



تعیین ضرایب کالیبره کردن تنش در اندازه گیری تنش پسماند با روش سوراخکاری افزایشی

محمد صدیقی^{۱*}، مهرداد خاندائی^۲، جلال جودکی^۳

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 ۱۶۳-۱۶۷۶۵ sedighi@iust.ac.ir

چکیده- تنش پسماند-که بر اثر ورود به منطقه پلاستیک ایجاد می شود-یکی از عوامل تأثیرگذار بر طراحی و کارکرد قطعات است، استاندارد ASTM E837-01 تنش پسماند در قطعات تخت به روش سوراخکاری را بررسی کرده و ضرایب کالیبره کردن تنش را برای ورق های تخت با پروفیل تنش ثابت ارائه کرده است، اما استاندارد خاصی برای اندازه گیری تنش پسماند در قطعات انحنا دار به روش سوراخکاری افزایشی در دسترس نیست. در این مقاله نخست به روش المان محدود ضرایب کالیبره کردن تنش در روش سوراخکاری افزایشی تعیین و سپس از نتایج یک آزمون تجربی و یک شبیه سازی عددی برای بررسی درستی این ضرایب استفاده می شود. آزمون تجربی کالیبره کردن شامل آزمون خمش چهار نقطه در ورق تخت آلومینیومی از جنس AA5056 F است که پروفیل تنش آنها به روش تحلیلی شناخته شده است. شبیه سازی عددی شامل خمش چهار نقطه ورق است که مقادیر کرنش در هر مرحله به روش المان محدود تعیین شده است. نتایج نشان می دهد که ضرایب کالیبره کردن به دست آمده دقت مناسبی داشته و محدوده عمق های قابل اندازه گیری توسط این روش نیز در نتایج قابل مشاهده است.

کلیدواژگان: اندازه گیری تنش پسماند، روش سوراخکاری افزایشی، آزمون کالیبره کردن، ضرایب کالیبره کردن تنش.

Calibration Coefficients for Residual Stress Measurement in Incremental Hole Drilling Method

M. Sedighi^{1*}, M. Khandaei², J. Joudaki³

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 به کمک روش سوراخکاری مطالعه کرد. رندلر و ویگنس [۴] در سال ۱۹۶۶ روش سوراخکاری را توسعه دادند و هندسه و شکل استاندارد را برای روزت کرنش سنج 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 کالیبره کردن \bar{A} , \bar{B} معرفی شد. وی در سال ۱۹۸۸ ضرایب کالیبره کردن 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 کرنش سنج به سطح و انجام سوراخکاری در نزدیکی کرنش سنج 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 به روش 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

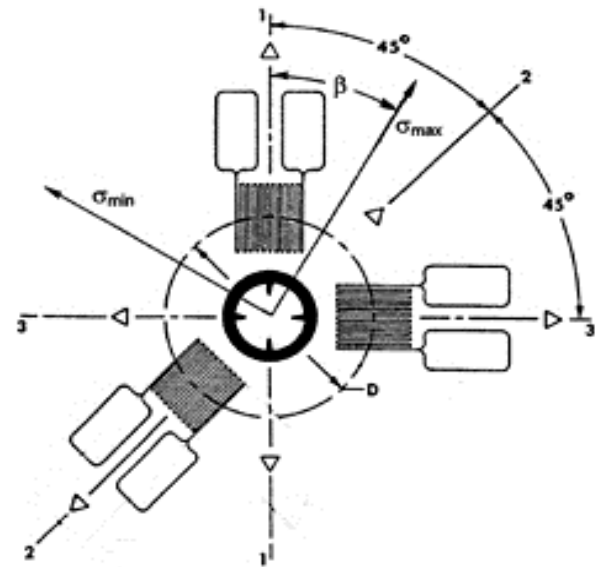
حرارتی را در فرایند پوشش‌دهی به کمک اکسیدهای زیرکونیوم اندازه‌گیری کرد. ونکیتاکریشن [۱۳] تنش پسماند در لوله‌های شکل‌دهی شده و جوشکاری شده را ارزیابی کرد. کواچ [۱۴] در سال ۲۰۰۴ اثر کوپلینگ بر ایجاد تنش پسماند در ورق‌های تخت را مطالعه کرد. چانگ [۱۵] در سال ۲۰۰۹ روش سوراخکاری را با روش پردازش تصویر ترکیب کرد. شاجر [۱۶] در سال ۲۰۰۹ پیشرفت‌های اخیر در اندازه‌گیری تنش پسماند را مرور کرد و مهم‌ترین مسأله در مسیر توسعه 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 کالیبره کردن تنش پسماند در سوراخکاری افزایشی ارائه و سپس ضرایب کالیبره کردن به روش المان محدود محاسبه می‌شوند. صحت ضرایب به دست 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 چسباندن کرنش سنج در محل مناسب بر روی قطعه، یک سوراخ با قطر مشخص ایجاد می‌شود. این سوراخ به صورت 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 به کمک دایره موهر در راستای محورهای مختصات تصویر می‌شوند. در

