

اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات پلیمری به کمک روش انطباق تصاویر دیجیتالی

فرید آزادی

کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، f.azadi@modares.ac.ir

داود اکبری*

استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران، daakbari@modares.ac.ir

چکیده

در این مقاله، برای بررسی و اندازه‌گیری تنش پسماند و تأثیرات آن بر میزان کرنش در قطعات پلیمری، از ترکیب روش انطباق تصاویر دیجیتال و روش سوراخکاری استفاده شده است. با اعمال خمش روی قطعات و اعمال جابجایی ثابت، تنش خمشی ایجاد شده و با استفاده از تجهیز ساخته شده، اندازه‌گیری شده است. در این راستا قطعات پلیمری از جنس پلکسی گلس با ضخامت‌های مختلف، تحت خمش سه نقطه‌ای با اندازه‌های مختلف مورد آزمون قرار گرفته و در نهایت نتایج بدست آمده از روش معرفی شده در این مقاله، با نتایج تحلیل نظری و شبیه‌سازی اجزای محدود، مقایسه و صحت‌سنجی شده است. مواد پلیمری مورد آزمایش به دلیل ضرایب کشسانی پایین، دارای کرنش آزاد شده‌ی بسیار بیشتری نسبت به نمونه‌های فلزی هستند و بررسی کرنش‌های آزاد شده در آن‌ها نیازمند کرنش‌سنج‌های با گستره بسیار بالاتری می‌باشد. بررسی نتایج نشان می‌دهد که ترکیب روش انطباق تصاویر دیجیتالی و سوراخکاری، قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند با دقت بالا (در حدود اختلاف کمتر از ۱۰٪) را دارا می‌باشد. روش به کار گرفته شده در این مقاله با برطرف کردن محدودیت‌های روش مرسوم استفاده از کرنش‌سنج، کرنش‌ها را در محدوده‌ی بسیار گسترده‌تری اندازه‌گیری می‌کند و جایگزین مناسبی برای روش کرنش‌سنجی سوراخ در اندازه‌گیری تنش پسماند نمونه‌های پلیمری خواهد بود. **واژه‌های کلیدی:** تنش پسماند، انطباق تصاویر دیجیتالی، کرنش‌سنجی سوراخ، خمکاری، قطعات پلیمری، شبیه‌سازی اجزای محدود.

Measurement of Residual Stress in Polymers by Digital Image Correlation Method

F. Azadi

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

D. Akbari

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

Abstract

In this paper, the combination of digital image correlation and hole drilling methods has been used to investigate and measure the residual stress of polymer components. The bending stress was created by a three-point bending system and measured by the provided equipment. These stresses are considered in theory to be equivalent to the residual stresses within the component. Digital image correlation method utilized as a novel method to measuring released strain. In this regard, Plexiglas polymer materials in various thicknesses were analyzed under the different values of 3-point bending test. Finally, the obtained results from the introduced method in this paper, with the results of Finite element analysis and simulation have been compared and validated. Unlike the samples that have an unknown amount of residual stresses, the residual stresses in these specimens have a certain amount that can be compared and verified with the simulation and analytical results. Polymer materials have a higher released strain range than metals and it is possible to investigate the strain released by digital image correlation. The results show that the combination of digital image correlation and hole drilling techniques as innovations presented in this paper are capable of measuring residual stresses with a high accuracy less than 10% and also because of their major advantages. The method of using strain gauge would be a suitable alternative to the hole drilling whit strain gauge method for measuring residual stress in polymer samples.

Keywords: Residual Stress, Digital Image Correlation, Hole Drilling, Bending, Polymer material, Finite element modeling.

۱- مقدمه

تنش‌های پسماند یکی از عوامل اصلی شکست و تخریب مجموعه‌ها و قطعات در صنعت می‌باشند به ویژه زمانی که سازه تحت بارهای متناوب و یا محیط‌های خورنده قرار داشته باشد. این تنش‌ها در اکثر فرایندهای ساخت قطعات ایجاد می‌گردند. امروزه با توجه به اهمیت بررسی و تعیین مقدار تنش پسماند، روش‌های مختلفی برای اندازه‌گیری آن به وجود آمده و توسعه یافته است. اندازه‌گیری تنش پسماند به سه صورت کلی مخرب^۱، نیمه مخرب^۲ و غیر مخرب^۳ انجام

می‌شود. در بین روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند، روش کرنش سنجی سوراخ در محدوده‌ی گسترده‌ای از مواد مهندسی متداول است. این روش که برای اولین بار در سال ۱۹۳۴ توسط ماتار^۴ معرفی شد [۱]، بعد از چسباندن سه عدد کرنش سنج روی سطح قطعه و سوراخکاری در مرکز این کرنش‌سنج‌ها، کرنش‌های آزاد شده به وسیله کرنش سنج‌ها ثبت شده و با استفاده از روابط الاستیک خطی، تنش-های پسماند موجود در قطعه محاسبه می‌گردد. زمان‌بر بودن فرایند آماده‌سازی اولیه، چسباندن کرنش سنج‌ها، قیمت بالا و یک بار مصرف بودن کرنش سنج‌ها و در نتیجه هزینه‌ی بالای آزمون از محدودیت‌های

³ Non-Destructive

⁴ Mathar

¹ Destructive

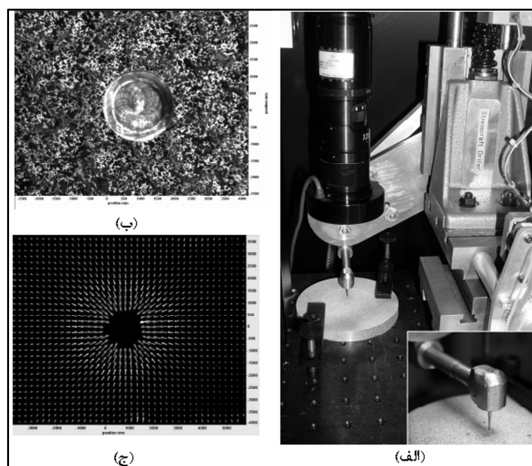
² Semi Destructive

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: daakbari@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۰۰/۰۶/۳۱

تاریخ پذیرش: ۰۰/۱۱/۰۸

عمده این روش است. توسعه‌ی روش‌های تصویربرداری موجب شده که انطباق تصاویر دیجیتالی^۱ بتوانند در بسیاری از موارد به طور موثر، جایگزین استفاده از کرنش‌سنج‌ها گردد. نلسون و همکاران در سال ۲۰۰۶ با استفاده از روش انطباق تصاویر دیجیتال سه‌بعدی و روش سوراخکاری به بررسی تنش پسماند در قطعات پرداختند [۲]. در سال ۲۰۰۸ لورد و همکاران به بررسی کاربرد روش انطباق تصاویر دیجیتالی دوبعدی برای اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از سوراخکاری مرکزی تدریجی و انطباق تصاویر (شکل ۱) پرداختند [۳]. آن‌ها یک نمونه‌ی آلومینیومی ساده را مورد آزمایش قرار داده و تنش‌های آزاد شده در سطح نمونه را اندازه‌گیری کردند. چانگ و همکاران در سال ۲۰۰۹ با هدف اندازه‌گیری تنش پسماند، روش سوراخکاری را با روش پردازش تصویر ترکیب کردند [۴].



