

خواص خمشی کامپوزیت‌های زمینه‌ی اپوکسی تقویت شده با الیاف آسیاب شده

سعید کریمی^۱، سیروس جوادپور^{۲*}

چکیده

این پژوهش، به مطالعه خواص خمشی کامپوزیت‌های زمینه‌ی اپوکسی تقویت شده با الیاف‌های آسیاب شده از دو نوع شیشه‌ی معمولی (E-glass) و شیشه‌ی با استحکام بالا (S-glass) و یک نوع کربن با استحکام بالا پرداخته است. نخست، الیاف اولیه با استفاده از آسیاب ساینده به پودر تبدیل شد و مورفولوژی آن‌ها به کمک میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مورد بررسی قرار گرفت. کامپوزیت‌های تولیدی، با مخلوط و اضافه کردن ۱wt.% پودر حاصل از آسیاب‌کاری الیاف‌های یاد شده یک رزین اپوکسی تجاری از نوع پخت در دمای بالا تبدیل شدند. تأثیر انجام عملیات گاز زدایی رزین و هم‌چنین افزودن گاما آمینو پروپیل تری اکسی سیلین (γ -APS) به عنوان عامل اتصال دهنده‌ی رزین به فاز تقویت کننده نیز بررسی شد. برای این منظور، خواص خمشی کامپوزیت‌های تولیدی با یکدیگر مقایسه و سطح شکست نمونه‌های آزمون خمش و مکانیزم‌های چقرمگی فعال با استفاده از تصاویر SEM ارزیابی شد. با افزودن ۲wt.% از γ -APS به رزین اپوکسی حاوی الیاف آسیاب شده‌ی شیشه E و سپس گاز زدایی آن، بیش‌ترین افزایش در استحکام خمشی و مدول کشسان مُماسی حاصل شد. این مقادیر به ترتیب به میزان ۱/۲۲ و ۱/۲۰ برابر نسبت به حالت خالص به دست آمد.

واژه‌های کلیدی: الیاف کربن، الیاف شیشه، آسیاب‌کاری، کامپوزیت زمینه‌ی اپوکسی، آزمون خمش.

^۱ - فارغ‌التحصیل دکتری تخصصی مهندسی مواد- بخش مهندسی مواد- دانشگاه شیراز

^۲ - استاد و عضو هیئت علمی بخش مهندسی مواد- دانشگاه شیراز

* - نویسنده مسوول مقاله: Javadpor@shirazu.ac.ir

پیشگفتار

رزین‌های اپوکسی، گروهی از مواد پلیمری و اغلب گرماسخت هستند که ترکیب بی‌نظیری از خواص را دارند. برتری این پلیمرها نسبت به سایر پلیمرهای گرماسخت، قابل ملاحظه است و از این رو به طور گسترده از آن‌ها در کاربردهای سازه‌ای استفاده می‌شود. استحکام مکانیکی بالاتر، خواص الکتریکی و حرارتی بهتر، مقاومت به خوردگی مناسب‌تر، انقباض کم‌تر در حین عملیات پخت و چسبندگی بیشتر به انواع الیاف و تقویت کننده از ویژگی‌های اصلی رزین‌های اپوکسی به شمار می‌رود [۱ و ۲]. از نارسایی‌های اصلی این رزین نیز می‌توان به حساسیت بالای آن‌ها به رشد ترک اشاره کرد [۳].

مطالعات گسترده‌ای در خصوص افزایش استحکام و مدول کششی و خمشی اپوکسی‌ها انجام شده که برای این منظور نیز انواع کامپوزیت‌ها، هیبریدهای نانویی و میکرونی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است. شایان ذکر است که تعداد و حجم تحقیقات انجام شده بر روی خواص کششی این مواد، به میزان چشمگیری بیش‌تر از خواص خمشی آن‌ها است. برای نمونه، S. Rana و همکاران با افزودن ۰٫۵ wt.% از الیاف کربن نانویی، استحکام کششی را تا ۲۰ درصد افزایش دادند [۴]. در کاری مشابه، A. Al-Turaif استحکام کششی اپوکسی را با افزودن ۳ wt.% نانو TiO_2 ، به میزان ۱۵ درصد ارتقا داد [۵]. هیبریدی متشکل از زمینه‌ی اپوکسی تقویت شده با ذرات میکرونی نیکل و ذرات نانویی آلومینا، توسط M. Martin و همکاران ساخته شد [۶]. در تحقیق یاد شده، اگرچه کامپوزیت‌سازی موجب کاهش کرنش شکست کششی نمونه‌ها تا ۵۰ درصد حالت خالص شد؛ اما استحکام کششی آن‌ها تا ۵۶ درصد ارتقا یافت. M. Nadler و همکاران، اپوکسی خالص را با افزودن ۰٫۵ wt.% نانو لوله‌های کربنی چند دیواره تقویت کردند و در ازای کاهش ۶۰ درصدی کرنش شکست خمشی، میزان استحکام شکست خمشی را تا ۳۰ درصد افزایش دادند [۷]. خواص خمشی نانو کامپوزیت‌های اپوکسی تقویت شده با نانو لوله‌های کربنی با جهت‌گیری تصادفی نیز توسط K. T. Lau و همکاران در سال ۲۰۰۳ بررسی شد [۸]. آن‌ها نتیجه گرفتند که به دلیل عدم اتصال مناسب در فصل

مشترک فاز زمینه و تقویت کننده‌ی آن سیستم کامپوزیتی، افزودن نانو لوله‌های کربنی موجب کاهش استحکام خمشی نسبت به اپوکسی خالص می‌شود. این در حالی است که تنها سه سال پس از ارائه آن گزارش، M. Moniruzzaman و همکاران نانو کامپوزیتی با زمینه اپوکسی همراه با تقویت کننده‌هایی از نانو لوله‌های کربنی تک دیواره (۰٫۵ wt.%) ساختند و موفق به ارتقای مدول و استحکام خمشی به ترتیب برابر با ۱۷ و ۱۰ درصد شدند [۹].

