

شبیه‌سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی برای تعیین تنشهای پسماند در صفحات فلزی، صفحات ارتوتروپیک و کامپوزیتی چند لایه

محمود مهرداد شکریه^{۱*} و احمدرضا قاسمی خوزانی^۲

^۱دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه علم و صنعت ایران

^۲دانشجوی دکتری دانشکده مهندسی مکانیک - دانشگاه علم و صنعت ایران

(تاریخ دریافت ۸۳/۱۱/۳، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۸۴/۹/۲۲، تاریخ تصویب ۸۴/۱۱/۲۹)

چکیده

در این تحقیق یک روش جدید برای محاسبه ضرایب کالیبراسیون جهت بدست آوردن تنشهای پسماند در مواد مختلف توسعه داده شده است. روش بدست آمده در این تحقیق می تواند بجای روشهای آزمایشی مورد استفاده قرار گیرد. در این روش فرآیند سوراخکاری مرکزی در مواد مختلف به کمک روش اجزاء محدود شبیه سازی شده است. در هر حالت محل سوراخکاری و محل نصب کرنش سنج به دقت المان بندی گردیده و 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 راستای نصب هر کرنش سنج واقعی استخراج شده و میانگین گیری شده است.

در این تحقیق شبیه سازی روش سوراخکاری مرکزی برای مواد ایزوتروپیک به صورت دو بعدی و سه بعدی انجام گرفته است. با استفاده از این روش ضرایب کالیبراسیون محاسبه گردیده و با ضرایب کالیبراسیون استاندارد مقایسه گردیده است. نتایج این روش با نتایج حل دقیق استاندارد، خطایی کمتر از ۰/۳ درصد را نشان می دهد. شبیه سازی روش سوراخکاری مرکزی برای مواد ارتوتروپیک لزوم استفاده از ماتریس ضرایب برای این مواد را بیان می دارد. نتایج حاصل از شبیه سازی با روش تحلیلی نیز مقایسه شده است.

با شبیه سازی روش سوراخکاری در چند لایه های کامپوزیت امکان بدست آوردن ماتریس ضرایب کالیبراسیون فراهم می گردد. چند نمونه از چند لایه های کامپوزیت با چیدمان مختلف و مواد مختلف انتخاب گردیده است. با انجام عملیات سوراخکاری مرکزی کرنشهای رها شده قرائت شده و با استفاده از ضرایب بدست آمده تنشهای ناشی از پخت در آنها پیش بینی شده است. از مزیتهای روش جدید سهولت استفاده برای همه مواد با هر درجه از خواص ارتوتروپیک می باشد. در این روش می توان کرنش سنج های مختلف و قطر متفاوت سوراخها را با توجه به شرایط آزمایش شبیه سازی نمود، و ماتریس ضرایب حاصل را در تعیین تنشهای پسماند مجهول به کار گرفت. تعیین ماتریس ضرایب تنشهای پسماند در اشکال هندسی پیچیده از کاربردهای این روش است.

واژه‌های کلیدی: ضرایب کالیبراسیون - روش سوراخکاری مرکزی - شبیه سازی - روش اجزاء محدود

مقدمه

عمکرد نمونه ندارد، نیمه مخرب نامیده می‌شود. روش سوراخکاری برای اندازه‌گیری تنشهای پسماند در سال ۱۹۳۴ توسط Mathar [۲] پیشنهاد شد. این روش در مواردی که تنشهای پسماند در عمق قطعه یکنواخت بوده و یا اینگونه فرض شوند، به کار می‌رود. این روش برای مواد ایزوتروپیک و همگن در مقیاس ماکروسکوپی تهیه شده است. در سال ۱۹۶۶، Rendler و Vigness [۳] با تعریف ضرایب کالیبراسیون، این روش را برای هر نوع ماده ایزوتروپیک عمومیت دادند.

در کامپوزیتهای عدم تطابق ضرایب انبساط حرارتی الیاف و ماتریس، انقباض و انبساط متفاوت لایه های متوالی به دلیل اختلاف جهات اصلی آنها و انجماد غیر یکنواخت

تنشهای پسماند، تنشهایی خود متعادل هستند که در داخل قطعه محبوس گردیده اند و در حالیکه قطعه تحت هیچ نوع بار خارجی نیست، بخشی از مقاومت آن صرف غلبه بر این تنشها می‌شود. تنشهای پسماند در فلزات در اثر مواردی نظیر تسلیم قطعه، جوشکاری، ریخته گری و نورد ایجاد می شوند. البته تنشهای پسماند همیشه مضر نمی باشند و در مواردی همچون عملیات پرتاب ساچمه^۱ با طراحی مناسب می توان از آنها استفاده نمود. روش سوراخکاری مرکزی^۲ تنها روش اندازه‌گیری تنشهای پسماند است که به صورت استاندارد ASTM درآمده است [۱]. این روش، ساده و مطمئن بوده و از آنجا که باعث تخریب موضعی شده و تاثیر عمده‌ای در کاهش

بدست آمده از حالات الاستیک و ویسکو الاستیک نشان داده‌اند که رهایی ویسکو الاستیک رزین اپوکسی می‌تواند تنش‌های پسماند را در حدود ۲۰ درصد کاهش دهد. همچنین آنها بیان کرده‌اند که تحلیل الاستیک، انحنای چندلایه را بیش از اندازه واقعی بدست می‌آورد، ولی تحلیل ویسکو الاستیک قادر است که به دقت خمیدگی‌ها را محاسبه کند.

در سال ۱۹۸۹، Kim و Hahn [۱۷] روش الاستیک را برای محاسبه انحنای چندلایه باریک کربن- اپوکسی $[0_n/90_n]$ به کار بردند. آنها تنش‌های پسماند را با اندازه‌گیری تابیدگی نوار باریک اندازه‌گیری کردند. اما Hyer [۱۸-۱۹] با ترکیب روش انرژی و روش کلاسیک شکل چند لایه های نامتقارن $[0/90]$ را به خوبی محاسبه نمود. Gillespie و Bogetti با در نظر گرفتن انقباض شیمیایی ماتریس، تحلیلی ترکیبی را برای کامپوزیت‌های ضخیم تک‌جهته شیشه- پلی استر در نظر گرفتند، که در آن تئوری کلاسیک لایه‌ای با یک مدل شبیه‌ساز پخت یک بعدی برای پیش بینی تنش‌های پسماند ترکیب شده است [۲۰]. در سال ۱۹۹۷، Cowley و Beaumont [۲۱] در تحقیقی بر روی کامپوزیت‌های کربن $[0/90]$ با رزین ترموست و ترموپلاستیک، نشان دادند که تنش‌های پسماند در لایه چینی نامتقارن و انقباض شدید در جهت عمود بر الیاف باعث ایجاد نیروهای خارج صفحه ای می‌گردد و با تغییر شکل خارج صفحه ای این تنشها تا حدودی آزاد می‌شوند. آنها کاهش تنش‌های پسماند به اندازه یک چهارم از مقدار اولیه خود به دلیل کاهش مدول الاستیک عرضی را پس از گذشت ۲۰۰ روز از ساخت قطعه اثبات نمودند.

Schajer و Yang [۲۲] در سال ۱۹۹۴، نشان دادند که تعمیم روش سوراخکاری مرکزی در مواد ارتوتروپیک توسط Prasad و همکارانش معتبر نیست. آنها روش متفاوتی را ارائه کردند که برای دو حالت خاص از مواد ارتوتروپیک و با هر درجه‌ای از خاصیت ارتوتروپیک برقرار است. همچنین آنها جدولی را ارائه کرده‌اند که با استفاده از آن می‌توان ضرایب کالیبراسیون را برای قطعات با خواص مختلف درون‌یابی کرد. روش سوراخکاری عمیق نیز توسط Bateman و همکاران برای تحلیل تنش در لایه‌های زیرین سازه های کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفته است [۲۳].

