

## اندازه‌گیری کرنش با روش تداخل‌سنجی چینی دیجیتال و با الگوریتم جدید محاسبه فاز

رسول محرمی<sup>۱\*</sup>، احمد درودی<sup>۲</sup>، محمدجواد تقیلو<sup>۱</sup>

<sup>۱</sup>دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

<sup>۲</sup>دانشکده فیزیک، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

### تاریخچه داوری:

دریافت: ۳ اسفند ۱۳۹۴  
بازنگری: ۱۷ خرداد ۱۳۹۵  
پذیرش: ۲۷ تیر ۱۳۹۵  
ارائه آنلاین: ۲۶ مرداد ۱۳۹۵

### کلمات کلیدی:

اندازه‌گیری کرنش  
تداخل‌سنجی لک‌ویسی  
تداخل‌سنجی چینی دیجیتال  
تکنیک تغییر فاز

**چکیده:** در این مقاله از روش تداخل‌سنجی لک‌ویسی چینی دیجیتال برای محاسبه کرنش استفاده شده است. یک تصویر قبل از بارگذاری و چهار تصویر بعد از بارگذاری به روش تغییر فاز، ثبت شده است. با کم کردن شدت اولیه از چهار شدت بعد از بارگذاری، چهار شدت جدید بدست می‌آید که از روی آنها فاز محاسبه و کرنش از روی فاز بدست می‌آید. برای انجام این کار از سیستم اصلاح شده مایکلسون به عنوان ابزار چینی استفاده شده است. قطعه مورد آزمایش یک صفحه آلومینیومی با ابعاد  $1 \times 35 \times 35$  میلی‌متر می‌باشد که از چهار طرف گیردار بوده و در مرکز صفحه تحت جابجایی نقطه‌ای قرار دارد. برای اعمال جابجایی، فیکسچری ساخته شد که توانایی اعمال جابجایی‌های بیشتر از ۳ میکرون را داشت. از دو لیزر دیودی با طول موج ۶۳۰ نانومتر به عنوان منبع نور برای تابش روی قطعه از دو زاویه‌ی یکسان و متقابل استفاده شد. با توجه به اینکه در اندازه‌گیری تجربی شرایط واقعی بوده ولی در تحلیل عددی شرایط ایده‌آلی در نظر گرفته شده، رفتار دو نمودار حاصل از اندازه‌گیری تجربی و تحلیل عددی تقریباً یکسان می‌باشد، در بخش تحلیل خطا، خطای نسبی ناشی از عوامل تاثیرگذار در اندازه‌گیری تجربی محاسبه شده و حدود ۱۸ درصد حاصل گردیده است.

### ۱- مقدمه

تداخل‌سنجی چینی<sup>۱</sup> دیجیتالی که الگوی چینی تداخلی لک‌ویسی<sup>۲</sup> دیجیتالی (DSPSI<sup>۳</sup>) نیز نامیده می‌شود، یک روش نوری هم‌دوس<sup>۴</sup> همراه با پردازش دیجیتالی تصویر می‌باشد. نظریه نوری برای تداخل‌سنجی چینی دیجیتالی و تداخل‌سنجی چینی فوتوگرافی یکسان می‌باشد؛ اما از نظر تکنیکی تداخل‌سنجی چینی دیجیتالی یک فرآیند کامپیوتری است که فرآیند ظاهرسازی را حذف می‌نماید. این باعث افزایش سرعت آزمایش شده که شیروگرام<sup>۵</sup> می‌تواند در زمان-واقعی<sup>۶</sup> مشاهده شود. با استفاده از تکنیک تغییر فاز، تداخل‌سنجی چینی دیجیتالی به شیروگرام اجازه می‌دهد تا به صورت خودکار و عددی محاسبه شود [۱]. این امکانات جدیدی را برای کاربردهای تداخل‌سنجی چینی در صنعت فراهم می‌نماید. یک روش برای به‌دست آوردن کرنش درون صفحه‌ای استفاده از دو جهت مستقل خطی تابش (معمولاً دارای زوایای یکسان متقابل) می‌باشد. شیروگرام‌ها برای هر دو جهت تابش با استفاده از تکنیک تغییر فاز<sup>۷</sup> به‌دست می‌آید [۲، ۳]. نتیجه

کم کردن نقشه فاز دو شیروگرام یک الگوی فریز<sup>۸</sup> جدیدی را می‌دهد که نشان‌دهنده مؤلفه کرنش درون صفحه‌ای می‌باشد و نتیجه افزودن نقشه فاز دو شیروگرام، الگوی فریز شیب می‌باشد؛ بنابراین، مؤلفه درون صفحه‌ای کرنش می‌تواند بدون دیفرانسیل‌گیری عددی از داده‌های جابه‌جایی، به طور مستقیم به‌دست آید.