شکل ۱- نمایی از (الف) مجموعه‌ی آماده شده برای عملیات سوراخکاری (ب) تصویر بعد از سوراخکاری (ج) نقشه‌برداری اطراف سوراخ [۳]

یوکسل و همکاران در سال ۲۰۱۹ در نمونه‌ی کامپوزیت پلیمری شیشه‌ای/پلی استر تقویت شده با فیبر یک‌طرفه به کمک روش سوراخکاری و انطباق تصویر دیجیتال به اندازه‌گیری تنش‌های پسماند پرداختند [۶]. قاسمی و همکاران، روشی را معرفی کردند که در آن با به کارگیری روش انطباق، تنش‌های پسماند را با استفاده از آزمون کشش و به صورت غیرمخرب اندازه‌گیری کردند [۷]. در ادامه، آزادی و همکاران به بررسی کاربردهای روش انطباق تصاویر دیجیتال در ارزیابی تنش پسماند به کمک ترکیب آن با روش‌های متداول پرداختند [۸].

در پژوهش انجام گرفته توسط باران و همکاران در سال ۲۰۱۵ به دلیل دشواری تعیین اندازه‌ی دقیق تنش‌های پسماند واقعی موجود در قطعات، اندازه‌گیری صرفاً بر روی نمونه‌هایی با مقادیر تنش داخلی نامعلوم و صرفاً جهت اثبات کارایی روش، ارائه شده است [۵]. عمده بررسی‌ها بر روی نمونه‌های فلزی انجام شده است که کاربرد روش استاندارد کرنش‌سنجی سوراخ در آن‌ها، سال‌ها پیش اثبات شده است.

کرنش‌های بسیار کوچک نمونه‌های فلزی باعث شده که کرنش‌سنج‌های مقاومتی پاسخگو باشد. لکن در مواد پلیمری، سطح کرنش‌های آزاد شده بسیار بزرگتر بوده و اساساً کاربرد روش انطباق را در آن‌ها توجیه پذیرتر می‌کند. لذا در این مقاله به بررسی تنش‌ها در نمونه‌های پلیمری با روش انطباق تصاویر دیجیتال پرداخته شده است.

لازم است نتایج روش انطباق تصاویر دیجیتال از طریق مقایسه با نتایج اندازه‌گیری‌های مستقل اعتبارسنجی شود. برای اعتبار سنجی این روش می‌توان بررسی‌هایی روی نمونه‌هایی با خواص شناخته شده و یا تحت شرایط بارگذاری کاملاً مشخص انجام داد [۹-۱۱]. در راستای ارزیابی کاربرد روش مزبور در اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در مواد پلیمری در ابتدا نظریه روش‌های سوراخکاری مرکزی و انطباق تصاویر دیجیتالی مورد بررسی قرار گرفته است. پس از آن مراحل آماده‌سازی نمونه‌ها و روش انجام آزمون برای اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات پلیمری از جنس پلکسی‌گلس تحت خمش سه‌نقطه‌ای بیان شده است که در نهایت نتایج بدست آمده از این روش با نتایج نظری (مقاومت مصالح) و شبیه‌سازی اجزای محدود، مقایسه و صحت‌سنجی گردیده است. در این پژوهش بر خلاف آزمون‌هایی که بر روی نمونه‌ی دارای تنش پسماند طبیعی در فلزات که با روش نصب کرنش‌سنج انجام شده است، تنش پسماند به وجود آمده دارای مقدار مشخصی می‌باشد. مواد پلیمری مورد آزمون به دلیل ضرایب کشسانی پایین، دارای کرنش آزاد شده‌ی بسیار بیشتری نسبت به نمونه‌های فلزی هستند و بررسی کرنش‌های آزاد شده در آن‌ها نیازمند کرنش‌سنج‌های با گستره بسیار بالاتری است. روش به کار گرفته شده در این پژوهش با برطرف کردن محدودیت ذکر شده، کرنش‌ها را در گستره بسیار گسترده‌تر اندازه‌گیری می‌کند.

۲- اندازه‌گیری تنش پسماند به کمک استاندارد ASTM E837-13a

روش سوراخکاری یکی از روش‌های مرسوم بررسی تنش پسماند یکنواخت^۲ و غیر یکنواخت^۳ در قطعات مختلف است. این روش به عنوان روشی نیمه‌مخرب شناخته می‌شود که در آن قطعه‌ی مورد بررسی تخریب نمی‌شود. توسعه و کاربرد روش سوراخکاری موجب شده که استاندارد ASTM E837 برای نخستین بار در سال ۱۹۸۱ تعریف و ارائه شود [۵]. استاندارد ASTM E837-13a یکی از مهم‌ترین مراجع ارائه شده برای ارزیابی تنش پسماند می‌باشد و در آن الزامات اندازه‌گیری تنش ارائه شده است. روش ارائه شده در این استاندارد شامل چسباندن روزت^۴ کرنش‌سنج است. در شکل ۲ نمونه‌ای از تجهیزات استاندارد مورد استفاده در روش سوراخکاری نمایش داده شده است. روش کار به این صورت است که بعد از نصب روزت کرنش‌سنج در قسمت مورد نظر، سوراخی در مرکز کرنش‌سنج‌ها ایجاد می‌گردد. در نتیجه، کرنش‌هایی ناشی از تنش پسماند در قطعه آزاد می‌شود که به وسیله‌ی کرنش‌سنج‌ها مطابق شکل ۳ در سه راستای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه

² Uniform

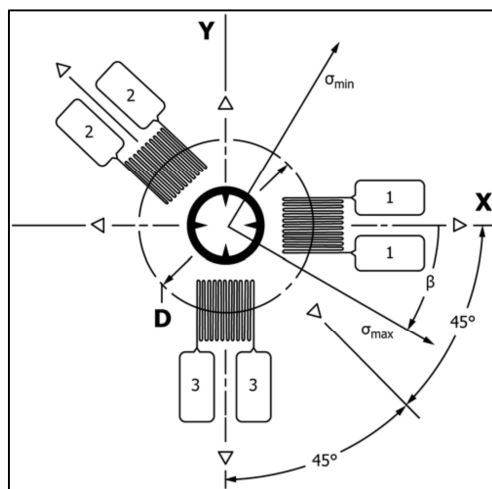
³ Non-uniform

⁴ Rosette

¹ Digital Image Correlation (DIC)

پسماند در قطعات کامپوزیتی پرداختند [۱۸].

میزان کرنش آزاد شده برای یک ماده ایزوتروپیک الاستیک خطی در راستای کرنش سنج و تنش‌های اصلی و زاویه‌ی اصلی از طریق رابطه (۱) بدست می‌آید [۵].



شکل ۳- طرح‌واره کلی کرنش‌سنج آزمون سوراخکاری [۵]

$$\varepsilon_r \sigma = A (\sigma_{max} + \sigma_{min}) + B (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \cos 2\alpha \quad (1)$$

با توجه به نکات ارائه شده در این پژوهش، ضرایب کالیبراسیون (A و B)، وابسته به پارامترهایی نظیر هندسه‌ی کرنش‌سنج، خاصیت الاستیک ماده، قطر و عمق سوراخ می‌باشد.

مقادیر این ضرایب از جداول استاندارد سوراخکاری ASTM E837-13a انتخاب می‌شود. رابطه‌ی شماره (۲) ارتباط بین اجزای تنش و مقادیر کرنش آزاد و اندازه‌گیری شده توسط کرنش‌سنج‌ها را نشان می‌دهد که به کمک رابطه‌ی ماتریسی قابل محاسبه خواهد بود [۵].

