# بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی نانوکامپوزیت‌های زمینه پلی‌استری تقویت‌شده با کاربیدسیلیسیم و فایبرگلاس

رامینه راد[1*]، احمد منشی[2]

[1] کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد
[2] استاد، دانشگاه صنعتی اصفهان

تاریخ ثبت اولیه: ۹۲/۶/۳۰، تاریخ دریافت نسخهٔ اصلاح‌شده: ۹۲/۱۲/۴، تاریخ پذیرش قطعی: ۹۲/۱۲/۶

**چکیده** در تحقیق حاضر به بررسی رفتار سایش ساینده کامپوزیت‌های زمینه پلی‌استری تقویت‌شده با درصدهای گوناگون پودر کاربید سیلیسیم و الیاف فایبرگلاس پرداخته شده است. تاثیر درصدهای گوناگون الیاف فایبرگلاس و پودر کاربید سیلیسیم و همچنین فاصله لغزشی بر روی جرم از دست‌رفته مورد آزمایش قرار گرفته است. با افزایش فاصله لغزشی، میزان درصد جرم از دست‌رفته کاهش می‌یابد و با کاهش درصد جرم از دست‌رفته، مقاومت در برابر سایش کامپوزیت زیاد خواهد شد. ویژگی‌های استحکام مواد به نوع و کیفیت تقویت‌کننده بستگی دارد. از اینرو نمونه شامل ۱٪ وزنی فایبرگلاس در درجه اول و ۳٪ وزنی کاربید سیلسیم در درجه دوم بیشترین استحکام را از خود نشان دادند. وزن مخصوص نانو کامپوزیت‌ها با افزودن تقویت‌کننده به زمینه تمایل به کاهش از خود نشان داد در حالیکه درصد تخلخل باز نانو کامپوزیت‌ها تمایل به افزایش داشتند. در نهایت بررسی ریزساختار کامپوزیت‌های تقویت شده توسط آنالیز پراش اشعه‌ی ایکس و میکروسکوپ الکترونی روبشی انجام شد که به دلیل درصد ناچیز تقویت‌کننده‌ها به فاز زمینه، فاز شناسی خیلی قابل شناسایی نبود.

**کلمات کلیدی:** نانوکامپوزیت، ساینده، پلی‌استر، فایبرگلاس، کاربید سیلیسیم

# The Investigating to Physical and Mechanical properties of Nano Polyester matrix composites reinforced with Fiber Glass and silicon carbide

**R. Raad[1] and A. Monshi[2]**

[1] *Ms.c student, Faculty of Materials Engineering, Islamic Azad university of Najaf Abad.*
[2] *Professor, Department of Materials Engineering, Isfahan university of Technology, Isfahan, Iran*

**Abstract** An experimental study was conducted to determine the abrasive wear behavior of different weight percentage fiberglass and silicon carbide powder filled polyester composites. The effect of glass fiber and SiC powder concentration and sliding distance on the weight loss of composites has been analyzed. The weight loss depends on fiber glass and powders concentration. The weight loss decreases with the increase of sliding distance and wear resistance increases with the decrease of percentage of weight loss. Strength characteristics on the material depending on the type and quantity of fillers have been tested. Sample having 1 weight percentage (wt%) of fiber glass and 3 percentage (wt%) of SiC show the maximum strength. Density of the Nano composites tends to decrease with adding filler into matrix, While porosity percentage and water absorption percentage of the Nano composites tend to increase. At least morphologies and microstructures of samples were characterized by various techniques such as X-Ray diffraction (XRD), Scanning electron microscopy (SEM), nevertheless the X-Ray diffraction could not identify the phases because of the small percentage of reinforcements.

**Keywords:** Nanocomposites, abrasive, polyester, fiber glass, silicon carbide.

***عهده‌دار مکاتبات**

**نشانی:** دانشگاه آزاد نجف آباد

**تلفن:** ۰۳۱۱-۶۲۵۲۸۱۱، **دورنگار:** -، **پیام‌نگار:** ramineh_r66@yahoo.com

## ۱– مقدمه

امروزه نانو کامپوزیت‌ها در مقایسه با پلیمرهای مشابه خالص و کامپوزیت‌های متداول، به دلیل داشتن خواص مکانیکی، فیزیکی و شیمیایی مطلوب‌تر، کاربرد وسیعی در زمینه‌های مختلف صنعتی و تحقیقاتی یافته‌اند. نانوکامپوزیت‌های پلیمری نسل جدیدی از مواد هستند که شامل یک ماتریس پلیمری و درصد کمی از یک تقویت‌کننده نانومتری می‌باشند. تقویت‌کننده‌های نانومتری به علت داشتن نسبت طول به قطر زیاد، ابعاد بسیار کوچک و میزان سطح بسیار بالا در مقایسه با تقویت‌کننده‌های معمولی باعث بهبود خواص پلیمر می‌شود. وزن کمتر قطعه نهایی در مقایسه با کامپوزیت‌های معمولی، استحکام مکانیکی بالاتر، مقاومت بالا در برابر نفوذ گازها و بخارات، سطح ظاهری بهتر، فرآیندپذیری راحت‌تر و تحمل حرارتی بالاتر، از ویژگی‌های این مواد است. از طرف دیگر نانوکامپوزیت‌ها به دلیل داشتن خواص مکانیکی مناسب نسبت به مواد پلیمری مشابه، دارای طول عمر بالاتر بوده و لذا مشکلات زیست محیطی مربوط به پسماند آنها نیز کاهش می‌یابد[۱]. کاربردهای واقعی نانوکامپوزیت‌های پلیمری با سرعت یکنواختی در حال گسترش است که این امر به علت بالا بودن قیمت مواد اولیه می‌باشد و می‌توان گفت برخی کاربردها به دلایل اقتصادی با شکست مواجه شده است. تحقیقات بیشتری در دستور کار قرار گرفته تا نانو مواد جدیدی ساخته شود که علاوه بر مزیت‌های مواد قدیمی‌تر، عیوب آن‌ها را از لحاظ قیمت یا خواص مکانیکی، فیزیکی و سایشی برطرف نماید. این مواد جدید، نانوسیلیکات و کاربیدسیلیسیم می‌باشند. مواد اولیه برای ساخت چنین موادی دارای فراوانی بسیاری بوده و تولید آنها ساده‌تر و در نتیجه قیمت پایین‌تری دارند. همچنین دارای خواص مکانیکی و فیزیکی خوبی هستند و بازار تجاری بسیار عالی به صورت بالقوه دارند[۲].

