش‌بینی می‌کند. آن‌ها همچنین مقدار بهینه فشار داخلی لوله در آزمون برش‌نگاری را بدست آوردند. لیو و همکاران [7] به امکان اندازه‌گیری ترک و سوراخ در مواد پلیمری و فلزی به کمک بارگذاری حرارتی در برش‌نگاری پرداختند. آن‌ها با انجام آزمون‌های تجربی، حداقل نسبت قطر به عمق را برای قابل تشخیص بودن سوراخ موجود در صفحه آلومینیومی و پلیمری در روش برش‌نگاری، بدست آوردند.

¹ Holography

² Speckle pattern interferometry

³ Digital shearography

⁴ Vacuum loading

⁵ Flat bottom hole

⁶ Plate

در این مجموعه، نور تک‌رنگ لیزر توسط عدسی پخش‌کننده با زاویه α نسبت به محور Z به سطح جسم مورد آزمون تابانده می‌شود و بازتاب این نور پس از برخورد با آینه‌های تداخل‌گر، به سطح تصویر برداری در دوربین CCD می‌رسد.

در این چیدمان، نور بازتابیده از نقطه شماره 1 واقع در سطح جسم به جداکننده پرتو² که یک نیم آینه است، می‌رسد. بخشی از این نور پس از برخورد به جداکننده پرتو، بازتاب پیدا کرده و پس از بازتاب از آینه شماره 1، در سطح دوربین CCD در نقطه 1' تصویر می‌شود. بخش دیگری از نور رسیده به جداکننده پرتو از آن عبور کرده و به آینه شماره 2 می‌رسد. آینه شماره 2 به حالت کاملاً موازی با صفحه XY نصب نشده و حول محور Y اندکی دوران داده شده است. این زاویه اندک موجب می‌شود تا نور بازتابیده از آن در نقطه P در سطح دوربین CCD تصویر شود که به اندازه δ_x از نقطه 1' فاصله دارد. به این ترتیب، هر نقطه از جسم بر روی دو نقطه در دوربین CCD تصویر می‌شود. به این عمل، برش زدن³ تصویر در راستای محور X و به δ_x اندازه برش⁴ برش گفته می‌شود. حال اگر نقطه 2 را به فاصله δ_x از نقطه 1 در نظر بگیریم، تصویر این دو نقطه در نقطه P با یکدیگر تداخل می‌کند.

شدت نور حاصل از تداخل دو تصویر برش‌خورده در نقطه P واقع در صفحه تصویر برابر I و مطابق معادله (1) می‌باشد که در آن I_0 شدت متوسط نور دو پرتو، ϕ اختلاف فاز نور در دو نقطه و γ مدول تداخل است. پس از بارگذاری قطعه، به دلیل جابجایی نسبی نقاط 1 و 2، اختلاف فازشان به اندازه Δ تغییر می‌کند و شدت نور جدید I' به صورت معادله (2) تغییر می‌یابد. با محاسبه تفاضل مقادیر نور در قبل (I) و بعد از بارگذاری (I')، توزیع شدت نور جدیدی برابر I_s بدست می‌آید که به وسیله معادله (3) بیان می‌شود [11].

$$I = I_0(1 + \gamma \cos \phi) \quad (1)$$

$$I' = I_0(1 + \gamma \cos(\phi + \Delta)) \quad (2)$$

$$I_s = I - I' = I_0\gamma(\sin \phi + \frac{\Delta}{2}) \cdot \sin(\frac{\Delta}{2}) \quad (3)$$

با توجه به معادله (3)، در نقاطی که تغییر فاز Δ برابر مضرب فردی از π باشد، ($\Delta = (2n + 1)\pi, n = 0, 1, 2, \dots$)، شدت نور بیشینه و تصویر در آن نقاط روشن است، اما در نقاطی که تغییر فاز Δ برابر مضرب زوجی از π باشد ($\Delta = (2n)\pi, n = 0, 1, 2, \dots$)، آنگاه شدت نور کمینه و تصویر در آن نقاط تاریک دیده می‌شود.

ترک (d) - و نیروی آزمون (F)، بر تعداد و تراکم هاله‌های ایجاد شده در آزمون برش‌نگاری مورد بررسی قرار گرفته است. با برآزش نتایج بدست آمده، معادله‌ای جهت برقراری ارتباط بین تعداد و تراکم هاله‌ها با هندسه ترک به دست آمده است. با استفاده از این معادله می‌توان با شمارش تعداد و اندازه‌گیری تراکم هاله‌ها، هندسه ترک موجود در قطعه را تخمین زد. در نهایت، صحت نتایج شبیه‌سازی با انجام آزمون‌های تجربی تأیید شده است.

2- اصول برش‌نگاری

اصول برش‌نگاری بر پایه تداخل نور لیزر روی سطح قطعه است. در این روش بایستی دو جبهه نور تک‌رنگ لیزر روی سطح قطعه و یا در صفحه تصویر، تداخل کرده و یک الگوی هاله‌ای ایجاد نمایند؛ از این رو، اولین گام در شناخت اصول این روش، توجه به نحوه تشکیل الگوی هاله‌ای است.

2-1- تشکیل الگوی هاله‌ای

روش‌های مختلفی برای ایجاد تداخل بین امواج نور وجود دارد که یکی از متداول‌ترین آن‌ها، استفاده از تداخل‌گر مایکلسون¹ است. از این رو می‌توان چیدمان نوری روش برش‌نگاری را بر اساس این تداخل‌گر قرار داد.

در شکل 1 مجموعه چیدمان نوری روش برش‌نگاری با استفاده از تداخل‌گر مایکلسون از نمای XZ نشان داده شده است.

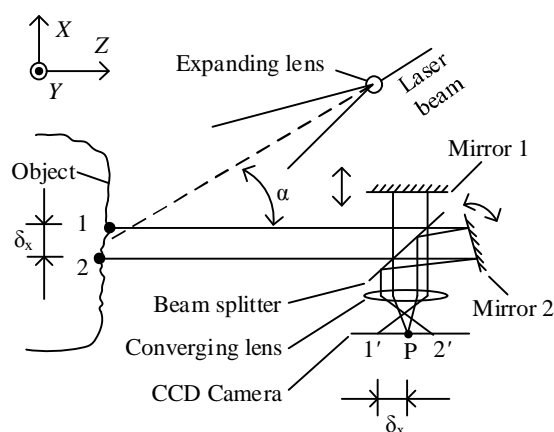


Fig. 1 Scheme of the shearography set up based on Michelson interferometer

شکل 1 نمایش شماتیک چیدمان نوری روش برش‌نگاری با استفاده از تداخل‌گر مایکلسون

² Beam Splitter

³ Shearing

⁴ Shear size

¹ Michelson interferometer

برای ترسیم الگوی فازی، بایستی توزیع فاز قبل از بارگذاری (ϕ) و پس از بارگذاری (ϕ')، محاسبه شود. از آنجایی که دوربین CCD مورد استفاده در چیدمان آزمون تنها شدت نور را ثبت کرده و توانایی ثبت فاز نور تابیده شده را ندارد؛ جهت استخراج فاز هر تصویر، از روش جابجایی فاز³ استفاده می‌شود. در این روش قبل از بارگذاری، تصویری از قطعه با توزیع شدت نور I_1 ثبت سپس آینه شماره 1 در شکل 1 توسط یک المان پیزوالکتریک که در پشت آن قرار گرفته است، در راستای محور X اندکی جابجا می‌شود و تصویر دوم با توزیع شدت نور I_2 ثبت می‌شود. به همین ترتیب پس از ثبت تصاویر با شدت‌های نور I_3 و I_4 ، توزیع فاز قبل از بارگذاری (ϕ) توسط معادله (5) بدست می‌آید [11]. با انجام این روند پس از بارگذاری قطعه، توزیع فاز پس از بارگذاری (ϕ') نیز محاسبه می‌شود. با کم کردن این دو مقدار از یکدیگر، توزیع اختلاف فاز (Δ) بدست می‌آید. مقادیر بدست آمده از فاز تصاویر به طور مستقیم به گرادیان جابجایی ارتباط دارند. بدین صورت که در نواحی تیره با مقدار Δ یکسان، گرادیان جابجایی ($\frac{\partial w}{\partial x} = \frac{\lambda \Delta}{4\pi \delta_x}$) برابر است. این مقدار در هاله‌های متوالی با افزایش ضریب صحیحی از 2π رادیان تغییر می‌کند.

$$\phi = \tan^{-1} \frac{I_4 - I_2}{I_1 - I_3} \quad (5)$$

3- استفاده از برش‌نگاری در تشخیص ترک

از روش برش‌نگاری می‌توان به شکل کارآمدی برای تشخیص عیوب زیرسطحی استفاده نمود. در این پژوهش برای تشخیص ترک در یک نمونه کامپوزیتی از مدل هندسی شکل 3 با بارگذاری کششی در راستای عمود بر جهت ترک استفاده شده است.