### ۲- مبانی تداخل‌سنجی چینی دیجیتال

سامانه تجربی برای تداخل‌سنجی چینی دیجیتالی در شکل ۱ (الف)، (ب) و (پ) نشان داده شده است. نمونه مورد آزمایش با استفاده از پرتو نور گسترده مورد تابش قرار می‌گیرد. نور منعکس شده از سطح قطعه در صفحه عکس یک دوربین CCD<sup>۹</sup> متمرکز می‌شود؛ بنابراین یک جفت تصویر چینی‌یافته<sup>۱۰</sup> به صورت افقی از نمونه مورد آزمایش روی صفحه تصویر دوربین CCD با تغییر خیلی کوچک زاویه آینه شماره ۱ از حالت عمودی "شکل (پ)" به‌دست می‌آید. با تداخل دو تصویر چینی‌یافته الگوی لک‌ویسی تولید می‌شود. توزیع شدت  $I(x, y)$  الگوی لک‌ویسی به صورت زیر داده می‌شود:

$$I(x, y) = I_0 [1 + \gamma \cos \phi(x, y)] \quad (۱)$$

- 1 Shearography
- 2 Speckle
- 3 Digital Speckle Pattern Shearing Interferometry
- 4 Coheren
- 5 Shearogram
- 6 Real-Time
- 7 Phase shifting technique

- 8 Fringe
- 9 Charge-Coupled Device
- 10 Sheared

می‌دهد؛ یعنی اصطلاح "شیروگرام دیجیتال" که تغییر فاز نسبی  $\Delta$  همزمان روی مانیتور نشان داده می‌شود [۲].

نشان داده شده است [۳] که تغییر فاز نسبی  $\Delta$  با مشتقات جابه‌جایی به‌جای خود جابه‌جایی توسط رابطه چینی تداخل‌سنجی چینی مرتبط است. اگر چینی در جهت  $x$  باشد،  $\Delta$  از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$\Delta_x = \left( \frac{\partial u}{\partial x} k_x e_x + \frac{\partial v}{\partial x} k_y e_y + \frac{\partial w}{\partial x} k_z e_z \right) \delta x \quad (3)$$

و اگر جهت چینی در راستای  $y$  باشد، معادله (۳) به صورت زیر خواهد بود:

$$\Delta_y = \left( \frac{\partial u}{\partial y} k_x e_x + \frac{\partial v}{\partial y} k_y e_y + \frac{\partial w}{\partial y} k_z e_z \right) \delta y \quad (4)$$

که  $v$ ،  $u$  و  $w$  به ترتیب مؤلفه‌های بردار جابه‌جایی در جهت  $y$ ،  $x$  و  $z$  می‌باشند؛  $e_x$ ،  $e_y$  و  $e_z$  بردارهای واحد در جهات  $x$ ،  $y$  و  $z$  بوده و  $\delta x$  و  $\delta y$  مقادیر چینی در جهت  $x$  و  $y$  می‌باشند؛  $k_x$  بردار حساسیت می‌باشد. نشان داده شده است [۳] که بردار حساسیت نیمساز زاویه بین پرتو تابش و بازتابش (شکل ۱ الف)) است.

در کل، سه مجهول در توزیع شدت در معادله (۱) وجود دارد که عبارتند از:  $I_0$ ،  $\gamma$  و  $\phi$ ؛ بنابراین، حداقل سه اندازه‌گیری برای تعیین زاویه فاز نسبی نیاز می‌باشد. برای هر شدت ثبت شده یک افزایش ۱۲۰ درجه (برای سه اندازه‌گیری) یا ۹۰ درجه (برای چهار اندازه‌گیری) فاز برای یک پرتو در تداخل‌سنج مایکلسون تغییر داده می‌شود. از ولتاژ متغیر بدین منظور استفاده شده است. تحلیل سه (یا چهار) الگوی شدت سه (یا چهار) معادله تولید می‌کند؛ بنابراین، توزیع زاویه فاز نسبی  $\phi$  می‌تواند از روی شدت‌های ثبت شده در بالا محاسبه شود [۵].

$$\phi = \arctan \frac{\sqrt{3}(I_3 - I_2)}{2I_1 - I_2 - I_3} \quad (5)$$

(برای سه اندازه‌گیری شدت)

$$\phi = \arctan \frac{(I_4 - I_2)}{(I_1 - I_3)} \quad (6)$$

(برای چهار اندازه‌گیری شدت)

وقتی نمونه تغییر شکل پیدا می‌کند، سه (یا چهار) فریم اضافی از شدت ثبت می‌شود؛ در حالی که مثل حالت اول تغییر فاز برای همان داده‌ها انجام می‌شود. توزیع فاز  $\phi'$  الگوی تداخلی بعد از تغییرات هم، شبیه  $\phi$  به‌دست می‌آید.