در تحقیق حاضر، منابع گوناگونی مورد بررسی قرار گرفت و با توجه به آن می‌توان چنین گفت که تا کنون در موارد زیادی از الیاف آسیاب شده (مانند: الیاف شیشه و الیاف کربن) برای ایجاد کامپوزیت‌های پلیمری استفاده شده است؛ اما تمرکز اصلی اغلب آن‌ها تنها بر خواص الکتریکی، سایش و سختی معطوف شده است [۱۰-۱۱]. در حقیقت به غیر از سایش، مقالات انگشت‌شماری در خصوص جنبه‌های مکانیکی تقویت رزین اپوکسی با الیاف آسیاب شده در دسترس قرار دارد. برای نمونه در سال ۱۹۸۵، T. Cotgreave اگرچه چقرمگی شکست در دمای پایین اپوکسی را با استفاده از الیاف شیشه‌ی آسیاب شده، تا ۸۸ درصد افزایش داد؛ اما استحکام کششی نمونه‌های وی تا ۱۸ درصد کاهش یافت [۱۱].

با توجه به نبود اطلاعات کافی درباره‌ی خواص مکانیکی و به ویژه خواص خمشی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف آسیاب شده؛ هدف اصلی تحقیق حاضر، بررسی تأثیر استفاده از الیاف آسیاب شده بر خواص خمشی یک رزین اپوکسی تجاری متمرکز شده است. برای این منظور، سه نوع الیاف گوناگون شیشه E، شیشه S و کربن تهیه، آسیاب و با یک روش به نسبت ساده و مقرون به صرفه برای تقویت رزین اپوکسی استفاده شده است.

مواد و روش‌ها

مواد و تجهیزات:

در این تحقیق از الیاف کربن با استحکام بالا، الیاف شیشه‌ی با استحکام بالا (S-glass) و الیاف شیشه‌ی تجاری (E-glass) به عنوان مواد اولیه برای آسیاب‌کاری استفاده شد. مشخصات الیاف‌های یاد شده و هم‌چنین

تقریبی ۱cm بریده و برای آسیاب کاری ساینده^۲ آماده شدند. یک محفظه‌ی پیرکس همراه با پره‌هایی از جنس تفلون سخت، آسیاب ساینده مورد استفاده در این تحقیق را تشکیل داد. از گلوله‌های فولادی پوشش داده شده با کروم سخت نیز به عنوان عامل ساینده در آن استفاده شد. از نسبت گلوله به پودر ۱:۱۰۰ در اتانول به عنوان محیط سرد کننده و روان‌ساز استفاده شد. پره‌های تفلونی این آسیاب، با نیروی محرکه‌ی یک دریل ستونی و با سرعت چرخشی ۳۰۰RPM برای مدت زمان ۳۰ دقیقه به حرکت در آمدند که حاصل آن، یک دوغاب از الیاف آسیاب شده بود. دوغاب حاصل، به مدت ۲۴ ساعت در دمای ۱۲۰ درجه‌ی سانتی‌گراد در گرم‌کن خشک شد و پس از الک کردن، پودر با ابعاد کمتر از ۳۰۰ μm به عنوان الیاف آسیاب شده مورد استفاده قرار گرفت.

تفاوت ترکیب شیمیایی دو نوع الیاف شیشه E و S به ترتیب در جدول‌های ۱ و ۲ آمده است. فاز زمینه‌ی کامپوزیت را یک رزین اپوکسی تجاری از نوع پخت در دمای بالا (رزین LV 1189 و سخت کننده HA 41) تشکیل داد که از شرکت رزین مکرر خریداری شده بود. از گاما آمینو پروپیل تری اکسی سیلین^۱ (γ -APS) نیز به عنوان عامل اتصال دهنده‌ی فاز زمینه به تقویت کننده استفاده شد. از تجهیزات اصلی مورد استفاده در این تحقیق، می‌توان به میکروسکوپ الکترونی روبشی (Cambridge-360) و دستگاه آزمایش خمش (Santam-STM150) اشاره کرد.

آسیاب کاری ساینده:

نخست، الیاف اولیه با استفاده از قیچی دستی به ابعاد

^۱.gamma-aminopropyl triethoxy silane

^۲. Attrition Milling

جدول ۱- مشخصات الیاف‌های اولیه

الیاف	برند	کد	قطر الیاف (μm)	Tex (g/km)
شیشه E	CAMELYAF	-	۲۵	۲۴۰۰
شیشه S	LBIE	HS4C	۱۱	۱۲۰۰
کربن	TORAYCA	T700	۷	۸۰۰

جدول ۲- مقایسه ترکیب شیمیایی دو خانواده از الیاف شیشه‌ی مورد استفاده در تحقیق حاضر [۱]

الیاف	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	TiO ₂	Zr ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	Fe
شیشه E	۵۲-۵۶	۴-۶	۱۲-۱۵	۲۱-۲۳	۰٫۴-۰٫۴	۰٫۲-۰٫۵	-	۰-۱	۰٫۲-۰٫۴	۰٫۲-۰٫۷
شیشه S	۶۰-۶۵٫۵	-	۲۳-۲۵	۰-۹	۶-۱۱	-	۰-۱	۰-۰٫۱	۰-۰٫۱	-

ساخت نمونه‌های کامپوزیتی:

برای ساخت نمونه‌های کامپوزیتی، از نسبت وزنی رزین به سخت کننده ۸۰:۱۰۰ استفاده و برای همه‌ی نمونه‌ها، مقدار عامل تقویت کننده برابر با 1 wt.% در نظر گرفته شد. الیاف آسیاب شده به مدت ۵ دقیقه، با استفاده از همزن مغناطیسی، با رزین مخلوط شد و پس از افزودن سخت کننده به آن مخلوط، هم‌زدن به مدت ۵ دقیقه دیگر نیز ادامه یافت تا یک مخلوط یکنواخت و آماده‌ی قالب‌گیری ایجاد شود. پس از تزریق مخلوط حاصل در قالب‌های شیشه‌ای با ابعاد حفره‌ی ۸۰×۱۰×۳۴mm، مرحله‌ی پخت اولیه برای مدت زمان دو ساعت در دمای محیط انجام شد و سپس فرایند پخت نهایی برای مدت زمان ۲۴ ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد ادامه یافت. نمونه‌های حاصل، بر اساس استاندارد ASTM D790-03 تحت آزمون خمشی قرار گرفتند [۱۶]. لازم به ذکر است که در این آزمون، فاصله‌ی میان دو تکیه‌گاه نمونه و سرعت حرکت فک دستگاه به ترتیب برابر با ۶۰mm و ۱mm/min در نظر گرفته شد. در پایان، سطح شکست

