



Laboratory Study on the Mechanical Properties of Vinyl Ester Matrix Composite Coatings Reinforced by Glass Fiber, Nano TiO₂ and Carbon Nanofibers

ARTICLE INFO

Article Type

Original Research

Authors

Delfariban F.¹ MSc,
Alizadeh M.¹ PhD,
Tayyebi M.^{1*} MSc,
Salahinejad E.² PhD

How to cite this article

Delfariban F, Alizadeh M, Tayyebi M, Salahinejad E. Laboratory Study on the Mechanical Properties of Vinyl Ester Matrix Composite Coatings Reinforced by Glass Fiber, Nano TiO₂ and Carbon Nanofibers. Modares Mechanical Engineering. 2021;21(5):341-351.

¹ Department of Materials Science and Engineering, Shiraz university of Technology, Shiraz, Iran.

² Faculty of Materials Science and Engineering, K. N. Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

* Correspondence

Address: Department of Materials Science and Engineering, Shiraz university of Technology, Shiraz, Iran.

Phone: -

Fax: -

m.tayyebi@sutech.ac.ir

Article History

Received: April 17, 2020

Accepted: December 13, 2020

ePublished: April 25, 2021

ABSTRACT

In this research, vinyl ester matrix composite coatings reinforced by E-glass fibers, Nano TiO₂, and Carbon Nanofiber were prepared by hand lay-up method, and their mechanical properties were investigated. The mechanical properties of fiber-reinforced composites were investigated by the tensile, impact, hardness, shear test, and wear tests. Scanning electron microscopy was employed to study the fracture surface of the prepared samples. The results of the tensile test showed that the presence of the E-glass fibers increases the strength about 4 times and the elongation about 8 times in the vinyl ester matrix. There was no change in the fiber-reinforced composite strength by reinforcing the composite with nanoparticles of TiO₂ and carbon Nanofiber, but the elongation of the fiber-reinforced composite increased by 1.6 times. Impact resistance of fiber-reinforced composite and fiber-reinforced nanocomposite relative to vinyl ester resin increased about 20 and 29 times. The presence of glass fiber and nanoparticles increase the hardness of the samples about 1.5 to 2 times in the vinyl ester matrix. The results of the adhesion test demonstrated that the presence of nanoparticles in fiber-reinforced nanocomposite improves adhesion to concrete surfaces. Also, the results of the wear test showed that the presence of glass fiber in the matrix of vinyl ester reduces wear resistance, and the presence of nanoparticles in fiber-reinforced nanocomposite improves the wear resistance of the fiber-reinforced composite.

Keywords Vinyl Ester Resin, E-Type Glass Fiber, Fiber-Reinforced Composite, Fiber-Reinforced Nanocomposite

CITATION LINKS

[1] Chemical resistance, void content and tensile properties of oil palm/jute...[2] Fiber-reinforced-plastic (FRP) reinforcement for concrete structures: properties and...[3] High-performance concrete mix for an optimum protection in...[4] Principles of polymer systems. [5] A novel design for water-based modified epoxy coating with...[6] Analysis and performance of fiber composites [7] nanoparticles, Nanoclays and Nanotubes. [8] Study on the effect of nanosilica particles on morphology, thermo-mechanical and...[9] glass/epoxy polymer nanocomposites: manufacturing, structures, thermal and...[10] Comparison of mechanical properties of glass fiber/vinyl ester and carbon...[11] Microstructure and mechanical properties of SiC-particle-strengthening tri-metal... [12] Engineering. Mechanical Properties of Glass Fiber Reinforced Polyester Composites [13] Aligned multi-walled carbon nanotube-reinforced composites: processing and...[14] Strength of unidirectional glass/epoxy composite with silica nanoparticle-enhanced matrix [15] Functional fillers for plastics [16] The mechanism of wear of polytetrafluoroethylene. [17] Manufacturing process optimization for wear property of... [18] Influence of crystallization on intercalation, morphology, and mechanical properties of...[19] Investigation of Microstructure and Tensile Properties of CuZnAl Shape Memory Alloy Produced by Accumulative... [20] Sliding wear behavior of PTFE composites. [21] The friction and wear characteristics of nanometer SiC and polytetrafluoroethylene...[22] Epoxy/acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer/clay ternary nanocomposite as...[23] Manufacturing of high-strength multilayered composite by accumulative roll bonding. [24] Intercalated polypyrrole/Na⁺-montmorillonite nanocomposite via...[25] Characterization of polymer-layered silicate (clay) nanocomposites by transmission electron microscopy and...[26] Preparation and mechanical properties of polypropylene-clay hybrids [27] Bond behavior of reinforcing bars in tensile strain-hardening fiber-reinforced cement composites.