در سال ۲۰۰۰ چاند[1] رفتار مقاومت به سایش کامپوزیت پلی‌استر با فایبرگلاس را مورد بررسی قرار داد. یکی از علت‌های استفاده از فایبرگلاس بعنوان تقویت‌کننده این است که از گسترش آسیب‌ها طی سایش جلوگیری می‌کند. افزودن الیاف به ترکیب‌های پلیمری در مقایسه با پلیمر خالص باعث افزایش استحکام مکانیکی کامپوزیت می‌شود[۳]. تایب[2] و همکارانش در سال ۲۰۰۷ افزودن تقویت‌کننده فایبرگلاس به کامپوزیت زمینه پلی‌استر را برای مصارف سایشی چند مرحله‌ای مورد مطالعه قرار دادند. در تحقیق ذکر شده، تاثیر سه درجه کاغذ ساینده SiC (۱۵۰۰،۱۰۰۰،۴۰۰) در رفتار سایش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج آزمایشگاهی نشان داده که سرعت سایش کامپوزیت زمینه پلی‌استر تقویت‌شده با فایبرگلاس با افزایش اندازه ذرات ساینده و سرعت چرخشی بطور قابل ملاحظه‌ای افزایش پیدا خواهد کرد، در حالیکه تمایل دارد با افزایش بار اعمالی نرمال، کاهش یابد[۴]. در سال ۲۰۱۰ میشرا[3] و همکارش عدم یکنواختی سایش در کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف گیاهی باگاس را مورد مطالعه قرار دادند. در مقاله میشرا، اهمیت عدم یکنواختی سایش کامپوزیت بعنوان تابعی از بار و اندازه ذره ساینده مشاهده شده است. بنابراین نرخ سایش ساینده کامپوزیت، قویا به بار و اندازه ذره بستگی دارد. به همین علت با افزایش بار و اندازه ذره نرخ سایش زیاد می‌شود[۵].

در تحقیق حاضر نخست رزین پلی‌استر همراه با سخت‌کننده‌های مناسب آمیخته شد و از ذرات ساینده کاربید سیلیسیم به‌عنوان تقویت‌کننده استفاده گردید. سپس با ساختن نمونه‌های متفاوت؛ درجه استحکام، سختی و مقاومت به سایش آن‌ها اندازه‌گیری شد. بعد از آن فایبرگلاس که نقش تقویت‌کننده دارد در مقادیر مختلف اضافه گردید و آزمایش‌های استحکام، سختی و سایش در مورد آنها به عمل آمده و بهترین ترکیب و دانه‌بندی معرفی شد. همچنین در این پروژه اثر میزان درصدهای گوناگون کاربید سیلیسیم و فایبرگلاس بر خواص استحکام فشاری سرد، وزن مخصوص و تخلخل بررسی شده است و در نهایت بررسی‌های میکروسکوپی (SEM) از نحوه اتصال ذرات به زمینه صورت گرفته است.

1-chand

2-El-Tayeb

3-Mishra

## ۲- مواد اولیه و روش تحقیق

جهت ایجاد فاز زمینه از ترکیب رزین پلی‌استر غیراشباع ساخت ترکیه به همراه اتیل متیل کتون پر اکسید(MEKP) ساخت ایران کمپانی ایران یزد به عنوان سخت‌کننده و نفتالایت کبالت ساخت ترکیه به عنوان تسریع‌کننده مورد استفاده قرار می‌گیرد. از الیاف شیشه– FiberGlass از کمپانی Alfa Aesar به عنوان تقویت‌کننده به همراه کاربید سیلیسیم– SiC با اندازه مش ۲۰۰ با خلوص ۹۹/۹ ٪ از کمپانی LSM[1] استفاده شده است. در مرحله‌ی اولیه‌ی تحقیق، رزین پایه، تسریع‌کننده و سخت‌کننده به نسبت استوکیومتری مخلوط شدند که بر این اساس میزان ۱٪ نفتالایت کبالت را در۹۷٪ رزین پلی‌استر مخلوط کرده و در انتها میزان ۲٪ پراکسید به عنوان سخت‌کننده به رزین اضافه شد. بعد از آماده شدن یک بچ ۱۰ گرمی رزین، ترکیبی از تقویت‌کننده‌ها که شامل پودر کاربیدسیلیسیم و فایبرگلاس است بطور انفرادی و ترکیبی به فاز زمینه اضافه گردید، که این ترکیبات در جدول (۱) نشان داده شده است.

**جدول ۱.** نمونه‌های کامپوزیت زمینه پلی‌استری تقویت شده

| | فاز زمینه | | | فاز تقویت‌کننده | |
|---|---|---|---|---|---|
| | Polyester | Peroxide | Cobalt | FiberGlass | SiC |
| ۱ | ٪۹۷ | ٪۲ | ٪۱ | – | ٪۱ |
| ۲ | ٪۹۷ | ٪۲ | ٪۱ | – | ٪۲ |
| ۳ | ٪۹۷ | ٪۲ | ٪۱ | – | ٪۳ |
| ۴ | ٪۹۷ | ٪۲ | ٪۱ | ٪۱ | – |
| ۵ | ٪۹۷ | ٪۲ | ٪۱ | ٪۲ | – |
| ۶ | ٪۹۷ | ٪۲ | ٪۱ | ٪۳ | – |
| ۷ | ٪۹۷ | ٪۲ | ٪۱ | ٪۱ | ٪۱ |