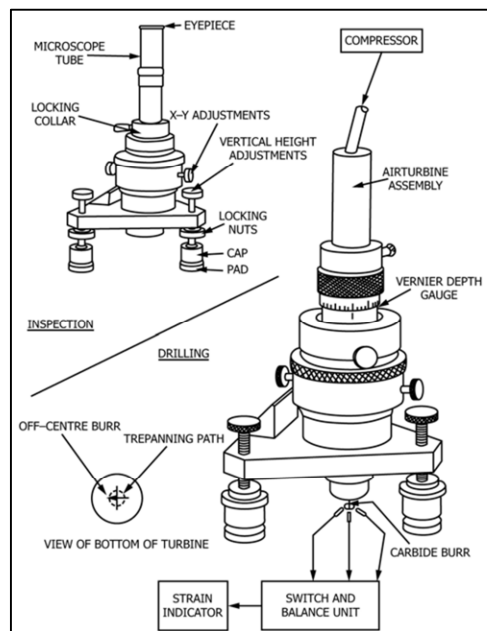
$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \tau_{13} \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A+B & 0 & A-B \\ A & -2B & A \\ A-B & 0 & A+B \end{bmatrix} \quad (2)$$

در نهایت با انجام محاسبات مربوطه، حداکثر و حداقل تنش‌ها بدست می‌آید.

۳- روش انطباق تصاویر دیجیتال

امروزه استفاده از روش‌های با دقت بالا برای ارزیابی تنش بسیار حائز اهمیت می‌باشند. به همین علت روش‌های نوری که قابلیت اندازه‌گیری جابجایی‌ها و کرنش‌ها را با دقت بالا دارا می‌باشند، مورد توجه پژوهشگران و صنعتگران قرار گرفته است. روش‌های نوری دارای سرعت بسیار بالا، دقت بالا، هزینه پایین و عدم وابستگی به ریزساختار و کیفیت سطوح می‌باشند. در بین انواع روش‌های نوری، روش انطباق تصاویر دیجیتالی به علت هزینه پایین، سرعت بالا و عدم نیاز به مواردی نظیر تحلیل فازها، هاله‌ها و امواج، نسبت به روش‌های نوری دیگر دارای برتری می‌باشد. این روش برای اولین بار در سال ۱۹۸۲ در دانشگاه کارولینای جنوبی توسط پروفسور سائن برای به دست آوردن میدان جابجایی معرفی شد [۱۹]. ایده‌ی اصلی این روش به این صورت می‌باشد که چگونه بین نقاط قبل و بعد از تغییر شکل در ماده‌ی مورد

ثبت شده و به کمک روابط ارائه شده در استاندارد سوراخکاری ASTM E837-13a این کرنش‌ها به تنش‌های پسماند تبدیل می‌شوند [۵]. شکل ۳ چیدمان نوع A کرنش‌سنج مورد استفاده در آزمون سوراخکاری را نمایش می‌دهد.



شکل ۲- تجهیزات مورد استفاده در روش سوراخکاری [۵]

روش کرنش سنجی سوراخ از مهم‌ترین و شناخته شده‌ترین روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند بوده و بر روی قطعات مختلف پلیمری، فلزی و انواع مواد مرکب مورد بررسی قرار گرفته است. قاسمی و همکاران در پژوهش‌های متعددی از روش کرنش سنجی سوراخ برای محاسبه تنش‌های پسماند غیریکنواخت محبوس شده در لایه‌های کامپوزیتی مختلف استفاده کردند [۱۲]. همچنین این روش توسط اکبری و همکاران برای بررسی تنش پسماند در نمونه‌های کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفته است [۱۳].

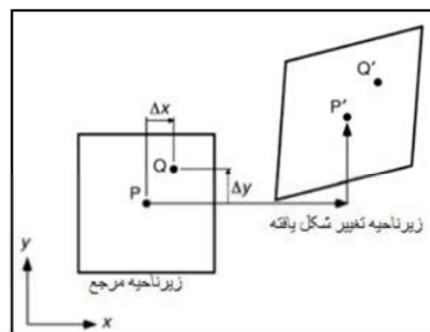
شکریه و همکاران به توسعه نظریه روش کرنش‌سنجی سوراخ برای بدست آوردن ماتریس ضرایب کالیبراسیون پرداختند [۱۴]. در ادامه روش انتگرال برای محاسبه تنش‌های پسماند نایکنواخت در چند لایه‌ی کامپوزیتی با چیدمان‌های متفاوت توسط قاسمی و همکاران مورد استفاده قرار گرفته است [۱۵]. همچنین شکریه و همکاران در مقالات متعددی به بررسی روش جدید محاسبه ضرایب کالیبراسیون برای اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در مواد مختلف پرداخته‌اند. در این روش، فرآیند سوراخکاری با استفاده از روش اجزای محدود، شبیه سازی شده و پس از اعمال بار اولیه به صورت تنش‌های پسماند، کرنش‌های آزاد شده اطراف ناحیه سوراخ زیر کرنش سنج محاسبه و ماتریس ضرایب کالیبراسیون بدست می‌آید. با استفاده از سوراخ‌کاری، شبیه سازی شده و با محاسبات کرنش‌های باقیمانده در اطراف ناحیه سوراخ و ماتریس ضرایب کالیبراسیون، تنش‌های پسماند محاسبه می‌شوند [۱۶-۱۷]. در ادامه، قاسمی و همکاران به کمک شبیه سازی سوراخکاری و محاسبه ماتریس ضرایب کالیبراسیون به بررسی تنش

بررسی، ارتباط برقرار شود. روش انطباق تصاویر دیجیتالی این کار را با به کارگیری بخش‌های فرعی از عکس مرجع^۱ که به نام زیر مجموعه^۲ شناخته می‌شوند، انجام می‌دهد و موقعیت نسبی آن‌ها را تعیین می‌کند. برای هر زیرمجموعه، اطلاعات جابجایی و کرنش در حین انتقال محاسبه می‌شود تا با موقعیت زیرمجموعه‌ها در شرایط فعلی مطابقت داده شود. نتیجه‌ی نهایی یک شبکه (شامل اطلاعات جابجایی و کرنش) با توجه به اطلاعات مرجع می‌باشد. در روش انطباق تصاویر دیجیتالی، شدت نور هر عکس با یک تابع چند جمله‌ای پیوسته تخمین زده می‌شود. برای بررسی میزان انطباق هر جفت زیرناحیه، ضریب انطباق C به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود.

$$C(R) = \frac{\sum_{i=-m}^{i=m} \sum_{j=-m}^{j=m} (G_r(X_p, Y_p) - G_d(X'_p, Y'_p))^2}{\sum_{i=-m}^{i=m} \sum_{j=-m}^{j=m} (G_r(X_p, Y_p))^2} \quad (3)$$

ضرایب و پارامترهای رابطه‌ی فوق در شکل شماره ۴ نشان داده شده است. G_r توابع پیوسته‌ی درونیایی شدت نور در تصاویر قبل از بارگذاری و G_d میزان توابع پیوسته‌ی درونیایی شدت نور در تصاویر بعد از اعمال بار می‌باشد و در رابطه‌ی انطباق، مقدار شدت نور در هر نقطه از زیرناحیه عکس مرجع با نقطه متناظر آن در زیرناحیه متناظر در عکس بعد از بارگذاری مقایسه شده و اختلاف آن‌ها به دست می‌آید. وقتی ضریب انطباق صفر شود در حقیقت تابع خطا در کل زیرناحیه صفر شده و این نشان دهنده‌ی تطابق کامل است. طرحواره نحوه‌ی بررسی جابجایی و پارامترهای موجود در رابطه‌ی ضریب انطباق در شکل شماره ۴ قابل مشاهده است.

