

## شبیه سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی در مواد ایزوتروپیک

محمود مهرداد شکرپه و احمدرضا قاسمی خوزانی

**چکیده:** تنشهای پسماند، تنشهایی خود متعادل هستند و بخشی از مقاومت قطعه صرف غلبه بر این تنشها می‌گردد. تاثیر تنشهای پسماند با توجه به مقدار، علامت و توزیع تنش در مقایسه با تنشهای ناشی از بار خارجی می‌تواند مفید یا مضر باشد. روش سوراخکاری مرکزی تنها روش اندازه‌گیری تنشهای پسماند است که به صورت استاندارد ASTM درآمده است.

در این تحقیق روش سوراخکاری مرکزی برای مواد ایزوتروپیک شبیه‌سازی گردیده است. نتایج بدست آمده در این تحقیق می‌تواند بجای روش آزمایشی مورد استفاده قرار گیرد. در این مطالعه شبیه‌سازی به صورت دو بعدی و سه بعدی انجام گرفته است. با تغییر نسبت قطر سوراخ به قطر روزت، ضرایب محاسبه شده با ضرایب موجود در استاندارد مقایسه گردیده‌اند. اثر تغییر ضریب پواسون بر روی کرنشهای اندازه‌گیری شده بررسی گردیده است. جهت مطالعه اثرات عمق سوراخکاری شبیه‌سازی سه‌بعدی انجام گرفته و صفحات فلزی با ضخامت متغیر شبیه‌سازی شده است. در هر حالت کرنش متوسط برای المانهای موجود در محل نصب کرنش سنج محاسبه گردیده است. نتایج شبیه‌سازی نمایانگر نزدیکتر بودن کرنش متوسط محاسبه شده از المانهای موجود در محل نصب کرنش‌سنج به نتایج بدست آمده از روش آزمایشی استاندارد می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** تنشهای پسماند، سوراخکاری مرکزی، ضرایب کالیبراسیون، شبیه‌سازی، اجزاء محدود

### ۱. مقدمه

تنشهای پسماند، تنشهایی خود متعادل هستند که در داخل قطعه محبوس گردیده‌اند و در حالیکه قطعه تحت هیچ نوع بار خارجی نیست، بخشی از مقاومت آن صرف غلبه بر این تنشها می‌گردد. تنشهای پسماند ممکن است در اثر فرآیند ساخت و یا در طول دوره کاری در قطعه پدید آیند. این نوع تنشها در فلزات در اثر مواردی نظیر تسلیم قطعه، جوشکاری، ریخته‌گری و نورد ایجاد می‌شوند. در بسیاری از موارد، تنشهای پسماند نقش عمده‌ای را در شکست سازه ایفا می‌کنند، ولی همیشه نقش مخرب ندارند. تاثیر تنشهای پسماند با توجه به مقدار، علامت و توزیع تنش در مقایسه با تنشهای ناشی از بار خارجی می‌تواند مفید یا مضر باشد [1].

اندازه‌گیری تنشهای پسماند عموماً بر پایه روشهای غیر مستقیم متکی بوده و به سه دسته عمده تقسیم می‌شود [2, 3]. در روش اول که به روش مکانیکی معروف است و از کرنش‌سنج برای اندازه‌گیری کرنشهای پسماند استفاده می‌شود، باید به طریقی تنش محبوس در حضور کرنش‌سنج آزاد شود تا کرنش‌سنج بتواند تغییر در کرنش را به سبب رها شدن تنش ثبت کند. بنابراین روش مکانیکی روشی مخرب و یا نیمه مخرب است. روش دوم یا روش نوری برای اندازه‌گیری تنشهای پسماند سطحی بعنوان روشی غیر مخرب، و برای اندازه‌گیری تنشهای پسماند زیرسطحی بعنوان روشی مخرب محسوب می‌شود. از روشهای غیر مخرب، روش پراش نوترونی است که روشی پرهزینه بوده و قطعه باید تحت اثر یک منبع نوترونی قرار گیرد. روش سوم روشی غیرمخرب است که خواصی از مواد را که در حالت تنش دار و عاری از تنش مقادیر متفاوتی دارند، اندازه‌گیری می‌نماید. این روش به روشهای فرا صوتی و مغناطیسی تقسیم می‌شوند.

از میان روشهای فوق روش سوراخکاری مرکزی یا Central hole-drilling تنها روش اندازه‌گیری تنشهای پسماند است که به صورت استاندارد ASTM درآمده است [1]. این روش، ساده و مطمئن بوده و از آنجا که باعث تخریب موضعی شده و ضمناً تاثیر عمده‌ای در کاهش عمرکرد نمونه ندارد، نیمه مخرب نامیده می‌شود.

نسخه اصلی مقاله در تاریخ ۱۳۸۳/۱/۲۵ واصل، و پس از بازنگریهای لازم، در تاریخ ۱۳۸۴/۱۰/۱۷ به تصویب نهایی رسیده است.  
سرپرستی داوری‌ها توسط دبیر تخصصی، دکتر شجاعی فرد صورت گرفته و مقاله توسط ایشان برای چاپ توصیه شده است.  
دکتر محمود مهرداد شکرپه، آزمایشگاه تحقیقاتی کامپوزیت‌ها، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران. [Shokrieh@iust.ac.ir](mailto:Shokrieh@iust.ac.ir)  
احمدرضا قاسمی خوزانی، آزمایشگاه تحقیقاتی کامپوزیت‌ها، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران.

سازه فرض شده است، که حذف تنشهای اولیه در ناحیه سوراخکاری باعث تغییر توزیع تنش در سازه می گردد.

