http://mechanics.journals.modares.ac.ir

مجله علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

دوره ۱۱ شماره ۱ بهار ۱۳۹۰ ص ص ۱۹-۲۷

تاریخچه مقاله:
دریافت ۸۹/۵/۳
پذیرش ۹۰/۳/۲۸
ارائه در سایت ۹۰/۴/۱

تعیین ضرایب کالیبره‌کردن تنش در اندازه‌گیری تنش پسماند با روش سوراخکاری افزایشی

محمد صدیقی[1*]، مهرداد خاندائی[2]، جلال جودکی[3]

۱- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران
۲- دانشجوی دکترای، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران
۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت، تهران
*تهران، صندوق پستی ۱۶۷۶۵-۱۶۳ sedighi@iust.ac.ir

چکیده- تنش پسماند-که بر اثر ورود به منطقهٔ پلاستیک ایجاد می‌شود-یکی از عوامل تأثیرگذار بر طراحی و کارکرد قطعات است، استاندارد ASTM E837-01 تنش پسماند در قطعات تخت به‌روش سوراخکاری را بررسی کرده و ضرایب کالیبره‌کردن تنش را برای ورق‌های تخت با پروفیل تنش ثابت ارائه کرده است، اما استاندارد خاصی برای اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات انحنادار به‌روش سوراخکاری افزایشی در دسترس نیست. در این مقاله نخست به‌روش المان محدود ضرایب کالیبره‌کردن تنش در روش سوراخکاری افزایشی تعیین و سپس از نتایج یک آزمون تجربی و یک شبیه‌سازی عددی برای بررسی درستی این ضرایب استفاده می‌شود. آزمون تجربی کالیبره‌کردن شامل آزمون خمش چهار نقطه در ورق تخت آلومینیومی از جنس AA5056 F است که پروفیل تنش آنها به‌روش تحلیلی شناخته شده است. شبیه‌سازی عددی شامل خمش چهار نقطهٔ ورق است که مقادیر کرنش در هر مرحله به‌روش المان محدود تعیین شده است. نتایج نشان می‌دهد که ضرایب کالیبره‌کردن به‌دست آمده دقت مناسبی داشته و محدوده عمق‌های قابل اندازه‌گیری توسط این روش نیز در نتایج قابل مشاهده است.

کلیدواژگان: اندازه‌گیری تنش پسماند، روش سوراخکاری افزایشی، آزمون کالیبرہ‌کردن، ضرایب کالیبره‌کردن تنش.

Calibration Coefficients for Residual Stress Measurement in Incremental Hole Drilling Method

M. Sedighi*[1], M. Khandaei[2], J. Joudaki[3]

1- Associate Professor, School of Mechanical Eng, Iran Univ of Science and Tech.
2- Ph. D. Student, School of Mechanical Eng, Iran Univ of Science and Tech.
3- M. Sc. Student, School of Mechanical Eng, Iran Univ of Science and Tech.
*P.O.B. 16765-163 Tehran. Iran sedighi@iust.ac.ir

Abstract- Residual stress is an important parameter which affects the mechanical behavior of manufactured parts. The ASTM standard code E837-01 describes measurement of residual stresses in flat parts using the hole-drilling method. It presents calibration coefficients for plates with uniform stress distribution. But there is no standard code for measuring residual stresses in curved thin parts using the hole-drilling method. In this paper, first the calibration coefficients are determined using the FEM for the incremental hole-drilling method. Then the coefficients are verified using an experimental test and a FE simulation result. The experimental test consists of a flat AA5056F plate under bending conditions. The FE simulation also consists of bending loading condition. In experimental test, calibration coefficients are applied to measure the bending stress using the incremental hole-drilling method. In FE simulation, strains are determined and used to calculate the induced stress using the calibration coefficients. The results show that the stresses can be determined with good accuracy using the calibration coefficients. Also it is observed that the maximum depth through which the stress distribution can be determined accurately is limited by some factors, such as, stress concentration effects due to the drilled hole.

Keywords: Residual Stress Measurement, Incremental Hole-Drilling, Calibration Test, Stress Calibration Coefficients.

۱- مقدمه

اندازه‌گیری تنش پسماند به کمک روش سوراخکاری برای اولین بار در سال ۱۹۳۴ توسط ماتار [۱] معرفی شد. در سال ۱۹۵۰ سوئت و وانکرومبروگ [۲] این روش را تکمیل کردند. کلسی [۳] نخستین فردی بود که مسأله تغییرات تنش پسماند در راستای ضخامت را در سال ۱۹۵۶ به‌کمک روش سوراخکاری مطالعه کرد. رندلر و ویگنس [۴] در سال ۱۹۶۶ روش سوراخکاری را توسعه دادند و هندسه و شکل استانداردی را برای روزت کرنش‌سنج پیشنهاد کردند. توسعه روش سوراخکاری موجب شد که استاندارد ASTM E837 برای نخستین بار در سال ۱۹۸۱ تعریف و ارائه شود. در سال ۱۹۷۴ پروکتر و بینی [۵] برای نخستین بار، روش سوراخکاری به کمک هوای فشرده را برای سوراخکاری قطعات -به گونه‌ای که فرایند ماشینکاری، تنش پسماند در قطعه ایجاد نکند- استفاده کردند. فلامان [۶] در سال ۱۹۸۲ برای نخستین بار سوراخکاری با سرعت دورانی بالا (400,000 rpm) را مطرح کرد. شاجر [۷] در سال ۱۹۸۱ برای نخستین بار روش المان محدود را برای کاربردهای عمومی در روش سوراخکاری ارائه کرد که در این روش ضرایب کالیبره‌کردن $\overline{B}, \overline{A}$ معرفی شد. وی در سال ۱۹۸۸ ضرایب کالیبره‌کردن خود را تصحیح کرد [۸،۹].