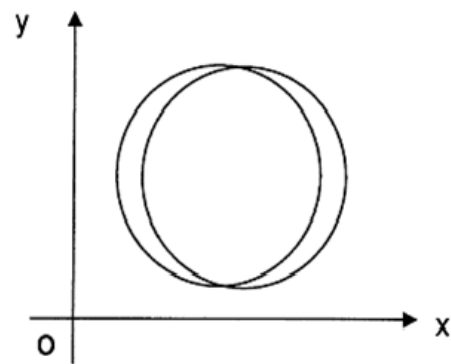
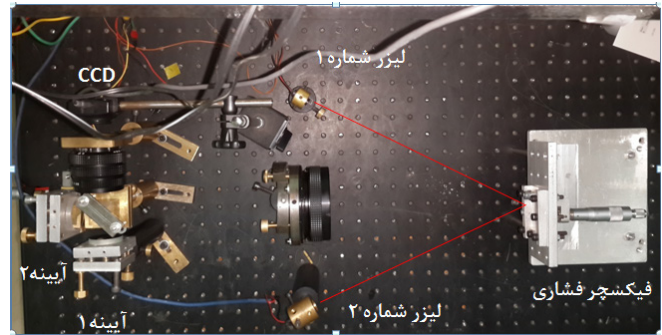
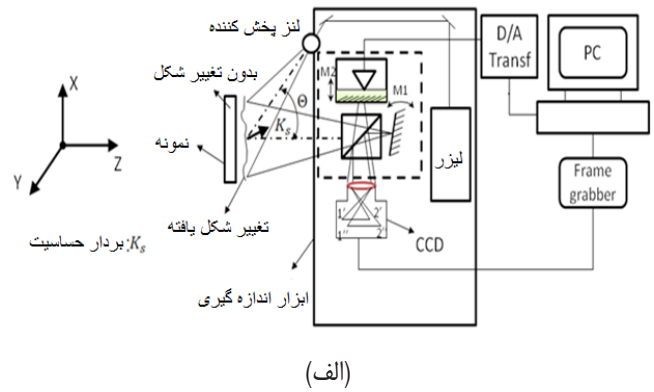


Fig. 1. Principle of digital shearography method[1]: (a): Experimental setup, (b): The system used to measure strain, (c): Two arranged photos in X direction.

شکل ۱: اصول تداخل‌سنجی چینی دیجیتالی: (الف): سامانه تجربی، (ب): سامانه مورد استفاده برای اندازه‌گیری کرنش، (پ): دو عکس چینی یافته در جهت  $x$

که  $I_0$  نشان‌دهنده شدت متوسط این دو موج نوری چینی یافته است،  $\gamma$  مدول ترم تداخل و  $\phi(x,y)$  زاویه فاز نسبی تصادفی بین دو عکس چینی‌یافته قبل از تغییر شکل نمونه می‌باشد. زمانی که نمونه تحت تغییر شکل قرار می‌گیرد، توزیع شدت الگوی لک‌وپیسی خیلی کم تغییر می‌کند:

$$I'(x, y) = I_0 [1 + \gamma \cos \phi'(x, y)] \quad (2)$$

این دو شدت توسط دوربین CCD ثبت می‌شود. حاصل تفریق بین اطلاعات حاصل‌گرفته از این دو عکس الگوی فریز را

### ۳- مواد و روش کار

با توجه به اینکه بارگذاری به صورت نقطه‌ای و در مرکز قطعه آلومینیومی گیردار از چهار طرف، با ابعاد  $35 \times 35 \times 1$  میلی‌مترمکعب می‌باشد و مقدار بارگذاری  $1/300\text{mm}$ ، حدود ۳ میکرون، می‌باشد. همچنین طول موج لیزرها  $630$  نانومتر و مقدار چینش در این آزمایش  $7$  میلی‌متر می‌باشد؛ برای اعمال جابه‌جایی‌های ریز و در حد  $3$  میکرون ابزار ثابتی برای این کار طراحی و ساخته شد که نقشه سه بعدی آن در شکل ۲ همراه با تصویر آن آورده شده است:

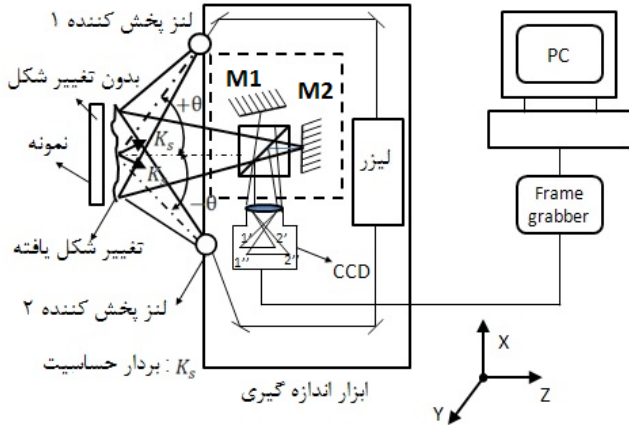


Fig. 3. Illumination of light from two equal and mutual angles[1].