Tootoonian و Shajer [14] برای افزایش حساسیت روش سوراخکاری سعی در ایجاد یک سوراخ مخروطی در نمونه و اندازه گیری کرنشهای رها شده نمودند. آنها برای محاسبه ضرایب کالیبراسیون با استفاده از روش المان محدود و اختصاص مدول الاستیک نزدیک صفر به المانهای سوراخ، مقادیر ضرایب کالیبراسیون را افزایش و دقت روش سوراخکاری مرکزی را بالا بردند. Beghini & Bertini [15] سعی بر آن داشتند که ضرایب موثر در روش انتگرال<sup>۱</sup> را اصلاح نمایند. آنان با استفاده از روش المان محدود توابع موثر بر این ضرایب و خطاهای احتمالی عملیات سوراخکاری را بررسی نمودند. Aoh & Wei نیز در سال ۲۰۰۳ [16] با استفاده از مدلهای دو بعدی و سه بعدی المان محدود نشان دادند، که نتایج یک مدل سه بعدی المان محدود در تعیین ضرایب کالیبراسیون موثرتر بوده و نتایج آن به واقعیت نزدیکتر است. Hwang و همکاران، [17] روش المان محدود را برای اصلاح ضرایب کالیبراسیون روش سوراخکاری مرحله ای در مواد ایزوتروپیک انتخاب نمودند. آنان در تحقیقات خود به مطالعه ضرایب کالیبراسیون در دو جهت پرداخته و رفتار این ضرایب را با شدت تنش بررسی نموده اند.

## ۲. تئوری

در شکل ۱ صفحه‌ای نازک تحت تنش یک محوره  $\sigma_0$  در نظر گرفته می‌شود. مقادیر تنش در مختصات قطبی به صورت زیر به دست می‌آیند [18].

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{\sigma_0}{2}(1 - \cos 2\theta) \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_0}{2}(1 + \cos 2\theta) \\ \tau_{r\theta} = \frac{\sigma_0}{2}\sin 2\theta \end{cases} \quad (1)$$

با ایجاد یک سوراخ به شعاع  $a$  در صفحه مذکور، یک قطعه استوانه‌ای شکل از ماده تنش‌دار از صفحه جدا شده و مقادیر تنش تغییر می‌کنند. توزیع تنش در اطراف سوراخ در این حالت در مختصات قطبی به صورت زیر است [18]:

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = \frac{\sigma_0}{2} \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \left[1 + \left(\frac{3a^2}{r^2} - 1\right) \cos 2\theta\right] \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_0}{2} \left[\left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) + \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta\right] \\ \tau_{r\theta} = \frac{\sigma_0}{2} \left(1 + \frac{3a^2}{r^2}\right) \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) \sin 2\theta \end{cases} \quad (2)$$

با کم کردن معادلات (۱) از (۲) تنش رها شده در اثر ایجاد سوراخ به صورت زیر بدست می‌آید:

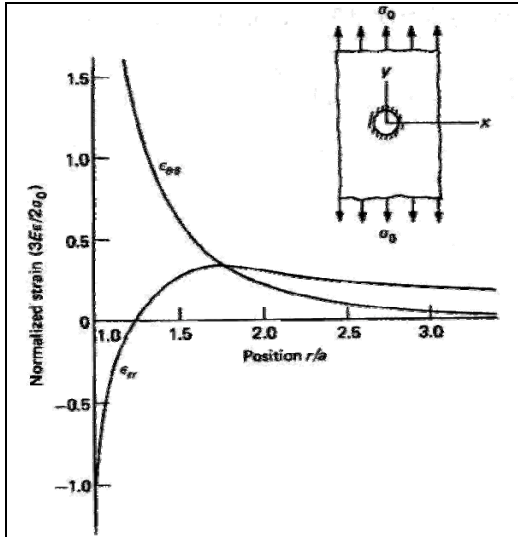
در این روش ابتدا کرنش‌سنج روزت به سطح یک قطعه دارای تنش پسماند متصل شده سپس یک سوراخ کوچک با عمقی تقریباً هم اندازه با قطر سوراخ در مجاورت کرنش‌سنج روزت ایجاد می‌گردد. این سوراخ به صورت محلی تنش‌ها را در محیط پیرامونی آزاد نموده و کرنشهای رها شده بوسیله سه کرنش‌سنج روی روزت اندازه‌گیری می‌شوند. با داشتن مقادیر کرنش‌های رها شده و بر اساس روابط ویژه مقادیر تنش‌های پسماند محاسبه می‌گردند. روش سوراخکاری برای اندازه‌گیری تنشهای پسماند اولین بار در سال ۱۹۳۴ توسط Mathar [4] پیشنهاد شده است. این روش برای مواد ایزوتروپیک و همگن در مقیاس ماکروسکوپی تهیه شده است [5]. در سال ۱۹۶۶ Rendler و Vigness [6] با تعریف ضرایبی به نام ضرایب کالیبراسیون، این روش را برای هر نوع ماده ایزوتروپیک عمومیت دادند. این روش در مواردی به کار می‌رود که تنشهای پسماند در عمق قطعه یکنواخت بوده و یا اینگونه فرض شوند [1]. در سال ۱۹۷۰ Lake و همکاران [7] در تحقیقی بر روی کامپوزیت‌های نازک الیاف شیشه‌ای نشان دادند که در مواد نازک نیازی به سوراخکاری حفره با عمق بهینه نبوده و تنها یک سوراخ سرتاسری برای اینکار کافیهست. ابتدا در سال ۱۹۶۸، Bert و Thompson [8] و بعدها در سال ۱۹۸۷، Prasad و همکاران [5] روال محاسباتی روش سوراخکاری را برای استفاده در مواد ارتوتروپیک تعمیم دادند. در سال ۱۹۹۴، Schajer و Yang [9] نشان دادند که تعمیم Prasad معتبر نبوده و روش متفاوتی را ارائه کردند که برای هر نوع ماده ارتوتروپیک و با هر درجه‌ای از خاصیت ارتوتروپیک برقرار است.

