(يادداشت فنی)
افزايش مقاومت خمشي كامپوزيتها توسط كشش الياف

سیامک مطهری *
استاديار دانشكده مهندسي شيمي - پرديس دانشكده هاي فني - دانشگاه تهران
(تاريخ دريافت ۸۵/۶/۲۵ ، تاريخ دريافت روايت اصلاح شده ۸۶/۵/۳ ، تاريخ تصويب ۸۶/۷/۷)

چكيده
در اين پژوهش مقاومت خمشي و مدول خمشي كامپوزيتهاي شيشه- اپوكسي و نيز كامپوزيتهاي كربن- اپوكسي توسط وارد نمودن نيرو بر الياف در هنگام پخت رزين افزايش داده شده است. در اين تحقيق، تنش بوسيله يك دستگاه كشش، بر الياف كه بصورت يك جهته و پيوسته در امتداد طول نمونه قرار داشته اند، اعمال گرديده است. نتايج حاصل از آزمايش خمش چهار نقطه اي بر نمونه ها حاكي از افزايش همزمان مدول و مقاومت نمونه‌هاست. افزايش مدول و مقاومت، در مقدار مشخصي از كشش الياف به حداكثر مقدار خود مي‌رسد و سپس افزايش مقدار كشش باعث افت خواص ذكر شده مي‌گردد. مقدار بهينه پيش تنيدگي براي بدست آوردن حداكثر خواص مكانيكي بستگي به نوع الياف دارد. در اين تحقيق همچنين مكانيزم بهبود خواص توسط اعمال تنش توضيح داده شده است.

واژه های کلیدی: الياف شيشه - الياف كربن - رزين اپوكسي – كامپوزيت - مدول خمشي - استحكام خمشي - پيش تنيدگي

مقدمه
در سالهاي اخير كامپوزيتهاي پليمري كاربرد وسيعي در صنايع مختلف پيدا كرده اند. اين مواد بدليل پايين بودن نسبت وزن به مقاومت بهترين انتخاب براي صنايع هوا فضا محسوب مي‌شوند. به جز صنايع هوا فضا بسياري ديگر از صنايع هستند كه نيازمند اين مواد مي‌باشند. در اغلب موارد در كاربردهاي مهندسي، افزايش خواص فيزيكي و مكانيكي قطعات توليد شده، هدف اساسي محققين مي‌باشد.

يكي از روش هايي كه براي افزايش خواص مكانيكي كامپوزيهاي ساخته شده بر اساس رزينهاي پليمري و الياف مصنوعي مورد استفاده قرار مي‌گيرد، اعمال نيرو بر الياف مي‌باشد [۶-۱]. اعمال نيرو بر الياف مي‌تواند به دو صورت انجام پذيرد. در حالت اول الياف قبل از اينكه در كامپوزيت استفاده شوند تحت كشش قرار مي‌گيرند. سپس كشش از روي انها بر طرف شده و در مرحله بعد در كامپوزيت مورد مصرف واقع مي‌شوند. در حالت دوم الياف هنگام ساخت كامپوزيت مادامي‌كه رزين در حال پخت است، تحت كشش قرار مي‌گيرند. اين كشش تا پايان فرايند پخت رزين ادامه يافته و بعد از اينكه رزين كاملا سخت شد كشش بر طرف مي‌شود.

Chou و همكارانش در مجموعه اي از فعاليتهاي تحقيقاتي الياف كربن را قبل از استفاده در كامپوزيت تحت كشش قرار دادند [۹-۷]. آنها نشان دادند كه بدين ترتيب مي‌توان مقاومت كامپوزيتي را كه بعدا از اين الياف ساخته مي‌شود، افزايش داد. ايشان براي توجيه اين مطلب چنين استدلال كردند كه اعمال نيرو بر الياف باعث مي‌گردد تا تارهايي كه داراي نقاط ضعف در ساختمان خود هستند، قبل از استفاده در كامپوزيت گسيخته شوند. آنها معتقدند پاره شدن تارها در داخل كامپوزيت وقتي كه كامپوزيت تحت شرايط سرويس دهي قرار مي‌گيرد، موجب پديد آمدن موج تنشي مي‌شود كه انتشار آن در داخل كامپوزيت باعث شكست پيش از موعد قطعه مي‌گردد. بنا بر اين با حذف تارهاي ضعيف قبل از استفاده الياف در كامپوزيت مي‌توان از ايجاد موج تنش و در نتيجه تضعيف كامپوزيت جلوگيري كرد.