شکل ۳: تابش نور از دو زاویه مساوی و متقابل [۱].

$$\begin{aligned} I_{33} &= 2I_0 [1 + \gamma \cos(\phi + 180^\circ)] \\ I_{44} &= 2I_0 [1 + \gamma \cos(\phi + 270^\circ)] \end{aligned} \quad (8)$$

سپس هرکدام از شدت‌های بعد از بارگذاری تک-تک از شدت قبل از بارگذاری کم می‌شوند و بدین طریق چهار شدت جدید به دست می‌آید:

$$\begin{aligned} I'_{11} &= |I_{11} - I_1| \\ I'_{22} &= |I_{22} - I_1| \\ I'_{33} &= |I_{33} - I_1| \\ I'_{44} &= |I_{44} - I_1| \end{aligned} \quad (9)$$

و با استفاده از این چهار شدت جدید و رابطه (۶) یک فاز به دست می‌آید:

$$\Phi = \frac{I'_{44} - I'_{22}}{I'_{33} - I'_{11}} \quad (10)$$

فاز حاصل گردیده از رابطه (۱۰) در رابطه (۱۱) حاصل از رابطه (۳) قرار داده می‌شود (برش در جهت  $x$  می‌باشد):

$$\Phi_{+\theta} = \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left[ \sin(+\theta) \frac{\partial u}{\partial x} + (1 + \cos(+\theta)) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (11)$$

همین مراحل برای لیزر با زاویه  $(-\theta)$  انجام شده و رابطه (۱۲) حاصل

می‌شود:

$$\Phi_{-\theta} = \frac{2\pi\delta x}{\lambda} \left[ \sin(-\theta) \frac{\partial u}{\partial x} + (1 + \cos(-\theta)) \frac{\partial w}{\partial x} \right] \quad (12)$$

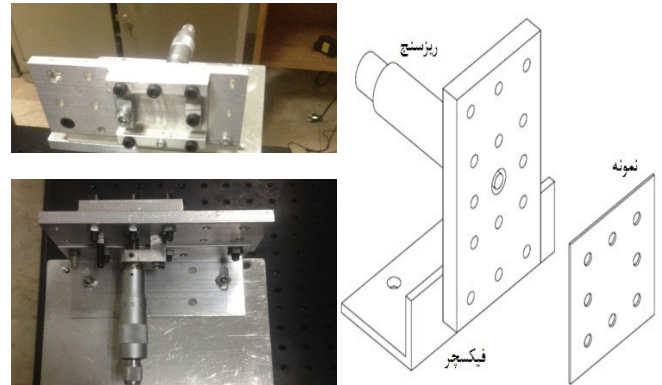


Fig. 2. The Fixture used to pressure loading at the center of the specimen.

شکل ۲: فیکسچر مورد استفاده برای اعمال نیروی فشاری در مرکز نمونه.

مقدار کرنش به روش تجربی تداخل‌سنجی چینشی محاسبه شده و با نتایج روش اجزا محدود مقایسه شده است.

یک روش ابتکاری در این کار برای محاسبه فاز استفاده شده که یک مرحله محاسبات را کوتاه‌تر نموده است و در ادامه به توضیح این روش ابتکاری می‌پردازیم.

همان‌طور که در بخش قبل توضیح داده شد، در روش سنتی ابتدا قبل از بارگذاری سه یا چهار تصویر از نمونه ثبت شده و از روی این تصاویر، فاز اولیه محاسبه می‌شود و سپس به نمونه بار اعمال شده و سه یا چهار تصویر دیگر با استفاده از روش تغییر فاز تهیه می‌گردد و از روی این تصاویر، فاز ثانویه محاسبه گردیده و در مرحله بعدی اختلاف فاز ثانویه و اولیه به دست می‌آید، همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، این کار برای دو لیزر با زوایای یکسان و متقابل انجام می‌شود و با استفاده از اختلاف فاز حاصل گردیده و روابط (۳) و (۴) مقدار کرنش درون صفحه‌ای و شیب محاسبه می‌گردد [۳]. اما روشی که در این مقاله استفاده شده است بدین صورت می‌باشد: ابتدا یک شدت قبل از بارگذاری ثبت می‌شود:

$$I_1 = 2I_0 [1 + \gamma \cos \phi] \quad (7)$$

و بعد از بارگذاری چهار تصویر با روش تغییر فاز ثبت می‌گردد:

$$I_{11} = 2I_0 [1 + \gamma \cos \phi]$$

$$I_{22} = 2I_0 [1 + \gamma \cos(\phi + 90^\circ)]$$

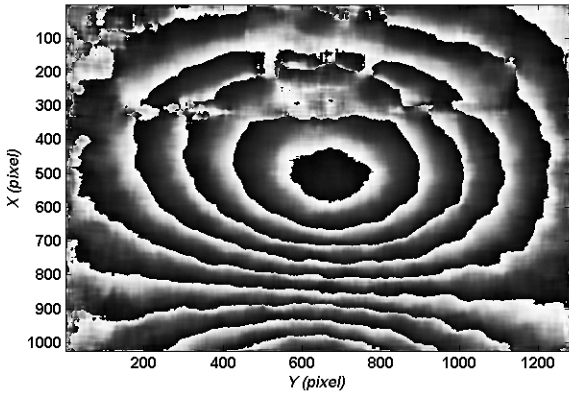
حداکثر کرنش در هر دو نزدیک عدد ۷ است.