در مرحله بعدی، پودر کاربید سیلیسیم و الیاف فایبرگلاس با نسبت‌های درصدی معین و گوناگون به فاز زمینه اضافه شد، سپس توسط قاشق همزن مخلوط گردید و به صورت ترکیبی یکنواخت درآمد. مایع به دست آمده ژله مانند است که درون قالب‌های آلومینیومی با ابعاد ۹×۱۱/۳ میلی‌متر ریخته شد و به منظور همگن شدن مناسب پودر ، به مدت ۵ دقیقه، در دمای اتاق نگهداری شد تا سخت شود و بعد از سفت شدن، نمونه از درون قالب آلومینیومی بیرون آورده شد. قرص‌های بدست آمده دارای قطر ۹/۳ میلی‌متر با ارتفاع ۱۱ میلی‌متری هستند ولی با این تفاوت که حضور گوناگون تقویت‌کننده‌ها، نمونه‌ها را به رنگ‌های مختلف درآورده که این حالت در هنگام آزمایش مقاومت در برابر سایش اثر خود را تا حدودی نشان داد. قطر نمونه‌های حاصل در مقایسه با قطر قالب تا حدودی افزایش یافت و این امر به دلیل زیاد شدن غلظت ترکیب و بالا آمدن سطح کامپوزیت برای خروج راحت‌تر از قالب می‌باشد. بعد از تهیه قرص‌ها، آزمایش استحکام فشاری سرد، مقاومت به سایش و آزمایش‌های خواص ظاهری بر روی آن‌ها انجام شد. اندازه‌گیری خواص فیزیکی (درصد جذب آب، درصد تخلخل، دانسیته و درصد انحلال در آب) نمونه‌های کامپوزیت، طبق استاندارد ASTM C0020-00R05 صورت گرفت. در این مرحله نمونه‌ها برای بررسی میزان تخلخل و جذب آب آماده شدند. وزن اولیه ($w_1$) تک‌تک نمونه‌ها اندازه‌گیری گردید، بعد از آن قرص‌ها درون بشرهای ۱۰۰ میلی‌لیتری حاوی آب مقطر به مدت ۲۴ ساعت قرارگرفتند تا وزن غوطه وری($w_2$) آن مشخص شود. در نهایت توسط دستگاه تعلیق، وزن معلق در آب ($w_3$) اندازه‌گیری گردید. همچنین توسط فرمول‌های ارشمیدس، درصد تخلخل باز و دانسیته برای هر قطعه طبق روابط زیر محاسبه شد و در فصل نتایج و بحث به بررسی خواص فیزیکی هرکدام از نمونه‌ها پرداخته شده است.

$$\text{وزن حجمی مخصوص}\ \left(\frac{g}{cm^{3}}\right) = \frac{\text{وزن اولیه}}{\text{حجم}}$$

$$\text{درصد تخلخل باز} = \frac{\text{وزن اولیه} - \text{وزن غوطه وری}}{\text{حجم}} \times 100$$

$$\text{درصد وزنی جذب آب} = \frac{\text{وزن اولیه} - \text{وزن غوطه وری}}{\text{حجم}} \times 100$$

بعد از آن نوبت به آزمایش مقاومت نمونه‌ها در برابر سایش است، به همین منظور برای راحتی کار از یکسری ورقه‌های سنباده p100 استفاده شد. قبل از شروع به ساییدن، وزن اولیه قرص‌ها اندازه‌گیری گردید، سپس هرکدام از

1- London and Scandinavian Metallurgical

قرص‌ها روی یک ورق سنباده به طور جداگانه با حرکت رفت و برگشتی یکسان و اعمال نیروی یکسان ساییده شدند. در نهایت با اندازه‌گیری وزن بعد از سایش و جایگذاری در فرمول مربوطه درصد کاهش وزن قطعه به دست آمد. هرچه میزان درصد کاهش وزن بیشتر باشد، مقاومت در برابر سایش نمونه کمتر خواهد بود.

به منظور شناسایی فازهای ایجاد شده در اثر افزودن تقویت‌کننده‌های کاربیدسیلیسیم و فایبرگلاس به فاز زمینه پلیمری از پراش پرتو ایکس استفاده شد. از آن جایی که نمونه‌ها بسیار مستحکم و کوچک هستند و قابل خرد شدن توسط دستگاه آسیاب‌کاری نمی‌باشند ابتدا آن‌ها را با چکش خرد کرده و سپس توسط آسیاب‌کاری پودر و برای انجام آزمایش آماده شدند. آزمایش‌های پراش پرتو ایکس با استفاده از دستگاه پراش پرتو ایکس مدل (PW3040, Philips X'pert) تحت ولتاژ ۴۰KV و جریان ۳۰mA انجام شدند. نرخ نگهداری در هر گام ۱ ثانیه، اندازه گام‌ها ۰/۰۵ درجه و محدوده پراش ۱۰ تا $^\circ$۹۰ بر اساس محل قرار گرفتن پیک‌ها انتخاب گردید. همچنین استحکام فشاری سرد (CCS) نمونه‌ها طبق استاندارد ASTM CO 133_97R03 اندازه‌گیری شد.

جهت اندازه‌گیری استحکام نمونه‌ها از دستگاه جک دیجیتال ILE[1] انگلستان استفاده شد. در این مرحله قرصی که هیچ آزمایشی روی آن انجام نگرفته آماده برای آزمایش استحکام فشاری است. از دستگاه استحکام فشاری سرد ولی به روش برزیلی استفاده شد چرا که میزان کشش نمونه مدنظر است. به همین منظور قرص بطور افقی در دستگاه قرار گرفت و با اعمال نیرو، قرص به جای اینکه فشرده شود، کشیده شد. بعد از آن با بدست آمدن حداکثر نیرو می‌توان طبق فرمول برزیلی میزان استحکام هرکدام از قرص‌ها را تخمین زد. میکرو ساختار و مورفولوژی فازهای ایجاد شده در اثر افزودن تقویت‌کننده‌ها به زمینه توسط دستگاه میکروسکوپ الکترونی روبشی LEO 4357P ساخت کمبریج کشور انگلستان بررسی شد. در تحقیق حاضر، ابتدا خواص فیزیکی و مکانیکی مختلف بر روی نمونه‌های کامپوزیت زمینه پلی‌استر خالص و کامپوزیت‌های تقویت شده با مواد مختلف مورد بررسی قرار گرفت. سپس از دستگاه پراش پرتو ایکس برای فاز شناسی و میکروسکوپ الکترونی روبشی برای مطالعه عیوب سطحی استفاده شد.