ضرایب کالیبراسیون به چهار عامل هندسه کرنش‌سنج، خواص مواد، شعاع سوراخ و عمق سوراخکاری بستگی دارد. برای مواد ایزوتروپیک ضرایب  $a$  و  $b$  و توزیع یکنواخت تنش در عمق برای یک سوراخ راه به در، دارای حل تحلیلی دقیق بوده و مقادیر آنها در استاندارد موجود است. برای یک سوراخ کور در ماده ایزوتروپیک نیز این ضرایب به روش عددی محاسبه و در استاندارد آمده است [10]. از روشهای قدرتمند در تعیین ضرایب کالیبراسیون و تعیین تنشهای پسماند روش المان محدود می باشد. در سال ۱۹۸۸ Shajer روش المان محدود را برای تعیین ضرایب کالیبراسیون در مواد ایزوتروپیک به کار برد [11]. او با استفاده از محاسبات المان محدود و حل عددی توانست این ضرایب را برای سوراخکاری مرحله ای و تنش غیر یکنواخت در عمق استخراج نماید. Flaman & Boag [12] به مقایسه نتایج حاصل از روش سوراخکاری مرکزی برای تغییرات تنشهای پسماند در عمق پرداخته اند. همزمان Shaw & Chen [13] نیز به توسعه معادلات روش المان محدود برای تجزیه و تحلیل کرنشهای اندازه گیری شده از روش سوراخکاری مرکزی پرداختند. در تحقیقات آنان تنشهای پسماند به عنوان تنشهای اولیه موجود در

1. Integral Method

$$\sigma_0 = 4.502E\varepsilon_g \quad (8)$$

قرار دادن کرنش سنج در این موقعیت، مزایایی از قبیل حداکثر بودن مقادیر مربوط به  $\varepsilon_{rr}$  و کم بودن تغییرات کرنش در ناحیه مجاور را داراست. برای اندازه گیری کرنش های  $\varepsilon_3, \varepsilon_2, \varepsilon_1$  کرنش سنج هایی با نام روزت طراحی شده اند که در آنها نقاط بهینه کرنش سنجی برای کرنش سنج ها رعایت گردیده است. در شکل (۲) دستگاه سوراخکاری مرکزی نشان داده شده است.



شکل ۱. توزیع کرنش در جهت x در اثر رهایی تنشهای

پسماند [18]

حساسیت پاسخ کرنش سنج ها مستقیماً به اندازه سوراخ در مقایسه با اندازه روزت وابسته است. حداکثر حساسیت برای یک روزت معین زمانی حاصل می شود که سوراخ بزرگترین اندازه مجاز را داشته باشد. همان گونه که نسبت  $\frac{D_0}{D}$  افزایش می یابد، حساسیت روش تقریباً به نسبت  $(\frac{D_0}{D})^2$  افزایش می یابد. رابطه زیر برای نسبت  $\frac{D_0}{D}$  برقرار است [1]:

$$0.3 < \frac{D_0}{D} < 0.5$$

در جدول (۱) اندازه های نامی روزت ها به همراه مقادیر مجاز قطر سوراخ مرکزی آنها داده شده است.

جدول ۱. ابعاد روزت به همراه قطرهای سوراخ پیشنهادی [1]

اندازه اسمی (mm)	۰/۷۹۴	۱/۵۸۸	۳/۱۷۵
D	۲/۵۷	۵/۱۳	۱۰/۲۶
GW=GL	۰/۷۹	۱/۵۹	۳/۱۸
R <sub>1</sub>	۰/۸۹	۱/۷۷	۳/۵۴
R <sub>2</sub>	۱/۶۸	۳/۳۶	۶/۷۲
Min D <sub>0</sub>	۰/۷۷	۱/۵۴	۳/۰۸
Max D <sub>0</sub>	۱/۰۱	۲/۵۷	۵/۱۳

$$\begin{cases} \sigma_{rr} = -\frac{\sigma_0 a^2}{2r^2} [1 + (\frac{3a^2}{r^2} - 4) \cos 2\theta] \\ \sigma_{\theta\theta} = \frac{\sigma_0 a^2}{2r^2} (1 + \frac{3a^2}{r^2} \cos 2\theta) \\ \tau_{r\theta} = -\frac{\sigma_0 a^2}{2r^2} (\frac{3a^2}{r^2} - 2) \sin 2\theta \end{cases} \quad (3)$$

توزیع کرنش متناظر با توزیع تنش معادلات (۳) عبارت است از:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= \frac{\sigma_{rr}}{E} - \nu \frac{\sigma_{\theta\theta}}{E} = \\ &= -\frac{\sigma_0 a^2 (1+\nu)}{2Er^2} (1 + \frac{3a^2}{r^2} \cos 2\theta - \frac{4 \cos 2\theta}{1+\nu}) \\ \varepsilon_{\theta\theta} &= \frac{\sigma_{\theta\theta}}{E} - \nu \frac{\sigma_{rr}}{E} = \\ &= \frac{\sigma_0 a^2 (1+\nu)}{2Er^2} (1 + \frac{3a^2}{r^2} \cos 2\theta - \frac{4\nu \cos 2\theta}{1+\nu}) \\ \varepsilon_{r\theta} &= \frac{1+\nu}{E} \tau_{r\theta} = \\ &= -\frac{\sigma_0 a^2 (1+\nu)}{2Er^2} (\frac{3a^2}{r^2} - 2) \sin 2\theta \end{aligned} \quad (4)$$