#### ۴- تجزیه و تحلیل نتایج

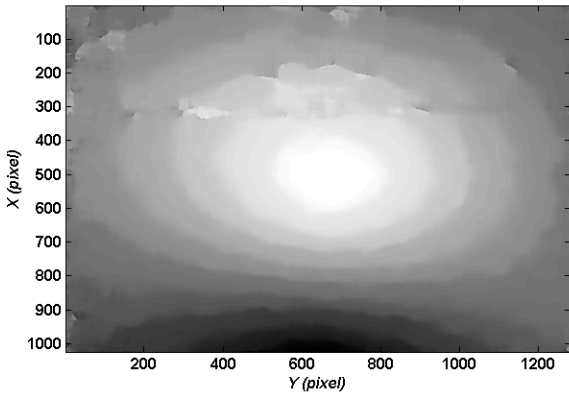
از روی پنج تصویر ثبت شده تانسور فاز به صورت شکل ۴ و با پیوسته‌سازی فاز پله-پله، تانسور فاز پیوسته در شکل ۴ (ب) و برای یکی از ستون‌های تانسور فاز پیوسته شده نمودار دو بعدی فاز در شکل ۴ (پ) حاصل گردیده است:

همین مراحل برای لیزر سمت چپ (در بارگذاری یکسان) نیز تکرار می‌شود و فازی که برای آن به دست می‌آید در شکل ۵ نشان داده شده است و با پیوسته‌سازی تانسور فاز پله-پله، تانسور فاز پیوسته برای لیزر شماره ۲ (سمت چپ)، مطابق شکل ۵ (ب) به دست می‌آید و برای یکی از ستون‌های تانسور فاز پیوسته شده نمودار دو بعدی فاز برای لیزر سمت چپ در شکل ۵ (پ) حاصل گردیده است:

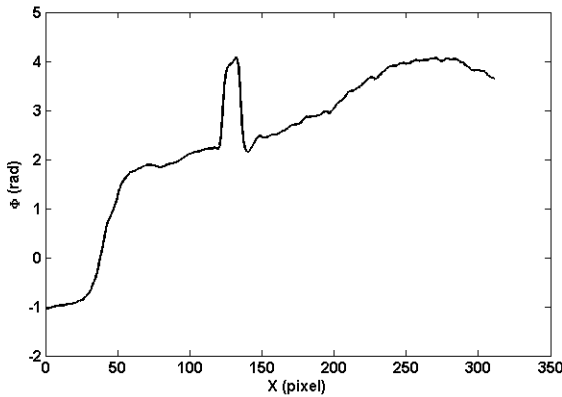
در شکل ۶ فاز حاصل از تابش دو لیزر در زوایای متقابل و مساوی و حاصل جمع و تفاضل آنها رسم شده است:



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 4. (a): Final phase tensor obtained from the images have been taken with laser 1 (right), discontinuous phase, (b): Final phase tensor obtained from the images have been taken with laser 1 (right), continuous phase, (c): 2D phase graph of continued phase tensor row=190-500 and column=400 have been taken with laser 1 (right).

شکل ۴: (الف): تانسور فاز نهایی حاصل گردیده از تصاویر گرفته شده با لیزر شماره ۱ (راست)، طرح گسسته فاز، (ب): تانسور فاز نهایی حاصل گردیده از تصاویر گرفته شده با لیزر شماره ۱ (راست) طرح پیوسته شده فاز، (پ): نمودار دو بعدی فاز برای سطر ۱۹۰ تا ۵۰۰ و ستون ۴۰۰ تانسور فاز پیوسته شده لیزر شماره ۲ (سمت راست).

#### ۴-۱- محاسبه تجربی کرنش درون صفحه‌ای خالص

با تفاضل دو رابطه (۱۱) و (۱۲) از همدیگر، رابطه (۱۳) حاصل می‌شود که کرنش خالص درون صفحه‌ای از روی آن به دست می‌آید:

$$\Phi_I = \Phi_{+\theta} - \Phi_{-\theta} = \frac{4\pi\delta x (\sin \theta)}{\lambda} \frac{\partial u}{\partial x} \quad (13)$$

با قرار دادن مقدار چینش ( $\delta x = 7\text{mm}$ )، طول موج لیزر ( $\lambda = 630\text{nm}$ )، زاویه تابش ( $\theta \approx 15^\circ$ ) و مقدار فاز حاصل گردیده از رابطه (۱۳) مقدار کرنش درون صفحه‌ای به صورت شکل ۷ به دست می‌آید.

#### ۴-۲- محاسبه اجزا محدود کرنش درون صفحه‌ای خالص

با در نظر گرفتن عدد ۷۰ گیگاپاسکال برای مدول الاستیک و عدد پواسون ۰/۳ برای قطعه آلومینیومی و اجزای مثلثی برای مش‌بندی، کرنش به صورت شکل ۸ محاسبه می‌شود.