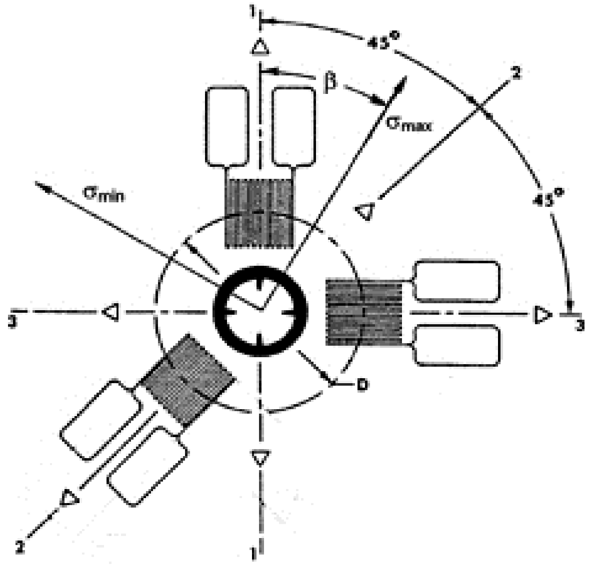
استاندارد ASTM E837-01 [۱۰] یکی از مهم‌ترین مراجع موجود برای تعیین تنش پسماند است و در آن الزامات اندازه‌گیری تنش ارائه شده است. روش مطرح شده در این استاندارد شامل چسباندن روزت کرنش‌سنج به سطح و انجام سوراخکاری در نزدیکی کرنش‌سنج است. با اندازه‌گیری کرنش‌های آزاد شده و استفاده از معادلات تبدیل کرنش به تنش، تنش‌های پسماند اصلی و راستای آن‌ها مشخص می‌شود. تنش پسماند اندازه‌گیری شده به‌روش این استاندارد برای تعیین تنش پسماند در مواد همسانگرد و الاستیک خطی استفاده می‌شود. نکته قابل توجه آن است که روش سوراخکاری تنش پسماند را در نزدیکی سطح ماده اندازه‌گیری می‌کند و برای اندازه‌گیری در عمق، به فرمول‌بندی دیگری نیاز است. نیکولاری [۱۱] در سال ۱۹۸۵ به مطالعه این روابط پرداخت. وی از روش سوراخکاری افزایشی استفاده و معادلات مربوط را استخراج کرد. همچنین مونتای [۱۲] در سال ۲۰۰۲ از روش سوراخکاری افزایشی استفاده و تنش پسماند حرارتی را در فرایند پوشش‌دهی به‌کمک اکسیدهای زیرکونیوم اندازه‌گیری کرد. ونکیتاکریشنان [۱۳] تنش پسماند در لوله‌های شکل‌دهی شده و جوشکاری شده را ارزیابی کرد. کواچ [۱۴] در سال ۲۰۰۴ اثر کوپلینگ بر ایجاد تنش پسماند در ورق‌های تخت را مطالعه کرد. چانگ [۱۵] در سال ۲۰۰۹ روش سوراخکاری را با روش پردازش تصویر ترکیب کرد. شاجر [۱۶] در سال ۲۰۰۹ پیشرفت‌های اخیر در اندازه‌گیری تنش پسماند را مرور کرد و مهم‌ترین مسأله در مسیر توسعهٔ روش سوراخکاری را ایجاد تجهیزات لازم برای استفاده میدانی از روش‌های نوری دانسته است. مینجوت [۱۷] در سال ۲۰۱۱ دقت روش سوراخکاری را برای اندازه‌گیری تنش پسماند در قطعات سرامیکی مطالعه کرده است.

در این مقاله، نخست روابط تحلیلی حاکم بر کالیبره‌کردن تنش پسماند در سوراخکاری افزایشی ارائه و سپس ضرایب کالیبره‌کردن به‌روش المان محدود محاسبه می‌شوند. صحت ضرایب به‌دست آمده با کمک روش المان محدود بررسی می‌شود. به این منظور از نتایج آزمون خمش چهار نقطه از ورق ساده-که در نرم‌افزار المان محدود شبیه‌سازی شده-استفاده می‌شود. همچنین از یک آزمون تجربی برای بررسی دقت روش اندازه‌گیری استفاده می‌شود. آزمون تجربی شامل آزمون خمش چهار نقطه است که بر روی ورق تخت انجام شده است. در هر دو آزمایش پروفیل تنش خطی بوده و مقادیر کرنش حاصل از سوراخکاری بررسی و تحلیل شده و خطاها تعیین می‌شود.