اگر روابط فوق برای حالتی که بجای  $\sigma_0$  تنشهای  $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$  بر قطعه اعمال می شوند بازنویسی شوند، رابطه کلی زیر را می توان برای کرنش های متناظر آنها نوشت:

$$\varepsilon_r = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + C \tau_{xy} \sin 2\theta \quad (5)$$

در رابطه (۵)،  $\theta$  زاویه نقطه دلخواه با محور x بوده و ضرایب A, B و C مقادیر ثابتی هستند که ثوابت کالیبراسیون نامیده می شوند.  $\tau_{xy}, \sigma_y, \sigma_x$  را نیز می توان تنشهای پسماند موجود در قطعه در نظر گرفت. اگر روزت مورد استفاده از نوع ساعتگرد که کرنش سنج ها در زوایای 0, ۱۳۵, و ۲۷۰ درجه نصب گردیده اند باشد، خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} A+B & 0 & A-B \\ A & -C & A \\ A-B & 0 & A+B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \\ \sigma_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} \quad (6)$$

با اندازه گیری مقادیر  $\varepsilon_3, \varepsilon_2, \varepsilon_1$  و استفاده از رابطه (۶) مقادیر تنشهای پسماند بدست می آیند.

## ۱-۲. نقاط کرنش سنجی

برای یافتن نقاط بهینه برای اندازه گیری کرنش ها روابط (۴) را برای نقطه ای روی محور X ( $\theta = 0$ ) بدست می آوریم:

$$\begin{cases} \frac{2E\varepsilon_{rr}}{\sigma_0(1+\nu)} = -(\frac{a}{r})^2 [1 + 3(\frac{a}{r})^2 - \frac{4}{1+\nu}] \\ \frac{2E\varepsilon_{\theta\theta}}{\sigma_0(1+\nu)} = (\frac{a}{r})^2 [1 + 3(\frac{a}{r})^2 - \frac{4\nu}{1+\nu}] \end{cases} \quad (7)$$

توزیع  $\frac{3E\varepsilon}{2\sigma_0}$  بر حسب  $\frac{r}{a}$  برای  $\nu = \frac{1}{3}$  در شکل (۱) ترسیم شده است.

همان گونه که مشاهده می شود، توزیع کرنش ها در مجاورت ناحیه  $r=a$  تغییرات شدیدی دارد، بنابراین مکان مناسبی برای

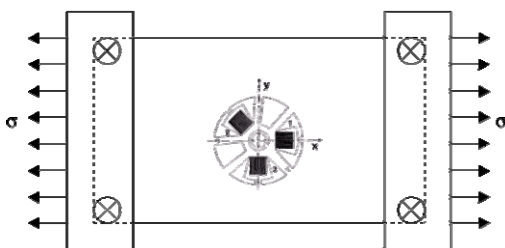
کرنش سنجی نیست. در موقعیت  $\frac{r}{a} = 1/75$  خواهیم داشت [18]:

بدست آوردن ضرایب کالیبراسیون برای سوراخ سرتاسری بصورت تحلیلی با انتگرال گیری روی سطح کرنش سنج محاسبه می گردد. برای مواد ایزوتروپیک می توان ثوابت A, B و C را طبق روابطی خاص و با استفاده از جداول مربوطه که در استاندارد ASTM شماره E837 موجود است به راحتی محاسبه نمود [1].

در روش آزمایشگاهی با اعمال یک تنش معلوم  $\sigma$  در جهت X به نمونه و صفر بودن تنش در جهت Y با استفاده از روابط (۹) و مطابق شکل (۳) ضرایب کالیبراسیون A و B بدست می آیند:

$$A = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_3}{2\sigma} \quad (9)$$

$$B = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_3}{2\sigma}$$

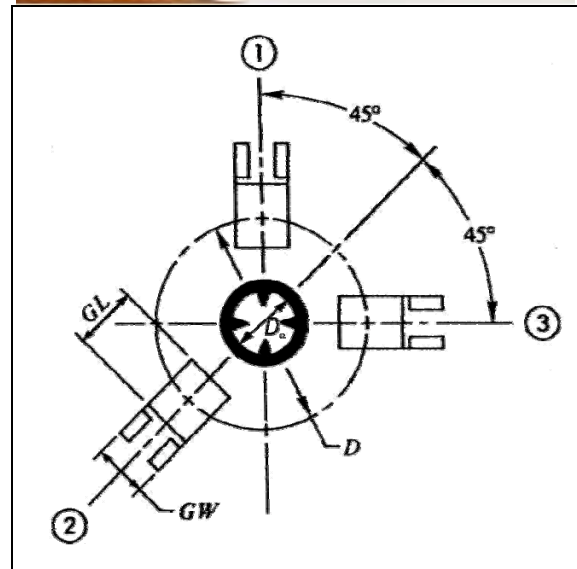


شکل ۳: آزمایش تعیین ضرایب A و B

برای کاهش حداکثر اثرات لبه ای و موضعی، قطر سوراخ باید حداکثر یک پانزدهم پهنای قطعه نمونه بوده و حداکثر تنش اعمالی از نصف تنش تسلیم تجاوز ننماید. نکته مهم در این است که مقادیر بدست آمده برای ضرایب کالیبراسیون فقط قابل استفاده برای آزمایشی است که دقیقاً با شرایط کالیبراسیون سازگار باشد.