Jorge و همكارانش [۱۰] براي اعمال تنش بر الياف روش دوم را آزمودند. ايشان با آويزان نمودن وزنه‌هايي به انتهاي رشته‌هاي الياف شيشه، الياف را مادامي‌كه رزين در اطراف آنها در حال پخت بود، تحت كشش قرار دادند. ايشان نشان دادند كه اعمال نيرو بر رشته‌هاي الياف مي‌تواند مقاومت كششي[1] كامپوزيت را

* نويسنده مسئول : تلفن : ۶۱۱۱۲۱۹۱ , فاكس : ۶۶۹۵۷۷۸۴ , Email:smotahari@ut.ac.ir

Archive of SID
www.SID.ir

افزایش دهد. این محققین صرفا به گزارش این مطلب قناعت کرده و هیچ توضیحي براي توجیه این مسئله ارائه نکرده اند. روشي که در این پژوهش به کار گرفته شده است، اعمال نیرو بر الیاف در هنگام پخت رزین مي‌باشد. در اینجا براي اعمال نیرو از دستگاه کشش استفاده شده است. استفاده از دستگاه کشش امکان کنترل دقیق میزان نیرو را فراهم مي‌آورد. در ادامه آزمایش خمش چهار نقطه اي[۲] براي بررسي خواص خمشي کامپوزیت مورد استفاده قرار گرفته است.

آزمایش ها

مواد

در این پژوهش از الیاف شیشه بصورت رشته اي و از نوع E محصول شرکت فایبر گلاس کانادا استفاده شده است. الیاف کربن از نوع مدول بالا از شرکت هرکولس و با نام تجارتي QUN1689 و رزین اپوکسي ساخت شرکت سیبا گایگي با کد RP-۱۵۰۰ بوده است.

روش ها

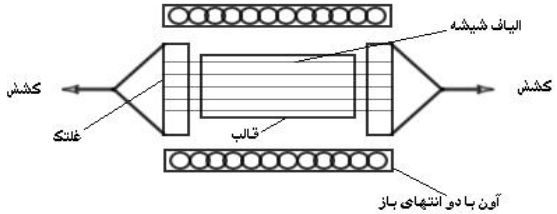
براي ساخت نمونه ها الیاف بر روي دو غلطك به قطر ۲/۸۵ سانتي متر و طول ۳/۴۹ سانتي‌متر پیچیده شدند. سطوح غلطك ها از يك لایه لاستیك نرم پوشیده شده بود تا باعث آسیب به الیاف و پارگي آنها نشوند. در هر آزمایش تعداد ۱۲ دور الیاف به دور غلطك ها پیچیده شدند. بعد از پیچش الیاف، غلطك ها به يك دستگاه کشش افقي انتقال یافتند. توسط دستگاه کشش، میزان دلخواه کشش در مرحله بعدي بر الیاف اعمال مي‌شد. براي آنکه فاصله خالي بین ردیف بالا و ردیف پایین الیاف از بین برود، دو طرف الیاف توسط يك گیره که داراي سطوح نرم لاستیکي بود به هم نزدیك شدند. سپس الیاف در داخل يك قالب آلومینمي با سطح مقطع مستطیلي شکل که سطح داخلي آن توسط واکس و مواد جدا کننده پوشیده شده بود، قرار گرفته و مقدار مشخصي رزین اپوکسي به الیاف افزوده شد. کل این مجموعه در داخل یک آون خاص که برای این آزمایش طراحی و ساخته شده بود قرار گرفت. این آون داراي دو سر باز بوده و به صورت دو نیم استوانه دور تا دور نمونه را در بر مي‌گرفت. براي کنترل درجه حرارت در داخل آون، دو سوراخ آون در دو انتها با مواد عایق پوشیده شد. آون مجهز به ترموکوپل بوده و قادر بود درجه حرارت را در داخل کنترل نماید. سپس انجام آزمایش با اعمال مقدار از پیش تعیین شده‌اي نیروي کششي به الیاف از طریق غلطك ها شروع شد. وقتي کشش به حد مشخصي مي‌رسید، ثابت نگه داشته و آون روشن مي‌شد. در این مرحله درجه حرارت به ۱۵۰ درجه سانتی گراد رسیده و به مدت چهار ساعت ثابت نگه داشته می شد تا پخت رزین تکمیل گردد. بدین ترتیب الیاف تحت کشش از پیش تعیین شده به همراه رزین اپوکسي در ۱۵۰ درجه سانتی گراد پخت شده وکامپوزیت ساخته مي‌شد. شکل (۱) نمایشي نمادین از دستگاه مورد استفاده براي ساخت کامپوزیت است. بعد از پخت نمونه، درجه حرارت آون به آرامي کاهش یافته تا به دماي محیط برسد. سپس نیروي کشش الیاف به آرامي برطرف شده و نمونه از قالب خارج مي‌شد. در این آزمایش براي محاسبه تنشها در قسمت بعدي نیاز به دانستن قطر الیاف بود. بدین منظور قطر فیلامنت شیشه و کربن توسط دستگاه SEM اندازه گیري و به ترتیب برابر ۲۰ و ۱۰میکرون بدست آمد.