## ۳- نتایج و بحث

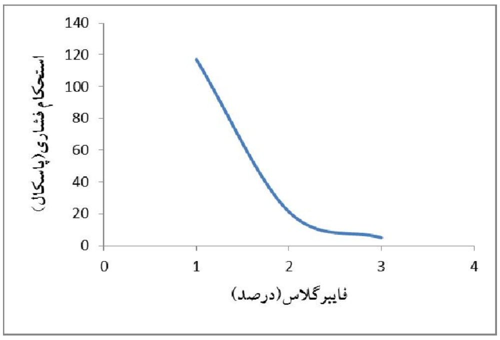
همانطور که در مروری بر منابع به خواص افزودن الیاف به کامپوزیت‌های پلیمری اشاره شد، در تحقیق حاضر نیز برای مقایسه این تقویت‌کننده با تقویت‌کننده کاربیدسیلیسیم و همچنین ترکیبی کلی از تقویت‌کننده‌ها، مورد مطالعه قرار گرفت. در جدول (۲) خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت‌شده با درصدهای مختلف فایبرگلاس بررسی می‌شود.

بر خلاف انتظار در شکل (۱)، نمونه‌ها هنگام افزایش میزان درصد تقویت‌کننده با کاهش استحکام روبه رو شده‌اند. با افزودن ۱٪ فایبرگلاس به زمینه پلی‌استر و وارد کردن نیرو توسط دستگاه استحکام فشاری، نمونه هیچ عکس العملی نسبت به نیروی وارد شده نشان نداد و قطعه سالم ماند. نیرو تا ۲۰۰۰۰ نیوتن ادامه یافت و بلاخره در این مقدار نیرو، ترکی جزئی ایجاد شد. این روند نشان‌دهنده انعطاف‌پذیری بالای کامپوزیت زمینه پلی‌استری تقویت‌شده با فایبرگلاس است. از طرف دیگر با افزایش میزان درصدهای فایبرگلاس به زمینه یک شیب نزولی مشاهده می‌شود که این امر بر خلاف توقع برای رسیدن به درصد بهینه از فاز دوم، با ایجاد میکرو ترک-هایی بعد از افزوده شدن الیاف تا ۳٪ ، میزان استحکام قطعه را کاهش داد.

**جدول ۲.** خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت زمینه پلی استر تقویت‌شده با فایبرگلاس

| زمینه | تقویت‌کننده | استحکام فشاری (MPa) | درصد کاهش وزن | وزن مخصوص $(\frac{g}{cm^3})$ | درصد تخلخل باز |
|---|---|---|---|---|---|
| ۹۷٪رزین | ۱٪فایبرگلاس | ۱۱۷ | ٪۸/۶۹ | ۱/۲۷ | ۱/۱۱ |
| ۲٪پراکسید | ۲٪فایبرگلاس | ۲۱/۱۸ | ٪۸/۵۸ | ۱/۲۳ | ۱/۲ |
| ۱٪کبالت | ۳٪فایبرگلاس | ۱۸ | ٪۸/۸۴ | ۱/۲۴ | ۳/۴ |

1- International Leading Equipment



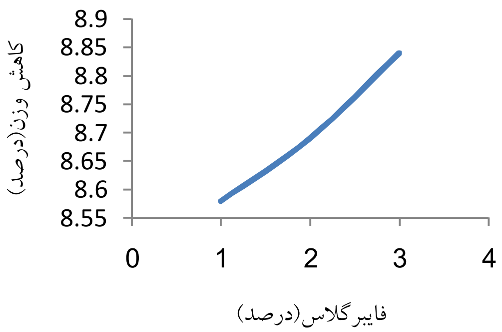

**شکل ۱.** تست استحکام نمونه کامپوزیت زمینه پلی‌استر تقویت شده با فایبرگلاس

نمونه‌های کامپوزیتی تقویت‌شده با فایبرگلاس برخلاف سایر نمونه‌ها تحت سایش سنباده برای میزان درصدهای مختلف، طبق نمودار ترسیم شده در شکل (۲) شیب تقریبا یکنواختی را دارا است. هرچند شیب نمودار بصورت صعودی زیاد می‌شود ولی بر اساس داده‌های ثبت شده در جدول (۲) دیده می‌شود که درصد کاهش وزن برای هر سه نمونه تقریباً نزدیک به هم است و اختلاف زیادی ندارند.

بعد از بررسی میزان استحکام و مقاومت در برابر سایش کامپوزیت‌های تقویت شده با فایبرگلاس، به مطالعه خواص فیزیکی نمونه‌ها در شکل (۳) پرداخته می‌شود. به علت ساختار الیافی که تقویت‌کننده فایبرگلاس دارد، وجود مقادیر ۱ الی ۳٪ فایبرگلاس باعث کاهش تراکم و افزایش تخلخل شده است که این امر به خاطر تقابل الیاف با زمینه می‌باشد. استحکام و مقاومت به سایش با افزایش میزان درصد فایبرگلاس روند کاهشی دارد. حتی مرز مشترک، خود باعث ایجاد ترک شده و با افزایش مقدار مرز مشترک، ترک‌ها رشد یافته و شکست قطعه در نیروهای کمتری را ایجاد کرده است.

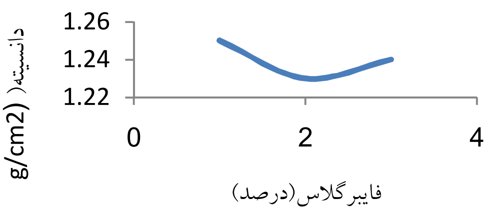
بعد از بررسی فایبرگلاس بر روی زمینه پلی‌استر، در جدول (۳) به مطالعه خواص فیزیکی و مکانیکی درصدهای مختلف کاربیدسیلیسم افزوده شده به زمینه پلی‌استر پرداخته می‌شود.

