

## مروری بر کاربرد روش غیرمخرب برهمنگاری تصاویر دیجیتالی برای اندازه‌گیری تنش پسماند

فرید آزادی<sup>۱</sup>، داود اکبری<sup>۲\*</sup>، پیمان قاسمی تمامی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک

۲- استادیار، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک

۳- دانشجوی دکتری، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده مهندسی مکانیک

\* daakbari@modares.ac.ir

### چکیده

این مقاله به معرفی و بررسی اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی، شیارزنی و روش غیرمخرب برهمنگاری تصاویر دیجیتالی و سابقه فعالیت‌های انجام شده در این حوزه می‌پردازد. به این منظور در ابتدا به بیان اصول روش سوراخکاری طبق استاندارد ASTM E837 و شیارزنی پرداخته شده است. پس از آن اصول روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی و روش‌های مورد نیاز برای محاسبه ضرایب همبستگی مورد بررسی قرار گرفته است. با هدف کاربردی‌سازی روش معرفی شده، کارهای مرتبط با آن که در سال‌های اخیر اجرا شده، مرور شده است. به این منظور مقالات و گزارش‌های مرتبط استخراج شده و نکات اصلی برای ارزیابی تنش پسماند با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی، شیارزنی و برهمنگاری تصاویر دیجیتالی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. با بررسی نکات بیان شده در پژوهش‌های صورت گرفته، مشخص شد که روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی و سوراخکاری مرکزی قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند را با دقت بالایی دارا هستند.

**واژگان کلیدی:** برهمنگاری تصاویر دیجیتالی، تنش پسماند، مخرب، نیمه مخرب.

### ۱- مقدمه

محدوده گسترده‌ای از مواد مهندسی متداول است. این روش برای اولین بار در سال ۱۹۳۴ توسط ماتار<sup>۴</sup> معرفی شد [۱]. سوئت<sup>۵</sup> و وانکرومبورگ<sup>۶</sup> در سال ۱۹۵۰ این روش را تکمیل کردند [۲]. کلسی<sup>۷</sup> نخستین فردی بود که مساله تغییرات تنش پسماند در راستای ضخامت را در سال ۱۹۵۶ به کمک روش سوراخکاری مطالعه کرد [۳]. رندلر<sup>۸</sup> و ویگنس<sup>۹</sup> در سال ۱۹۶۶ روش سوراخکاری را توسعه دادند و هندسه و شکل استاندارد برای کرنش‌سنج پیشنهاد کردند [۴]. توسعه و کاربرد روش سوراخکاری موجب شد که استاندارد ASTM E837 برای نخستین بار در سال ۱۹۸۱ تعریف و ارایه شود. استاندارد ASTM E837-01 یکی از مهمترین مراجع ارایه شده برای ارزیابی تنش پسماند است و در آن الزامات اندازه‌گیری تنش ارایه شده است. روش ارایه شده در این استاندارد شامل چسباندن روزت<sup>۱۰</sup> کرنش‌سنج است. با اندازه‌گیری کرنش‌های آزاد شده و استفاده از

تنش پسماند نوعی از تنش‌های داخلی است که بدون آنکه جسم تحت بار خارجی قرار داشته باشد در جسم وجود دارد. همواره در قطعات دارای تنش پسماند، بخشی از مقاومت جسم صرف غلبه بر این تنش‌ها می‌شود. تنش‌های پسماند ممکن است طی فرآیند ساخت و یا در طول دوره کاری، در قطعه به وجود آیند. در بسیاری از موارد، تنش‌های پسماند نقش عمده‌ای در تخریب سازه ایفا می‌کنند. به ویژه زمانی که سازه تحت بارهای متناوب و یا محیط‌های خورنده قرار داشته باشد. تنش‌های پسماند در همه موارد نقش مخرب ندارند و این امر بستگی به مقدار، علامت و توزیع تنش‌های پسماند در مقایسه با تنش‌های ناشی از بار خارجی دارد. اندازه‌گیری تنش پسماند به سه صورت کلی مخرب<sup>۱</sup>، نیمه مخرب<sup>۲</sup> و غیر مخرب<sup>۳</sup> انجام می‌شود. در بین روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند، روش سوراخکاری مرکزی در

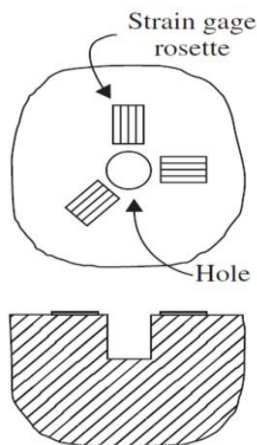
6 Vancrombrugge  
7 Kelsey  
8 Rendler  
9 Vigness  
10 Rosette

1 Destructive  
2 Semi Destructive  
3 Non-Destructive  
4 Mathar  
5 Soete

خمش و پیچش به وجود می‌آیند. این تنش‌ها پس از برداشته شدن بارهای خارجی دوباره به صفر برگشته و مقدار آن‌ها را می‌توان از معادلات مقاومت مصالح و الاستیسیته محاسبه نمود. تنش‌های پسماند را به طور ساده می‌توان تنش‌هایی دانست که مستقل از بارهای خارجی بوده و به طور قابل توجهی استحکام خستگی اجزاء ماشین را تحت تأثیر قرار می‌دهند. اندازه‌گیری تنش‌های پسماند عموماً بر پایه روش‌های غیر مستقیم متکی است. ویتز و بهادشینا<sup>۱</sup> در تحقیقات خود روش‌های اندازه‌گیری تنش‌های پسماند و منشأ و طبیعت این تنش‌ها را مورد مطالعه قرار داده اند [۱۰-۱۱]. روش‌های مختلف و مقایسه آنها در منابع مختلف بررسی شده است. روش‌های بررسی تنش پسماند به سه دسته روش‌های مخرب، روش‌های غیر مخرب و نیمه مخرب تقسیم می‌شوند [۱۲-۱۸].

۲-۱- اندازه‌گیری تنش پسماند به روش کرنش‌سنجی سوراخ

شکل ۱ چیدمان نوع A کرنش‌سنج مورد استفاده در آزمون سوراخکاری را نمایش می‌دهد. رابطه بین میزان کرنش آزاد شده برای یک ماده ایزوتروپیک الاستیک خطی در راستای کرنش‌سنج و تنش‌های اصلی و زاویه اصلی از طریق رابطه ۱ بدست خواهد آمد [۱۴].



شکل ۱- شماتیک کلی کرنش‌سنج آزمون سوراخکاری

معادلات تبدیل کرنش به تنش، تنش‌های پسماند اصلی و راستای آن‌ها مشخص می‌شود. تنش پسماند اندازه‌گیری شده به روش این استاندارد برای تعیین تنش پسماند در مواد همسانگرد و الاستیک خطی استفاده می‌شود. باید توجه داشت که روش سوراخکاری قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند را در نزدیکی سطح ماده دارا می‌باشد و برای اندازه‌گیری در عمق، به فرمول‌بندی دیگری مربوط به سوراخکاری افزایشی نیاز می‌باشد. نیکولاری<sup>۱</sup> در سال ۱۹۸۵ به مطالعه روابط مربوط به سوراخکاری افزایشی پرداخت و معادلات آن را استخراج کرد [۵]. مونتای<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۲ از روش سوراخکاری افزایشی استفاده و تنش پسماند حرارتی را در فرآیند پوشش‌دهی به کمک اکسیدهای زیرکونیوم اندازه‌گیری کرد [۶]. چانگ<sup>۳</sup> در سال ۲۰۰۹ با هدف اندازه‌گیری تنش پسماند، روش سوراخکاری را با روش پردازش تصویر ترکیب کرد [۷]. شاجر<sup>۴</sup> در سال ۲۰۰۹ پیشرفت‌های اخیر در اندازه‌گیری تنش پسماند را مرور کرد و مهم‌ترین مساله در مسیر توسعه روش سوراخکاری را ایجاد تجهیزات لازم برای استفاده میدانی از روش‌های نوری معرفی کرد [۸]. او در سال ۱۹۸۸ به بررسی تئوری روش‌های مختلف اندازه‌گیری تنش پسماند نظیر روش سوراخکاری مرکزی<sup>۵</sup>، روش سوراخکاری تدریجی<sup>۶</sup>، روش میانگین تنش<sup>۷</sup>، سری‌های توانی<sup>۸</sup>، روش انتگرال<sup>۹</sup> و مقایسه بین این روش‌ها پرداخت [۹]. در این پژوهش به بررسی روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند از طریق آزادسازی کرنش‌های سطحی پرداخته شده است. برای اندازه‌گیری کرنش‌های آزاد شده، روش‌های کرنش‌سنجی و روش تصویربرداری و برهمنگاری تصاویر دیجیتال مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا پژوهش‌ها و فعالیت‌های اصلی سال‌های اخیر در این حوزه مورد توجه قرار گرفته است و کارایی این روش مقایسه و ارزیابی شده است.