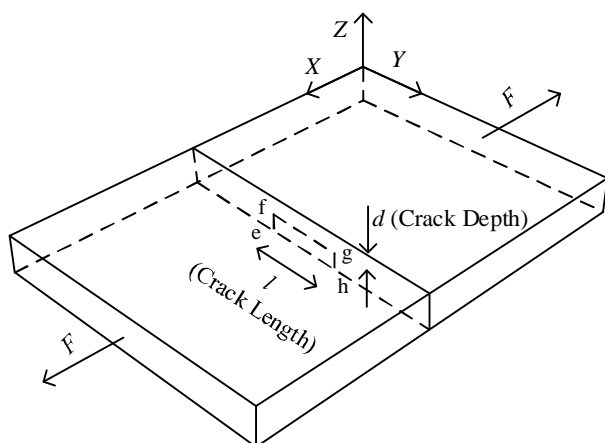


Fig. 3 Geometry of the studied object with a sub-surface crack

³ Phase shifting technique

در شکل 2 تصویر الگوی تداخلی حاصل از آزمون برش‌نگاری یک صفحه که پس از بارگذاری دچار جابجایی خارج از صفحه شده است، مشاهده می‌شود. به الگوی تیره و روشن بدست آمده، الگوی هاله‌ای¹ گفته می‌شود. در الگوی هاله‌ای، هر هاله نشان دهنده نقاط هم‌فاز است که با هاله بعد از خود به اندازه 2π رادیان اختلاف فاز دارد.

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

2-2- تفسیر الگوی هاله‌ای

با توجه به شکل 1، در صورتی که زاویه تابش پرتو لیزر به جسم در راستای محور Z باشد ($\alpha=0$)، مشتق اول جابجایی خارج از صفحه نسبت به محور X مطابق معادله (4) بدست می‌آید [12]. در این رابطه λ طول موج لیزر مورد استفاده و w جابجایی هر نقطه در راستای محور Z است. بنابراین بر اساس معادله (4) می‌توان نتیجه گرفت که برش‌نگاری، گرادیان جابجایی خارج از صفحه $\frac{\partial w}{\partial x}$ را به طور مستقیم محاسبه می‌کند.

از آنجایی که اختلاف فاز بین دو هاله متوالی برابر 2π رادیان است، بنابراین با شمارش هاله‌های تشکیل شده، مقدار تغییر فاز Δ بدست می‌آید که می‌توان با استفاده از معادله (4)، گرادیان جابجایی ایجاد شده در محل هاله مورد نظر را محاسبه کرد.

2-3- الگوی فازی

به منظور افزایش حساسیت روش برش‌نگاری برای یافتن عیوب کوچکتر، به جای تحلیل و تفسیر الگوی هاله‌ای، از الگوی فازی² استفاده می‌شود [11].

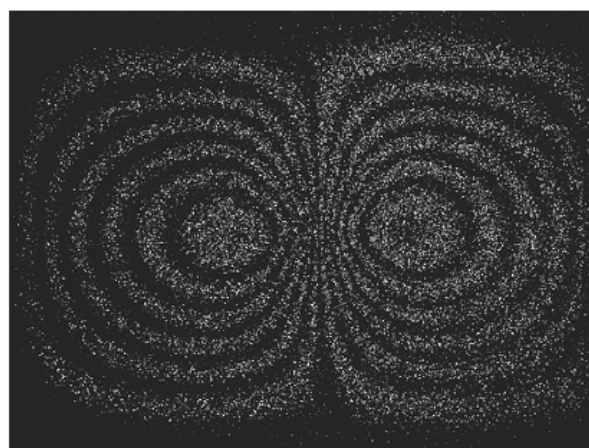


Fig. 2 Fringe pattern of a plate subjected to the out of plane displacement [3]

شکل 2 الگوی هاله‌ای یک صفحه پس از اعمال جابجایی خارج از صفحه [3]

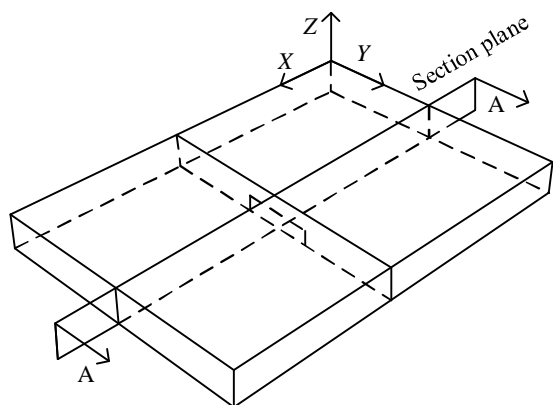
¹ Fringe pattern

² Phase map

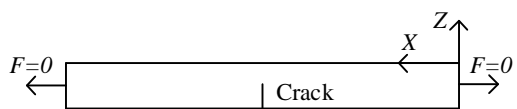
شکل 3 هندسه قطعه مورد مطالعه و ترک داخلی آن این شکل هندسه قطعه به همراه ترک داخلی آن را به صورت شماتیک نشان می‌دهد. مستطیل e f g h، ترک داخلی قطعه با طول l بوده و در صفحه تقارن قطعه قرار گرفته است. ترک در عمق d از سطح بالایی قطعه قرار داشته و از ضلع eh به سمت بیرون راه به در است. از آنجایی که برای ایجاد ترک در نمونه‌های تجربی، از یک تیغچه برش بسیار نازک استفاده می‌شود، عرض ترک (در راستای محور X) بسیار کوچک بوده و نسبت به سایر ابعاد هندسی قابل صرف نظر کردن است.

5- آزمون‌های تجربی

هندسه قطعه مورد مطالعه در بخش قبل بیان شد. برای ایجاد ترک در نمونه‌های کامپوزیتی، از یک تیغچه برش نازک استفاده و شیاریهایی با طول 10 mm و عمق $0/5\text{ mm}$ ایجاد شد.



