مجله علوم و تکنولوژی پلیمر ، سال هجدهم،
شماره ۵، صفحه ۳۳۰-۳۲۵، ۱۳۸۴
ISSN : 1016-3255

تنشهای باقیمانده در کامپوزیتهای پلیمری با الیاف پیوسته

Residual Stresses in Polymer Composites with Continuous Fibers

سیامک مطهری*
تهران، دانشگاه تهران، پردیس یک، دانشکده فنی، گروه مهندسی شیمی، صندوق پستی ۱۱۳۶۵/۴۵۶۳

دریافت: ۸۴/۲/۱۳، پذیرش: ۸۴/۴/۲۶

چکیده

در این پژوهش، روشی جدید برای اندازه‌گیری تنشهای باقیمانده در کامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با الیاف پیوسته ارائه شده است. تنشهای داخلی در کامپوزیت هنگامی شکل می‌گیرند که نمونه از دمای پخت تا دمای محیط سرد شود. به دلیل وجود اختلاف در ضرایب انقباض گرمایی الیاف و زمینه، تنشهای برشی در سطح مشترک بین دو فاز تشکیل می‌شوند. وجود این تنشها باعث کاهش کارایی کامپوزیت هنگام مصرف می‌شود. با استفاده از روشی که در این پژوهش ارائه شده است، افزون بر این که می‌توان از ایجاد تنشهای باقیمانده در کامپوزیت جلوگیری کرد، می‌توان مقدار تنشهای باقیمانده در کامپوزیت را نیز اندازه گرفت. این روش بر اساس اعمال نیروی کششی بر الیاف هنگام پخت رزین پلیمری است. اعمال کشش بر الیاف باعث ایجاد کرنش در آنها شده، بدین ترتیب می‌توان اختلاف طولی را که بین زمینه و الیاف در اثر انقباض گرمایی هنگام سرد شدن از دمای پخت تا دمای محیط بوجود می‌آید، جبران کرد.

واژه‌های کلیدی

الیاف شیشه ، رزین اپوکسی، تنشهای باقیمانده، کامپوزیت، سطح مشترک

مقدمه

وجود تنشهای باقیمانده داخلی در کامپوزیتهای پلیمری امری اجتناب‌ناپذیر است. معمولاً اکثر کامپوزیتها در دمای بالاتر از دمای محیط پخت شده، سپس تا دمای محیط سرد می‌شوند. وقتی دمای نمونه کامپوزیتی از دمای پخت به دمای محیط کاهش می‌یابد، تنشهای داخلی در کامپوزیت تشکیل می‌شوند. این امر به دلیل تفاوت ضرایب انبساط و انقباض گرمایی اجزای تشکیل دهنده کامپوزیت است. گرچه در مورد کامپوزیتهای پلیمری دمای پخت چندان زیاد نیست (در حدود ۱۰۰ تا ۲۰۰°C)، ولی معمولاً تفاوت عمده‌ای بین ضرایب انبساط

Key Words

fiber glass, epoxy resin, residual stress, composite, interface

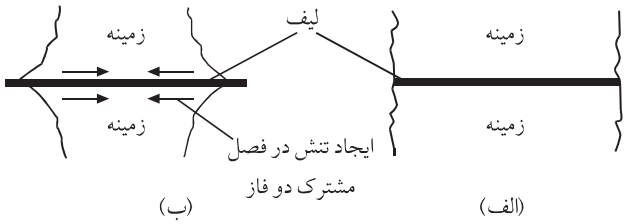
* مسئول مکاتبات، پیام‌نگار : smotahari@yahoo.com

گرمایی پلیمر و الیاف وجود دارد. به عنوان مثال ضریب انبساط گرمایی الیاف شیشه در حدود $^{\circ}C^{-6}10\times5$است، در حالی که برای اپوکسی پخت شده این مقدار تا $^{\circ}C^{-6}10\times50$ نیز افزایش می‌یابد، یعنی تقریباً حدود ۱۰ برابر بیشتر از الیاف شیشه است. معمولاً دمای پخت، دمای بدون تنش (stress free) در نظر گرفته می‌شود. این موضوع به دلیل روان بودن رزین است و تنشها قبل از سخت شدن پلیمرنمی‌توانند شکل بگیرند. بعد از سخت شدن پلیمر و ایجاد پیوندهای فیزیکی و شیمیایی بین پلیمر و سطوح الیاف، تغییرات دما منجر به ایجاد تنش در سطح مشترک بین دو فاز می‌شود. این تنشها به شکل تنش برشی در بین دو فاز باقیمانده، باعث کاهش کارایی کامپوزیت در هنگام کاربری می‌شود. شکل ۱ نحوه تشکیل تنشهای برشی را در فصل مشترک الیاف و زمینه (matrix) نشان می‌دهد.

