بیستمین کنفرانس اپتیک و فوتونیک ایران
و ششمین کنفرانس مهندسی و فناوری فوتونیک ایران
۸ تا ۱۰ بهمن ماه۱۳۹۲ - دانشگاه صنعتی شیراز

نمایه‌سنجی سه‌بعدی و اندازه‌گیری غیرمخرب جابه‌جایی‌های خارج صفحه‌ای در بارگذاری خمشی با استفاده از ماره افکنشی دیجیتالی

پگاه عسگری[۱]، یوسف پورویس بهراموندی[۲]، علیرضا مرادی[۱،۳] و امید رحمانی[۲]

[۱] گروه فیزیک، دانشکده علوم، دانشگاه زنجان، زنجان
[۲] گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه زنجان، زنجان
[۳] پژوهشکده اپتیک و فوتونیک، دانشگاه تحصیلات تکمیلی علوم پایه، زنجان

چکیده - در این مقاله با استفاده از تحلیل تصاویر انحراف یافته فریز های ماره افکنشی دیجیتالی ناشی از تغییرات خارج صفحه ای و پستی و بلندی های نمونه و به دست آوردن اختلاف فاز، روش جدیدی برای تحلیل رفتار سازه تحت بار گذاری معرفی شده است. تیر آلومینیومی و باریکه کامپوزیتی به عنوان نمونه مورد استفاده قرار گرفته اند. اختلاف فاز تصاویر حاصل به کمک رایانه و با توجه به هندسه‌ی چیدمان به تغییرات خارج صفحه‌ای تبدیل می‌شودو می‌توان از آن میزان کرنش را به دست آورد. برتری این روش در عدم نیاز به تجهیزات پیچیده، سرعت در پردازش نتایج، حجم بالای اطلاعات بدست آمده از نمونه، غیر مخرب بودن، توانایی انجام آن در دماهای بسیار بالا و همین طور امکان اتوماتیک کردن سیستم برای مانیتورینگ سازه ها می‌باشد.

کلید واژه- ماره ی دیجیتالی، ماره ی افکنشی، آزمون غیرمخرب، نمایه سنجی سه بعدی، تغییرات خارج صفحه ای

Three-dimensional profilometry and non-destructive measurement of out-of-plane deflection under bending by digital projection moiré

Pegah Asgari[1],Yousef Pourvais[2], Ali-Reza moradi[1,3], Omid Rahmani[2]

[1] Department of Physics, University of Zanjan, PO Box 45195-313, Zanjan, Iran
[2] Department of Mechanical engineering, University of Zanjan, PO Box 45195-313, Zanjan, Iran
[3] Optics Research Center, Institute for Advanced Studies in Basic Sciences, PO Box 45137-66731, Zanjan, Iran

In this paper, we developed a method to analyze of mechanical structures. The method is based on determination of phase difference of digital projection moiré fringes due to out-of-plane displacements or three dimensional profile of the sample. Buckling of glass/polyester composite column and bending deflection of aluminum beam has been studied by the technique. The image process session including generation and phase analysis of moiré fringes has all been done digitally and the results can lead to three dimensional information of the specimen surface. Simple equipment, fast data process, enormous amount of measured information from specimen, non-destructivity, capability to be used at high temperatures, and the ability of automated measurement for system health monitoring are the main advantages of the method.

Keywords: Digital moiré, Projection moiré, Non-destructed test, 3D profilometry, Out-of-plan deflection

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

۱- مقدمه

پدیده ی ماره نخستین بار در سال ۱۸۸۷ برای اولین بار ماره را به عنوان روشی برای اندازه گیری جا به جایی های کوچک معرفی کرد [۱]. از اوایل دهه ی ۱۹۷۰ به ویژه در دهه اخیر، از تکنیک ماره به خاطر ارزان بودن، دقیق بودن و کارایی در بسیاری از آزمون ها استفاده شده است. از جمله می‌توان به اندازه گیری زاویه و فاصله، تنش، کرنش، خزش گرمایی، آزمون کروی بودن سطوح آینه های کروی، اندازه گیری ابیراهی قطعات اپتیکی، پیدا کردن مدهای نوسانی سازه های بزرگ مانند پل ها و غیره اشاره کرد [۲]. مهم ترین مزیت روش ماره بر روش های مکانیکی، خاصیت تمام نگاری اطلاعاتی از قبیل میدان کرنش، انعطاف پذیری و دقت بالای این روش است [۳].