کامپوزیت‌های پلی‌استری تقویت‌شده با کاربید سیلیسیم از مستحکم‌ترین نوع ساینده‌ها می‌باشند، زیرا از نظر استحکام فشاری بسیار بالا بوده است و با افزایش درصد وزنی آن‌ها، میزان استحکام افزایش می‌یابد.

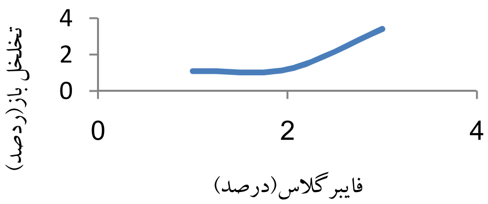



**شکل ۲.** تست مقاومت به سایش نمونه کامپوزیت زمینه پلی‌استر تقویت شده با فایبرگلاس

الف)




ب)



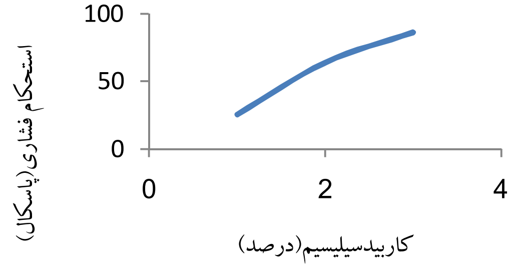

**شکل۳.** خواص فیزیکی کامپوزیت پلی‌استر تقویت‌شده با فایبرگلاس؛ الف) وزن مخصوص، ب) درصد تخلخل باز

**جدول ۳.** خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت زمینه پلی استر تقویت شده با کاربید سیلیسیم

| درصد تخلخل باز | وزن مخصوص $(\frac{g}{cm^3})$ | درصد کاهش وزن | استحکام فشاری (MPa) | تقویت کننده | زمینه |
|---|---|---|---|---|---|
| ٪۲/۴ | ۱/۲۶ | ٪۸/۴ | ۲۵/۸۴ | SiC ٪۱ | ٪۹۷رزین ٪۲پراکسید ٪۱کبالت |
| ٪۳/۵ | ۱/۲۵ | ٪۷ | ۶۳/۸۵ | SiC ٪۲ | |
| ٪۴/۵ | ۱/۲۲ | ٪۳/۵ | ۸۶ | SiC ٪۳ | |

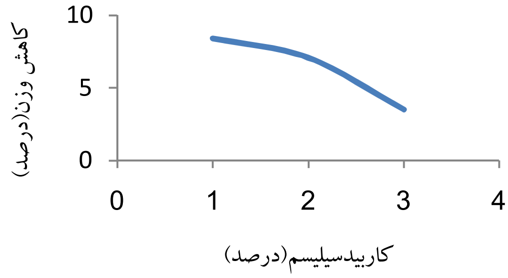
همچنین کامپوزیت تقویت‌شده با کاربید سیلیسیم از انعطاف بالایی برخوردار است؛ به این علت که نمونه‌ها هنگام

وارد کردن نیرو به قطعات، کشیده و پهن می‌شوند. در کامپوزیت تقویت شده با ۳٪ کاربید سیلیسیم پس از اعمال نیرو به قطعه، ارتفاع آن به ۳/۵mm کاهش یافته است بدون اینکه هیچ ترکی در قطعه ایجاد شود. این امر حاکی از انعطاف‌پذیری واستحکام بالای قطعه ۳ درصدی می‌باشد. نمونه شامل ۲٪ کاربید سیلیسیم به مراتب شرایطی همانند نمونه تقویت شده با ۳٪ SiC را دارا است ولی با این تفاوت که میزان استحکام آن کمتر می‌باشد. در قطعه‌ای که توسط ۱٪ کاربید سیلیسیم تقویت شده است، با اعمال ۴۰۰۰ نیوتن نیرو، ترک کوچکی مشاهده می‌شود.




**شکل ۴.** تست استحکام نمونه کامپوزیت زمینه پلی‌استر تقویت شده با کاربیدسیلیسیم

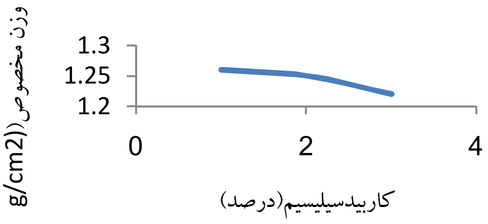
در شکل (۵) کاهش یکباره درصد کاهش وزن با افزایش درصد وزنی از ۱ تا ۳ درصد کاربید سیلیسیم دیده می‌شود. با افزایش درصد کاربیدسیلیسیم از ۲٪ به ۳٪ طی سایش توسط سنباده، میزان وزن کاسته شده از قطعه به نصف رسیده است، در صورتی‌که میزان کاهش جرم از دست‌رفته از ۱٪ کاربیدسیلیسیم به ۲٪ از آن تفاوت چشمگیری نداشته است. ولی با بالا رفتن میزان درصد کاربیدسیلیسیم به بیش از ۳ ٪ مقاومت در برابر سایش قطعه افزایش خواهد یافت.



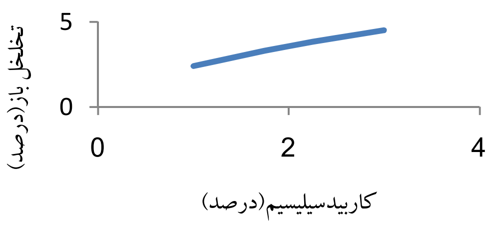

**شکل ۵.** تست مقاومت به سایش نمونه کامپوزیت زمینه پلی‌استر تقویت شده با کاربیدسیلیسیم

باتوجه به شکل (۶) بررسی خواص فیزیکی روی قطعه‌های کامپوزیتی زمینه پلی‌استر تقویت‌شده با کاربیدسیلیسیم دیده می‌شود. طبق نمودار رسم شده در شکل (۶– الف) با زیاد شدن درصد وزنی SiC کاهش تراکم برای قطعه‌های کامپوزیتی دیده می‌شود. به همین علت با زیاد شدن درصد وزنی ذرات از ۱ تا ۳ درصد، میزان درصد تخلخل باز رو به افزایش می‌باشد. این امر نشان می‌دهد دانسیته حجمی ذرات ریز کاربید سیلیسیم کم است و حجم زیادی را اشغال می‌کند و وجود آن باعث انبساط می‌گردد. ارتباط این ذرات با زمینه پلی‌استر بسیار خوب بوده است بطوریکه علی‌رغم کاهش تراکم، افزایش خواص مکانیکی استحکام و مقاومت به سایش ایجاد شده است. پیوند قوی بین ذرات کاربیدسیلیسیم و زمینه مانع پیشرفت ترک و باعث افزایش استحکام و مقاومت به سایش شده است.