بطور عمومی تنشهای باقیمانده داخل اجسام به دو گروه تنشهای باقیمانده درشت (macro residual stresses) و تنشهای باقیمانده ریز (micro residual stresses) دسته‌بندی می‌شوند. استفاده از کلمه ریز و درشت به معنای کم یا زیاد بودن مقدار تنشها از نظر کمی نیست [۳-۱]. بلکه بیانگر نحوه توزیع تنشها داخل جسم است. تنشهای باقیمانده ریز می‌توانند به اندازه‌ای زیاد باشند که سبب شکست جسم حتی قبل از کاربرد شوند.

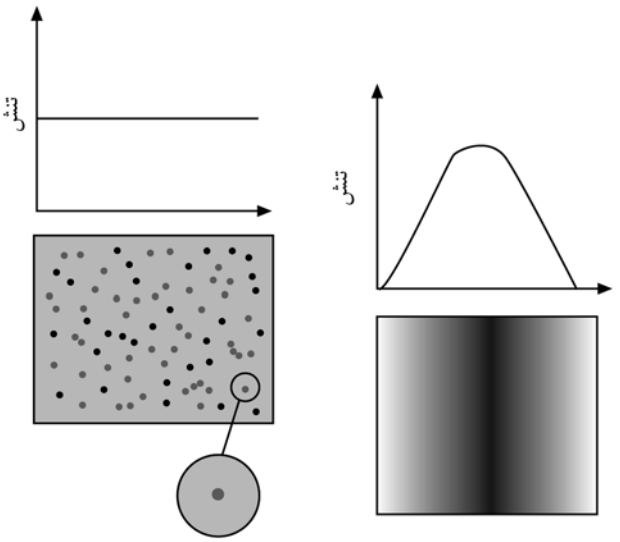
در واقع منظور از تنشهای باقیمانده ریز این است که توزیع تنش داخل جسم بطور کاملا یکنواخت انجام شده، از دید ماکروسکوپی، در قطعه تنشی وجود ندارد. مثلاً وقتی ذرات پرکننده داخل زمینه‌ای پراکنده می‌شوند، به دلیل تفاوت ضرایب انبساط گرمایی پرکننده و زمینه، میدان تنشی در اطراف هر ذره به هنگام تغییرات دما بوجود می‌آید. ولی، چون ذرات پرکننده ریز است و بطور یکنواخت در زمینه توزیع می‌شوند، مقدار تنش در تمامی نقاط یکسان است و بطور فرض هنگام حرکت از نقطه‌ای به نقطه‌ای دیگر تفاوتی در سطح تنش مشاهده نمی‌شود. در مورد تنشهای باقیمانده درشت، مسأله کاملاً عکس این است. یعنی بطور فرض با حرکت از یک انتهای قطعه به سمت انتهای دیگر یا از سطحی به سمت داخل جسم، سطح تنش موجود تفاوت می‌کند. در شکل ۲ این موضوع بطور طرح‌وار نشان داده شده است.

در تنشهای باقیمانده درشت، روشهای مکانیکی متداولی برای اندازه‌گیری مقدار تنش وجود دارد. به عنوان مثال می‌توان به روش براده‌برداری اشاره کرد. وقتی بخشی از جسم در اثر تنش، جدا می‌شود. برای اینکه نیروهای داخلی به تعادل برسند، قطعه مجبور به جابه‌جایی است. نحوه و مقدار جا به‌جا شدن قطعه بیانگر و ملاکی برای محاسبه تنشهای موجود است. این نوع روشهای متداول مکانیکی هنگامی که تنشهای باقیمانده از نوع تنشهای ریز باشند، کاربردی ندارند چرا که توزیع تنش کاملاً یکنواخت است و با براده برداری یا ایجاد شکاف و



شکل ۱ نحوه تشکیل تنشهای برشی در فصل مشترک الیاف وزمینه بعد از سرد شدن کامپوزیت تا دمای محیط: (الف) قبل از سرد شدن و (ب) بعد از سرد شدن.