قطعه به علت گرادینهای شدید دما در حین ساخت سبب ایجاد تنش‌های پسماند می‌شود. اندازه این تنشها به ساختار چند لایه، خواص مواد لایه ها و پروسه ساخت بستگی دارد. تنش‌های پسماند در مواد مرکب بازده و کارآیی سازه را کاهش داده و باعث ترک برداشتن ماتریس، لایه لایه شدن سازه، پاره شدن الیاف و تاب برداشتن در چند لایه های نا متقارن می‌شوند و تاثیر قابل توجهی در کاهش استحکام حدی و نهایی سازه دارند [۴-۶].

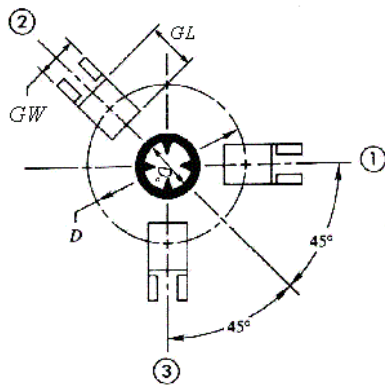
در سال ۱۹۶۸، Bert و همکاران [۷] و بعدها در سال ۱۹۸۷، Prasad و همکارش [۸] روال محاسباتی روش سوراخکاری را برای استفاده در مواد ارتوتروپیک تعمیم دادند. موضوع تنش‌های پسماند در کامپوزیت‌های پلیمری در سال ۱۹۷۰، توسط Novac و همکارش [۹] مورد بررسی قرار گرفت. Lake و همکاران [۱۰] در تحقیقی بر روی کامپوزیت‌های نازک الیاف شیشه‌ای نشان دادند که در مواد نازک نیازی به سوراخکاری حفره با عمق بهینه نبوده و تنها یک سوراخ سرتاسری برای اینکار کافیتست. در سال ۱۹۷۵، Hahn و Pagano [۱۱] یک تحلیل ترموالاستیک خطی را بر اساس تئوری کلاسیک برای محاسبه تنش‌های پسماند حرارتی ارائه کردند. در سال ۱۹۷۶، Hahn [۱۲] مقایسه‌ای را میان نتایج تئوری ارائه شده و نتایج تجربی برای گونه‌های مختلفی از کامپوزیت‌های پلیمری بویژه شیشه - اپوکسی و کربن- اپوکسی انجام داد. در سال ۱۹۷۷، Pagano و Hahn [۱۳] روش خود را با معرفی دمای عاری از تنش برای تعیین تنش‌های پسماند به کار بردند. دمای عاری از تنش، دمایی است که در آن قطعه کامپوزیتی پلیمری دارای هیچ‌گونه تنش پسماندی نباشد و یا حداکثر انحنای یک چندلایه نامتقارن به سمت صفر میل کند ولی ممکن است قطعه کاملاً به صورت مسطح در نیاید. در دمای پخت، کلیه تنش‌های پسماند حرارتی قطعه آزاد می‌شوند و اگر کرنش پسماندی در قطعه وجود داشته باشد، مربوط به انقباض شیمیایی لایه‌هاست. تفاوتی که بین دمای پخت و دمای عاری از تنش وجود دارد، مربوط به حضور انقباض شیمیایی در قطعه است [۱۴-۱۳]. در سال ۱۹۷۹، Weitsman [۱۵] و در سال ۱۹۸۱، Harper و Weitsman [۱۶] روشی را برای ارزیابی تنش‌های پسماند در چندلایه‌های کربن- اپوکسی Cross-Ply با در نظر گرفتن رفتار ویسکو الاستیک خطی در تمام دوره خنک شدن به کار برده‌اند. با مقایسه نتایج

تئوری روش سوراخکاری مرکزی در مواد ایزوتروپیک

است [۱]:

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

(۳)



شکل ۱: دستگاه سوراخکاری مرکزی و کرنش سنج روزت .

ثوابت کالیبراسیون A, B, C در رابطه (۲) به خواص ماده، هندسه روزت، قطر و عمق سوراخ وابسته‌اند. تعیین ضرایب کالیبراسیون در روش سوراخکاری مرکزی از اهمیت زیادی برخوردار بوده و مقادیر این ثوابت به روشهای متفاوت تجربی و عددی بدست می آیند. برای مواد ایزوتروپیک $C=2B$ بوده و برای یک روزت پادساعتگرد کمیت C به C تبدیل می‌شود.

شبیه سازی دو بعدی فرآیند سوراخکاری مرکزی در مواد ایزوتروپیک

در این قسمت روش سوراخکاری مرکزی برای مواد ایزوتروپیک به کمک روش اجزاء محدود شبیه سازی شده است. با شبیه سازی روش سوراخکاری مرکزی توسط روش المان محدود ضرایب کالیبراسیون بدست می‌آیند. این ضرایب نسبت به تنش اولیه وارد به نمونه بدون بعد بوده و قابل استفاده در یک آزمایش واقعی جهت تعیین تنشهای پسماند قطعه آزمایشی می باشند. جهت

در روش سوراخکاری مرکزی ابتدا کرنش سنج روزت به سطح یک قطعه دارای تنش پسماند چسبانده می‌شود. در کرنش سنج روزت نقاط بهینه کرنش سنجی برای کرنش سنجها رعایت گردیده است. سپس یک سوراخ کوچک با عمق اندکی بزرگتر از قطر سوراخ در مرکز کرنش سنج روزت ایجاد می‌شود. این سوراخ به صورت محلی تنشها را در محیط پیرامونی آزاد نموده و کرنشهای رها شده بوسیله سه کرنش سنج روی روزت اندازه گیری می‌شوند. در مواد ایزوتروپیک کرنشهای اندازه گیری شده توسط هر کرنش سنج که محور آن با محور مختصات x زاویه θ می سازد، بصورت زیر بیان می‌شود:

$$\varepsilon_r = A(\sigma_x + \sigma_y) + B(\sigma_x - \sigma_y) \cos 2\theta + C\tau_{xy} \sin 2\theta \quad (1)$$

در رابطه (۱)، θ زاویه نقطه دلخواه با محور x بوده و ضرایب A, B و C مقادیر ثابتی هستند، که ثوابت کالیبراسیون نامیده می‌شوند. $\tau_{xy}, \sigma_y, \sigma_x$ نیز تنشهای پسماند موجود در قطعه می باشند. در شکل (۱) دستگاه سوراخکاری مرکزی و کرنش سنج روزت نشان داده شده است. هر گاه روزت مورد استفاده از نوع ساعتگرد که کرنش سنجها در زوایای ۰، ۱۳۵ و ۲۷۰ درجه نصب گردیده اند باشد، خواهیم داشت:

$$\begin{bmatrix} A+B & 0 & A-B \\ A & -C & A \\ A-B & 0 & A+B \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \tau_{xy} \\ \sigma_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

با اندازه گیری مقادیر $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ و استفاده از رابطه (۲) مقادیر تنشهای پسماند بدست می‌آیند. حساسیت پاسخ کرنش سنجها مستقیماً به اندازه سوراخ (D_0) در مقایسه با اندازه روزت (D) وابسته است. عمق سوراخ نیز در حدود $0.4D$ یا کمی بیشتر از آن است، اما برای ماده‌ای که ضخامت آن از $1/2 D$ کمتر است، باید یک سوراخ سرتاسری در قطعه ایجاد شود. حداکثر حساسیت برای یک روزت معین زمانی حاصل می‌شود که سوراخ بزرگترین اندازه مجاز را داشته باشد. همان گونه که نسبت $\frac{D_0}{D}$ افزایش می‌یابد، حساسیت روش تقریباً به نسبت $(\frac{D_0}{D})^2$ افزایش می‌یابد. رابطه زیر برای نسبت $\frac{D_0}{D}$ برقرار

راه به در می توان کرنش ها را محاسبه نمود. در جدول (۱) کرنش های بدست آمده از روش شبیه سازی سوراخکاری مرکزی با کرنش های بدست آمده از ضرایب کالیبراسیون استاندارد مقایسه شده 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 شده است.