الف)




ب)




شکل ۶. خواص فیزیکی کامپوزیت زمینه پلی‌استر تقویت شده با کاربیدسیلیسیم؛ الف) وزن مخصوص، ب) درصد تخلخل باز

بعد از بررسی تقویت‌کننده‌های کاربید سیلیسیم و فایبرگلاس به مطالعه برروی ترکیب این دو تقویت‌کننده به زمینه پلی‌استری پرداخته شده است. جدول (۴) به بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی این کامپوزیت ترکیبی پرداخته است. در مقایسه‌ی میزان تراکم نمونه‌های ارائه شده، بیشترین تراکم برای کامپوزیت تقویت‌شده با الیاف فایبرگلاس می‌باشد.

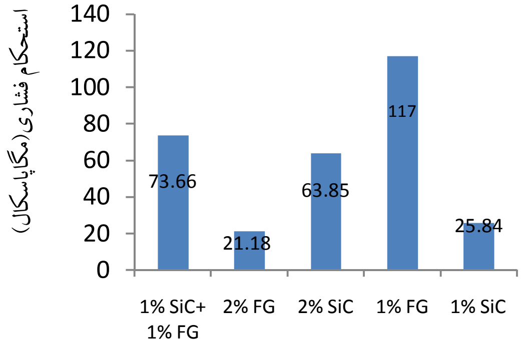
همچنین وجود ٪۱ SiC در مقایسه با کامپوزیت ترکیبی نیز باعث حضور دانسیته مناسب و تخلخل ۱ درصدی می‌شود که تولید آن را توجیه پذیر می‌کند.

**جدول ۴.** خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت پلی‌استری تقویت‌شده با SiC و فایبرگلاس

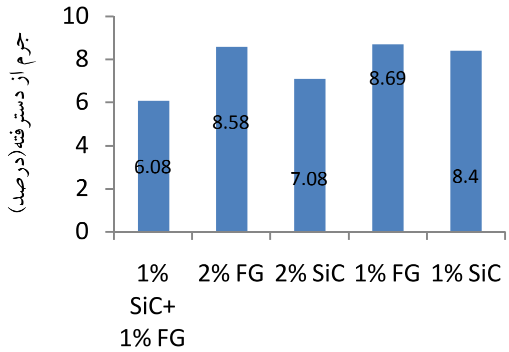
| درصد تخلخل باز | وزن مخصوص $(\frac{g}{cm^3})$ | درصد کاهش وزن | استحکام فشاری (MPa) | تقویت کننده | زمینه |
|---|---|---|---|---|---|
| ٪۱/۳ | ۱/۲۶ | ٪۶/۰۸ | ۷۳/۶ | FG٪۱ SiC۱ ٪ | ٪۹۷رزین ٪۲ اسید ٪۱کبالت |

همانطور که در شکل (۷) رسم شده است با افزودن کاربید سیلیسیم به فایبرگلاس ترکیب بسیار مستحکمی ایجاد شده است، تا حدی که استحکام نمونه به ۳/۵ برابر نسبت به نمونه ٪۲ فایبرگلاس و ٪۱ کاربید سیلیسیم رسیده است. در بین نمونه‌های شامل ٪۱ فایبرگلاس، بهترین استحکام متعلق به خود نمونه بدون اضافه‌شونده دیگری است که نشان می‌دهد فایبرگلاس علاوه بر ایجاد کامپوزیت با رزین پلی‌استر و تقویت زمینه، چسبندگی خوبی با زمینه ایجاد نموده و نسبت به پلی‌استر تنها ٪۹۱ افزایش استحکام داده است. از طرف دیگر حضور ٪۱ SiC در کنار ٪۱ فایبرگلاس تا حدودی کاهش استحکام نشان می‌دهد که به خاطر اثر سایندگی می‌توان چنین ترکیبی را بکار برد، اگرچه اتصال SiC با زمینه کمتر از فایبرگلاس و زمینه بوده است و ترک‌های ناشی از کاهش استحکام در مرز مشترک رخ داده است. حضور ٪۲ فایبرگلاس از مقدار بهینه گذشته و ضمن کاهش اتصالات فایبرگلاس و زمینه، کاهش استحکام داده است.

نظر به قدرت سایندگی کاربیدسیلیسیم نمونه شامل ٪۱ SiC و ٪۱ فایبرگلاس کمترین درصد کاهش وزن و بیشترین مقاومت در برابر سایش برای کامپوزیت تقویت‌شده با کاربید سیلیسیم نسبت به دو نمونه دیگر در نمودار رسم شده در شکل (۸) دیده می‌شود. در این نمودار حضور ٪۱ فایبرگلاس به تنهایی مقاومت سایشی کمتری دارد و اضافه کردن ٪۱ فایبرگلاس میزان کاهش وزن را افزایش و مقاومت به سایش را کاهش داده است. از طرف دیگر افزودن فایبرگلاس به خاطر بافت الیافی‌اش، کمک به بالا رفتن سختی نمونه و در نهایت مقاوم نمودن قطعه در برابر سایش را بهبود می‌بخشد.




