

برآورد دقیق تر میدان تنش پسماند ناشی از پخت در کامپوزیت‌های پلیمری با در نظر گرفتن خصوصیات فاز میانی

مجید صفرآبادی

استادیار، مهندسی مکانیک، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران
msafarabadi@ut.ac.ir ۱۴۳۹۹۵۵۹۶۱

چکیده

در این تحقیق به مطالعه تاثیر شرایط چسبندگی بین الیاف و رزین بر میدان تنش پسماند حرارتی در کامپوزیت‌های پلیمری، پرداخته شده است. بدین منظور، یک کامپوزیت سه فاز شامل الیاف، رزین و فاز میانی در نظر گرفته شده است. در ابتدا، با استفاده از پیش‌بینی‌های تحلیلی موجود برای خصوصیات الاستیک فاز میانی و براساس معادلات مایکرومکانیک، خواص مکانیکی تک لایه ارتوتروپیک سه فاز حاصل شده است. با اعمال این خواص به حل دقیق موجود، ضرایب کالیبراسیون مربوط به روش سوراخکاری مرکزی برای چهار کامپوزیت تک جهته با جنس‌های متفاوت بدست آمده است. شبیه‌سازی روش سوراخکاری مرکزی در چندلایه‌های کامپوزیتی با در نظر گرفتن ضخامت‌های متفاوت فاز میانی، منجر به پیش‌بینی یک ماتریس ضرایب کالیبراسیون معادل برای چندلایه گردیده است. در نهایت با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود برای کرنش‌های پسماند، تنش‌های پسماند حرارتی به ازای شرایط متفاوت چسبندگی محاسبه گردیده است. نتایج تحلیلی نشان می‌دهد که در کامپوزیت کربن-اپوکسی، شرایط چسبندگی تاثیر مهمی بر تمامی ضرایب کالیبراسیون دارد؛ در حالیکه در کامپوزیت‌های بوران-اپوکسی، شیشه-اپوکسی و کولار-اپوکسی تعداد قابل ملاحظه‌ای از این ضرایب، حساسیتی به این شرایط ندارند. در نتیجه، در چندلایه‌های کربن-اپوکسی دور شدن از شرایط چسبندگی کامل، منجر به کاهش قابل ملاحظه میدان تنش پسماند می‌گردد (حدود ۳۰٪)، در حالیکه این تغییرات در چندلایه‌های شیشه-اپوکسی کمتر است (حدود ۱۱٪)، عمده این کاهش در تنش پسماند زمانی اتفاق می‌افتد که ماده کامپوزیتی به صورت سه فاز در نظر گرفته می‌شود، حتی اگر فاز میانی بسیار نازک باشد.

کلیدواژگان

تنش پسماند، فاز میانی، روش سوراخکاری مرکزی، ضرایب کالیبراسیون

More accurate evaluation of curing residual stress field considering interphase characteristics

Majid Safarabadi

School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
P.O.B. 1439955961 Tehran, Iran, msafarabadi@ut.ac.ir

Abstract

In this research, the effects of bonding conditions between fiber and resin on thermal residual stress field of polymer composites have been studied. For this purpose, a three phase composite has been considered includes fiber, matrix as well as the interphase between them. First, by employing the available analytical predictions for elastic properties of the interphase and based on micromechanical equations, the mechanical properties of the three phase orthotropic layer is obtained. By applying these properties to the available exact solution, calibration factors of the central hole-drilling method for unidirectional composites with four different materials have been reached. Simulation of the central hole-drilling method in composite laminates considering various interphase thicknesses leads to prediction of an equivalent calibration factors matrix for the laminate. Finally, by using the available experimental data for residual strains, thermal residual stresses are calculated according to different bonding conditions. Analytical results show that for carbon/epoxy composite, bonding conditions affect all of the calibration factors importantly, while for boron/epoxy, glass/epoxy and aramid/epoxy composites some of these factors are not sensitive to these conditions. Thus, for carbon/epoxy laminates, getting away from perfect bonding conditions, gives rise to a noticeable decrease in residual stress field (about 30%), while these variations are lower in glass/epoxy composite (about 11%). Main of this reduction is occurred when the composite is considered as a three-phase material, even if the interphase is very narrow.

Keywords

Residual Stress, interphase, Hole-Drilling Method, Calibration Factors

تنش پسماند عبارتست از تنش‌ای که در جسم وجود دارد، بدون آنکه جسم، تحت بار خارجی و یا گرادیان‌های دمایی قرار داشته باشد. بخشی از مقاومت جسم صرف غلبه بر این تنش‌ها می‌گردد. تنش‌های پسماند ممکن است طی فرآیند ساخت و یا در طول دوره کاری، در قطعه به وجود آیند. در بسیاری از موارد، تنش‌های پسماند نقش عمده‌ای در تخریب سازه ایفا می‌کنند، به ویژه زمانی که سازه تحت بارهای متناوب و یا محیط‌های خورنده قرار می‌گیرد، ولی همیشه نقش مخرب ندارند. این امر بستگی به مقدار، علامت و توزیع تنش‌های پسماند در مقایسه با تنش‌های ناشی از بار خارجی دارد [۱].

در کامپوزیت‌های پایه پلیمر، حین سرد شدن چندلایه از دمای پخت به دمای محیط، به دلیل عدم انطباق در ضرایب انبساط حرارتی، تنش‌های پسماند بوجود می‌آیند. در چندلایه‌های نازک، این تنش‌ها در دو مقیاس میکرومکانیک^۱ و مکرومکانیک^۲ مورد مطالعه قرار می‌گیرند. عدم تطابق در ضرایب انبساط حرارتی الیاف و رزین عامل اصلی تشکیل تنش‌های پسماند میکرومکانیک است، در حالیکه اختلاف در زوایای لایه‌ها سبب ایجاد تنش‌های مکرومکانیک در یک چندلایه کامپوزیتی است [۲].

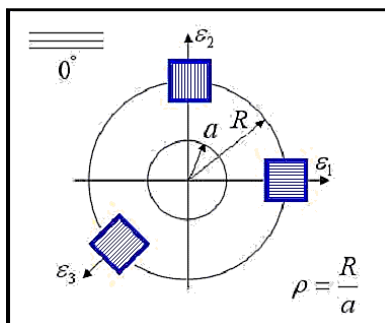
تنش‌های پسماند می‌توانند تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر رفتار چندلایه‌های کامپوزیتی داشته باشند. در اکثر مواقع این تنش‌ها منجر به کاهش خواص استحکامی کامپوزیت‌ها تا حد قابل ملاحظه‌ای می‌گردند. تنش پسماند فشاری در الیاف، ظرفیت تحمل بار فشاری در راستای الیاف را کاهش داده و حتی ممکن است باعث برش ناحیه اتصال تکرشته و رزین گردد. این کاهش استحکام در مقابل فشار در جهت عرضی نیز وجود دارد. همچنین این تنش‌ها به صورت قابل ملاحظه‌ای باعث کاهش استحکام خمشی می‌گردند. کاهش خواص استحکامی منجر به بروز مسائلی چون شکل موجی الیاف، ترک عرضی، لایه‌لایه شدن، تاب‌خوردگی چندلایه‌ها و در نهایت کاهش عمر سازه‌های کامپوزیتی می‌گردند [۱].

اخیراً، روش‌های پیشرفته آزمایشگاهی جدیدی جهت اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در کامپوزیت‌های پلیمری توسعه یافته است که به دو دسته مخرب و غیر مخرب تقسیم می‌شوند؛ استفاده از هر یک از روش‌های فوق، بستگی به مقیاس تشکیل تنش‌های پسماند در قطعه دارد [۳].

در بین روش‌های اندازه‌گیری تنش‌های پسماند، روش سوراخکاری مرکزی در محدوده گسترده‌ای از مواد مهندسی متداول است که در استاندارد ASTM مدون گردیده است [۴]. برای اولین بار، این روش در مواد ارتوتروپیک مورد استفاده قرار گرفت و در ادامه برای کامپوزیت‌های غیر ارتوتروپیک توسعه یافت [۵]. این روش از اواسط دهه ۱۹۶۰ میلادی برای مواد ارتوتروپیک مورد استفاده قرار گرفت [۶،۷]. اندازه‌گیری تنش‌های پسماند در اثر فرآیند سوراخکاری مرکزی، بر اساس روابط تنش و کرنش در یک نمونه بدون سوراخ و یک نمونه سوراخدار بنا نهاده شده است. در این روابط ابتدا تنش در یک نمونه بدون سوراخ بصورت پارامتری بیان گردیده است. سپس روابطی که در همان نمونه با ایجاد یک سوراخ برای تنش متصور است، بیان شده است. اختلاف این دو مقدار در هر نقطه اطراف سوراخ، بیانگر تنش آزاد شده در اثر سوراخکاری است. در روش سوراخکاری مرکزی، ابتدا کرنش سنج روزت به سطح یک قطعه دارای تنش پسماند، چسبانده می‌شود. روزت ساعتگرد شامل سه کرنش سنج در زوایای ۹۰، ۰ و ۲۲۵ درجه می‌باشد شکل ۱. سپس یک سوراخ کوچک با

عمق اندکی بزرگتر از قطر سوراخ در مرکز روزت ایجاد می‌گردد. این سوراخ به صورت محلی، تنش‌ها را در محیط پیرامونی آزاد نموده و کرنش‌های رها شده بوسیله سه کرنش سنج روی روزت اندازه‌گیری می‌شوند [۸].