۲- روابط تحلیلی در سوراخکاری افزایشی

برای اندازه‌گیری پروفیل تنش پسماند در قطعه‌ای با تنش غیریکنواخت، از روش سوراخکاری افزایشی استفاده می‌شود. در این روش پس از چسبانیدن کرنش‌سنج در محل مناسب بر روی قطعه، یک سوراخ با قطر مشخص ایجاد می‌شود. این سوراخ به‌صورت گام به گام ایجاد شده و در هر گام با برداشتن ماده، تغییرات کرنش ثبت می‌شود. با استفاده از کرنش‌های ثبت شده، تنش‌های بیشینه و کمینه و همچنین راستای تنش بیشینه در هر گام مشخص می‌شود. سپس کرنش‌ها به‌کمک دایره موهر در راستای محورهای مختصات تصویر می‌شوند. در

شکل ۱ یکی از رایج‌ترین کرنش‌سنج‌ها در اندازه‌گیری تنش پسماند نشان داده شده است.



شکل ۱ کرنش‌سنج نوع A در اندازه‌گیری تنش پسماند [10]

رابطه میان تنش در راستای ۱و ۳ با کرنش‌سنج‌هایی مطابق شکل ۱ در رابطه زیر [۸] نشان داده شده است:

$$\begin{cases} \varepsilon_n^1 = A_n \Delta h_n (\sigma_{1n} + \sigma_{3n}) + B_n \Delta h_n (\sigma_{3n} - \sigma_{1n}) \cos 2\theta_n \\ \varepsilon_n^2 = A_n \Delta h_n (\sigma_{1n} + \sigma_{3n}) + B_n \Delta h_n (\sigma_{3n} - \sigma_{1n}) \cos 2(\theta_n + \phi) \\ \varepsilon_n^3 = A_n \Delta h_n (\sigma_{1n} + \sigma_{3n}) + B_n \Delta h_n (\sigma_{3n} - \sigma_{1n}) \cos 2(\theta_n + \psi) \end{cases} \quad (1)$$

با توجه به نوع کرنش‌سنج در رابطه (۱) داریم $\psi = 135^\circ$,$\phi = -90^\circ$. در این صورت راستای تنش اصلی در هر گام و مقادیر تنش در راستای دو کرنش‌سنج ۱و ۳ از رابطه‌های زیر به‌دست می‌آید:

$$\theta_n = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{\varepsilon_n^1 - 2\varepsilon_n^2 + \varepsilon_n^3}{\varepsilon_n^3 - \varepsilon_n^1} \right] \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sigma_{1n} = \dfrac{\varepsilon_n^2 (A_n + B_n \cos 2\theta_n) - \varepsilon_n^3 (A_n - B_n \sin 2\theta_n)}{2 A_n B_n (\sin 2\theta_n + \cos 2\theta_n) \Delta h_n} \\ \sigma_{3n} = \dfrac{\varepsilon_n^3 (A_n + B_n \sin 2\theta_n) - \varepsilon_n^2 (A_n - B_n \cos 2\theta_n)}{2 A_n B_n (\sin 2\theta_n + \cos 2\theta_n) \Delta h_n} \end{cases} \quad (3)$$

ضرایب A_n, B_n در رابطه (۱) ضرایب کالیبره‌کردن نامیده می‌شوند. با مشخص بودن تنش در راستای ۱و ۳ این ضرایب را می‌توان با کمک رابطه‌های (۴) و (۵) تعیین کرد:

$$A_n = \frac{\varepsilon_n^1 + \varepsilon_n^3}{2\Delta h_n (\sigma_{1n} + \sigma_{3n})} \quad or \quad A_n = \frac{\varepsilon_n^2 \cos 2\theta_n + \varepsilon_n^3 \sin 2\theta_n}{\Delta h_n (\sigma_{1n} + \sigma_{3n})(\sin 2\theta_n + \cos 2\theta_n)} \quad (4)$$

$$B_n = \frac{\varepsilon_n^1 - \varepsilon_n^3}{2\Delta h_n (\sigma_{3n} - \sigma_{1n}) \cos 2\theta_n} \quad or \quad B_n = \frac{\varepsilon_n^2 - \varepsilon_n^3}{\Delta h_n (\sigma_{3n} - \sigma_{1n})(\sin 2\theta_n + \cos 2\theta_n)} \quad (5)$$

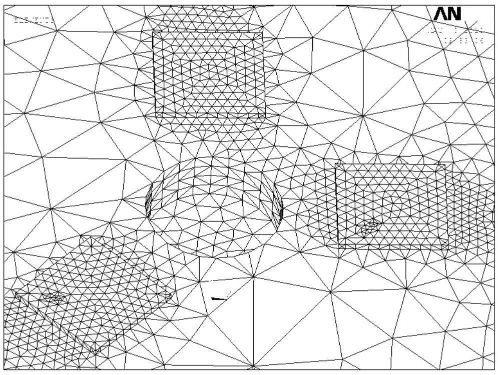
۳- تعیین ضرایب کالیبره‌کردن به کمک روش المان محدود

در این بخش نخست ضرایب کالیبره‌کردن به کمک دو شبیه‌سازی المان محدود تعیین و سپس برای ارزیابی صحت، از آزمایش خمش چهار نقطه استفاده می‌شود.