در الگوریتم روش انطباق، روند جستجو برای محاسبه‌ی جابجایی‌ها و گرادیان‌های جابجایی مجهول با گام‌های بلند شروع می‌شود. در این روند در ابتدا گرادیان جابجایی‌ها صفر در نظر گرفته می‌شوند و الگوریتم با گام‌های ۱ پیکسل در ناحیه مورد نظر جستجو کرده و پیکسلی که ضریب انطباق را به حداقل برساند به عنوان جواب اولیه در نظر گرفته می‌شود. جابجایی‌ها و گرادیان آن‌ها با دقت کسری از پیکسل با استفاده از روش نیوتن-رافسون به دست می‌آید. نتایج این مرحله به عنوان مقادیر اولیه در الگوریتم نیوتن-رافسون برای زیرناحیه بعدی استفاده می‌شود [۲۰].



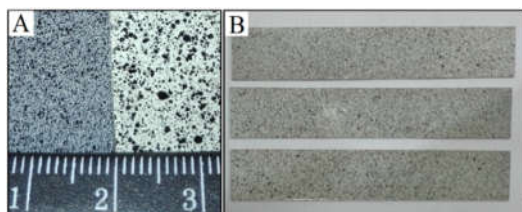
شکل ۴- زیرناحیه‌های مرجع و تغییرشکل یافته [۱۰]

در نهایت، کرنش‌ها با انجام محاسبات در راستاهای اصلی (در راستای x، y و z) بدست می‌آیند. با استفاده از روش انطباق تصاویر می‌توان میدان کرنش ایجاد شده در اثر یک بارگذاری مشخص را در سطح قطعه به طور تجربی و بدون استفاده از کرنش‌سنج اندازه‌گیری نمود.

۴- آزمون تجربی

برای انجام آزمون و بررسی تنش پسماند، ابتدا قطعاتی از جنس پلکسی‌گلس با ابعاد $100 \times 20 \times 6$ و $100 \times 20 \times 3$ میلی‌متر تهیه گردید. برای هر حالت از آزمون، سه نمونه آماده و مورد بررسی قرار گرفته است و نتایج ارائه شده به صورت میانگینی از مقادیر بدست آمده است. برای انجام آزمون انطباق، باید روی سطح نمونه قبل از تصویر برداری الگوی لکه‌ای سیاه و سفید ایجاد گردد. در شکل ۵ نمونه‌هایی از الگو-های لکه‌ای ایجاد شده در آزمون آورده شده است. در این روش، الگوی لکه‌ای تصادفی سیاه و سفید به دلیل ایجاد یک تصویر محلی غیر تکراری در هر زیر دامنه، بهترین نوع الگودهی می‌باشد. در صورت وجود الگوی طبیعی روی قطعات، نیاز به ایجاد الگوی مصنوعی روی آن‌ها وجود ندارد. در این آزمون به دلیل شفافیت نمونه‌ها و عدم وجود الگوی طبیعی روی آن‌ها، الگوی لکه‌ای روی سطح نمونه ایجاد گردید. اندازه‌ی الگوها بسته به سطح مورد بررسی و دقت مورد نیاز بایستی انتخاب گردد. در نمونه‌های مورد نظر در این پژوهش از آنجا که هدف، اندازه‌گیری کرنش‌های آزاد شده در منطقه بسیار محدودی از اطراف سوراخ‌ها است از الگودهی بسیار ریز استفاده شده است. برای ایجاد الگوی لکه‌ای بر روی نمونه‌ها از اسپری رنگ سفید و سیاه غیر براق استفاده شده و پاشش رنگ به صورت دستی انجام گردید. تعیین اندازه و تراکم مناسب الگوی لکه‌ای سیاه و سفید براساس آزمون کالیبراسیون اولیه قابل تخمین می‌باشد.

کیفیت الگوی لکه‌ای از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این امر تا حدودی بر نتایج انطباق تصاویر دیجیتال تأثیر می‌گذارد [۲۱]. الگوی لکه‌ای با کیفیت پایین منجر به عدم همبستگی در برخی از گره‌های مش شبکه‌ی مجازی می‌شود. همچنین تأثیر مشخصی بر دقت در محاسبه‌ی تابع همبستگی دارد. استفاده از الگوی لکه‌ای مناسب می‌تواند مستقیماً روی نتایج تأثیر بگذارد [۲۲].



شکل ۵- دو نمونه الگوی لکه‌ای سیاه و سفید با تراکم و اندازه متفاوت (A) تصویری از نمونه‌های مورد آزمون (B)

بعد از ایجاد الگوی لکه‌ای مورد نظر روی سطح قطعات، یک عکس قبل از عملیات سوراخکاری روی قطعه به عنوان عکس مرجع گرفته

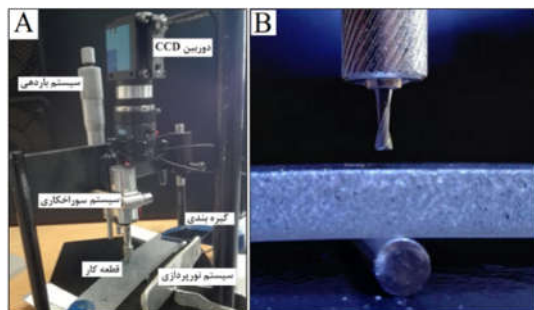
¹ Reference Image

² Subset

مرحله، تصاویر از سطح قطعه و الگوی لکه‌ای گرفته شد. دوربین و کلیه‌ی تجهیزات مورد نظر به صورت یکپارچه روی یک چیدمان سوار شدند تا نیاز به صرف زمان برای نصب و تنظیم آن‌ها در هر آزمون کمتر شود، خطاهای ناشی از چیدمان‌های مختلف بر روی نتایج به کمترین میزان ممکن برسد و همچنین کل چیدمان به صورت قابل حمل و متمرکز در یک مجموعه قرار بگیرد. در این حالت با توجه به مزایای بیان شده، مناسبانه لرزش ناشی از عملیات سوراخکاری بر نتایج تاثیر خواهد گذاشت، ولی با توجه به جنس نرم نمونه‌ی مورد بررسی و قابلیت براده‌برداری خوب آن، میزان لرزش به مقداری نبود که بر روی نتایج تاثیر بگذارد.

در عمل، سوراخ ایجاد شده باعث آزاد شدن تنش‌های پسماند به وجود آمده در اثر خمش در قطعه می‌گردد. در شکل ۷ سوراخ ایجاد شده در سطح نمونه، راستاهای مشخص شده و همچنین المان‌های سطح قابل مشاهده است. بعد از عملیات سوراخکاری تصاویر دیجیتالی ذخیره شده از سطح قطعه مورد آزمون در نرم افزار پردازش تصویر، فراخوانی شده و قسمت مورد نظر برای عملیات پردازش تصویر از تصاویر گرفته شده جدا می‌شود. در این پژوهش جهت تصویربرداری از نرم‌افزار IC Capture 2.4 استفاده شد. برای انجام عملیات پردازش تصاویر می‌توان از نرم افزارهای پردازش تصویر موجود در بازار و همچنین کدهای پردازش تصویر در محیط نرم افزارهای پایهای استفاده نمود. در این پژوهش از نرم افزار پردازش تصویر GOM Correlate 2018 از مجموعه آرامیس استفاده شده است. تصویر اول قبل از بارگذاری به عنوان عکس مرجع گرفته شده و بعد از بارگذاری، تصاویر بعدی گرفته می‌شود. با تحلیل این تصاویر در الگوریتم انطباق، میدان جابجایی و کرنش‌های آزاد شده به دست می‌آید. نمونه میدان جابجایی محاسبه شده و ابعاد سوراخ و الگوهای سطحی برای سه مرحله از سوراخکاری در شکل ۷ نشان داده شده است.