**شکل ۷.** مقایسه تست استحکام نمونه‌های کامپوزیت پلی‌استری تقویت شده با SiC و فایبرگلاس

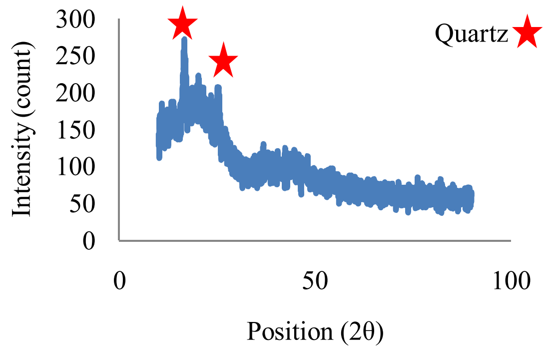



**شکل ۸** مقایسه تست مقاومت به سایش نمونه‌های کامپوزیت پلی‌استری تقویت شده با SiC و فایبرگلاس

### ۳-۱- آنالیز فازی XRD از ساختار کامپوزیت‌های زمینه پلی‌استر

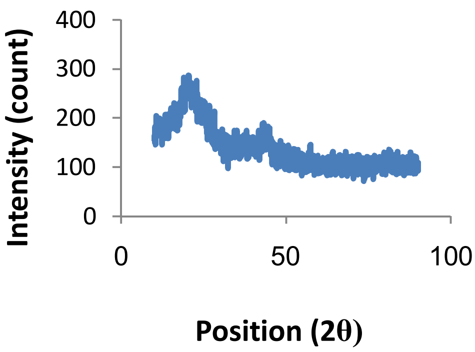
بعد از بررسی خواص فیزیکی و مکانیکی کامپوزیت‌های زمینه پلی‌استری تقویت‌شده، نمونه‌های منتخب توسط آسیاب‌کاری پودر و برای آزمایش XRD آماده شدند. به دلیل میزان درصد کم تقویت‌کننده‌ها در زمینه پلی‌استر، توان شناسایی فازهای موجود بسیار کم است. با این حال دو نمونه کامپوزیتی که توسط پودر کاربیدسیلیسیم و الیاف فایبرگلاس تقویت‌شده‌اند، مورد آزمایش قرار گرفته و الگوهای زیر را ارائه کرده است. در شکل (۹) آنالیز XRD از نمونه کامپوزیتی تقویت‌شده با ٪۳ فایبرگلاس پس از ۲ ساعت آسیاب‌کاری را نشان می‌دهد. مطابق با شکل، نمونه پس از پودر شدن، حاوی کوارتز آزاد است که عدم ایجاد پیوند شیمیایی بین رزین

پلی‌استر و الیاف فایبرگلاس را نشان می‌دهد. ساختار آمورف به دلیل حضور پلی‌استر و فایبرگلاس در این کامپوزیت پایدار است، ولی چون میزان درصد فایبرگلاس ناچیز است از نظرکمی نمی‌توان گفت چه مقدار کوارتز واکنش داده است. همچنین در نقاط دیگر شکل علاوه بر دو پیک موجود، کوارتز نیز موجود است با این تفاوت که در شبکه پلی‌استری ادغام شده است.




**شکل ۹.** الگوی XRD از نمونه کامپوزیت زمینه پلی‌استر تقویت‌شده با ۳٪ فایبرگلاس

افزودن درصد کمی پودر کاربید سیلیسیم به کامپوزیت زمینه پلی‌استر منجر به انجام پیوند فیزیکی مابین فاز زمینه و فاز تقویت‌کننده خواهد شد. ساختار این کامپوزیت به علت حضور ۳ درصدی کاربیدسیلیسیم و درگیری فیزیکی فاز اول و دوم، شبه‌کووالانس خواهد بود و شکل اصلی خود را نشان نمی‌دهد. در نتیجه نمی‌توان پیک شارپی برای SiC در شکل (۱۰) دید و فاز تقویت‌کننده در سیستم پلیمری ادغام شده است و شبکه آمورف بوجود آورده است.




**شکل ۱۰.** الگوی XRD از نمونه کامپوزیت زمینه پلی‌استر تقویت‌شده با ۳٪ کاربیدسیلیسیم

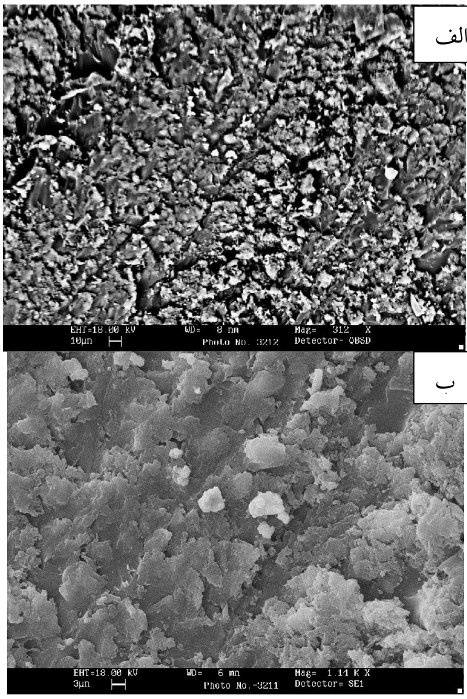
### ۳-۲- آنالیز میکروسکوپی SEM از ساختار کامپوزیت‌های زمینه پلی‌استر