سوراخ در قطعه تغییر شکلی بوجود نمی‌آید. از این رو، اندازه‌گیری تنشهای باقیمانده ریز در اجسام مشکل بوده، نمی‌توان از روشهای متداول برای تخمین آنها استفاده کرد. یکی از روشهایی تخمین مقدار تنشهای داخلی ریز، استفاده از مدلهای ریاضی است. بسیاری از پژوهشگران سعی کرده‌اند تا مدلهایی را ارائه دهند که متناسب با شرایط مسأله، نوع و مقدار تنشهای داخلی را محاسبه کند. با وجود این، معمولاً تمامی مدلهای ریاضی بر اساس مجموعه‌ای از فرضیات بنا شده‌اند. بسته به اینکه این فرضیات تا چه اندازه با واقعیتها مطابقت داشته باشند، جوابهایی که از مدلهای ریاضی بدست می‌آید، ممکن است در مواردی دور از واقعیت باشد. معمولاً پژوهشگرانی که سعی می‌کنند با استفاده از



شکل ۲ تفاوت در چگونگی توزیع تنشهای داخلی: (الف) از دید ماکروسکوپی تنش متغیر در نقاط مختلف و (ب) تنش متغیر در اطراف یک ذره اما توزیع تنش یکنواخت از نظر ماکروسکوپی.

روشهای ریاضی مسأله را حل کنند، به دنبال روشی هستند، تا بتوانند اطلاعات تجربی را در باره مسأله بیابند و نشان دهند که نتایج حاصل از مدل و تجربه به هم نزدیک هستند. بدین معنا که همیشه نتایج تجربی در نهایت ملاکی برای اثبات کارایی مدل ریاضی محسوب می شود [۴].

اصول نظری

همان طورکه در مقدمه گفته شد، در کامپوزیتها اختلاف ضرایب انبساط گرمایی اجزای تشکیل دهنده سبب ایجاد تنش به هنگام تغییرات دما می شود. در کامپوزیتهای پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه یا کربن تقریباً همیشه ضریب انبساط گرمایی پلیمر بیشتر از تقویت کننده است. از این رو، هنگام سرد شدن کامپوزیت از دمای پخت تا دمای محیط، پلیمر نسبت به الیاف تمایل بیشتری به جمع شدگی نشان می دهد. با این وجود، به دلیل تشکیل پیوندهای قوی فیزیکی و شیمیایی بین دو فاز، هر کدام از این فازها نمی توانند به خودی خود حرکت کنند، در نتیجه نیروهای داخلی شکل می گیرند.

یکی از روشهایی که می توان برای جلوگیری از ایجاد تنش در داخل کامپوزیت استفاده کرد، تحت کشش قرار دادن الیاف هنگام پخت رزین است. اگر الیاف به اندازه کافی کشیده شوند، تغییر شکل یا کرنش کافی در آنها بوجود می آید، در نتیجه هنگام سرد شدن، الیاف به همراه پلیمر کاهش طول یافته، از ایجاد تنش جلوگیری می کند [۵].

در این پژوهش، الیاف بطور کنترل شده‌ای تحت کشش قرار گرفته‌اند. مقدار کشش روی الیاف در طول فرایند کاملاً ثابت نگه داشته شده است. بررسی منحنی نیرو در مقابل تغییر شکل الیاف نتایج جالب توجهی را نشان می دهد. همچنین، مقدار کشش لازم الیاف برای حذف تنشهای برشی در کامپوزیت محاسبه شده است.

تجربی

مواد

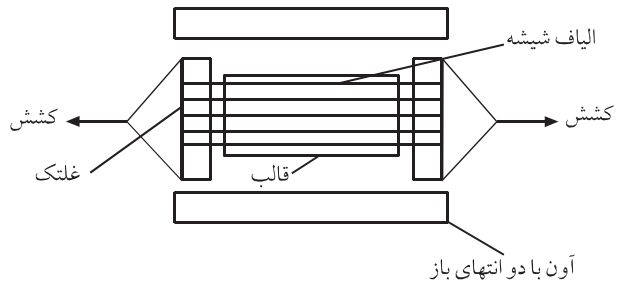
در این پژوهش، از الیاف شیشه به شکل رشته‌ای و از نوع E محصول شرکت فایبرگلاس کانادا و رزین اپوکسی ساخت شرکت سیباگایگی باکد RP-۱۵۰۰ استفاده شد.