در این سري از آزمایش ها تنش ثابت و از پیش تعیین شده اي، بر الیاف شیشه در طول فرایند ساخت اعمال شد. میزان تنش اعمال شده بر الیاف شیشه به ترتیب صفر، ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ مگاپاسکال بر مبناي سطح مقطع الیاف (بدون در نظر گرفتن زمینه) انتخاب شد. در هر سطح تنش سه نمونه ساخته و از هر نمونه دو نمونه کوچکتر بریده شد. همچنین براي الیاف کربن با توجه به مدول بالاتر آنها مقدار تنش صفر، ۴۰، ۸۰، ۱۱۰ و ۱۴۰مگاپاسکال در نظر گرفته شد. در مورد الیاف کربن در هر سطح تنش دو نمونه ساخته شد که در ادامه کار هر نمونه به دو نمونه کوچکتر بریده شد. اندازه هر نمونه ۴×۱۰×۷۲ میلیمتر بوده است. بدین ترتیب در هر سطح تنش براي کامپوزیت هاي شیشه- اپوکسي، شش نمونه و براي کامپوزیت هاي کربن- اپوکسي چهار نمونه براي انجام آزمایش های بعدي تهیه شد. در نمونه هاي ساخته شده درصد وزني الیاف اندازه گیري و مقدار آن برابر ۲±۶۲% براي نمونه هاي ساخته شده از الیاف شیشه و ۲±۴۷% براي نمونه هاي ساخته شده از الیاف کربن به دست آمد.

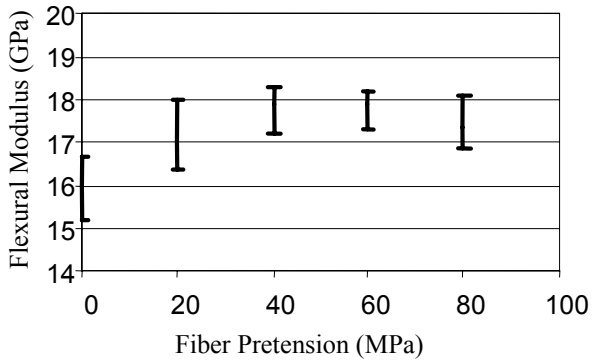
در مرحله بعدي نمونه هاي تهیه شده با استفاده از يك دستگاه INSTRON تحت آزمایش خمش قرار

Archive of SID

www.SID.ir



شكل ۱: نمايشي نمادين از دستگاه مورد استفاده براي ساخت نمونه ها.



شكل ۲: مدول خمشي كامپوزيت شيشه- اپوكسي، در برابر پيش تنيدگي الياف شيشه.

گرفتند. آزمايش خمش طبق استاندارد ASTM D790 به صورت آزمايش خمش چهار نقطه اي انجام پذيرفت.

در اين آزمايش ها سرعت حركت فك دستگاه برابر با ۱/۲۷ ميليمتر بر دقيقه انتخاب شد.