در سال ۱۹۶۸، یک رویه محاسباتی تقریبی برای مرتبط نمودن کرنش‌های اندازه‌گیری شده (به روش سوراخکاری مرکزی) با تنش‌های پسماند در مواد ارتوتروپیک ارائه گردید [۹]. پرساد^۳ و همکاران [۵] جهت ارتباط تنش و کرنش در مواد ارتوتروپیک از سه ضریب استفاده نمودند، اما شاجر و پانگ^۴ [۱۰] نشان دادند که سه ضریب کافی نبوده و یک ماتریس ضرایب برای ارتباط تنش و کرنش در مواد ارتوتروپیک لازم است. روش تحلیلی که توسط آنها ارائه گردید، برای دو حالت خاص از مواد ارتوتروپیک می‌باشد. همچنین نسبت ثابت مدول برشی به مدول صفحه‌ای در مدل تحلیلی آنها، کاربرد معادلات استفاده شده را محدود نموده است. سیکوت^۵ و همکاران [۱۱،۱۲] نیز سه ضریب برای ارتباط تنش و کرنش در لایه‌های زیرین چند لایه‌های کامپوزیتی استفاده نمودند و این ضرایب را به روش المان محدود محاسبه کردند. شکریه و کمالی [۱۳] با استفاده از ضرایب ارائه شده توسط شاجر به بررسی تنش‌های پسماند در سطح چند لایه‌های کامپوزیتی پرداخته و نتایج خود را با تئوری کلاسیک لایه‌ای مقایسه نمودند. شکریه و قاسمی [۱۴] با استفاده از روش اجزاء محدود، روش سوراخکاری مرکزی را در مواد ارتوتروپیک و ارتوتروپیک شبیه‌سازی نموده و ضرایب کالیبراسیون را با این روش محاسبه نمودند. بر اساس نتایج مراجع فوق، این ضرایب، تابع نسبت قطر سوراخ به قطر روزت و خواص الاستیک ماده کامپوزیتی است که خود این خواص تابع خصوصیات اجزاء تشکیل دهنده (شامل الیاف و رزین، درصد حجمی الیاف) می‌باشند. بنابراین خصوصیات فیزیکی و الاستیک اجزاء اصلی یک ماده کامپوزیتی نقش مهمی در مقدار ضرایب کالیبراسیون خواهد داشت.



شکل ۱ نقاط کرنش سنجی و جهات اندازه‌گیری کرنش در صفحه ارتوتروپیک با سوراخ دایره‌ای [۸].

در تحقیقات اخیر نشان داده شده است که میزان چسبندگی بین الیاف و رزین نقش بسیار مهمی در میدان تنش پسماند یک ماده کامپوزیتی ایفا می‌نماید [۱۵]. از دیدگاه مهندسی شیمی یک لایه غیرهمگن بین اجزاء اصلی کامپوزیت (الیاف و رزین) وجود دارد که خواص آن با این دو بخش متفاوت بوده، ولی مرتبط با خواص آنهاست. این خواص نظیر ساختار مولکولی، چگالی، مدول الاستیسیته و ... است که در راستای شعاعی تغییر می‌کند. لذا این ناحیه به عنوان یک ناحیه مجزا در نظر گرفته شده و خواص آن وابسته به دو ناحیه اطراف خود (رزین و الیاف) می‌باشد که به آن ناحیه فاز میانی گفته می‌شود

4.Schajer & Yang
5. Sicot

1. Micro-mechanics Level
2. Macro-mechanics Level
3.prasad

خصوصیات فاز میانی محاسبه خواهد گردید. بدین منظور، ابتدا یک مرور اجمالی بر آزمایش سوراخکاری مرکزی و نحوه محاسبه ضرایب کالیبراسیون صورت گرفته است. در ادامه به بررسی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی فاز میانی پرداخته شده است. با در نظر گرفتن کامپوزیت سه فاز، تاثیر خصوصیات فاز میانی (با ضخامت‌ها و خصوصیات الاستیک متفاوت) بر ضرایب کالیبراسیون کامپوزیت‌های کربن-اپوکسی، بوران-اپوکسی، شیشه-اپوکسی و کولار-اپوکسی بررسی شده است. همچنین، یک مقایسه بین ضرایب کالیبراسیون کامپوزیت دو فاز و سه فاز صورت گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که ضخامت و خواص الاستیک فاز میانی، تاثیر قابل ملاحظه‌ای بر مقدار ضرایب کالیبراسیون دارد. در برخی موارد در مقایسه با شرایط چسبندگی کامل بین الیاف و رزین، (کامپوزیت دو فاز) زمانی که کامپوزیت به صورت سه فاز با ضخامت‌های بیشتر فاز میانی در نظر گرفته می‌شود، تغییرات ضرایب کالیبراسیون و در نتیجه میدان تنش پسماند محاسبه شده، بسیار چشم‌گیر خواهد بود. بنابراین، صرف نظر نمودن از اثرات فاز میانی می‌تواند منجر به عدم محاسبه دقیق ضرایب کالیبراسیون و در نتیجه عدم قطعیت در میدان تنش پسماند محاسبه شده حاصل از کرنش‌های اندازه‌گیری شده بر اساس آزمایش سوراخکاری مرکزی، گردد. در نهایت با استفاده از نتایج آزمایشگاهی موجود بر اساس روش سوراخکاری مرکزی برای چندلایه‌های کامپوزیتی کربن-اپوکسی و شیشه-اپوکسی، به محاسبه تنش‌های پسماند به ازای ضخامت‌ها و خصوصیات متفاوت فاز میانی پرداخته شده است.

۲- آزمایش سوراخکاری مرکزی و ضرایب کالیبراسیون مربوطه

همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، 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 اندازه‌گیری می‌شوند، شکل ۱.

شاجر و یانگ [۱۰] برای مرتبط کردن تنش پسماند و کرنش رها شده تعداد نه 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. آنها از رابطه ماتریسی زیر استفاده نمودند:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} \\ C_{21} & C_{22} & C_{23} \\ C_{31} & C_{32} & C_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

بطوریکه ضرایب نرمی C_{11} تا C_{33} به خواص الاستیک نمونه، قطر و عمق سوراخ و هندسه کرنش‌سنج وابسته است. شکریه و قاسمی [۱۴] با استفاده از روش اجزاء محدود روش سوراخکاری مرکزی را در مواد ایزوتروپیک، ارتوتروپیک و چندلایه‌های کامپوزیتی شبیه‌سازی نموده و ضرایب

[۱۶]. آنها در تحقیق خود فاز میانی را بدین صورت تعریف نمودند: "در اطراف الیاف غوطه‌ور در یک رزین یک ناحیه نسبتاً پیچیده‌ای قرار دارد بطوریکه بین الیاف و رزین چسبندگی کامل وجود ندارد. در این ناحیه به دلیل انقباض رزین و گرادیان‌های تنش بالا تنش‌های مکانیکی به صورت قابل ملاحظه‌ای گسترش می‌یابد و حتی در برخی موارد نقاط تکین تنش^۱، ظاهر می‌گردد. در نتیجه حفره‌ها، میکروتکرک‌ها و انفصالات مشابه دیگری به وجود می‌آیند. در این حالت، کامپوزیت به عنوان یک جسم دارای سه فاز مختلف در نظر گرفته می‌شود. دو ناحیه شامل الیاف و رزین و یکی دیگر که به دلیل تعامل این دو ناحیه به دلیل رفتارهای متفاوتشان در برابر تغییرات دما بین آنها تشکیل می‌گردد؛ این ناحیه به نام فاز میانی نامیده می‌شود [۱۶]."