دستگاهها

در این پژوهش، برای اندازه‌گیری قطر رشته‌های الیاف شیشه از میکروسکوپ الکترون پویشی (SEM) و برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی از دستگاه ویژه‌ای ساخت داخل کشور استفاده شد.

روشها

برای ساخت نمونه‌ها، الیاف شیشه روی دو غلتک به قطر ۲/۸۵ cm و طول ۳/۴۹ cm پیچیده شدند. سطوح غلتکها با لایه‌ای از لاستیک نرم پوشیده شد تا از آسیب و پارگی الیاف جلوگیری شود. در هر آزمایش تعداد ۱۲ دور الیاف به دور غلتکها پیچیده شد. برای پیچش یکنواخت الیاف به دور غلتکها از دستگاهی استفاده شد که جزئیات مربوط به آن در مرجع [۶] ذکر شده است. بعد از پیچش الیاف، غلتکها به دستگاه کشش افقی انتقال یافتند. به کمک دستگاه کشش، مقداری دلخواه کشش در مرحله بعدی روی الیاف اعمال شد. برای از بین بردن فاصله خالی بین ردیف بالا و پایین الیاف ، دو طرف الیاف به وسیله گیره‌ای که دارای سطوح نرم لاستیکی بود به هم نزدیک شدند. سپس، الیاف داخل قالب آلومینیمی با سطح مقطع مستطیلی شکل که سطح داخلی آن با موم و مواد جدا کننده پوشیده شده بود، قرار گرفت و مقدار مشخصی رزین اپوکسی به الیاف افزوده شد. کل این مجموعه داخل آونی که برای این آزمایش طراحی و ساخته شد، قرار گرفت. این آون دارای دو سر باز بوده و به شکل دو نیم استوانه، دور تا دور نمونه را در بر می گیرد. برای کنترل دمای داخل آون، دو سوراخ آون در دو انتها با مواد عایق پوشیده شد. آون مجهز به ترموکوپلی است که قابلیت کنترل دمای داخل آون را دارد. سپس، انجام آزمایش با اعمال مقدار از پیش تعیین شده‌ای نیروی کشش به الیاف از طریق غلتکها شروع شد. وقتی کشش به حد مشخصی رسید، مقدار آن ثابت نگه داشته و آون روشن شد. در این مرحله دما تا ۱۵۰ °C افزایش یافت و به مدت ۴ h تا پخت کامل رزین دما ثابت نگه‌داشته شد. بدین ترتیب الیاف تحت کششی از پیش تعیین شده به همراه رزین اپوکسی در دمای ۱۵۰ °C پخت وکامپوزیت ساخته شد. شکل ۳ نمایی از دستگاه استفاده شده را برای ساخت کامپوزیت نشان می دهد. بعد از پخت نمونه، دمای آون به آرامی تا دمای محیط کاهش یافت. سپس، نیروی کشش الیاف به آرامی برطرف و نمونه از قالب خارج شد. برای محاسبه تنشها در قسمت بعدی نیاز به دانستن قطر و تعداد تارهای الیاف شیشه بود. به این منظور قطر رشته شیشه به وسیله



شکل ۳ نمایی از دستگاه استفاده شده برای ساخت نمونه‌ها.

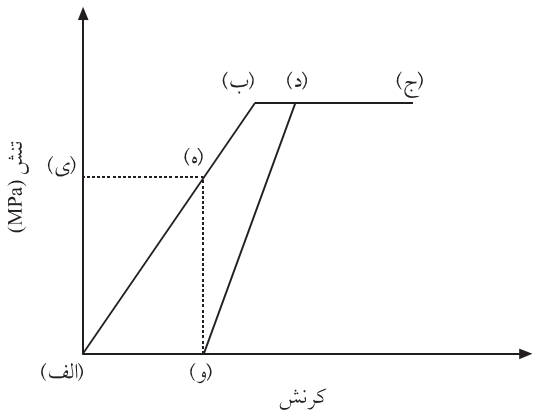
SEM برابر ۲۰μ اندازه گیری شد.