ابعاد دایره‌ی داخلی مطابق استاندارد سوراخکاری برابر کمترین فاصله ممکن از وسط کرنش سنج‌ها تا مرکز سوراخ می‌باشد و دایره بیرونی برابر بزرگترین بعد کرنش سنج‌ها بعلاوه‌ی فاصله آن‌ها تا مرکز سوراخ می‌باشد.



شکل ۶- تجهیز سوراخ‌کاری و روش انطباق تصاویر دیجیتال (A) و نحوه گیره‌بندی و اعمال خمش سه نقطه‌ای (B)

یکی از مزایای استفاده از روش تصویربرداری بجای کرنش‌سنج‌های روزت این است که می‌توان این فاصله‌ها را به تناسب اندازه‌ی کرنش‌سنج‌ها و یا موقعیت مورد نظر بزرگتر یا کوچکتر در نظر گرفت. سپس در نرم افزار پردازش تصویر، عملیات تحلیل نتایج و پردازش

شده و سپس بعد از هر مرحله سوراخکاری از سطح قطعه، تصویربرداری می‌شود. با توجه به استفاده از دوربین^۱ CCD جهت تصویر برداری از سطح نمونه‌ها و حساسیت بالای این دوربین‌ها نسبت به تغییرات شدت نور، کلیه مراحل آزمون در محیط تاریک و فقط با نور سفید تعبیه شده روی تجهیز انجام گردید. تصاویر به صورت سیاه و سفید و در ابعاد ۱۶۰۰×۱۲۰۰ پیکسل ثبت گردیدند. در این پژوهش از دوربین CCD مدل MK23U274 با رزولوشن ۲ مگاپیکسل با سرعت تصویر برداری ۱/۱۰۰۰۰ ثانیه استفاده شده است.

با تحلیل این تصاویر در الگوریتم انطباق، می‌توان میدان جابجایی و در نهایت کرنش را به دست آورد. در روش انطباق تصاویر دوبعدی^۲ که با استفاده از یک دوربین CCD انجام می‌گیرد، بایستی محور دوربین بر سطح قطعه‌ی کار کاملاً عمود باشد که در این صورت جابجایی لکه‌های سیاه و سفید با جابجایی سطح نمونه یکسان خواهد بود.

تعادل محور دوربین بر سطح قطعه‌ی کار به کمک کنترل تراز بودن سطح پشتی دوربین و سطح اصلی قطعه‌ی کار انجام گردید که با توجه به چیدمان مورد استفاده منجر به عمود بودن محور دوربین بر سطح قطعه کار می‌گردد.

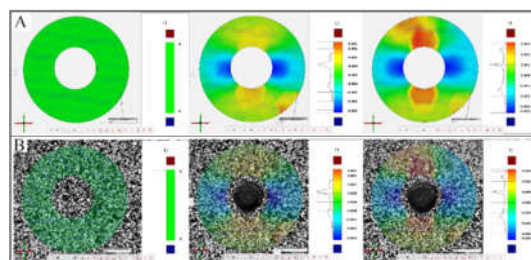
برای ایجاد تنش مشخص در قطعات، آن‌ها را تحت خمشی سه نقطه‌ای با اندازه‌ی جابجایی ثابت قرار داده و سپس عملیات سوراخکاری بر روی آن‌ها انجام گردید. در ابتدا آزمون‌های اولیه جهت کالیبره کردن نرم افزار پردازش تصویر، سیستم تصویر برداری، تعیین شدت نور مناسب، تعیین اندازه و تراکم مناسب الگوی لکه‌ای سیاه و سفید و اطمینان از عمود بودن محور دریل بر سطح قطعه کار انجام گرفت. این آزمون‌ها بیشتر کیفی بوده و بستگی به تجربه‌ی کاربر دارند. همچنین در نرم‌افزار پردازش تصویر به کمک نقاط مرجع و تعریف فواصلی به عنوان فاصله‌ی مرجع، می‌توان دقت اندازه‌گیری جابجایی‌ها و کرنش‌ها را کالیبره نمود. قطعات اصلی مورد آزمایش خمکاری شده در قسمت پایه‌ی تجهیز ساخته شده به صورت کاملاً صلب بسته شده و تصویر مرجع گرفته شد. همانطور که توسط تحقیقات پیشین نشان داده شده است، خطاهای مربوط به تغییر منبع نور از اهمیت بالایی برخوردارند [۲۱]. نور باید پایدار و یکنواخت باشد تا نویز را کاهش دهد و تصاویر آزمایشی خام را با کیفیت بهتر ثبت کند. نویز و خطاهای منبع نور می‌تواند کاهش یابد، اما حتی با سخت افزار با عملکرد بالا (به عنوان مثال لنزها، دوربین‌ها و غیره) کاملاً برطرف نمی‌شود [۲۳].

عملیات سوراخکاری برای آزادسازی تنش پسماند در قطعات با توجه به شرایط و الزامات ارائه شده در جدول ۲ استاندارد ASTM E837-13a انجام گردید. برای سوراخکاری از ابزار فرز کاربیدی با سرعت دورانی ۱۰۲۰۰ دور در دقیقه استفاده شد. قطر سوراخ به وجود آمده ۲ میلی متر و با توجه به ضخامت نمونه‌ها مطابق استاندارد در عمق‌های مشخص در ۱۰ مرحله‌ی سوراخکاری انجام گردید [۱۹]. کرنش معادل از کرنش‌های آزاد شده در این ۱۰ مرحله، جهت انجام محاسبات و بدست آوردن تنش‌ها از قسمت همگرای نتایج انتخاب می‌گردد. عملیات سوراخکاری و تصویربرداری به کمک تجهیز ساخته شده که در شکل شماره ۶ نشان داده شده است، انجام گردید و در هر

^۱ Charge-Coupled Device

^۲ 2D

تصاویر انجام می‌گردد.

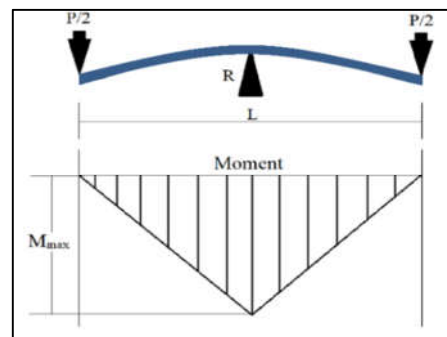


شکل ۷- تصویر المان بندی شده (A) سطح نمونه سوراخکاری شده (B) در روش انطباق تصاویر دیجیتال

در نهایت کانتور رنگی مربوط به کرنش‌های سطحی قطعه در راستاهای X و Y را می‌توان به صورت گرافیکی بدست آورد. در محیط نرم افزار پردازش تصویر برای محاسبه و ثبت مقادیر کرنش‌های آزاد شده در هر مرحله در هر کدام از راستاهای مشخص شده، کرنش‌های آزاد شده به صورت جداگانه بدست می‌آید و مقدار میانگین کرنش‌ها در هر راستا در محدوده‌ی متناسب با محل نصب کرنش‌سنج‌ها در آزمون کرنش‌سنجی سوراخ به عنوان کرنش آزاد شده در نظر گرفته می‌شود. خروجی اندازه‌گیری، مقادیر مربوط به کرنش‌ها در راستاهای تعیین شده که همان راستاهای کرنش‌سنج‌ها در استاندارد سوراخکاری مطابق شکل ۳ می‌باشد را شامل می‌شود. برای بدست آوردن مقادیر تنش پسماند معادل، کرنش‌های بدست آمده توسط کدهای نرم افزاری MATLAB در روابط استخراج شده از استاندارد سوراخکاری جایگذاری شده و تنش پسماند محاسبه می‌شود.