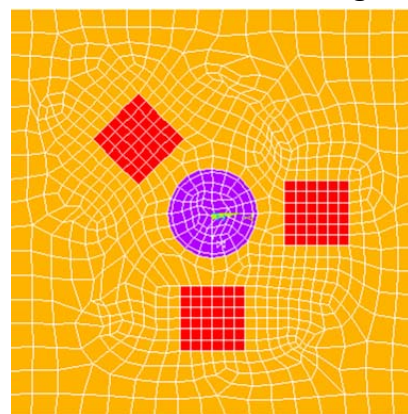
شبیه سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی مواد ایزوتروپیک در حالت سه بعدی

از آنجا که کرنش سنج روی سطح قطعه نصب می شود، تغییرات کرنش روی سطح را ثبت می نماید. پس از انجام اولین مرحله، کرنش رها شده در مراحل بعد تحت تاثیر دو عامل تنش های موجود در آن عمق و افزایش عمق سوراخ است. بنابراین افزایش عمق امکان رها سازی کرنش بیشتری را نسبت به مراحل قبلی می دهد. بنابراین در صورتی که عمق جدید سوراخ کاملاً عاری از تنش باشد، نیز رها سازی کرنش ادامه می یابد [۲۵].

جهت شبیه سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی در مواد ایزوتروپیک بصورت سه بعدی، از المان ۲۰ گره ای Solid186 استفاده گردیده است. محل سوراخکاری با قطر ثابت ۲/۰۵۲ میلی متر (۰/۴D) المان بندی شده است. صفحه در سه حالت با ضخامتهای ۱، ۱/۵ و ۲ میلی متر مدل شده است. تنش تک محوره ۲۰ MPa به نمونه داده شده است.

شکل (۳) توزیع کرنش در جهت تنش وارده را در یک نمونه با ضخامت برابر قطر نشان می دهد. در اعمال تنشهای پسماند یکنواخت به نمونه و سوراخکاری مرکزی کرنش متوسط المانهای سطحی و کرنش متوسط کل المانها 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 (۲) ارائه شده است. 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. همچنین نتایج روش SCHD بیانگر خطای کمتر کرنش متوسط کل المانها در محل نصب روزت نسبت به استاندارد می باشد.

شبیه سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی ^۳ (SCHD) از نرم افزار المان محدود ANSYS استفاده گردیده است [۲۴]. یک نمونه فولادی ($E = 200 \text{ GPa}, \nu = 0.3$) 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 شده است. همچنین محل سوراخکاری با قطرهای متغیر از ۰/۳D تا ۰/۵D متمایز گردیده و المان بندی شده است (شکل ۲). ابعاد صفحه نیز 150×150 میلی متر شبکه بندی شده 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 استفاده شده است. پس از وارد نمودن تنش اولیه به نمونه به عنوان تنش پسماند موجود در یک نمونه آزمایشی، جهت شبیه سازی فرآیند سوراخکاری المانهای موجود در ناحیه سوراخ در مدل اجزاء محدود حذف شده اند. در حذف المانها، که در نرم افزار ANSYS از آن به عنوان حالت مرگ المانها^۴ یاد می شود، المانها حذف نمی شوند، اما سفتی المانهای انتخاب شده در ناحیه سوراخ به میزان معادل 1×10^{-6} مقدار اولیه خود کاهش می یابد [۲۴]. پس از سوراخکاری و حل توسط نرم افزار کرنش در راستای هر کرنش سنج در محل قرارگیری شبکه های هر سه کرنش سنج یک روزت استخراج گردیده و متوسط آنها بدست آمده است.



شکل ۲: شبکه بندی سوراخ و کرنش سنج روزت.

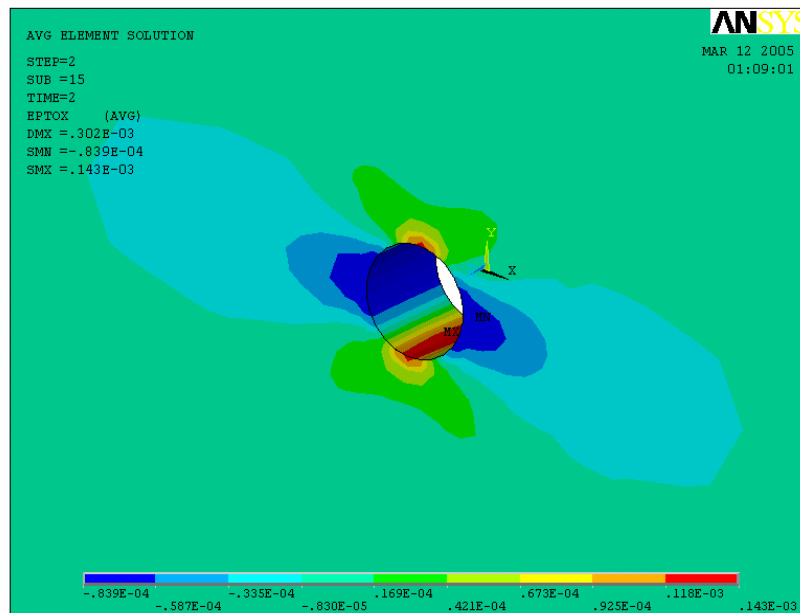
با این روش می توان ضرایب کالیبراسیون را محاسبه و با نتایج استاندارد مقایسه نمود. همچنین با استفاده از استاندارد ASTM و ضرایب کالیبراسیون برای یک سوراخ

جدول ۱: مقایسه ضرایب کالیبراسیون و کرنش های بدست آمده از روش SCHD و ASTM.

D_0	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

جدول ۲: کرنشهای بدست آمده از شبیه سازی سوراخکاری در حالت سه بعدی برای مواد نازک.