#### ۴-۳- مقایسه نتایج حاصل از تحلیل تجربی و عددی

در این آزمایش اندازه‌گیری در جهت محور  $x$  قطعه با ابعاد  $1 \times 35 \times 35$  میلی‌متر مکعب انجام شده است، منطقه مورد بررسی (خط سفید روی تصویر) همان‌طور که در شکل ۹ نشان داده شده است، برای ستون ۴۰۰ و ردیف‌های ۱۹۰ تا ۵۰۰ تانسور فاز که حدود ۵ میلی‌متر می‌باشد، نمودار کرنش در این منطقه رسم شده است و نتایج حاصل از تحلیل اجزا محدود در شکل ۸ آمده است.

با مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی و تجربی دیده می‌شود که نتایج تحلیل اجزا محدود هم تقریباً و با درصد خطای خیلی کمی نتایج آزمایش تجربی را تأیید می‌کند و شکل ۱۰ مقایسه‌ای را بین این دو تحلیل انجام داده است.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود مرتبه هر دو اندازه‌گیری  $10^{-5}$  می‌باشد و



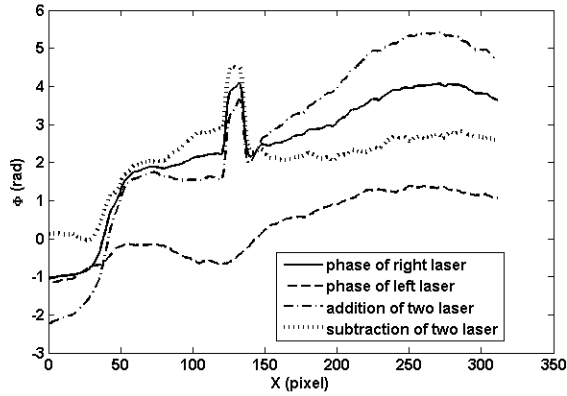


Fig. 6. Phase graph and addition/subtraction of both lasers.

شکل ۶: نمودار فاز برای هر دو لیزر و حاصل جمع و تفاضل آنها.

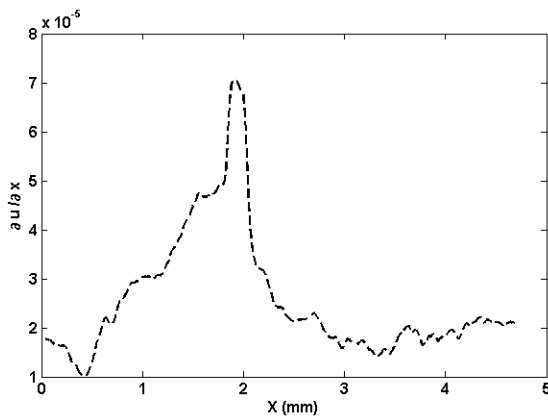


Fig. 7. Graph of the pure in-plane strain component ( $\partial u/\partial x$ ).

شکل ۷: نمودار مؤلفه درون صفحه‌ای کرنش ( $\partial u/\partial x$ )

#### ۴-۴- تحلیل خطا

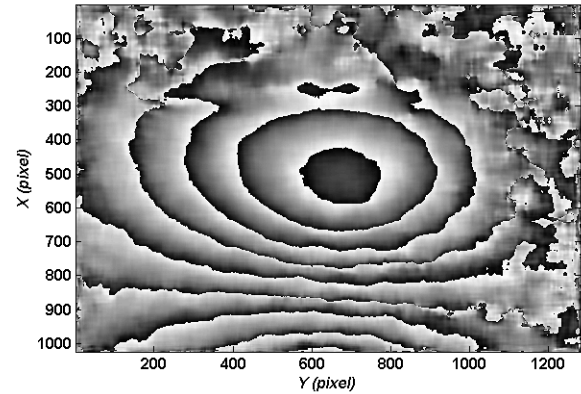
خطاهایی که در محاسبه کرنش می‌توانند تأثیرگذار باشند، عبارتند از:

- خطای محاسبه زاویه تابش لیزر
- خطای محاسبه مقدار چینش
- خطای ناشی از محاسبه فاز

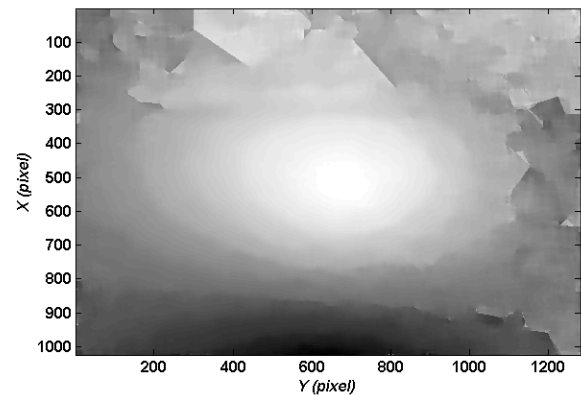
هر کدام از این خطاها و ترکیب آنها می‌تواند در شکل نمودار کرنش اثرگذار باشد؛ برای ترکیب خطاهای مثبت و منفی نمودار کرنش در شکل ۱۱ رسم شده و محدوده خطا با خط خطا مشخص شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، خطای نسبی اندازه‌گیری تجربی حدود ۱۸ درصد است.

