



## تعیین کمی اندازه عیوب در سطوح انحناءدار به کمک روش غیر مخرب برش‌نگاری دیجیتالی

شبیر قبادی<sup>1</sup>، داود اکبری<sup>2\*</sup>

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

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

\* تهران، صندوق پستی 111-14115، daakbari@modares.ac.ir

## چکیده

## اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 22 آذر 1400  
داوری اولیه: 5 دی 1400  
پذیرش: 14 بهمن 1400

## کلیدواژگان:

برش‌نگاری دیجیتالی  
سطوح منحنی  
اصلاح اندازه برش

آزمون برش‌نگاری دیجیتالی یک روش نوری، تمام میدانی و غیر مخرب می‌باشد که با کمک گرفتن از روش‌های پردازش تصویر، امکان و قابلیت شناسایی عیوب را ایجاد می‌کند. در این روش گرادیان جابه‌جایی‌های سطح به طور مستقیم از الگوهای هاله‌ای به دست آمده، استخراج می‌شوند که نیازمند پردازش و استخراج اطلاعات فازی از تصاویر هاله‌ای به دست آمده از آزمون تجربی می‌باشد. یکی از مهمترین پارامترهای روش برش‌نگاری، اندازه برش است که مقدار آن در تشخیص عیوب و اندازه‌گیری مقادیر کمی نقش مهمی دارد. عدم انتخاب مقدار مناسب این پارامتر، امکان شناسایی و ارزیابی عیب را دشوار می‌کند. از آنجا که تغییر اندازه برش در سطوح انحناءدار، موجب کاهش شدید دقت تخمین اندازه عیوب می‌گردد، این پارامتر نیاز به تصحیح دارد. در این مقاله، روشی برای تخمین اندازه عیوب در سطوح انحناءدار به کمک پردازش تصاویر هاله‌ای معرفی شده است. تحلیل هندسی برای محاسبه دقیق اندازه برش در امتداد انحناء جسم مورد بررسی قرار گرفته است و با کمک آن، نتایج حاصله از تخمین عیب بهبود یافت. بهبود تخمین اندازه عیب برای عیوب 10، 16 و 20 میلی‌تری به ترتیب تا 15، 9/6 و 15 درصد بوده است. در نتیجه استفاده از روش معرفی شده، اصلاح اندازه تخمین را مؤثر و مفید نشان می‌دهد.

## Evaluation of the defect size in the curved surfaces using digital shearography NDT method

Shobeir Ghobadi, Davood Akbari\*

Mechanical Engineering Department, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

\* P.O.B. 14115- 111, Tehran, Iran, daakbari@modares.ac.ir

## Article Information

Original Research Paper  
Received: 13 December 2021  
First Decision: 26 December 2021  
Accepted: 3 February 2022

## Keywords:

Digital Shearography  
Curved Surfaces  
Modifying Shear Distance

## Abstract

Digital shearography is an optical, full-field and non-destructive method that can be used in identification of the defects by using image processing techniques. In this method, the surface displacement gradients are directly extracted from the fringe patterns, which requires processing of the phase information in the fringe images obtained in the experimental tests. One of the most important parameters of the shearography is the shear distance, playing an important role in the detection of the defects and quantitative measurements. Any mistake in the selection of the appropriate value for this parameter, makes it difficult to identify the right defect size. This parameter needs to be corrected because the changing in the shear size on the curved surfaces severely reduces the accuracy of the estimating of the defect size. In this paper, a method for estimating the size of the defects in curved surfaces by processing the shearography images is introduced. Geometric analysis is used to calculate the size of the accurate shear distance along the curvature, which can be used to improve the results of the defect estimation. Improvement of the defect size estimation for defects of 10, 16 and 20 mm has been measured as 15, 9.6 and 15%, respectively. It concluded that the proposed method can be used for better estimation of the defect size in the curved surfaces.

## 1- مقدمه

معرفی شده است [1، 2]. کرنش‌ها را که به عنوان مشتقات جابه‌جایی نیز نامیده می‌شوند، می‌توان به صورت جداگانه تحت عنوان جابه‌جایی‌های خارج از صفحه و جابه‌جایی‌های داخل صفحه با چینش مناسب تجهیزات در این روش به آن به دست آورد. برای استخراج اطلاعات در روش برش‌نگاری از فرایندهای پردازش تصویر کمک گرفته می‌شود تا اطلاعات فازی را از

برش‌نگاری دیجیتالی یک روش نوری، تمام میدانی و غیرتماسی برای شناسایی عیوب می‌باشد که قابلیت اندازه‌گیری تمامی کرنش‌های موجود در سطح قطعه را دارد. بسیاری از مقالات این موضوع را تأیید نموده‌اند و برش‌نگاری یک ابزار مناسب برای شناسایی عیوب به خصوص در قطعات از جنس کامپوزیت

## Please cite this article using:

Sh. Ghobadi, D. Akbari, Evaluation of the defect size in the curved surfaces using digital shearography NDT method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 11, pp. 54- 62, 2022 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

تصاویر به‌دست آورد [3، 4].

روش برش‌نگاری با دیگر روش‌های غیر مخرب نوری همچون تمام‌نگاری<sup>1</sup> و تداخل الگوی لکه‌ای الکترونیکی<sup>2</sup>، تا حدودی زیادی مشابه است. یکی از مهمترین تفاوت برش‌نگاری با روش‌های مذکور در پارامتر اندازه‌گیری است که برش‌نگاری به طور مستقیم مشتق جابه‌جایی‌ها را اندازه می‌گیرد. در صورتی که روش‌های هالوگرافی و تداخل الگوی الکترونیکی، جابه‌جایی‌ها را اندازه‌گیری می‌کنند و مشتقات جابه‌جایی به‌وسیله مشتق‌گیری عددی از تصاویر فازی جابه‌جایی‌ها به دست می‌آیند. از این‌رو روش برش‌نگاری دیجیتال، امکان محدوده حساسیت قابل کنترل بزرگتری را ایجاد می‌کند. بنابراین این امکان بوجود می‌آید که مشتق جابه‌جایی‌ها برای تغییر شکل‌های بزرگ قابل اندازه‌گیری باشد. از آنجا که روش برش‌نگاری برخلاف تمام‌نگاری، به پرتو مرجع نیازمند نیست، به دفع‌کننده ارتعاشات نیاز ندارد و به ارتعاشات محیطی حساسیت کمتری دارد [5].