### ۳. شبیه سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی

جهت شبیه سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی (Simulated central hole-drilling=SCHD) از نرم افزار المان محدود Ansys استفاده گردیده است. یک نمونه فولادی ( $E = 200GPa, \nu = 0.3$ ) در حالت تنش صفحه ای در نظر گرفته شده است. المان مورد استفاده المان ۸ گره ای Plane82 از نوع Solid می باشد. محل نصب کرنش سنج روزت با اندازه اسمی ۱/۵۸۸ میلی متر و قطر متوسط ۵/۱۳ میلی متر (D) به دقت المان بندی گردیده است. همچنین محل سوراخکاری با قطرهای متغیر از ۰/۳D تا ۰/۵D متمایز گردیده و المان بندی شده است (شکل ۴). ابعاد صفحه نیز ۱۵۰\*۱۵۰ میلی متر شبکه بندی گردیده است. تعداد المان مورد استفاده در شبیه سازی حالت دو بعدی کل مدل ۲۲۱۷ المان می باشد و برای شبکه بندی هر کرنش سنج از سه کرنش سنج یک روزت نیز ۳۶ المان مورد استفاده قرار گرفته است.

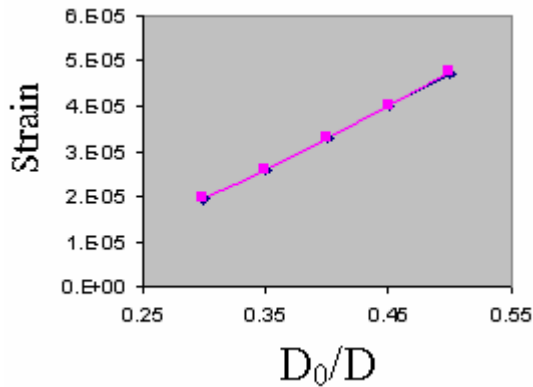


شکل ۲. دستگاه سوراخکاری مرکزی و کرنش سنج روزت

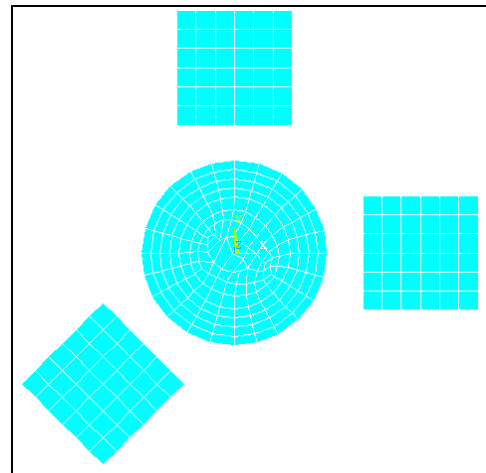
عمق سوراخ در حدود ۰/۴ D یا کمی بیشتر از آنست، اما برای ماده ای که ضخامت آن از ۱/۲ D کمتر است، باید یک سوراخ سرتاسری در قطعه ایجاد شود.

### ۲-۲. تعیین ضرایب کالیبراسیون

ثوابت کالیبراسیون A, B, C در رابطه (۶) به خواص ماده، هندسه روزت، قطر و عمق سوراخ وابسته اند. تعیین ضرایب کالیبراسیون در روش سوراخکاری مرکزی از اهمیت زیادی برخوردار بوده و می توان مقادیر این ثوابت را به روشهای تجربی و یا عددی بدست آورد. برای مواد ایزوتروپیک  $C=2B$  بوده و برای یک روزت پادساعتگرد کمیت  $C$  در معادله ماتریسی (۶) به  $C$  تبدیل می شود.

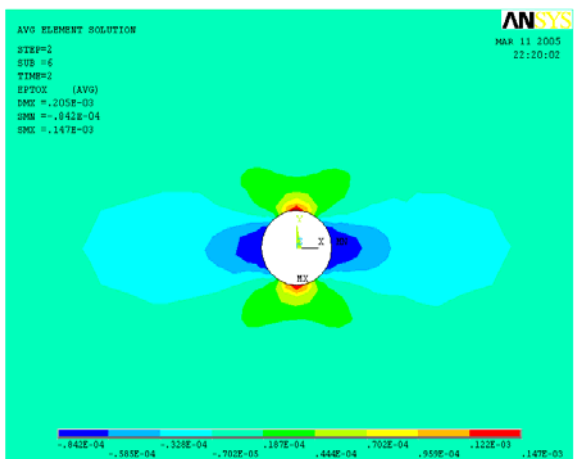


شکل ۵. تطابق خوب کرنشهای بدست آمده از روش شبیه سازی سوراخکاری مرکزی SCHD و روش ASTM



شکل ۴. شبکه بندی سوراخ و کرنش سنج

نتایج استخراج شده برای هر کرنش سنج از معدل گیری کرنش در راستای نصب کرنش سنج و بر اساس متوسط کرنش هر المان در نقاط گوسی استخراج گردیده است. از آنجا که المان مرتبه دوم استفاده گردیده است می توان دقت مناسبی را انتظار داشت. شکل (۶) توزیع تنش ون- مایسز را برای قطر سوراخ  $0/4D$  نشان می دهد.



شکل ۶. توزیع تنش ون- مایسز در شبیه سازی سوراخکاری مرکزی

### ۳-۱. اعمال تنش دو محوره و تغییرات ضریب پواسون

جهت مطالعات بیشتر توجه خود را به مدل با ناحیه سوراخکاری  $0/4D$  معطوف می نماییم. با اعمال تنش دو محوره در مدل شبیه سازی شده با قطر سوراخ  $0/4D$  و مقایسه نتایج با استاندارد خطایی کمتر از  $0/13$  درصد مشاهده گردیده است. همچنین تغییرات ضریب پواسون از  $0/25$  تا  $0/35$  بر روی کرنشهای اندازه گیری شده در شکل (۷) بررسی گردیده است.