وجود فاز میانی یک فرض نیست، بلکه وجود آن توسط آزمایشات متعددی اثبات شده و تحقیقات زیادی در مورد خواص این ناحیه به صورت تئوری و آزمایشی صورت گرفته است. در سال ۲۰۰۰، پامپ^۲ و همکاران [۱۷] تحقیقاتی روی کامپوزیت‌های پلی‌پروپیلن انجام دادند. آنها در مورد روش‌های شناسایی خصوصیات فیزیکی این ناحیه شامل تخمین درصد حجمی، ضخامت، مدول الاستیسیته و ضریب انبساط حرارتی بحث‌های فراوانی انجام دادند. بر اساس تحقیقات آنها فاز میانی دارای ضخامت قابل توجهی بوده و خواص الاستیک آن متفاوت از خواص الیاف و رزین است. بر اساس تحقیقات مشابه، فاز میانی یک بخش از رزین بوده که سطح الیاف را احاطه کرده است! اندازه و نوع این ناحیه به صورت قابل توجهی تغییر می‌کند که این تغییرات وابسته به خصوصیات الیاف و رزین و سطوح آنها دارد. بر اساس نتایج این تحقیق، ترکیبات ساختاری و ضخامت فاز میانی توسط عواملی چون شرایط پخت، رفتار سطوح و سایر خواص متالورژیکی الیاف و رزین تعیین می‌گردد. در سال ۲۰۰۱، فیشر^۳ و همکاران [۱۸] با استفاده از دو مدل مایکرو مکانیکی به پیش‌بینی خواص مکانیکی یک کامپوزیت شامل سه فاز پرداختند. بر اساس تحقیقات مشابه در کامپوزیت‌های پلیمری درصد وزنی ناحیه فاز میانی تقریباً ۵٪ به صورت آزمایشگاهی به دست آمد. بنابراین انتظار می‌رود که فاز میانی تاثیر قابل توجهی روی رفتار کلی کامپوزیت داشته باشد. در سال ۲۰۰۱، کیم^۴ و همکاران [۱۹] با استفاده از سه روش آزمایشگاهی متفاوت به اندازه‌گیری ضخامت ناحیه فاز میانی پرداختند. آزمایشات انجام شده بر روی کامپوزیت شیشه-اپوکسی ضخامت‌های ۰.۳۰، ۰.۴۰، ۰.۷ میکرومتر را برای فاز میانی نتیجه داد. در سال ۲۰۰۶، ماتزن میلر و گرلاچ^۵ و [۲۰] با استفاده از روش‌های آزمایشگاهی به تعیین خصوصیات ناحیه فاز میانی پرداختند. بر اساس تمامی این تحقیقات یک مساله بسیار مهم و قابل توجه بوده است. این مساله مهم وجود یک فاز میانی است که خواص آن به طور قابل ملاحظه‌ای به خواص الیاف و رزین وابسته است. در نتیجه عدم چسبندگی کامل الیاف و رزین به یکدیگر وجود دارد. (به طوریکه بر اساس این فرض پارامتری به نام راندمان چسبندگی تعریف می‌شود) بنابراین در کامپوزیت‌های پلیمری، ضخامت و خواص حرارتی و مکانیکی فاز میانی بر ثابت‌های الاستیک ماده کامپوزیتی تاثیرگذار بوده و در نتیجه بسته به مشخصات فاز میانی، ضرایب کالیبراسیون یک چندلایه کامپوزیتی می‌تواند تحت تاثیر قرار گیرد. بنابراین در این مقاله به بررسی میزان تاثیر فاز میانی بر ضرایب کالیبراسیون کامپوزیت‌های پلیمری پرداخته شده است که در نهایت با ضرب شدن ماتریس ضرایب کالیبراسیون در کرنش‌های اندازه‌گیری شده (حاصل از روش سوراخکاری مرکزی) میدان تنش پسماند، به عنوان تابعی از

4. Kim
5. Matzenmiller and Gerlach

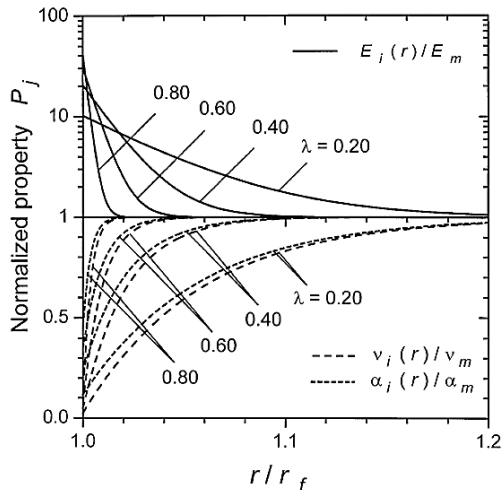
1. Stress Singularity
2. Pompe
3. Fisher

β_2 و در نتیجه ضرایب کالیبراسیون تاثیرگذار بوده و سبب تغییر میدان تنش پسماند می گردند. بر اساس روابط مایکرومکانیک مقدار ثابت‌های مستقل الاستیک تابعی از درصد حجمی و خصوصیات مکانیکی اجزای تشکیل دهنده آن (الیاف، رزین و فاز میانی) می باشد. بنابراین خصوصیات فاز میانی بر میدان تنش پسماند، تاثیرگذار می باشد.

۳- بررسی خصوصیات فاز میانی

همانطور که قبلاً اشاره گردید، وجود فاز میانی یک فرض نیست، بلکه وجود آن توسط آزمایشات متعددی اثبات شده و تحقیقات زیادی در مورد خواص این ناحیه به صورت تئوری و آزمایشی صورت گرفته است. در فرآیند ساخت کامپوزیت‌ها (حین پخت و سرد شدن تا دمای محیط)، تعامل حرارتی بین الیاف و رزین سبب تشکیل فاز میانی می گردد. خصوصیات حرارتی و مکانیکی این ناحیه متفاوت از خواص الیاف و رزین بوده اما تابع خواص این دو جزء اصلی و وابسته به شرایط پخت (راندمان یونید بین الیاف و رزین) می باشد [۱۶]. مدول یانگ، ضریب پواسون و ضریب انبساط حرارتی فاز میانی در جهت شعاعی تغییر نموده و نحوه این تغییرات به شرایط پخت و سرد شدن وابسته است. این شرایط توسط پارامتری به نام راندمان چسبندگی بین الیاف و رزین تعریف می شود (پارامتر λ در شکل شماره ۲).

پاپانیکولانو و بقیه [۱۶] با در نظر گرفتن یک کامپوزیت سه فاز و بر اساس تئوری الاستیسیته به پیش بینی خواص حرارتی و مکانیکی فاز میانی پرداختند. بر اساس نتایج این تحقیق، این خصوصیات از شعاع خارجی الیاف تا شعاع داخلی ماتریس به صورت نمایی تغییر می کند بطوریکه نحوه این تغییرات تابع راندمان پیوند بین الیاف و رزین (پارامتر λ) می باشد شکل ۲. اندیسهای i, m به الیاف و رزین اشاره می نمایند. مقدار $\lambda = 1$ بیانگر چسبندگی کامل بین الیاف و رزین است که در نتیجه فاز میانی وجود نخواهد داشت. البته چنین موضوعی واقعیت نداشته و راندمان پیوند هیچ‌گاه ۱۰۰٪ نخواهد بود و فاز میانی همواره وجود دارد. مقادیر $\lambda < 1$ مطابق با یک کامپوزیت سه فاز بوده و همانطور که در شکل ۲ ملاحظه می گردد، با کاهش راندمان پیوند ضخامت فاز میانی بیشتر شده و تغییرات خصوصیات حرارتی و مکانیکی فاز میانی ملایم‌تر می گردد. همانطور که در شکل ۳ مشاهده می شود، در سطح مشترک الیاف و فاز میانی، خواص فاز میانی با الیاف متفاوت بوده در حالی که در سطح مشترک فاز میانی و رزین این خواص یکسان هستند. بنابراین عدم چسبندگی کامل بین الیاف و رزین سبب انفصال تنش در سطح مشترک الیاف و فاز میانی خواهد گردید.