1- 3D View



2- Section A:A with no load



3- Section A:A with load

Fig. 4 Geometry of object and crack in shearography test, 1-3D view of object with section plane A:A, 2-geometry of object and crack with no load in A:A section, 3- geometry of crack and deflection of object in A:A section

شکل 4 هندسه قطعه و ترک در آزمون برش‌نگاری، 1- نمای سه بعدی قطعه به همراه صفحه برش A:A، 2- هندسه ترک و قطعه در نمای برش خورده A:A قبل از اعمال بار 3- هندسه ترک و خیز قطعه در نمای برش خورده A:A پس از بارگذاری

جدول 1 خواص مکانیکی الیاف و زمینه صفحه کامپوزیتی

Table 1 Mechanical properties of fiber and matrix of composite plate

خواص	واحد	الیاف شیشه	زمینه اپوکسی
مدول کششی	(GPa)	71.7	3.2
مدول برشی	(GPa)	28.9	1.2
چگالی	(Kg/m ³)	2540	1200
درصد حجمی	(%)	35	65

شکل 4 رفتار قطعه دارای ترک در اثر اعمال بار کششی بر آن را نشان می‌دهد. شکل 1-4، نمای سه بعدی قطعه دارای ترک به همراه صفحه برش A:A (صفحه تقارن قطعه در راستای محور Y)، را نشان می‌دهد. در شکل 2-4، نمای برش خورده قطعه توسط صفحه A:A نشان داده شده است. مشاهده می‌شود زمانی که هنوز باری به قطعه وارد نشده، دهانه ترک بسته و سطح قطعه کاملاً تخت قرار گرفته است. اما زمانی که بار آزمون به قطعه وارد شود (شکل 3-4)، دهانه ترک باز شده و سطح قطعه در محل ترک در راستای محور Z دچار جابجایی می‌شود که این جابجایی، به جابجایی خارج از صفحه¹ موسوم است. مقدار جابجایی خارج از صفحه برای هر نقطه با موقعیت (x,y) در سطح قطعه، با پارامتر $w(x,y)$ بیان می‌شود. مقدار مطلق w با نزدیک‌تر شدن به محل ترک، افزایش می‌یابد. جابجایی خارج از صفحه (w) ، موجب ایجاد اختلاف فاز بین نور بازتابیده از سطح قطعه در قبل و بعد از بارگذاری می‌شود. این اختلاف فاز موجب تشکیل هاله‌های متوالی در آزمون برش‌نگاری دیجیتال می‌شود که تعداد و تراکم آن‌ها به مشتق جابجایی خارج از صفحه $(\frac{\partial w}{\partial x})$ وابسته است. از طرفی مقدار w تابعی از هندسه ترک و اندازه بار آزمون F ، می‌باشد. بنابراین با یافتن ارتباط بین تعداد و تراکم هاله‌ها با هندسه ترک، می‌توان اندازه ترک را بر اساس نتایج آزمون برش‌نگاری تخمین زد.

4- هندسه و جنس قطعه مورد مطالعه

قطعه مورد مطالعه مطابق شکل 3، می‌باشد. این قطعه، صفحه مستطیل شکل به ابعاد $100 \times 70\text{ mm}^2$ و با ضخامت 4.5 mm است. طول ترک داخلی قطعه l بوده و در عمق d از سطح بالایی قطعه قرار گرفته است.

نمونه مورد استفاده برای ساخت این قطعه به صورت کامپوزیت 8 لایه از جنس شیشه-اپوکسی تک جهته با ترتیب لایه چینی

¹ Out of plane displacement

جدول 2 مشخصات آزمون‌های تجربی انجام شده

Table 2 Experimental tests specification

واحد	پارامتر
10	طول ترک، l (mm)
0/5	عمق ترک، d (mm)
147, 294, 441	نیروی آزمون، F (N)

6- شبیه‌سازی اجزای محدود برش‌نگاری دیجیتال

برای شبیه‌سازی روش برش‌نگاری دیجیتالی از نرم‌افزار تجاری آباکوس¹ به همراه یک برنامه جانبی نوشته شده در محیط برنامه‌نویسی متلب² استفاده شد. شکل 7 نمایش شماتیکی از مدل در نظر گرفته شده در شبیه‌سازی اجزای محدود را نشان می‌دهد. به دلیل تقارن قطعه در دو صفحه، یک چهارم هندسه قطعه در نرم‌افزار مدل شد و در وجه $brh'c$ قید تقارن در راستای محور Y اعمال شد؛ جهت مدلسازی ترک، در وجه $qrh'p$ به غیر از سطح ترک (سطح $fg'h'e$) در راستای محور X قید تقارن اعمال شد. نیروی آزمون به صورت نیروی کششی یکنواخت بر وجه $obcs$ و در جهت منفی محور X وارد شد. جنس قطعه به صورت کامپوزیت 8 لایه تعریف و خواص مکانیکی هر لایه شامل مدول یانگ، مدول برشی در جهت الیاف و عمود بر الیاف و چگالی با توجه به قاعده ترکیب³ در کامپوزیت‌ها [13] محاسبه و وارد نرم‌افزار شد. برای المان‌بندی قطعه از المان جامد سه بعدی استفاده شد که در نزدیکی ترک دارای بیشترین تراکم و به ابعاد $0.25 \times 0.25 \times 0.1 \text{mm}^3$ بود. شکل 8 کانتور جابجایی خارج از صفحه (w) را برای یکی از شبیه‌سازی‌های اجزای محدود انجام شده نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که نقاط نزدیک به ترک بیشترین مقدار جابجایی خارج از صفحه را داشته‌اند.

همان‌گونه که در تئوری برش‌نگاری بیان شد، روش برش‌نگاری قادر است گرادیان‌های جابجایی خارج از صفحه را اندازه‌گیری کند؛ بنابراین نیاز به محاسبه مشتق جابجایی خارج از صفحه نسبت به محور X می‌باشد. از آنجایی که اغلب نرم‌افزارهای تجاری اجزای محدود قادر به نمایش مشتقات جابجایی خارج از صفحه نسبت به محورهای مختصات نمی‌باشد، از برنامه‌نویسی در نرم‌افزار جانبی متلب برای رسیدن به این منظور استفاده شد. از این رو، پس از انجام شبیه‌سازی اجزای محدود، مختصات نقاط سطح قطعه استخراج و به وسیله برنامه جانبی نوشته شده در نرم‌افزار متلب، شیب ایجاد شده در سطح قطعه $(\frac{\partial w}{\partial x})$

به منظور انجام آزمون‌های تجربی، چیدمان برش‌نگاری مطابق شکل 5 آماده‌سازی شد. این چیدمان شامل منبع نور لیزر هلیوم-نئون با طول موج 632nm ، دوربین دیجیتالی CCD با کیفیت $3/2 \text{Mp}$ ، تداخل‌گر مایکلسون، سازوکار اعمال نیروی کششی به نمونه، سازوکار پردازش تصویر و نمایشگر می‌باشد. نمونه در بین فک‌های مجموعه اعمال نیرو مه‌ار شده و بار مورد نظر به آن اعمال شد. تصویر بازتابیده از سطح جسم توسط دوربین دیجیتالی CCD ثبت شده و به رایانه منتقل شد. با انجام پردازش تصویر که در بخش اصول برش‌نگاری اشاره شد، هاله‌های برش‌نگاری مربوط به هر آزمون بدست آمد. مشخصات آزمون‌های تجربی انجام شده در جدول 2 ارائه شده است. در شکل 6 الگوی هاله‌ای بدست آمده از آزمون تجربی نمونه با بارگذاری $F=294 \text{N}$ نشان داده شده است.

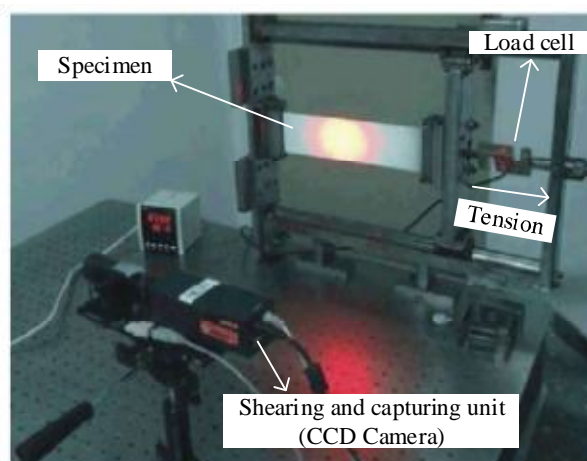


Fig. 5 Set up of digital shearography of specimen under tension load

شکل 5 چیدمان آزمون برش‌نگاری دیجیتالی یک نمونه تحت بارگذاری کششی

Fig. 6 Fringe pattern obtained in an experiment with load $F=294 \text{N}$

شکل 6 الگوی هاله‌ای بدست آمده از آزمون تجربی نمونه در بارگذاری $F=294 \text{N}$

¹ Abaqus

² Matlab

³ Rule of mixtures

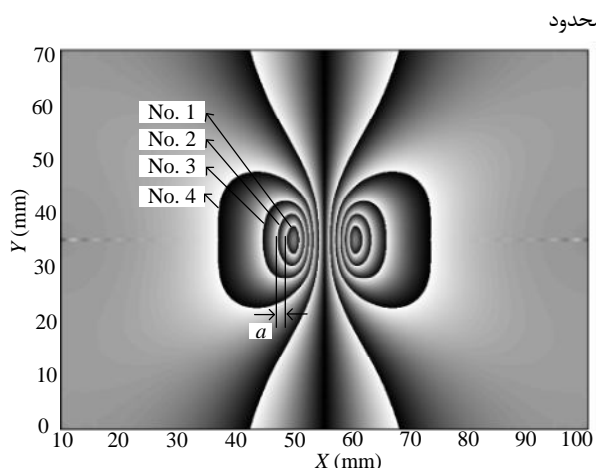


Fig. 9 Phase map for part with crack length of $l=12.9\text{mm}$, depth of $d=0.92\text{mm}$ and $F=441\text{N}$ force in simulation