شکل ۱ یکی از رایج ترین کرنش سنج ها در اندازه گیری تنش پسماند نشان داده شده است.



شکل ۱ کرنش سنج نوع A در اندازه گیری تنش پسماند [10]

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

$$\begin{cases} \epsilon_n^i = A_n \Delta h_n (\sigma_n + \sigma_{rn}) + B_n \Delta h_n (\sigma_{rn} - \sigma_n) \cos 2\theta_n \\ \epsilon_n^r = A_n \Delta h_n (\sigma_n + \sigma_{rn}) + B_n \Delta h_n (\sigma_{rn} - \sigma_n) \cos 2(\theta_n + \phi) \\ \epsilon_n^t = A_n \Delta h_n (\sigma_n + \sigma_{rn}) + B_n \Delta h_n (\sigma_{rn} - \sigma_n) \cos 2(\theta_n + \psi) \end{cases} \quad (1)$$

با توجه به نوع کرنش سنج در رابطه (۱) داریم $\phi = -90^\circ$, $\psi = 135^\circ$ در این صورت راستای تنش اصلی در هر گام و مقادیر تنش در راستای دو کرنش سنج ۱ و ۳ از رابطه های زیر به دست می آید:

$$\theta_n = \frac{1}{2} \tan^{-1} \left[\frac{\epsilon_n^i - 2\epsilon_n^r + \epsilon_n^t}{\epsilon_n^r - \epsilon_n^i} \right] \quad (2)$$

$$\begin{cases} \sigma_n = \frac{\epsilon_n^r (A_n + B_n \cos 2\theta_n) - \epsilon_n^i (A_n - B_n \sin 2\theta_n)}{2A_n B_n (\sin 2\theta_n + \cos 2\theta_n) \Delta h_n} \\ \sigma_{rn} = \frac{\epsilon_n^r (A_n + B_n \sin 2\theta_n) - \epsilon_n^i (A_n - B_n \cos 2\theta_n)}{2A_n B_n (\sin 2\theta_n + \cos 2\theta_n) \Delta h_n} \end{cases} \quad (3)$$

ضرایب A_n, B_n در رابطه (۱) ضرایب کالیبره کردن نامیده می شوند. با مشخص بودن تنش در راستای ۱ و ۳ این ضرایب را می توان با کمک رابطه های (۴) و (۵) تعیین کرد:

$$A_n = \frac{\epsilon_n^i + \epsilon_n^r}{2\Delta h_n (\sigma_n + \sigma_{rn})} \quad \text{or} \quad (4)$$

$$A_n = \frac{\epsilon_n^i \cos 2\theta_n + \epsilon_n^r \sin 2\theta_n}{\Delta h_n (\sigma_n + \sigma_{rn}) (\sin 2\theta_n + \cos 2\theta_n)}$$

$$B_n = \frac{\epsilon_n^i - \epsilon_n^r}{2\Delta h_n (\sigma_{rn} - \sigma_n) \cos 2\theta_n} \quad \text{or} \quad (5)$$

$$B_n = \frac{\epsilon_n^r - \epsilon_n^t}{\Delta h_n (\sigma_{rn} - \sigma_n) (\sin 2\theta_n + \cos 2\theta_n)}$$

