

بررسی عددی اثر هندسه قطعه بر ضرایب کالیبراسیون در روش Hole-Drilling

محمد صدیقی (دانشیار)

محمدسعید اشتری (کارشناس ارشد)

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران

در این تحقیق با استفاده از روش اجزاء محدود، اثرات هندسه قطعه بر ضرایب کالیبراسیون در روش سوراخ‌کاری^۱ مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور فرایند شبیه‌سازی برای قطعات استوانه‌ای با قطرهای مختلف و سپس برای یک صفحه مسطح انجام گرفته و ضرایب کالیبراسیون برای هندسه‌های مختلف تعیین شده است. در انجام تحلیل‌ها، قطر سوراخ و هندسه شاخه‌ی کرنش‌سنج ثابت بوده، و فقط هندسه قطعه تغییر کرده است. تحلیل برای هر قطعه با تغییر عمق سوراخ در هشت مرحله صورت پذیرفته است. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی برای صفحه مسطح و مقادیر موجود در استاندارد نشان‌گر خطای حدوداً ۲/۸ درصدی است. همچنین مقایسه‌ی نتایج به دست آمده برای سطوح منحنی با صفحه‌ی صاف در عمق‌های مختلف سوراخ‌کاری، اختلاف‌های متفاوتی بین ۰/۶ تا ۶/۲ درصد را نشان داده است.

sedighi@iust.ac.ir
saeed_3396@yahoo.com

واژگان کلیدی: تنش‌های پسماند، سوراخ‌کاری، ضرایب کالیبراسیون.

۱. مقدمه

روش سوراخ‌کاری از رایج‌ترین روش‌ها برای تعیین تنش‌های پسماند است. در این روش در نمونه‌ی که باید در آن تنش پسماند تعیین شود سوراخی تعبیه می‌شود. بنابراین، تنش‌ها آزاد شده و دیواره‌ی آن سوراخ عاری از تنش می‌شود و در نزدیکی سوراخ تغییر شکل رخ می‌دهد. تغییر شکل انجام شده به وسیله کرنش‌سنج‌ها اندازه‌گیری می‌شود. با استفاده از روابط ۱ و ۲ می‌توان تنش‌های پسماند از کرنش‌های اندازه‌گیری شده در اطراف سوراخ را تعیین کرد.

$$\sigma_{\min}, \sigma_{\max} = \frac{\varepsilon_2 + \varepsilon_1}{4A} \pm \frac{\sqrt{(\varepsilon_2 - \varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_2 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2}}{4B} \quad (2)$$

که در آن $\varepsilon_2, \varepsilon_1$ و ε_2 کرنش‌های اندازه‌گیری شده توسط کرنش‌سنج‌ها هستند. ضرایب \bar{A} و \bar{B} نیز «ضرایب کالیبراسیون» نامیده می‌شوند، و با استفاده از روابط ۳ و ۴ به دست می‌آیند:

$$\bar{A} = -\frac{1+\nu}{2E} \times \bar{a} \quad (3)$$

$$\bar{B} = -\frac{1}{2E} \times \bar{b} \quad (4)$$

که در آنها \bar{a} و \bar{b} ضرایب کالیبراسیون مستقل از گونه هستند. مقدار این ضرایب برای سطح صاف استاندارد است، و در موارد خاص با استفاده از روش کالیبراسیون تجربی یا شبیه‌سازی نرم‌افزاری به دست می‌آیند.

تاریخ: دریافت ۱۳۸۶/۵/۳، داوری ۱۳۸۷/۴/۱۷، پذیرش ۱۳۸۷/۱۱/۷.