## ۲- روش‌های بررسی تنش پسماند

تنش‌ها به دو دسته تنش‌های باری و تنش‌های پسماند تقسیم می‌شوند. تنش‌های باری، عبارتند از تنش‌هایی که در حد الاستیک به وسیله بارهای خارجی مانند: کشش، فشار،

6 Incremental Strain Method  
7 Average Stress Method  
8 Power Series Method  
9 Integral Method  
10 Withers & Bhadeshia

1 Niku-Lari  
2 Montay  
3 Chang  
4 Schajer  
5 Basic Hole-Drilling Method

$$p = \frac{(\varepsilon_3 + \varepsilon_1)}{2}, q = \frac{(\varepsilon_3 - \varepsilon_1)}{2}, \quad (5)$$

$$t = \frac{(\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)}{2}$$

با استفاده از روابط ۴ و ۵ تعداد معادلات به ۳ رابطه مجزا کاهش یافته است که در روابط ۸-۶ نمایش داده شده است [۱۴]:

$$\bar{a} P = \frac{Ep}{(1+\theta)} \quad (6)$$

$$\bar{b} Q = Eq \quad (7)$$

$$\bar{b} T = Et \quad (8)$$

به این ترتیب مقادیر مربوط به مولفه‌های تنش‌ها از طریق روابط ۱۱-۹ ارایه می‌شود [۱۴]:

$$\sigma_1 = P - Q \quad (9)$$

$$\sigma_3 = P + Q \quad (10)$$

$$\tau_{13} = T \quad (11)$$

در انتها مقادیر مربوط به تنش‌های اصلی با استفاده از پارامترهای تفکیک شده به صورت رابطه ۱۲ ارایه خواهند شد [۱۴]:

$$\sigma_{max} \cdot \sigma_{min} = P \pm \sqrt{Q^2 + T^2} \quad (12)$$

$$= \left[ \frac{P}{\bar{a}(1+\theta)} \pm \frac{\sqrt{q^2 + t^2}}{\bar{b}} \right] E$$

$$\beta = \frac{1}{2} \tan^{-1}(T/Q) = \frac{1}{2} \tan^{-1}(t/q)$$

که در رابطه ۱۲،  $\beta$  زاویه اندازه‌گیری شده ساعتگرد بین کرنش‌سنج ۳ و جهت تنش اصلی ماکزیمم می‌باشد.

## ۲-۲- روش شیاری

روش شیاری از لحاظ مفهومی شبیه به روش سوراخکاری مرکزی است اما به جای سوراخ از شیاری استفاده می‌کند. برخلاف سوراخکاری مرکزی، صرف نظر از ضخامت نمونه، شیاری می‌تواند پروفیل تنش کل ضخامت را اندازه‌گیری کند، به دلیل آزادسازی بیشتر کرنش در روش شیاری امکان تعیین توزیع تنش پسماند تا عمق‌های بیشتری نسبت به روش سوراخکاری مرکزی وجود دارد، روش شیاری حساس تر بوده و از وضوح بهتری نسبت به روش سوراخکاری مرکزی برخوردار است [۱۹]. اگر چه روش شیاری در سال ۱۹۷۱ توسط وایدیانیتن و فینی معرفی شد [۲۰]، اما به علت مشکلات آزمایشگاهی کاربرد گسترده

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

که در آن:

$\varepsilon_r$ : میزان کرنش آزاد و اندازه‌گیری شده

$\sigma_{max}$ : حداکثر تنش اصلی

$\sigma_{min}$ : حداقل تنش اصلی

A, B: ثابت‌های کالیبراسیون

$\alpha$ : زاویه اندازه‌گیری شده ساعتگرد بین جهت حداکثر تنش اصلی و محور کرنش‌سنج

با توجه به نکات ارایه شده در استاندارد [۱۴]، ضرایب کالیبراسیون A و B وابسته به پارامترهایی نظیر هندسه کرنش‌سنج، خاصیت الاستیک ماده، قطر و عمق سوراخ می‌باشد. به منظور عدم وابستگی این ثوابت به خواص الاستیک ماده پارامترهای  $\bar{a}$  و  $\bar{b}$  طبق رابطه ۲ تعریف شده‌اند [۱۴]:

$$\bar{a} = \frac{2EA}{1+\theta}, \bar{b} = 2EB \quad (2)$$

که در آن E مدول الاستیک و  $\theta$  نسبت پواسون ماده می‌باشد. پارامترهای ارایه شده در رابطه ۲ از طریق اعمال بار دوماحوره برابر  $\frac{(\sigma_{max} + \sigma_{min})}{2}$  و برش خالص  $\frac{(\sigma_{max} - \sigma_{min})}{2}$  قابل ارزیابی خواهند بود. برای کرنش‌سنج ۴۵ درجه با چیدمان نمایش داده شده در شکل ۱، رابطه بین اجزای تنش و مقادیر کرنش آزاد و اندازه‌گیری شده توسط کرنش‌سنج‌ها از طریق ماتریس زیر قابل محاسبه خواهد بود [۱۴]:

$$\begin{bmatrix} A+B & 0 & A-B \\ A & -2B & A \\ A-B & 0 & A+B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \tau_{13} \\ \sigma_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

که در آن:

$\sigma_1$  و  $\sigma_3$ : اجزای تنش در جهت ۱ و ۳

$\tau_{13}$ : تنش برشی جهت‌های ۱ و ۳

$\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ : کرنش‌های آزاد و اندازه‌گیری شده در کرنش-سنج‌های ۱ و ۲ و ۳ می‌باشند.

به منظور ساده‌سازی روابط، پارامترها مطابق روابط ۴ و ۵ در نظر گرفته می‌شود [۱۴]:

$$P = \frac{(\sigma_3 + \sigma_1)}{2}, Q = \frac{(\sigma_3 - \sigma_1)}{2}, T = \tau_{13} \quad (4)$$

### ۳- معرفی روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال

به طور کلی روش سوراخکاری مرکزی دارای کاربردهای بسیاری می‌باشد و در صنعت مورد استفاده قرار می‌گیرد. ولی وجود معایبی نظیر عدم دسترسی به کل سطح، زمان‌بر بودن آزمون و نیاز به دقت برای همراستاسازی کرنش‌سنج و محور سوراخکاری، استفاده از این روش برای ارزیابی تنش پسماند را با چالش روبرو کرده است. امروزه استفاده از روش‌های با دقت بالا برای ارزیابی تنش پسماند بسیار حایز اهمیت می‌باشد. به همین علت روش‌های نوری که قابلیت ارزیابی تنش پسماند در موقعیت و با دقت بالا را دارا می‌باشند، بسیار 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 برهمنگاری تصاویر دیجیتالی<sup>۱</sup> 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 از سال ۱۹۸۲ در دانشگاه کارولینای جنوبی توسط پروفیسور ساتن<sup>۲</sup> برای به دست آوردن میدان جابجایی معرفی شد [۲۴-۲۲]. بارالت و همکاران در سال ۲۰۱۸ به ارزیابی تنش پسماند در فرآیند ساخت افزایشی با استفاده از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی پرداختند. طبق اظهار آن‌ها تا بحال هیچ روشی قابلیت اندازه‌گیری تنش پسماند در حین انجام فرآیند را دارا نبوده است. آن‌ها در این پژوهش به انجام این امر پرداختند و صحت سنجی نتایج حاکی از دقت بالای روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی بود [۲۵]. هدف اصلی روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی، بدست آوردن جابجایی در یک محدوده مورد نظر از قطعات تحت تغییر شکل می‌باشد. کاربردهای فراوان این روش در آنالیز میدان تنش-کرنش در مواد مختلف و در ابعاد متفاوت، این روش را بسیار محبوب کرده است. در این روش، ابتدا روی سطح قطعه یک الگوی لکه‌ای سیاه و سفید تصادفی ایجاد می‌شود. بعد از آماده‌سازی نمونه، قبل و بعد از بارگذاری دو عکس از الگوی لکه‌ای سطح قطعه گرفته می‌شود و سپس با تحلیل این دو عکس در الگوریتم برهمنگاری، می‌توان میدان جابجایی و در نهایت کرنش را