نمونه‌ها نیز پس از پوشش‌دهی با لایه‌ای از طلا، با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مطالعه شدند. مرحله‌ی نمونه‌سازی و انجام آزمون خمشی، برای دو حالت دیگر نیز دنبال شد. اگرچه حساسیت به وجود

حفره‌های گازی در روش تست خمشی سه نقطه‌ای، کمتر از شیوه‌ی چهار نقطه‌ای آن است؛ اما به هر حال اثر مخرب این حفره‌ها به خوبی به اثبات رسیده است [۱۷]. از این رو در حالت اول، مخلوط‌های شامل رزین، عامل پخت و الیاف آسیاب شده به مدت زمان ۳۰ دقیقه در یک محفظه‌ی خلأ با میزان خلأ نسبی 250 torr گاز زدایی و سپس در قالب تزریق شدند. از سوی دیگر، همان طور که پیش‌تر نیز گفته شد، برای آسیاب‌کاری الیاف، از آسیاب ساینده در محیط اتانول استفاده شد و از این رو امکان آسیب سطحی و حذف آهار از سطح الیاف وجود داشت و در نتیجه ممکن بود فاز زمینه قادر به اتصال مناسب به سطح تقویت کننده و انتقال نیرو به آن نباشد. برای بهبود چسبندگی در فصل مشترک، بسته به شرایط معمولاً رزین اپوکسی را با افزودن ۵-۱۱ wt.% عامل اتصال دهنده اصلاح می‌کنند [۱۸ و ۱۹]. بنابراین در حالت دوم، دو درصد وزنی از APS- γ نیز به عنوان عامل اتصال دهنده به مخلوط رزین و تقویت کننده افزوده و پس از گاز زدایی، در قالب تزریق شد. شیوه‌ی کد گذاری نمونه‌های ساخته شده، در جدول ۳ آمده است که در آن P مخفف Pristine epoxy و S, E و C به ترتیب بیانگر الیاف S-glass, E-glass و Carbon شده است.

جدول ۳- کد گذاری نمونه‌های ساخته شده

اجزای تشکیل دهنده	کد نمونه	گاز زدایی	اتصال دهنده
اپوکسی بدون عامل تقویت کننده	P1	x	x
	P2	✓	x
	P3	✓	✓
اپوکسی تقویت شده با پودر الیاف شیشه E	E1	x	x
	E2	✓	x
	E3	✓	✓
اپوکسی تقویت شده با پودر الیاف شیشه S	S1	x	x
	S2	✓	x
	S3	✓	✓
اپوکسی تقویت شده با پودر الیاف کربن	C1	x	x
	C2	✓	x
	C3	✓	✓