تنش تک محوره اولیه  $20 \text{ MPa}$  به نمونه داده شده است. پس از حل المانهای سوراخ انتخاب گردیده و در حالت مرگ (Kill Elements) قرار داده شده اند. در این حالت سفتی المانهای انتخاب گردیده به  $10^{-6}$  \* مقدار اولیه خود کاهش می یابد. پس از سوراخکاری و حل توسط نرم افزار کرنش در راستای هر کرنش سنج در محل قرارگیری شبکه های کرنش سنج استخراج گردیده و متوسط آنها بدست آمده است.

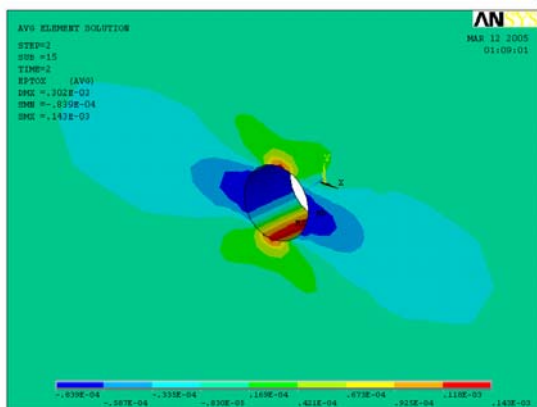
با این روش می توان ضرایب کالیبراسیون را محاسبه و با نتایج حل دقیق استاندارد مقایسه نمود. همچنین با استفاده از استاندارد ASTM [1] و ضرایب کالیبراسیون برای یک سوراخ سرتاسری می توان کرنشها را محاسبه نمود. در جدول (۲) کرنشهای بدست آمده از روش شبیه سازی سوراخکاری مرکزی با کرنشهای بدست آمده از ضرایب کالیبراسیون استاندارد مقایسه گردیده و درصد خطا بدست آمده است. نتایج استخراج شده برای هر کرنش سنج از معدل گیری کرنش در راستای نصب کرنش سنج و بر اساس متوسط کرنش هر المان در نقاط گوسی استخراج گردیده است. کرنشهای بدست آمده از هر دو روش در شکل (۵) ترسیم گردیده اند.

نتایج مدل سازی صفحه ای تطابق بسیار مناسبی با استاندارد نشان داده است. همچنین میزان افزایش خطا در دو مقدار حدی  $D_0/D$  مشهود است.

### جدول ۲: مقایسه ضرایب کالیبراسیون و کرنش های بدست

آمده از روش SCHD و ASTM

$\frac{D_0}{D}$	ASTM		SCHD		ASTM ( $\mu\epsilon$ )	SCHD ( $\mu\epsilon$ )	Error %
	A	B	A	B			
0/3	0/089	0/278	0/0891	0/2784	19/69	19/71	0/14
0/35	0/121	0/364	0/1211	0/3642	26/07	26/08	0/07
0/40	0/158	0/454	0/1582	0/4551	32/97	32/99	0/06
0/45	0/200	0/544	0/2002	0/5438	40/20	40/21	0/02
0/5	0/247	0/629	0/2481	0/6303	47/51	47/64	0/29



شکل ۸. توزیع کرنش در جهت تنش وارده در یک نمونه (ضخامت برابر قطر)

با افزایش تدریجی عمق سوراخی که در مرکز روزت ایجاد می‌گردد، کرنش‌های رهاشده در فواصل مساوی قرائت می‌گردند. با این فرض که کرنش رهاشده در هر مرحله کاملاً در اثر تنش موجود در همان مرحله از عمق سوراخ بوده است، تنش‌هایی که در هر مرحله از عمق سوراخ وجود داشته‌اند محاسبه می‌شوند. برای هر مرحله‌ای از عمق سوراخ، ضرایب کالیبراسیون متفاوتی را باید به کار برد. این ضرایب کالیبراسیون برای هر مرحله از عمق سوراخ به صورت تجربی یا عددی و با سوراخکاری مرحله‌ای در نمونه‌ای که تحت تنش یکنواخت خارجی از پیش معلوم است، تعیین می‌شوند [12].

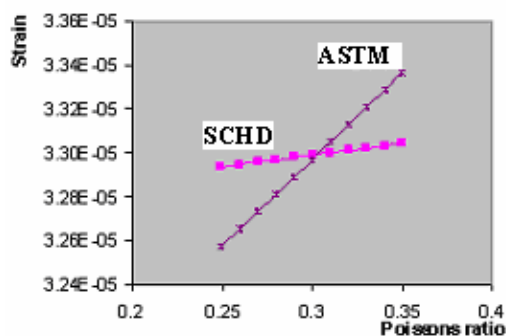
در اعمال تنشهای پسماند یکنواخت به نمونه و سوراخکاری مرکزی کرنش متوسط روی المانهای سطحی و کرنش متوسط کل المانهای زیر سطح در محل نصب کرنش سنج بدست آمده است. مقدار محاسبه شده کرنش از روش استاندارد  $\mu\epsilon$  ۳۲/۹۷ می باشد. مقادیر محاسبه شده از روش SCHD در این حالت در جدول (۳) ارائه شده اند.