آن تا اواسط دهه ۱۹۸۰ به تعویق افتاد. با استفاده از روش شیارزنی می‌توان تنش‌های پسماند درون قطعات را آزاد کرد و به کمک نتایج به دست آمده از روش برهمنگاری تصاویر که میزان کرنش پسماند را نشان می‌دهد، تنش پسماند ناشی از تغییر شکل قطعه را با استفاده از روابط تئوری محاسبه نمود. در حالت کلی تنش پسماند در راستای عمق قطعه متغیر بوده و با توجه به روشی که انتخاب می‌شود، نیاز به محاسبات پیچیده آن روش برای تعیین ضرایب نرمی قطعه دارد. مهمترین روش‌های ارزیابی تنش‌های پسماند در روش شیارزنی شامل چند جمله‌ای‌های پیوسته، چند جمله‌ای‌های پراکنده و بارهای نوار است. روش بارهای نوار که به روش پالس معروف است، قدیمی ترین و رایج ترین روش برای به دست آوردن تنش‌های پسماند در روش شیارزنی است که ابتدا توسط شاجر در روش سوراخکاری مرکزی ارائه شد [۲۱]. در این روش تنش به عنوان مجموعه-ای از توابع پالس بیان می‌شود که در رابطه (۱۳) نشان داده شده است.

$$\sigma(x) = \sum_{j=1}^n A_j U_j(x) \quad (13)$$

$U_j(x)$  پالس واحد بوده و به صورت رابطه (۱۴) تعریف می‌شود.

$$U_j(x) = \begin{cases} 1 & A_{j-1} \leq x \leq A_j \\ 0 & x \leq A_{j-1} \cdot x \geq A_j \end{cases} \quad (14)$$

راه حل‌ها شامل تعیین ضرایب ناشناخته  $A_j$  مطابق با مقدار تنش در [امین افزایش برش است رابطه (۱۵)].

$$\begin{aligned} \varepsilon(a_i) &= \frac{1}{E'} \int_0^{a_i} G(x, a_i) \sum_{j=1}^n A_j U_j(x) dx \\ &= \frac{1}{E'} \int_{a_j}^{a_{j-1}} G(x, a_i) U_j(x) dx = \sum_{j=1}^n A_j C_{ij} \end{aligned} \quad (15)$$

بنابراین  $C_{ij}$  یا عناصر ماتریس انطباق را می‌توان توسط رابطه (۱۶) تعریف کرد.

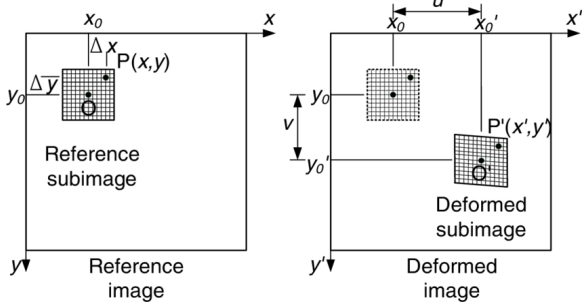
$$C_{ij} = \frac{1}{E'} \int_{a_j}^{a_{j-1}} G(x, a_i) U_j(x) dx \quad (16)$$

در طی ۲۵ سال گذشته تلاش‌های چشمگیری برای بهبود جنبه‌های نظری و آزمایشگاهی این روش انجام شده است.

از بارگذاری هستند که طبق روابط زیر با همدیگر ارتباط دارند.

$$x' = x + U + \frac{\partial U}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial U}{\partial y} \Delta y \quad (19)$$

$$y' = y + V + \frac{\partial V}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial V}{\partial y} \Delta y \quad (20)$$



شکل ۲- زیرناحیه‌های مرجع و تغییر شکل یافته [۲۴]

که در رابطه ۱۹ و ۲۰، پارامترهای  $\Delta x$  و  $\Delta y$  فواصل افقی و عمودی نقطه  $(x, y)$  از مرکز زیرناحیه است. در رابطه برهمنگاری، 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. سپس مقدار مجذور اختلاف آن‌ها بر مقدار مجذور شدت نور آن نقطه در عکس مرجع تقسیم می‌شود. عدد به دست آمده، معیاری از خطای نسبی در آن نقطه است. برای محاسبه مقدار خطای کل در یک زیرناحیه، مقدار خطای نقاط با یکدیگر جمع می‌شوند، وقتی ضریب برهمنگاری صفر شود، در حقیقت تابع خطا در کل زیرناحیه صفر شده و این نشان دهنده تطابق کامل است. بهترین جواب زمانی به دست می‌آید که ضریب  $C(R)$  در رابطه ۱۷ کمینه شود. به تعبیر دیگر، توابع درونیایی قبل و بعد از بارگذاری در هر نقطه اختلاف کمی داشته باشند. طبق رابطه ۲۱ برای کمینه کردن  $C$  باید گرادیان آن صفر شود.

برای حل رابطه ۱۶ و به دست آوردن ریشه‌های آن، از روش نیوتن-رافسون استفاده می‌شود. این روش از یک مقدار اولیه تقریبی برای پیدا کردن ریشه معادلات استفاده می‌کند و تا زمانی که خطا از مقدار معینی کمتر شود تکرار انجام می‌دهد. از آنجاییکه ضریب برهمنگاری تابعی از مولفه‌های جابجایی و گرادیان آن‌ها است، این مجهولات با

به دست آورد. ایده اصلی این روش به این صورت می‌باشد که چگونه بین نقاط قبل و بعد از تغییر شکل در ماده مورد بررسی ارتباط برقرار می‌شود. روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی این کار را با به کارگیری بخش‌های فرعی از عکس مرجع<sup>۱</sup> انجام می‌دهد که به نام زیر مجموعه<sup>۲</sup> شناخته می‌شوند 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. نتیجه نهایی یک شبکه شامل اطلاعات جابجایی و کرنش با توجه به اطلاعات پیکربندی مرجع می‌باشد. در روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی، شدت نور هر عکس با یک تابع چند جمله‌ای پیوسته تخمین زده می‌شود. ساتن و همکاران طی مقاله‌ای نشان دادند که منحنی درجه ۵ بهترین نتایج را نشان می‌دهد [۲۴]. الگوریتم برهمنگاری هر بار تابع شدت نور دو زیرناحیه از دو تصویر قبل و بعد از بارگذاری با ابعاد  $N \times N$  پیکسل را با هم مقایسه کرده و آن زیرناحیه از عکس بعد از بارگذاری را که بیشترین تطابق با زیرناحیه عکس مرجع دارد، به عنوان زیرناحیه تغییر یافته در نظر می‌گیرد و جابجایی و تغییر شکل‌های آن را به دست می‌آورد. این روند برای تمامی زیرناحیه‌های تصویر مرجع انجام شده و در نهایت میدان جابجایی کل به دست می‌آید. مطابق شکل ۲ برای بررسی میزان انطباق هر جفت زیرناحیه ضریب برهمنگاری  $C$  به صورت رابطه ۱۷ تعریف می‌شود که می‌تواند معیار مناسبی برای درک مقدار مطابقت دو زیرناحیه متناظر باشد [۲۴].

که در رابطه بالا،  $R$  بردار مجهولات به صورت رابطه ۱۸ می‌باشد:

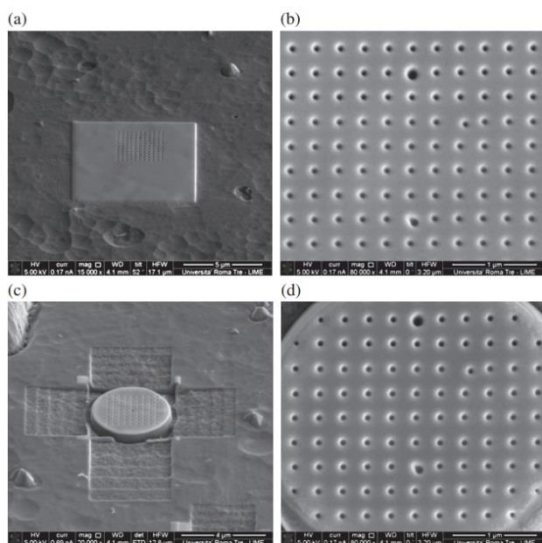
$$\nabla C = \left( \frac{\partial C}{\partial R_k} \right)_{k=1.13} \quad (21)$$

$$R = (X, Y, U, V, \frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y}, \frac{\partial v}{\partial y}) \quad (18)$$