کاربرد عمده روش برش‌نگاری، در عیب‌یابی و همچنین اندازه‌گیری پارمترهای جابه‌جایی سطح در سطوح تخت است. با این حال تحقیقات محدودی نیز در انجام این آزمون در سطوح منحنی شکل انجام گرفته است.

کیم و همکاران در پژوهشی عیب ترک در لوله را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بر روی نمونه استوانه‌ای، ترک‌هایی با طول 12 میلی‌متر و عمق‌های 1، 2 و 3 میلی‌متر ایجاد نمودند و با بارگذاری فشار داخلی با استفاده از گاز نیتروژن نمونه را تحت بارگذاری قرار دادند. همچنین از تکنیک جابه‌جایی فاز و الگوریتم واپیچیدن<sup>3</sup> برای بهبود نتایج آزمون و تحلیل هاله‌های به‌دست آمده از آزمون استفاده کردند. براساس این تحقیق، آن‌ها دریافتند که اندازه برش در شناسایی عیب ترک بسیار مهم است. همچنین کمی‌سازی و اندازه‌گیری ترک به روش برش‌نگاری به فاکتورهایی چون اندازه برش، جهت برش و میزان بارگذاری وابسته است [6]. کیم همچنین در تحقیقی دیگر، اندازه‌گیری عیب در دیواره نازک شده‌ی لوله در اثر خوردگی را با آزمون تداخل الگوی الکترونیکی و برش‌نگاری دیجیتال بررسی نمود. نمونه مورد بررسی در این تحقیق از جنس فولاد کربنی با تنش تسلیم 240 مگاپاسکال، تنش کششی 415 مگاپاسکال و ازدیاد طول 30% بوده است. بارگذاری مورد استفاده در این تحقیق فشار داخلی به اندازه 0.2 مگاپاسکال بوده است. او در

این مقاله نشان داد روش‌های استفاده شده برای اندازه‌گیری عیوب، هر دو نتایج خوبی داشته‌اند و می‌توانند در شناسایی و اندازه‌گیری عیوب در لوله‌ها مورد استفاده قرار گیرند [7].

عبدالله و همکاران در رابطه با خوردگی در لوله‌های انتقال نفت در سال 2008 تحقیقی انجام دادند که در آن لوله‌های خطوط انتقال نفت به ضخامت دیواره‌ی 7 میلی‌متر و دارای عیوب مصنوعی 35، 50 و 70 میلی‌متر به عمق‌های 1، 3 و 5 میلی‌متر تحت آزمون برش‌نگاری قرار گرفتند. ابتدا بر روی نمونه، جهت صحت سنجی، آزمون رادیوگرافی انجام شد و سپس نمونه با روش برش‌نگاری مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به نتایج آنها تنها عیوب با عمق بیش از 3 میلی‌متر قابل شناسایی بودند و عیوب با عمق 1 میلی‌متر حتی در فشار حداکثری 0.5 مگاپاسکال نیز قابل شناسایی نبودند [8].

لوبانو و همکاران، لوله‌های ساخته شده از جنس کامپوزیت تقویت شده با الیاف شیشه را با روش برش‌نگاری بررسی کردند. در این تحقیق آن‌ها ابتدا سطح لوله کامپوزیتی را مورد بررسی کیفی قرار دادند و موفق به شناسایی عیب لوله با قطر 4 میلی‌متر با بارگذاری حرارتی شدند. در آزمونی دیگر، به مطالعه و بررسی محل اتصال دو لوله با جنس مشابه پرداختند و نواحی جوش ناقص را شناسایی نمودند [9].

بسیاری از تحقیقات صورت گرفته صرفاً شناسایی عیوب در اجسام منحنی را مورد بررسی قرار داده‌اند و کارهای کمی و اندازه‌گیری کرنش بسیار محدود انجام شده است. گرووز و همکارانش خط جوش یک لوله را که تحت فشار هیدرواستاتیک قرار داشته است، مورد ارزیابی قرار دادند. آن‌ها با استفاده از سه تابش و انتقال محورهای مختصات با ایجاد برش در تصاویر توانستند تمامی مشتقات جایجایی و در ادامه میدان کرنش را در امتداد خط جوش تعیین کنند [10].

اندازه‌گیری تغییر شکل سطح یک منحنی با روش برش‌نگاری به علت تغییر اندازه برش اعمالی و به‌وجود آمدن بردارهای حساسیت مختلف شامل خطاهایی خواهد بود. تصحیح این موارد برای به‌دست آوردن مقادیر دقیق‌تر کمک خواهد کرد. گرووز و همکاران تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بررسی کمی عیوب در قطعات با سطح منحنی و اصلاح خطاهای اندازه‌گیری، به انجام رسانده‌اند. در این تحقیقات، آن‌ها با استفاده از روش جابه‌جایی فاز<sup>4</sup> جابه‌جایی منبع، اقدام به خواندن فاز از سطح قطعه کرده و شیب سطح قطعه را به‌دست آورد، سپس با انتگرال‌گیری از آن موفق به به‌دست آوردن اطلاعات مربوط به هندسه قطعه شدند

<sup>1</sup> Halography

<sup>2</sup> ESPI

<sup>3</sup> Unwrapping

<sup>4</sup> Spatial phase

دقیق‌تر در آزمون کمی برش‌نگاری به‌دست آورد.

## 2- تئوری روش

### 2-1- اساس برش‌نگاری

اساس روش برش‌نگاری دیجیتالی برپایه تداخل دو جبهه نور بازتاب شده از سطح جسم است که توسط دوربین CCD ثبت و ضبط می‌گردد. همان‌طور که در شکل 1 نشان داده شده است، برای این منظور و ایجاد تداخل، از یک چیدمان تداخل‌سنج به نام تداخل‌سنج مایکلسون استفاده می‌گردد که شامل دو آینه و یک نیم آینه می‌باشد. با کمی زاویه دادن به یکی از آینه‌ها، اصطلاحاً برش صورت می‌گیرد و تصویر تداخلی در سطح سنسور دوربین ایجاد و ثبت می‌گردد. در روش برش‌نگاری از کم کردن دو تصویر تداخلی که الگوی لکه‌ای<sup>1</sup> نیز نامیده می‌شوند، تصویر الگوی هاله‌ای<sup>2</sup> به‌دست می‌آید که مکان عیب و چگونگی آن را مشخص می‌کند. تنظیم اندازه برش براحتی با استفاده از زاویه دادن به یکی از دو آینه انجام می‌گیرد که یکی از مهمترین پارامترهای شناسایی عیوب در روش برش‌نگاری است.