براي محاسبه مقدار مدول خمشي و مقاومت خمشي نمونه ها از روابط ذيل استفاده شد[۱۲] .

$$E = \frac{Pa^2}{\Delta W d^3}(3L - 4a) \qquad (۱)$$

$$\sigma = \frac{3P(L-S)}{2Wd^2} \qquad (۲)$$

كه در اين روابط E و σ مدول خمشي و مقاومت نمونه ها و W و d عرض و ضخامت هر نمونه و L ، S و a به ترتيب فاصله دو پايه زيرين، فاصله دو نقطه اعمال نيرو در بالا و a فاصله بين پايه زيرين و نقطه اعمال فشاردر بالاي نمونه است. در اين روابط همچنين P حداكثر نيرويي است كه نمونه تحمل مي‌كند و Δ مقدار خمش نمونه (مقدار حركت فك ها) به ازاي نيروي P است.

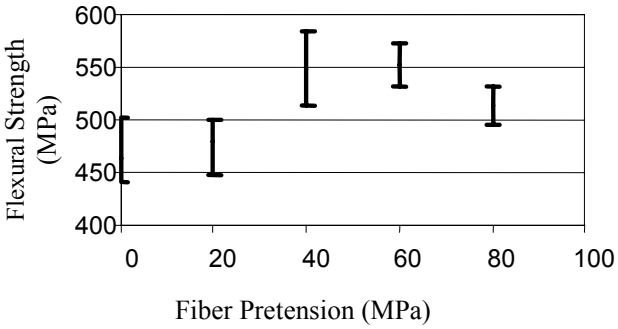
نتايج و بحث

بعد از انجام آزمايش های خمش، استحكام خمشي و مدول خمشي نمونه ها توسط رابطه (۱) و (۲) محاسبه شده و نتايج حاصل از اين آزمايش ها در شكل هاي (۲) و (۳) و (۴) و (۵) به تصوير درآمده است. همان گونه كه تصاوير نشان مي‌دهند، تنش اعمال شده بر الياف به هنگام پخت رزين اپوكسي ، اثر مستقيم و ملموسي بر مدول و استحكام خمشي نمونه ها دارد. در هر دو مورد افزايش تنش بر الياف باعث افزايش مدول و استحكام شده است. اين روند براي كامپوزيت شيشه تا حدود ۴۰ الي ۶۰ مگاپاسكال و براي كامپوزيت كربن تا ۱۱۰ مگاپاسكال تنش ادامه دارد. بعد از آن مشاهده مي‌شود كه افزايش تنش اعمال شده بر الياف، اثر منفي بر خواص داشته و باعث افت مدول و استحكام خمشي نمونه‌ها مي‌شود. در واقع مي‌توان اين مطلب را چنين بيان كرد كه براي كامپوزيت موجود، يك نقطه بهينه تنش وجود دارد كه در آن نقطه خواص خمشي به حداكثر مقدار خود مي‌رسند.

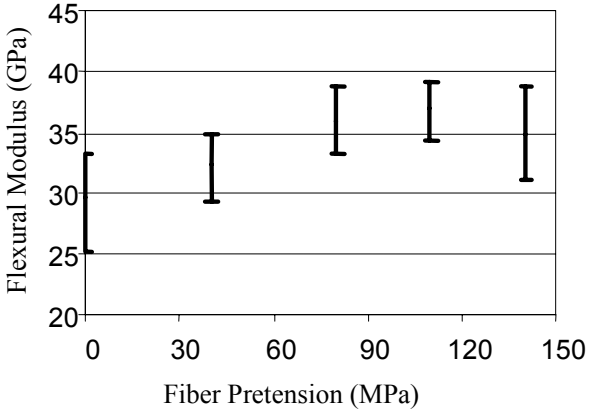
در مورد كامپوزيت شيشه– اپوكسي، مقايسه مدول خمشي نمونه اي كه در ۴۰ مگاپاسكال تنش ساخته شده است با نمونه شاهد كه بدون اعمال تنش در شرايط عادي تهيه شده است، نشان مي‌دهد كه اعمال تنش مناسب برالياف توانسته است مدول خمشي را بيش از ۱۲ درصد افزايش دهد. به همين ترتيب در مورد استحكام