کالیبراسیون را با این روش محاسبه نمودند. برای محاسبه ضرایب کالیبراسیون در هر یک از لایه ها C_{31}, C_{21}, C_{11} بارگذاری در جهت الیاف اعمال می گردد. در این حالت زاویه $\alpha = 0$ بوده و با حل تحلیلی تنش و کرنش این ضرایب محاسبه خواهند شد. ستون اول ماتریس ضرایب به صورت زیر است [۲۱]:

$$C_{11} = \frac{1}{E_x} [(\beta_1^2 + \nu_{xy})\lambda_1 - (\beta_2^2 + \nu_{xy})\lambda_2] \quad (۲)$$

$$C_{21} = \frac{1}{E_x} [-\beta_1^2(\beta_2^2 + \nu_{xy})\lambda_3 + \beta_2^2(\beta_1^2 + \nu_{xy})\lambda_4] \quad (۳)$$

$$C_{31} = \frac{1}{2E_x} \text{Re}[\eta_1\lambda_5 - \eta_2\lambda_6] \quad (۴)$$

جایی که E_x و ν_{xy} به ترتیب مدول یانگ راستای طولی و ضریب پواسون اصلی هر یک از لایه ها بوده و با استفاده از قانون ترکیب در مایکرومکانیک قابل محاسبه است. در یک صفحه ارتوتروپیک برای حالت تنش صفحه‌ای، حداقل پنج ثابت الاستیک برای برقراری ارتباط بین تنش و کرنش مورد نیاز است. ($\nu_{yx}, \nu_{xy}, G_{xy}, E_y, E_x$) این پنج ثابت توسط رابطه زیر به یکدیگر مرتبط می گردند، که در آن β_1 و β_2 ریشه های مختلط معادله می باشند [۲۲]:

$$\beta^4/E_x + (\frac{1}{G_{xy}} - \frac{2\nu_{xy}}{E_x})\beta^2 + \frac{1}{E_y} = 0 \quad (۵)$$

بطوریکه E_y و G_{xy} مدول یانگ راستای عرضی و مدول برشی هر یک از لایه ها است و با استفاده از مایکرومکانیک قابل محاسبه است. سایر پارامترهای $\lambda_1 - \lambda_6$ و η_1 و η_2 با استفاده از روابط ارائه شده در پیوست شماره ۱ قابل محاسبه هستند. مقدار ρ در این معادلات نسبت قطر روزت به قطر سوراخ است که بر اساس استاندارد ASTM برابر با ۲٫۵ می باشد.

با اعمال تنش در جهت عمود بر الیاف ($\theta = 90$) ضرایب ستون دوم ماتریس C_{32}, C_{22}, C_{12} محاسبه می گردند [۲۱]:

$$C_{12} = \frac{1}{E_x} [-\beta_2(\beta_1^2 + \nu_{xy})\lambda_1 + \beta_1(\beta_2^2 + \nu_{xy})\lambda_2] \quad (۶)$$

$$C_{22} = \frac{1}{E_x} [\beta_1^2\beta_2(\beta_2^2 + \nu_{xy})\lambda_3 - \beta_1\beta_2^2(\beta_1^2 + \nu_{xy})\lambda_4] \quad (۷)$$

$$C_{32} = \frac{1}{2E_x} \text{Re}[-\beta_2\eta_1\lambda_5 + \beta_1\eta_2\lambda_6] \quad (۸)$$

همچنین با اعمال تنش در راستای $\alpha = 45$ و محاسبه معادلات برش صفحه ای می توان ضرایب ستون سوم را محاسبه نمود [۲۱]:

$$C_{13} = 0 \quad (۹)$$

$$C_{23} = 0 \quad (۱۰)$$

$$C_{33} = \frac{1}{2E_x} \text{Re}[i(1 + \beta_2)\eta_1\lambda_5 - i(1 + \beta_1)\eta_2\lambda_6] \quad (۱۱)$$

با اندازه گیری مقادیر $\epsilon_1, \epsilon_2, \epsilon_3$ با استفاده از آزمایش سوراخکاری مرکزی و استفاده از روابط ۱ الی ۱۱ مقادیر ضرایب کالیبراسیون و در نتیجه تنش‌های پسماند بدست می آیند؛ همانطور که ملاحظه می شود بر اساس معادله ۵ تعداد چهار ثابت مستقل هر یک از لایه ها بر مقدار ضرایب β_1 و

$$E_x = \sum_{j=1}^3 E_j V_j \quad (12)$$

$$v_{xy} = \sum_{j=1}^3 v_j V_j \quad (13)$$

$$E_y = \frac{1}{\sum_{j=1}^3 \frac{V_j}{E_j}} \quad (14)$$

$$G_{xy} = \frac{1}{\sum_{j=1}^3 \frac{V_j}{G_j}} \quad (15)$$

در معادلات فوق اندیس j به الیاف، ماتریس و فاز میانی اشاره دارد. با توجه به تغییرات خواص فاز میانی در راستای شعاعی، متوسط آنها به صورت زیر محاسبه شده و در روابط بالا منظور گردیده است:

$$(E_i)_{ave} = \frac{1}{t_i} \int_{r_f}^{r_m} E_i \cdot dr \quad (16)$$

$$(v_i)_{ave} = \frac{1}{t_i} \int_{r_f}^{r_m} v_i \cdot dr \quad (17)$$

جاییکه t_i ضخامت فاز میانی است و بر اساس راندمان پیوند تعیین می‌گردد. همچنین:

$$(G_i)_{ave} = \frac{(E_i)_{ave}}{2[1 + (v_i)_{ave}]} \quad (18)$$

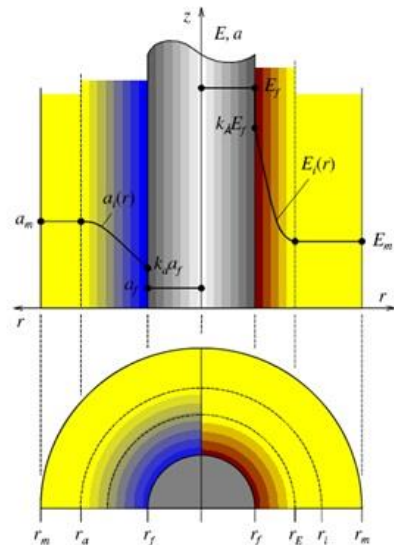
بنابراین برای هر مقدار مشخص راندمان پیوند بین الیاف و رزین در بازه صفر تا یک، یک مقدار مشخص برای ضخامت فاز میانی و تغییرات خصوصیات آن در راستای شعاعی حاصل شده که با استفاده از این معلومات می‌توان چهار ثابت الاستیک هر یک از لایه‌ها را محاسبه نمود و در ادامه به محاسبه ضرایب کالیبراسیون مربوطه، پرداخت.

۵- نتایج حاصله

همانطور که قبلاً نیز بیان شد، در روش سوراخکاری مرکزی ابتدا کرنش سنج به سطح نمونه دارای تنش پسماند چسبانده می‌شود، سپس یک سوراخ کوچک با عمق تقریباً برابر قطر سوراخ در مجاورت کرنش‌سنج‌ها ایجاد می‌گردد. این سوراخ به صورت محلی، تنش‌ها را در محیط پیرامونی آزاد نموده و کرنش‌های رها شده به وسیله سه کرنش‌سنج اندازه‌گیری می‌شوند. با داشتن مقادیر کرنش‌های رها شده و بر اساس ضرایب کالیبراسیون بدست آمده، می‌توان تنش‌های پسماند را محاسبه نمود.

در این قسمت ضرایب کالیبراسیون برای کامپوزیت‌های سه فاز با چهار جنس متفاوت و با در نظر گرفتن راندمان‌های متفاوت پیوند، محاسبه گردیده است. در ادامه، برای چندلایه‌های کامپوزیتی کربن-اپوکسی و شیشه-اپوکسی با استفاده از نتایج موجود بر اساس آزمایش سوراخکاری مرکزی به محاسبه میدان تنش پسماند به ازای مقادیر متفاوت راندمان چسبندگی بین الیاف و رزین پرداخته شده است. جدول شماره ۱ خصوصیات اجزای اصلی چهار کامپوزیت مورد نظر را بیان می‌کند.

شکل ۲ تغییر خصوصیات حرارتی و مکانیکی فاز میانی در راستای شعاعی



شکل ۳ شماتیک تغییرات مدول یانگ و ضریب انبساط حرارتی فاز میانی در راستای شعاعی

۴- پیش‌بینی ضرایب کالیبراسیون با در نظر گرفتن فاز میانی

همانطور که قبلاً اشاره شد، مقدار ضرایب کالیبراسیون در روش سوراخکاری مرکزی به خصوصیات الاستیک ماده کامپوزیتی وابسته است. این خصوصیات نیز تابعی از مشخصات هندسی و مکانیکی اجزای اصلی ماده کامپوزیتی هستند که شامل سه فاز الیاف، رزین و فاز میانی بین آنهاست. در بخش ۳ مشاهده شد، که خصوصیات فاز میانی تابع راندمان پیوند بین الیاف و رزین می‌باشد. این راندمان، تابع شرایط متفاوت فرآیند پخت و سرد کردن کامپوزیت، حین ساخت است. بنابراین، مقادیر متفاوت این راندمان که در حقیقت هر یک از مقادیر آن منجر به یک ضخامت مشخص و پروفیل تغییرات مشخصی از خصوصیات فاز میانی خواهد شد، سبب تغییر در خواص الاستیک هر یک از لایه‌های یک چندلایه شده و در نهایت سبب تغییر در ضرایب کالیبراسیون می‌گردد.