امروزه مزایای شبیه‌سازی باعث رشد روزافزون استفاده از این روش شده است. از جمله مزایای این روش می‌توان به سهولت انجام کار در مدت زمان کوتاه، و صرف هزینه‌ی بسیار اندک اشاره کرد. همچنین در روش تجربی به دلیل ایده‌آل نبودن شرایط و عدم دقت محاسباتی و هندسی، همواره خطاهایی وجود دارند. از جمله‌ی این خطاها می‌توان به عدم استقرار کرنش‌سنج‌ها در راستا و مکان مناسب، خروج از مرکز سوراخ (مثلاً ۲۵° میلی‌متر خروج از مرکز، حدوداً ۳ درصد خطا ایجاد می‌کند)، عیوب شبکه‌ی قطعه و پیش‌تنش‌های موجود در آن، عدم دقت دستگاه‌های آزمایشگاهی (مانند دستگاه آزمایش کشش، دیتالاگر و...) اشاره کرد. در روش تجربی برای ایجاد هرگونه تغییر در خصوصیات هندسی، تکرار آزمایش ضروری است. اما در روش عددی این تغییرات را به سادگی، و در مدت زمان کوتاهی می‌توان اعمال کرد. در روش عددی می‌توان ضرایب \bar{A} و \bar{B} را برای هر هندسه و شرایط دلخواه تعیین کرد؛ دست‌یابی به این مهم در روش تجربی در بعضی موارد ممکن نیست. تعیین تنش‌های پسماند با روش سوراخ‌کاری نخستین بار در سال ۱۹۳۴، و برای اندازه‌گیری توزیع تنش یکنواخت در نمونه ارائه شد.^[۱] سپس در سال ۱۹۶۶ و با معرفی ضرایب کالیبراسیون، روش سوراخ‌کاری برای تمام مواد ایزوتروپیک عمومیت یافت.^[۲] در سال ۱۹۸۱ برای شبیه‌سازی روش سوراخ‌کاری از روش اجزاء محدود استفاده شد.^[۳] در سال ۱۹۸۷ ضرایب کالیبراسیون برای یک سطح صاف و در یک عمق خاص محاسبه شد.^[۴] ضرایب مستقل از گونه نیز در سال ۱۹۸۸ به صورت تابعی از عمق سوراخ برای حالت تنش یکنواخت در سطوح مسطح و بر پایه‌ی مطالعات اجزاء محدود تعیین شد.^[۵] در ادامه، شبیه‌سازی سوراخ‌کاری در مواد ایزوتروپیک با صفحات نازک، مواد اورتوتروپیک و چندلایه‌های

جدول ۲. ضریب $\bar{\alpha}$ برای هندسه‌های مختلف و عمق سوراخ‌های مختلف.

استاندارد	صفحه مسطح	استوانه با قطر ۴۰ میلی‌متر	استوانه با قطر ۲۰ میلی‌متر	عمق سوراخ
۰/۰۹۰	۰/۰۹۲۸۷	۰/۰۹۰۳۱	۰/۰۹۰۴۱	۰/۲۵۶۵
۰/۲۰۶	۰/۲۱۴۷۷	۰/۲۱۱۹۱	۰/۲۱۲۰۱	۰/۵۱۳
۰/۳۰۵	۰/۳۱۵۵۱	۰/۳۱۷۴۰	۰/۳۱۹۸۴	۰/۷۶۹۵
۰/۳۷۷	۰/۳۸۵۸۹	۰/۳۹۴۷۳	۰/۳۹۹۳۲	۰/۱۰۲۶
۰/۴۲۵	۰/۴۳۴۱۹	۰/۴۴۵۷۴	۰/۴۵۱۱۷	۱/۲۸۲۵
۰/۴۵۴	۰/۴۶۴۵۵	۰/۴۷۷۱۳	۰/۴۸۲۲۰	۱/۵۳۹۰
۰/۴۷۲	۰/۴۷۸۳۵	۰/۴۹۴۹۹	۰/۴۹۹۱۱	۱/۷۹۵۵
۰/۴۸۲	۰/۴۸۹۳۹	۰/۵۰۴۰۴	۰/۵۰۶۶۲	۲/۰۵۲۰

کامپوزیتی با کمک روش اجزاء محدود انجام، و ضرایب کالیبراسیون برای این مواد محاسبه شد.^[۶] و در نهایت در سال ۲۰۰۷ با ترکیب دو روش سوراخ‌کاری و نوری غیر تماسی ضرایب کالیبراسیون در مواد اورتوتروپیک مورد مطالعه قرار گرفت.^[۷]