۵- نتایج و صحت سنجی

تنش خمشی به وجود آمده در قطعات، ارتباط مستقیم با مقدار خمش، هندسه و جنس قطعات دارد که مقدار مدول الاستیسیته برای این جنس معادل ۳۱۰۰ مگاپاسکال ارائه شده است. در حالت خمش سه نقطه‌ای، بیشینه تنش در قسمت وسط تیر اعمال می‌شود که با مقدار گشتاور اعمالی به قطعه کار رابطه مستقیم دارد. در شکل ۸ به صورت شماتیک خمش و گشتاور معادل آن آورده شده است.



شکل ۸- تصویر طرح‌واژه از خمش سه نقطه‌ای و تنش معادل آن

به دلیل تقارن هندسی قطعات، نوع بارگذاری به صورت تیر ساده با بار متمرکز در وسط در نظر گرفته می‌شود که در آن می‌توان تنش

خمشی اعمالی به قطعات را از طریق رابطه شماره (۴) محاسبه نمود.

$$\sigma_{bend} = \frac{Mc}{I} \quad (4)$$

که در آن M ممان خمشی، c فاصله تا تار خنثی و I ممان اینرسی مقطع است. مقدار ممان خمشی اعمال شده در وسط تیر از طریق رابطه شماره (۵) بدست می‌آید.

$$M = \frac{PL}{4} \quad (5)$$

نیروی که باعث به وجود آمدن این گشتاور در قطعات است را از طریق مقدار جابجایی تیر می‌توان بدست آورد که در رابطه شماره (۶) آورده شده است.

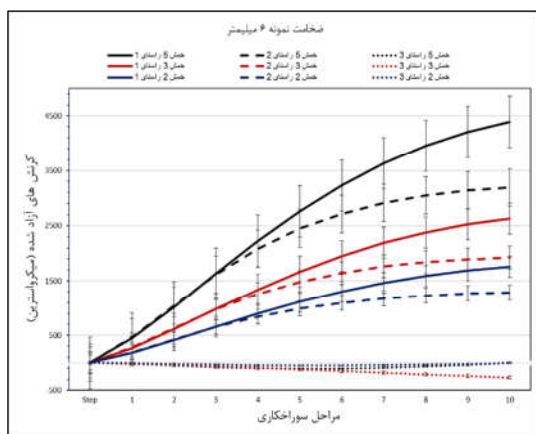
$$\Delta_{max} = \frac{PL^3}{48EI} \quad (6)$$

مقادیر c و I و L با توجه به هندسه و ابعاد نمونه‌ها انتخاب شده‌اند. جهت بررسی دقیق‌تر و بدست آوردن نتایج تحلیلی با دقت بیشتر در ابتدا طرح هندسی قطعات مورد آزمون در نرم‌افزار طراحی شده و به نرم افزار المان محدود ANSYS منتقل گردید [۲۴]. در ابتدا جنس نمونه مورد آزمون انتخاب شده و با وارد کردن اطلاعات مورد نیاز نظیر ضریب پواسون، خواص کششی و مدول الاستیسیته (ارائه شده در جدول ۱ آورده شده است) و در نظر گرفتن مدل رفتاری الاستیک خطی برای ماده، ادامه فرایند شبیه سازی انجام گرفت. خواص نمونه‌ها از مقادیر ارائه شده در برگه، مشخصه‌ی مواد برگرفته شده است و نمونه‌ها به دلیل خواص مکانیکی‌شان به صورت ایزوتروپ در نظر گرفته شده‌اند.

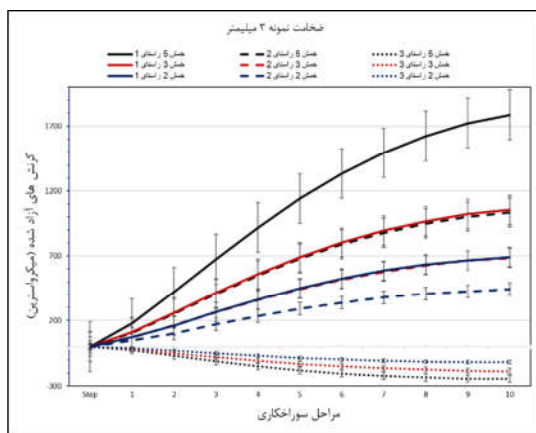
جدول ۱- خواص مکانیکی ماده مورد شبیه سازی

شماره	خواص	مقدار	واحد
۱	مدول الاستیسیته	۳۱۰۰	MPa
۲	بیشترین استحکام کششی	۷۲	MPa
۳	استحکام تسلیم	۴۸	MPa
۴	ضریب پواسون	۰/۳۵	-
۵	چگالی	۱/۱۹	g/cm ³

بعد از المان بندی سطح، کیفیت المان‌های سطحی بدست آمده از نظر معیار نرخ تطابق المان‌ها کنترل شد که به دلیل شکل هندسی ساده‌ی نمونه، بیشتر از ۹۸ درصد تطابق وجود داشت. سپس اقدام به اعمال شرایط مرزی نظیر نیروی تکیه‌گاه و نیروهای اعمالی گیره‌بندی در دو سر انتهایی نمونه گردید که معادل جابجایی ۵، ۳ و ۲ میلی‌متر برای نمونه در حالت خمش سه نقطه‌ای می‌باشد (شکل ۹). عملیات سوراخکاری بعد از اعمال خمش روی قطعات به کمک دستور تولد و مرگ در نرم افزار ANSYS Workbench انجام گرفت و میزان کرنش‌ها و تنش‌های ناشی از خمش در جسم بعد از ایجاد سوراخ مورد بررسی قرار گرفت.



شکل ۱۱- مقادیر کرنش‌های آزاد شده در نمونه با ضخامت ۶ میلی متر



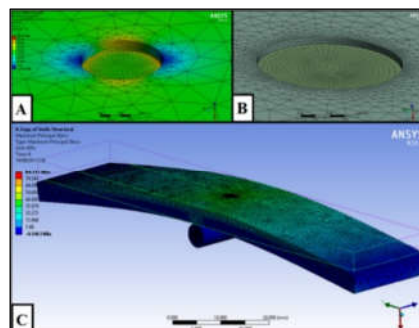
شکل ۱۲- مقادیر کرنش‌های آزاد شده در نمونه با ضخامت ۳ میلی متر

مقادیر خمش قطعات بدست آمده از نرم‌افزار شبیه‌سازی اجزای محدود ANSYS و نتایج تحلیلی که به کمک روابط مقاومت مصالح بررسی و مقایسه گردیدند، مطابقت کامل با یکدیگر داشتند. مقایسه‌ی نتایج آزمون تجربی، شبیه‌سازی اجزای محدود و تحلیلی در جدول شماره ۲ به صورت مقایسه‌ای ارائه شده است.