۳- تعیین ضرایب کالیبره کردن به کمک روش المان محدود

در این بخش نخست ضرایب کالیبره کردن به کمک دو شبیه سازی المان محدود تعیین و سپس برای ارزیابی صحت، از آزمایش خمش چهار نقطه استفاده می شود.

۳-۱- تعیین ضرایب A_n, B_n

برای تعیین ضرایب کالیبره کردن A_n, B_n از دو شبیه سازی جداگانه استفاده شده است. برای تعیین A_n از کشش دو محوره ورق استفاده شده و در جهت کرنش سنج های ۱ و ۳ مقدار تنش ثابت $\sigma_1 = \sigma_3 = 30 \text{ MPa}$ به ورق اعمال شده است. مدل المان محدود در نرم افزار ANSYS شبیه سازی شده است. شبیه سازی به صورت استاتیکی انجام شده و اثر حذف لایه های فلز در سوراخکاری مرحله ای 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 سه بعدی با تابع عملکرد درجه دوم با نام Solid95 بوده است. برای محاسبه ضریب B_n شرایط قبلی حفظ شده و فقط نوع بارگذاری تغییر کرده و از شرایط آزمون برش خالص $\sigma_1 = -\sigma_3 = -30 \text{ MPa}$ استفاده

در جدول ۱ خواص مکانیکی ماده مورد شبیه سازی و در جدول ۲ ضرایب A_n, B_n با فرض $\Delta h_n = 0.2 \text{ mm}$ آورده شده است.

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

مقدار	خواص
۷۰ GPa	مدول الاستیسیته
۲۸۰ MPa	تنش تسلیم
۰/۳۳	ضریب پواسون
۲۷۰۰ Kg/m ³	چگالی
الاستیک	مدل رفتاری ماده

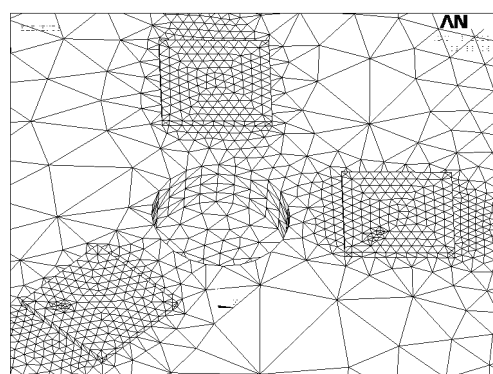
جدول ۲ ضرایب A_n, B_n به دست آمده از شبیه سازی کشش دو محوره و برش خالص به ازای $\Delta h_n = 0.2 \text{ mm}$

مرحله	B_n	A_n	ارتفاع
۱	۲۰۰۴	-۱۳۶۲	۰/۱-۰/۲
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 کالیبره کردن به کمک روش المان محدود

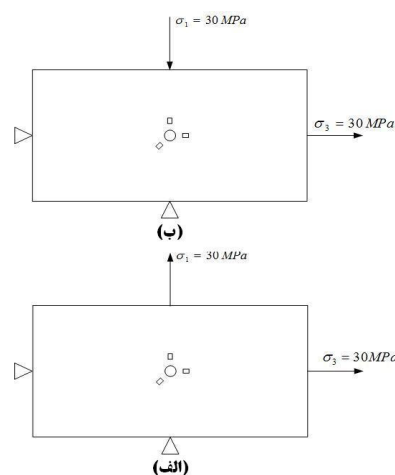
برای بررسی درستی ضرایب به دست آمده در بخش ۱-۳ از شبیه سازی المان محدود استفاده می شود. برای این منظور از شبیه سازی خمش چهار نقطه استفاده می شود. خواص مکانیکی در این آزمون مطابق جدول ۱ است. در آزمون خمش چهار نقطه، مقدار تنش در محل کرنش سنج از ۱۲۰ MPa در سطح تا ۱۲۰ MPa- در عمق تغییر می کند. در شکل ۴- الف 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 می باشد.