* حالت (1): ساخت نمونه بدون انجام گاز زدایی و بدون افزودن عامل اتصال دهنده

** حالت (2): ساخت نمونه با انجام گاز زدایی و بدون افزودن عامل اتصال دهنده

** حالت (3): ساخت نمونه با انجام گاز زدایی و با افزودن عامل اتصال دهنده

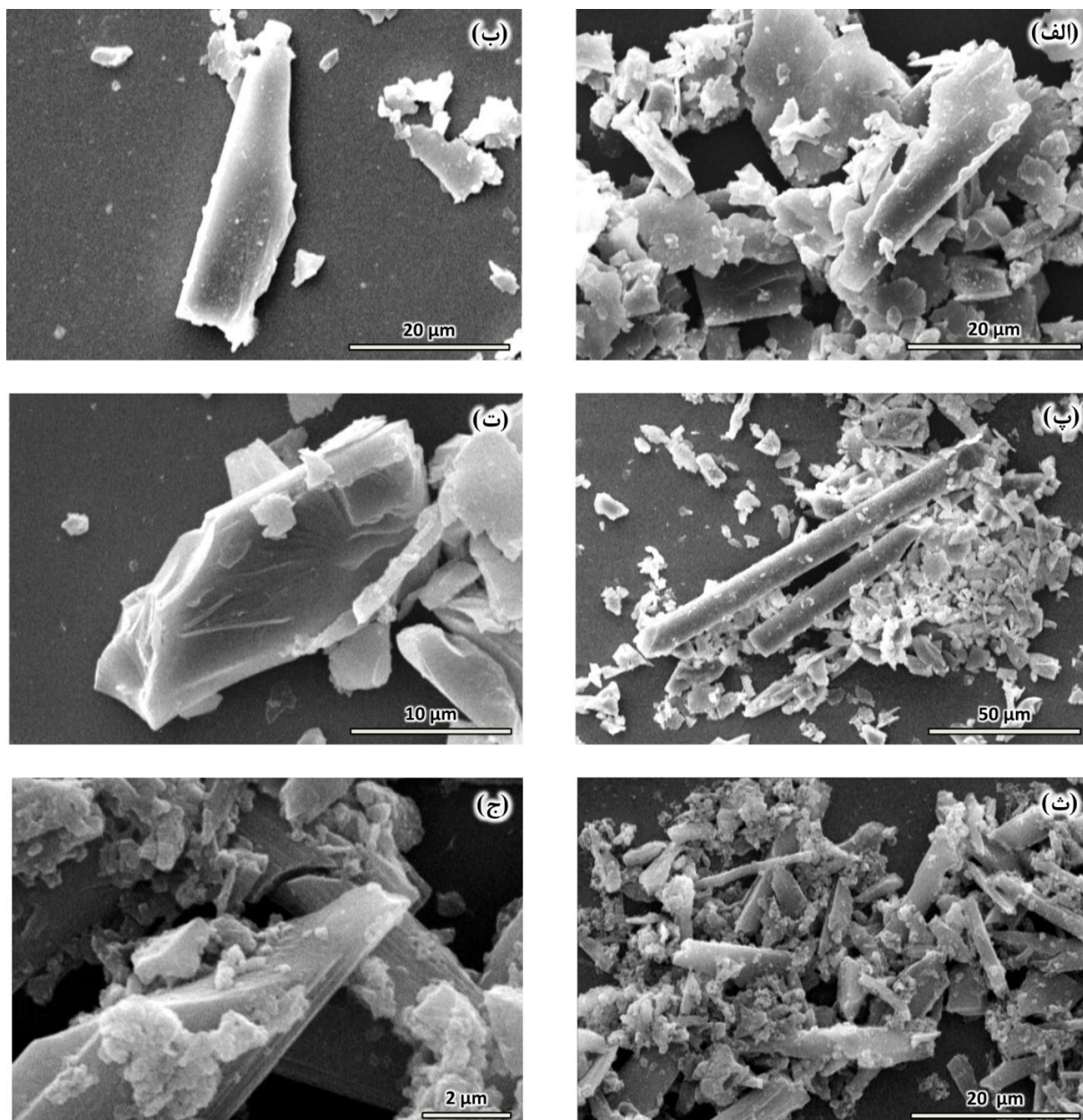
نتایج و بحث

مورفولوژی الیاف آسیاب شده:

شکل ۱، تصاویر SEM مربوط به مورفولوژی هر سه الیاف آسیاب شده را همراه با سطوح شکست هر یک از آنها نشان می‌دهد. این تصاویر، پس از عبور ذرات از روزنه‌های الک گرفته شده است. چنین به نظر می‌رسد که به غیر از الیاف کربن، آسیاب‌کاری سایر الیاف‌ها به ذراتی

با نسبت ابعادی پایین منجر شده است. این در صورتی است که می‌توان ذرات آسیاب شده‌ی الیاف کربن را "الیاف کوتاه"^۱ در نظر گرفت. موضوع دیگر، مکانیزم حاکم بر فرایند آسیاب‌کاری است: شکست برای الیاف کربن و سایش برای الیاف شیشه. با توجه به شکل ۱، می‌توان طبیعت تُرد الیاف را نیز با شکست آنها در زوایای نزدیک به ۴۵ درجه مشاهده کرد.

¹: Short Fiber



شکل ۱- تصاویر SEM به ترتیب برای الیاف شیشه E، الیاف شیشه S و الیاف کربن: الف، پ و ت مربوط به مورفولوژی پودر و ب، ت و ج مربوط به شیوه شکست هر یک از ذرات پودر حاصل از آسیاب‌کاری الیاف

خواص خمشی کامپوزیت‌های تولیدی

در روابط بالا، کمیت‌های σ_f ، ε_f ، E_B ، P ، D ، L ، m ، b و d به ترتیب عبارتند از: تنش شکست خمشی (MPa)، کرنش شکست خمشی (-)، مدول کشسان مُماسی^۱ (GPa)، نیروی اعمالی در نقطه‌ی شکست (N)، مقدار خم شدن در نقطه‌ی شکست (mm)، شیب نمودار نیرو بر حسب میزان خم شدن (N/mm)، فاصله‌ی بین دو تکیه‌گاه (۶۰ mm)، پهنای نمونه (۱۰ mm) و ضخامت نمونه (۴ mm).

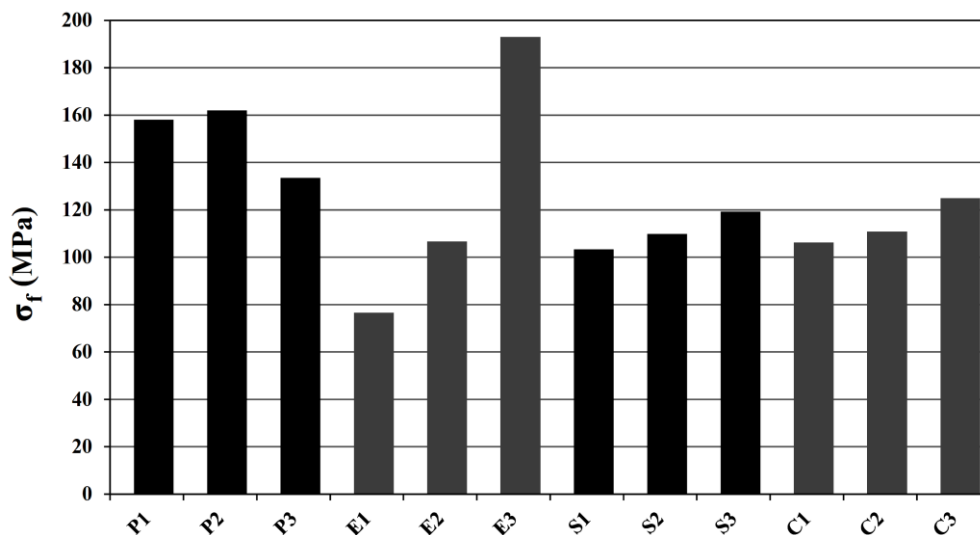
شکل‌های ۲ تا ۴ به ترتیب تغییرات استحکام، کرنش شکست و مدول کشسان مُماسی نمونه‌های کامپوزیتی تولیدی را نشان می‌دهند. هر یک از داده‌های موجود در این نمودارها، حاصل انجام آزمون خمشی سه نقطه‌ای بر روی سه نمونه و سپس میانگین‌گیری از نتایج آن‌ها است. این کمیت‌ها بر اساس استاندارد ASTM D790-03 و به ترتیب مطابق با روابط ۱ تا ۳ محاسبه شده است:

$$\sigma_f = 3PL/2bd^2 \quad (۱)$$

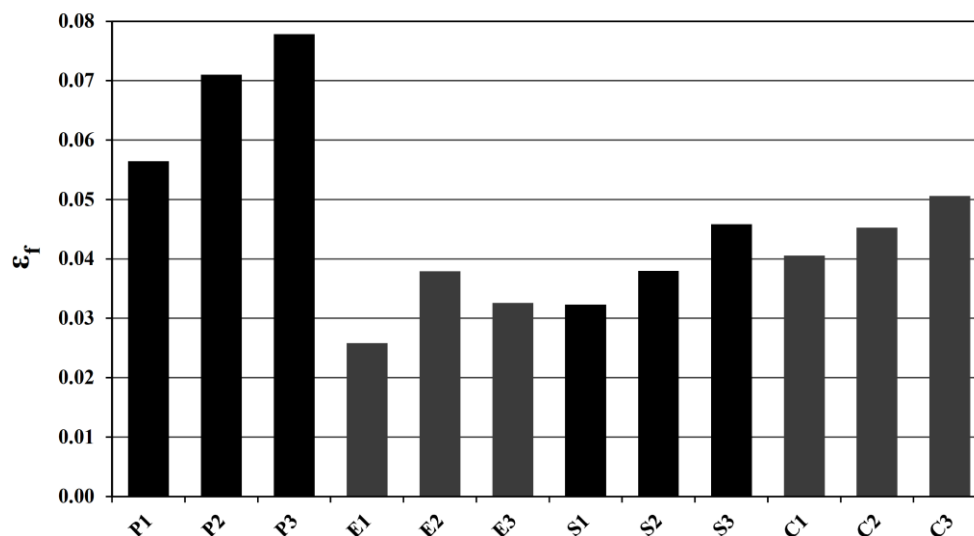
$$\varepsilon_f = 6Dd / L^2 \quad (۲)$$

$$E_B = L^3m / 4000bd^3 \quad (۳)$$

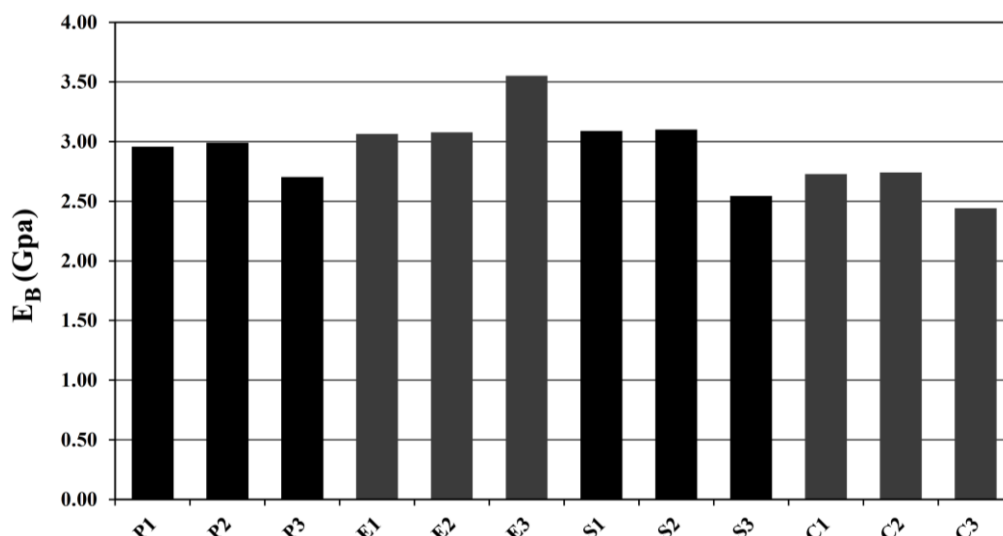
^۱. Tangent Modulus of Elasticity



شکل ۲- مقادیر تنش شکست خمشی نمونه‌های خالص و کامپوزیتی



شکل ۳- مقادیر کرنش شکست خمشی نمونه‌های خالص و کامپوزیتی



شکل ۴- مقادیر مدول کشسان مُماسی نمونه‌های خالص و کامپوزیتی

استحکام نهایی هر یک از نمونه‌های کامپوزیتی، بیشتر از حالتی است که در آن‌ها از عامل اتصال دهنده استفاده نشده است. از سوی دیگر، میزان افزایش چشم‌گیر استحکام خمشی نمونه‌ی کامپوزیتی E3، حاکی از سازگاری هر چه بیشتر این عامل اتصال دهنده با الیاف شیشه E است؛ به گونه‌ای که تنها در این نمونه می‌توان از دیدگاه افزایش استحکام خمشی، کامپوزیت‌سازی را موفقیت‌آمیز قلمداد کرد. در این حالت، استحکام به میزان ۲۲٪ نسبت به نمونه‌ی P1 افزایش یافته است.

با توجه به شکل ۲، انجام فرایند گاز زدایی در همه‌ی نمونه‌ها موجب افزایش استحکام خمشی شده است. این افزایش، چندان هم دور از انتظار نیست؛ زیرا با حذف یا کاهش حفرات گازی، عملاً نقاط تمرکز تنش، کاهش و توانایی تحمل نیروی ماده، بهبود می‌یابد [۱۷]. افزودن عامل اتصال دهنده، استحکام ماده‌ی اولیه را کاهش داده است؛ اما به دلیل افزایش استحکام فصل مشترک میان فاز تقویت کننده و زمینه، قابلیت انتقال نیرو از زمینه به الیاف آسیاب شده افزایش یافته است و در نتیجه میزان

بررسی سطوح شکست میکروسکوپی:

شکل ۵ سطوح شکست میکروسکوپی نمونه‌های C3، S3 و E3 را نشان می‌دهد. در شکل ۵-الف، به خوبی مکانیزم‌های جدایش شدید فصل مشترک الیاف کربن و زمینه^۱، بیرون زدن الیاف^۲ و استخوان ماهی^۳ نمایان است [۲۱]. مکانیزم چقرمگی اول، در شکل ۵-ب نیز به وضوح مشاهده می‌شود. جدایش کامل فصل مشترک الیاف شیشه S و زمینه در شکل ۵-پ قابل ملاحظه است. بیرون زدن این نوع از الیاف نیز در شکل ۵-ت مشهود است. در حقیقت این فضای زیاد میان تقویت کننده و زمینه، از فصل مشترک و چسبندگی ضعیف و هم چنین عدم کارایی مؤثر عامل اتصال دهنده نشئت می‌گیرد. در شکل ۵-ث از یک سو آثاری از رزین اپوکسی چسبیده شده به سطح یک ذره در نمونه‌ی E3 مشاهده می‌شود و از سوی دیگر نیز تغییر شکل پلاستیک فاز زمینه در پیرامون آن ذره، به سمت محیط خارجی آن امتداد یافته است. به طورعموم این حالت در شرایطی رخ می‌دهد که عامل اتصال دهنده، یک فصل مشترک مناسب و قوی میان الیاف و زمینه ایجاد کرده باشد؛ به گونه‌ای که استحکام این اتصال، بیشتر از استحکام فاز زمینه باشد [۲۲ و ۲۳]. در یک کار مشابه، M. Etcheverry و همکارش به بررسی خواص مکانیکی پلی‌پروپیلن تقویت شده با الیاف شیشه و بهبود فصل مشترک هر دو فاز پرداختند [۲۳]. در تحقیق یاد شده نیز برای نمونه‌هایی که افزایش خواص مکانیکی را از خود نشان داده‌اند، پدیده‌ی چسبیدن زمینه‌ی پلیمری به فاز تقویت کننده دیده می‌شود. با توجه به این توضیحات، به دلیل هم‌خوانی مناسب‌تر عامل اتصال دهنده در نمونه‌ی E3، اتصال قوی‌تر و فضای جدایش کمتری بین زمینه و تقویت کننده مشاهده می‌شود (شکل‌های ۵-ث و ج) و به این ترتیب

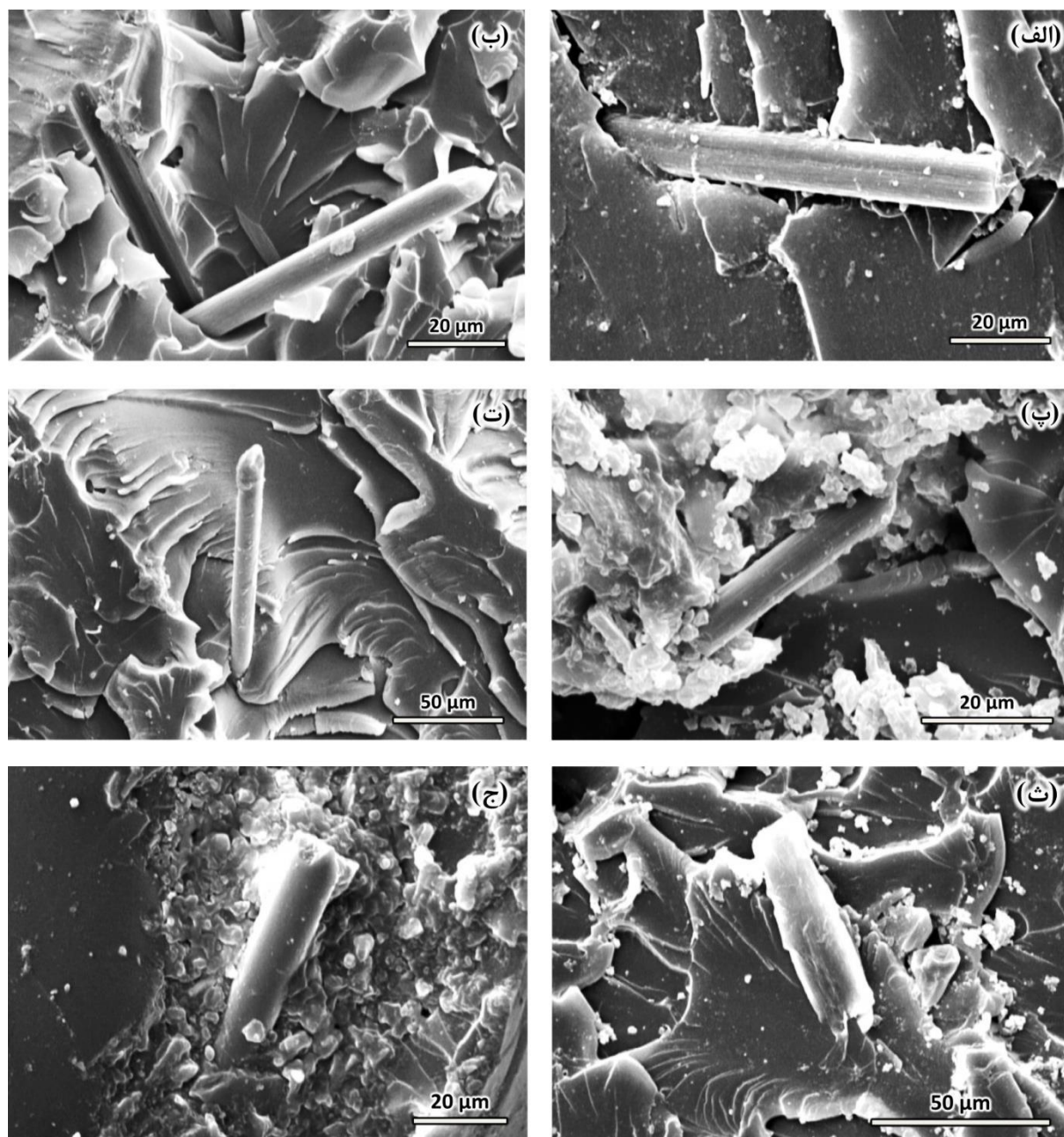
همان گونه که شکل ۳ نشان می‌دهد، میزان کرنش خمشی همه‌ی نمونه‌های کامپوزیتی‌ گاز زدایی شده، بالاتر از نوع گاز زدایی نشده‌ی آن‌ها است. از میان نمونه‌های کامپوزیتی، تنها میزان کرنش شکست نمونه‌ی E3 در حدود ۵۰ درصد کاهش یافته است. این موضوع را نیز می‌توان به هم‌خوانی مطلوب عامل اتصال دهنده با این سیستم کامپوزیتی تعبیر کرد؛ زیرا در این شرایط، کرنش شکست ماده‌ی کامپوزیتی، به مقدار کرنش شکست ماده‌ی تقویت کننده نزدیک‌تر شده است [۲۰].