جهت محاسبه چهار ثابت الاستیک هر یک از لایه‌ها از یک چندلایه، از قوانین ترکیب بر اساس میکرومکانیک استفاده می‌شود. از آنجایی که الیاف و رزین به صورت آیزوتروپیک فرض شده و تغییرات نمایی خصوصیات فاز میانی در راستای شعاعی شبیه به یک ماده تابعی مدرج است، بر اساس روابط میکرومکانیک می‌توان خواص الاستیک هر یک از لایه‌ها را بصورت زیر محاسبه نمود:

جدول ۲ ضرایب کالیبراسیون محاسبه شده برای کامپوزیت کربن-اپوکسی به ازای

$C_{ij} \left[\frac{1}{Gpa} \right]$	راندمان‌های متفاوت پیوند				درصد ماکزیمم تغییرات
	$\lambda = 1$	$\lambda = 0.8$	$\lambda = 0.6$	$\lambda = 0.3$	
$t_i (\mu m)$	۰	۰/۰۷	۰/۲۱	۰/۵۶	-
C_{11}	-۰/۰۰۵۱۰	-۰/۰۰۴۸۹	-۰/۰۰۴۸۱	-۰/۰۰۴۵۲	-۱۱/۴۲
C_{21}	۰/۰۱۰۱۹	۰/۰۰۸۱۴	۰/۰۰۸۰۷	۰/۰۰۷۸۱	۲۳/۳۷
C_{31}	۰/۰۰۳۴۹	۰/۰۰۲۴۳	۰/۰۰۲۴۲	۰/۰۰۲۴۰	۳۱/۲۸
C_{12}	۰/۰۰۳۹۸	۰/۰۰۳۶۸	۰/۰۰۳۶۳	۰/۰۰۳۴۲	-۱۴/۰۱
C_{22}	-۰/۱۲۲۷۷	-۰/۰۸۲۹۶	-۰/۰۸۲۹۱	-۰/۰۸۲۷۱	-۳۲/۶۳
C_{32}	-۰/۰۵۹۹۳	-۰/۰۳۹۳۰	-۰/۰۳۹۳۰	-۰/۰۳۹۲۹	-۳۴/۴۴
C_{33}	-۰/۰۸۱۶۳	-۰/۰۵۷۸۵	-۰/۰۵۷۶۸	-۰/۰۵۷۰۳	-۳۰/۱۳

جدول ۳ ضرایب کالیبراسیون محاسبه شده برای کامپوزیت بوران-اپوکسی به ازای

$C_{ij} \left[\frac{1}{Gpa} \right]$	راندمان‌های متفاوت پیوند				درصد ماکزیمم تغییرات
	$\lambda = 1$	$\lambda = 0.8$	$\lambda = 0.6$	$\lambda = 0.3$	
$t_i (\mu m)$	۰	۱	۳	۵	-
C_{11}	-۰/۰۰۴۴۳	-۰/۰۰۴۳۵	-۰/۰۰۴۱۸	-۰/۰۰۴۰۳	-۱۴/۲۵
C_{21}	۰/۰۰۷۴۵	۰/۰۰۷۴۳	۰/۰۰۷۲۸	۰/۰۰۷۱۳	-۷/۱۵
C_{31}	۰/۰۰۲۲۹	۰/۰۰۲۳۴	۰/۰۰۲۳۲	۰/۰۰۲۳۰	۱/۸۷
C_{12}	۰/۰۰۳۴۶	۰/۰۰۳۴۴	۰/۰۰۳۳۲	۰/۰۰۳۱۹	-۱۲/۹
C_{22}	-۰/۰۷۴۴۵	-۰/۰۷۵۰۴	-۰/۰۷۴۹۱	-۰/۰۷۴۷۸	۰/۸
C_{32}	-۰/۰۳۵۸۸	-۰/۰۳۶۴۱	-۰/۰۳۶۴۰	-۰/۰۳۶۳۸	۱/۴۸
C_{33}	-۰/۰۵۲۱۴	-۰/۰۵۲۳۹	-۰/۰۵۲۰۰	-۰/۰۵۱۶۲	۱/۴۸

جدول ۴ ضرایب کالیبراسیون محاسبه شده برای کامپوزیت شیشه-اپوکسی به ازای

$C_{ij} \left[\frac{1}{Gpa} \right]$	راندمان‌های متفاوت پیوند				درصد ماکزیمم تغییرات
	$\lambda = 1$	$\lambda = 0.8$	$\lambda = 0.6$	$\lambda = 0.3$	
$t_i (\mu m)$	۰	۰/۱۶	۰/۴۸	۰/۸	-
C_{11}	۰/۰۲۰۲۸	۰/۰۲۰۳۶	۰/۰۱۹۴۸	۰/۰۱۸۶۴	-۱۶/۱۲
C_{21}	۰/۰۱۹۶۶	۰/۰۱۹۴۰	۰/۰۱۸۹۱	۰/۰۱۸۴۳	-۹/۶۶
C_{31}	۰/۰۰۱۸۰	۰/۰۰۱۸۶	۰/۰۰۱۹۸	۰/۰۰۲۰۹	۲۳/۹۷
C_{12}	۰/۰۱۳۵۴	۰/۰۱۳۲۵	۰/۰۱۲۶۹	۰/۰۱۲۱۶	-۱۵/۶۵
C_{22}	۱/۱۸۱۲	۱/۱۷۹۳	۱/۱۷۵۹	۱/۱۷۲۶	-۱/۱۲
C_{32}	۰/۰۴۷۹۷	۰/۰۴۸۰۳	۰/۰۴۸۱۴	۰/۰۴۸۲۴	-۰/۸۴
C_{33}	۰/۰۹۹۹۶	۰/۰۹۹۳۷	۰/۰۹۸۲۳	۰/۰۹۷۱۲	-۴/۴۴

همانطور که جدول ۵ نشان می‌دهد، برای کامپوزیت کولار-اپوکسی به جز ضرایب C_{11}, C_{32} تمامی ضرایب کالیبراسیون در $\lambda = 0.8$ بیشینه هستند. ضریب C_{11} در شرایط چسبندگی کامل دارای بیشترین مقدار خود است در حالیکه ضریب C_{32} به ازای بیشترین ضخامت فاز میانی (در کمترین راندمان پیوند) ماکزیمم می‌گردد. توجه به این نکته حائز اهمیت است که ضریب C_{31} با تغییر $\lambda = 1$ به $\lambda = 0.8$ به صورت چشم‌گیری (حدود ۵۰٪) افزایش می‌یابد.

جدول ۱ خصوصیات الاستیک و فیزیکی کامپوزیت‌های مورد مطالعه

ماده	کربن اپوکسی	بوران اپوکسی	شیشه اپوکسی	آرامید اپوکسی
قطر فایبر (μm)	۷	۱۰۰	۱۶	۱۲
مدول فایبر (Gpa)	۲۳۰	۴۱۰	۷۲	۱۲۰
مدول ماتریس (Gpa)	۶٫۷	۶٫۷	۵٫۲	۴٫۰
ضریب پواسون فایبر	۰٫۲۵	۰٫۰۵	۰٫۱۷	۰٫۳۲
ضریب پواسون ماتریس	۰٫۳۵	۰٫۳۵	۰٫۳۵	۰٫۳۵
کسر حجمی ماتریس	۵۰٪	۴۰٪	۵۰٪	۴۵٪

با استفاده از روابط میکرومکانیکی ۱۲-۱۵ چهار ثابت الاستیک مربوط به هر یک از لایه‌ها محاسبه می‌گردد. جدول ۲-۵ نتایج حاصله مربوط به ضرایب کالیبراسیون را برای هر یک از کامپوزیت‌های مورد نظر نشان می‌دهند. راندمان‌های پیوند با مقادیر ۱، ۰٫۸، ۰٫۶ و ۰٫۳ به عنوان نمونه مفروضند. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد، راندمان چسبندگی برابر با ۱ بیانگر یک کامپوزیت دو فاز بوده و فاز میانی وجود ندارد. در هر یک از راندمان‌های فرض شده خصوصیات الاستیک و ضخامت فاز میانی با استفاده از شکل شماره ۲ استخراج گردیده است. جهت محاسبه ضرایب کالیبراسیون، یک برنامه کامپیوتری با استفاده از نرم افزار میپل نوشته شده است [۲۳]. همانطور که در جدول شماره ۲ مشاهده می‌شود، برای کامپوزیت کربن-اپوکسی با افزایش ضخامت فاز میانی (کاهش راندمان پیوند) مقدار ضرایب کالیبراسیون به صورت قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر فاصله گرفتن از شرایط چسبندگی کامل منجر به کاهش ضرایب می‌گردد. ضرایب C_{11}, C_{12} کمترین تغییر را نسبت به ضخامت فاز میانی دارند، حال آنکه سایر ضرایب حدود ۳۰٪ تغییرات از خود نشان می‌دهند.

جدول ۳ ضرایب نرمی حاصله را برای کامپوزیت بوران-اپوکسی نشان می‌دهد. ضرایب C_{11}, C_{21}, C_{12} با افزایش ضخامت فاز میانی کاهش یافته و نسبت به شرایط پیوند حساس هستند، در حالی که سایر ضرایب، تغییر قابل ملاحظه‌ای ندارند.