ضخامت صفحه (mm)	کرنش محاسبه شده از استاندارد ASTM	کرنش متوسط در سطح ($\mu\epsilon$)	درصد خطا	کرنش متوسط کل المانها ($\mu\epsilon$)	درصد خطا
1	32.97	33.55	1.7	33.55	1.7
1.5	32.97	34.31	4.1	34.14	3.5
2	32.97	35.00	6.2	34.81	5.6



شکل ۳: توزیع کرنش متوسط کل در جهت تنش وارده در یک نمونه (ضخامت برابر قطر).

$$\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E_y} - \nu_{xy} \frac{\sigma_x}{E_x}$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G_{xy}}$$

بعلت خاصیت تقارن الاستیک زیر چهار ثابت از پنج ثابت فوق مستقل می باشند:

$$\frac{U_{xy}}{E_x} = \frac{U_{yx}}{E_y} \quad (5)$$

مواد ارتوتروپیک در حالت سه بعدی دارای نه ثابت الاستیک هستند، که با در نظر گرفتن رابطه فوق تنها

تئوری روش سوراخکاری مرکزی در مواد ارتوتروپیک

در مواد ارتوتروپیک برای حالت دوبعدی تنش صفحه‌ای^۵، پنج ثابت الاستیک برای نسبت دادن تنش و کرنش نیاز است ($\nu_{yx}, \nu_{xy}, G_{xy}, E_y, E_x$). هنگامی که محوره‌های مختصات x و y در جهات اصلی الاستیک ماده قرار داشته باشند، قانون عمومی هوک بصورت زیر بدست می آید:

$$\epsilon_x = \frac{\sigma_x}{E_x} - \nu_{yx} \frac{\sigma_y}{E_y}$$

Schajer و همکارش از رابطه ماتریسی زیر استفاده نمودند:

$$\frac{1}{\sqrt{E_X E_Y}} \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{22} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{Bmatrix} \quad (۶)$$

که در آن ضرایب نرمی^۷ C_{11} تا C_{33} در حالت کلی مستقل از ثوابت مثلثاتی A، B و C هستند. ضریب $1/\sqrt{E_X E_Y}$ برای آن قرار داده شده که ضرایب فوق ثوابتی بدون بعد باشند. اگر x و y مربوط به روزت بر محورهای اصلی ماده ارتوتروپیک^۸ منطبق باشند، ضرایب C_{12} و C_{32} صفر هستند.

ضرایب نرمی معادله (۶) به خواص ارتوتروپیک نمونه، قطر و عمق سوراخ و هندسه کرنش سنج وابسته است. برای یک ماده ارتوتروپیک عمق سوراخ به نسبت مدول برشی عرضی^۹ به مدول محوری صفحه ای^{۱۰} بستگی دارد. کاهش این نسبت باعث کاهش سریع عمق موثر سوراخ می‌شود. فرضیاتی که Schajer و Yang در نظر گرفتند عبارتند از:

۱. تنش در ضخامت قطعه ارتوتروپیک، یکنواخت است.
۲. آزاد شدن کرنشهای پسماند پس از سوراخکاری به صورت الاستیک است.
۳. در قطعه حالت تنش سطح برقرار است.
۴. قطعه ارتوتروپیک، محیطی پیوسته و همگن است.
۵. سطح کرنش سنج در محاسبات لحاظ می‌شود.

شبیه سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی در مواد ارتوتروپیک

جهت شبیه سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی در مواد ارتوتروپیک از نرم افزار المان محدود ANSYS [۲۴]، استفاده شده است. در یک صفحه ارتوتروپیک به ابعاد 150×150 میلیمتر محل نصب کرنش سنج روزت و محل سوراخ به دقت شبیه سازی شده است. المان مورد استفاده المان مرتبه دوم ۸ گره ای Plane82 از نوع Solid می باشد. تعداد المان مورد استفاده در شبیه سازی حالت دو بعدی کل مدل ۲۰۵۴ المان می باشد و برای شبکه بندی هر کرنش سنج از سه کرنش سنج یک روزت نیز ۹ المان استفاده شده است. پس از وارد نمودن تنش اولیه به نمونه به عنوان تنش پسماند، جهت شبیه سازی سوراخکاری المانهای ناحیه سوراخ در مدل اجزاء محدود

هشت ثابت از آنها مستقل هستند. این مواد نسبت به سه صفحه دارای تقارن الاستیک می‌باشند. در مواد ایزوتروپیک $E_x = E_y = E$ ، $\nu_{xy} = \nu_{yx} = \nu$ ، $G_{xy} = G = \frac{E}{2(1+\nu)}$ می باشد. لذا مواد ایزوتروپیک تنها دو ثابت الاستیک مستقل دارند.

یک تقریب ساده برای روش سوراخکاری^۶ در مواد ارتوتروپیک آن است که پاسخ کرنش آزاد شده را به صورت مثلثاتی مشابه با مواد ایزوتروپیک بگیریم. در این حالت فرض می‌شود که معادله (۱) هنوز برقرار بوده و کرنش سنج‌های (۳) در راستای جهات تقارن الاستیک ماده ارتوتروپیک باشند. در اینجا C، ثابت کالیبراسیون مستقلی است که به A و B وابسته نیست. استفاده از معادله (۱) برای مواد ارتوتروپیک ابتدا در سال ۱۹۶۸ توسط Bert و همکارش [۷] و سپس در سال ۱۹۸۷ با روشی متفاوت توسط Prasad و همکاران [۸] پیشنهاد گردید.

در سال ۱۹۹۴، Schajer & Yang [۲۲] نشان دادند، که تعمیم روش سوراخکاری مرکزی برای مواد ارتوتروپیک توسط Bert و همکارش و Prasad و همکارانش معتبر نیست. همچنین در حالاتی که نمونه‌های آزمایشی بسیار نزدیک به حالت ایزوتروپیک هستند، مقدار ضریب کالیبراسیون C به مقدار 2B نمی‌رسد، در صورتیکه برای مواد ایزوتروپیک رابطه $C = 2B$ برقرار است. Schajer و همکارش نشان دادند که کرنش‌های رها شده اطراف یک سوراخ در یک ماده ارتوتروپیک به فرم مثلثاتی نمی‌باشند. آنها با فرض پیوستگی همگن ساختار میکروسکوپی یک ماده ارتوتروپیک و معادلات میدان جابجایی رها شده حول یک سوراخ [۲۲]، ارتباط بین تنشهای پسماند و کرنشهای رها شده در اثر سوراخکاری را بیان نمودند. آنها نشان دادند که افزایش ارتوتروپیک خواص ماده باعث انحراف شدید از فرم مثلثاتی کرنش (معادله ۱) می‌گردد.

Schajer & Yang، برای مرتبط ساختن تنش پسماند و کرنش رها شده در مواد ارتوتروپیک نه (۹) ضریب کالیبراسیون تعریف نمودند که می‌توان آنها را به روشهای تئوری، عددی و تجربی بدست آورد. آنها با یک حل تحلیلی، مقادیر ضریب کالیبراسیون را برای گستره مناسبی از خواص مکانیکی مختلف مواد ارتوتروپیک محاسبه نمودند.

حذف شده اند. با دانستن مقدار تنش اوليه وارد به نمونه و استخراج کرنشهای آزاد شده در محل شبيه سازی شده کرنش سنج روزت، ضرایب کالیبراسیون محاسبه می شوند. کرنش در راستای هر کرنش سنج از معدل گیری کرنش در راستای نصب کرنش سنج و بر اساس متوسط کرنش هر المان در نقاط گوسی بدست می آید. لذا برای کرنش سنجی که در راستای X قرار دارد ϵ_x ، و برای کرنش سنجی که در راستای Y قرار دارد ϵ_y ، و برای کرنش سنجی که در راستای 45° قرار دارد، ϵ_r در همان راستای 45° و در سطح کرنش سنج معدل گیری می شود.

در این تحقیق آزاد شدن کرنشهای پسماند پس از سوراخکاری نمونه به صورت الاستیک فرض شده است. همچنین نمونه در قطعه حالت تنش سطحی قرار دارد و قطعه ارتوتروپ، محیطی پیوسته و همگن است.