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



شکل ۲ مدل المان محدود

در شکل ۳ طرحواره ای از دو شبیه سازی کشش دو محوره و برش خالص استفاده شده در استخراج ضرایب کالیبره کردن نشان داده شده است.



شکل ۳ شکل هندسی و بارگذاری های استفاده شده در شبیه سازی و استخراج ضرایب کالیبره کردن

۴- آزمون‌های تجربی اندازه‌گیری تنش

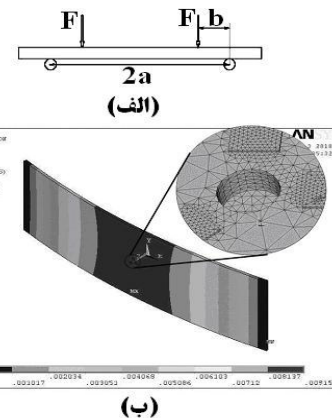
برای ارزیابی صحت ضرایب کالیبره کردن استفاده شده در قسمت قبل، از آزمون تجربی خمش چهار نقطه ورق تخت استفاده می‌شود. روابط پایه روش سوراخکاری، برای قطعات حجمی به دست آمده است. لذا هدف از انجام این آزمون، بررسی تأثیر ضخامت کم ورق بر دقت و صحت نتایج اندازه‌گیری تنش و به ویژه تعیین اعتبار ضرایب کالیبره کردن 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 ۲۷۰۰۰ rpm 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 ۲ mm استفاده شده است. دستگاه داده برداری^۱ از شرکت ویشای^۲ نوع P3 با دقت $\pm 1 \mu m/m$ است. برای سوراخکاری از نرخ پیشروی بسیار پایین استفاده شده است. 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.

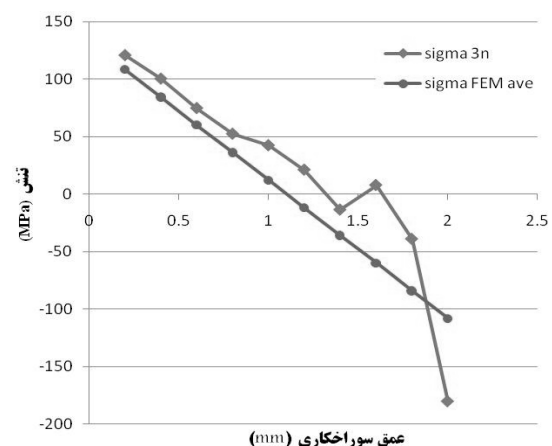
۴-۲- آزمون خمش ورق تخت

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



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 کالیبره کردن 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.



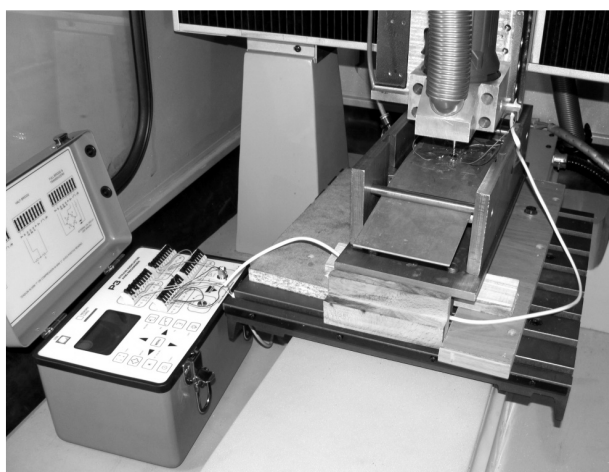
شکل ۵ مقایسه تنش محاسبه شده به روش سوراخکاری افزایشی و تنش میانگین در آزمون خمش چهار نقطه