ضرایب کالیبراسیون مربوط به کامپوزیت شیشه-اپوکسی در جدول ۴ ارائه گردیده است. همانطور که ملاحظه می‌شود، با افزایش ضخامت فاز میانی، ضرایب C_{11}, C_{12} به شکل قابل ملاحظه‌ای کاهش یافته اما ضرایب C_{21}, C_{33} حساسیت بسیار پایینی نسبت به خصوصیات فاز میانی دارند. ضرایب C_{22}, C_{32} تقریباً بدون تغییر باقی مانده و می‌توان گفت مستقل از شرایط پیوند هستند. یک افزایش قابل ملاحظه در ضریب C_{31} به میزان ۲۳٫۹۷٪ مشاهده می‌شود.

پسماند موجود در یک سازه کامپوزیتی، غیر 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 پسماند در عمق یک سازه کامپوزیتی از نتایج بدیهی آن به شمار می‌رود. حالت دوم آن است که هر لایه بصورت جداگانه مدلسازی 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 [۱۴]. در نتیجه در این تحقیق با استفاده از تئوری کلاسیک لایه ای و استفاده از نتایج مرحله قبل برای هر یک از لایه ها، یک ماتریس ضرایب کالیبراسیون (ماتریس نرمی معادل برای چندلایه) بدست آمده است. جهت محاسبه این ماتریس معادل، یک برنامه کامپیوتری با استفاده از نرم افزار میپیل نوشته شده است [۲۳]. به عنوان مثال، برای این کامپوزیت در شرایط چسبندگی کامل (عدم وجود فاز میانی، کامپوزیت دو فاز) ماتریس ضرایب به فرم زیر است:

$$C = \begin{bmatrix} 0.5014 & -0.0239 & 0.0870 \\ -0.2768 & -1.5373 & -0.3644 \\ 0.1021 & -0.0449 & -0.7206 \end{bmatrix} \quad (19)$$

ماتریس ضرایب فوق با تقسیم بر حاصل ضرب مدول یانگ چندلایه در دو راستا به صورت بی بعد ارائه گردیده است. کاهش دما از شرایط پخت به دمای محیط، برابر با 80°C در نظر گرفته شده است.

برای چندلایه کربن-اپوکسی با چیدمان $[90^{\circ}/0^{\circ}]_n$ با انجام آزمایش سوراخکاری مرکزی، کرنش‌های رها شده به صورت زیر است [۱۴]:

$$[\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3] = [249.3, -240.3, -566] \mu\text{E} \quad (20)$$

در نتیجه با استفاده از ماتریس ضرایب، تنش پسماند حرارتی ناشی از پخت در سطح چند لایه را می‌توان پیش بینی نمود:

$$[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3] = [-18.14, 2.53, 35.4] \text{MPa} \quad (21)$$

به همین ترتیب با تکرار شبیه سازی برای چندلایه در مقادیر مختلف راندمان پیوند (ضخامت‌های متفاوت فاز میانی) می‌توان برای کامپوزیت کربن-اپوکسی سه فاز با شرایط متنوع پیوند بین الیاف و رزین، ماتریس ضرایب را محاسبه نموده و میدان تنش پسماند را محاسبه نمود. جدول ۷ میزان تغییرات تنش پسماند را به ازای تغییرات ضخامت فاز میانی نشان می‌دهد. همانطور که ملاحظه می‌شود، زمانی که کامپوزیت از شرایط چسبندگی کامل (کامپوزیت دو فاز با راندمان پیوند $\lambda = 1$ به سمت یک ماده سه فاز با راندمان چسبندگی پایین در نظر گرفته می‌شود، میدان تنش پسماند، حدود 30% کاهش نشان می‌دهد. مساله جالب دیگر اینکه، قسمت اعظم این کاهش (حدود 20% آن) به صورت ناگهانی از $\lambda = 1$ به $\lambda = 0.8$ اتفاق می‌افتد. بنابراین، باید در نظر گرفت که حتی مقدار کوچک ضخامت فاز میانی که نزدیک به یک کامپوزیت دو فاز است، میدان تنش پسماند را به صورت قابل ملاحظه ای تغییر می‌دهد.

جدول ۵ ضرایب کالیبراسیون محاسبه شده برای کامپوزیت کولار-اپوکسی به ازای راندمانهای متفاوت پیوند

درصد ماکزیمم تغییرات	$\lambda = 1$	$\lambda = 0.8$	$\lambda = 0.6$	$\lambda = 0.3$	
$C_{ij} \left[\frac{1}{Gpa} \right]$					t_i (mm)
	۰	۰/۱۲	۰/۳۶	۰/۶	-
C_{11}	/۰۱۱۰۹	/۰۱۱۰۱	/۰۱۰۷۳	/۰۱۰۴۵	-۹/۳۸
C_{21}	/۰۱۲۹۰	/۰۱۳۲۶	/۰۱۳۰۷	/۰۱۲۸۸	۲/۸۱
C_{31}	/۰۰۲۴۴	/۰۰۳۶۸	/۰۰۲۶۱	/۰۰۲۷۱	۵۰/۳۵
C_{12}	/۰۰۸۳۰	/۰۰۸۳۸	/۰۰۸۱۷	/۰۰۷۹۶	۰/۹۳
C_{22}	/۰۸۷۳۴	/۰۹۲۰۱	/۰۹۱۸۵	/۰۹۱۶۹	۵/۳۵
C_{32}	/۰۳۹۵۹	/۰۴۲۴۴	/۰۴۲۴۷	/۰۴۲۴۹	-۷/۴۰
C_{33}	/۰۶۹۸۲	/۰۷۲۸۰	/۰۷۲۳۳	/۰۷۱۸۶	۴/۲۷

جدول ۶، نتایج حاصله را برای چهار کامپوزیت مورد مطالعه جمع بندی می‌نماید. درصد تغییرات ضرایب کالیبراسیون بیانگر میزان حساسیت هر یک از آنها به ضخامت فاز میانی و شرایط چسبندگی بین الیاف و رزین است. در کامپوزیت کربن-اپوکسی این حساسیت بالا بوده و تمامی ضرایب به صورت قابل ملاحظه ای تغییر می‌نمایند (همگی بیش از 10% و حتی تا حدود 35% تغییرات دارند)؛ در حالیکه برای سایر کامپوزیت‌های مورد مطالعه، برخی از این ضرایب تقریباً بدون تغییر باقی می‌مانند. این موضوع به دلیل طبیعت و فیزیک خاص الیاف کربن که به صورت عرضی آیزوتروپیک هستند، اتفاق می‌افتد.

جدول ۶ میزان حساسیت ضرایب کالیبراسیون برای کامپوزیت‌های مورد مطالعه به شرایط چسبندگی

آرامید / اپوکسی	شیشه / اپوکسی	بوران / اپوکسی	کربن / اپوکسی	اجزای اصلی کامپوزیت
</10	>/10	>/10	>/10	C_{11}
</3	</10	</10	>/20	C_{21}
>/50	>/20	</2	>/30	C_{31}
</1	>/10	>/10	>/10	C_{12}
</10	</2	</1	>/30	C_{22}
</10	</1	</2	>/30	C_{32}
<5%	<5%	<1%	>30%	C_{33}

۵-۱- تعیین تنش‌های پسماند در کامپوزیت‌های چند لایه

جهت شبیه سازی فرآیند سوراخکاری مرکزی در چند لایه های کامپوزیتی، دو حالت را می‌توان در نظر گرفت. حالت اول آن است که ثابت‌های موثر مهندسی هر چیدمان با استفاده از تئوری کلاسیک لایه ای (CLT) محاسبه گردند. با استفاده از این ثابت‌ها مدلسازی صورت پذیرد و ماتریس ضرایب، توسط روش شبیه سازی استخراج و تنش‌های پسماند حرارتی محاسبه شوند. اما اشکال اساسی این روش آن است که تنش‌های پسماند موجود در قطعه، یکنواخت فرض می‌شوند درحالی‌که در عمل این‌گونه نیست. واقعیت آن است که تنش‌های

کالیبراسیون چندلایه و در نتیجه میدان تنش پسماند تغییر خواهد نمود. اگر به چندلایه فوق تعداد شش لایه با زاویه 45° اضافه شود (سه لایه در بالا و سه لایه در پایین) و آزمایش سوراخکاری مرکزی تکرار گردد، برای چندلایه شیشه-اپوکسی متقارن با چیدمان $[0/\pm 45/90]_S$ کرنش‌های رها شده در آزمایش سوراخکاری مرکزی به صورت زیر است [۱۴]:

$$[\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3] = [390, 363, 851] \mu\epsilon \quad (25)$$