جدول ۲- تنش‌های بدست آمده از روش تجربی و تحلیلی

اختلاف (%)	تجربی (MPa)	تحلیلی (MPa)	اجزای محدود	خمش (mm)	ابعاد نمونه (mm)
-	-	۵۵,۸	۵۵,۸	۵	۱۰۰×۲۰×۶
۵,۶	۳۱,۵	۳۳,۴۸	۳۳,۴۸	۳	
۵,۴	۲۱,۵	۲۲,۳۲	۲۲,۳۲	۲	
۷,۲	۲۵,۸	۲۷,۹	۲۷,۹	۵	۱۰۰×۲۰×۳
۹,۹	۱۸,۴	۱۶,۷۴	۱۶,۷۴	۳	
۸,۴	۱۰,۲	۱۱,۱۶	۱۱,۱۶	۲	

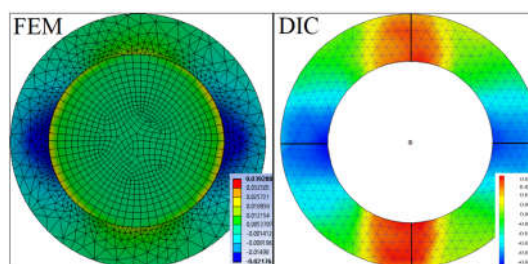
در حالت خمش ۵ میلی‌متر اعمالی به قطعات با ضخامت ۶ میلی- متر با توجه به عبور مقدار تنش خمشی از استحکام تسلیم و ترد بودن



شکل ۹- تنش‌های آزاد شده در اثر حذف المان‌ها (A)، سطح المان‌بندی شده نمونه (B)، شبیه‌سازی خمش تیر در نرم افزار المان محدود (C)

حداکثر مقدار تنش خمشی به وجود آمده در قطعات در دو حالت با ضخامت‌های مختلف ۳ میلی‌متر و ۶ میلی‌متر و هرکدام از آن‌ها تحت سه خمش متفاوت به میزان ۲ میلی‌متر، ۳ میلی‌متر و ۵ میلی‌متر قرار گرفتند. هر کدام از آزمون‌ها سه مرتبه تکرار شده و نتایج به صورت میانگینی از مقادیر آورده شده است. در نمودار شماره ۱ و ۲ مقادیر کرنش‌های آزاد شده هر کدام از مراحل روی نمونه‌های مختلف با یکدیگر مقایسه گردیده است.

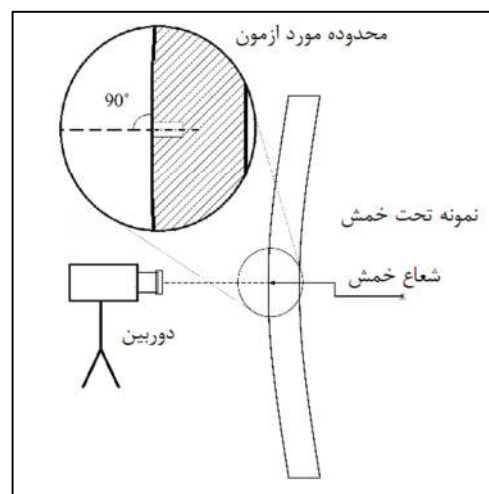
در شکل ۷ راستاهای ۱ الی ۳ بر طبق راستاهای مشخص در استاندارد ASTM E837 13-a به ترتیب در زاویه‌های ۴۵,۰ و ۹۰ درجه مشخص گردیده است. کرنش‌های بدست آمده طبق مطالب ارائه شده در روابط مربوطه در استاندارد سوراخکاری جایگذاری شده و مقادیر تنش‌های آزاد شده در این نمونه‌ها محاسبه گردید [۵]. در شکل ۱۰ مقایسه‌ای گرافیکی بین کرنش‌های اندازه‌گیری شده به کمک روش انطباق تصاویر دیجیتال و شبیه‌سازی المان محدود آورده شده است.



شکل ۱۰- کرنش‌های اندازه‌گیری شده به کمک روش انطباق تصاویر دیجیتال (DIC) و شبیه‌سازی المان محدود (FEM)

مقادیر کرنش‌های آزاد شده در نمونه‌ها که به کمک روش انطباق تصاویر دیجیتال و سوراخکاری بدست آمده است در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ آورده شده است.

نمونه ها، شکست در قطعات رخ داد و امکان تصویربرداری از آن ها قبل از شکست قطعات وجود نداشت. به همین دلیل نتایجی برای این حالت ارائه نشده است. نتایج بدست آمده از آزمون عملی با نتایج شبیه سازی و محاسبات مقاومت مصالحی بین ۵ الی ۹٫۹ درصد اختلاف داشته اند. در حالت انطباق تصاویر دو بعدی (2D-DIC)، فرض بر این است که نمونه‌ی تحت آزمون به صورت مسطح و عمود بر محور دوربین باقی می‌ماند. حساسیت نسبت به تراز کردن قطعه‌ی آزمایشی با محور نوری سیستم تصویربرداری در حالت دو بعدی بالا است. با توجه به محدوده‌ی مورد بررسی در حالت سوراخکاری و قرار گیری محور دوربین در وسط نمونه‌ی مورد آزمایش، می‌توان سطح محدود مورد تست را عمود بر محور دوربین در نظر گرفت (شکل ۱۳). با این حال خطای حاصل از عدم عمود بودن قسمت‌های دورتر از مرکز سوراخ در نتایج تاثیر خواهند گذاشت.



شکل ۱۳- طرحواره‌ای از محدوده‌ی انجام تست و تاثیر خمش بر تعامد تصاویر

از عواملی که منجر به خطا در داده‌های بدست آمده می‌شوند می‌توان به تغییرات شدت نور در تصاویر اشاره کرد که در راستای رفع این عامل، تمامی مراحل آزمون در محیطی تاریک و با نور سفید تعبیه شده در سیستم انجام گرفت. اندازه و تراکم الگوی لکه‌ای، عامل تاثیرگذار دیگر در نتایج است و با توجه به اندازه‌ی تصویر، باید به صورت بهینه ایجاد گردد. به دلیل اینکه ایجاد الگوی لکه‌ای به صورت دستی بوده، کنترل اندازه و تراکم آن‌ها به صورت تجربی بوده و بستگی به مهارت و تجربه فرد دارد. ارتعاشات و جابجایی‌های صلب یکی از عوامل مهم تاثیرگذار بر نتایج است که با توجه به محل انجام آزمون و ایجاد یک چیدمان منسجم و صلب (شکل ۶) این خطاها به حداقل رسانیده شده است.