شکل 9 نمایش الگوی فازی بدست آمده از شبیه‌سازی برای قطعه با ترک به طول $l=12.9\text{mm}$ عمق $d=0.92\text{mm}$ و نیروی آزمون $F=441\text{N}$

7- بحث و نتایج

تعداد و تراکم هاله‌های موجود در الگوی فازی، دو ویژگی تاثیرپذیر از هندسه ترک می‌باشند؛ از این رو، ارتباطی بین این دو ویژگی با هندسه ترک و نیروی آزمون برقرار شد تا بتوان هندسه ترک را با مشاهده الگوی فازی، تخمین زد. به همین منظور، جهت بررسی اثر طول ترک (l)، عمق ترک (d) و نیروی آزمون (F) بر تعداد و تراکم هاله‌ها و بدست آوردن ارتباط بین آن‌ها به صورت کمی، از طراحی آزمایش به روش ترکیب مرکزی¹ در نرم‌افزار دیزاین اکسپرت² استفاده شد. در طراحی آزمایش به روش ترکیب مرکزی، برای هر پارامتر پنج سطح در نظر گرفته، سپس تعدادی آزمایش جهت انجام معرفی می‌شوند. سطوح پارامترهای مورد بررسی در جدول 3 آورده شده است. تعداد آزمایش‌های مورد نیاز برای بررسی سه پارامتر، 15 آزمایش می‌باشد که پس از انجام آزمون‌ها، تعداد و تراکم هاله‌ها به عنوان خروجی هر آزمایش، استخراج شد (جدول 4).

در شکل 9 نمونه‌ای از الگوی فازی بدست آمده از شبیه‌سازی آورده شده است. این الگو دارای چهار هاله ($n=4$) می‌باشد که به ترتیب از شماره 1 تا 4 شماره‌گذاری شده است. فاصله بین درونی‌ترین هاله و هاله مابعد آن (برای شکل 9، فاصله بین هاله شماره 1 و 2) به عنوان معیاری از تراکم هاله‌ها در نظر گرفته شده و با پارامتر a نمایش داده می‌شود.

هرچه a کوچک‌تر باشد، نشان دهنده تراکم بالاتر هاله‌ها در نتایج آزمون است. آزمایش‌های انجام شده به همراه نتایج آن‌ها در جدول 4 آورده شده است.

محاسبه شد. با استفاده از معادله (4) و با معلوم بودن اندازه برش و طول موج نور لیزر مورد استفاده $\lambda=623\text{nm}$ ، توزیع تغییر فاز (Δ) در سطح قطعه بدست می‌آید؛ در نهایت با حذف مضارب صحیح 2π رادیان از توزیع Δ الگوی فازی بدست می‌آید. در شکل 9 نمونه‌ای از الگوی فازی بدست آمده از شبیه‌سازی قطعه‌ای با ترک به طول $l=12.9\text{mm}$ ، عمق $d=0.92\text{mm}$ و نیروی آزمون $F=441\text{N}$ نشان داده شده است.

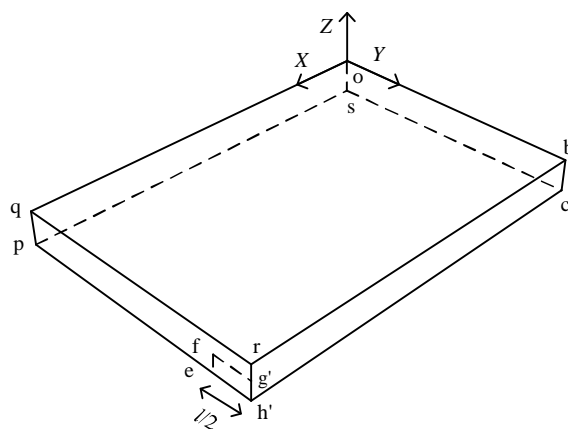


Fig. 7 Schematic view of finite element simulation model

شکل 7 نمایش شماتیک مدل شبیه‌سازی اجزای محدود

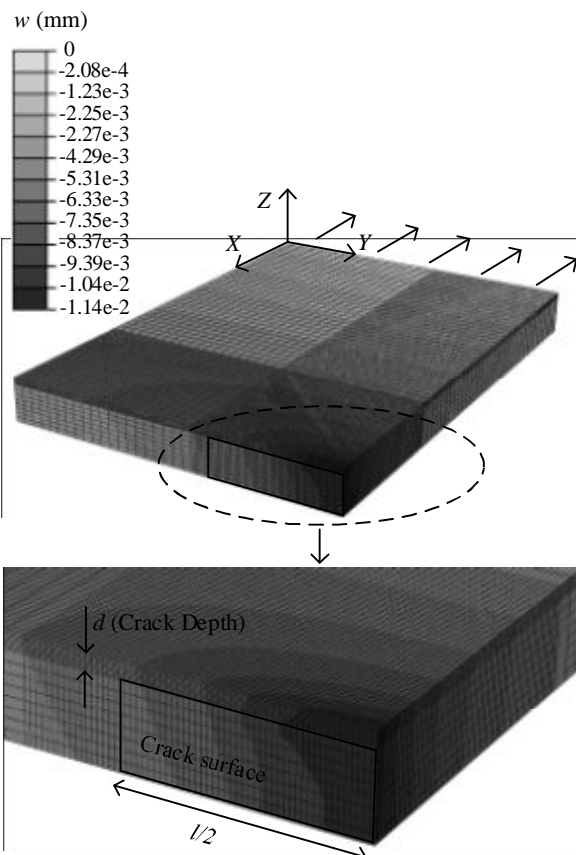


Fig. 8 Out of plane displacement contour in the finite element simulation

شکل 8 نمایش کانتور جابجایی خارج از صفحه (w) در شبیه‌سازی اجزای

¹ Central composite design

² Design expert

جابجایی سطحی نقاط بدست می‌آید؛ در حالی که در آزمون‌های تجربی، نتایج آزمون، الگوهای هاله‌ای هستند که نمونه‌ای از آن در شکل 6 نشان داده شده است و همان‌گونه که مشاهده می‌شود، حاوی نویز و اختلال می‌باشد. از این رو لازم است تا بر روی الگوی هاله‌ای یک مرحله پردازش اضافی جهت بدست آوردن الگوی فازی انجام گیرد. برای استخراج الگوی فازی، روش‌های متعددی وجود دارد که به صورت نرم‌افزاری و سخت‌افزاری قابل انجام است. در این پژوهش از روش پردازش با تبدیل فوریه دو بعدی¹ 2D FFT استفاده شده است. برای انجام این تبدیل لازم است تصاویر هاله‌ای چند مرحله تحت فیلترهای پایین‌گذر² و بالاگذر³ جهت حذف نویزها و اطلاعات زائد قرار گرفته، سپس تابع مذکور روی آن‌ها اعمال شود.