جدول ۳. کرنشهای بدست آمده از شبیه سازی سوراخکاری

در حالت سه بعدی برای مواد نازک

ضخامت mm	کرنش محاسبه شده از استاندارد ASTM	کرنش متوسط در لایه اول ( $\mu\epsilon$ )	درصد خطا	کرنش متوسط المانهای حجمی ( $\mu\epsilon$ )	درصد خطا
۱	۳۲/۹۷	۳۳/۵۵	۱/۷	۳۳/۵۵	۱/۷
۱/۵	۳۲/۹۷	۳۴/۳۱	۴/۱	۳۴/۱۴	۳/۵
۲	۳۲/۹۷	۳۵/۰۰	۶/۲	۳۴/۸۱	۵/۶

در این حالت نیز نتایج تطابق مناسبی با استاندارد نشان می دهد. حداکثر خطا در حالت سه بعدی برای ضخامت تقریباً برابر قطر سوراخ ۶/۲ درصد بدست آمده است. نتایج روش SCHD همچنین



شکل ۷. کرنشهای بدست آمده از روش SCHD و ASTM با تغییرات ضریب پواسون

شکل فوق نشان می دهد که کرنشهای بدست آمده با استفاده از ضرایب کالیبراسیون استاندارد شیب بیشتری را نسبت به روش شبیه سازی سوراخکاری مرکزی نشان می دهد. لازم به ذکر است که حد اکثر خطای دو روش ۱/۱۱ درصد برای ضریب پواسون ۰/۲۵ و کمترین آن ۰/۰۶ درصد برای ضریب پواسون ۰/۳ بوده است. از آنجا که روش SCHD از روش اجزاء محدود بعنوان یک روش عددی استفاده نموده است، و از آنجا که مقادیر کرنش بسیار کوچک می باشند، خطاهای عددی می تواند باعث تغییر شیب این روش نسبت به روش استاندارد گردد.

## ۲-۳. شبیه سازی سوراخکاری مرکزی در حالت سه

### بعدی برای قطعات نازک

در این قسمت جهت شبیه سازی سوراخکاری مرکزی در قطعات نازک از المان ۲۰ گره ای Solid186 استفاده گردیده است. محل سوراخکاری با قطر ثابت ۲/۰۵۲ میلیمتر (۰/۴D) المان بندی گردیده است. صفحه در سه حالت با ضخامتهای ۱، ۱/۵ و ۲ میلیمتر بررسی گردیده است. تنش تک محوره ۲۰ MPa به نمونه داده شده است. شکل (۸) توزیع کرنش در جهت تنش وارده را در یک نمونه با ضخامتی برابر قطر نشان می دهد. از آنجا که کرنش سنج بر روی سطح قطعه نصب می گردد، تغییرات کرنش روی سطح را ثبت می نماید. پس از انجام اولین مرحله، کرنش رهاشده در مراحل بعد تحت تاثیر دو عامل تنش‌های موجود در آن عمق و تغییر هندسه سوراخ است. لذا امکان رهاسازی کرنش بیشتری را نسبت به مراحل قبلی می دهد. بنابراین در صورتی که عمق جدید سوراخ کاملاً عاری از تنش باشد نیز رهاسازی کرنش ادامه می یابد [12].

در این حالت مشابه روش سوراخکاری ابتدا یک کرنش سنج روزت در سطح نمونه نصب می گردد.

سوراخکاری و محل نصب کرنش سنج به دقت المان ریزی شده است. پس از وارد نمودن بار اولیه به عنوان تنش پسماند موجود در قطعه جهت شبیه سازی فرآیند سوراخکاری، المانهای موجود در ناحیه سوراخ در مدل اجزاء محدود حذف شده اند. سپس کرنش در محل نصب روزت در جهت نصب کرنش سنج واقعی استخراج گردیده و میانگین گیری گردیده است. در حالت دو بعدی قطر سوراخ از کمترین مقدار مجاز شروع شده و تا حداکثر آن ادامه یافته است. نتایج حالت دو بعدی خطایی کمتر از ۰/۳ درصد را در مقایسه با نتایج استاندارد نشان می دهد. همچنین تغییرات ضریب پواسون از ۰/۲۵ تا ۰/۳۵ مورد بررسی قرار گرفته است. در حالت سه بعدی قطر سوراخ ثابت در نظر گرفته شده است و ضخامت قطعه از حالت صفحه ای تا تقریباً ضخامت برابر قطر سوراخ افزایش داده شده است. نتایج شبیه سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی نمایانگر نزدیکتر بودن متوسط کرنش المانهای حجمی در مقایسه با روش استاندارد می باشد.

نتایج تحقیق نشان می دهد که در مدل المان محدود می توان تنشهای اولیه را به عنوان تنشهای پسماند موجود در قطعه در نظر گرفت. همچنین لحاظ نمودن سطح کرنش سنج در محاسبات ضروری است. با شبیه سازی سه بعدی نیز امکان مطالعه روش سوراخکاری مرحله ای و محاسبه تنشهای پسماند غیر یکنواخت در عمق فراهم می گردد.

### مراجع

- [1] *Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method*, ASTM Standard E837, American Society for Testing and Materials, 2004.
- [2] Ersoy N. and Vardar O., "Measurement of Residual Stresses in Layered Composites by Compliance Method," *Journal of Composite Materials*, vol. 34, no. 7, 2000, pp. 575-598.
- [3] Tuck Ma Fim C. W., "The Measurement of Residual Stress," BGA Technical Publications, <http://www.bga.org.uk>, 1999.
- [4] Mathar J., "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes," *Transactions of ASME* 56, no. 4, 1934, pp. 249-254.
- [5] Prasad C. B., Prabhakaran R. and Thompkins S., "Determination of Calibration Constants for the Hole-Drilling Residual Stress Measurement Technique Applied to Orthotropic Composites," *Composite Structures*, Part I: Theoretical Considerations, vol. 8, no. 2, 1987, pp. 105-118, Part II: Experimental Evaluations, vol. 8, no. 3, 1987, pp. 165-172.
- [6] Rendler N. J. and Vigness I., "Hole-Drilling Strain-Gage Method of Measuring Residual Stresses," *Experimental Mechanics*, vol. 6, no. 12, 1966, pp. 577-586.