مطالعه آزمایشگاهی خواص مکانیکی پوشش‌های کامپوزیتی زمینه وینیل‌استر تقویت شده با الیاف شیشه، نانو ذرات TiO_2 و نانو الیاف کربن

فائزه دلفریان MSc

ارشناسی ارشد، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

مرتضی علیزاده PhD

دانشیار، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

مسلم طیبی* MSc

دانشجوی دکتری، مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

عرفان صلاحی‌نژاد PhD

دانشیار، گروه مهندسی مواد، دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

چکیده

در این تحقیق، پوشش‌های کامپوزیتی زمینه وینیل‌استر تقویت شده با الیاف شیشه نوع E، نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم و نانو الیاف کربن به روش لایه گذاری دستی تولید گردید و خواص مکانیکی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. خواص مکانیکی کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف با استفاده از آزمون‌های کشش، ضربه، سختی سنجی، چسبندگی و سایش مورد بررسی قرار گرفت. میکروسکوپ الکترونی روبشی به منظور بررسی سطوح شکست نمونه‌های آماده شده بکار گرفته شد. نتایج آزمون کشش نشان داد که با تقویت زمینه‌ی رزین وینیل‌استر توسط الیاف شیشه، استحکام به میزان ۵ برابر و درصد ازدیاد طول ۸ برابر افزایش می‌یابد. با تقویت کامپوزیت الیافی توسط نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم و نانو الیاف کربن تغییری در استحکام کامپوزیت الیافی ایجاد نشد اما میزان درصد ازدیاد طول کامپوزیت الیافی به میزان ۱/۶ برابر تغییر یافت. استحکام ضربه کامپوزیت الیافی و نانو کامپوزیت الیافی نسبت به رزین وینیل‌استر به ترتیب حدود ۲۰ و ۲۹ برابر افزایش نشان داد. نتایج آزمون چسبندگی حاکی از آن می‌باشد که حضور نانو ذرات در نانو کامپوزیت الیافی موجب بهبود چسبندگی آن به سطح بتن می‌شود. بررسی نتایج آزمون سایش نشان داد که حضور الیاف شیشه در زمینه وینیل‌استر موجب کاهش مقاومت به سایش و حضور نانو ذرات در نانو کامپوزیت الیافی موجب بهبود مقاومت به سایش کامپوزیت الیافی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: رزین وینیل‌استر، الیاف شیشه نوع E، کامپوزیت الیافی، نانو کامپوزیت الیافی.

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۳

*نویسنده مسئول: m.tayyebi@sutech.ac.ir

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر به دلیل نادیده گرفتن مضرات مواد شیمیایی یا عدم استفاده از پوشش‌های مناسب در مجتمع‌های صنعتی که در معرض مواد خورنده (مواد اسیدی) قرار دارند ضرر و زیان فراوانی به این گونه واحدها وارد شده است. در این راستا سازه‌های بتنی و فولادی در معرض محیط خورنده، به شدت دچار خوردگی می‌شوند^[1]. در بتن، میلگردها توسط محیط قلیایی ایجاد شده در اطراف میلگرد محافظت می‌شوند. چنانچه در اثر عدم استفاده از