در معادلات بالا،  $U$  و  $V$  مولفه‌های جابجایی در مرکز زیرناحیه،  $G_d$  و  $G_r$  توابع پیوسته درونیایی شدت نور قبل و بعد از بارگذاری می‌باشند.  $(x, y)$  و  $(x', y')$  به ترتیب مختصات نقاط در زیرناحیه‌های تصویر مرجع و تصویر بعد



انجام شده است. کورسونسکای<sup>۱</sup> و همکاران به بررسی تنش-های پسماند در مقیاس میکرومتر پرداختند [۲۶]. آنها در این پژوهش به بررسی ورق های پوشش دهی شده نازک با استفاده از روش های ماشینکاری پرتوهای متمرکز<sup>۲</sup> و برهمنگاری تصاویر پرداختند. در این پژوهش روش بهینه ای برای اندازه گیری تنش پسماند در مقیاس میکروسکوپی ارائه شده است. روش ماشینکاری پرتوهای متمرکز در این پژوهش شامل ایجاد سوراخ های حلقوی می باشد. عکسبرداری و تحلیل های مورد نیاز برای روش برهمنگاری تصاویر توسط دوربین های الکترون روبشی<sup>۳</sup> و الگوهای ایجاد شده قبل از عملیات ماشینکاری صورت پذیرفته است. پژوهش های صورت گرفته برای پوشش دهی فیزیکی بخار نیتريد تیتانیوم روی لایه تنگستن-کبالت و پوشش رسوب-دهی فیزیکی بخار طلا صورت گرفته است. در انتها نیز برای صحت سنجی روش پیشنهاد شده، نتایج پژوهش با روش های دیگری برای تخمین تنش پسماند نظیر روش پراش اشعه ایکس مقایسه شده است. در شکل ۳ تصاویر مربوط عملیات صورت گرفته در این پژوهش نشان داده شده است.



شکل ۳- تصویر مراحل فرآیند یون متمرکز و عکسبرداری الکترون روبشی [۲۶]

کروتونسالر و همکاران به معرفی روش جدیدی برای بررسی تنش پسماند در ورق های نازک از طریق روش های ماشینکاری پرتوهای متمرکز و برهمنگاری تصاویر پرداختند. به طور کلی پوشش کربن آمورف هیدروژنه دارای

جستجوی دسته ای از این مولفه ها که ضریب برهمنگاری را کمینه کند، قابل دستیابی است. در الگوریتم روش برهمنگاری، روند جستجو برای محاسبه جابجایی ها و گرادیان های جابجایی مجهول با گام های بلند شروع می شود. در این روند، در ابتدا گرادیان جابجایی ها صفر در نظر گرفته می شوند و الگوریتم با گام های ۱ پیکسل در ناحیه مورد نظر جستجو کرده و پیکسلی که ضریب برهمنگاری را به حداقل برساند به عنوان جواب اولیه در نظر گرفته می شود. سپس با استفاده از روش نیوتن-رافسون جابجایی ها و گرادیان آن ها با دقت کسری از پیکسل به دست می آید. نتایج این مرحله به عنوان مقادیر اولیه در الگوریتم نیوتن-رافسون برای زیرناحیه بعدی استفاده می شود [۲۴]. در این روش با انجام محاسبات کلی در نهایت کرنش ها در راستاهای مختلف به صورت روابط ۲۲-۲۴ می باشند:

$$\epsilon_{xx} = \frac{1}{2} \left( \left( \frac{du}{dx} \right)^2 + \left( \frac{dv}{dx} \right)^2 + \left( \frac{dw}{dx} \right)^2 \right) + \left( \frac{du}{dx} \right) \quad (22)$$

$$\epsilon_{yy} = \frac{1}{2} \left( \left( \frac{du}{dy} \right)^2 + \left( \frac{dv}{dy} \right)^2 + \left( \frac{dw}{dy} \right)^2 \right) + \left( \frac{dv}{dy} \right) \quad (23)$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{1}{2} \left( \left( \frac{du}{dz} \right)^2 + \left( \frac{dv}{dz} \right)^2 + \left( \frac{dw}{dz} \right)^2 \right) + \left( \frac{dw}{dz} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{du}{dx} \frac{du}{dy} + \frac{dv}{dx} \frac{dv}{dy} \right) \quad (24)$$

که در آن  $\epsilon_{xx}$ ,  $\epsilon_{yy}$ ,  $\epsilon_{zz}$  مولفه های کرنش اصلی در راستای  $x$ ,  $y$  و  $z$  می باشد. از این رو با استفاده از روش برهمنگاری تصاویر می توان میدان کرنش ایجاد شده در اثر یک بارگذاری مشخص را در سطح قطعه به طور تجربی و بدون استفاده از از کرنش سنج اندازه گیری نمود.

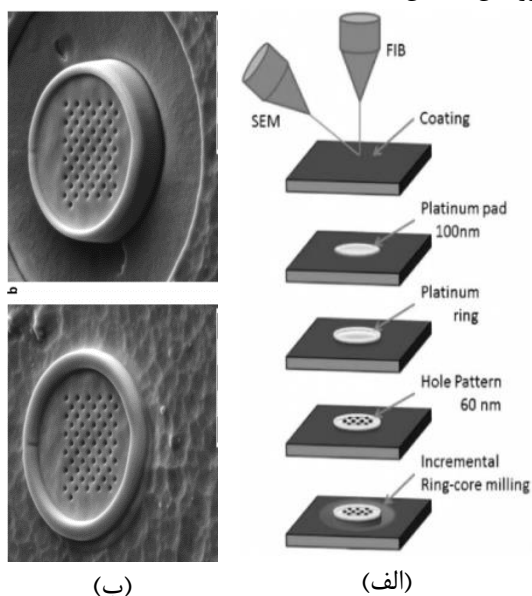
#### ۴- کاربرد روش برهمنگاری در اندازه گیری تنش پسماند

از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی به طور موثری در اندازه گیری تنش های پسماند می توان استفاده نمود. در اغلب فعالیت های صورت گرفته در این حوزه، روش برهمنگاری به عنوان ابزار اندازه گیری کرنش های سطحی آزاد شده در اثر یک عملیات سوراخکاری سطحی مورد استفاده قرار گرفته است. با تعیین ضرایب مربوط به تبدیل کرنش به تنش های سطحی، می توان از آن به عنوان ابزار اندازه گیری تنش پسماند بهره برد. در حوزه بررسی تنش پسماند با استفاده از روش های نوری، فعالیت های زیادی

3 Scanning Electron Microscope (SEM)

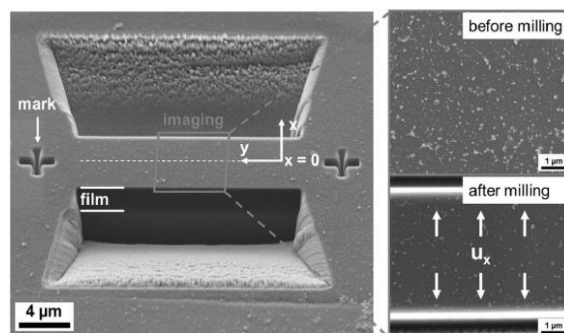
1 Korsunsky  
2 Focused ion beam (FIB)

جابجایی‌های ایجاد شده را ارزیابی می‌کنند. با بررسی این جابجایی‌ها، می‌توان تنش پسماند موجود در قطعات را تخمین زد. آن‌ها در ادامه روش پیشنهاد شده را با روش‌های تجربی دیگر مانند خمش ۴ نقطه‌ای و پراش اشعه ایکس مورد صحت سنجی قرار دادند و به اعتبار روش پیشنهادی پی بردند. با انجام آزمون‌های صحت سنجی به این نتیجه رسیدند که روش برهمنگاری تصویر برای تخمین تنش پسماند، دارای دقت بالاتری نسبت به سایر روش‌های سنتی می‌باشد [۲۸]. مارکو و همکاران در سال ۲۰۱۱ به بررسی تنش پسماند ورق‌های نازک برای پوشش داده شده از طریق روش یون متمرکز-برهمنگاری تصاویر پرداختند. آن‌ها در این پژوهش ابتدا به عملیات باربرداری حلقوی مربوط به ماشینکاری پرتوهای متمرکز پرداختند و سپس با استفاده از فرآیند عکسبرداری الکترون روبشی و آنالیز برهمنگاری تصاویر دیجیتال به تخمین مورد نیاز برای تنش‌های پسماند پرداختند. در این پژوهش قطعات مورد آزمایش نیتريد کروم پوشش داده شده روی فولاد و لایه طلا پوشش داده شده روی سیلیکون انتخاب شده بود. نتایج بدست آمده حدود تنش پسماند را بین ۵/۱۵- گیگاپاسکال برای نیتريد کروم و ۱۹۴ مگاپاسکال برای طلا تخمین زد [۲۹]. در شکل ۶ تصاویر مربوط به عملیات صورت گرفته در این پژوهش نمایش داده شده است.