بیانگر خطای کمتر کرنش متوسط کل المانهای حجمی در محل نصب روزت نسبت به استاندارد می باشد. در شبیه سازی روش سوراخکاری مرکزی در قطعات نازک در این تحقیق تنش یکنواخت فرض شده است و شبیه سازی روش سوراخکاری مرحله ای برای قطعات با توزیع غیر یکنواخت تنش در دست بررسی است.

### ۴. نتایج و بحث

مقایسه ضرایب کالیبراسیون ارائه شده در استاندارد و ضرایب روش سوراخکاری مرکزی به روش المان محدود، دقت و اطمینان فرآیند شبیه سازی را نشان می دهد. نتایج شبیه سازی دو بعدی روش سوراخکاری مرکزی بیانگر خطایی کمتر از ۰/۳ درصد در کرنشهای رها شده شبیه سازی می باشد. همچنین کرنشهای رها شده از حذف المانها در ناحیه سوراخکاری تطابق خوبی با کرنشهای پیش بینی شده توسط ضرایب استاندارد دارند.

نتایج ارائه شده در شکل (۷) نشان می دهد که حساسیت روش شبیه سازی فرآیند سوراخکاری به تغییرات ضریب پواسون کمتر از مقادیر ارائه شده در استاندارد می باشد، اما خطای حاصله بسیار ناچیز و کمتر از ۰/۱۳ درصد می باشد. علت این امر را می توان در استفاده از روش عددی و حل المان محدود جستجو نمود. در حل عددی تنش و کرنش در هر نقطه از تنش و کرنش نقاط اطراف تاثیر می پذیرد. لذا از آنجا که کرنشهای مورد مطالعه مقادیر کوچکی دارند، با جمع شدن خطاها کرنشهای بدست آمده از روش SCHD و ASTM شیب ظاهراً متفاوتی نشان می دهند. با محاسبه ضرایب کالیبراسیون مشخص گردیده است که ضرایب روش SCHD و ASTM بسیار به یکدیگر نزدیکند.

مدلسازی سه بعدی فرآیند سوراخکاری امکان مطالعه تنشهای زیر سطحی و بررسی کرنشهای رها شده در گامهای متوالی روش سوراخکاری مرکزی را فراهم می نماید. در این حالت نیز نتایج شبیه سازی تطابق مناسبی با استاندارد دارند. حداکثر خطا در حالت سه بعدی برابر ۶/۲ درصد بدست آمده است.

### ۵. نتیجه گیری

روش المان محدود روشی قدرتمند و مطمئن در تعیین ضرایب کالیبراسیون روش سوراخکاری مرکزی جهت تعیین تنشهای پسماند می باشد. در این روش امکان مطالعه شدت تنش، لحاظ نمودن سطح کرنش سنج در محاسبات، مطالعه تغییرات خواص مواد و تغییرات هندسی سوراخ وجود دارد.

در این تحقیق با استفاده از روش المان محدود روش سوراخکاری مرکزی برای تعیین تنشهای پسماند شبیه سازی گردیده است. شبیه سازی به صورت دو بعدی و سه بعدی انجام گرفته است. در حالت دو بعدی از المان صفحه ای ۸ گره ای و در حالت سه بعدی از المان سه بعدی ۲۰ گره ای استفاده گردیده است. در هر حالت محل

- [13] Shaw D. and Chen H. Y., "A Finite Element Technique to Analyze the Data Measured by the Hole-Drilling Method," *Experimental Techniques*, vol. 30, n. 2, 1990, pp.120-1233.
- [14] Tootoonian M. and Schajer G. S., "Enhanced Sensitivity Residual-Stress Measurements Using Taper-Hole Drilling," *Experimental Mechanics*, June 1995, pp. 124-129.
- [15] Beghini M. and Bertini L., "Analytical Expressions of the Influence Functions for Accuracy and Versatility Improvement in the Hole-Drilling method", *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 35, n. 2, Mar, 2000, pp.125-135.
- [16] Aoh J. N. and Wei C. S., "On the Improvement of Calibration Coefficients for Hole-Drilling Integral Method: Part II-Experimental Validation of Calibration Coefficients," *Journal of Engineering Materials and Technology*, *Transactions of the ASME*, vol. 125, n. 2, April, 2003, pp.107-115.
- [17] Hwang B. W., Shu C. M. and Kim S. H. "Finite Element Analysis of Calibration Factors for the Modified Incremental Strain Method," *Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, vol. 38, n. 1, January, 2003, pp.45-51.
- [18] Dalley J. W. and Riley W. F., *Experimental Stress Analysis*, 1991, pp. 329-333.
- [7] Lake B. R., Appl F. J. and Bert C. W., "An Investigation of the Hole-Drilling Technique for Measuring Planar Residual Stress in Rectangularly Orthotropic Materials", *Experimental Mechanics*, vol. 10, no. 10, 1970, pp. 233-239.
- [8] Bert C. W. and Thompson G. L., "A Method for Measuring Planar Residual Stresses in Rectangularly Orthotropic Materials," *Journal of Composite Materials*, vol. 2, no. 2, 1968, pp. 244-253.
- [9] Schajer G. S. and Yang L., "Residual-Stress Measurement in Orthotropic Materials Using the Hole-Drilling Method", *Experimental Mechanics*, December 1994, pp. 324-333.
- [10] "Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method," *Technical Note TN-503*, Measurements Group, <http://www.measurementsgroup.com/guide/tn/tn503/503intro.htm>, 2001.
- [11] Schajer G. S., "Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the Hole-Drilling Method. Part I – Stress Calculation Procedures," *Journal of Engineering Materials and Technology*, vol. 110, October 1988, pp. 338-343.
- [12] Flaman M. T. and Boag J. M., "Comparison of Residual-Stress Variation with Depth-Analysis Techniques for the Hole-Drilling Method," *Experimental Techniques*, vol. 30, n. 4, December 1990, pp.352-355.