در آزمایشی دیگر برای تعیین تعداد تارها در هر رشته از الیاف شیشه، جرم حجمی الیاف اندازه‌گیری شد. با مشخص بودن جرم حجمی و وزن واحد طول رشته، حجم واحد طول محاسبه و با دانستن قطر تار، تعداد آنها در هر رشته از الیاف محاسبه شد. تعداد تارها در هر رشته برابر با ۳۰۰۰ بود که با اطلاعات موجود در کاتالوگ مربوط مطابقت داشت. با داشتن تعداد و قطر تارها در هر رشته، سطح مقطع هر رشته براحتی بدست آمد و تقریبا برابر با ۰/۹۴ mm^2 محاسبه شد. با استفاده از سطح مقطع الیاف در هر نمونه، نیروهای کششی اعمال شده بر الیاف به تنش تبدیل شد تا عمومیت بیشتری داشته باشد. در این مجموعه آزمایشها هشت نمونه در چهار سطح تنش به ترتیب دو نمونه در ۲۰MPa، دو نمونه در ۴۰MPa، دو نمونه در ۷۰ MPa و دو نمونه در ۱۰۰MPa تنش بر الیاف شیشه در هنگام پخت رزین تهیه شدند.

نتایج و بحث

منحنی تنش ـ کرنش الیاف

منحنی تنش در برابر کرنش برای الیاف به وسیله دستگاه کشش ثبت شد. این منحنی اطلاعات مهم و قابل توجهی در اختیار قرار می‌دهد. شکل ۴ تغییرات تنش الیاف را قبل، در طول و بعد از فرایند پخت نشان می‌دهد. در شکل ۴، آغاز اعمال تنش بر الیاف شیشه از نقطه (الف) است. نقطه (الف) تا (ب) بیانگر اعمال تنش بر الیاف قبل از شروع فرایند پخت رزین است. در این مرحله رزین به شکل سیال گرانرو بوده، نقشی در کشیده شدن الیاف با دستگاه کشش ندارد، وقتی دما به کمک آون افزایش می‌یابد. الیاف تحت کشش منبسط شده، به این دلیل مقدار



شکل ۴ تغییرات تنش در برابر کرنش برای الیاف شیشه قبل، در طول و بعد از پخت رزین.

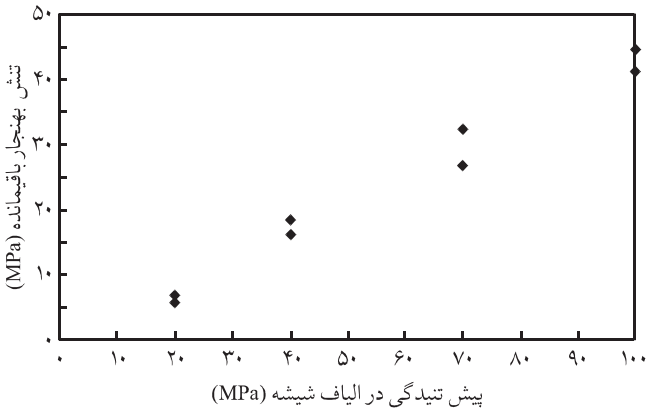
کرنش افزایش می‌یابد. با این حال دستگاه کشش مقدار تنش اعمال شده بر الیاف را ثابت نگه می‌دارد. افزایش کرنش الیاف به دلیل افزایش دما، به کمک فاصله بین نقطه (ب) تا (ج) مشخص می‌شود. بعد از پخت نمونه و خاموش شدن آون وقتی که دما کاهش می‌یابد، الیاف دوباره منقبض شده، از این رو کاهش طول در آنها مشاهده می‌شود. در اینجا کرنش از نقطه (ج) به نقطه (د) بر می‌گردد. در این شرایط به دلیل پخت رزین و ایجاد پیوند بین پلیمر و الیاف، طبیعی است که الیاف نمی‌توانند کاملاً به جای اولیه خود یعنی نقطه (ب) برگردند. در انتها وقتی تنش به آرامی برطرف می‌گردد، تنش کاهش یافته، از نقطه (د) به نقطه (و) می‌رسد. حرکت از نقطه (الف) به (و) چرخه‌ای کامل از تنش و کرنش را برای الیاف شیشه در طول فرایند نشان می‌دهد. آنچه در اینجا قابل تأمل است. نقطه شروع و پایان این چرخه است. همان‌طور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، فرایند کشش الیاف از نقطه (الف) شروع شده و به نقطه (و) خاتمه یافته است. این بدین معناست که الیاف شیشه‌ای که داخل زمینه پلیمری قفل شده‌اند، به اندازه فاصله (الف) تا (و) کرنش را در خود حفظ کرده‌اند. به عبارت دیگر، الیاف شیشه در کامپوزیت تحت کشش قرار دارند. وجود تنشهای باقیمانده در الیاف شیشه سبب می‌شود تا در فصل مشترک دو فاز تنشهای برشی ایجاد شود [۷].