Archive of SID

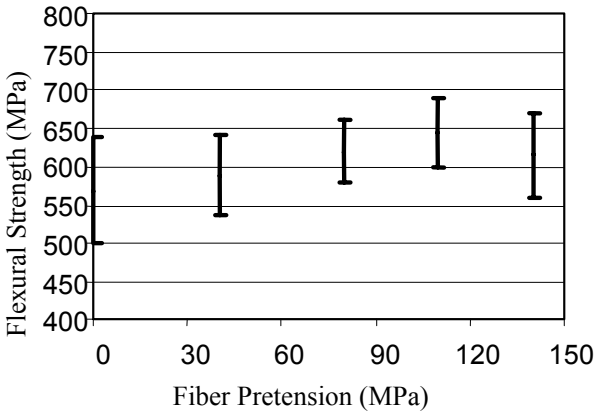
www.SID.ir



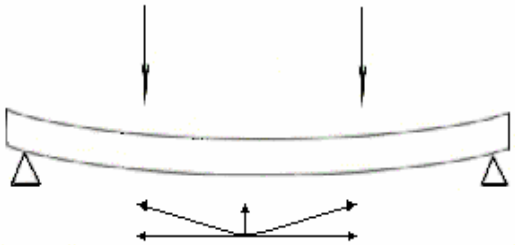
شکل ۳: استحکام خمشی کامپوزیت شیشه- اپوکسی، در برابر پیش تنیدگی الیاف شیشه.



شکل ۴: مدول خمشی کامپوزیت کربن- اپوکسی، در برابر پیش تنیدگی الیاف کربن.



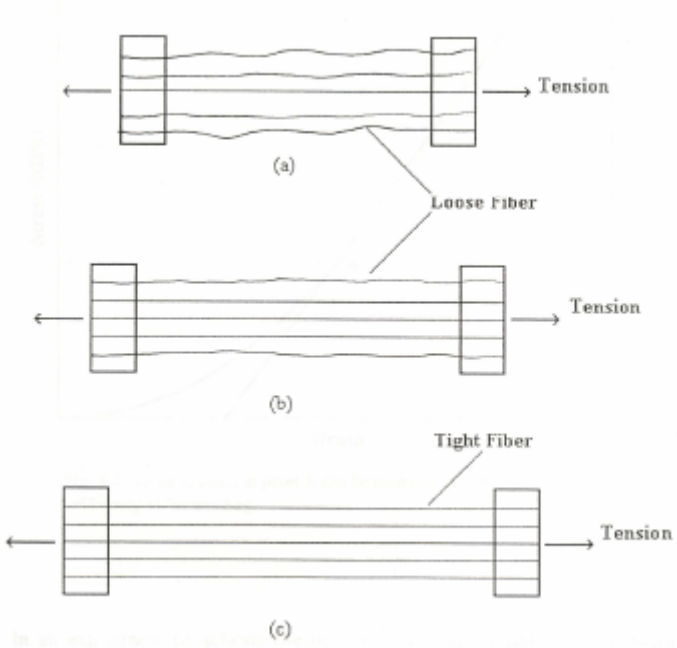
شکل ۵: استحکام خمشی کامپوزیت کربن- اپوکسی، در برابر پیش تنیدگی الیاف کربن.



شکل ۶: مولفه عمودی نیروی کشش الیاف، در برابر نیروی خمش ایستادگی می‌کند.

Archive of SID

www.SID.ir



شكل ۷: در حالت a و b ليفهاي شل در هنگام كشش يكي يكي تحت تاثير بار قرار مي‌گيرند در صورتي كه در حالت c تمامي الياف همزمان و به يک باره نيرو را تحمل كرده و در نتيجه مقاومت بالاتري نشان مي‌دهند.

خمشي نمونه ساخته شده در صفر و ۶۰ مگاپاسكال تنش نشان مي‌دهدكه استحكام نمونه ها در حدود ۱۹ در صد افزايش يافته است.

در مورد نمونه‌هاي كربن- اپوكسي، نيز روند مشابه‌اي به چشم ميخورد. بدين ترتيب كه افزايش مقدار تنش اعمال شده بر الياف در هنگام پخت رزين باعث افزايش مدول و استحكام خمشي نمونه‌ها مي‌شود. حداكثر ميزان مدول و استحكام خمشي در ۱۱۰ مگاپاسكال تنش الياف بدست آمده است. در اين ميزان از پيش تنيدگي، در مورد مدول خمشي ۲۵ درصد و در مورد استحكام خمشي ۱۳ درصد افزايش در مقايسه با نمونه‌هاي بدون پيش تنيدگي (سطح تنش صفر) قابل مشاهده است.