تاکدا نخستین کسی بود که تکنیک افکنش توری بر روی نمونه را برای توپوگرافی ابداع کرد [۴]. وی با استفاده از تکنیک فوریه [۵]، فاز تصاویر را بدست آورده و با استفاده از اختلاف فاز تصویر مرجع و نمونه، مدل سه بعدی توپوگرافیک نمونه را تشکیل داد. استفاده از تکنیک فوریه، مستلزم تعریف یک فیلتر حوزه فرکانس، برای هر نمونه به طور خاص است که علاوه بر نیاز به دخالت کاربر در هر مرحله از تحلیل، خطاهای قابل توجهی مخصوصا در جا به جایی های کوچک پدید می‌آورد. در این مقاله، به جای استفاده از تکنیک فوریه از روش ماره دیجیتالی و جابه جایی فاز برای تحلیل تصاویر مرجع و نمونه استفاده شده است که علاوه بر امکان اندازه گیری جا به جایی های کوچکتر، نیازی به تعریف فیلتر فرکانسی مخصوص و در نتیجه دخالت کاربر ندارد و لذا امکان اتوماتیک کردن سیستم آزمون را به وجود می آورد.

۲-ماره و ماره دیجیتالی افکنشی

وقتی دو ساختار تناوبی یا شبه تناوبی روی هم قرار بگیرند، طرح جدیدی شامل نوارهای تاریک و روشن به وجود می آید که فریزهای ماره نامیده می شود. با توجه به نوع ساختارهای مورد استفاده و نحوه ی جابه جایی آن ها نسبت به هم، شکل فریزهای ماره ی ایجاد شده نیز متفاوت خواهد بود. الگوی ساده ی طرح ماره را می توان در هنگام قرار دادن دو توری بر روی هم که شامل خطوط دوره ای موازی هستند مشاهده کرد. فاصله ی بین خطوط ماره بسیار بزرگ تر از دوره ی تناوب خطوط دو توری است. در روش ماره دیجیتالی، توری مرجع با استفاده از رایانه ساخته شده و استفاده می شود. تصویر خطوط کسینوسی که برای توری نمونه ساخته شده است و روی نمونه تابانده شده، نیز توری نمونه است که با جابه جایی نمونه تغییر خواهد کرد. با استفاده از دوربین از سطح نمونه با هر جابه جایی یک عکس گرفته می‌شود. عکس های گرفته شده در رایانه بابهره گیری از نرم افزارهای مخصوص با توری مرجع برهم نهی شده و تصویر نهایی طرح ماره ی این دو را نشان خواهد داد. باید توجه داشت که توری مرجع باید تفاوتی در اندازه ی گام و یا زاویه ی خطوط با توری نمونه داشته باشد. در تحلیل این روش در واقع هنگام عکس برداری و برهم نهی توری تصویر یا نمونه با توری مرجع، درحال رمزگذاری روی کانتورها هستیم و برای تحلیل و به دست آوردن اطلاعات فازی تصویر از آن ها رمزگشایی می‌کنیم.