پوشش‌های محافظ مناسب یا بکارگیری پوشش‌هایی با خواص مکانیکی ضعیف سطح بتن در معرض اسید و بخارات اسیدی قرار گیرد، عدد اسیدی (PH) کاهش یافته و محافظت بتن از روی میلگردها حذف می‌شود. بنابراین خواص مکانیکی پوشش به عنوان یکی از عوامل مهم در جلوگیری از تخریب و خوردگی بتن مطرح می‌گردد. زمانی که میلگردهای فولادی داخل بتن زنگ می‌زنند، این زنگ زدگی باعث افزایش حجم میلگردها می‌گردد که این موضوع موجب ایجاد ترک در مقاطع بتنی به موازات میلگردها و تخریب سازه‌ها خواهد شد^[2]. مطابق استانداردهای DIN (Deutsches institute fur normung) و ACI (American concrete institute) در یک واحد صنعتی که تولید کننده یا مصرف کننده مواد خورنده می‌باشد، می‌بایست کلیه سطوح در معرض مواد خورنده دارای پوشش‌های محافظتی باشند^[3]. یکی از پوشش‌های محافظتی مناسب برای این واحدها، پوشش‌های کامپوزیتی زمینه پلیمری است. از جمله این کامپوزیت‌ها می‌توان کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه و نیز کامپوزیت‌های وینیل‌استر تقویت شده با الیاف شیشه را نام برد^[4]. پوشش‌های کامپوزیتی زمینه اپوکسی به دلیل خواص برجسته مانند فرآیندپذیری خوب، مقاومت شیمیایی عالی، عایق الکتریکی، محافظت بالا در برابر خوردگی و چسبندگی قوی برای محافظت مواد مختلف به کار می‌روند^[5]. از آنجا که رزین وینیل‌استر از واکنش یک کربوکسیلیک اسید (Carboxylic acid) و یک واحد رزین اپوکسی تهیه می‌شود، می‌توان گفت این رزین‌ها، بسیاری از خواص اپوکسی را دارند. علاوه بر این، مقاومت شیمیایی عالی آن‌ها سبب گردیده است در محیط‌هایی که نیازمند مقاومت بالا در برابر خوردگی است، از آن‌ها استفاده شود. مقاومت شیمیایی عالی رزین‌های وینیل‌استر ناشی از حضور گروه متیل و وینیل و همچنین زنجیر اصلی اپوکسی که نسبت به تهاجم‌های شیمیایی بسیار مقاومند، می‌باشد^[6]. رزین‌های وینیل‌استر بسیار چقرمه می‌باشند و استحکام چسبندگی خوبی دارند. این رزین‌ها به خوبی الیاف شیشه و دیگر تقویت کننده‌ها را خیس کرده و چسبندگی خوبی به آن‌ها دارد^[7]. حضور الیاف شیشه در کامپوزیت‌های زمینه وینیل‌استر باعث می‌شود که این کامپوزیت‌ها علاوه بر دارا بودن مقاومت شیمیایی مناسب، خواص مکانیکی قابل قبولی را داشته باشند^[8].

هدف از انجام این پژوهش، ساخت پوشش‌های کامپوزیتی با خواص مکانیکی مطلوب ضمن حفظ یا ارتقاء مقاومت به خوردگی پوشش می‌باشد. حضور ذرات و الیاف در ساختار نانو کامپوزیت‌های پلیمری، معمولاً باعث ایجاد استحکام در رزین می‌شود. در واقع هنگامی که ذرات و یا الیاف درون یک رزین توزیع می‌شوند، نیروهای اعمال شده به کامپوزیت به ذرات یا الیاف منتقل می‌شود. نانو ذرات با ترکیب شدن با رزین با درصدهای وزنی مختلف و شیوه‌های توزیع متفاوت، باعث ارتقای خواص مکانیکی

سایش تحت نیروهای مختلف و سرعت ۰/۰۵ متر بر ثانیه انجام شد. پس از طی مسافت ۴۰۰ متر، قطعه مجدداً وزن شد. نتایج به صورت اختلاف وزن قبل و بعد از انجام آزمون و نمودار تغییرات ضریب اصطکاک بر حسب مسافت ارائه گردید. آزمون سختی ویکرز با توجه به استاندارد ASTM E384 انجام گرفت.

این آزمون در سه نقطه انجام شد و نتایج حاصل از آزمون به صورت میانگین نقاط گزارش شد. جهت انجام آزمون ضربه چارپی از استاندارد ISO 179 استفاده شد. نمونه‌های کامپوزیتی به شکل مستطیل با طول و عرض به ترتیب ۸۰ و ۱۰ میلی‌متر آماده شد. آزمون توسط دستگاه آزمون چارپی مدل (PIT Series, U-shaped pendulum of up to 150 J) انجام شد و نتایج به صورت میزان انرژی ضربه قبل از شکست گزارش شد. به منظور شناسایی بهتر خواص ضربه‌ای کامپوزیت، آزمون در ۲ راستا انجام شده و نتیجه به صورت میانگین نتایج در دو راستا، گزارش شد. به منظور انجام آزمون چسبندگی برشی از استاندارد JIS استفاده شد. جهت آماده سازی نمونه‌های آزمون چسبندگی مطابق استاندارد JIS کامپوزیت روی سطح بتن ساخته شد و سپس توسط دستگاه CNC مطابق ابعاد استاندارد، برش داده شد. به منظور بررسی سطح شکست کامپوزیت در آزمون‌های کشش و ضربه و همچنین بررسی سطح کامپوزیت در آزمون سایش از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل Philips-FEG استفاده شد.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- تولید نمونه‌های کامپوزیتی