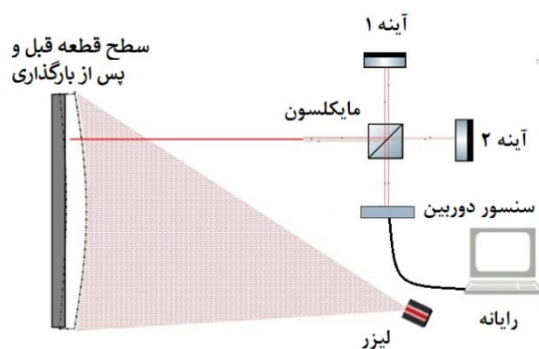


Fig. 1 Schematic of Modified Michelson and generating of interferometric patterns on sensor surface

شکل 1 شماتیک چیدمان مایکلسون اصلاح شده و ایجاد الگوی هاله‌ای تداخلی در سطح سنسور

در روش برش‌نگاری برای ایجاد تصاویر الگوی هاله‌ای به دو تصویر قبل و بعد از بارگذاری نیاز است. برای ایجاد تنش در سطح قطعه از انواع روش‌های بارگذاری مرسوم همچون بارگذاری حرارتی یا مکانیکی می‌توان استفاده کرد. در شکل 2 نمایی از چیدمان برش‌نگاری بر پایه تداخلگر مایکلسون نشان داده شده است.

چنانچه دو جبهه نور با یکدیگر برخورد کنند از تداخل آن‌ها

که این اطلاعات مربوط به سطح کمک می‌کنند تا بردار حساسیت و اندازه برش اصلاح شوند و به کمک رابطه ارائه شده مشتقات جابه‌جایی سطح به‌دست آمده اصلاح شده و مقادیر دقیق‌تری به‌دست آوردند [11، 12].

در تحقیقات پیشین برای اندازه‌گیری کرنش، راه حل جامعی ارائه نشده است. آندری و همکاران با ارائه روشی متشکل از ترکیب اندازه‌گیری داخل خطی و پردازش اطلاعات برش‌نگاری در سه بعد، اندازه‌گیری کرنش‌ها به شکل دقیقی انجام داده‌اند. این روش مبتنی بر ادغام یک پروژکتور نور ساختاریافته در سیستم برش‌نگاری سه بعدی برای اندازه‌گیری درون خطی جسم بوده است و اندازه برشی واقعی در امتداد جسم منحنی را همراه با تصحیح ماتریس حساسیت برای محاسبه اجزای کرنش سطح تخمین زده‌اند [13].

همچنین اندازه برش در تخمین اندازه عیب نیز تاثیرگذار است و مقدار متفاوت اندازه برش در نتایج به‌دست آمده تاثیر بسزایی خواهد داشت. بررسی تاثیر اندازه برش در تخمین اندازه عیب در ترک لوله مورد بررسی قرار گرفته است که به ازای مقدار معینی از اندازه برش تخمین اندازه عیب دقیق‌تر خواهد بود [14].

برای تخمین اندازه برش روش‌های گوناگونی مبتنی بر ناحیه تحت پوشش هاله‌های برش‌نگاری ارائه گردیده است. در روش میشل، با اندازه‌گیری دو نقطه طرفین هاله تشکیل شده و با کسر اندازه برش از آن، تخمین اندازه عیب محاسبه می‌گردد [15]. در روشی دیگر با اندازه‌گیری نقاط مرکزی هاله‌های پروانه شکلی ایجاد شده و رابطه معرفی شده، تخمین اندازه عیب انجام می‌گیرد. که در مقایسه با روش قبلی در مواردی که هاله برش‌نگاری کاملی به‌دست نمی‌آید بسیار کارآمدتر خواهد بود زیرا که فاصله مراکز هاله‌ها برای تخمین اندازه عیب کافی می‌باشد [16].

این حقیقت که بسیاری از اجسام دارای سطح صاف نیستند مانند سطوح بسیاری از سازه‌های هوافضایی و همچنین مجسمه‌ها، این موضوع را در برش‌نگاری پراهمیت می‌سازد. بنابراین ارائه روش و راه‌حل مناسب برای انجام هرچه دقیق‌تر روش برش‌نگاری در سطوح با انحنای بالا، لازم و ضروری است. در این مقاله رابطه‌ای براساس تحلیل هندسی آزمون، برای اصلاح اندازه‌برش اعمالی و به‌دست آوردن مقادیر صحیح‌تری از آن در نقاط مختلف از سطح قطعه، معرفی شده است. تا به کمک آن تخمین اندازه عیب در سطوح انحناءدار دقیق‌تر اصلاح شود. به این ترتیب می‌توان با استفاده از مقادیر به‌دست آمده نتایج

<sup>1</sup> Speckle pattern

<sup>2</sup> Fringe pattern

تخت همراه با تفاوت‌هایی در نتایج آن می‌باشد. اندازه برش یکی از مهمترین پارامترها در شناسایی عیوب در روش برش‌نگاری است که مقدار آن ثابت و بوسیله تغییر زاویه در یکی از آینه‌ها تعیین می‌گردد. اندازه آن تاثیر مستقیم بر مقدار کرنش‌های خوانده شده از تصاویر هاله‌ای دارد. اما همان‌طور که در شکل 2 نشان داده شده است، در طول یک سطح منحنی به علت تغییرات هندسی اندازه برش اعمالی در سطح جسم کشیده می‌شود و مقدار آن در بیش از آن مقداری می‌باشد که از پیش تعیین شده است. در پژوهشی گروو رابطه (5) برای اصلاح مقدار اندازه برش ارائه نمود که در آن  $dx_c$  اندازه برش اصلاح شده محاسبه می‌گردد [11].

$$dx_c = dx_m \sqrt{\left(\frac{dz}{dx}\right)^2 + 1^2} \quad (5)$$

در این رابطه  $dx_m$  اندازه برش اعمالی و  $\frac{dz}{dx}$  شیب سطح در جهت x می‌باشد.