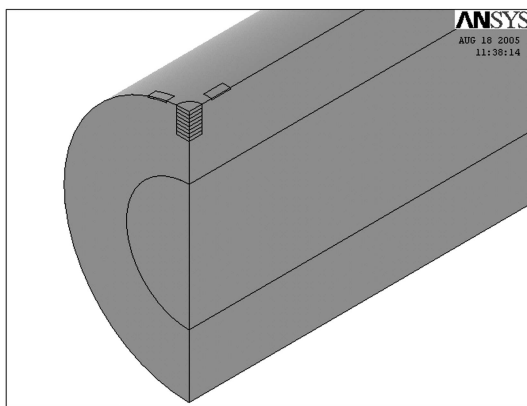
در این تحقیق با استفاده از روش اجزاء محدود، اثرات هندسه‌ی قطعه برای قطعات استوانه‌یی با قطرهای مختلف و نیز یک صفحه‌ی مسطح انجام گرفته و ضرایب کالیبراسیون برای هندسه‌های مختلف تعیین شده است.

۲. تعیین ضرایب کالیبراسیون به کمک شبیه‌سازی

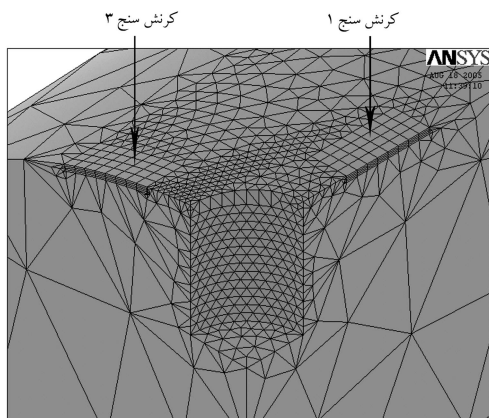
برای انجام فرایند شبیه‌سازی از روش اجزاء محدود و نرم‌افزار ANSYS استفاده شده است. فرایند شبیه‌سازی برای سه هندسه‌ی مختلف شامل: سطوح مدور با قطرهای ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر، و همچنین برای یک صفحه‌ی مسطح انجام گرفته است. لذا می‌توان ضرایب کالیبراسیون را در هر سه هندسه مقایسه کرد. لازم به ذکر است که ضرایب کالیبراسیون برای سطح صاف در استانداردها موجودند.^[۸] در این تحقیق به منظور اثبات صحت شبیه‌سازی انجام شده و فرضیات آن، سطح صاف نیز مدل شده و ضرایب آن استخراج شده‌اند. در جدول‌های ۱ و ۲ می‌توان نتایج شبیه‌سازی را با مقادیر استاندارد مقایسه کرد. این مقایسه حاکی از حدود ۲/۸ درصد خطا است که میزان قابل قبولی است.

شبیه‌سازی (در هر سه مورد) با فرضیه‌ها و اصول مشابه انجام پذیرفته است. همچنین تحلیل‌ها به صورت تقارن محوری انجام پذیرفته‌اند. قطر سوراخ تعبیه شده در قطعات برای اندازه‌گیری کرنش‌های آزاد شده، ۲/۰۵۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با توجه به انجام تحلیل به صورت مرحله‌یی، با کشتن اجزاء عمق آن در هر مرحله افزایش پیدا می‌کند. در شکل ۱ مدل ساخته شده برای تحلیل نشان داده شده است. قطر دایره‌ی چیدمان کرنش‌سنج‌های شاخه‌یی برابر ۵/۱۳ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی شاخه‌ها مطابق شکل ۲، کرنش‌سنج‌هایی در دو راستای صفر و ۹۰ درجه قرار داده شدند.

به منظور مدل‌سازی کرنش‌سنج‌ها، از حجم‌هایی به طول ۰/۵ سانتی‌متر و عرض ۰/۴ سانتی‌متر و عمق ۰/۱ میلی‌متر استفاده شده که در آنها مش بندی به صورت انتقالی انجام گرفته و عمق هر حجم به ۴ قسمت تقسیم شده است. برای اندازه‌گیری



شکل ۱. مدل ساخته شده برای تحلیل.