برای ساخت قطعات کامپوزیتی با زمینه وینیل‌استر، در ابتدا نیاز است رزین وینیل‌استر مورد بررسی قرار گیرد. رزین وینیل‌استر با ترکیب شدن با متیل‌اتیل‌کتون‌پراکساید به عنوان کاتالیزور و اکانت‌کبالت به عنوان شتاب دهنده اول و دی‌متیل‌آنیلین به عنوان شتاب دهنده کمکی وارد فرایند پخت می‌شود. نکته بسیار مهم در این قسمت مشخص کردن زمان ژله‌ایی شدن رزین وینیل‌استر با مقادیر مختلفی از کاتالیزور و شتاب دهنده می‌باشد. لذا زمان ژله‌ایی شدن رزین وینیل‌استر با درصدهای مختلفی از کاتالیزور و شتاب دهنده در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بررسی و در جدول ۲ گزارش گردیده است.

جدول ۲) زمان ژل شدن رزین وینیل‌استر بر حسب درصد کاتالیزور و شتاب دهنده.

ردیف	درصد رزین (%)	درصد وزنی اکانت کبالت ۱ (%)	درصد وزنی دی متیل آنیلین (%)	درصد پراکساید وزنی (%)	زمان (min)
۱	۹۷	۱	۱	۱	۱۷-۱۵
۲	۹۷/۳	۰/۹	۰/۹	۰/۹	۳۵-۳۳
۳	۹۷/۹	۰/۷	۰/۷	۰/۷	۹۵-۹۰
۴	۹۸/۵	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۳۷۵-۳۷۶۵

پلیمر می‌شوند. حال با استفاده از روش لایه گذاری دستی، می‌توان کامپوزیت‌هایی ساخت که دارای الیاف و نانو ذرات باشند که این امر باعث بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت می‌شود. همچنین با توزیع نانو ذرات در بستر رزین می‌توان خواص متفاوت فیزیکی و شیمیایی را به رزین اضافه کرد. در این پژوهش با اضافه کردن الیاف شیشه و نانوذرات به رزین وینیل‌استر، استحکام کششی، مقاومت در برابر سایش و جذب انرژی ضربه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۲- مواد و روش تحقیق

رزین مورد استفاده در این پژوهش وینیل‌استر و مهمترین اجزا برای پخت وینیل‌استر در دمای محیط، متیل‌اتیل‌کتون‌پراکساید و اکانت‌کبالت می‌باشد. از کاتالیزور متیل‌اتیل‌کتون‌پراکساید به میزان ۱ درصد وزنی و از شتاب دهنده کبالت ۱ درصد، به میزان ۱ درصد وزنی استفاده شد. همچنین از محلول دی‌متیل‌آنیلین نیز به عنوان شتاب دهنده کمکی، به ویژه در زمانی که دمای محیط پایین است و یا قطعه از ضخامت کمی برخوردار است، به میزان ۱ درصد وزنی استفاده شد. خواص مکانیکی الیاف شیشه دو جهته (۹۳۵-۴۵) نوع E مورد استفاده به ترتیب در جدول ۱ گزارش شده است.

در این پژوهش، از نانو ذرات دی اکسید تیتانیوم (TiO_2) با خلوص ۹۹ درصد و میانگین اندازه دانه ۲۰ نانومتر، استفاده شد. همچنین از نانو الیاف کربن با خلوص ۹۹/۹ درصد و میانگین قطر و طول به ترتیب ۳۰ و ۳۵۰ میکرومتر استفاده شد. به منظور ساخت کامپوزیت الیافی، ابتدا مقداری رزین رقیق شده توسط تینر به عنوان پرایمر روی سطح بتن اعمال شد. همچنین جهت ساخت نانو کامپوزیت الیافی روی سطح بتن رزین همراه با نانو ذرات، توسط تینر رقیق شد و به عنوان پرایمر روی سطح بتن اعمال گردید. سپس فرایند لایه گذاری دستی روی بتن انجام شد. جهت انجام آزمون کشش نمونه‌های ساخته شده از استاندارد ASTM D3039 استفاده شد. آزمون کشش توسط دستگاه UH-F1000Kn با سرعت ۵ میلی متر بر دقیقه انجام شد. مقادیر استحکام کششی گزارش شده برای کامپوزیت‌های تولید شده در این پژوهش، مقدار متوسط سه اندازه گیری مختلف است.