۳-۱- تعیین ضرایب A_n, B_n

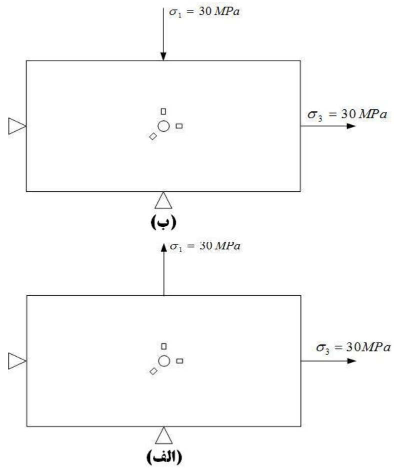
برای تعیین ضرایب کالیبره‌کردن A_n, B_n از دو شبیه‌سازی جداگانه استفاده شده است. برای تعیین A_n از کشش دو محوره ورق استفاده شده و در جهت کرنش‌سنج‌های ۱ و ۳ مقدار تنش ثابت $\sigma_1 = \sigma_3 = 30\ MPa$ به ورق اعمال شده است. مدل المان محدود در نرم افزار ANSYS شبیه‌سازی شده است. شبیه‌سازی به‌صورت استاتیکی انجام شده و اثر حذف لایه‌های فلز در سوراخکاری مرحله‌ای با استفاده از قابلیت تولد و مرگ المان اعمال شده است. در شکل ۲ مدل المان محدود سوراخکاری در گام چهارم نشان داده شده است. المان مورد استفاده سه‌بعدی با تابع عملگر درجه دوم با نام Solid95 بوده است. برای محاسبهٔ ضریب B_n شرایط قبلی حفظ شده و فقط نوع بارگذاری تغییر کرده و از شرایط آزمون برش خالص $\sigma_1 = -\sigma_3 = -30\ MPa$ استفاده

شده است. در هر دو حالت تغییر کرنش‌ها در اثر فرایند سوراخکاری به دست آمده و به کمک رابطه‌های (۴) و (۵) محاسبات A_n, B_n انجام شده است. به این منظور، ابتدا بار خارجی به‌صورت گسترده بر روی مرزهای خارجی مدل اعمال شده و سپس در هر گام یک لایه از المان‌های مدل در محل سوراخ کشته شده است. تغییرات کرنش در کرنش‌سنج‌ها که بر روی سطح خارجی ورق ایجاد شده، پس از کشتن هر لایه از المان‌ها خوانده شده است.



شکل ۲ مدل المان محدود

در شکل ۳ طرحواره ای از دو شبیه‌سازی کشش دو محوره و برش خالص استفاده شده در استخراج ضرایب کالیبره‌کردن نشان داده شده است.



شکل ۳ شکل هندسی و بارگذاری‌های استفاده شده در شبیه‌سازی و استخراج ضرایب کالیبره‌کردن

در جدول۱ خواص مکانیکی ماده مورد شبیه سازی و در جدول ۲ ضرایب A_n, B_n با فرض $\Delta h_n = ۰.۲mm$ آورده شده است.

جدول ۱ خواص مکانیکی ماده مورد شبیه‌سازی کشش دو محوره و برش خالص

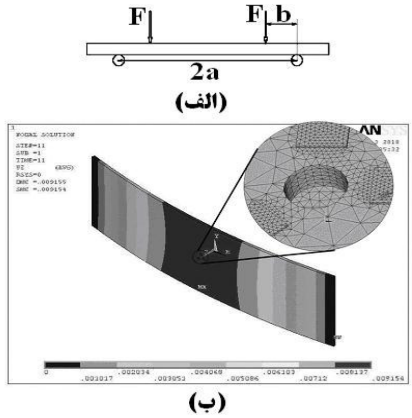
خواص	مقدار
مدول الاستیسیته	۷۰GPa
تنش تسلیم	۲۸۰MPa
ضریب پوآسون	۰/۳۳
چگالی	۲۷۰۰Kg/m³
مدل رفتاری ماده	الاستیک

جدول ۲ ضرایب A_n, B_n به‌دست آمده از شبیه‌سازی کشش دو محوره و برش خالص به ازای $\Delta h_n = ۰.۲mm$

مرحله	B_n	A_n	ارتفاع
۱	۲۰۰۴	-۱۳۶۲	۰/۰-۰/۲
۲	۲۹۰۰	-۱۶۹۱	۰/۲-۰/۴
۳	۲۷۰۱	-۱۸۷۵	۰/۴-۰/۶
۴	۲۸۴۴	-۱۶۰۸	۰/۶-۰/۸
۵	۲۱۵۸	-۹۴۱	۰/۸-۱/۰
۶	۱۷۰۲	-۵۳۳	۱/۰-۱/۲
۷	۱۱۸۹	-۱۵۴	۱/۲-۱/۴
۸	-۸۱۸	۱۸۳	۱/۴-۱/۶
۹	-۴۹۸	۵۶۶	۱/۶-۱/۸
۱۰	-۲۱۲	۱۵۲۵	۱/۸-۲/۰