1. Data Logger
2. Vishay measurements group

جدول ۳ خواص مکانیکی آلومینیوم AA5056 F

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

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



شکل ۷ آزمایش کالیبره کردن خمش چهار نقطه تیر مستقیم

۵- نتایج و بحث

نتایج حاصل از ارزیابی درستی ضرایب کالیبره کردن به روش المان محدود در بخش ۳-۲ ارائه شد. در این بخش نخست نتایج اندازه گیری تنش در آزمایش تجربی بخش ۴ ارائه و سپس بحث و تحلیل نتایج و خطاهای آزمایش آورده می شود.

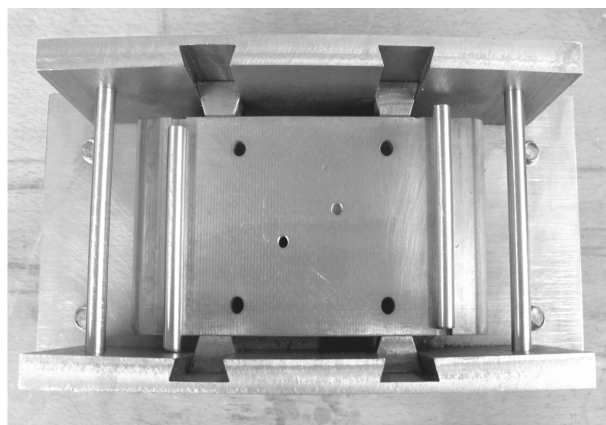
۵-۱- نتایج آزمایش تجربی

پس از سوراخکاری و ثبت کرنش ها در مراحل مختلف، منحنی تنش در راستای طولی (کرنش سنج ۳) به کمک رابطه (۳)

و پایین حرکت می کند. ورق تخت در فضای بین دو تکیه گاه موجود بر روی فک متحرک و دو تکیه گاه ثابت بالایی قرار می گیرد. حرکت رو به بالای فک می تواند موجب ایجاد خمش در ورق تخت شود. از تحلیل استاتیکی تیر تحت خمش می توان مقدار بیشینه تنش را به کمک رابطه (۶) تعیین کرد.

$$\sigma_{\max} = \frac{3Et\nu}{-3a^2 + b^2} \quad (6)$$

مقدار خیز در وسط تیر است که از آن برای کنترل تنش اعمالی استفاده می شود. پارامترهای a, b (شکل ۴- الف) وابسته به ابعاد هندسی فیکسچر بوده و در نمونه ساخته شده داریم $a = 10.5 \text{ mm}$ و $b = 35 \text{ mm}$. بنابراین اگر خیز وسط تیر برابر $\nu = 9 \text{ mm}$ انتخاب شود، پروفیل تنش در راستای طولی دارای مقدار بیشینه $\sigma_{\max} = 118 \text{ MPa}$ و مقدار کمینه $\sigma_{\min} = -118 \text{ MPa}$ خواهد بود. لذا در این آزمایش، خیز ورق در مقطع میانی آن توسط ساعت اندازه گیری 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

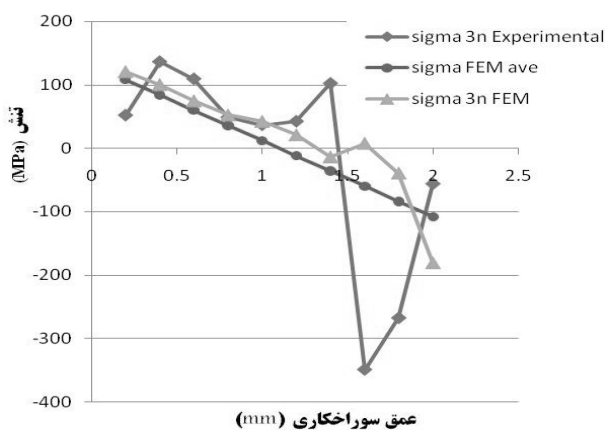
در این آزمایش از ورق تختی با ضخامت ۲mm از آلومینیوم AA 5056F استفاده شده است. در جدول ۳ خواص مکانیکی این آلیاژ آورده شده است.