به منظور انجام آزمون سایش از استاندارد ASTM G99 استفاده شد. قطعات جدا شده از کامپوزیت به شکل دیسک و به قطر ۵۰ میلیمتر برش داده شد. قبل از انجام آزمون سایش نمونه‌ها توسط ترازو با دقت ۰/۰۰۱ گرم، وزن گردید و سپس در دستگاه آزمون سایش قرار گرفت. دستگاه مورد استفاده از نوع پین، روی دیسک با پین فولادی به طول و قطر به ترتیب ۴۳ و ۵ میلیمتر بود. آزمون

جدول ۱) خواص مکانیکی الیاف شیشه

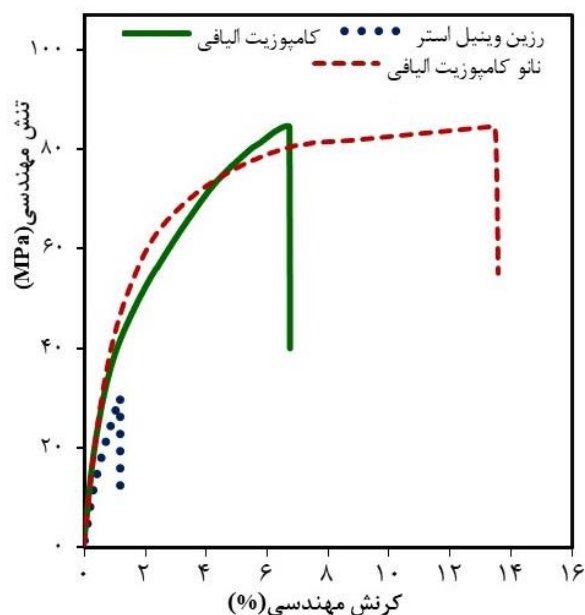
الیاف	ازدیاد طول (%)	مدول یانگ (GPa)	استحکام کششی (MPa)
E-glass	۶/۸	۸۱-۸۰	۳۰۰۰

افزوده شد و به مدت ۳۰ دقیقه توسط همزن مکانیکی با سرعت ۲۰۰۰ دور بر دقیقه تحت عمل اختلاط قرار گرفت. سپس مخلوط رزین و نانو ذرات به مدت ۳۰ دقیقه به منظور توزیع بهتر نانو ذرات درون دستگاه آلتراسونیک قرار گرفت. به منظور جلوگیری از افزایش دما حین عمل اختلاط، مخلوط درون حمام آب و یخ قرار گرفت و دستگاه بعد از هر ۳۰ ثانیه کارکرد، به مدت ۳۰ ثانیه متوقف شد. سپس مجدداً ۲ مرحله مذکور تکرار شد. مخلوط رزین وینیل استر و نانو ذرات به همراه ۰/۹ درصد وزنی اکبات کبالت و ۰/۹ درصد وزنی دی‌متیل‌آمین به مدت ۵ دقیقه توسط همزن مکانیکی تحت عمل اختلاط قرار گرفت. سپس مقدار ۰/۹ درصد وزنی پراکسید به مخلوط رزین و کاتالیزور افزوده و مجدداً توسط همزن مکانیکی به مدت ۵ دقیقه مورد عمل اختلاط قرار گرفت و فرآیند قالب گیری همانند ساخت کامپوزیت الیافی انجام گردید. از آنجا که توزیع نانو ذرات در بستر رزین موجب بهبود میزان ترشوندگی الیاف شیشه توسط رزین در حضور نانو ذرات نسبت به رزین وینیل استر می‌شود^[۹]، هر لایه الیاف شیشه تر شده توسط رزین وینیل استر همراه با نانو ذرات، ضخامتی در حدود ۵-۶ میلی‌متر از کامپوزیت حاصل را تشکیل می‌دهد. به منظور ساخت نانو کامپوزیت الیافی با ضخامت ۴-۳ میلی‌متر از تعداد ۶ لایه الیاف شیشه استفاده شد.