۳- چیدمان آزمایش و روش کار

مراحل تصویر گیری برای به دست آوردن مقدار خمش و همین طور واکنش جسم تحت بارگذاری به این صورت است که از جسم و تیر تحت بار گذاری در زمان های منظم تصویر گرفته می شود و توری تابانده شده روی آن جابه جا می‌شود. تابع شدت هر کدام از طرح های توری مرجع و توری نمونه، خطوط کسینوسی خواهد بود. برای توری مرجع خواهیم داشت:

$$y = a_0 + b\cos\left(\frac{2\pi}{p_r}y\right) \qquad (۱)$$

که در آن p_r گام توری مرجع است و a_0 شدت تابش زمینه و y فاصله از مبدا مختصات در جهت $\hat{j}$ است. البته باید توجه داشت که چون توری مرجع به اندازه ی زاویه ی α در جهت عقربه های ساعت چرخانده شده است، در نتیجه تابع عبور شدت به صورت زیر تغییر می‌کند:

$$y' = x\sin\alpha + y\cos\beta \qquad (۲)$$

$$\begin{aligned} T_r &= a_0 + b\cos(x\sin\alpha + y\cos\beta) \\ &= a_0 + b(\varphi_r) \end{aligned} \qquad (۳)$$

فرض کنید توری نمونه به صورت یک طرح تناوبی کسینوسی بررسی شود. در این صورت، برای برهم نهی

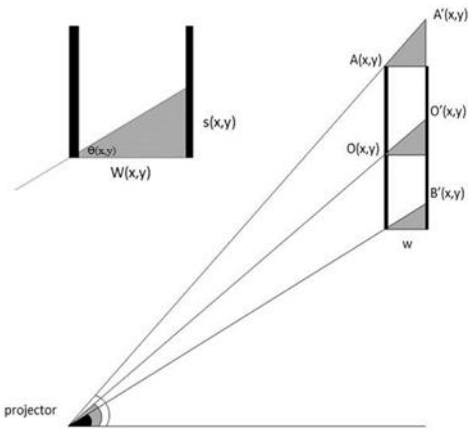
[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]

این طرح، با طرح تناوبی توری مرجع، باید توابع شدت آنها در یکدیگر ضرب شود. تابع شدت توری نمونه که همان تصویر توری است که بر سطح جسم تابیده می‌شود باید بر محور های اصلی x و y منطبق باشد. اما گام و فاز اولیه ی آن در هر نقطه متفاوت فرض می‌شود. بدین وسیله می‌توان گفت در تاباندن توری بر روی جسم هیچ گونه محدودیتی وجود ندارد.

$$\begin{aligned}&\cos\varphi_r\cos\varphi_s=\frac{1}{2}[\cos(\varphi_r+\varphi_r)+\cos(\varphi_r-\varphi_r)]\\&T_rT_s=a_0a_0'(x,y)+a_0b'(x,y)\cos\varphi_s+\\&a_0'(x,y)b\cos\varphi_r+\frac{bb'(x,y)}{2}\\&[\cos(\varphi_s+\varphi_r)+\cos(\varphi_s-\varphi_r)]\end{aligned}\qquad(۴)$$

اگر با استفاده از تبدیل فوریه، فرکانس های بالا فیلتر شود، جمله ی دوم باقی می‌ماند که نمایانگر فریزهای ماره است.

$$\begin{aligned}&T_rT_s=a_0a_0'(x,y)+\frac{bb'(x,y)}{2}\cos(\varphi_r-\varphi_s)=\\&a_0''(x,y)+\frac{b''(x,y)}{2}\cos(\phi_m(x,y))\end{aligned}\qquad(۵)$$



شکل ۱- هندسه چیدمان ماره افکنشی

چیدمان کلی سیستم اندازه گیری در شکل ۱ نشان داده شده است. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود، ابتدا الگوی خطوط موازی بر روی نمونه افکنده می‌شود. در این خطوط به دلیل تابش مایل پرتوها به سطح نمونه، جابه جایی جسم در جهت z باعث جابه جایی تک تک نقاط تصویر روی جسم می‌شود. مقدار این جابه‌جایی برای نقاط مختلف تصویر، بسته به هندسه ی چیدمان متفاوت خواهد بود. اگر جابه جایی هر نقطه از جسم را با w، جابه جایی تصویر در هر نقطه را با s و زاویه ی تابش را در هر نقطه با Θ نمایش دهیم، در این صورت خواهیم داشت:

$$w(x,y)=\frac{s(x,y)}{\tan\theta}\qquad(۶)$$

با به دست آوردن اختلاف فاز دو تصویر گرفته شده از نمونه طی مراحل بارگذاری و یا طی روند جابه جایی خارج صفحه ی نمونه، می‌توان مقدار جابه جایی تصویر دوم نسبت به تصویر اول را به دست آورد:

$$s(x,y)=\frac{p_s(x,y)\Delta\psi(x,y)}{2\pi}\qquad(۷)$$

برای به دست آوردن اطلاعات فازی تصویر، می‌توان از چند روش گوناگون استفاده کرد، از جمله روش فوریه و روش جابه‌جایی فاز. روش فوریه، برای به دست آوردن تفاوت های گسسته ای که در تصویر وجود دارد، و روش جابه جایی فاز برای تغییراتی که در تصاویر به صورت پیوسته به وجود می آید، مناسب تر است. مثلا در روش پیشنهادی این مقاله، روش فوریه را برای مشاهده و اندازه گیری شکستگی های روی اجسام و روش جابه جایی فاز را برای خمیدگی های آن می‌توان به کار برد.

برای روش جابه جایی فاز باید فاز تصویر را در حداقل سه مرحله به قدر دل خواه جابه جا کرد. در این مقاله، هر بار تصویر توری مرجع به اندازه ی $\frac{\pi}{2}$ در جهت انتشار توری جابه جا می شود و فاز تصویر از طریق زیر به دست می آید:

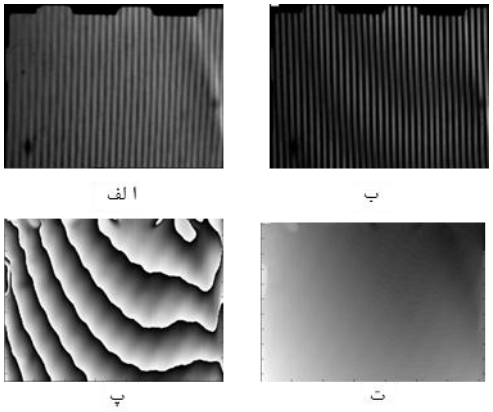
$$\phi_m(x,y)=\arctan\left(\frac{I_4-I_2}{I_3-I_1}\right)\qquad(۸)$$

که I_1 تا I_4 شدت تصاویر در هر مرحله جابه‌جایی فاز اند. در این روش می توان با استفاده از نرم افزار MATLAB تصاویر را جابه جا کرد و به کار بست.

برای به دست آوردن جابه‌جایی‌ها و تغییرات خارج صفحه ای، تصاویر به دست آمده از تحلیل فریزها با استفاده از الگوریتم پیوسته سازی به فاز پیوسته تبدیل می‌شود. مراحل تحلیل و بررسی فریزها در شکل ۲ نشان داده شده است.

در این مقاله برای صحت سنجی روش مورد استفاده، شعاع انحنای یک استوانه ی فولادی اندازه گیری شده

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]



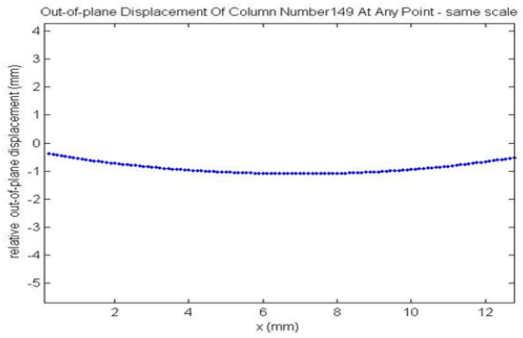
شکل ۲- تکنیک جا به جایی فاز. تصویر اولیه نمونه (الف)برهم نهی توری مجازی و ایجاد ماره دیجیتالی (ب) نقشه فازی گسسته (پ) نقشه فازی پیوسته (ت)