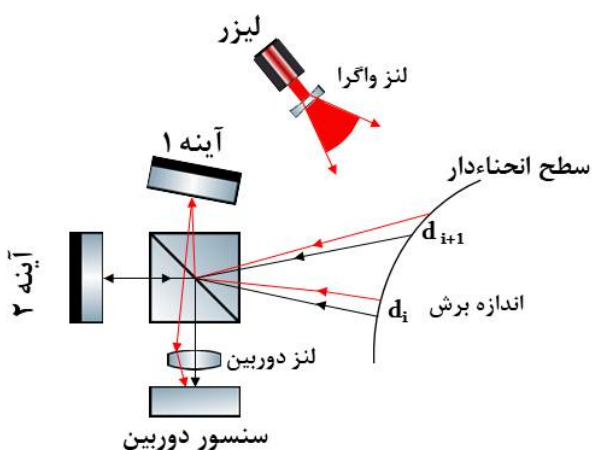


Fig. 2 Schematic of shearography test on curved surfaces

شکل 2 شماتیک آزمون برش‌نگاری بر روی سطح انحناءدار

## 2-2- بررسی هندسی برش‌نگاری سطوح منحنی

با توجه به تغییر اندازه برش در طول انحناء قطعه و لزوم محاسبه مقدار آن برای به دست آوردن نتایج تجربی و کمی بهتر، در این بخش به بررسی و تحلیل هندسی آزمون و همچنین محاسبه اصلاح اندازه برش برای نقاط مختلف پرداخت شده است.

مختصات اجزاء چیدمان برش‌نگاری در سطح منحنی در شکل 3 نشان داده شده است. قطعه منحنی شکل مفروض، یک لوله با شعاع 2 و به مرکز 0 می‌باشد که نقطه مرجع این دستگاه مختصات در نظر گرفته می‌شوند. نقطه G محل دریافت پرتوهای بازتابی از سطح جسم می‌باشد. یک سطح تخت به عنوان معیاری برای اعمال اندازه برش و تنظیم آن در نظر گرفته شده است.

تصویر تداخلی با شدت نور به معادله (1) به دست می‌آید:

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

که در آن I شدت نور تداخلی،  $I_0$  شدت نور متوسط زمینه،  $\gamma$  مدول تداخل و  $\varphi$  اختلاف فاز تصادفی بین تصاویر برش خورده در هر نقطه می‌باشد. سپس با استفاده از یک بارگذاری مانند بارگذاری مکانیکی یا حرارتی در قطعه تنش ایجاد کرده و مجدد تصویر تداخلی الگوی لکه‌ای I ثبت می‌شوند:

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

که در آن  $\Delta$  اختلاف فاز نسبی تصویر فازی می‌باشد و با کم کردن این تصاویر تصویر الگوی هاله‌ای به دست می‌آید از آنجا که دوربین CCD شدت نور را ثبت می‌کند برای آن مقادیر منفی وجود ندارد بنابراین با کم ساده سازی می‌توان رابطه (3) را نوشت:

$$I' - I = 4I_0\gamma[\sin(\varphi + \frac{\Delta}{2})\sin\frac{\Delta}{2}] \quad (3)$$

با به دست آوردن و استخراج اطلاعات فاز از تصاویر الگوی هاله‌ای که با روش‌های پردازش تصاویر به دست می‌آیند، می‌توان مقدار کرنش‌های ایجاد شده در قطعه را به دست آورد. با تنظیم زاویه تابش لیزر و دوربین به طوری که در یک راستا قرار بگیرند، چیدمان تنها به جابه‌جایی‌های خارج از صفحه حساس می‌گردد که در این حالت کرنش خارج از صفحه به صورت رابطه (4) خواهد بود:

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

که  $\lambda$  طول موج پرتو لیزر،  $\frac{\partial w}{\partial x}$  کرنش خارج از صفحه و  $\delta x$  اندازه برش می‌باشد. با داشتن مقدار فاز و قرار دادن آن در معادله بالا، کرنش‌های خارج از صفحه به دست می‌آیند.

در بسیاری از آزمون‌ها لازم است از روش‌های پردازش تصویر برای بهبود تصاویر برش‌نگاری استفاده نمود تا تصاویر با کیفیت بهتری حاصل شود. زیرا گاهی حتی تفاضل مستقیم تصاویر منجر به تصاویر هاله‌ای می‌شوند که به چشم دیده نمی‌شوند. علت این اتفاق، عدم توزیع شدت نور یا به عبارتی هیستوگرام نامناسب تصویر می‌باشد. از جمله روش‌های پردازش تصویر که می‌توان استفاده کرد، متعادل کننده هیستوگرام<sup>1</sup> نام دارد. همچنین برای بهبود کیفیت تصاویر با روش‌های کاهش دهنده نویز، روش فیلتر پایین‌گذر باترورث<sup>2</sup> می‌باشد که در تصاویر این مقاله نیز در پردازش تصاویر به کار گرفته شده است. برش‌نگاری در اجسام دارای سطح انحناءدار نسبت به سطوح

<sup>1</sup> Histogram equalization

<sup>2</sup> Butterworth Low pass filter

## 3- آزمون‌های تجربی

در این تحقیق ابتدا برای انجام آزمون غیرمخرب بر روی سطوح منحنی قطعات لوله‌ای شکل از جنس پی‌وی‌سی در قطرهای مختلف 50، 80، 100 و 150 میلی‌متر تهیه شد که خواص آن در جدول 1 نشان داده شده است. عیوب صفحه‌ای دایره‌ای شکل در اندازه‌های 10، 15، 20، 25 در این نمونه‌ها برای بررسی برش‌نگاری ایجاد شدند. به دلیل خواص ایزوتروپیک، این نمونه‌ها نتایج بهتری نسبت به دیگر مواد ارائه می‌کند و لذا آزمون تجربی روی آن‌ها ساده‌تر انجام می‌گیرد. شکل 4 نمونه‌ای از لوله‌های به کار برده شده در این آزمون‌ها را نشان می‌دهد که در داخل لوله عیوب از نوع عیب صفحه‌ای ایجاد شده است.