شکل ۲. مدل سوراخ و دایره‌ی چیدمان کرنش‌سنج‌ها و مش بندی.

جدول ۱. ضریب $\bar{\alpha}$ برای هندسه‌های مختلف و عمق سوراخ‌های مختلف.

استاندارد	صفحه مسطح	استوانه با قطر ۴۰ میلی‌متر	استوانه با قطر ۲۰ میلی‌متر	عمق سوراخ
۰/۰۴۹	۰/۰۵۲۰۲	۰/۰۴۹۲۰	۰/۰۴۹۱۱	۰/۲۵۶۵
۰/۱۰۸	۰/۱۱۴۴۳	۰/۱۱۰۵۳	۰/۱۱۰۴۸	۰/۵۱۳
۰/۱۵۱	۰/۱۵۷۵۸	۰/۱۵۵۸۶	۰/۱۵۶۳۷	۰/۷۶۹۵
۰/۱۷۷	۰/۱۸۱۴۷	۰/۱۸۳۲۶	۰/۱۸۴۴۲	۰/۱۰۲۶
۰/۱۹	۰/۱۹۳۹۵	۰/۱۹۷۰۱	۰/۱۹۸۹۳	۱/۲۸۲۵
۰/۱۹۵	۰/۱۹۸۹۴	۰/۲۰۲۳۲	۰/۲۰۵۱۲	۱/۵۳۹۰
۰/۱۹۵	۰/۱۹۵۳۷	۰/۲۰۲۸۳	۰/۲۰۶۷۲	۱/۷۹۵۵
۰/۱۹۲	۰/۱۹۳۹۴	۰/۲۰۰۸۲	۰/۲۰۵۸۷	۲/۰۵۲۰

کرنش‌های آزاد شده، فقط از اجزاء نزدیک سطح استفاده شده است که عمق آنها ۰/۲۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. هر کرنش‌سنج از ۳۲ جزء تشکیل شده است که برای محاسبه‌ی کرنش آزاد شده، میانگین کرنش‌های به دست آمده از اجزاء مد نظر بوده است. خطای نتایج به دست آمده با این روش، نسبت به حالتی که کرنش‌ها فقط از طریق گره‌های سطحی به دست می‌آیند، کم‌تر از ۱ درصد است.

۴. نتایج و بحث

از آنجا که در این تحقیق اثر هندسه‌ی نمونه مورد بررسی است، در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده سایر عوامل اثرگذار مربوط به هندسه‌ی شبیه‌سازی، شامل هندسه‌ی کرنش‌سنج و هندسه‌ی سوراخ (قطر و عمق سوراخ) ثابت فرض شده‌اند. لذا هرگونه اختلاف در نتایج شبیه‌سازی، ناشی از اختلاف قطر نمونه‌های مدل‌شده است. همچنین یادآور می‌شود که نتیجه‌ی شبیه‌سازی فرایند سوراخ‌کاری برای صفحه‌ی مسطح با مقادیر موجود در استاندارد^[۸] مقایسه شده که اختلاف نتایج ناشی از خطای موجود در فرض‌های انجام‌شده در شبیه‌سازی است.

مفروضات در قسمت تعیین ضرایب کالیبراسیون به‌کمک شبیه‌سازی آورده شده است. خطا در نتایج ممکن است ناشی از عوامل زیر باشد:

۱. کرنش‌سنج‌ها ۰/۲۵ میلی‌متر در سطح فرو رفته‌اند؛
 ۲. میانگین کرنش در ۳۲ جزء، به‌عنوان کرنش اندازه‌گیری‌شده در روابط قرار گرفته است.
- (خطای مورد بحث ۲/۵ تا ۳ درصد است.)