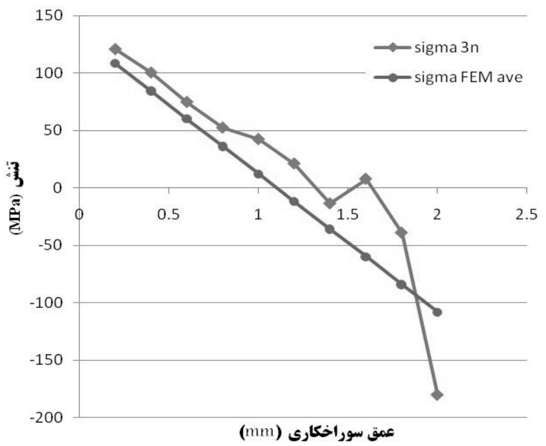
۳-۲- ارزیابی صحت ضرایب کالیبره‌کردن به کمک روش المان محدود

برای بررسی درستی ضرایب به‌دست آمده در بخش ۳-۱ از شبیه‌سازی المان‌محدود استفاده می‌شود. برای این منظور از شبیه‌سازی خمش چهار نقطه استفاده می‌شود. خواص مکانیکی در این آزمون مطابق جدول ۱ است. در آزمون خمش چهار نقطه، مقدار تنش در محل کرنش‌سنج از ۱۲۰MPa در سطح تا ۱۲۰MPa- در عمق تغییر می‌کند. در شکل ۴- الف طرحواره آزمون خمش چهار نقطه و در شکل ۴- ب مدل المان محدود خمش چهار نقطه ورق قبل از سوراخکاری نشان داده شده است. خیز نقطه میانی تیر برابر ۹/۱۵ mm می‌باشد.



شکل ۴ الف) طرحواره آزمون خمش چهار نقطه ب) مدل المان محدود خمش چهار نقطه

در این شبیه‌سازی، مدل مربوط به کرنش‌سنج‌ها نیز بر روی سطح ورق ساخته شده است (شکل ۴-ب). در ابتدا شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری مورد نظر بر روی مدل المان محدود اعمال و سپس لایه‌های مربوط به سوراخکاری افزایشی، گام به گام از مدل المان محدود حذف شده است. در هر گام، کرنش‌های مربوط به مدل المان محدود کرنش‌سنج‌ها خوانده شده و توسط ضرایب کالیبره‌کردن که در قسمت قبل به دست آمده مقادیر تنش‌های القایی محاسبه شده است. در شکل ۵ تنش محاسبه شده به کمک ضرایب A_n, B_n از جدول ۲ و همچنین پروفیل میانگین تنش در هر لایه در تست خمش چهار نقطه ورق ترسیم شده است.



شکل ۵ مقایسه تنش محاسبه شده به‌روش سوراخکاری افزایشی و تنش میانگین در آزمون خمش چهارنقطه

۴- آزمون‌های تجربی اندازه‌گیری تنش

برای ارزیابی صحت ضرایب کالیبره‌کردن استفاده شده در قسمت قبل، از آزمون تجربی خمش چهار نقطه ورق تخت استفاده می‌شود. روابط پایه روش سوراخکاری، برای قطعات حجمی به‌دست آمده است. لذا هدف از انجام این آزمون، بررسی تأثیر ضخامت کم ورق بر دقت و صحت نتایج اندازه‌گیری تنش و به ویژه تعیین اعتبار ضرایب کالیبره‌کردن در محاسبه تنش در قطعات نازک است. در بخش بعدی تجهیزات مورد استفاده معرفی شده و سپس نتایج آزمون خمش چهار نقطه ورق تخت ارائه می‌شود.

۴-۱- تجهیزات مورد استفاده

برای سوراخکاری از دستگاه فرز کنترل عددی (CNC) که دارای موتور AC با دور rpm ۲۷۰۰۰ شرکت بوش است، استفاده شده است. کرنش‌سنج مورد استفاده از شرکت TML از نوع FRS-2-23 است که برای اندازه‌گیری تنش پسماند در آلومینیوم ساخته شده است. برای سوراخکاری از تیغ فرزهایی با قطر ۲mm استفاده شده است. دستگاه داده برداری[1] از شرکت ویشای[2] نوع P3 با دقت $\pm 1 \mu m/m$ است. برای سوراخکاری از نرخ پیشروی بسیار پایین استفاده شده است. سوراخکاری در ۱۰ گام انجام شده و پس از هر گام، فرصت زمانی کافی برای انتقال حرارت داده شده تا کرنش‌های حرارتی بر مقادیر ثبت شده تأثیر نگذارند. چسب مورد استفاده در چسباندن کرنش‌سنج از شرکت TML نوع سیانواکریلات CN بوده است.