برای محاسبه مقدار تنش کششی باقیمانده در الیاف شیشه می‌توان بسادگی از نقطه (و) خطی عمودی رسم کرد تا خط (الف)ـ(ب) را در نقطه (ه) قطع کند. در این شرایط نقطه (ی) مقدار تنش باقیمانده در الیاف داخل کامپوزیت است.

در این پژوهش هشت نمونه در چهار سطح تنش۲۰، ۴۰، ۷۰ و ۱۰۰MPa بر الیاف ساخته شد. سپس، تنش کششی باقیمانده در الیاف به شکل تابعی از سطوح تنش اعمال شده بر الیاف مشخص گردید. نتایج در جدول ۱ و شکل ۵ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل۵ مشاهده می‌شود مقدار تنش باقیمانده در الیاف رابطه‌ای خطی با سطح

جدول ۱ نتایج حاصل از آزمایشها.

تنش اعمال شده بر الیاف در طول فرایند پخت رزین (MPa)	تنش کششی باقیمانده در الیاف در پایان هر آزمایش (MPa)	
	آزمایش اول	آزمایش دوم
۲۰	۵/۹	۶/۶
۴۰	۱۶/۱	۱۸/۴
۷۰	۲۶/۷	۳۲/۲
۱۰۰	۴۰/۹	۴۴/۶



شکل ۵ تنش بهنجار باقیمانده در الیاف شیشه بعد از پخت رزین بر حسب تابعی از تنش اولیه اعمال شده بر الیاف.

تنش اولیه اعمال شده بر الیاف دارد.

هدف اصلی در این پژوهش، محاسبه مقدار تنش برشی در فصل مشترک بین زمینه و الیاف است. برای محاسبه تنش برشی در فصل مشترک می توان از معادله (۱) استفاده کرد:

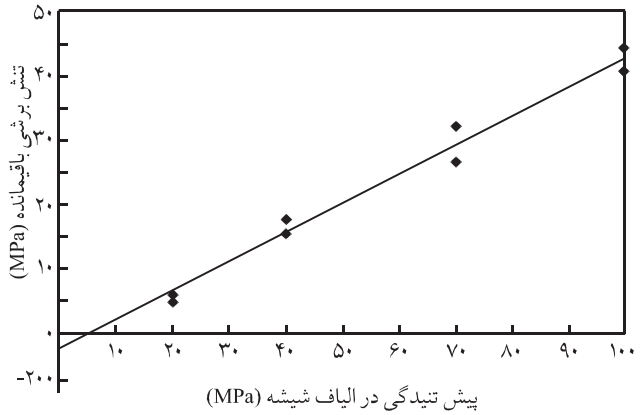
$$\tau = F_r/S_f \qquad (۱)$$

که در این معادله τ مقدار تنش برشی در فصل مشترک دو فاز، F_r نیروی کشش باقیمانده در الیاف و S_f سطوح جانبی الیاف در کامپوزیت است. با دانستن تعداد رشته ها در کامپوزیت، تعداد تارها در هر رشته و قطر هر تار سطوح جانبی الیاف موجود در نمونه از معادله (۲) محاسبه شد:

$$S_f = \pi . D_f . L . N \qquad (۲)$$

که در این معادله، D_f قطر تار، L طول نمونه و N تعداد کل تارها در نمونه است. با توجه به اطلاعات موجود مقدار τ تنش برشی بر فصل مشترک بین دو فاز زمینه و الیاف قابل محاسبه است.

شکل ۶ مقدار تنش برشی در فصل مشترک دو فاز را به عنوان تابعی از تنش اولیه اعمال شده مشخص می کند. همان طور که در شکل ۶ مشخص شده است، رابطه‌ای خطی بین اطلاعات موجود مشاهده می شود، بدین معنی که با افزایش تنش اولیه اعمال شده بر الیاف شیشه به هنگام پخت کامپوزیت، مقدار تنش برشی باقیمانده بر فصل مشترک دو فاز افزایش می یابد. در شکل ۶ بهترین خطی را که از میان داده ها می توان عبور داد (trendline) رسم شده است. امتداد این خط و محل تقاطع آن با محورهای عمودی و افقی اطلاعات مهمی را فراهم می آورد. محل تقاطع این خط با محور افقی، تنشی را مشخص می کند، که اعمال آن بر الیاف در هنگام پخت رزین موجب می شود تا هیچ تنش برشی در



شکل ۶ تنش برشی باقیمانده در فصل مشترک دو فاز بر حسب تابعی از تنش اولیه اعمال شده بر الیاف.