نتایج به دست آمده اگرچه بصورت ساده مقایسه شده است، لکن نشانگر اختلاف کم و دقت قابل قبول روش انتخابی در اندازه‌گیری تنش‌های آزاد شده در فرآیند سوراخکاری ماده‌ی مزبور می‌باشد. این واقعیت نشان می‌دهد که از روش ترکیبی معرفی شده در این مقاله می‌توان به صورت موثری در اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات پلیمری بهره برد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، جهت بررسی و اندازه‌گیری تنش پسماند و تاثیرات آن بر میزان کرنش‌های سطحی روی قطعات پلیمری از ترکیب روش انطباق تصاویر دیجیتال و روش سوراخکاری استفاده شده است. تنش خمشی اعمال شده در اثر خمش سه نقطه‌ای، معادل تنش پسماند در نظر گرفته شده است. در این راستا قطعات پلیمری از جنس پلیکسی‌گلس تحت خمش سه نقطه‌ای مورد آزمایش قرار گرفته و در نهایت نتایج بدست آمده از این روش با نتایج تئوری و شبیه سازی المان محدود مقایسه و صحت سنجی گردید. در این راستا با ایجاد خم با جابجایی مرکزی ۲، ۳ و ۵ میلیمتری در نمونه‌ها، کرنش‌های داخلی ایجاد شده و با آزادسازی محلی این کرنش‌ها به کمک سیستم سوراخکاری ست‌آپ شده در این پژوهش، طبق شرایط ارائه شده در استاندارد سوراخکاری در ۱۰ مرحله اندازه‌گیری شد. نتایج حاصل از اندازه‌گیری تجربی کرنش‌ها در محدوده‌ی ۵۰۰- تا ۴۵۰۰ میکرون بوده است که تنش‌های محاسبه شده را در محدوده‌ی ۱۰ تا ۳۱٫۵ مگاپاسکال نشان می‌دهد. جهت مقایسه‌ی نتایج از مدلسازی عددی و حل تحلیلی استفاده شده است. مقایسه نشان می‌دهد که نتایج نهایی، کمتر از ۱۰٪ با نتایج شبیه‌سازی و محاسبات تحلیلی اختلاف دارند. با بررسی نتایج بدست آمده، مشخص شده است که روش انطباق تصاویر دیجیتال برای استخراج کرنش‌های آزاد شده در نمونه‌های آزمون پلیمری ناشی از سوراخکاری، روشی مناسب و قابل قبول می‌باشد که در این مقاله، قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند با دقت بالایی در حدود اختلاف کمتر از ۱۰٪ را دارا می‌باشد.

۷- فهرست علائم

A	ضریب کالیبراسیون تنش یکنواخت
B	ضریب کالیبراسیون تنش برشی یکنواخت
C	فاصله تار خنثی تا سطح
E	مدول الاستیسیته
G_r	تابع درونیایی شدت نور تصویر مرجع
G_d	تابع درونیایی شدت نور تصویر ثانویه
I	ممان دوم سطح
L	طول نمونه تحت خمش
M	گشتاور خمشی
P	نیروی اعمالی به تیر
R	بردار مجهولات
x, y	مختصات نقاط زیرناحیه‌های تصویر مرجع
x', y'	مختصات نقاط زیرناحیه‌های تصویر ثانویه

علائم یونانی

ε	لرجت دینامیکی ($\text{kgm}^{-1}\text{s}^{-1}$)
ε_r	چگالی (kgm^{-3})
$\sigma_{\max}$	عمر متوسط موضعی هوا (s)
$\sigma_{\min}$	تنش مینیمم اصلی، MPa
σ_x	تنش در راستای x، MPa
σ_y	تنش در راستای y، MPa
τ_{xy}	تنش برشی x-y

- [17] Shokrieh MM. Simulation of central hole drilling process for measurement of residual stresses in isotropic, orthotropic, and laminated composite plates. *Journal of Composite materials*. 41(4):435-52, 2007 Feb.
- [18] Ghasemi AR, Taheri-Behrooz F, Shokrieh MM. Measuring residual stresses in composite materials using the simulated hole drilling method. In *Residual stresses in composite materials* (pp. 111-162), Woodhead Publishing, 2021 Jan 1.
- [19] Sutton MA, Wolters WJ, Peters WH, Ranson WF, McNeill SR. Determination of displacements using an improved digital correlation method. *Image and vision computing*.;1(3):133-9, 1983 Aug 1.
- [20] Hild F, Roux S. Digital image correlation. Optical methods for solid mechanics. A full-field approach. 367:183-228, 2012.
- [21] Haddadi H, Belhabib S. Use of rigid-body motion for the investigation and estimation of the measurement errors related to digital image correlation technique. *Optics and Lasers in Engineering*. 46(2):185-96, 2008 Feb 1.
- [22] Lionello G, Cristofolini L. A practical approach to optimizing the preparation of speckle patterns for digital-image correlation. *Measurement Science and Technology*. 25(10):107001, 2014 Sep 15.
- [23] Palanca M, Brugo TM, Cristofolini L. Use of digital image correlation to investigate the biomechanics of the vertebra. *Journal of Mechanics in Medicine and Biology*. 15(02):1540004, 2015 Apr 30.
- Madenci E, Guven I. *The finite element method and applications in engineering using ANSYS®*. Springer; 2015 Feb 10.
- [1] Mathar J. Determination of initial stresses by measuring the deformation around drilled holes. *Trans. ASME*.;56(4):249-54, 1934.
- [2] Nelson DV, Makino A, Schmidt T. Residual stress determination using hole drilling and 3D image correlation. *Experimental Mechanics* ;46(1):31-8, 2006 Feb.
- [3] Lord JD, Penn D, Whitehead P. The application of digital image correlation for measuring residual stress by incremental hole drilling. In *Applied Mechanics and Materials* (Vol. 13, pp. 65-73). Trans Tech Publications Ltd, 2008.
- [4] Chang CW, Chen PH, Lien HS. Evaluation of residual stress in pre-stressed concrete material by digital image processing photoelastic coating and hole drilling method. *Measurement*.;42(4):552-8, 2009 May 1.
- [5] ASTM E. 837-13a Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method. ASTM International, West Conshohocken. 2013 Oct.
- [6] Yuksel O, Baran I, Ersoy N, Akkerman R. Investigation of transverse residual stresses in a thick pultruded composite using digital image correlation with hole drilling. *Composite structures*.;223:110954, 2019 Sep 1.
- [7] Ghasemi Tamami P, Akbari D, Azadi F. Non-destructive residual stress measurement using digital image correlation method. *NDT Technology*.;2(3):50-8, 2019 Feb 20.
- [8] Azadi F, Akbari D, Ghasemi Tamami P. Application of Digital Image Correlation method for measurement of residual stress (A review). *NDT Technology*.;2(5):70-82, 2020 Feb 20.
- [9] Zhang DS, Arola DD. Applications of digital image correlation to biological tissues. *Journal of Biomedical Optics*. 9(4):691-9, 2004 Jul.
- [10] Moghaddam HK, Maraki MR, Rajaei A. Application of carbon nanotubes (CNT) on the computer science and electrical engineering: A review. *International Journal of Reconfigurable and Embedded Systems*.9(1):61, 2020 Mar 1.
- [11] Sutton MA, Ke X, Lessner SM, Goldbach M, Yost M, Zhao F, Schreier HW. Strain field measurements on mouse carotid arteries using microscopic three-dimensional digital image correlation. *Journal of Biomedical Materials Research Part A: An Official Journal of The Society for Biomaterials, The Japanese Society for Biomaterials, and The Australian Society for Biomaterials and the Korean Society for Biomaterials*. 84(1):178-90, 2008 Jan.
- [12] Ghasemi AR, Taheri-Behrooz F, Shokrieh MM. Determination of non-uniform residual stresses in laminated composites using integral hole drilling method: Experimental evaluation. *Journal of composite materials*.;48(4):415-25, 2014 Feb.
- [13] Akbari S, Taheri-Behrooz F, Shokrieh MM. Characterization of residual stresses in a thin-walled filament wound carbon/epoxy ring using incremental hole drilling method. *Composites Science and Technology*.;94:8-15, 2014 Apr 9.
- [14] Shokrieh MM, Ghasemi K AR. Determination of calibration factors of the hole drilling method for orthotropic composites using an exact solution. *Journal of Composite materials*; 41(19):2293-311, 2007 Oct.
- [15] Ghasemi AR, Mehrdad SM. Development of an integral method for determination of non-uniform residual stresses in laminated composites, 347-355, 2008.
- [16] Ghasemi AR, Shokrieh MM. Residual strains measurement and calculating residual stresses in composite laminates using the integral method. *Esteghlal*. 28(2):81-93, 2010.