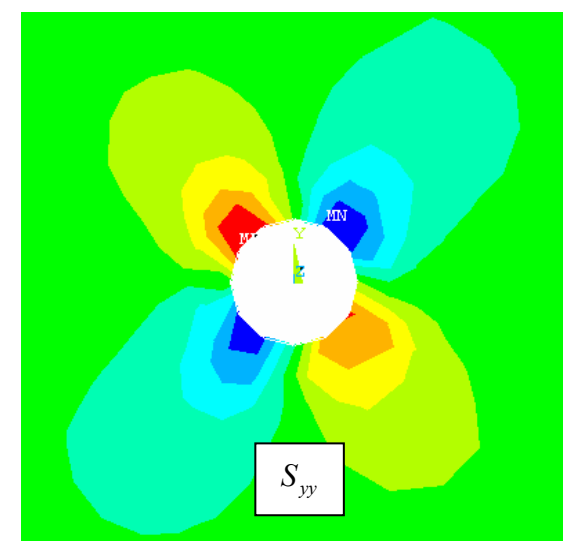
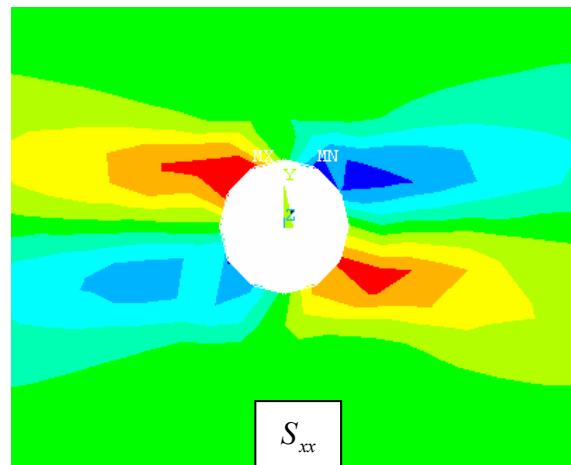
محاسبه ماتریس ضرایب

فرض کنید که حالت تنش صفحه ای برای نمونه برقرار شده و تنش تک محوره به آن اعمال شود. در این حالت توزیع تنش در قطعه یکنواخت است. پس از حل برای شبيه سازی فرآيند سوراخکاری، المانهای موجود در ناحیه سوراخ انتخاب شده و از بین برده شده اند.

در این حالت سفتی المانهای انتخاب شده به 1×10^{-6} مقدار اوليه خود کاهش می یابد و توزیع تنش در نمونه تغییر می کند. با محاسبه مقادیر کرنشهای رها شده $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ به روش اجزا محدود، با استفاده از معادله ماتریسی (۶) ضرایب کالیبراسیون محاسبه می شوند. برای محاسبه ماتریس ضرایب از شبيه سازی سه آزمایش کالیبراسیون استفاده می شود. برای محاسبه ضرایب نرمی C_{31}, C_{21}, C_{11} شبيه سازی آزمایش کشش با مقدار تنش معلوم در جهت کرنش سنج شماره ۱ انجام می شود. با محاسبه مقادیر $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ به روش اجزا محدود، با استفاده از معادله ماتریسی (۶) ضرایب C_{31}, C_{21}, C_{11} محاسبه می شوند.

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= \sigma, & C_{11} &= \sqrt{E_x E_y} \frac{\epsilon_1}{\sigma}, \\ \sigma_{22} &= 0, & C_{21} &= \sqrt{E_x E_y} \frac{\epsilon_2}{\sigma}, \\ \sigma_{12} &= 0, & C_{31} &= \sqrt{E_x E_y} \frac{\epsilon_3}{\sigma}, \end{aligned} \quad \xrightarrow{\text{Eq.6}} \quad (7)$$

برای محاسبه ضرایب C_{33}, C_{23}, C_{13} ، آزمایش کشش با مقدار تنش معلوم در جهت کرنش سنج شماره ۳



شکل ۴: توزیع تنش در یک ماده ارتوتروپ در اثر سوراخکاری مرکزی با اعمال تنش برشی.

معادله (۲) کاملاً مشهود است. برای مثال برای ماده ای $\nu_{xy} = 0.25$ ، $E_y = 50 \text{ GPa}$ ، $E_x = 200 \text{ GPa}$ که و $G_{xy} = 40 \text{ GPa}$ باشد، ماتریس ضرایب با استفاده از روش SCHD بصورت زیر بدست می‌آید:

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} -0.277 & 0 & 0.150 \\ -0.084 & 0.659 & -0.193 \\ 0.198 & 0 & -0.635 \end{bmatrix} \quad (10)$$

برای مواد ایزوتروپیک در معادله (۲)، ضرایب $C_{21} = C_{23} = (C_{11} + C_{31})/2 = (C_{13} + C_{33})/2$ ، $C_{11} = C_{33}$ و $C_{13} = C_{31}$ می باشد، در حالیکه معادله (۱۰) بوضوح این روابط را نقض و عدم درستی آن را در مواد ارتوتروپیک نشان می دهد. تناقض اساسی دیگر با توجه به خصوصیات متفاوت ماده ارتوتروپیک در دو راستا آشکار می شود. شبیه‌سازی تست کشش در راستای محور اصلی ماده ارتوتروپ ($\sigma_x = 1$ ، $\sigma_y = \tau_{xy} = 0$) ضرایب $A = (C_{11} + C_{31})/2$ و $B = (C_{11} - C_{31})/2 = -0.2375$ را نتیجه می‌دهد. هر گاه شبیه‌سازی آزمایش کشش در جهت عمود بر محور اصلی ($\sigma_y = 1$ ، $\sigma_x = \tau_{xy} = 0$) صورت پذیرد، ضرایب $A = (C_{33} + C_{13})/2 = -0.2425$ و $B = (C_{33} - C_{13})/2 = -0.3925$ بدست می‌آید. تفاوت بین این دو گروه از اعداد بسیار مهم و قابل توجه است.

شبیه سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی در کامپوزیت‌های چندلایه و نتایج آزمایشگاهی

جهت شبیه‌سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی در چند لایه‌های کامپوزیت دو حالت را می توان در نظر گرفت. حالت اول آن است که ثوابت موثر مهندسی^{۱۱} هر چیدمان با استفاده از تئوری کلاسیک لایه ای (CLT) محاسبه گردند. با استفاده از این ثوابت مدلسازی صورت پذیرد و ماتریس ضرایب توسط روش شبیه سازی (SCHD) استخراج و تنشهای پسماند حرارتی محاسبه شوند. در این حالت می‌توان از ضرایب موجود در جدول ارائه شده توسط Schajer & Yang [۲۲] نیز استفاده نمود. اما اشکال اساسی این روش آن است که تنشهای پسماند موجود در قطعه یکنواخت فرض می‌شوند در حالیکه در عمل اینگونه نیست. واقعیت آن است که تنشهای پسماند موجود در یک سازه کامپوزیتی غیر

شبیه‌سازی می‌شود. با محاسبه مقادیر $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ ، ضرایب C_{33}, C_{23}, C_{13} محاسبه می‌شوند.

$$\begin{aligned} \sigma_{12} &= 0, & C_{13} &= \sqrt{E_x E_y} \frac{\epsilon_1}{\sigma}, \\ \sigma_{22} &= \sigma, & C_{23} &= \sqrt{E_x E_y} \frac{\epsilon_2}{\sigma}, \\ \sigma_{12} &= 0, & C_{33} &= \sqrt{E_x E_y} \frac{\epsilon_3}{\sigma} \end{aligned} \quad (8)$$

برای تعیین ضریب C_{22} ، تنش برشی معلوم به نمونه مدل اعمال می گردد. با محاسبه مقدار ϵ_2 به روش اجزا محدود، ضریب C_{22} محاسبه می گردد.