۴-۲- آزمون خمش ورق تخت

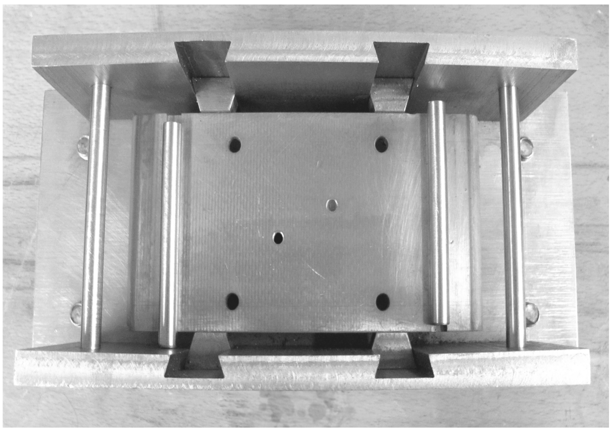
شکل ۴- الف طرحواره آزمون خمش چهار نقطه را نشان می‌دهد. برای انجام آزمایش، فیکسچری مانند شکل ۶ ساخته شده که شرایط تکیه‌گاهی و بارگذاری مشخص شده در شکل ۴- الف را تأمین می‌کند. فک متحرک این فیکسچر که توسط چهار ریل دم‌چلچله‌ای مهار شده، توسط یک پیچ در جهت بالا

1. Data Logger
2. Vishay measurements group

و پایین حرکت می‌کند. ورق تخت در فضای بین دو تکیه‌گاه موجود بر روی فک متحرک و دو تکیه‌گاه ثابت بالایی قرار می‌گیرد. حرکت رو به بالای فک می‌تواند موجب ایجاد خمش در ورق تخت شود. از تحلیل استاتیکی تیر تحت خمش می‌توان مقدار بیشینه تنش را به کمک رابطه (۶) تعیین کرد.

$$\sigma_{\max} = \frac{۳EtV}{-۳a^{۲} + b^{۲}} \qquad (۶)$$

Vمقدار خیز در وسط تیر است که از آن برای کنترل تنش اعمالی استفاده می‌شود. پارامترهای a, b(شکل ۴- الف) وابسته به ابعاد هندسی فیکسچر بوده و در نمونه[۴] ساخته شده داریم $a = ۱۰۵\, mm$ و $b = ۳۵\, mm$. بنابراین اگر خیز وسط تیر برابر $V = 9mm$ انتخاب شود، پروفیل تنش در راستای طولی دارای مقدار بیشینه $\sigma_{\max} = ۱۱۸\, MPa$ و مقدار کمینه $\sigma_{\min} = -۱۱۸\, MPa$ خواهد بود. لذا در این آزمایش، خیز ورق در مقطع میانی آن توسط ساعت اندازه‌گیری شده و فک متحرک فیکسچر تا جایی بالا آورده شده که خیز مورد نظر را تأمین کند.



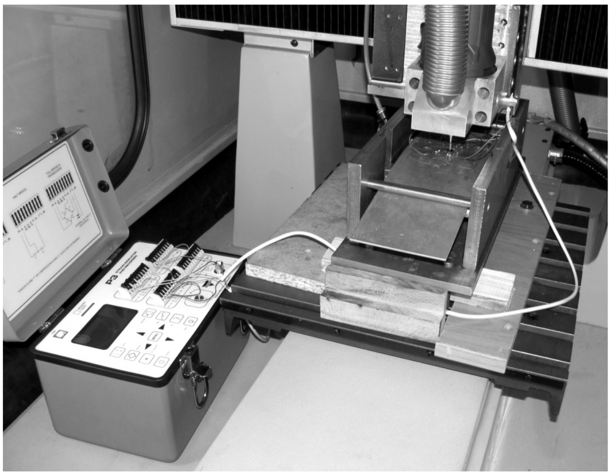
شکل ۶ فیکسچر ساخته شده برای آزمون خمش چهار نقطه

در این آزمایش از ورق تختی با ضخامت ۲mm از آلومینیوم AA 5056F استفاده شده است. در جدول ۳ خواص مکانیکی این آلیاژ آورده شده است.

جدول ۳ خواص مکانیکی آلومینیوم AA5056 F

خواص	مقدار
مدول الاستیسیته	۷۱GPa
تنش تسلیم	۲۵۰MPa
استحکام نهایی	۳۵۰MPa
ضریب پواسون	۰/۳۳
چگالی	۲۶۴۰Kg/m^3
سختی نمونه	۸۴ برینل

شکل ۷ فیکسچر را در وضعیت آماده سوراخکاری نشان می‌دهد. خیز تیر در نقطه میانی برابر ۹mm است.