نتايج بدست آمده در اين مطالعه بسيار شبيه به آنچه كه Jorge و همكارانش [۱۰] گزارش كرده‌اند مي‌باشد. تفاوت عمده در نوع تهيه نمونه، مواد استفاده شده و آزمايش های انجام شده مي‌باشد. Jorge و همكارانش [۱۰] براي ايجاد تنش در الياف از آويختن وزنه به انتهاي الياف استفاده كردند، در صورتي كه در اين پژوهش از دستگاه كشش براي اين كار استفاده شده است كه كنترل دقيقتري بر ميزان كشش را فراهم مي‌آورد. از طرف ديگر دانشمندان فوق‌الذكر آزمايش های كشش را بر نمونه‌هاي شيشه- پلي استر خود انجام داده‌اند و حدود ۲۵ درصد افزايش در مقاومت كششي كامپوزيت را گزارش كرده‌اند. در صورتي كه در اين مطالعه از آزمايش های خمش بهره برده شده است. با تمامي اين مسائل هنوز شباهت بسياري در بين نتايج وجود دارد. به اين ترتيب كه در هر دو تحقيق افزايش پيش تنيدگي باعث بهبود خواص مورد مطالعه شده است.

اما سوالي كه در اينجا مي‌بايست بدان پرداخت اين است كه چگونه اعمال تنش بر الياف مي‌تواند خواص مكانيكي را بهبود بخشد. براي پاسخ به اين سوال هر كدام از اين خواص را جداگانه بررسي خواهيم كرد. اجازه دهيد ابتدا مكانيزم تاثير تنش وارد بر الياف بر خواص خمشي را بررسي كنيم. هنگامي‌كه الياف شيشه تحت تنش قرار مي‌گيرند، مقداري كرنش در الياف بوجود مي‌آيد. وقتي رزين در اطراف آنها پخت شده و از حالت سيال ويسكوز به حالت جامد تبديل مي‌گردد، پيوندهاي قوي فيزيكي و شيميايي بين زمينه پليمري و الياف به وجود مي‌آيند. وجود اين پيوندهاي قوي باعث مي‌گردد تا در انتهاي فرايند توليد بعد از بر طرف شدن نيروي وارد بر الياف، در صدي از كرنش الياف همچنان در الياف حفظ شده و باقي بماند[۱۱]. به عبارت ديگر الياف در داخل كامپوزيت به صورت كشيده شده قرار دارند. در مرحله بعدي وقتي نمونه در آزمايش خمش تحت تاثير نيرو قرار مي‌گيرد،

Archive of SID

www.SID.ir

الياف كشيده شده مقاومت بيشتري در مقابل خم شدگي از خود نشان مي‌دهند. اين مسئله در شكل ۶ نمايش داده شده است.

در واقع مي‌توان چنين تعبير كرد كه نيروي كشش الياف به دو مولفه تجزيه شده كه مولفه عمودي آن در مقابل نيروي خمش قرار مي‌گيرد. بدين ترتيب نيروي بيشتري براي خم كردن نمونه نياز است و يا به تعبير ديگر مدول خمشي افزايش مي‌يابد.

از طرف ديگر اعمال نيرو بر الياف شيشه باعث افزايش استحكام خمشي كامپوزيت مي‌شود. دليل اين امر را مي‌توان در نحوه قرار گيري الياف در امتداد طول نمونه بررسي كرد. در كامپوزيتي كه الياف بدون اعمال نيرو در هنگام پخت رزين ساخته شده است، الياف كاملا موازي با يكديگر قرار نداشته و بعضي از آنها داراي اعوجاج هستند. بعد از سخت شدن رزين الياف معوج به همان صورت باقي مي‌مانند.. بنا بر اين در مرحله بعد در هنگام آزمايش وقتي نيروي خمش وارد مي‌شود، الياف يكي يكي نيرو را تحمل كرده و در نتيجه مقاومت كلي نمونه كاهش مي‌يابد. در حالي كه در نمونه هايي كه الياف در هنگام پخت رزين تحت نيرو قرار داشته اند، الياف همگي كاملا موازي و كشيده شده هستند و در آزمايش خمش همگي همراه هم و همزمان نيروي خمشي را تحمل كرده و در نتيجه نمونه استحكام بيشتري را نشان مي‌دهد. شكل (۷) اين مطلب را نشان مي‌دهد.