در جداول ۱ و ۲، نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای تعیین ضرایب \bar{a} و \bar{b} آمده است. با استفاده از جداول ۱ و ۲، میانگین درصد خطای شبیه‌سازی انجام‌شده برای ضریب \bar{a} نسبت به مقدار استاندارد برابر با ۰/۳٪، و برای ضریب \bar{b} برابر با ۲/۵۸٪ است. این مقادیر نشان می‌دهند که شبیه‌سازی با دقت قابل قبولی انجام گرفته است. در جدول ۳، مقایسه و درصد اختلاف نتایج به‌دست آمده برای صفحه‌ی مسطح و نمونه‌های استوانه‌ای آورده شده است.

جدول ۳ نشان می‌دهد که تفاوت در عمق‌های مختلف تا چه حد می‌تواند موجب بروز خطا در نتایج شود. همان‌طور که در جدول فوق مشاهده می‌شود، درصد اختلاف در سوراخ‌های با عمق کم‌تر از ۰/۵ میلی‌متر و عمق بالاتر از ۱/۳ میلی‌متر تقریباً غیر قابل اغماض است. به‌عبارت دیگر در تحقیقاتی که دقت نتایج اهمیت بالایی دارد، نمی‌توان از ضرایب موجود در استاندارد برای هندسه‌های مختلف استفاده کرد، و در هر مورد باید به‌وسیله‌ی یکی از دو روش تجربی یا شبیه‌سازی ضرایب را استخراج کرد.

جدول ۳. درصد اختلاف ضرایب سطوح منحنی نسبت به سطح صاف.

عمق سوراخ (میلی‌متر)	درصد اختلاف ضریب \bar{A}		درصد اختلاف ضریب \bar{B}	
	استوانه به قطر ۲۰ میلی‌متر	استوانه به قطر ۴۰ میلی‌متر	استوانه به قطر ۲۰ میلی‌متر	استوانه به قطر ۴۰ میلی‌متر
۰/۲۵۶۵	۵/۵۹	۵/۴۲	۲/۶۶	۲/۷۶
۰/۵۱۳۰	۳/۴۵	۳/۴۱	۱/۲۹	۱/۳۳
۰/۷۶۹۵	۰/۷۶	۱/۰۹	۱/۳۷	۰/۶۰
۱/۰۲۶۰	۱/۶۳	۰/۹۹	۳/۴۸	۲/۲۹
۱/۲۸۲۵	۲/۵۷	۱/۵۸	۳/۹۱	۲/۶۶
۱/۵۳۹۰	۳/۱۱	۱/۷۰	۳/۸۰	۲/۷۱
۱/۷۹۵۵	۵/۸۱	۳/۸۲	۴/۳۴	۳/۴۸
۲/۰۵۲۰	۶/۱۵	۳/۵۴	۳/۵۲	۲/۹۹

از آنجا که شبیه‌سازی به‌صورت مرحله‌ی مد نظر است، سوراخ مدل‌شده در بدنه‌ی قطعات در عمق قطعه به ۸ قسمت تقسیم شده است. لذا می‌توان شبیه‌سازی را با عمق‌های مختلف سوراخ انجام داد. در ادامه، تنش کالیبراسیون به‌نمونه اعمال می‌شود و تحلیل انجام می‌گیرد. ابتدا قطعه بدون سوراخ تحلیل می‌شود، و سپس در هر مرحله اجزاء محل سوراخ تا عمق مورد نظر کشته شده‌اند و تحلیل انجام می‌شود. تحلیل برای هر قطعه در هشت عمق مختلف انجام گرفته است. در هر مرحله ۰/۲۵۶۵ میلی‌متر به عمق سوراخ اضافه شده است.

اصول شبیه‌سازی تشریح‌شده‌ی فوق برای هر سه هندسه رعایت شده است. سطوح مدور به‌صورت استوانه‌هایی به قطرهای ۲۰ و ۴۰ و ارتفاع ۱۰۰ میلی‌متر مدل‌شده‌اند و صفحه‌ی مدل‌شده دارای طول ۱۲۰، عرض ۲۴ و ضخامت ۱۲ میلی‌متر بوده است.