#### ۵- نتیجه‌گیری

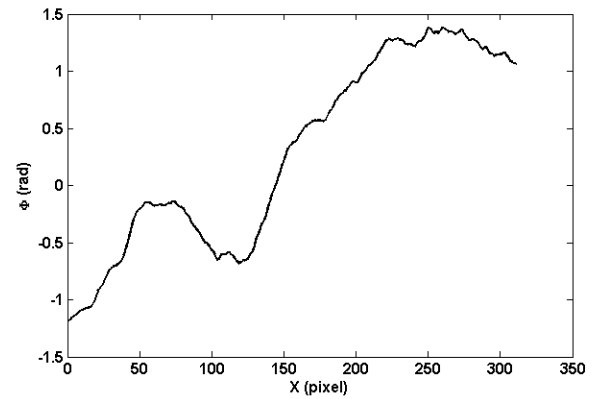
اندازه‌گیری کرنش با روش نوری تداخل سنجی چینی دیجیتال به دلیل اینکه به طور مستقیم کرنش اندازه‌گیری می‌گردد، حساسیت چندانی نسبت به ارتعاشات ندارد. حساسیت روش به مقدار بار اعمالی بالا می‌باشد؛ بدین صورت که با توجه به نوع لیزر مورد استفاده مقدار جابه‌جایی‌هایی قابل تشخیص توسط این روش تغییر می‌کند. هر چقدر طول موج لیزر بالا باشد قطعات با زبری سطح بالاتری را می‌شود مورد بررسی قرار داد.



(الف)



(ب)



(ج)

Fig. 5. (a): Final phase tensor obtained from the images have been taken with laser 1 (left), discontinuous phase, (b): Final phase tensor obtained from the images have been taken with laser 1 (left), continuous phase, (c): 2D phase graph of continued phase tensor row=190-500 and column=400 have been taken with laser 2 (left).

شکل ۵: (الف) تانسور فاز نهایی حاصل گردیده از تصاویر گرفته شده با لیزر شماره ۲ (چپ)، طرح گسسته فاز، (ب): طرح پیوسته شده فاز، (پ): نمودار دو بعدی فاز برای سطر ۱۹۰ تا ۵۰۰ و ستون ۴۰۰ تانسور فاز پیوسته شده لیزر شماره ۲ (سمت چپ).

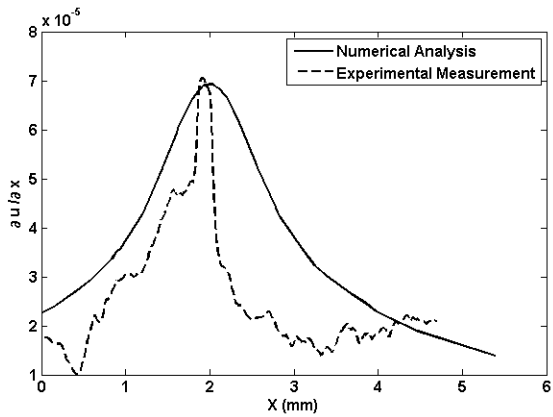


Fig. 10. Comparison of results obtained from numerical and experimental analyses.

شکل ۱۰: مقایسه نتایج حاصل از تحلیل عددی و تجربی.

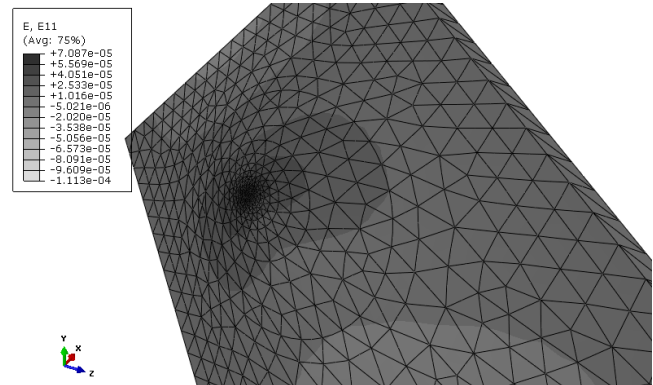
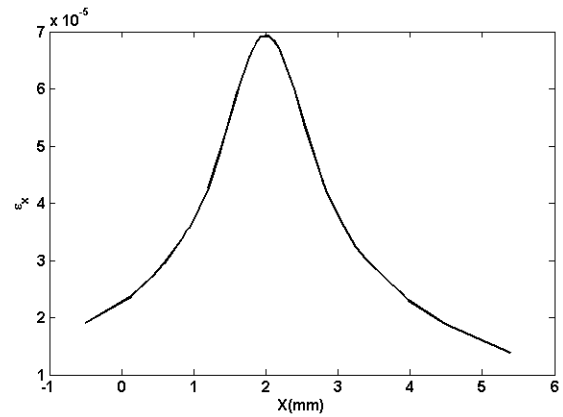


Fig. 8. Obtained results from finite element method.