نتيجه گيري

در اين پژوهش آزمايش هاي انجام شده بر روي كامپوزيت هاي ساخته شده از الياف پيوسته و يك جهته شيشه به همراه رزين اپوكسي، نشان مي‌دهد كه اعمال تنش بر الياف در هنگام پخت رزين باعث مي‌گردد تا مقاومت نمونه در برابر خمش افزايش يابد. اين آزمايشات همچنان گوياي اين امر است كه مدول خمشي نيز افزوده مي‌گردد. در هر دو مورد نشان داده شده است كه مقدار افزايش خواص مكانيكي بستگي به تنش اعمال شده بر الياف دارد و حداكثر بهبود خواص در يك تنش بهينه بدست مي‌آيد كه بستگي به نوع الياف مورد استفاده دارد. اعمال تنش فرا تر از اين مقدار بهينه باعث افت خواص مي‌گردد. نتايج اين پژوهش نشان مي‌دهد براي كامپوزيتهاي شيشه- اپوكسي استفاده شده در اين مطالعه حداكثر ۱۲ در صد مدول و ۱۹ در صد استحكام خمشي و براي كامپوزيتهاي كربن- اپوكسي حداكثر ۲۵ درصد مدول و ۱۳ درصد استحكام نمونه را مي‌توان بدين طريق افزايش داد. از اين روش مي‌توان در فرايندهايي همچون پيچش رشته[۳] بهره جست و كامپوزيتي با خواص بالاتر توليد نمود.

مراجع

1 - Wu, Z. S., Iwashita, K., Hayashi, K., Higuchi, T., Murakami, S. and Koseki, Y. (2003). "Strengthening prestressed-concrete girders with externally prestressed PBO fiber reinforced polymer sheets." *Journal of Reinforced Plastics and Composites,* Vol. 22, PP. 1269 – 1286.

2 - Wiedenman, N. and Dharan, C. K. H. (2006). "Ballistic penetration of compressively loaded composite plates." *Journal of Composite Materials,* Vol. 40, PP. 1041 - 1061.

3 - 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, PP. 2213 - 2225.

4 - Cao, Y. and Cameron, J. (2006). "Impact properties of silica particle modified glass fiber reinforced epoxy." *Composite Journal of Reinforced Plastics and Composites*, Vol. 25, PP. 761 – 769.

5 - Ghugal, Yuwaraj M. and Deshmukh, Santosh B. (2006). "Performance of alkali-resistant glass fiber reinforced concrete." *Journal of Reinforced Plastics and Composites,* Vol. 25, PP. 617 - 630.

Archive of SID

www.SID.ir

6 - Scherf, J. and Wagner H. D. (1992). "Interpretation of fiber fragmentation in carbon epoxy single fiber composites: possible fiber pre-tension effects." *Polymer Engineering & Science*, Vol . 32 No. 4, PP. 298-304.

7 - Manders, P. W. and Chou, T. W. (1983). "Enhancement of strength in composite reinforced with previously stressed fibers." *J. of Composite Materials*, Vol. 17, No. 26, PP. 26-44.

8 - Chou T. W., (1992) *Microstructural design of fiber composites* Cambridge University Press, New York.

9 - Chi, Z. F. and Chou, T. W. (1983). "An experimental study of effect of fiber prestressed of loose carbon strands on composite strength." *J. of Composite Materials*, Vol. 17, PP. 196-209.

10 - Jorge, L. D. A., Marques, A. T. and De Castro, S. T. (1990). "The influence of prestressing on the mechanical behaviour of unidirectional composites." *Proceeding of ECCM*, Vol. 4, PP. 897-902.

11 - Motahari, S. (2005). "Residual stresses in fibrous polymer composites." *J. of Polymer Science and Technology,* Vol. 18, No. 5, PP. 325-330.

12 - Popov, E. P. (1968). *Introduction to Mechanics of Solids*, Prentice Hall Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

واژه های انگلیسی به ترتیب استفاده در متن

1 -Tensile Strength
2 - Four Point Bending Test
3 - Filament Winding

Archive of SID

www.SID.ir