تأثیر عملیات گاز زدایی بر تغییر میزان مدول کشسان مُماسی همه‌ی نمونه‌ها، قابل اغماض است (شکل ۴). در این حالت نیز تنها در مورد نمونه‌ی E3 می‌توان موفقیت‌آمیز بودن کامپوزیت‌سازی و تأثیر مثبت استفاده از عامل اتصال دهنده را در افزایش میزان سفتی خمشی مشاهده کرد. در این حالت، مدول کشسان مُماسی به میزان ۲۰ درصد نسبت به نمونه‌ی P1 ارتقا یافته است. این در حالی است که در سایر نمونه‌ها، استفاده از عامل اتصال دهنده موجب نرمی خمشی آن‌ها شده است. نمونه‌ی P3، چکش‌خواری بالاتری نسبت به حالت P2 از خود نشان داده است، مدول کشسان مماسی و استحکام کمتری دارد و کرنش شکست آن نیز بالاتر است و در نتیجه نه تنها افزودن این نوع از عامل اتصال دهنده باعث تردی فاز زمینه نشده است؛ بلکه آن را انعطاف‌پذیرتر نیز کرده است. این افزایش انعطاف‌پذیری را می‌توان ناشی از کاهش تشکیل پیوندهای عرضی مؤثر دانست؛ زیرا بخشی از پیوندهای شیمیایی گروه اپوکسی با سمت آلی عامل اتصال دهنده تشکیل می‌شوند و این در حالی است که سمت غیر آلی آن بدون پیوند باقی مانده است.

¹. Interface De-bonding

². Fiber Pull-out

³. Fish Bone



شکل ۵- تصاویر SEM از سطح شکست میکروسکوپی نمونه‌های C3 (الف و ب)، S3 (پ و ت) و E3 (ث و ج).

ارتباط داد. آهار الیاف، ضخامتی در حد $0.1 \mu\text{m}$ دارد و عواملی مانند نوع زمینه‌ی پلیمری، میزان محافظت سطحی مورد نیاز برای الیاف و قیمت بستگی دارد و به همین دلیل نیز از مواد پایه‌ی پلیمری متنوعی برای آهارزنی الیاف استفاده می‌شود [۱ و ۲۴].

انتظار می‌رود که نیروی بیشتری از فاز زمینه به فاز تقویت کننده منتقل شده باشد.

عدم استحکام بخشی و نامناسب بودن فصل مشترک در نمونه‌ی S3 در مقایسه با نمونه‌ی E3 را می‌توان به تفاوت در ترکیب شیمیایی و آهار سطحی^۱ الیاف اولیه

^۱. Sizing

بر مدول کشسان مُماسی نداشت.

۳- میزان استحکام نهایی هر یک از نمونه‌های کامپوزیتی که در آن‌ها از عامل اتصال دهنده استفاده شد، بالاتر از حالت بدون افزودنی به دست آمد.

۴- احتمال شسته شدن آهار از سطح الیاف شیشه S بیشتر از نوع E است؛ زیرا در حضور محلول‌هایی مانند آب، حاوی اکسیدهای مخرب بیشتری است.

۵- بهترین خواص خمشی را نمونه‌ی E3 از خود نشان داد.

به طور کلی می‌توان چنین نتیجه گرفت که با آسیاب‌کاری الیاف شیشه‌ی تجاری، با روشی آسان‌تر و مقرون به صرفه‌تر از بسیاری از تقویت‌کننده‌های میکرونی و نانویی معمولی، میزان استحکام و سفتی خمشی اپوکسی را افزایش داد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله، دستاوردهای خود را مدیون همکاری صمیمانه و بی‌دریغ آقای دکتر سید مجتبی زبرجد و آقای دکتر رحیم اقرء به ترتیب استاد بخش مهندسی مواد دانشگاه شیراز و استادیار پژوهشکده مکانیک پژوهشگاه فضایی ایران و همچنین آقای مهندس داریوش آذری مدیر عامل محترم کارخانه‌ی توان محور آذین صنعت و کارکنان آن مجموعه می‌دانند. در حقیقت این پژوهش بدون حمایت‌های علمی، مالی و فنی ایشان ممکن نبود.

اگرچه اختلاف فاحشی میان ترکیب شیمیایی الیاف شیشه E و S وجود ندارد (جدول ۲)؛ اما همین تغییر شیمیایی کافی است تا خواص فیزیکی و مکانیکی کاملاً متفاوتی را از خود نشان دهند. برای نمونه، دمای ذوب الیاف شیشه E و S به ترتیب حدود ۱۰۶۵ و ۱۵۰۰ درجه سانتی‌گراد است [۱]. این تغییر در ترکیب شیمیایی می‌تواند تغییر خواص سطحی مانند تغییر در میزان ترشوندگی را به دنبال داشته باشد. همچنین افزایش میزان اکسیدهای نامنظم در سطح الیاف و به ویژه SiO_2 ، Fe_2O_3 ، Al_2O_3 می‌تواند منجر به جذب هر چه بیشتر ملکول‌های مانند آب، هیدراته شدن آهار پلیمری و در نتیجه کاهش اثر چسبندگی آن شود [۲۴]. مجموع اکسیدهای یاد شده در S-glass (حدود ۸۷ درصد) بالاتر از E-glass (حدود ۷۰ درصد) است و در نتیجه احتمال شسته و جدا شدن آهار سطحی اولیه آن را در حین فرایند آسیاب‌کاری در حضور اتانول افزایش می‌دهد. به این ترتیب اگر همه‌ی پارامترهای دخیل بر چسبندگی سطحی رزین به آهار (مانند جنس الیاف و نوع آهار) ثابت فرض شود، بسیار خوش‌بینانه خواهد بود که بتوان با افزایش میزان عامل اتصال دهنده، کمبود آهار را در سطح شیشه S جبران کرد؛ زیرا عامل اتصال دهنده به خودی خود تأثیرات مطلوبی بر خواص فیزیکی و مکانیکی رزین ندارد و افزایش آن چندان توصیه نمی‌شود.

نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج این تحقیق می‌توان چهار مورد را به عنوان دستاوردهای شاخص برشمرد:

۱- شیوه‌ی شکست همه‌ی الیاف‌ها به صورت ترد بود و تنها ذرات الیاف کربن آسیاب شده به عنوان الیاف کوتاه در نظر گرفته شد.

۲- فرایند گاز زدایی در همه‌ی نمونه‌ها موجب افزایش استحکام و کرنش خمشی شد؛ در حالی که تأثیر چندانی

References :

- 1- ASM Handbook: Composites, p. 161-162, ASM International, 2001.
- 2- W. Jiang, F. L. Jin and S. J. Park, "Thermo-Mechanical Behaviors of Epoxy Resins Reinforced with Nano- Al_2O_3 Particles", Journal of Industrial and Engineering Chemistry, Vol. 18, pp. 594-496, 2001.
- 3- G. Akovali, Handbook of composite fabrication, p. 26-27, iSmithers Rapra Publishing, Ankara, 2001.
- 4- S. Rana, R. Alagirusamy and M. Joshi, "Development of Carbon Nanofibre Incorporated Three Phase Carbon/Epoxy Composites with Enhanced Mechanical, Electrical and Thermal Properties", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 42, pp. 439-445, 2011.
- 5- H. A. Al-Turaif, "Effect of Nano TiO_2 Particle Size on Mechanical Properties of Cured Epoxy Resin", Progress in Organic Coatings, Vol. 69, pp. 241-246, 2010.
- 6- M. Martin, S. Hanagud and N. Thadhani, "Mechanical Behavior of Nickel+Aluminum Powder-Reinforced Epoxy Composites", Materials Science and Engineering: A, Vol. 443, pp. 209-218, 2007.
- 7- M. Nadler, J. Werner, T. Mahrholz, U. Riedel and W. Hufenbach, "Effect of CNT Surface Functionalisation on the Mechanical Properties of Multi-Walled Carbon Nanotube/Epoxy-Composites", Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, Vol. 40, pp. 932-937, 2009.
- 8- K. T. Lau, S. Q. Shi, L. M. Zhou and H. M. Cheng, "Micro-Hardness and Flexural Properties of Randomly-Oriented Carbon Nanotube Composites", Journal of Composite Materials, Vol. 37, pp. 365-376, 2003.
- 9- M. Moniruzzaman, F. Du, N. Romero and K. I. Winey, "Increased Flexural Modulus and Strength in SWNT / Epoxy Composites by a New Fabrication Method", Polymer, Vol. 47, pp. 293-298, 2006.
- 10- J. Milewski, "A Study of the Packing of Milled Fibreglass and Glass Beads", Composites, Vol. 4, pp. 258-265, 1973.
- 11- T. Cotgreave, "Milled Fibre Reinforced Epoxy Resin - an Engineering Polymer Composite", Polymer, Vol. 26, pp. 1419-1422, 1985.
- 12- P. Vasconcelos, F. Lino, A. Magalhaes and R. Neto, "Impact Fracture Study of Epoxy-Based Composites with Aluminium Particles and Milled Fibres", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 170, pp. 277-283, 2005.
- 13- N. Chand and A. Naik, "Development and High Stress Abrasive Wear Behavior of Milled Carbon Fiber Reinforced Epoxy Gradient Composites", Polymer Composites, Vol. 29, pp. 736-744, 2008.
- 14- N. Chand and A. Nigrawal, "Investigations on DC Conductivity Behaviour of Milled Carbon Fibre Reinforced Epoxy Graded Composites", Bulletin of Materials Science, Vol. 31, pp. 665-668, 2008.
- 15- N. Chand and M. K. Sharma, "Development and Sliding Wear Behaviour of Milled Carbon Fibre Reinforced Epoxy Gradient Composites", Wear, Vol. 264, pp. 69-74, 2008.
- 16- ASTM D790 (2003), "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials".
- 17- M. Azlan, "The Effect of Voids on the Flexural Fatigue Properties of Carbon/Epoxy Composites", Ph.D. Thesis University of Southampton, School of Engineering Science, 2010.
- 18- H. He and K. Li, "Silane Coupling Agent Modification on Interlaminar Shear Strength of Carbon Fiber / Epoxy / Nano- CaCO_3 Composites", Polymer Composites, Vol. 33, pp. 1755-1758, 2012.

- 19- E. Földes, J. Gulyás, S. Rosenberger and B. Pukánszky, "Chemical Modification and Adhesion in Carbon Fiber/Epoxy Micro Composites; Coupling and Surface Coverage", *Polymer Composites*, Vol. 21, pp. 387-395, 2000.
- 20- R. M. Jones, *Mechanics of Composite Materials*, 2ed., p., 164-165, CRC Press, London, 1998.
- 21- R. A. Pearson and A. F. Yee, "Influence of Particle Size and Particle Size Distribution on Toughening Mechanisms in Rubber-Modified Epoxies", *Journal of Materials Science*, Vol. 26, pp. 3828-3844, 1991.
- 22- H. H. Kim, S. Y. Kim, D. H. Kim, C. Y. Oh and N. J. Jo, "Effect of Silane Coupling Agent on the Flexural Property of Glass Fiber Reinforced Composite Film", *Journal of Materials Science and Chemical Engineering*, Vol. 2, pp. 38-42, 2014.
- 23- M. Etcheverry and S. E. Barbosa, "Glass Fiber Reinforced Polypropylene Mechanical Properties Enhancement by Adhesion Improvement", *Materials*, Vol. 5, pp. 1084-1113, 2012.
- 24- J. K. Kim and Y. W. Mai, *Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites*, p., 174-183, Elsevier, New York, 1998.