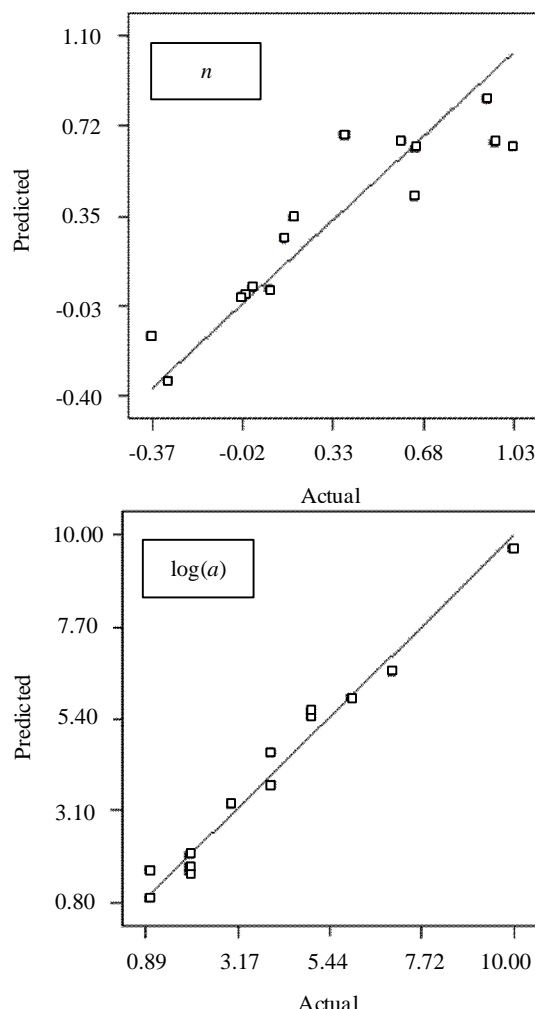


Fig. 10 Graph of the actual response values versus the predicted response values of fitted equations (6) and (7)

شکل 10 نمایش مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادلات برازش یافته (6) و (7) نسبت به مقدار واقعی

معادلات (6) و (7) حاصل از برازش اطلاعات بدست آمده می‌باشند. این معادلات، تعداد (n) و تراکم هاله‌های ایجاد شده (a) در برش‌نگاری را بر حسب طول ترک (l)، عمق ترک (d) و نیروی آزمون (F) بیان می‌کنند.

$$n = -1.75303 + 0.11181l + 2.90438 \times -3.94198 \times 10^{-3} \times F - 0.27196 \times l \times d + 1.41421 \times 10^{-3} \times l \times F - 2.33112 - 2.33112 \times 10^{-3} \times d \times F \quad (6)$$

$$\log(a) = 0.928 - 0.0648 \times l + 0.381 \times d - 9.081 \times 10^{-4} \times F \quad (7)$$

جدول 3 سطوح پارامترهای مورد بررسی در طراحی آزمایش

پارامتر	سطح 1	سطح 2	سطح 3	سطح 4	سطح 5
طول ترک، d (mm)	5	7/02	10	12/97	15
عمق ترک، d (mm)	0/4	0/92	1/7	2/47	3
نیروی آزمون، F (N)	300	441	650	858	1000

جدول 4 نتایج آزمون‌های انجام شده

شماره آزمایش	طول ترک l (mm)	عمق ترک d (mm)	نیروی آزمون F (N)	تعداد هاله‌ها n	تراکم هاله‌ها a (mm)
1	5	1/7	650	1	4
2	7/02	0/92	858	3	1/06
3	7/02	2/47	441	1	3
4	7/02	0/92	441	2	4/46
5	7/02	2/47	858	2	10/8
6	10	1/7	1000	6	1
7	10	1/7	650	4	1/53
8	10	1/7	300	2	9/13
9	10	3	650	2	8/5
10	10	0/4	650	5	0/43
11	12/97	0/92	441	4	1/23
12	12/97	0/92	858	10	0/5
13	12/97	2/47	441	2	4/5
14	12/97	2/47	858	5	1/4
15	15	1/7	650	7	0/97

در شکل 10، نمودار مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادلات (6) و (7) نسبت به مقادیر واقعی نمایش داده شده است. نزدیک بودن نقاط به خط مورب با زاویه 45 درجه، نشان دهنده صحت معادلات برازش یافته است [14].

7-1- صحت‌سنجی شبیه‌سازی انجام شده

برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌ها، نتایج سه نمونه از شبیه‌سازی‌ها با نتایج آزمون‌های تجربی متناظرشان مقایسه شد. قابل ذکر است که در شبیه‌سازی، الگوی فازی به طور مستقیم از

¹ Fast Fourier Transform

² Low pass

³ High pass

جدول 5 مقایسه تعداد هاله‌های بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها (n^{sim}) با آزمون‌های تجربی (n^{exp})

Table 5 Comparison between number of fringes resulted in simulation (n^{sim}) and experiments (n^{exp})

شماره آزمون	نیروی آزمون (N)	تعداد هاله‌های تجربی n^{exp}	تعداد هاله‌های شبیه‌سازی n^{sim}	خطا (%)
1	147	1	1	0
2	294	2	2	0
3	441	3	3	0

الگوی فازی بدست آمده از آزمون‌های تجربی و شبیه‌سازی‌های متناظر آن‌ها در شکل 11 نشان داده شده است. برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌های انجام شده، تعداد (n) و تراکم (a) هاله‌های بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها با آزمون‌های تجربی متناظرشان مقایسه شد. مقایسه تعداد و تراکم هاله‌های بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها و آزمون‌های تجربی در جدول‌های 5 و 6 آورده شده است که نشان دهنده مطابقت مناسب بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی است.