در نمونه کامپوزیتی زمینه پلی‌استر تقویت شده با پودر کاربیدسیلیسم به علت سنگین بودن ذرات فاز تقویت‌کننده نسبت به فاز زمینه، ذرات SiC ته‌نشین می‌شوند. همانطور که در تصویر SEM شکل (۱۱-الف) مشاهده می‌شود، از الکترون‌های برگشتی استفاده شده است، زیرا الکترون‌های ثانویه نتوانستند تصویر خوبی از ساختار کامپوزیتی با فاز دوم کاربید سیلیسیم بدهند. این امر به دلیل انرژی بیشتر الکترون‌های برگشتی است که از عمق بیشتری می‌آیند و هرچه انعکاس الکترونی بیشتر باشد، تصویر گرفته شده سفیدتر خواهد بود. در شکل (۱۱-الف)، تصویر SEM از ساختار نحوه توزیع پودر کاربید سیلیسیم در زمینه پلی‌استر با بزرگنمایی ۳۱۲ برابر، از نواحی تیره و روشن شامل ذرات SiC و رزین پلی‌استر را نشان می‌دهد. از آن‌جایی که طبق الکترون‌های برگشتی احتمال می‌رود ذرات سفیدتر پودر کاربید سیلیسیم باشند، می‌توان گفت اندازه این ذرات حدود ۸-۳ $m\mu$ می‌باشد. شکل (۱۱-ب)، تصویر SEM برای کامپوزیت تقویت‌شده با SiC را با استفاده از الکترون‌های ثانویه با بزرگنمایی ۱۱۴۰ برابر نشان داده است. از آن‌جایی که عناصر سنگین‌تر روشن‌تر هستند، پس احتمال می‌رود مناطق مشخص شده در این شکل متعلق به ذرات کاربید سیلیسیم با اندازه دانه ۳ $m\mu$ باشد.

در کل از آن جایی که ذرات سنگین کاربید سیلیسیم در کف قالب ته نشین می‌شود، راه عملی این است که قبل از ریختن مواد به درون قالب چندبار همزده شود و همزمان ویسکوزیته (گرانروی) مایع را افزایش داد، یعنی در عملیات صنعتی، سخت‌کننده بیشتری از نسبت استوکیومتری را بکار برد.

در شکل (۱۲)، تصویر SEM از نمونه کامپوزیت زمینه پلی‌استری تقویت‌شده با فایبرگلاس در بزرگنمایی‌های گوناگون مشاهده می‌شود. در آزمایش میکروسکوپ الکترون روبشی، نمونه منتخب دارای حفره‌ای در سطحش می‌باشد که طی عکس‌برداری از نمونه توسط این حفره به عمق نمونه دست یافت. شکل (۱۲-الف) از تصویر عمق حفره ذکر شده در بزرگنمایی ۱۰۰ که پخش شدن الیاف در زمینه پلی‌استر را نشان می‌دهد، گرفته شده است. در شکل (۱۲-ب)، چسبندگی

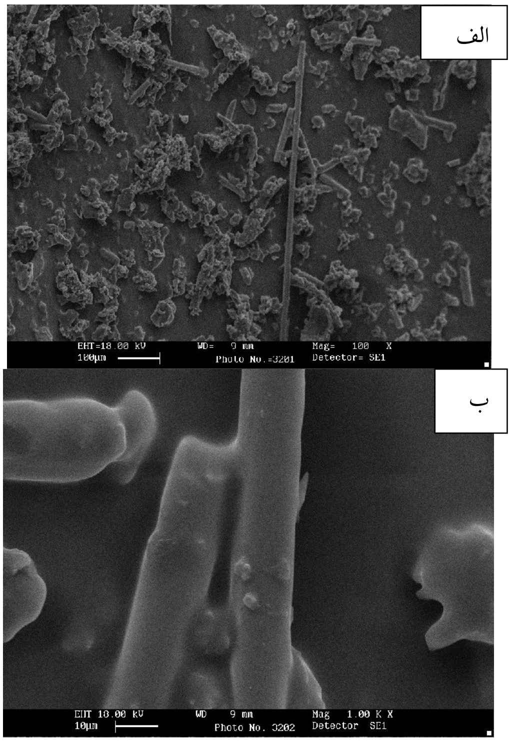
پلی‌استر به الیاف فایبرگلاس و ترشوندگی مناسب بین الیاف فایبرگلاس و زمینه پلی‌استر را نشان می‌دهد. چرا که در این بزرگنمایی مرز بین زمینه و الیاف، حفره‌دار نیست.




**شکل ۱۱.** تصویر SEM از سطح کامپوزیت زمینه پلی‌استر تقویت‌شده با کاربید سیلیسیم؛ الف) بزرگنمایی ۳۱۲ توسط الکترون برگشتی، ب) بزرگنمایی ۱۱۴۰ توسط الکترون ثانویه

## ۴- نتیجه‌گیری

ذرات کاربید سیلیسیم از ۱ تا ۳٪ باعث کاهش وزن مخصوص، افزایش تخلخل و جذب آب شده است. اما این کامپوزیت پیوند بسیار قوی با زمینه ایجاد نموده است و با جلوگیری از پیشرفت ترک، استحکام و مقاومت در برابر سایش را زیاد نموده است. از طرف دیگر اگرچه استحکام ۱٪ فایبرگلاس بهترین استحکام را به خاطر پیوندهای خوب رشته‌های فایبرگلاس با زمینه ایجاد نموده است، اما افزودن ۳٪ کاربید سیلیسیم مقاومت به سایش بهتری ایجاد کرده است و افزودن آن مورد تایید است. در مجموع ساخت کامپوزیت زمینه پلی‌استر با ۱٪ فایبرگلاس در درجه اول و با ۳٪ کاربید سیلیسیم در درجه دوم توصیه می‌شود.




**شکل ۱۲.** تصویر SEM از نمونه کامپوزیت زمینه پلی‌استر تقویت‌شده با فایبرگلاس؛ الف) بزرگنمایی ۱۰۰ ب) بزرگنمایی ۱۰۰۰

## مراجع

۱. شادی جلوان، وحید جوانبخت، نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری، موسسه آموزش عالی جهاد دانشگاهی، اصفهان.
۲. مجموعه مقاله‌های همایش علمی-کاربردی نانو تکنولوژی، انقلاب صنعتی آینده. جلد دوم، تهران ۱۳۸۰، ۷۵-۹۰.
3. Cahnd N., Naik A., Neogi S., Three body abrasive wear of short glass fiber polyester composite, Wear, 2000, 242, 38-46 .
4. El-Tayeb N.S.M., Yousif B.F., Yap T.C., An investigation on worn surfaces of chopped glass fiber reinforced polyester through SEM observations, Wear, 2008,41,5,331-340.
5. Mishra P., Acharya S.K., Anisotropy abrasive wear behavior of bagasse fiber reinforced polymer composite, International Journal of Engineering, Science and Technology, 2010, 2, 11, 104-112 .