است. توری یک بار به یک صفحه تخت افکنده شده و تصویر اول (مرجع) بدست می‌آید. سپس همان توری بر روی سطح استوانه ای افکنده شده و تصویر دوم (نمونه) گرفته می‌شود. با استفاده از اختلاف فاز دو تصویر، میزان جابه جایی خارج از صفحه ی نسبی دو تصویر که همان نمایه ی سطح استوانه ای است بدست می‌آید و از طریق نمایه ی سطح شعاع انحنا محاسبه می شود. قطر واقعی استوانه‌ی نمونه برابر با ۶۱٫۷۸ mm می باشد و قطر ثبت شده با استفاده از تکنیک ماره برابر با ۶۲٫۶۶ mm بدست آمد.

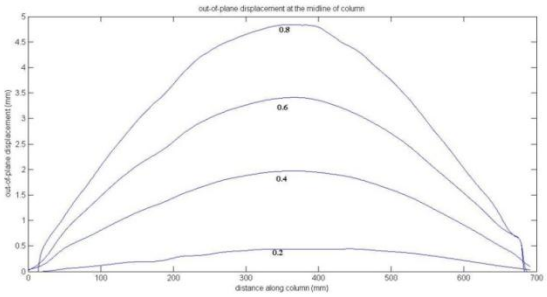
در ادامه در آزمایش اصلی، جا به جایی خارج صفحه ای خط میانی باریکه کامپوزیتی تحت چهار مرحله بارگذاری فشاری بدست آمده است. قطعه مورد مطالعه از جنس الیاف شیشه/پلی‌استر با توزیع تصادفی الیاف در سه بعد می باشد. همانطور که در شکل ۴ مشهود است، در فاصله ی بین بار ۰٫۲ و ۰٫۴ میلیمتر، جا به جایی در ستون افزایش ناگهانی داشته است که این پدیده نشان دهنده افت ناگهانی خواص سازه درحین افزایش بار و وقوع کمانش در باریکه مورد مطالعه است.

۴-نتیجه گیری

نتایج آزمایش های ارائه شده در این مقاله نشان می‌دهند روش ماره افکنشی دیجیتالی روشی مطمئن برای اندازه گیری جابه‌جایی های خارج صفحه ای در سازه های مختلف می‌باشد. به ویژه به دلیل حساسیت پایین به



شکل۳-نمودار مربوط به قطر استوانه با استفاده از ماره



شکل ۴-نتایج آزمایش بارگذاری فشاری روی ستون کامپوزیتی

ارتعاش و انعطاف پذیری بالا در نحوه چینش، می‌تواند به عنوان گزینه‌ی خوبی برای مانیتورینگ سازه ها، به ویژه سازه هایی که در شرایط سخت استفاده می‌شوند، مطرح باشد.

مراجع

[1]J. H. Bruning, D. R. Herriott, J. E. Gallagher, D. P. Rosenfeld, A. D. White, D. J. Brangaccio, Digital Wave front Measuring Interferometer for Testing Optical Surfaces and Lenses, Appl. Opt., 13 (1974) 2693-2703.

[2] C. A. Walker, Handbook of Moiré Measurement, Institute of Physics Publishing, 2004.

[3] C. Badulescu, C. M. Grédiac, J. D. Mathias, D. Roux, A Procedure for Accurate One-Dimensional Strain Measurement Using the Grid Method, Experimental Mechanics, 49 (2009) 841–854.

[4] M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi, Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry, J. Opt. Soc. Am., 72 (1982) 156-160.

[5] M. Takeda, H. Ina, S. Kobayashi, Fourier-transform method of fringe-pattern analysis for computer-based topography and interferometry, J. Opt. Soc. Am., 72 (1982) 156-160.

[6] R. S. Sirohi, Optical methods of measurement: Wholefield techniques, 2nd ed., CRC Press, 2009.

[Downloaded from opsi.ir on 2025-12-08]