۲-۳- بررسی خواص مکانیکی

۲-۳-۱- بررسی نتایج آزمون کشش

شکل ۲ نمودار تنش-کرنش نمونه‌های رزین وینیل استر، کامپوزیت الیافی و نانو کامپوزیت الیافی را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۲، استحکام و درصد ازدیاد طول کامپوزیت الیافی تولید



شکل ۲) نمودار تنش-کرنش رزین وینیل استر، کامپوزیت الیافی و نانو کامپوزیت الیافی

نتایج نشان می‌دهد که با افزایش درصد کاتالیزور و شتاب دهنده‌ها، سرعت انجام واکنش پخت، بیشتر می‌شود، لذا با توجه به زمان لازم جهت فرآیند لایه چینی دستی، در این پژوهش از ترکیب ردیف ۲ جهت ساخت کامپوزیت‌های الیافی استفاده شد.

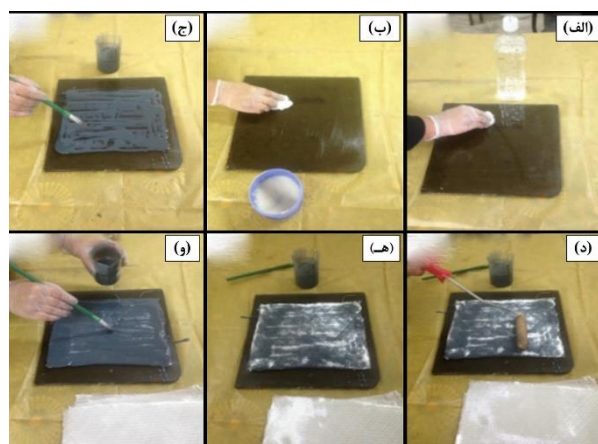
۳-۱-۱- ساخت کامپوزیت الیافی

به منظور ساخت کامپوزیت الیافی، تعداد لایه‌های مورد نیاز از الیاف شیشه با مورفولوژی متفاوت (۱۶/۵ درصد وزنی) با ابعاد یکسان آماده شد. سپس مقدار ۹۷/۳ گرم رزین وینیل استر به همراه ۰/۹ درصد وزنی اکبات کبالت و ۰/۹ درصد وزنی دی‌متیل‌آمین به مدت ۵ دقیقه توسط همزن مکانیکی تحت عمل اختلاط قرار گرفت. سپس مقدار ۰/۹ درصد وزنی پراکسید به مخلوط رزین و کاتالیزور افزوده و مجدداً توسط همزن مکانیکی به مدت ۵ دقیقه مورد عمل اختلاط قرار گرفت. جهت قالب‌گیری کامپوزیت، همانگونه که در شکل ۱ قابل مشاهده است؛ قالب شیشه‌ای توسط استون، پاکسازی شد. به منظور سهولت جدا شدن کامپوزیت از قالب، سطح قالب به واکس آغشته شد. سپس یک لایه نازک رزین روی سطح قالب اعمال و اولین لایه الیاف روی سطح قرار گرفت.

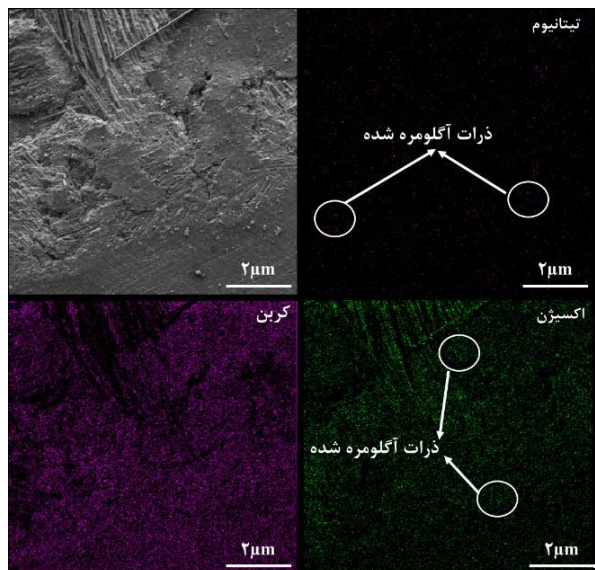
به منظور ترشوندگی کامل الیاف توسط رزین و خروج هوای محبوس شده بین الیاف و رزین، سطح الیاف توسط غلتک فشار داده و صاف شد و مجدداً یک لایه رزین جهت تر شدن کامل الیاف، روی سطح آن اعمال شد. از آنجا که هر لایه کامپوزیت الیافی ضخامتی در حدود ۷/۰ میلی‌متر دارد، به منظور دستیابی به کامپوزیت با ضخامت ۴-۳ میلی‌متر جهت آماده‌سازی نمونه‌های آزمون کشش، فرآیند لایه چینی جهت ساخت کامپوزیت ۵ لایه انجام شد.