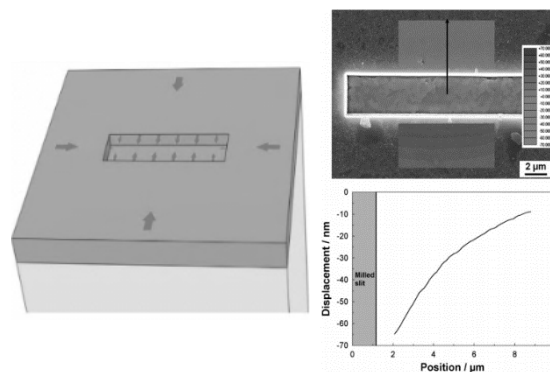


شکل ۶- نمایی از (الف) روند فرآیند یون متمرکز-برهمنگاری تصاویر و (ب) تصویر قبل و بعد از باربرداری نمونه [۲۹]

تنش پسماند ذاتی می‌باشد که به طور کلی بر رفتار شکست پوشش‌ها تاثیر گذار می‌باشد. به دست آوردن تنش پسماند به کمک روش‌های سنتی برای این نوع پوشش ساده نمی‌باشد. در این پژوهش آن‌ها روش جدید ماشینکاری پرتوهای متمرکز و برهمنگاری تصاویر دیجیتال را برای محاسبه تنش‌های پسماند استفاده کردند. مطابق شکل ۴ و ۵ برای اندازه‌گیری تنش پسماند مقطع‌های مختلفی نظیر شیار، اچ و حلقوی روی قطعات زده شد. در نهایت با عکسبرداری و تحلیل نتایج تنش پسماند روی مقاطع مورد ارزیابی قرار گرفت [۲۷].

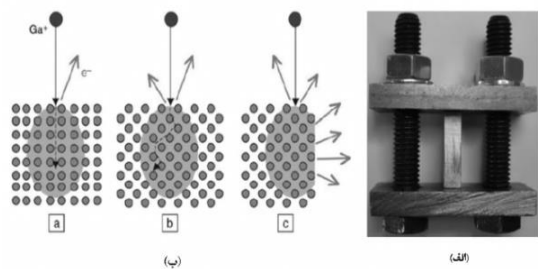


شکل ۴- تصاویر ثبت شده توسط فرآیند یون متمرکز- برهمنگاری تصاویر [۲۷]

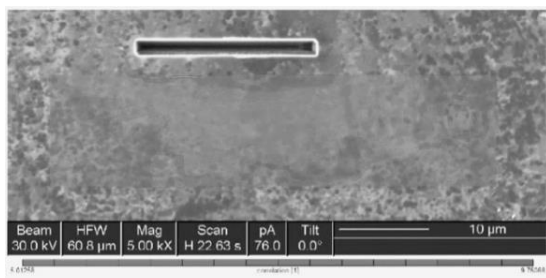


شکل ۵- میدان جابجایی آزاد شده با تکنیک شیار زنی [۲۷]

یاوو و همکاران به بررسی تنش پسماند در فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی اتصالات لب به لب با استفاده از روش برهمنگاری تصاویر و روش مقطع‌زنی پرداختند. آن‌ها در این پژوهش این روش را به عنوان روشی نو و بعنوان جایگزین برای سایر روش‌های سنتی اندازه‌گیری تنش پسماند معرفی کردند. روش آن‌ها در این پژوهش به این صورت بود که در ابتدا روی قطعه جوش داده شده شکاری ایجاد و سپس با استفاده از روش برهمنگاری تصاویر



شکل ۷- (الف) مکانیزم فشار (ب) شماتیک فرآیند باربرداری یون متمرکز [۳۱]



شکل ۸- دقت روش برهمنگاری تصاویر با سایز زیرمجموعه (الف) ۶۱ پیکسل [۳۱]

وینیارسکی<sup>۵</sup> و همکاران به اندازه‌گیری تنش پسماند در مقیاس میکرون با استفاده از روش سوراخکاری و برهمنگاری تصاویر دیجیتال پرداختند. در این پژوهش روش جدید سوراخکاری تحت عنوان سوراخکاری تدریجی میکرونی<sup>۶</sup> معرفی شد. این روش به بررسی تنش پسماند یا تنش اعمالی درون صفحه بر اساس عمق در مقیاس میکرون می‌پردازد. عملیات باربرداری توسط روش ماشینکاری پرتوهای متمرکز صورت گرفت. میزان جابجایی سطحی توسط روش برهمنگاری تصاویر دیجیتال و با استفاده از تصاویر الکترون روبشی که از سطح قطعه‌کار در حین باربرداری گرفته شد، مورد ارزیابی قرار گرفت. نمونه مورد آزمایش در این پژوهش بر پایه زیرکونیوم می‌باشند و در ابعاد  $3 \times 3 \times 25$  میلی‌متر مربع آماده‌سازی شد. به منظور ایجاد تنش پسماند در نمونه فرآیند تغییر شکل پلاستیک شدید صفحه‌ای<sup>۷</sup> ایجاد شد. به منظور ایجاد تغییر شکل پلاستیک شدید در یک سمت قطعه عملیات کوبش توسط گوی‌های از جنس تنگستن/کبالت و در محیط پر شده از گاز آرگون صورت گرفت. عملیات کوبش به مدت ۱۸۰

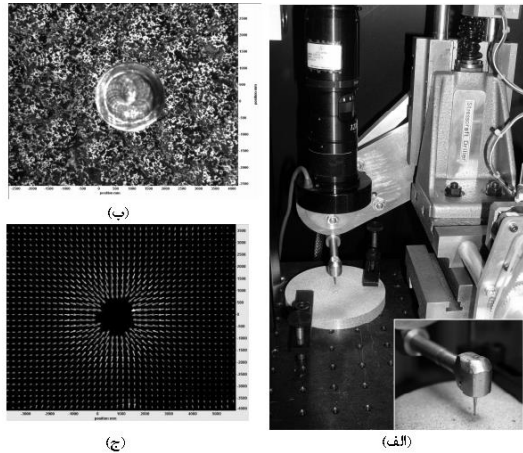
سباستیانی<sup>۱</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۴ به بررسی و محاسبه ضریب پواسون و تنش پسماند در مقیاس میکرون با استفاده از روش‌های ماشینکاری پرتوهای متمرکز، شیارزنی و برهمنگاری تصاویر دیجیتال پرداختند. آنها روش ارایه شده را به عنوان روشی جدید برای محاسبه ضریب پواسون و تنش پسماند معرفی کرده‌اند. آنها در حین انجام عملیات، با انجام آزمایش روی نیتريد کروم و مس آنیل شده، روش را به طور کامل صحت سنجی کردند. آنها تاثیرات ناهمسانگردی و ریزساختار را نیز مورد مطالعه قرار دادند [۳۰]. داینس<sup>۲</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۹ به بررسی اندازه‌گیری تنش پسماند در مقیاس میکرو برای فولادها با استفاده از روش‌های یون متمرکز-برهمنگاری تصاویر پرداختند. آنها در این پژوهش نمونه‌های  $3 \times 3 \times 20$  میلی-متر از فولاد را آماده کردند. نمونه‌ها با مجموعه نمایش داده شده در شکل ۷ (الف) به طور تک محور تا فشار ۴۰۰ مگاپاسکال فشرده شدند. سطوح نمونه‌ها تا کیفیت ۱ میکرومتر توسط پولیش آماده‌سازی شد و سپس برای فرآیند ماشینکاری پرتوهای متمرکز آماده‌سازی شد. برای آماده‌سازی فرآیند ماشینکاری پرتوهای متمرکز، لایه‌های اکسیدی از سطح نمونه خارج شد تا سطح قابل شناسایی ایجاد شود. بعد از عملیات اچ کردن<sup>۳</sup>، عکس مرجع از سطح توسط دوربین‌های برهمنگاری تصاویر دیجیتال گرفته شده است. شیار  $20 \times 1/5 \times 6/5$  میکرومتر (عمق  $\times$  عرض  $\times$  طول) مطابق شکل ۷ (ب) توسط فرآیند ماشینکاری پرتوهای متمرکز، به صورت عمودی روی نمونه ایجاد شد. پس از انجام این فعالیت، عکس بعد از تغییر شکل<sup>۴</sup> توسط دوربین‌ها از نمونه گرفته شد. سپس جابجایی‌های آزاد شده بر روی نمونه‌ها توسط نرم افزار برهمنگاری تصاویر دیجیتال دوبعدی محاسبه شد و بر اساس آن تنش‌های پسماند روی نمونه اندازه‌گیری شد که نتایج حاصل از آن در شکل ۸ نمایش داده شده است. جابجایی‌های برهمنگاری تصاویر دیجیتال با پاسخ‌های المان محدود ایزوتروپیک مقایسه شد و به صحت نتایج پی برده شد [۳۱].