جدول 1 خواص مکانیکی و حرارتی لوله‌های پی وی سی

Table 1 Mechanical and thermal properties of PVC pipes

ضرب	مدول	ظرفیت	چگالی	ضریب انتقال	خواص
یواسون	یانگ	حرارتی ویژه	(Kg/m <sup>3</sup> )	حرارت	حرارتی
(-)	(Gpa)	(J/Kg.K)		(W/m.k)	(1/k)
0/32	3/4	900	1200	0/15	5E-5
					اندازه

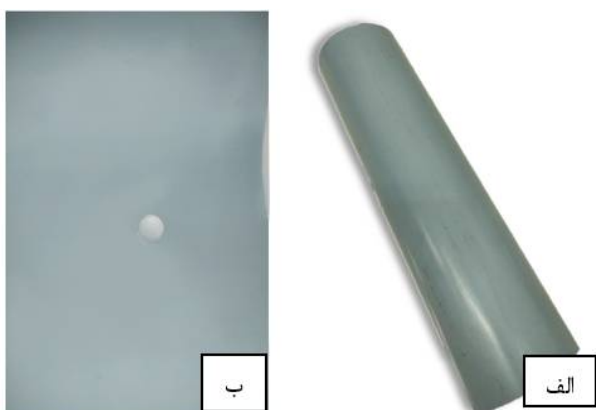


Fig. 4 a) A sample of PVC pipe. b) 10 mm Surface defects created on the inner surface of the sample

شکل 4 الف) نمونه لوله پی وی سی (ب) عیب صفحه ای 10 میلی‌متر ایجاد شده در سطح داخلی نمونه

چیدمان تجربی مورد استفاده در آزمون‌های انجام گرفته در شکل 5 نشان داده شده است. در راستای انجام صحیح آزمون و شناسایی عیوب، لازم است که مقدار اندازه برش و میزان بارگذاری برای هر عیب به‌طور صحیح انتخاب شود. در این آزمون از بارگذاری حرارتی به مدت 2 تا 5 ثانیه با لامپ حرارتی 1000 وات استفاده شده است که تغییرات دمایی بین 3 تا 10 درجه سانتی‌گراد در سطوح نمونه‌ها ایجاد می‌کند. روش‌های بارگذاری مرسوم در لوله‌ها عموماً بارگذاری فشار داخلی یا حرارتی می‌باشد که در این آزمون به علت سهولت اجرای

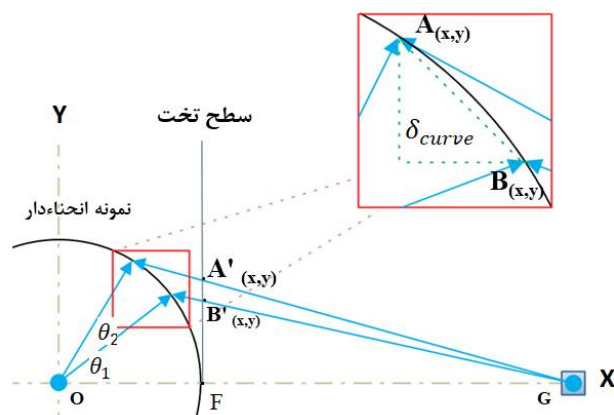


Fig. 3 Schematic of the shear size depicted on the curved surface

شکل 3 شماتیک اندازه برش تصویر شده بر روی سطح منحنی

به ازای زاویه  $\theta_1$  نقطه  $B$  یک نقطه از سطح منحنی است که فاصله آن از مرکز مختصات شکل زیر بر اساس هندسه نمونه با رابطه (6) محاسبه می‌شود:

$$B(x, y) = [r \sin \theta_1 \cdot r \cos \theta_1] \quad (6)$$

با به‌دست آوردن معادله خط بین نقطه  $B$  و  $G$  می‌توان نقطه  $B'$  را به‌دست آورد. و به ازای اندازه برش اعمالی  $\delta_f$  که با استفاده از سطح تخت مدرج تنظیم می‌گردد، نقطه  $A'$  به‌دست می‌آید.

$$A'(x, y) = [B'(x) \cdot B'(y) + \delta_f] \quad (7)$$

با تعیین معادله خط بین دو نقطه  $B'$  و  $G$  می‌توان از محل برخورد خط مذکور با منحنی جسم، مختصات نقطه  $B$  را به‌دست آورد.

$$\theta_2 = \tan^{-1} \left( \frac{A(y)}{GF} \right) \quad (8)$$

اندازه برش واقعی در سطح انحناء با کمک زوایای تعیین شده با استفاده از رابطه زیر، قابل محاسبه است. رابطه (9) مقدار کمان زاویه بین دو نقطه  $A$  و  $B$  می‌باشد. این مقدار براساس زاویه و شعاع انحناء محاسبه می‌گردد که برابر با اندازه برش مدنظر در سطح منحنی می‌باشد.

$$\delta_{curve} = 2r^2(1 - \cos \Delta\theta) \quad (9)$$

در این رابطه  $\Delta\theta$  زاویه بین دو نقطه  $A$  و  $B$  از سطح منحنی و  $r$  شعاع منحنی می‌باشد. رابطه فوق نشان می‌دهد که به ازای اندازه برش اعمالی، که یک مقدار ثابت و از پیش تعیین شده است، مقادیر متفاوتی در طول انحناء به‌دست می‌آید. با توجه به این‌که میزان انحناء یک سطح منحنی مانند لوله با کاهش قطر آن افزایش می‌یابد می‌توان گفت با کاهش قطر و افزایش انحناء، اندازه برش اختلاف بیشتری با مقدار اعمالی خواهد داشت. بنابراین اصلاح اندازه برش اهمیت و لزوم بیشتری پیدا خواهد کرد.