$$\begin{aligned} \sigma_{11} &= 0, \\ \sigma_{22} &= 0, \\ \sigma_{12} &= \sigma, \end{aligned} \quad \xrightarrow{\text{Eq.6}} \quad C_{22} = \sqrt{E_x E_y} \frac{\epsilon_2}{\sigma} \quad (9)$$

تجزیه و تحلیل نتایج

برای بررسی انحراف رفتار کرنش رها شده از حالت مثلثاتی برای یک ماده ارتوتروپیک، ابتدا ضریب پواسون اصلی کامپوزیت را ثابت ($\nu_{xy} = 0.25$) در نظر گرفته و تغییرات مدول برشی و مدول الاستیک بررسی شده است. با استفاده از روش شبیه‌سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی (SCHD) ماتریس ضرایب بدست آمده است. نتایج روش شبیه سازی SCHD با نتایج تحلیلی Schajer & Yang [۲۲] در شکل (۵) مقایسه شده است. حداکثر خطا در میان نتایج ۸٪ می باشد. جدول (۳) نتایج روش شبیه‌سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی (SCHD) را در مواد ارتوتروپیک با فرض ثابت بودن ضریب پواسون نشان می دهد. جهت بررسی تغییرات ضریب پواسون، مدول الاستیک در دو جهت ثابت و مساوی در نظر گرفته شده است. نسبت مدول برشی به مدول الاستیک نیز مساوی ۰/۱ ثابت فرض شده است. اما ضریب پواسون تغییر می کند ($E_x = E_y$ و $G_{xy}/E_y = 0.1$). نتایج شبیه‌سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی (SCHD) در جدول (۴) بیان شده است. مقایسه این نتایج با نتایج تحلیلی موجود [۲۲] در شکل (۵) نشان داده شده است. نتایج تطابق مناسبی را نشان می دهد و حداکثر خطا ۶٪ می باشد.

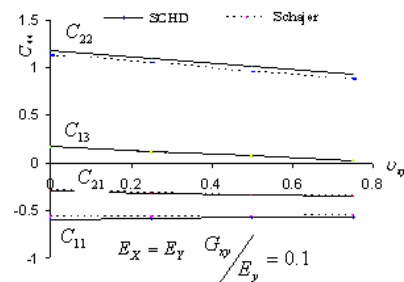
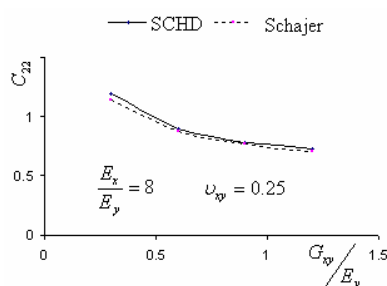
برای یک ماده ارتوتروپیک انحراف از حالت مثلثاتی و

جدول ۳: نتایج روش شبه سازی فرایند سوراخکاری مرکزی (SCHD) برای مواد ارتوتروپیک ($\nu_{xy} = 0.25$).

E_x/E_y	G_{xy}/E_y	C_{11}	C_{13}	C_{21}	C_{22}	C_{23}	C_{31}	C_{33}
1	0.10	-0.567	0.115	-0.316	1.045	-0.316	0.115	-0.567
1	0.20	-0.489	0.137	-0.205	0.755	-0.205	0.138	-0.490
1	0.30	-0.449	0.149	-0.159	0.640	-0.159	0.149	-0.449
1	0.40	-0.423	0.156	-0.133	0.577	-0.133	0.156	-0.423
2	0.15	-0.436	0.114	-0.247	1.047	-0.359	0.144	-0.719
2	0.30	-0.385	0.138	-0.159	0.771	-0.232	0.166	-0.607
2	0.45	-0.359	0.150	-0.124	0.662	-0.181	0.176	-0.551
2	0.60	-0.342	0.158	-0.104	0.602	-0.152	0.183	-0.516
4	0.20	-0.338	0.106	-0.204	1.120	-0.444	0.162	-0.922
4	0.40	-0.305	0.130	-0.131	0.833	-0.289	0.183	-0.762
4	0.60	-0.288	0.142	-0.101	0.720	-0.227	0.192	-0.683
4	0.80	-0.277	0.150	-0.084	0.659	-0.193	0.198	-0.635
8	0.30	-0.254	0.100	-0.152	1.146	-0.511	0.179	-1.129
8	0.60	-0.235	0.122	-0.096	0.871	-0.340	0.197	-0.913
8	0.90	-0.224	0.133	-0.073	0.765	-0.272	0.204	-0.811
8	1.20	-0.217	0.140	-0.060	0.707	-0.235	0.208	-0.749
16	0.40	-0.193	0.088	-0.119	1.253	-0.634	0.187	-1.416
16	0.80	-0.181	0.108	-0.072	0.964	-0.430	0.202	-1.121
16	1.20	-0.174	0.118	-0.053	0.853	-0.350	0.208	-0.983
16	1.60	-0.170	0.125	-0.043	0.792	-0.307	0.211	-0.901

جدول ۴: نتایج شبه سازی سوراخکاری مرکزی (SCHD) ($E_x = E_y$ و $G_{xy}/E_y = 0.1$).

ν_{xy}	C_{11}	C_{22}	C_{21}	C_{13}
0	-0.574	0.161	-0.295	1.128
0.25	-0.567	0.115	-0.316	1.045
0.50	-0.559	0.068	-0.336	0.961
0.75	-0.550	0.020	-0.355	0.877



شکل ۵: نمودار مقایسه ای نتایج روش شبه سازی SCHD با روش تحلیلی Schajer & Yang برای مواد ارتوتروپیک.

پسماند در عمق یک سازه کامپوزیتی از نتایج بدیهی آن به شمار می رود. حالت دوم آن است که هر لایه بصورت جداگانه مدلسازی

یکنواخت بوده و متعادلند. شرط تعادل یک قید منطقی و ضروری برای تنشهای پسماند موجود در یک سازه اعم از فلزی یا کامپوزیتی است، که عدم یکنواخت بودن تنشهای

آزمایشهای سری دوم: تعیین تنشهای پسماند در کامپوزیت شیشه - اپوکسی

کامپوزیتهای شیشه - اپوکسی تکجهته مورد بررسی با دمای پخت 100°C و با خواص لایه‌ای مندرج در جدول (۶) می‌باشند. دو نمونه جداگانه از این کامپوزیت انتخاب و تنشهای پسماند در سطح چند لایه محاسبه شده‌اند.

جدول ۶: ثوابت الاستیک شیشه - اپوکسی.

E_x (GPa)	E_y (GPa)	G_{xy} (GPa)	ν_{xy}
34.8	10	3.55	0.237

نمونه اول چیدمان $[0/\pm 45_3/90_5]_S$ می باشد، که ماتریس ضرایب حاصل از حذف المانهای سطحی برابر است با:

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} -0.3428 & -0.0118 & 0.1049 \\ -0.1176 & -0.4007 & -0.0903 \\ -0.0974 & -0.0091 & -0.2769 \end{bmatrix}$$

(۱۴)

کرنشهای رها شده از آزمایش سوراخکاری مرکزی نمونه مذکور در معادله (۱۵) بیان شده است.

$$[\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_3] = [3253 \quad 2243 \quad 7176] \mu\varepsilon \quad (15)$$

تنشهای پسماند حرارتی ناشی از پخت در سطح چند لایه، محاسبه و در معادله (۱۶) آورده شده است.

$$[\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \sigma_3] = [-27.4 \quad 6.3 \quad -35.3] \text{MPa} \quad (16)$$