5 Winiarski  
6 Incremental micro-hole-drilling  
7 Surface severe plastic deformation

1 Sebastiani  
2 Daynes  
3 Uniform FIB exposure (etching)  
4 Deformed image



نمونه ایجاد شد. نمونه تحت آزمون و سیستم مورد بررسی در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۹- نمایی از (الف) مجموعه آماده شده برای عملیات سوراخکاری (ب) تصویر بعد از سوراخکاری (ج) نقشه برداری اطراف سوراخ [۳۳]

سوراخ ایجاد شده دارای عمق ۱ میلی‌متر می‌باشد که سوراخ‌های با عمق ۱۲۸، ۲۵۶، ۵۱۲ و ۱۰۲۴ میکرومتر در چند مرحله بروی نمونه ایجاد شده است. هدف از ایجاد سوراخ‌های مرحله‌ای تعیین ارتباط بین تنش پسماند و عمق سوراخ بوده است. تصاویر مربوط به هر مرحله از باربرداری توسط دوربین ۱ مگاپیکسل ( ۱۰۲۴ × ۱۲۸۰ پیکسل) ترکیب شده با لنزهای زوم کننده ثبت شد. میدان دید  $5/6 \times 7$  میلی‌متر قادر بود تا مقیاس  $5/5$  میکرومتر/پیکسل را ارائه دهد. نرم‌افزار مورد استفاده برای تحلیل روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی لاویشن استرین مستر<sup>۵</sup> بود. میزان جابجایی بدست آمده توسط روش برهمنگاری در ۳۶ موقعیت زاویه-ای با اختلاف ۱۰ درجه و ۱۳ موقعیت شعاعی با اختلاف ۵۰ میکرومتر از شعاع ۱۴۰۰ تا ۲۰۰۰ میکرومتر در عمق-های مختلف ۱۲۸، ۲۵۶، ۵۱۲ و ۱۰۲۴ میکرومتر محاسبه شد. به منظور بررسی دقت نتایج بدست آمده از روش برهمنگاری شرایط مشابه بارگذاری و سوراخکاری و عمق-های مختلف برای حل تحلیلی مورد بررسی قرار گرفت. جابجایی‌های بدست آمده از روش برهمنگاری و حل تحلیلی با یکدیگر مقایسه شد و دقت خوبی برای روش برهمنگاری مورد تایید قرار گرفت. مقادیر میانگین جابجایی‌ها در حل

دقیقه و با توقف در هر ۱۵ دقیقه انجام شد. در ادامه عملیات باربرداری توسط یون گالیم انجام و سوراخی به شعاع ۲ میکرون روی نمونه ایجاد شد. عمق ایجاد شده برای سوراخ  $1/8$  میکرون بود و این عمق طی ۱۰ مرحله باربرداری ایجاد شد. عملیات عکسبرداری از سطح نمونه توسط دوربین الکترون روبشی دارای فیلمان انتشار میدانی<sup>۱</sup> به این صورت انجام شد که یک عکس به عنوان عکس مرجع قبل از عملیات باربرداری و عکس‌های بعدی پس از هر مرحله از باربرداری گرفته شد. پس از ثبت تصاویر میزان جابجایی‌های ایجاد شده با استفاده از تکنیک برهمنگاری تصاویر دیجیتالی مورد ارزیابی قرار گرفت. پس از ثبت میزان جابجایی‌ها به حل تحلیلی و ارتباط بین جابجایی و تنش با استفاده از ضرایب کالیبراسیون پرداخته شد. نتایج حاصل از این پژوهش با کارهای قبلی مقایسه نتیجه شد که این روش پتانسیل بالایی در ارزیابی تنش در گستره وسیعی از مواد نظیر فیلم‌های نازک، قطعات ممز<sup>۲</sup>، مواد نانوساختار و دستگاه‌های ارگانیک الکترونیک را دارا می‌باشد [۳۲].

علاوه بر روش سوراخکاری پرتوهای متمرکز، به منظور آزادسازی تنش‌های پسماند سطحی در نمونه‌ها، از سوراخکاری نیز استفاده شده است. ابعاد سوراخ ایجاد شده در این روش‌ها عموماً بزرگتر و کنترل آن‌ها کمتر است. با این حال به دلیل سهولت بیشتر در دسترسی به تجهیزات مورد توجه برخی پژوهشگران بوده است.

لورد<sup>۳</sup> و همکاران به بررسی کاربرد روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی برای اندازه‌گیری تنش پسماند با استفاده از روش سوراخکاری مرکزی تدریجی پرداختند. در این پژوهش از روش تحلیلی انتگرال برای اندازه‌گیری میزان تنش پسماند وابسته به عمق استفاده شد. نتایج به دست آمده از این پژوهش با استفاده از نتایج به دست آمده از کارهای پیشین که از کرنش‌سنج استفاده کرده بودند و مدل‌های المان محدود صحت‌سنجی شد. پس از آماده‌سازی نمونه آلومینیومی 7075-T79 شات پین شده و ایجاد الگوی لکه‌ای روی نمونه با استفاده از رنگ‌پاش، سوراخی به قطر ۲ میلی‌متر با استفاده از سیستم سوراخکاری تلفیق شده با توربین هوای فشرده استرس گرفت آراس سه‌بعدی<sup>۴</sup> ب روی

4 Stresscraft RS 3-D  
5 La Vision Strainmaster

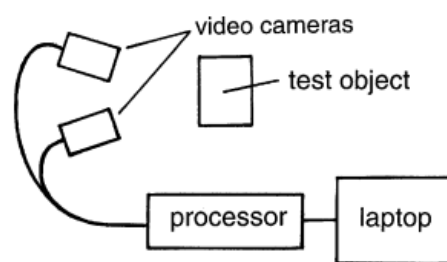
1 Field emission gun scanning electron microscope  
2 MEMS  
3 J.D.Lord

سطح و در عمق ضخامت را با استفاده از روش شیازنی فراهم کردند [۳۵]. هرمان در سال ۱۹۹۵ روش شیازنی را بر یک کامپوزیت فلزی استفاده کرد ولی کامپوزیت را مشابه یک فلز همگن در نظر گرفت [۳۶]. ارسوی و واردار در سال ۲۰۰۰ تنش های پسماند را در یک کامپوزیت چندلایه ای ترموپلاستیک متقاطع تعیین کردند [۳۷]. هیلد و روکس در سال ۲۰۰۶ با ایجاد یک شکاف در مقیاس میکرو و با استفاده از روش DIC و شناسایی میدان جا به جایی شدت تنش را ارزیابی کردند [۳۷]. بلیر و همکاران در سال ۲۰۰۹ با آزاد سازی جابه جایی تنش پسماند و شیازنی اندازه گیری کردند [۳۹]. در سال ۲۰۰۹ دینس و همکاران تنش های پسماند را در مقیاس میکرو و ماکرو با ترکیب روش برهمنگاری به دست آوردند [۴۰].

یاوو<sup>۳</sup> و همکاران در سال ۲۰۱۷ یک روش برش مرحله ای برای ارزیابی تنش های پسماند طولی در یک ورق نازک جوشکاری شده به وسیله ترکیب روش های اندازه گیری تنش پسماند سنتی و روش پیشرفته نوری ارائه کردند. رویکرد پیشنهادی، روش برهمنگاری تصویر دیجیتال به کمک روش شیازنی نامیده شد که یک شیازنی را روی یک نمونه ایجاد می کرد و از روش برهمنگاری تصویر دیجیتال برای اندازه گیری جابه جایی های آزاد شده از مقاطع برش پس از هر مرحله برش استفاده شد. سپس مستقیماً از توزیع جابه جایی ها برای محاسبه توزیع تنش پسماند در نوک شیازنی استفاده شد و از این رو پس از هر مرحله برش یک توزیع تنش به دست آمد. سرانجام از تمام توزیع های تنش، میانگین گرفته شد تا نهایتاً میدان تنش اصلی تعیین شود. در این روش هیچ گونه عملیات آزمایشگاهی پیچیده یا مشتقات خسته کننده ای وجود نداشت و وضوح تغییرات تنش با اندازه گیری های پیوسته جابه جایی های آزاد شده بسیار بهبود یافت. نتایج نشان داد که تنش های پسماند تعیین شده توسط روش برهمنگاری تصویر دیجیتال به کمک روش شیازنی تطابق خوبی با پیش بینی المان محدود داشت. همچنین تنش های پسماند به دست آمده در یک نمونه آلومینیومی جوشکاری شده به روش اصطکاکی با روش ارائه شده، با ارزیابی حاصل از تفرق اشعه ایکس تطابق خوبی نشان داد. در این پژوهش روش

روش انتگرال قدیمی مورد استفاده قرار گرفت و با استفاده از این رابطه مقادیر تنش پسماند در هر عمق باربرداری محاسبه شد. در انتها نتایج حاصل از تنش پسماند با استفاده از روش برهمنگاری و کرنش سنج با یکدیگر مقایسه شد و دقت و صحت نتایج در ارزیابی تنش پسماند مورد تایید قرار گرفت [۳۳].