همچنین، به دلیل تغییر لایه چینی و تعداد لایه ها، برای کامپوزیت دو فاز ماتریس ضرایب کالیبراسیون معادل به صورت زیر تغییر می یابد:

$$C = \begin{bmatrix} -0.3594 & -0.0122 & 0.1126 \\ -0.1226 & -0.4344 & -0.0902 \\ -0.1051 & -0.0099 & -0.2832 \end{bmatrix} \quad (26)$$

در نتیجه میدان تنش پسماند در این چند لایه به صورت زیر خواهد بود:

$$[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3] = [-30, 2.7, -38.5] MPa \quad (27)$$

جدول ۹ میزان تغییرات تنش پسماند را در شرایط مختلف چسبندگی بین الیاف شیشه و رزین اپوکسی را برای چندلایه با چیدمان $[0/\pm 45/90]_S$ نشان می دهد. مشابه چندلایه قبلی، برای راندمان‌های پیوند پایین نسبت به شرایط چسبندگی کامل، مقدار تنش پسماند حدود ۱۱٪ کاهش نشان می دهد. مشابه چندلایه های کربن-اپوکسی در اینجا نیز مشاهده می شود که قسمت عمده کاهش (بیش از ۶٪ آن) به صورت ناگهانی از $\lambda = 1$ به $\lambda = 0.8$ اتفاق می افتد.

جدول ۹ تغییرات میدان تنش پسماند به ازای ضخامت‌های متفاوت فاز میانی برای چندلایه شیشه-اپوکسی با چیدمان $[0/\pm 45/90]_S$

$C_{ij} \left[\frac{1}{Gpa} \right]$	$\lambda = 1$	$\lambda = 0.8$	$\lambda = 0.6$	$\lambda = 0.3$	درصد
	ماکزیمم تغییرات				
$t_i (\mu m)$	0	0/16	0/48	1/28	-
$\sigma_1 (MPa)$	-30	-27/87	-27/46	-26/93	10/23
$\sigma_2 (MPa)$	2/7	2/53	2/43	2/39	11/48
$\sigma_3 (MPa)$	-38/5	-35/95	-34/81	-34/13	11/35

۶- جمع بندی و نتیجه گیری

در این مقاله، میدان تنش پسماند حرارتی یک کامپوزیت چندلایه با در نظر گرفتن اثرات چسبندگی بین الیاف و رزین، به صورت دقیق تر برآورد شد. ابتدا با در نظر گرفتن یک کامپوزیت سه فاز و اعمال خصوصیات الاستیک فاز میانی و با استفاده از مایکرومکانیک، ثابت‌های مهندسی یک تک لایه ارتوتروپ حاصل گردید. در ادامه با استفاده از حل تحلیلی موجود، ضرایب کالیبراسیون روش سوراخکاری مرکزی مربوط به لایه تک جهت برای چهار جنس مختلف با در نظر گرفتن شرایط متنوع راندمان چسبندگی محاسبه گردید. با استفاده از تئوری کلاسیک لایه ای و همچنین استفاده از نتایج مراحل قبلی، یک کد کامپیوتری جهت محاسبه ماتریس ضرایب کالیبراسیون معادل برای چندلایه

در ادامه، با افزایش ضخامت فاز میانی، میدان تنش پسماند با سرعت کمتری کاهش می یابد.

جدول ۷ تغییرات میدان تنش پسماند به ازای ضخامت‌های متفاوت فاز میانی برای چندلایه کربن-اپوکسی با چیدمان $[90/0/90]$

$C_{ij} \left[\frac{1}{Gpa} \right]$	$\lambda = 1$	$\lambda = 0.8$	$\lambda = 0.6$	$\lambda = 0.3$	درصد
	ماکزیمم تغییرات				
$t_i (\mu m)$	0	0/7	0/21	0/56	-
$\sigma_1 (MPa)$	18/14	-14/68	-13/54	-12/85	29/16
$\sigma_2 (MPa)$	2/53	2/01	1/88	1/79	29/24
$\sigma_3 (MPa)$	35/4	28/19	26/31	25/43	28/16

برای چندلایه شیشه-اپوکسی متقارن با چیدمان $[0/\pm 45/90]_S$ کرنش‌های رها شده در آزمایش سوراخکاری مرکزی به صورت زیر است [۱۴]:

$$[\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3] = [325.3, 224.3, 717.6] \mu\epsilon \quad (22)$$

با تکرار روال فوق، می توان ماتریس ضرایب را محاسبه نمود. برای کامپوزیت دو فاز این ضرایب به صورت زیر است:

$$C = \begin{bmatrix} -0.3428 & 0.0118 & 0.1049 \\ -0.1176 & -0.4007 & -0.0903 \\ -0.0974 & -0.0091 & -0.2769 \end{bmatrix} \quad (23)$$

در نتیجه میدان تنش پسماند در این چند لایه به صورت زیر است:

$$[\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3] = [-27.47, 6.34, -35.36] MPa \quad (24)$$

جدول ۸ میزان تغییرات تنش پسماند را در شرایط مختلف چسبندگی بین الیاف شیشه و رزین اپوکسی را برای چندلایه با چیدمان $[0/\pm 45/90]_S$ نشان می دهد. برای راندمان‌های پیوند پایین نسبت به شرایط چسبندگی کامل، مقدار تنش پسماند حدود ۱۱٪ کاهش نشان می دهد. مشابه چندلایه های کربن-اپوکسی در اینجا نیز مشاهده می شود که قسمت عمده کاهش (حدود ۷٪ آن) به صورت ناگهانی از $\lambda = 1$ به $\lambda = 0.8$ حادث می شود.

جدول ۸ تغییرات میدان تنش پسماند به ازای ضخامت‌های متفاوت فاز میانی برای چندلایه شیشه-اپوکسی با چیدمان $[0/\pm 45/90]_S$

$C_{ij} \left[\frac{1}{Gpa} \right]$	$\lambda = 1$	$\lambda = 0.8$	$\lambda = 0.6$	$\lambda = 0.3$	درصد
	ماکزیمم تغییرات				
$t_i (\mu m)$	0	0/16	0/48	1/28	-
$\sigma_1 (MPa)$	-27/47	-25/96	-25/17	-24/53	10/71
$\sigma_2 (MPa)$	6/34	5/94	5/75	5/59	11/82
$\sigma_3 (MPa)$	-25/36	-23/09	-22/21	-21/53	10/83

آنچه که مسلم است، با تغییر تعداد لایه ها، ترتیب قرارگیری آنها و سایر مشخصات هندسی، کرنش‌های اندازه گیری شده و ماتریس ضرایب

- ϵ کرنش
- σ تنش (MPa)
- ν ضریب پواسون
- θ زاویه اندازه گیری ($^\circ$)
- λ راندمان چسبندگی (راندمان پیوند)
- α ضریب انبساط حرارتی ($1/^\circ C$)
- ρ نسبت قطر روزت به قطر سوراخ

۸- مراجع

- [1] Safarabadi, M.: Analytical Solution for Determination of Curing Residual Stresses in Composite Laminates. PhD Thesis, Iran University of Science and Technology, Iran, 2011.
- [2] Trende, A., Astrom, B.T. and Nilsson, G.: Modeling of Residual Stresses in Compression Molded Glass-mat Reinforced Thermoplastics. Composites, Part A, vol. 31, 2000, pp. 1241-1254.
- [3] Shokrieh, M.M. and Safarabadi, M.: Residual Stresses in Composite Materials, Chapter 8: Understanding residual stresses in polymer matrix composites. First ed, Woodhead Publisher, London, pp.197-232, 2014.
- [4] Determining Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain-Gage Method, ASTM International Standard, E837, 2004.
- [5] Prasad, C.B., Prabhakaran, R. and Tompkins, S.: Determination of Calibration Constants for the Hole-Drilling Residual Stress Measurement Technique Applied to Orthotropic Composites, Part H: Experimental Evaluations. Composite Structures, vol.8, 1987, pp. 165-172.
- [6] Lake, B.R., Appl, F.J. and Bert, C.W.: An Investigation of the Hole-Drilling Technique for Measuring Planar Residual Stress in Rectangular Orthotropic Materials. Experimental Mechanics, vol.10, 1970, pp. 233-239.
- [7] Rendler, N.J. and Vigness, I." "Hole-Drilling Strain Gauge Method of Measuring Residual Stresses. Experimental Mechanics, vol.6, no.12, 1966, pp. 577-586.
- [8] Ghasemi, A.R.: Determination of Residual Stresses in Laminated Composites. PhD Thesis, Iran University of science and technology, Iran, 2007.
- [9] Bert, C.W. and Thompson, G.L.: A Method for Measuring Planar Residual Stresses in Rectangular Orthotropic Materials. Composite Materials, vol.2, no.2, 1968, pp. 244-253.
- [10] Schajer, G.S. and Yang, L.: Residual-Stress Measurement in Orthotropic Materials Using the Hole-Drilling Method. Experimental Mechanics, 1994, pp. 324-333.
- [11] Sicot, O., Gong, X.L., Cherouat A. and Lu, J.: Determination of Residual Stress in Composite Laminates Using the Incremental Hole-Drilling Method. Composite Materials, 2003, pp. 831-843.
- [12] Sicot, O., Gong, X.L., Cherouat A. and Lu, J.: Influence of Experimental Parameters on Determination of Residual Stress Using the Incremental Hole-Drilling Method. Composite Science and Technology, 2004, pp. 171-180.
- [13] Shokrieh, M.M. and Kamali, M.: Theoretical and Experimental Studies on Residual Stresses in Laminated Polymer Composites. Composite Materials, vol.41, no. 4, 2007, pp. 435-452.
- [14] Shokrieh, M.M. and Ghasemi, A.R.: Simulation of Central Hole-Drilling Process for Measurement of Residual Stresses in Isotropic, Orthotropic