شکل ۸: نتایج حاصل از تحلیل اجزا محدود.

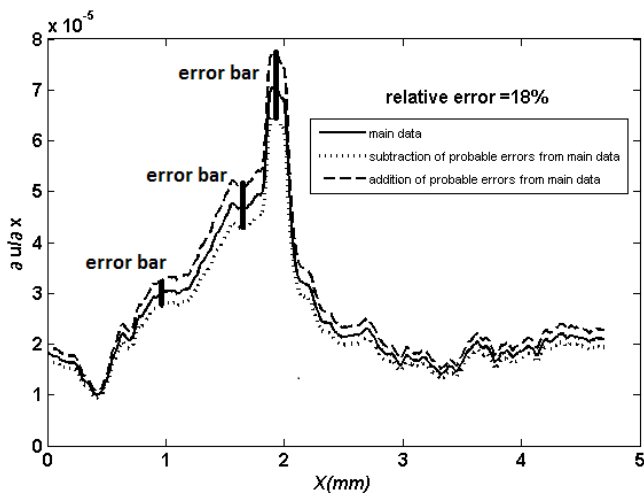


Fig. 11. Distribution of error in considered path.

شکل ۱۱: توزیع خطا در طول مسیر مورد بررسی

### منابع

- [1] W. Steinchen, L.X. Yang, G. Kupfer, Digital shearography for NDT and vibration measurement, in: Proceedings of the ASME Engineering Systems, *Design and Analysis (ESDA)*, 76(4) (1996) 27–34.
- [2] W. Steinchen, L.X. Yang, M. Schuth, G. Kupfer, Application of shearographic interferometry to quality assurance, *Journal of Materials Processing Technology*, 52(1) (1995) 141–150.
- [3] Y.Y. Hung, Shearography: A new optical method for strain measurement and non-destructive testing, *Optical Engineering*, 21(3) (1982) 391–395.
- [4] W. Steinchen, L.X. Yang, G. Kupfer, P. Mackel, F. Vössing, Determination of strain distribution by means of digital shearography, *Measurement*, 26(2) (1999) 79–90.
- [5] W. Steinchen, L.X. Yang, G. Kupfer, P. Mackel, F.

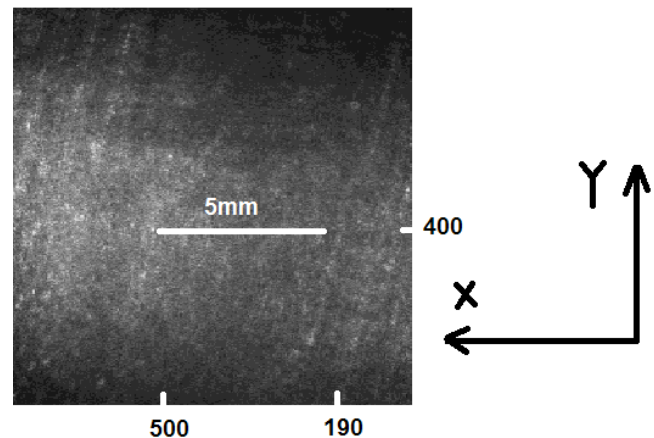


Fig. 9. Studied zone on aluminum specimen.

شکل ۹: منطقه مورد بررسی در قطعه آلومینیومی مربعی.

### تشکر و قدردانی

از خانم پگاه عسگری و مهندس یوسف پورویس در آزمایشگاه اپتیک دانشگاه زنجان بخاطر کمک‌های بی‌دریغشان در چیدمان سامانه تداخل‌سنجی چینی دیجیتال و بحث برنامه نویسی، نهایت تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

- [7] C.M. Vest, *Holographic interferometry*, John Wiley, 1979.
- [8] L.X. Yang, W. Steinchen, M. Schuth, G. Kupfer, Precision measurement and nondestructive testing by means of digital phase shifting speckle pattern and speckle shearing interferometry measurement, *Measurement*, 16(3) (1995) 149–160.
- Vössing, Nondestructive testing of aerospace composite materials using digital shearography, *Journal of Aerospace Engineering*, 212(1) (1998) 21–30.
- [6] L.X. Yang, W. Steinchen, G. Kupfer, Digitale Shearografie für direkte Messung der Biege- und Scherdehnungen von dünnen Platten (Direct measurement of bending and shear strains of thin plates), *Engineering Research*, 62(6) (1996) 168–174.

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Please cite this article using:

R. Moharrami, A. Daroudi, M. J. Taghilu, Measurement of Strain by Digital Shearography with a New Algorithm of Phase Calculation, *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 50(1) (2018) 25-32.  
DOI: 10.22060/mej.2016.739