نلسون<sup>۱</sup> و همکاران به تخمین تنش پسماند با استفاده از روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی سه بعدی پرداختند. آن ها در ابتدا به بررسی و ارائه روابط مورد نیاز برای تبدیل جابجایی های محاسبه شده به تنش پسماند و نحوه محاسبه ضرایب کالیبراسیون پرداختند. پس از آماده سازی دو دوربین و نصب آن ها، نمونه آلومینیومی 7075-T6 توسط اسپری رنگ آماده سازی و قبل از سوراخکاری تصویری مرجع از نمونه توسط دو دوربین گرفته شد. پس از عملیات سوراخکاری عکس بعدی توسط دو دوربین ثبت شد. سیستم برهمنگاری آرامیس سه بعدی<sup>۲</sup> که شماتیکی از آن در شکل ۱۰ نمایش داده شده است، به عنوان سیستم مورد استفاده در این پژوهش معرفی شد.



شکل ۱۰- شماتیک تصویر برداری سه بعدی [۳۴]

آن ها مقادیر مورد نیاز برای محاسبه تنش پسماند را از طریق آزمون های تجربی بدست آوردند و به این نتیجه رسیدند که مقادیر پیش بینی شده حل تحلیلی و آزمون برهمنگاری دارای اختلاف بسیار کمی می باشند. پس از انجام آزمون و بدست آوردن نتایج تنش پسماند توسط روش برهمنگاری و سوراخکاری، مقادیر بدست آمده با مقادیر آزمون سوراخکاری و تداخل سنجی محاسبه شد و صحت و دقت نتایج آزمون مورد تایید قرار گرفت [۳۴].

چنگ و فینی در سال ۲۰۰۷ یک تکنیک تحلیلی و محاسباتی کامل برای اندازه گیری تنش پسماند نزدیک

3 Xu Yaowu

1 D. V. Nelson  
2 ARAMIS-3D

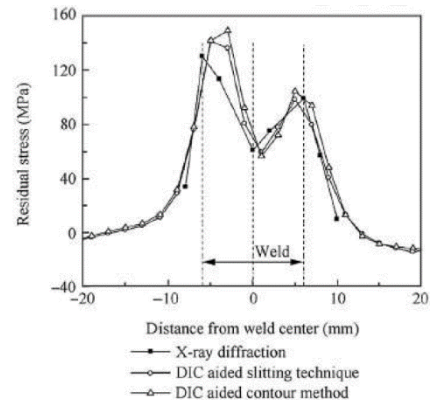
## ۵- نتیجه گیری

با توجه به نتایج بررسی‌های صورت گرفته و مطالعه منابع مرتبط، مشخص شده است که تلفیق روش برهمنگاری تصاویر دیجیتالی با روش‌های سنتی، بخصوص روش سوراخکاری مرکزی، دارای دقت مناسبی برای اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات می‌باشد. این روش دارای مزایای بسیاری نظیر عدم نیاز به آماده سازی سطح، مقرون به صرفه بودن با توجه به هزینه‌های تهیه و نصب کرنش سنج‌ها، رعایت هم‌محوری دریل و کرنش سنج و دسترسی به تمام سطح، نسبت به روش‌های اندازه‌گیری تنش پسماند معمول می‌باشد. با توجه به موارد ذکر شده در این پژوهش، این روش به عنوان روشی نوین و مناسب برای تخمین تنش پسماند پیشنهاد می‌شود. با این حال نیازمندی به یک سیستم سوراخکاری مناسب، پیچیدگی روابط در مواد غیرهمسانگرد و حساسیت سیستم به لرزش و ارتعاشات محیطی از جمله محدودیت‌های مورد توجه در کار پژوهشگران پیشین بوده است.

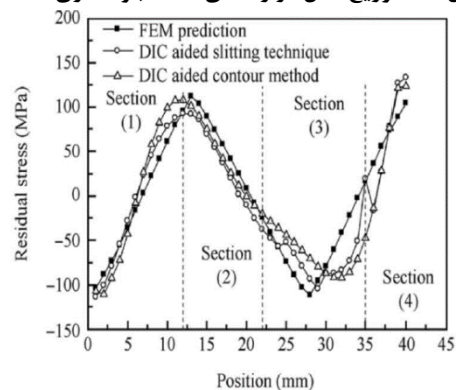
## ۶- مراجع

- [1] J. Mathar, Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes, *Transactions ASME*, Vol.56, No.4, pp. 249-254, 1934.
- [2] W. Soete, R. Vancrombrugge, An Industrial Method for the Determination of Residual Stresses, *Proc SESA*, Vol.8, No.1, pp. 17-28, 1950.
- [3] R.A. Kelsey, Measuring Non-uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method. *Proc SESA*, Vol.14, No.1, pp. 181-194, 1956.
- [4] N.J. Rendler, I. Vigness, Hole-Drilling Strain-Gage Method of Measuring Residual Stresses. *Experimental Mechanics*, Vol.6, No. 12, pp. 577-586, 1966.
- [5] A. Niku-Lari, J. Lu, J.F. Flavenot, Measurement of Residual-Stress Distribution by the Incremental Hole-Drilling Method, *Journal of Mechanical Working Technology*, Vol. 25, No.2, pp. 175-185, 1985.
- [6] G. Montay, A. Cherouat, J. Lu, N. Baradel, L. Bianchi, Development of the High-Precision Incremental-Step Hole-Drilling Method for the Study of Residual Stress in Multi-Layer Materials: Influence of Temperature and Substrate on ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 8 wt.% coatings, *Surface and Coatings Technology*, Vol.155, No.2-3, pp.152-160, 2002.
- [7] C.W. Chang, P.H. Chen, H.S. Lien, Evaluation of Residual Stress in Pre- Stressed Concrete Material by Digital Image Processing Photoelastic Coating and Hole Drilling Method, *Original Research Article Measurement*, Vol.42, No.4, pp. 552-558, 2009.
- [8] G.S. Schajer, Advances in Hole-Drilling Residual Stress Measurements. *Experimental Mechanics*, Vol. 50, No.2, pp. 159-168, 2009.

شیارزنی به کمک برهمنگاری تصویر دیجیتال برای ارزیابی تنش‌های پسماند در اتصالات جوشی با استفاده از برش‌های متوالی و راه حل‌های معکوس متعدد بر اساس مدل‌های الاستیک خطی استفاده شد. این روش توسط یک نمونه خمش چهار نقطه ای و یک نمونه جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی شده تایید شد، و نتایج نشان داد که: (۱) تنش‌های پسماند نمونه خمش چهار نقطه ای با روش شیارزنی به کمک برهمنگاری تصویر دیجیتال به خوبی با پیش بینی‌های المان محدود همخوانی داشت. در مقایسه با روش کانتور و برهمنگاری تصویر دیجیتال، روش شیارزنی و برهمنگاری تصویر دیجیتال دقت و پایداری بهتری داشت. (۲) تنش‌های پسماند در اتصال جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی که توسط روش شیارزنی به کمک برهمنگاری تصویر دیجیتال تعیین شده بود، با ارزیابی‌های به دست آمده توسط پراش اشعه ایکس سازگار بود (مطابق شکل ۱۲ و ۱۳). ضمناً، روش شیارزنی به کمک برهمنگاری تصویر دیجیتال یک وسیله قدرتمند برای اندازه گیری تنش‌های پسماند طولی در ورق نازک لب به لب جوش داده شده است [۴۱].