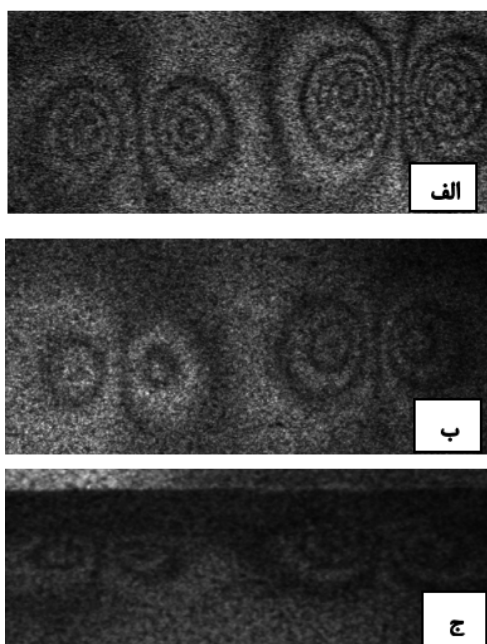


Fig. 6 20 and 25 mm defects' Fringe patterns at a) 0-degree b) 30-degree c) 60 degree

شکل 6 تصاویر هاله‌ای عیوب قطر 20 و 25 میلی‌متر در زوایای الف) 0 (ب) 30 ج) 60 درجه

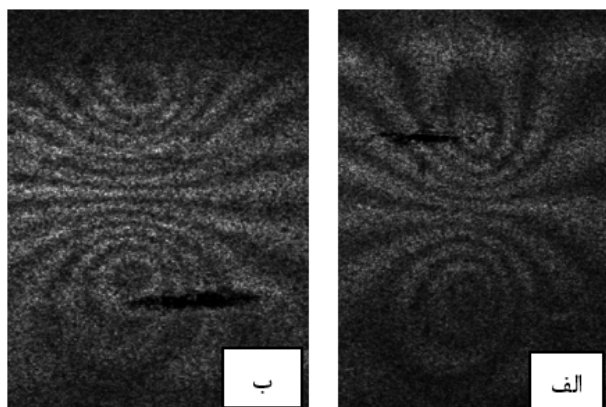


Fig. 7 Identification of 20 mm defect in 150 mm pipe at different degree a) 0-degree b) 60 degree

شکل 7 شناسایی عیوب 20 میلی‌متر در لوله به قطر 150 در زوایای الف) 0 (ب) 60 درجه

برای بررسی بیشتر آزمون برش‌نگاری در سطوح منحنی و بررسی تاثیر اندازه برش در سطح منحنی شکل، تخمین اندازه عیب در حالت‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. برای شناسایی و تخمین اندازه عیب، آزمون‌های برش‌نگاری مطابق پارامترهای جدول 2 انجام شده اند.

با توجه به محدودیت اشاره شده بر روی هاله‌هایی که از قطعات انحنا دار به دست آمده است، استفاده از یک روش مناسب برای تخمین اندازه عیب ضروری می‌باشد. تخمین اندازه عیب با استفاده از روش معرفی شده توسط صباغی و اکبری بر

بارگذاری حرارتی، از این روش استفاده شده است. پس از اعمال بارگذاری حرارتی و ایجاد تنش حرارتی در نمونه، تصاویر الگوی لکه‌ای چندین بار ثبت شده‌اند که با کم کردن دوبه‌دو آن‌ها از یکدیگر، تصاویر هاله‌ای به دست می‌آیند. برخی از تصاویر هاله‌ای به دست آمده دارای الگوهایی به شکل پروانه یا دایره می‌باشد که حاکی از وجود عیب می‌باشند. تمرکز کرنش در ناحیه عیب، دلیل بوجود آمدن این الگوها می‌باشند. به عبارتی دیگر، به علت تمرکز تنش در محل عیب و تفاوت آن در مقایسه با نواحی دیگر قطعه، الگوهای هاله‌ای خاصی بوجود می‌آیند که بیانگر وجود عیب می‌باشند. شکل 6 تصاویر هاله‌ای آزمون برش‌نگاری برای شناسایی عیوب در زوایای مختلف را نشان می‌دهد.

بر خلاف شکل 6 که اندازه برش در جهت محور افقی اعمال شده است، شکل 7 نتایج آزمون برش‌نگاری در شرایطی است که اندازه برش در جهت محور عمودی اعمال گردیده است. شکل 7 تصاویر عیب قطر 20 میلی‌متر را در لوله به قطر 150 میلی‌متر در دو زاویه 0 و 60، نشان می‌دهد.

همان‌طور که در شکل 7 نشان داده شده است، هاله‌های ایجاد شده در سطح انحنا دار بخصوص زمانی که اندازه برش در امتداد سطح انحنا قطعه قرار دارد و در زاویه‌های بالاتر کامل نمی‌باشند و ابتدا و انتهای هاله‌های تشکیل شده دقیقاً مشخص نیستند. این موضوع برای تخمین اندازه عیب ایجاد مشکل و محدودیت می‌کند.

در آزمون‌های انجام گرفته در این بخش، تصاویر به دست آمده به علت دامنه دینامیکی شدت نور پایین ابتدا مورد پردازش تصویر قرار گرفته‌اند تا تصاویر بهتری از جهت شدت نور و هیستوگرام حاصل گردد.

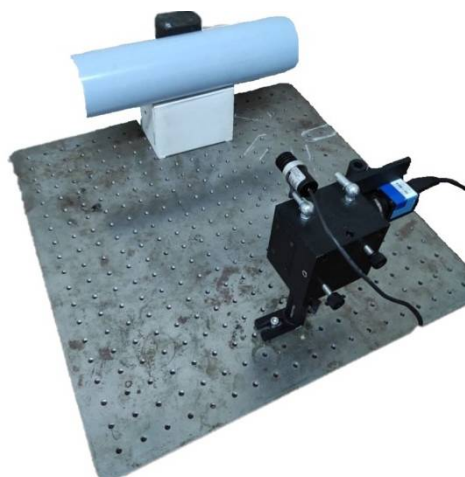


Fig. 5 Shearography set-up for conducting experimental test on PVC samples

شکل 5 چیدمان برش‌نگاری برای انجام آزمون تجربی بر روی نمونه‌های پی وی سی

همان‌گونه که قبلاً بیان شد، مقدار اندازه عیب تخمین زده تحت زاویه را می‌توان با کمک مقدار اندازه برش اصلاح شده به‌دست آمده از رابطه (9) بهبود داد تا به مقدار واقعی‌تر نزدیکتر شود. در جدول 3 نتایج اندازه‌گیری تجربی عیوب برای همه آزمایش‌ها انجام شده، نشان داده شده است.