تنش در عمق تحت تأثیر قرار می‌گیرد به طوری که در عمق تا حدود ۵۰ MPa 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 پدیده‌ای رخ نمی‌دهد. این ممکن است ناشی از وارد شدن نیروهای ناخواسته به قطعه در شروع فرایند سوراخکاری باشد.

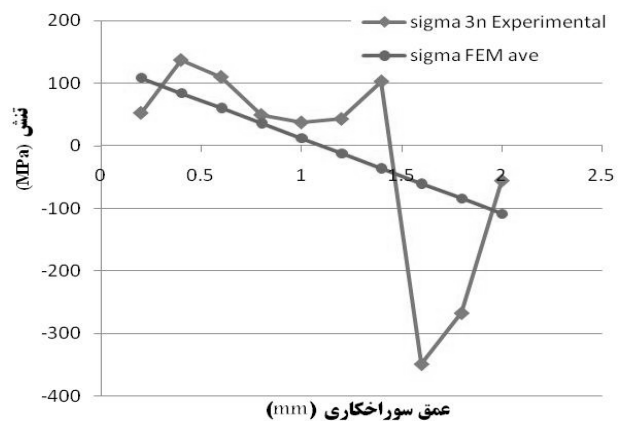
۴. آزمایش تجربی خمش چهار نقطه در این مقاله با همان شرایطی که شبیه‌سازی عددی شده، انجام شده و لذا می‌توان نمودار نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی و آزمایش تجربی را با هم مقایسه کرد. در شکل ۹ این دو نمودار همراه با منحنی تنش میانگین در هر لایه ترسیم شده است. در هر دو نمودار تجربی و عددی، تا گام ششم میزان انطباق 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 کالیبره کردن افزایشی، یکی از مهم‌ترین الزامات این روش است. نتایج این مقاله نشان می‌دهد که تعیین ضرایب کالیبره کردن با استفاده از روشی که ارائه شد، دقت قابل قبولی دارد.



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

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 به صورت تحلیلی به دست آمده- نیز ترسیم شده است در ترسیم این نمودارها از ضرایب کالیبره کردن 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 به دست آوردن ضرایب کالیبره کردن مطالعه شد. در آزمون شبیه‌سازی شده درستی ضرایب به دست آمده بررسی و سپس در آزمون تجربی، علاوه بر بررسی ضرایب، خود فرایند سوراخکاری افزایشی مطالعه شده است. نتایج زیر از این آزمایش‌ها به دست 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 به دلیل حذف لایه‌های بالایی، توزیع

۶- نتیجه گیری

نتایج عددی و تجربی به دست آمده در این مقاله نشان می دهد که دقت ضرایب کالیبره کردن 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 می یابد و به ویژه پس از عبور از تار خنثی (که موجب تغییر علامت تنش می شود) نتایج به شدت نوسانی می شوند. این پدیده را می توان به سه عامل: (۱) کاهش مقدار کرنش های آزاد شده در سطح قطعه با افزایش عمق سوراخکاری (۲) کمتر شدن مقدار کرنش های آزاد شده از حد دقت دستگاه داده برداری (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 می توان برای تعیین دقت نتایج اندازه گیری تنش پسماند به روش سوراخکاری افزایشی به کار برد. براین اساس، با توجه به رفتار نمودار مربوط به اندازه گیری توزیع تنش پسماند در عمق های مختلف، می توان حداکثر عمق قطعه ای را که نتایج اندازه گیری تنش در آن قابل قبول است تعیین کرد.

۷- مراجع

- 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
- [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

- [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.
- 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.