نمونه بعدی چیدمان $[0/45_6/90_5]_S$ می باشد. ماتریس ضرایب چند لایه با شبیه سازی توسط روش المان محدود و حذف المانهای سطحی محاسبه گردیده و در زیر آورده شده است:

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} -0.3594 & -0.0122 & 0.1126 \\ -0.1226 & -0.4344 & -0.0902 \\ -0.1051 & -0.0099 & -0.2832 \end{bmatrix}$$

(۱۷)

تنشهای پسماند حرارتی ناشی از پخت در سطح چند لایه با استفاده از کرنشهای رها شده برابر است با:

$$[\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_3] = [390 \quad 363 \quad 851] \mu\varepsilon \quad (18)$$

$$[\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \sigma_3] = [-30 \quad 2.7 \quad -38.5] \text{MPa} \quad (19)$$

شود. در این حالت هر لایه خواص خود را از لحاظ جنس، ضخامت و جهت الیاف داراست. بنابراین ماتریس ضرایب حاصل از حذف المانهای ناحیه سوراخ، برای تبدیلات تنش و کرنش مناسب است. از آنجا که لازم است تنشهای پسماند در هر لایه محاسبه گردد، عمق پیشروی باید حداکثر برابر یک لایه باشد و ماتریس ضرایب را برای آن لایه محاسبه و تنشهای پسماند را تعیین نمود. در این تحقیق از حذف المانهای لایه اول جهت محاسبه ماتریس ضرایب کالیبراسیون استفاده شده است.

آزمایش سری اول: تعیین تنشهای پسماند در کامپوزیت کربن - اپوکسی

یک نمونه کربن - اپوکسی تکجهته 1^2 با دمای پخت 100°C و چیدمان $[90_6/0_{10}]$ انتخاب شده است [۲۶]. ثوابت الاستیک کربن - اپوکسی در جدول (۵) آمده است.

جدول ۵: ثوابت الاستیک کربن - اپوکسی.

E_x (GPa)	E_y (GPa)	G_{xy} (GPa)	ν_{xy}
92.9	6.2	1.61	0.296

ماتریس ضرایب از حذف المانهای سطحی با استفاده از روش شبیه سازی SCHD بدست آمده است. با انجام عملیات سوراخکاری کرنش رها شده در سه راستا بدست آمده است. با استفاده از ماتریس ضرایب، تنش پسماند حرارتی ناشی از پخت در سطح چند لایه را می توان پیش‌بینی نمود.

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} -0.5014 & -0.0239 & 0.0870 \\ -0.2768 & -1.5373 & -0.3644 \\ 0.1021 & -0.0449 & -0.7206 \end{bmatrix} \quad (11)$$

کرنشهای رها شده از نمونه آزمایشی برابر است با:

$$[\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \varepsilon_3] = [2493 \quad -2403 \quad -566] \mu\varepsilon \quad (12)$$

و تنشهای پسماند محاسبه شده در نمونه را می توان بصورت زیر بیان نمود:

$$[\sigma_1 \quad \sigma_2 \quad \sigma_3] = [-18.1 \quad 2.5 \quad 35.4] \text{MPa} \quad (13)$$

می‌دهد. این اختلاف از آنجا ناشی می‌شود که آنها برای بدست آوردن ضرایب ستون دوم ماتریس نرمی از تست کشش نمونه ۴۵ درجه استفاده نموده اند، اما در روش شبیه سازی سوراخکاری مرکزی، تنش برشی به شکل مستقیم به نمونه وارد شده است.

نتیجه گیری

ضرایب کالیبراسیون کرنش های رها شده در روش سوراخکاری مرکزی را به تنشهای پسماند محبوس در قطعه مرتبط می‌نمایند. در مواد ایزوتروپیک تنها دو ضریب کالیبراسون برای تبدیل تنش و کرنش لازم است، اما در مواد مرکب تعداد این ضرایب به ۹ عدد افزایش یافته و بصورت ماتریسی بیان می‌شود. تعیین تمامی این ضرایب برای همه مواد با هر درجه از خواص ارتوتروپیک مشکل است. در این تحقیق با شبیه سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی در مواد ایزوتروپیک، بصورت دو بعدی و سه بعدی ضرایب کالیبراسون محاسبه و با ضرایب ارائه شده در استاندارد مقایسه شده است. شبیه سازی صفحات ارتوتروپیک با تغییر ضریب پواسون، مدول برشی و نسبتهای مدول الاستیک در دو راستا در محدوده وسیعی از مواد ارتوتروپیک انجام شده است. نتایج شبیه سازی صفحات ارتوتروپیک با نتایج تحلیلی ارائه شده توسط Schajer & Yang مقایسه شده است.

تطابق خوب نتایج حاصل از هر دو روش صحت نتایج روش SCHD و لزوم استفاده از ماتریس ضرایب برای مواد ارتوتروپ را بیان می‌کند.

از مزیت‌های روش شبیه سازی SCHD سهولت استفاده برای همه مواد با هر درجه از خواص ارتوتروپیک می‌باشد. همچنین می‌توان کرنش سنج های مختلف و قطر متفاوت سوراخها را با توجه به شرایط آزمایش شبیه سازی نمود. ماتریس ضرایب حاصل در تعیین تنشهای پسماند مجهول به کار می‌رود. در این تحقیق نمونه‌هایی از چند لایه‌های کامپوزیت، با استفاده از مدلسازی جداگانه هر لایه شبیه سازی شده است. با توجه به نتایج فوق، ماتریس ضرایب در این حالت از حذف المانهای لایه اول در ناحیه سوراخ بدست می‌آید. تنشهای پسماند در سطح چند لایه با آزمایش نمونه های کامپوزیتی و ثبت کرنشهای رها شده پیش بینی شده است.

مقایسه نتایج با نتایج دیگران

الف) برای مقایسه نتایج روش شبیه سازی SCHD با نتایج Schajer & Yang [۲۲] ابتدا به یک نمونه که وی بررسی نموده است، توجه می‌شود. خواص نمونه مورد بررسی او در جدول (۷) بیان شده است.

جدول ۷: ثوابت الاستیک یک نمونه ارتوتروپیک [۲۲].

$E_x (GPa)$	$E_y (GPa)$	$G_{xy} (GPa)$	ν_{xy}
2	0.5	0.4	0.25

برای ماده ارتوتروپیک جدول (۷)، ضرایب جدول Schajer در معادله زیر آمده است:

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} -0.285 & 0 & 0.157 \\ -0.084 & 0.681 & -0.196 \\ 0.206 & 0 & -0.646 \end{bmatrix} \quad (20)$$

نتایج روش شبیه سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی (SCHD) برای این نمونه برابر است با:

$$C_{ij} = \begin{bmatrix} -0.277 & 0 & 0.150 \\ -0.084 & 0.659 & -0.193 \\ 0.198 & 0 & -0.635 \end{bmatrix} \quad (21)$$

نتایج تطابق قابل قبولی نشان می‌دهد. حداکثر انحراف ضرایب دو روش، ۴/۵٪ می‌باشد.

ب) چند لایه کامپوزیتی کربن-اپوکسی با چیدمان $[0/\pm 45_3/90_5]_S$ از نمونه‌های آزمایشی، Schajer & Yang می‌باشد. آنها با آزمایش کشش نمونه‌هایی که از لایه چینی فوق در زوایای ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه جدا شده بود، روش خود را تایید نمودند. خواص لایه چینی فوق که آنها توسط تئوری لایه ها^{۱۳} محاسبه نمودند [۲۲] در جدول (۸) آورده شده است.

جدول ۸: ثوابت الاستیک نمونه های آزمایشی [۲۲].