فصل مشترک دو فاز بوجود نیاید. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، برای کامپوزیت استفاده شده دراین پژوهش در حدود MPa ۴ تنش بر الیاف شیشه سبب می شود تا کرنش کافی در الیاف برای خنثی کردن تفاوت حاصل در تغییر طول الیاف و زمینه به دلیل سرد شدن از دمای پخت تا دمای محیط بوجود آمده، در نتیجه هیچ تنش برشی در فصل مشترک دو فاز پدید نیاید. از طرف دیگر محل برخورد خط با محور عمودی، مشخص کننده مقدار تنش برشی است که در نمونه بدون اعمال پیش تنیدگی (prestressed) بر الیاف بوجود می آید. در اکثر موارد الیاف در کامپوزیت بدون اعمال تنش در هنگام پخت رزین استفاده می شوند. در این حالت مقدار تنش برشی روی سطح مشترک اولاً به سمت خارج الیاف بوده، ثانیاً مقدار آن از این تجربه قابل پیش‌بینی است. در این پژوهش، مقدار تنش برشی بر فصل مشترک دو فاز برای نمونه بدون پیش تنیدگی برابر با Pa ۴۵ بدست می آید که در مقایسه با مقدار مقاومت برشی اپوکسی پخت شده (که معمولاً حدود چند مگاپاسگال است) مقدار بسیار ناچیزی است. با وجود این، تنشها روی فصل مشترک می تواند در باز شدن ریز ترکها هنگام اعمال بار خارجی مؤثر بوده، آن را تسریع کنند. در حالتی که با اعمال تنش بر الیاف، جهت تنشهای برشی ایجاد شده در فصل مشترک رو به داخل (مرکز لیف) باشد، تنشهای ایجاد شده از باز شدن ریز ترکها ممانعت کرده، باعث به تأخیر افتادن فرایند شکست می شود.

نتیجه گیری

در این پژوهش، روشی برای ساخت کامپوزیت بدون تنشهای باقیمانده

داخلی ارائه شده است. نتایج آزمایشها نشان می دهد که برای کامپوزیت شیشه/ اپوکسی که در این پژوهش استفاده شده است، اعمال حدود ۴MPa تنش بر الیاف شیشه در هنگام پخت رزین اپوکسی، باعث می شود تا تنشهای برشی در فصل مشترک دو فاز بوجود نیاید. همچنین، نشان داده شده است که می توان با کنترل مقدار کشش بر الیاف در طول فرایند ساخت کامپوزیت، مقدار تنشهای ایجاد شده داخل کامپوزیت را به دلخواه کنترل کرد. درضمن مشخص شد که مقدار تنشهای باقیمانده در کامپوزیت بطور خطی و فزاینده با پیش تنیدگی الیاف متناسب است.

مراجع

1. Nelson D.V. and Lawrence C.M., Prediction and Measurement of Residual Stress in Composite Materials, Unpublished Paper, Private Communication.
2. So P. and Lawrence J.B., Residual Stresses In Polymers and their Effect on Mechanical Behavior, *Polym. Eng. Sci.,* **16**, 785-791, 1976.
3. Jed S.L. and Mallik R.A., Factors Affecting the Bond between Polymer Composites and Wood, *J. Reinforc. Plast. Compos.,* **24**, 405-412, 2005.
4. Niels L.P., On Topology Optimization of Plates with Prestress, *Int. J. Numerical Methods in Eng.,* **51**, 225-239, 2001.
5. Tan K.H., Patoary M.K.H., and Roger C.S.K., Anchorage Systems for Masonry Walls Strengthened with FRP Composite Laminates, *J. Reinforc. Plast. Compos.,* **22**, 1353-1371, 2003.
6. Motahari S. and Cameron J., The Influence of Fiber Prestressing on Mechanical Properties of Composite Materials, *Proceeding of the Composites'96 and Oriented Polymers Symposium,* Boucherville, Quebec, 591-617, 1996.
7. Teng J.G., Lam L. and Chen J.F., Shear Strengthening of RC Beams with FRP Composites, *Prog. Struct. Eng. Mater.,* **6**, 173-184, 2004.