تعمیم داده شد. در نهایت، با بکارگیری نتایج تجربی موجود مربوط به کرنش-های رها شده در آزمایش سوراخکاری مرکزی برای چندلایه های کربن-اپوکسی و شیشه-اپوکسی، میدان تنش پسماند مربوط به هر یک از این چندلایه ها با لحاظ نمودن اثرات فاز میانی بدست آمد. همانطور که در نتایج ملاحظه گردید، تمامی ضرایب کالیبراسیون مربوط به لایه تک جهت کربن-اپوکسی نسبت به خصوصیات فاز میانی به شدت حساس هستند، در حالیکه در سایر کامپوزیت‌ها با جنس الیاف شیشه، بوران و کولار برخی از این ضرایب هیچ‌گونه حساسیتی نسبت به شرایط پخت ندارند. نتایج حاصله بیانگر نقش تاثیرگذار راندمان پیوند (خصوصیات فاز میانی) بر میدان تنش پسماند است. در چندلایه های کربن-اپوکسی، بسته به شرایط متفاوت چسبندگی بین الیاف و رزین، تنش پسماند به میزان تقریبی ۳۰٪ تغییر می کند، در حالیکه در چندلایه های شیشه-اپوکسی، این تغییرات حدود ۱۱٪ است. قسمت عمده این تغییرات زمانی اتفاق می افتد که کامپوزیت مورد مطالعه به جای یک ماده دو فاز، به صورت سه فاز (حتی با ضخامت بسیار پایین فاز میانی) در نظر گرفته می شود. با اضافه شدن ضخامت فاز میانی، سرعت این تغییرات به شدت کاهش می یابد. از آنجایی که وجود فاز میانی توسط روش‌های تجربی متعددی به اثبات رسیده است، بنابراین با توجه به نتایج این تحقیق، بایستی به منظور برآورد صحیح تر میدان تنش پسماند در چندلایه های پلیمری، ضرایب کالیبراسیون را برای یک کامپوزیت سه فاز در نظر گرفت. در غیر این صورت در تبدیل کرنش‌های رها شده حاصل از آزمایش به تنش پسماند، خطای قابل ملاحظه ای بوجود خواهد آمد. علاوه بر این، میزان دقت تنش‌های پسماند بدست آمده در آزمایش سوراخکاری مرکزی بستگی به پیش بینی صحیح ضخامت و خواص الاستیک فاز میانی دارد. بنابراین به منظور برآورد بسیار دقیق تنش‌های پسماند، بایستی با استفاده از آزمایش، ضخامت دقیق فاز میانی را پیدا نمود. اما با توجه به نتایج این تحقیق، از آنجایی که میدان تنش پسماند نسبت به تغییر ضخامت فاز میانی، حساسیت پایینی دارد و بیشتر خطاها زمانی حاصل می شود که کامپوزیت به صورت دو فاز در نظر گرفته می‌شود (که در واقعیت با توجه به اثبات تجربی وجود فاز میانی، کامپوزیت دو فاز مدل مناسبی نیست)، میدان تنش پسماند حاصله حتی با در نظر گرفتن ضخامت تقریبی فاز میانی، از دقت مناسبی برخوردار خواهد بود.

۷- فهرست علائم

- a شعاع سوراخ (mm)
- R شعاع روزت (mm)
- C ضریب کالیبراسیون ($1/GPa$)
- E مدول الاستیسیته (MPa)
- G مدول الاستیسیته (MPa)
- V درصد حجمی
- t ضخامت (μm)
- r فاصله شعاعی (μm)
- f الیاف
- m ماتریس (رزین)
- i فاز میانی

$$\eta_2 = (\beta_2^2 + \nu_{xy} - \beta_2^2 \nu_{xy} - \beta_1^2 \beta_2^2 + i\beta_2(\beta_1^2 + \beta_2^2 - 2\nu_{xy}))$$

and Laminated Composite Plates. Composite Materials, vol.41, no.19, 2007, pp. 2293-2311.

- [15] Shokrieh, M.M. and Safarabadi, M.: Effects of Imperfect Adhesion on Thermal Micro-Residual Stresses in Polymer Matrix Composites. Adhesion & Adhesives, vol.31, 2011, pp. 490-497.
- [16] Papanicolaou, G.C., Michalopoulou, M.V. and Anifantis, N.K.: Thermal Stresses in Fibrous Composites Incorporating Hybrid Interphase Regions. Composites Science & Technology, vol.62, 2002, pp. 1881-1894.
- [17] Pompe, G. and Ma'eder, E.: Experimental Detection of a Transcrystalline Interphase in Glass-Fibre/Polypropylene Composites. Composites Science & Technology, vol.60, 2000, pp. 2159-2167.
- [18] Fisher, F.T. and Brinson, L.C.: Viscoelastic Interphases in Polymer Matrix Composites: Theoretical Models and Finite Element Analysis. Composites Science & Technology, vol.6, 2001, pp. 731-748.
- [19] Kim, J.K., Sham, M.L. and Wu, J.: Nanoscale Characterization of Interphase in Silane Treated Glass Fibre Composites. Composites, Part A, vol.32, 2001, pp. 607-618.
- [20] Matzenmiller, A. and Gerlach, S.: Parameter Identification of Elastic Interphase Properties in Fiber Composites. Composites, Part B, vol.37, 2006, pp. 117-126.
- [21] Shokrieh, M.M. and Ghasemi, A.R.: Determination of Calibration Factors of the Hole-Drilling Method for Orthotropic Composites Using an Exact Solution. Composite Materials, vol.41, 2007, pp. 2293-2311.
- [22] Savin, G.N.: Stress Concentration around Holes, (International Series of Monographs in Aeronautics and Astronautics. Division 1, Solid and Structural Mechanics), 1961, Pergamum Press, Oxford.
- [23] Maple 12, Copyright 1981-2008 by Waterloo Maple Inc.

پیوست شماره ۱:

روابط تکمیلی برای محاسبه ضرایب کالیبراسیون لایه ارتوتروپ [۲۱]:

$$\lambda_1 = \frac{1}{(\beta_1 - \beta_2)(1 - \beta_1)} \left(1 - \frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 - 1 + \beta_1^2}}\right)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{(\beta_1 - \beta_2)(1 - \beta_2)} \left(1 - \frac{\rho}{\sqrt{\rho^2 - 1 + \beta_2^2}}\right)$$

$$\lambda_3 = \frac{1}{(\beta_1 - \beta_2)(1 - \beta_1)} \left(1 - \frac{\rho\beta_1}{\sqrt{\rho^2\beta_1^2 - \beta_1^2 + 1}}\right)$$

$$\lambda_4 = \frac{1}{(\beta_1 - \beta_2)(1 - \beta_2)} \left(1 - \frac{\rho\beta_2}{\sqrt{\rho^2\beta_2^2 - \beta_2^2 + 1}}\right)$$

$$\lambda_5 = \frac{1}{(\beta_1 - \beta_2)(1 - \beta_1)} \left(1 - \frac{\rho(1 + i\beta_1)}{\sqrt{(\rho^2 - 2)(1 - \beta_1^2) + 2i\beta_1\rho^2}}\right)$$

$$\lambda_6 = \frac{1}{(\beta_1 - \beta_2)(1 - \beta_1)} \left(1 - \frac{\rho(1 + i\beta_2)}{\sqrt{(\rho^2 - 2)(1 - \beta_2^2) + 2i\beta_2\rho^2}}\right)$$

$$\eta_1 = (\beta_1^2 + \nu_{xy} - \beta_1^2 \nu_{xy} - \beta_1^2 \beta_2^2 + i\beta_1(\beta_1^2 + \beta_2^2 - 2\nu_{xy}))$$