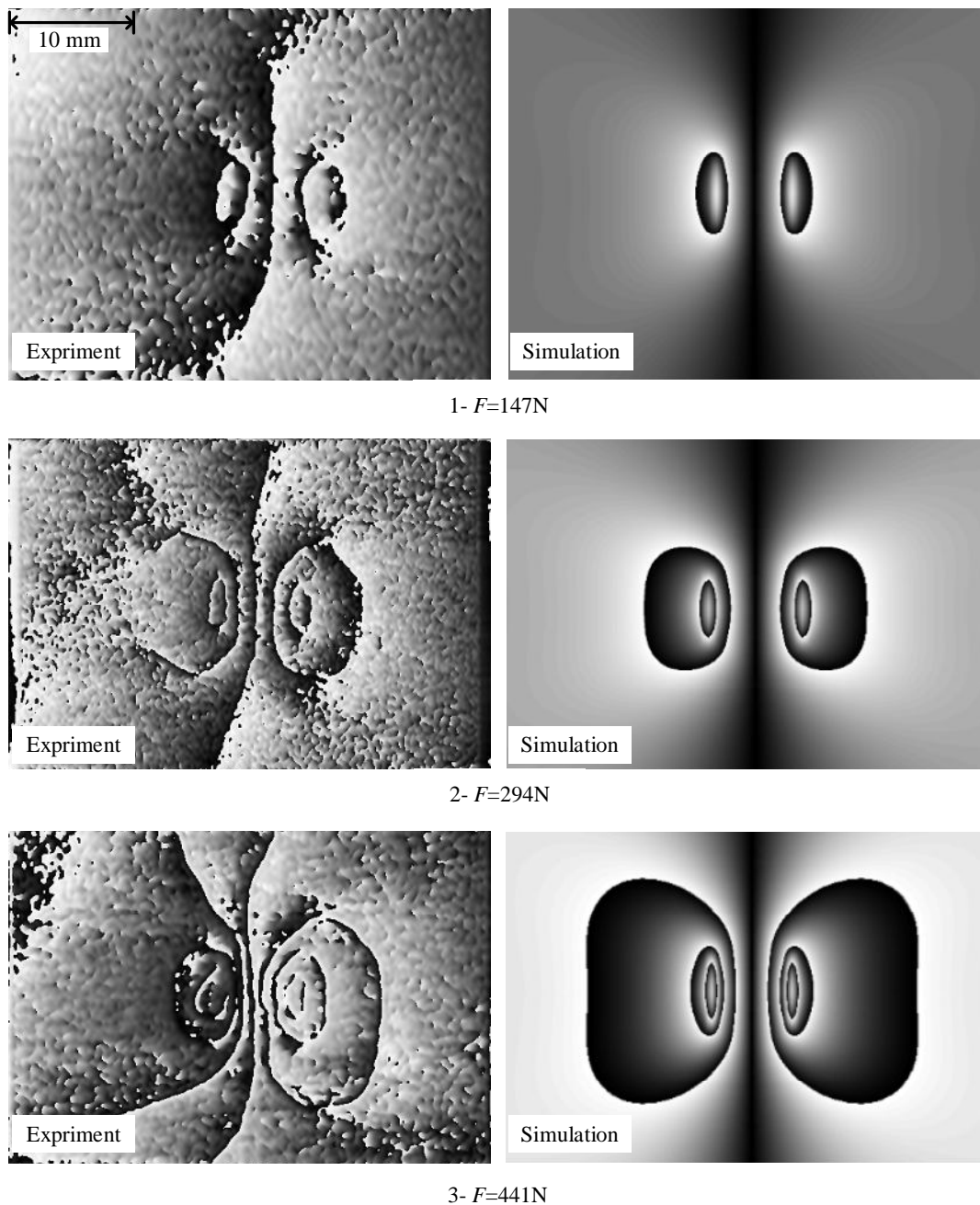


Fig. 11 Comparison between phase map extracted from simulation and experiments for specimens with crack depth of $d=0.5\text{mm}$ and crack length of $l=10\text{mm}$ in different loads

شکل 11 مقایسه نتایج الگوی فازی بدست آمده از شبیه‌سازی با نتایج تجربی برای نمونه با ترک به عمق $d=0.5\text{mm}$ و طول $l=10\text{mm}$ در بارگذاری‌های مختلف

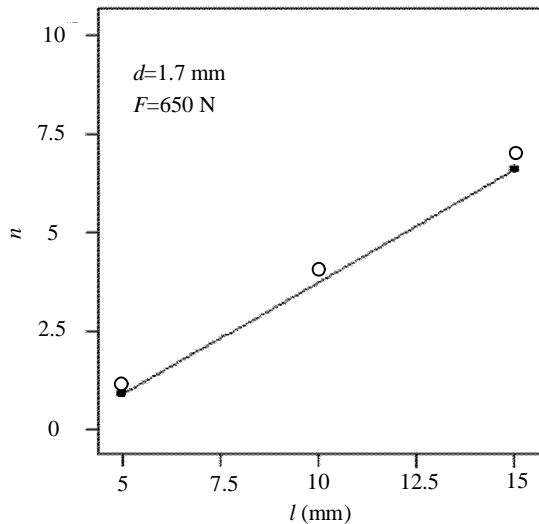


Fig. 12 Effect of Crack length(l) on the number of fringes(n)
 شکل 12 اثر طول ترک (l) بر تعداد هاله‌ها (n)

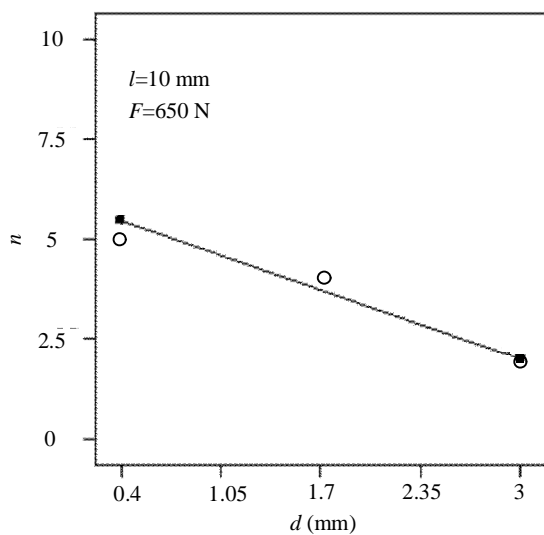


Fig. 13 Effect of Crack depth (d) on the number of fringes (n)
 شکل 13 اثر عمق ترک (d) بر تعداد هاله‌ها (n)

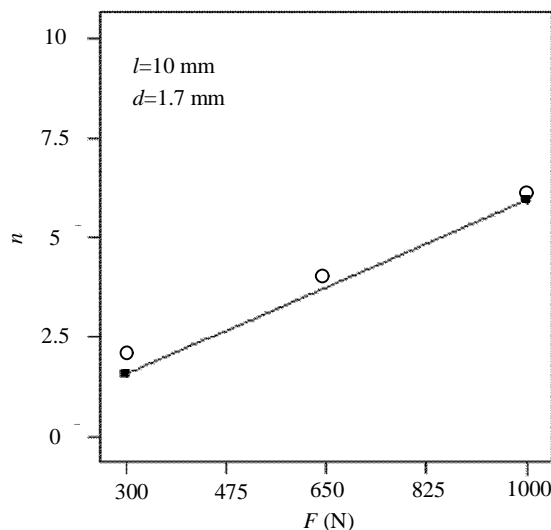


Fig. 14 Effect of test force (F) on the number of fringes (n)
 شکل 14 اثر نیروی آزمون (F) بر تعداد هاله‌ها (n)

به دلیل حساسیت آزمون‌های تجربی نسبت به ارتعاشات و عوامل محیطی، هاله‌های تشکیل شده به صورت کاملاً متقارن نبوده است. از این رو، تراکم هاله‌ها برای نیمه چپ و راست تصویر محاسبه و از میانگین آن‌ها برای مقایسه با شبیه‌سازی استفاده شد. مقایسه نتایج در جدول 6 بیانگر حداکثر خطای 21/4% است که نشان دهنده تطابق مناسب بین نتایج شبیه‌سازی و تجربی می‌باشد. در جدول 7 ابعاد پیش‌بینی شده ترک توسط معادلات (6) و (7) در مقایسه با مقدار واقعی آن آورده شده است. مقادیر خطا، بیانگر پیش‌بینی دقیق‌تر طول نسب به عمق ترک می‌باشد.

2-7- تفسیر اثر پارامترهای مورد بررسی بر تعداد (n) و تراکم هاله‌ها (a)

اثر طول ترک (l)، عمق ترک (d) و نیروی آزمون (F) بر تعداد (n) و تراکم هاله‌ها (a) در شکل‌های 12 تا 17 ارائه شده است. در این نمودارها، دایره‌های توخالی نشان دهنده نقاط بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها و خط رسم شده حاصل از برازش آن‌ها (معادلات (6) و (7)) است. علت تغییرات تعداد و تراکم هاله‌ها را بایستی در نحوه ایجاد هاله‌ها در آزمون برش‌نگاری جستجو کرد. در شکل 18، قطعه تحت بار، از صفحه‌ای که ترک در آن واقع شده است، برش خورده و به صورت دو نیمه مجزا رسم شده است.

جدول 6 مقایسه تراکم هاله‌های بدست آمده از شبیه‌سازی‌ها (a^{sim}) با آزمون‌های تجربی (a^{exp})

Table 6 Comparison between density of fringes resulted in simulation (a^{sim}) and experiments (a^{exp})

شماره آزمون	نیروی آزمون (N)	تراکم هاله‌های تجربی a^{exp}	تراکم هاله‌های شبیه‌سازی a^{sim}	خطا (%)
1	147	1/8	1/7	5/5
2	294	3/1	3/3	6/4
3	441	1/4	1/1	21/4

جدول 7 مقایسه ابعاد پیش‌بینی شده ترک توسط معادلات برازش یافته با مقدار واقعی آن

Table 7 Evaluation of predicted dimensions of cracks by calculated equations

شماره آزمون	نیروی آزمون (N)	طول پیش‌بینی شده (mm)	خطا (%)	عمق پیش‌بینی شده (mm)	خطا (%)
1	147	11/1	11	0/47	6
2	294	8/1	19	0/63	26
3	441	9/3	7	0/59	18

هنگامی که نیروی F بر دو طرف قطعه به صورت یکنواخت وارد می‌شود، برای به تعادل رسیدن نیرو در هر نیمه از قطعه، تنش عمودی σ^1 در سطح مقطع آن ایجاد می‌شود.