شکل ۷ آزمایش کالیبره‌کردن خمش چهار نقطه تیر مستقیم

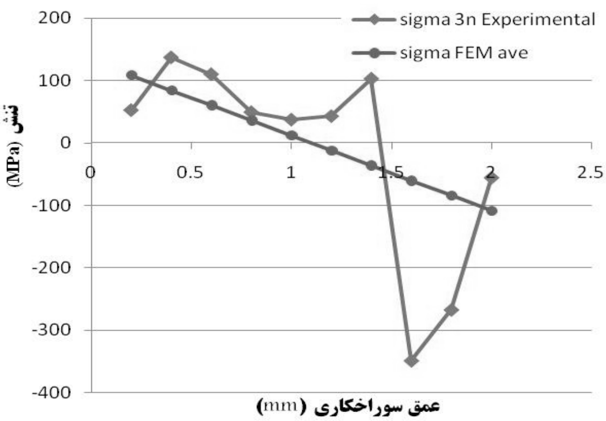
۵- نتایج و بحث

نتایج حاصل از ارزیابی درستی ضرایب کالیبره‌کردن به‌روش المان محدود در بخش ۳-۲ ارائه شد. در این بخش نخست نتایج اندازه‌گیری تنش در آزمایش تجربی بخش ۴ ارائه و سپس بحث و تحلیل نتایج و خطاهای آزمایش آورده می‌شود.

۵-۱- نتایج آزمایش تجربی

پس از سوراخکاری و ثبت کرنش‌ها در مراحل مختلف، منحنی تنش در راستای طولی (کرنش‌سنج ۳) به کمک رابطه (۳)

محاسبه و ترسیم شده است. در شکل ۸ نمودار توزیع تنش‌های خمشی برحسب عمق سوراخ برای آزمون خمش چهار نقطه ورق تخت ترسیم شده است. در این شکل منحنی میانگین تنش در هر لایه-که به‌صورت تحلیلی به‌دست آمده- نیز ترسیم شده است در ترسیم این نمودارها از ضرایب کالیبره‌کردن جدول ۲ استفاده شده است.



شکل ۸ تنش‌های القایی اندازه‌گیری شده در آزمون خمش تیر تخت

۵-۲- تحلیل و بررسی نتایج

در این مقاله روش سوراخکاری افزایشی و نحوه به‌دست آوردن ضرایب کالیبره‌کردن مطالعه شد. در آزمون شبیه‌سازی شده درستی ضرایب به‌دست آمده بررسی و سپس در آزمون تجربی، علاوه بر بررسی ضرایب، خود فرایند سوراخکاری افزایشی مطالعه شده است. نتایج زیر از این آزمایش‌ها به‌دست آمده است:

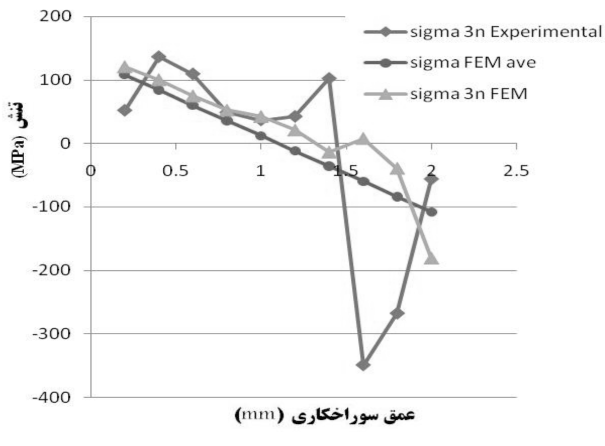
۱. در آزمایش شبیه‌سازی شده برای خمش چهار نقطه تا گام هفتم سوراخکاری دقت نتایج مناسب است اما در سه گام پایانی، مقدار تنش اندازه‌گیری شده بسیار بیشتر از مقدار مورد انتظار است. این ناشی از حذف لایه‌های بالایی سوراخ است که ماده تحت تنش بسیار بیشتری قرار دارد و در نتیجه تنش اندازه‌گیری شده نیز بیشتر از پروفیل واقعی تنش در حالت بدون سوراخ است.

۲. در آزمون تجربی خمش چهار نقطه، دقت اندازه‌گیری تا گام ششم خوب است، اما به‌دلیل حذف لایه‌های بالایی، توزیع تنش در عمق تحت تأثیر قرار می‌گیرد به طوری که در عمق تا حدود ۵۰MPa افزایش تنش فشاری رخ می‌دهد و شیب تغییر توزیع تنش نیز بسیار شدیدتر می‌شود.

۳. در آزمون تجربی، با وجود دقت در گام‌های اولیه سوراخکاری، تنش اندازه‌گیری شده در اولین گام کمتر از مقدار پیش‌بینی شده است، در حالی که در آزمون شبیه‌سازی چنین پدیده ای رخ نمی‌دهد. این ممکن است ناشی از وارد شدن نیروهای ناخواسته به قطعه در شروع فرایند سوراخکاری باشد.

۴. آزمایش تجربی خمش چهار نقطه در این مقاله با همان شرایطی که شبیه‌سازی عددی شده، انجام شده و لذا می‌توان نمودار نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی را با هم مقایسه کرد. در شکل ۹ این دو نمودار همراه با منحنی تنش میانگین در هر لایه ترسیم شده است. در هر دو نمودار تجربی و عددی، تا گام ششم میزان انطباق نتایج با یکدیگر و با منحنی تنش میانگین بسیار خوب است و این نتایج یکدیگر را تأیید می‌کنند.

۵. با توجه به اینکه استاندارد ASTM E837-01 به بررسی اندازه‌گیری تنش پسماند به‌روش سوراخکاری افزایشی نپرداخته، لذا تعیین ضرایب مربوط به کالیبره‌کردن افزایشی، یکی از مهم‌ترین الزامات این روش است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که تعیین ضرایب کالیبره‌کردن با استفاده از روشی که ارائه شد، دقت قابل قبولی دارد.