شبیه‌سازی صفحه‌ی مدل‌شده به دو منظور انجام شده است. هدف اول، همان‌طور که پیش‌تر ذکر شد، مقایسه‌ی نتایج حاصل با مقادیر موجود در استاندارد به‌منظور پی‌بردن به صحت نتایج حاصل از شبیه‌سازی، و هدف دوم مقایسه‌ی ضرایب کالیبراسیون به‌دست آمده برای سطوح منحنی و صفحه‌ی مسطح است. تنش کالیبراسیون برابر با ۴۵۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. طبق استاندارد این مقدار باید از نصف تنش تسلیم کم‌تر باشد تا در اطراف سوراخ تسلیم موضعی رخ ندهد.

۳. محاسبه‌ی ضرایب کالیبراسیون

با استفاده از روش شبیه‌سازی، برای هر قطعه (هر هندسه) از اختلاف کرنش‌ها در قطعه‌ی بدون سوراخ و قطعه‌ی سوراخ‌دار (با عمق سوراخ معین)، کرنش‌های آزاد شده به‌دست می‌آیند. اگر ε_{e1} کرنش آزادشده در راستای اعمال بار، ε_{e2} کرنش آزاد شده در راستای عمود بر اعمال بار، و σ_c معرف تنش کالیبراسیون باشد، ضرایب کالیبراسیون چنین محاسبه می‌شوند^[۸]:

$$\bar{A} = \frac{\varepsilon_{e1} + \varepsilon_{e2}}{2\sigma_c} \quad (۵)$$

$$\bar{B} = \frac{\varepsilon_{e1} - \varepsilon_{e2}}{2\sigma_c} \quad (۶)$$

این ضرایب به خصوصیات هندسی و خواص مکانیکی ماده بستگی دارند. طی تلاش‌های صورت‌گرفته به‌منظور حذف وابستگی این ضرایب به خواص مکانیکی ماده^[۵]، ضرایب مستقل از جنس ماده مطابق رابطه‌های ۷ و ۸ معرفی شد:

$$\bar{a} = -\frac{2E}{1+\nu} \times \bar{A} \quad (۷)$$

$$\bar{b} = -2E\bar{B} \quad (۸)$$

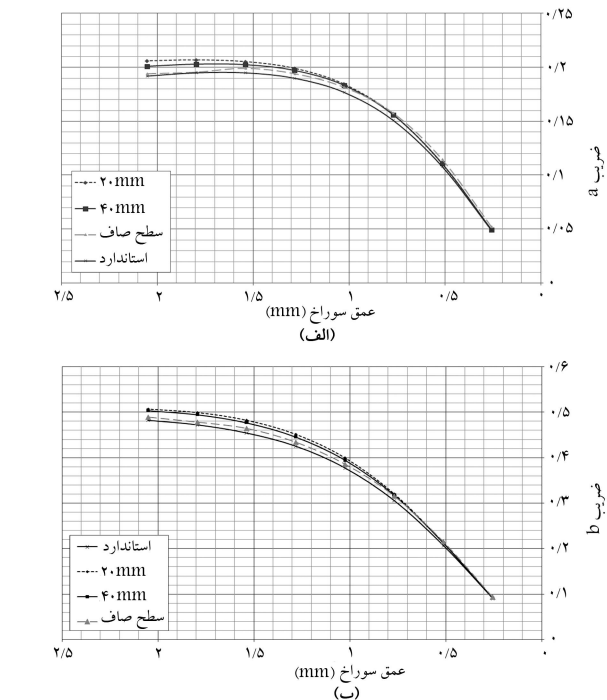
که در آنها E مدول کشسانی، و ν ضریب پواسون است. این ضرایب فقط به خصوصیات هندسی مسئله - اعم از هندسه‌ی سوراخ، هندسه‌ی شاخه و هندسه‌ی قطعه - بستگی دارند. در صورتی‌که هریک از شرایط هندسی یا خصوصیات فیزیکی ماده مورد آزمایش تغییر کند، \bar{A} و \bar{B} نیز تغییر خواهند کرد، و باید برای تعیین آنها، در صورت عدم وجود در استاندارد، کالیبراسیون انجام پذیرد.