سطح ترک، محل جدایش دو نیمه از هم بوده و تنشی در سطح آن ایجاد نمی‌شود؛ بنابراین توزیع تنش σ در راستای ضخامت قطعه (در راستای محور Z)، نامتقارن می‌باشد. توزیع نامتقارن تنش موجب ایجاد گشتاور خمشی M_y در محل ترک و خم شدن (شکم دادن) قطعه در محل ترک، مطابق شکل 3-4 می‌شود. شکل 19 اندازه جابجایی خارج از صفحه و شیب ایجاد شده در قطعه به همراه هاله‌های تشکیل شده در برش‌نگاری را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

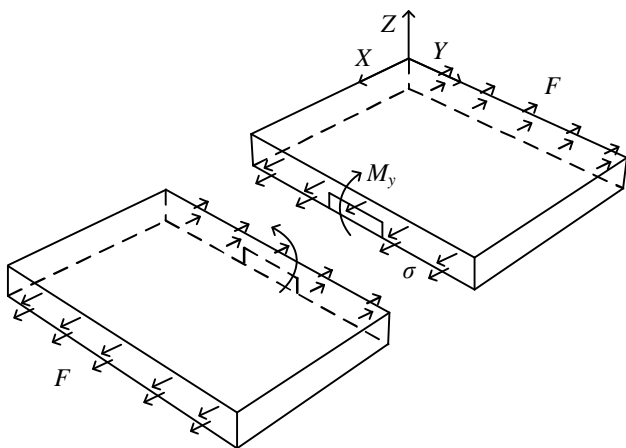


Fig. 18 Schematic illustration of bending moment in crack zone

شکل 18 نمایش شماتیک گشتاور خمشی ایجاد شده در محل ترک

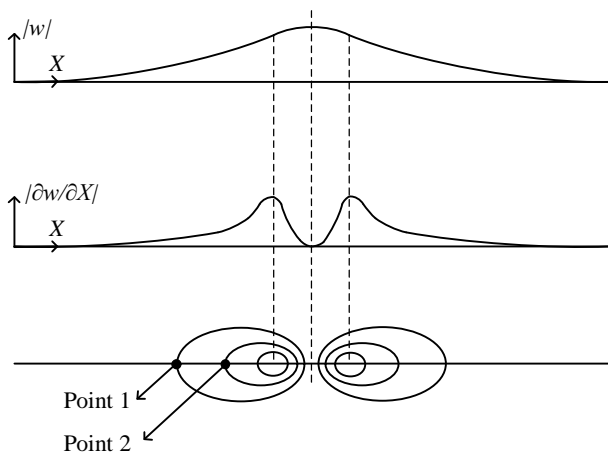


Fig. 19 Schematic illustration of out of plane displacement, slope and fringes in shearography

شکل 19 نمایش شماتیک جابجایی خارج از صفحه، شیب و هاله‌های تشکیل شده در برش‌نگاری

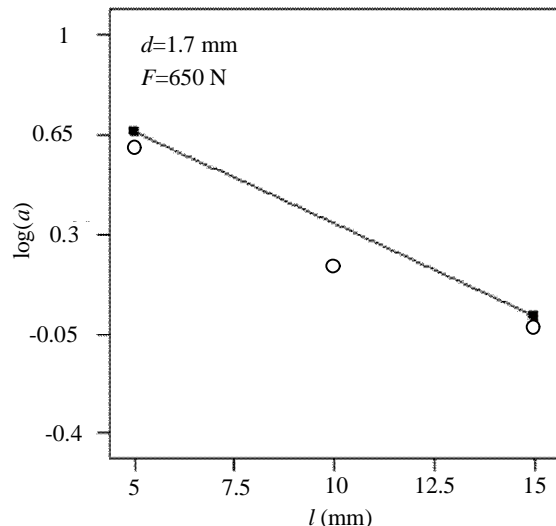


Fig. 15 Effect of crack length (l) on density of fringes (a)

شکل 15 اثر طول ترک (l) بر تراکم هاله‌ها (a)

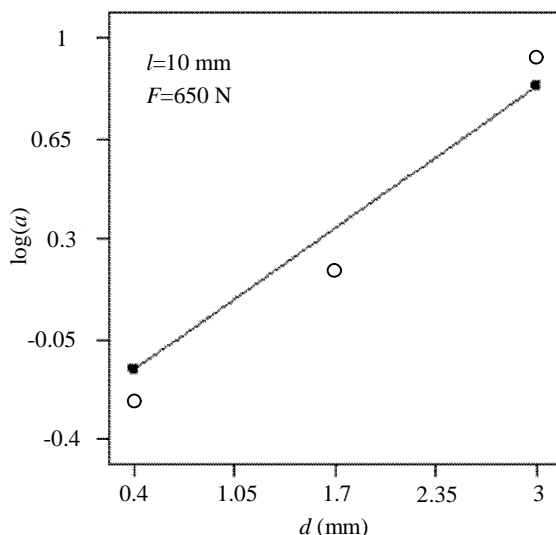


Fig. 16 Effect of crack depth (d) on density of fringes (a)

شکل 16 اثر عمق ترک (d) بر تراکم هاله‌ها (a)

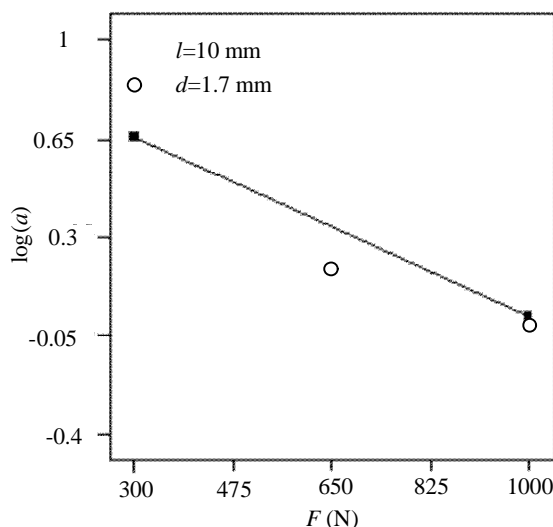


Fig. 17 Effect of test force (F) on density of fringes (a)

شکل 17 اثر نیروی آزمون (F) بر تراکم هاله‌ها (a)

¹ Normal stress

مجهولات دستگاه هستند، محاسبه می‌شوند. به دلیل دشواری استفاده از معادلات جبری ریاضی، می‌توان از نتیجه ترسیمی این معادلات بهره برد. برای نمایش نموداری نحوه پیدا کردن هندسه ترک از شکل 20 استفاده شده است. در این شکل، معادلات (6) و (7) به ازای نیروی آزمون $F=650\text{ N}$ به صورت کانتور دو بعدی رسم شده‌اند. با معلوم بودن تعداد و تراکم هاله‌ها و پیدا کردن نقطه تلاقی آن‌ها، طول و عمق ترک متناظر با آن نقطه بدست می‌آید. نمودار شکل 20 به ازای سایر مقادیر نیروی آزمون نیز قابل رسم و استفاده است. از این رو می‌توان پس از انجام هر آزمون تجربی، مقادیر a و n را از نتایج تجربی بدست آورده و با کمک منحنی راهنما، اندازه و عمق عیب را تخمین زد.

8- نتیجه‌گیری

در این پژوهش روش نوینی جهت تخمین طول و عمق ترک زیرسطحی در صفحات کامپوزیتی ارائه شد. به این منظور، ابتدا برش‌نگاری دیجیتالی صفحه کامپوزیتی دارای ترک توسط نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس و برنامه‌نویسی جانبی در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شد؛ سپس با استفاده از طراحی آزمایش و انجام شبیه‌سازی، رابطه‌ای بین تعداد و تراکم هاله‌های تشکیل شده در برش‌نگاری دیجیتالی با طول و عمق ترک و نیروی آزمون برقرار شد.