در ستون سوم جدول، اندازه برش اعمالی در سیستم برش‌نگاری که به صورت عمود بر لنز دوربین انجام می‌شود، نشان داده شده است و در ستون چهارم، تخمین اندازه عیب بر اساس رابطه (10) نشان داده شده است. ستون بعدی اصلاح تخمین اندازه عیب را بر اساس رابطه (9) که در این مقاله معرفی شده است نشان می‌دهد.

همان‌طور که در جدول 3 مشاهده می‌گردد، تقریباً برای تمامی عیوب با اندازه برش‌های بزرگتر مانند 15 میلی‌متر، مقادیر به‌دست آمده برای تخمین عیب، همراه با خطای بیشتری می‌باشد و اصلاح اندازه برش تاثیر مثبتی بر نتایج نخواهد گذاشت؛ چراکه با استفاده از رابطه (9) اندازه برش اصلاح شده در زاویه‌های 30 و 45 درجه بسیار بزرگ محاسبه می‌گردد و اختلاف آن با مقدار اعمالی زیاد می‌باشد. در نتیجه مقادیر محاسبه شده مطلوب نمی‌باشند. این اختلاف به خصوص در زوایای بالاتر برای اندازه برش‌های بزرگ بیشتر می‌گردد. یکی دیگر از اثرات زاویه که در نتایج قابل مشاهده است کاهش مقادیر اندازه عیب تخمین زده شده است که با افزایش زاویه به علت کوچک‌تر شدن عرض هاله‌ها مقدار اندازه عیب به‌دست آمده کوچک‌تر به‌دست آمده است.

مقادیر منفی در ستون آخر نشان دهنده‌ی کاهش دقت اندازه‌گیری با اعمال رابطه (9) و استفاده از اندازه برش اصلاح شده می‌باشد. در مجموع، نتایج نشان دهنده کاهش خطای اندازه‌گیری با اعمال اصلاح اندازه برش در اندازه برش‌های کمتر از 10 میلی‌متر است. لذا می‌توان سطوح منحنی شکل با بهکارگیری اندازه برش کمتر از 10 میلی‌متر، تخمین مناسب‌تری از عیوب ایجاد نمود.

## 5- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، اندازه برش که یکی از پارامترهای مهم و اساسی روش برش‌نگاری است در سطوح منحنی شکل مورد بررسی قرار گرفت. در این راستا رابطه‌ای بر اساس تحلیل هندسی معرفی شده است که مقدار اندازه برش را در نقاط مختلف از سطح قطعه بر اساس زاویه و قطر انحناء محاسبه می‌کند.

اساس محل تمرکز هاله‌ها مطابق شکل 8، که بیشترین گرادیان جابه‌جایی را شامل می‌شود، محاسبه شده است [16]. اندازه عیب با استفاده از رابطه (10) به‌دست می‌آید.

جدول 2 پارامترهای آزمون برش‌نگاری برای بررسی تخمین اندازه عیب در سطوح انحناءدار

Table 2 Shearography experimental test parameters to evaluate the defect size estimation at curved surfaces

اندازه عیب (mm)	زاویه تست (degree)	اندازه برش (mm)
10	0, 30, 45	6, 10, 15
15	0, 30, 45	6, 10, 15
20	0, 30, 45	6, 10, 15

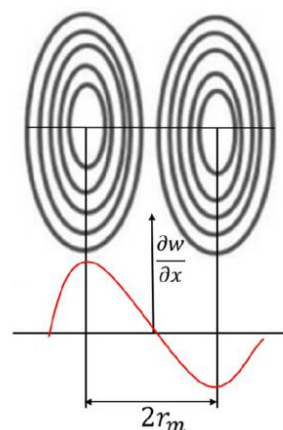


Fig. 8 Out-of plane displacement gradient  $\frac{\partial w}{\partial x}$  and  $r_m$  measurement method [16]

شکل 8 گرادیان جابه‌جایی خارج از صفحه  $\frac{\partial w}{\partial x}$  و نحوه اندازه‌گیری  $r_m$  [16]

$$2r = 2\sqrt{3}r_m - \delta_x \quad (10)$$

در این رابطه  $r_m$  فاصله مراکز هاله‌ها و  $\delta_x$  مقدار اندازه برش اعمالی می‌باشد. بدین ترتیب تخمین اندازه عیب را می‌توان از طریق تصاویر هاله‌ای به این طریق به‌دست آورد.

با توجه به اینکه مقدار اندازه برش تاثیر مهمی در تخمین اندازه عیب دارد از اندازه برش اصلاح شده در رابطه (10) برای اصلاح عیوب اندازه‌گیری شده در زوایای 30 و 45 استفاده شده است.

## 4- بحث و نتایج

آزمایشات تجربی برای تخمین اندازه عیب در زوایا، اندازه برش و اندازه عیب مختلف مطابق جدول 2 انجام شد و اندازه عیب با کمک معادله (10) تخمین زده شد. برای تعیین بهتر اندازه عیب از اصلاح اندازه برش معرفی شده در این مقاله استفاده شده است.