شکل ۱۲- توزیع تنش در راستای قطعه جوشکاری شده [۴۱]



شکل ۱۳- توزیع تنش نمونه خمکاری شده [۴۱]

development in additive manufacturing via digital image correlation, *Additive Manufacturing*, Vol. 22, pp. 1-12, 2018.

[26] Korsunsky, M. Alexander, M. Sebastiani, E. Bemporad, Residual stress evaluation at the micrometer scale: analysis of thin coatings by FIB milling and digital image correlation, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 205, No.7, pp. 2393-2403, 2010.

[27] M. Krottenthaler, C.Schmid, J. Schaufler, K.Durst, A simple method for residual stress measurements in thin films by means of focused ion beam milling and digital image correlation, *Surface and Coatings Technology*, Vol. 215, pp. 247-252, 2013.

[28] X.U. Yaowu, X. B. A. O. Rui, Residual stress determination in friction stir butt welded joints using a digital image correlation-aided slitting technique. *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 30, No.3, pp. 1258-1269, 2017.

[29] M. Sebastiani, C. Eberl, E. Bemporad, Depth-resolved residual stress analysis of thin coatings by a new FIB-DIC method, *Materials Science and Engineering: Vol.528*, No. 27, pp. 7901-7908, 2011.

[30] Sebastiani, M., et al. "Focused ion beam four-slot milling for Poisson's ratio and residual stress evaluation at the micron scale." *Surface and Coatings Technology*, Vol. 251, pp. 151-161, 2014.

[31] N. Daynes, G. Horne, P.J. Heard, D.Z.L. Hdgson, Microscale residual stress measurement in steel using focused ion beam slotting and digital image correlation, *Proceedings of the 2008 International Conference on Residual Stresses*. Vol. 23, 2008.

[32] B. Winiarski, P. J. Withers, Micron-scale residual stress measurement using micro-hole drilling and digital image correlation, *Application of Imaging Techniques to Mechanics of Materials and Structures*, Vol. 4, pp.189-198, 2013.

[33] J.D. Lord, D. Penn, P. Whitehead, The application of digital image correlation for measuring residual stress by incremental hole drilling, *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 13, pp. 65-73, 2008.

[34] D. V. Nelson, A. Makino, T. Schmidt. Residual stress determination using hole drilling and 3D image correlation. *Experimental Mechanics*, Vol. 46, No.1, pp. 31-38, 2006. Cheng, W., & Finnie, I. (2007). Residual stress measurement and the slitting method. Springer Science & Business Media.

[35] Cheng, W., & Finnie, I. (2007). Residual stress measurement and the slitting method. Springer Science & Business Media.

[36] Hermann, R. (1995). Crack growth and residual stress in Al-Li metal matrix composites under far-field cyclic compression. *Journal of materials science*, 30(15), 3782-3790.

[37] Ersoy, N., & Vardar, O. (2000). Measurement of residual stresses in layered composites by compliance method. *Journal of Composite Materials*, 34(7), 575-598.

[38] Hild, F., & Roux, S. (2006). Measuring stress intensity factors with a camera: Integrated digital image correlation (IDIC). *Comptes Rendus Mécanique*, 334(1), 8-12.

[39] Blair, A., Daynes, N., Hamilton, D., Horne, G., Heard, P. J., Hodgson, D. Z. L., ... & Shterenlikht, A. (2009). Residual stress relaxation measurements across interfaces at macro-and micro-scales using slitting and

[9] G.S. Schajer, Measurement of non-uniform residual stresses using the hole-drilling method. Part I—Stress calculation procedures, *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 110, No.4, pp. 338-343, 1988.

[10] Withers, P.J., Bhadeshia, H.K.D.H., "Over View Residual Stress: Part 1-Measurement Techniques," Vol 17, pp 355-365, 2001, "Journal of Material Science and Technology, Vol 17, pp 355-365, 2001.

[11] Withers, P.J., Bhadeshia, H.K.D.H., "Over View Residual Stress: Part 2-Nature And Origin," Journal of Material Science and Technology, Vol 17, pp 365-374, 2001.

[12] Daniel, I. M., & Liber, T., "Lamination residual stresses in fiber composite," NASA-CR-134826, 1975.

[13] Procter, E. and Beaney E. M., "the Trepan or Ring Core Method, Centre-Hole Method, Sach's Method, Blind Hole Methods, Deep Hole Technique", *Advances in surface treatment-technology and applications*, vol. 4, residual stress pub., pergomon press, pp. 165-198, 1987.

[14] "Determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method." ASTM Standard E837-99, American Society for Testing and Materials, 1999.

[15] Keil, S., "Experimental Determination of Residual Stresses with the Ring-Core Method and an On-Line Measuring System," *Exp. Tech.*, 1992.

[16] Zhao, Z. B., Hershberger, J., Yaliso, S. M. and Bilello, J. C. "Determination of residual stress in thin films: a comparative study of X-ray topography versus laser curvature method," *Thin Solid Films*, Vol. 415 No.1-2, , pp. 21-3, 2002.

[17] Fenn, R. H., Jones, A. M., and Wells, G. M., "X-Ray Diffraction Investigation of Triaxial Residual Stresses in Composite Materials," *Journal of Composite Materials*, Vol. 27, No. 14, pp. 1338-1351, 1993.

[18] Hutchings, M.T., Withers, P.J., Holden, T.M., Lorentzen, T., "Introduction to the Characterization of Residual Stress by Neutron Diffraction," Boca Raton: Taylor and Francis, 2005.

[19] Shokrieh, M. M., & Akbari, S. (2014). Measuring residual stresses in composite materials using the slitting/crack compliance method. In *Residual stresses in composite materials* (pp. 121-151). Woodhead Publishing.

[20] Vaidyanathan, S., & Finnie, I. (1971). Determination of residual stresses from stress intensity factor measurements. *Journal of basic Engineering*, 93(2), 242-246.

[21] Schajer, G. S. (1988) Measurement of non-uniform residual stresses using the hole-drilling method, *ASME Journal of Engineering Materials and Technology*, 110, 338-49.

[22] A. Shahmirzalo, M. Farahani, D. Akbari, Investigation the effects of subset size and step on the accuracy of measuring the elastic modulus by digital image correlation method, *Sixteenth International Conference on Aerospace Associations*, Khaje Nasir Al-Din Toosi University of Technology, Tehran, Iran, 2015.

[23] X. Huang, Z. Liu, H. Xie, Recent progress in residual stress measurement techniques. *Acta Mechanica Solida Sinica*, Vol. 26, No. 6, pp. 570-583, 2013.

[24] F. Hild, S. Roux, Digital image correlation. *Wiley-VCH, Weinheim*, pp. 183-228, 2012.

[25] J.L. Bartlett, B.P. Croom, J. Burdick, D. Henkel, X. Li, Revealing mechanisms of residual stress



amorphous materials. Metallurgical and Materials transactions A, 41(7), 1743-1751.

[42] Yaowu, X. U., & Rui, B. A. O. (2017). Residual stress determination in friction stir butt welded joints using a digital image correlation-aided slitting technique. Chinese Journal of Aeronautics, 30(3), 1258-1269.

DIC. In Journal of Physics: Conference Series (Vol. 181, No. 1, p. 012078). IOP Publishing.

[40] Daynes, N., Horne, G., Heard, P. J., Hodgson, D. Z. L., & Shterenlikht, A. (2008). Microscale residual stress measurement in steel using focused ion beam slotting and digital image correlation. In Proceedings of the 2008 International Conference on Residual Stresses.

[41] Winiarski, B., Langford, R. M., Tian, J., Yokoyama, Y., Liaw, P. K., & Withers, P. J. (2010). Mapping residual stress distributions at the micron scale in

## Application of Digital Image Correlation Method for Measurement of Residual Stress (A Review)

Farid Azadi<sup>1</sup>, Davood Akbari<sup>1\*</sup>, Peyman Ghasemi Tamami<sup>1</sup>

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

### Abstract:

In this paper, the measurement of residual stress by the combination of Hole drilling, slitting and digital image correlation methods and history of activities in this area have been investigated. To this end, the principles of the hole drilling, according to ASTM E837 and slitting methods have been discussed. Subsequently, the principles of digital image correlation and the methods used to calculate the correlation coefficient are investigated. To use the proposed method, related works done in recent years have been studied. For this purpose, related articles have been extracted and the main points for evaluation of residual stress using hole drilling and digital image correlation methods have been investigated. By reviewing past research done in the field of residual stress and examining the points made in the research, it has been determined that digital image correlation and central hole drilling methods can be used to measure the residual stresses in any industrial parts with high precision.

**Keywords:** Digital Image Correlation, Residual Stress, Destructive, Non-Destructive.