انحنای سطحی که اندازه‌گیری روی آن انجام می‌گیرد کم‌تر باشد (به سطح صاف نزدیک‌تر باشد)، درصد اختلاف کم‌تر می‌شود. در جدول ۳ درصد اختلاف برای قطر ۴۰ میلی‌متر نسبت به قطر ۲۰ میلی‌متر کم‌تر است. بنابراین استفاده از ضرایب صفحه‌ی مسطح برای هندسه‌هایی که سطح منحنی دارند، موجب بروز خطا در محاسبات می‌شود.

بنابراین توصیه می‌شود در هر مورد با استفاده از شبیه‌سازی ضرایب تعیین شوند. در شکل ۳ ضرایب کالیبراسیون حاصل از شبیه‌سازی به صورت منحنی نشان داده شده‌اند. با استفاده از این نمودارها می‌توان ضرایب را برای هر عمق دلخواه تعیین کرد.

۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش اجزاء محدود، اثرات هندسه‌ی قطعه بر ضرایب کالیبراسیون در روش سوراخ‌کاری برای قطعات استوانه‌ی بی و تخت مورد بررسی قرار گرفت. مقایسه‌ی نتایج شبیه‌سازی برای صفحه‌ی مسطح و مقادیر موجود در استاندارد حدود ۲/۸ درصد خطا و نتایج به دست آمده برای سطوح منحنی با صفحه‌ی صاف در عمق‌های مختلف سوراخ‌کاری، اختلاف‌های متفاوتی بین ۰/۶ تا ۶/۲ درصد را نشان داد. همچنین نتایج نشان دادند که هر قدر سطحی که اندازه‌گیری روی آن انجام می‌گیرد انحنای کم‌تری داشته باشد و به سطح صاف نزدیک‌تر باشد، درصد اختلاف کم‌تر می‌شود. بنابراین استفاده از ضرایب صفحه‌ی مسطح برای هندسه‌هایی که سطح منحنی دارند، در محاسبات خطا وارد می‌کند و در این مورد توصیه می‌شود در هر مورد با استفاده از شبیه‌سازی ضرایب تعیین شوند.



شکل ۳. منحنی ضرایب \bar{a} و \bar{b} بر حسب عمق سوراخ برای سطوح منحنی به قطرهای ۲۰ و ۴۰ میلی‌متر، سطح صاف و مقادیر استاندارد.

نکته‌ی قابل توجه دیگری که کاملاً منطقی نیز به نظر می‌رسد، کاهش درصد اختلاف با افزایش قطر استوانه‌ها همراه است. این مطلب نشان می‌دهد که هر قدر

پانویس

1. hole-drilling

منابع

1. Mathar, J. "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilling Holes", *Transactions of ASME*, **56**(4), pp. 249-254 (1934).
2. Rendler, N.J., and Vigness, I. "Hole drilling strain gage method of measuring residual stresses", *Experimental Mechanics*, **6**(12) pp. 577-586 (1966).
3. Schajer, G.S. "Application of finite element calculation to residual stress measurement", *ASME*, **103** (1987).
4. Niku Lari, J.L., and Flavenot, J.F. "Measurement of residual stress distribution by the hole drilling method", In A. Niku Lari (Editor): *Advances in Surface Treatments-Technology and Application*, (4), Residual Stress, pp. 199-219 (1987).
5. Schajer, G.S. "Measurement of non-uniform residual stresses using the hole drilling method", *Journal of Engineering Materials and Technology*, **110**(4), Part 1: pp. 338-343; Part 2: pp. 344-349 (October 1988).
6. Shokrieh M.M., and Ghasemi A.R. "Simulation of central hole drilling process for measurement of residual stresses in isotropic, orthotropic and laminated composite plates", *Journal of composite materials*, **41**(4), p.435-452 (2007).
7. Baldi, A. "Full field methods and residual stress analysis in orthotropic material", *International Journal of Solids and Structures*, **44**(25-26), pp. 8229-8243 (2007).
8. ASTM Standard: "Standard test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method," Designation: E 837-01 (January 2002).