جدول 3 نتایج تجربی آزمایشات تجربی و اصلاح تخمین اندازه عیب

Table 3 Experimental results of tests and correction of defect size estimation

درصد بهبود تخمین اندازه عیب	اندازه عیب بر اساس اندازه برش اصلاح شده (mm)	اندازه عیب بر اساس رابطه (9) (mm)	اندازه برش اعمالی (mm)	زاویه عیب (degree)	اندازه واقعی عیب (mm)	ردیف
-	-	14/4	6	0	10	1
-	-	13/8	10	0	10	2
-	-	12/2	15	0	10	3
15	11/2	12/7	6	30	10	4
15	10/6	12/1	10	30	10	5
-10	7/8	8/8	15	30	10	6
7	8/85	11/85	6	45	10	7
5	9/25	11/25	10	45	10	8
-20	6	8	15	45	10	9
-	-	19/5	6	0	16	10
-	-	18/9	10	0	16	11
-	-	17/3	15	0	16	12
9/3	16/3	17/8	6	30	16	13
5/6	15/7	17/2	10	30	16	14
-6/2	14/6	15/6	15	30	16	15
1/25	15	17	6	45	16	16
-6/25	14/5	5/16	10	45	16	17
-14/3	11/9	14/2	15	45	16	18
-	-	26/3	6	0	20	19
-	-	25/7	10	0	20	20
-	-	24/1	15	0	20	21
5	23/1	24/6	6	30	20	22
5/7	22/5	24	10	30	20	23
7/5	21/4	22/4	15	30	20	24
15	20/41	23/41	6	45	20	25
10	20/3	22/3	10	45	20	26
-3	18/7	20/7	15	45	20	27

میلی‌متر کاملاً قابل قبول و تکرارپذیر است و می‌توان در سطوح منحنی شکل از این روش برای تخمین بهتر اندازه عیب استفاده نمود.

### 6- مراجع

- [1] D. Akbari, N. Soltani, and 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, doi: 10.1177/0954405412473054.
- [2] N. Xu, X. Xie, X. Chen, and L. Yang, Shearography for specular object inspection, *Optics and lasers in*

از سویی تخمین اندازه عیوب به روش برش‌نگاری وابسته به مقدار اندازه برش می‌باشد که در بخش آزمون‌های تجربی مورد استفاده قرار گرفته است. اندازه عیب به‌دست آمده به روش برش‌نگاری در زوایای مختلف، متفاوت می‌باشد که برای کاهش خطای آن از اندازه برش اصلاحی معرفی شده استفاده شده است. بدین ترتیب مقادیر تخمینی اندازه عیوب در زوایای مختلف اصلاح می‌گردد و به مقدار واقعی نزدیک‌تر می‌شوند. نتایج نشان‌دهنده افزایش دقت اندازه‌گیری عیوب با به‌کارگیری اندازه‌برش اصلاح شده می‌باشد که از آن می‌توان به عنوان معیاری برای تخمین کمی عیوب در سطوح منحنی استفاده کرد. این افزایش دقت، برای اندازه برش‌های کمتر از 10



- [10] R. M. Groves, S. W. James, and R. P. Tatam, Pipe weld investigation using shearography, *Strain*, Vol. 39, No. 3, pp. 101–105, 2003, doi: 10.1046/j.1475-1305.2003.00071.x.
- [11] R. M. Groves, S. W. James, and R. P. Tatam, Full surface strain measurement using shearography, *In Optical Diagnostics for Fluids, Solids, and Combustion*, Vol. 4448, no. November, p. 142, 2001, doi: 10.1117/12.449371.
- [12] R. M. Groves, S. W. James, and R. P. Tatam, Shape and slope measurement by source displacement in shearography, *Optics and lasers in Engineering*, Vol. 41, No. 4, pp. 621–634, 2004, doi: 10.1016/S0143-8166(02)00177-X.
- [13] A. G. Anisimov and R. M. Groves, 3D shape shearography with integrated structured light projection for strain inspection of curved objects, *Optical Measurement Systems for Industrial Inspection IX*. Vol. 9525, p. 952517, 2015, doi: 10.1117/12.2184058.
- [14] K. S. Kang, K. S. Kim, H. C. Jung, and H. S. Jang, Influence of Shearing Amount on Detecting Crack-Shaped Internal Defect by Shearography, *Key Engineering Materials*, Vol. 321–323, pp. 112–115, 2006, doi: 10.4028/www.scientific.net/kem.321-323.112.
- [15] F. Michel, V. Moreau, V. Rosso, S. Habraken, and B. Tilkens, Quantification of defect size in shearing direction by shearography and wavelet transform, *In Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V*, 2007, Vol. 6616, p. 661636.
- [16] S. S. Farshi and D. Akbari, Application of Laser Shearing Interferometry in Non-Destructive Inspection and Size Estimation of Plane Defects pp. 1–14, 2020, doi: *Journal of Solid and Fluid Mechanics*, 2019. (in persian فارسی)
- Engineering*, Vol. 61, pp. 14–18, 2014, doi: 10.1016/j.optlaseng.2014.04.015.
- [3] Q. Kemao, H. Wang, and W. Gao, Windowed Fourier transform for fringe pattern analysis: Theoretical analyses, *Applied Optic*, Vol. 47, No. 29, pp. 5408–5419, 2008, doi: 10.1364/AO.47.005408.
- [4] Q. Zhao, X. Dan, F. Sun, Y. Wang, S. Wu, and L. Yang, Digital shearography for NDT: Phase measurement technique and recent developments, *Applied Science*, Vol. 8, No. 12, 2018, doi: 10.3390/app8122662.
- [5] D. Francis, R. P. Tatam, and R. M. Groves, Shearography technology and applications: A review, *Measurement Science and Technology*, Vol. 21, No. 10, 2010, doi: 10.1088/0957-0233/21/10/102001.
- [6] K.-S. Kim, Quantitative Evaluation of a Crack Inside of Pressure Pipeline by Shearography and ESPI, *In AIP Conference Proceedings*, no. March 2003, pp. 939–946, 2003, doi: 10.1063/1.1570235.
- [7] K. Kim, D. Jung, H. Chang, and H. Jung, Measurement of defect size and location of wall thinned pipe using ESPI and shearography, *In Fourth International Conference on Experimental Mechanics*, Vol. 7522, p. 75224U, 2009, doi: 10.1117/12.851607.
- [8] W. S. Wan Abdullah, M. Y. Yusof, A. N. Ahmad Puad, and M. E. Hoque, Potential application of laser shearography for analysis of corrosion in petroleum pipeline, *In ICEM 2008: International Conference on Experimental Mechanics*, Vol. 7375, No. 2, p. 73753X, 2008, doi: 10.1117/12.839272.
- [9] L. M. Lobanov, V. A. Pivtorak, I. V. Kyyanets', and O. M. Savyts'ka, Nondestructive testing of composite and metallic pipes by the method of electronic shearography, *Materials Science*, Vol. 43, No. 4, pp. 522–527, 2007, doi: 10.1007/s11003-007-0060-x.