$E_x (GPa)$	$E_y (GPa)$	$G_{xy} (GPa)$	ν_{xy}
73.6	34.5	21.3	0.45

نمونه فوق توسط روش شبیه سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی (SCHD) مدل شده است. نتایج برای مقایسه در جدول (۹) آورده شده است.

مقایسه نتایج، تطابق خوبی را به جز در موارد بدست آمده از کرنش سنجهای شماره ۱ و ۳ نمونه ۴۵ درجه نشان

ندارد، لذا شبیه‌سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی (SCHD) روش مناسبی است. همچنین برای تعیین تنشهای غیریکنواخت در عمق قطعه، امکان تعیین ضرایب کالیبراسیون برای سوراخکاری مرحله‌ای با استفاده از روش شبیه‌سازی وجود دارد.

در مقاطع بسیار کوچک که فرضیات تئوری الاستیسیته برقرار نیست، ضرایب کالیبراسیون برای تعیین تنشهای پسماند را می‌توان با این روش بدست آورد. از کاربردهای دیگر این روش می‌توان به تعیین ماتریس ضرایب تنشهای پسماند در اشکال هندسی پیچیده اشاره نمود. هنگامی که تغییرات تنش در ناحیه ای از قطعه شدید باشد، روشهای تئوری و آزمایشی برای تعیین ضرایب کالیبراسیون وجود

جدول ۹: مقایسه نتایج شبیه‌سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی (SCHD) با نتایج تئوری و آزمایشی موجود [۲۲].

Specimen	0 deg			45 deg			90 deg		
	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Strain Gage									
SCHD	-6.65	-2.22	-3.39	-0.003	-11.53	-0.013	2.69	-3.32	-10.86
Ref									
[22] Experimental	-8.3	-2.6	3.1	-2.5	-11.6	-5.4	2.4	-5	-11.3
Theoretical	-7.9	-2.7	4	-2.3	-9.9	-4.4	2.8	-4	-11.7

مراجع

- 1 - "Determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method." *ASTM Standard E837-99*, American Society for Testing and Materials (1999).
- 2 - Mathar, J. (1934). "Determination of initial stresses by measuring the deformation around drilled holes." *Transactions of ASME* 56, No. 4, PP. 249-254.
- 3 - Rendler, N. J. and Vigness, I. (1966). "Hole-drilling strain-gage method of measuring residual stresses." *Experimental Mechanics*, Vol. 6, No. 12, PP. 577-586.
- 4 - Ersoy, N. and Vardar, (2000). "Measurement of residual stresses in layered composites by compliance method." *Journal of Composite Materials*, Vol. 34, No. 7, PP. 575-598.
- 5 - Gascoigne, H. E. (1994). "Residual surface stresses in laminated cross-ply fiber-epoxy composite materials." *Experimental Mechanics*, PP. 27-36.
- 6 - Tsai, S. W. (1988). *Composites Design*, 4th edition, Think Composites .
- 7 - Bert, C. W. and Thompson, G. L. (1968). "A method for measuring planar residual stresses in rectangularly orthotropic materials." *Journal of Composite Materials*, Vol. 2, No. 2, PP. 244-253.
- 8 - Prasad, C. B., Prabhakaran, R. and Thompkins, S. (1987). "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, PP. 105-118, Part II: Experimental Evaluations, Vol. 8, No. 3, PP. 165-172.
- 9 - Novac, R. C. and DeCrescente, M. A. (1970). "Fabrication stresses in graphite resin composites." *Journal of Engineering for Power*, Vol. 92, PP. 377.
- 10 - Lake, B. R., Appl, F. J. and Bert, C. W. (1970). "An investigation of the hole-drilling technique for measuring planar residual stress in rectangularly orthotropic materials." *Experimental Mechanics*, Vol. 10, No. 10, PP. 233-239.

- 11 - Hahn, H. T. and Pagano, N. J. (1975). "Curing stresses in composite laminates." *Journal of Composite Materials*, Vol. 9, PP. 91-106.
- 12 - Hahn, H. T. (1976). "Residual stresses in polymer matrix composite laminates." *Journal of Composite Materials*, Vol. 10, PP. 266-278.
- 13 - Pagano, N. J. and Hahn, H. T. (1977). "Evaluation of composite curing stresses." *In Composite Materials: Testing and Design (Fourth Conference), ASTM STP 617*, PP. 317-329.
- 14 - Crasto, A. S. and Kim, R. Y. (1993). "On the determination of residual stresses in fiber-reinforced thermoset composites." *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 12, PP. 545-558.
- 15 - Weitsman, Y. (1979). "Residual thermal stresses due to cool-down of epoxy-resin composites." *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 46, PP. 563-567.
- 16 - Harper, B. D. and Weitsman, Y. (1981). "Residual thermal stresses in an unsymmetrical cross-ply graphite/epoxy laminate." *Proceedings of AIAA/ASME/ASCE/AHS 22nd Structures, Atlanta, GA : Structural Dynamics and Materials Conference*, April 6-8, PP. 325-332.
- 17 - Kim, K. S. and Hahn, H. T. (1989). "Residual stress development during processing of graphite/epoxy composites." *Composite Science and Technology*, Vol. 36, PP. 121-132.
- 18 - Hyer, M. W. (1981). "Calculation of the room-temperature shapes of unsymmetric laminates." *Journal of Composite Materials*, Vol. 15, PP. 296-310.
- 19 - Hyer, M. W. (1989). "Mechanics of unsymmetric laminates." *Chapter 2, Handbook of Composites*, Vol. 2 (Structures and Design), C. T. Herakovich & Y. M. Tarnopol'skii, Elsevier Science Pub., PP. 85-114.
- 20 - Bogetti, T. A. and Gillespie, J. W. (1989). "Process induced stress and deformation in thick section thermosetting composite laminates." *21st International SAMPE Technical Conference*, September 25-28, PP. 947-995.
- 21 - Cowley, K. D. and Beaumont, W. R. (1997). "The measurement and prediction of residual stresses in carbon-fiber/polymer composites." *Composite Science and Technology*, Vol. 57, PP. 1445-1455.
- 22 - Schajer, G. S. and Yang, L. (1994). "Residual-stress measurement in orthotropic materials using the hole-drilling method." *Experimental Mechanics*, PP. 324-333.
- 23 - Bateman, M. G., Millera, O. H., Palmera, T. J., Breena, C. E. P. and Kingston, E. J. (2005). "Measurement of residual stress in thicksection compositelaminates using the deep-hole method." *International Journal of Mechanical Sciences* 47; PP.1718-1739.
- 24 - ANSYS Help System, Analysis Guide & Theory Reference, Ver. 8.0.
- 25 - Schajer, G. S. (1988). "Measurement of non-uniform residual stresses using the hole-drilling method. Part I – Stress Calculation Procedures." *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 110, PP. 338-343.
- 26 - Shokrieh, M. M. and Kamali, S. M. (2005). "Theoretical and experimental studies on residual stresses in laminated polymer composites." *Journal of Composite Materials*, vol. 39, No. 24, pp.2213-2225.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

- | | | |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------|--------------------------------------|
| 1 - Shot Penning | 2 - Central Hole-Drilling | 3 - Simulated Central Hole-Drilling |
| 4 - Kill Elements | 5 - Plane Stress | 6 - Hole Drilling |
| 7 - Compliance | 8 - Principal Elastic Directions of the Orthotropic Material | |
| 9 - Transversely Modulus | 10 - In-Plane Modulus | 11 - Effective Engineering Constants |
| 12 - Uni-Directional | 13 - Classical Laminate Theory | |