شکل ۹ مقایسه تنش‌های اندازه گیری شده در روش تجربی با روش شبیه‌سازی در آزمون خمش چهار نقطه

۶- نتیجه‌گیری

نتایج عددی و تجربی به‌دست آمده در این مقاله نشان می‌دهد که دقت ضرایب کالیبره‌کردن در هر دو شرایط مربوط به قطعه تخت و خمیده تغییرات یکسانی دارند. در هر دو مورد، دقت نتایج در ابتدای سوراخکاری مناسب است اما با افزایش عمق سوراخکاری، دقت کاهش می‌یابد و به‌ویژه پس از عبور از تار خنثی (که موجب تغییر علامت تنش می‌شود) نتایج به‌شدت نوسانی می‌شوند. این پدیده را می‌توان به سه عامل: ۱) کاهش مقدار کرنش‌های آزاد شده در سطح قطعه با افزایش عمق سوراخکاری ۲) کمتر شدن مقدار کرنش‌های آزاد شده از حد دقت دستگاه داده‌برداری ۳) تشدید اثر تمرکز تنش ناشی از سوراخکاری پس از تغییر علامت تنش (عبور از تار خنثی) نسبت داد. نتایج ارائه شده در این مقاله را می‌توان برای تعیین دقت نتایج اندازه‌گیری تنش پسماند به‌روش سوراخکاری افزایشی به کار برد. براین اساس، با توجه به رفتار نمودار مربوط به اندازه‌گیری توزیع تنش پسماند در عمق‌های مختلف، می‌توان حداکثر عمق قطعه‌ای را که نتایج اندازه‌گیری تنش در آن قابل قبول است تعیین کرد.

۷- مراجع

[1] Mathar J.; "Determination of Initial Stresses by Measuring the Deformation Around Drilled Holes". Transactions ASME, Vol.56, No.4, 1934, pp249–254.

[2] Soete W, Vancrombrugge R.; "An Industrial Method for the Determination of Residual Stresses". Proc SESA, Vol.8, No.1, 1950, pp17–28.

[3] Kelsey R.A.; "Measuring Non-uniform Residual Stresses by the Hole Drilling Method". Proc SESA, Vol.14, No.1, 1956, pp181–194.

[4] Rendler N.J., Vigness I.; "Hole-Drilling Strain-Gage Method of Measuring Residual Stresses". Experimental Mechanics, Vol.6, No.12, doi:10.1007/BF02326825, 1966, pp577–586.

[5] Beaney E., Procter E.; "A Critical Evaluation of the Centre Hole Technique for Measurement of Residual Stress", Strain, 1974.

[6] Flaman M.T.; "Brief Investigation of Induced Drilling Stresses in the Centre-hole Method of Residual Stress Measurement", Experimental Mechanics, Vol.22, 1982, pp26-30.

[7] Schajer, G.S.; "Application of Finite Element Calculations to Residual Stress Measurements". J. Eng. Mat. And Tech., Vol.103, 1981, pp.157-163.

[8] 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, No.4, 1988, pp338–343.

[9] Schajer, G.S.; "Measurement of Non-Uniform Residual Stresses Using the hole-Drilling Method. Part ii – practical application of the integral method". Journal of Engineering Materials and Technology, Vol.110, No.4, 1988, pp344–349.

[10] ASTM E837-01, "Standard Test Method for Determining Residual Stresses by the Hole Drilling Strain-Gauge Method". American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, 2001.

[11] Niku-Lari A., Lu J., Flavenot J.F.; "Measurement of Residual-Stress Distribution by the Incremental Hole-Drilling Method". Journal of Mechanical Working Technology, Vol. 11, 1985, pp167-188.

[12] Montay G., Cherouat A., Lu J., Baradel N., Bianchi L.; "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 ZrO2–Y2O3 8 wt.% coatings", Surface and Coatings Technology, Vol.155, 2002, pp152–160.

[13] Venkitakrishnan P.V., Sinha P.P., Krishnamurthy R.; "Study and Analysis of Residual Stresses Due to Various Secondary Processes in AA 2219 Annealed, Sheet Using Acoustic Emission and Hole Drilling

Methods". NDT&E international, Vol.38, 2005, pp615-622.

[14] Quach W.M., Teng J.G., Chung K.F.; "Residual Stresses in Steel Sheets Due to Coiling and Uncoiling: A Closed-Form Analytical Solution". Engineering Structures, Vol.26, 2004, pp1249-1259.

[15] Chang C.W., Chen P.H., Lien H.S.; "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, 2009, pp552-558.

[16] Schajer G.S.; "Advances in Hole-Drilling Residual Stress Measurements". Experimental Mechanics, DOI 10.1007/s11340-009-9228-7, 2009.

[17] Mainjot A.K., Schajer G.S., Vanheusden A.J., Sadoun M.J.; "Residual Stress Measurement in Veneering Ceramic by Hole-Drilling". Original Research Article Dental Materials, Vol.27, 2011, pp439-444.