با توجه به معادله (4)، با افزایش شیب $(\frac{\partial w}{\partial x})$ مقدار تغییر فاز (Δ) افزایش می‌یابد؛ از طرفی با افزایش یا کاهش Δ به اندازه 2π رادیان، یک هاله جدید در الگوی فازی تشکیل می‌شود؛ به عنوان مثال با توجه به شکل 19، با حرکت از نقطه شماره 1 به نقطه شماره 2، Δ به اندازه 2π رادیان افزایش یافته و که نشان دهنده افزایش شیب سطح قطعه به اندازه $\frac{\lambda \times 2\pi}{4\pi \times \delta x}$ می‌باشد. بنابراین تعداد هاله‌های ایجاد شده در الگوی فازی، نشان دهنده حداکثر شیب ایجاد شده در قطعه است. از این رو، با کاهش عمق ترک، افزایش طول ترک و نیروی آزمون، جابجایی خارج از صفحه و شیب ایجاد شده در آن بیشتر شده و در نتیجه تعداد هاله‌های ایجاد شده در الگوی فازی افزایش می‌یابد. این امر در نمودارهای شکل‌های 12 تا 14 قابل مشاهده است. در اثر افزایش تعداد هاله‌ها، تراکم هاله‌ها بیشتر شده و در نتیجه فاصله بین آن‌ها (a) کاهش می‌یابد (شکل‌های 15 تا 17).

7-3- تخمین اندازه و عمق ترک به کمک ترسیم نمودار آزمون
معادلات (6) و (7) تعداد هاله‌ها (n) و تراکم هاله‌ها را بر حسب هندسه و نیروی آزمون بیان می‌کنند. پس از انجام آزمون برش‌نگاری برای یک قطعه، الگوی فازی متناظر با آن بدست می‌آید. با شمارش تعداد هاله‌ها (n) و اندازه‌گیری تراکم آن‌ها (a)، معادلات (6) و (7) به صورت دستگاه دو معادله و دو مجهول در می‌آید. با حل دستگاه، طول (l) و عمق ترک (d) که

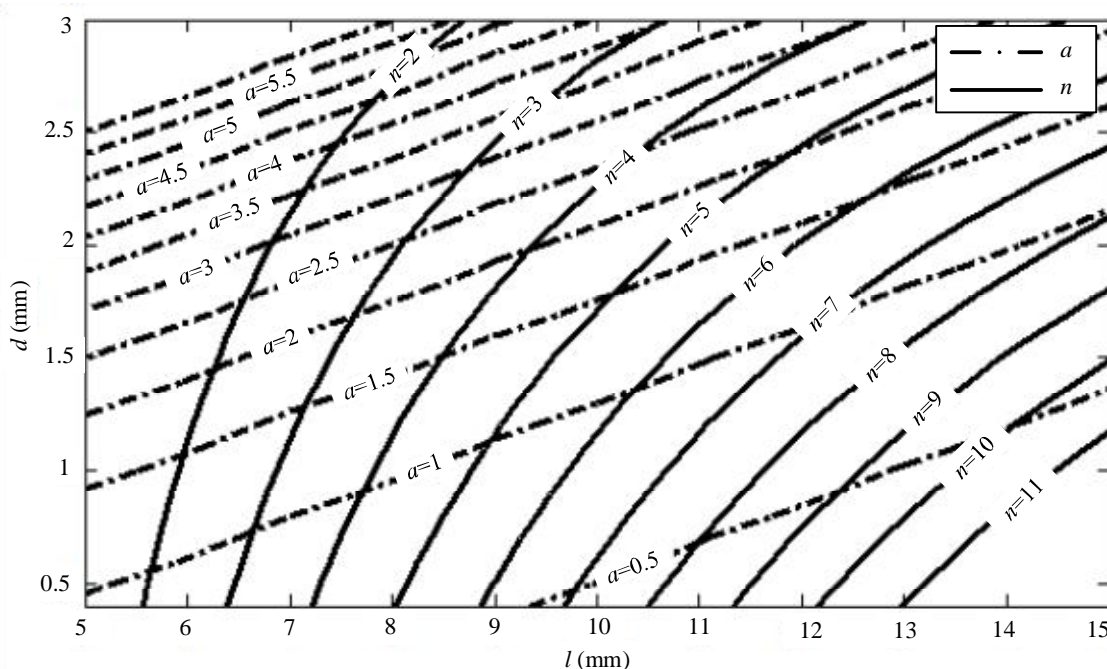


Fig. 20 Contour illustration of number (n) and density (a) of fringes in terms of crack length (l) and depth (d) for test force $F=650\text{ N}$

شکل 20 نمودار کانتوری تعداد (n) و تراکم هاله‌ها (a) بر اساس طول (l) و عمق ترک (d) به ازای نیروی آزمون $F=650\text{ N}$

- [5] S. Toh, F. Chau, V. Shim, C. Tay, H. Shang, Application of shearography in nondestructive testing of composite plates, *Journal of materials processing technology*, Vol. 23, No. 3, pp. 267-275, 1990.
- [6] K.-S. Kim, K.-S. Kang, Y.-J. Kang, S.-K. Cheong, Analysis of an internal crack of pressure pipeline using ESPI and shearography, *Optics & Laser Technology*, Vol. 35, No. 8, pp. 639-643, 2003.
- [7] Z. Liu, J. Gao, H. Xie, P. Wallace, NDT capability of digital shearography for different materials, *Optics and Lasers in Engineering*, Vol. 49, No. 12, pp. 1462-1469, 2011.
- [8] G. De Angelis, M. Meo, D. P. Almond, S. G. Pickering, S. L. Angioni, A new technique to detect defect size and depth in composite structures using digital shearography and unconstrained optimization, *NDT & E International*, Vol. 45, No. 1, pp. 91-96, 2012.
- [9] D. Akbari, N. Soltani, F. Reshadi, Application of digital shearography for non destructive testing of materials with thermal loading, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, pp. 36-45, 2013. (in Persian فارسی)
- [10] L. Krzemień, M. Łukomski, A. Kijowska, B. Mierzejewska, Combining digital speckle pattern interferometry with shearography in a new instrument to characterize surface delamination in museum artefacts, *Journal of Cultural Heritage*, Vol. 16, No. 4, pp. 544-550, 2015.
- [11] W. Steinchen, L. Yang, G. Kupfer, P. Mäckel, Non-destructive testing of aerospace composite materials using digital shearography, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering*, Vol. 212, No. 1, pp. 21-30, 1998.
- [12] Y. Hung, H. Ho, Shearography: An optical measurement technique and applications, *Materials science and engineering: R: Reports*, Vol. 49, No. 3, pp. 61-87, 2005.
- [13] A. K. Kaw, *Mechanics of composite materials*: CRC press, 2005.
- [14] Design Expert 7.00 software, Help section.
- با استفاده از رابطه ارائه شده می‌توان با اندازه‌گیری تعداد و تراکم هاله‌ها و با معلوم بودن نیروی آزمون، طول و عمق ترک را تخمین زد. برای صحت‌سنجی شبیه‌سازی‌های انجام شده، چیدمان برش‌نگاری دیجیتال راه‌اندازی و آزمون‌های تجربی انجام شد. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با آزمون‌های تجربی، صحت شبیه‌سازی‌های انجام شده را تأیید کرد.

9- مراجع

- [1] 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*, Vol. 227, No. 3, pp. 430-442, 2013.
- [2] H. Lopes, F. Ferreira, J. V. Araújo dos Santos, P. Moreno-García, Localization of damage with speckle shearography and higher order spatial derivatives, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 49, No. 1-2, pp. 24-38, 2014.
- [3] 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*, Vol. 64, No. 5, pp. 73-112, 2009.
- [4] D. Akbari, N. Soltani, Investigation of Loading Parameters in Detection of Internal Cracks of Composite Material with Digital Shearography, *World Applied Sciences Journal*, Vol. 21, No. 4, pp. 526-535, 2013.