۳-۱-۲- ساخت نانو کامپوزیت الیافی

به منظور ساخت نانو کامپوزیت الیافی، تعداد لایه‌های مورد نیاز از الیاف شیشه با ابعاد یکسان آماده شد. مقدار یک گرم نانو الیاف کربن و یک گرم نانو ذرات TiO_2 به ۹۵/۳ گرم رزین وینیل استر



شکل ۱) فرآیند قالب‌گیری کامپوزیت تقویت شده با الیاف



شکل ۳) تصاویر SEM نانو کامپوزیت الیافی

سطح شکست صاف می‌باشد و موج‌های نسبتاً موازی با فواصل تقریباً یکسان روی آن تشکیل شده است. این نوع سطح شکست مختص پلیمرهای گرما سخت است [13]. نشان داده شده است که مکانیزم شکست این پلیمرها، یک مکانیزم سه مرحله‌ای شامل شروع، انتقال و انتشار ترک است [13]. سه مرحله نام برده شده به صورت مجزا در سطح شکست نمونه رزین وینیل استر نشان داده شده در شکل ۴-الف قابل مشاهده می‌باشد.

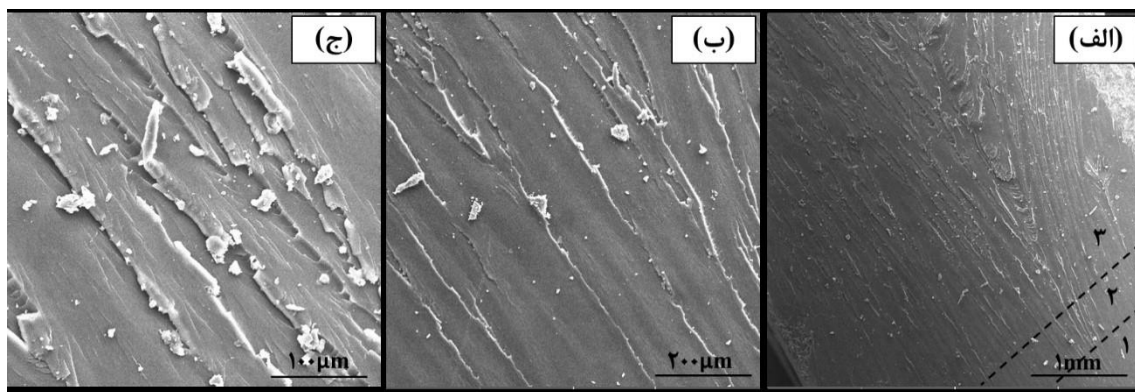
منطقه یک، منطقه آیینگی نامیده می‌شود که منطقه شروع ترک است. منطقه دو، منطقه انتقال نام دارد که در این منطقه زبری سطح به طور پیوسته افزایش می‌یابد. منطقه سه ناحیه انتشار ترک نام دارد. این منطقه به صورت مخروطی دیده می‌شود و هرچه وسعت این منطقه بزرگ‌تر باشد، نمایانگر جذب انرژی بیشتر هنگام شکست است [13]. شکل ۴-ب منطقه انتقال را در بزرگنمایی بالا نشان می‌دهد. دیده می‌شود که منطقه انتقال، شامل خطوط موازی با فواصل تقریباً یکسان است که در مقایسه با منطقه انتشار (شکل ۴-ج) فاصله خطوط بیشتر است.

قرارگیری الیاف شیشه در زمینه رزین وینیل استر باعث تغییر مکانیزم شکست آن می‌شود. شکل ۵ تصاویر SEM از سطح شکست

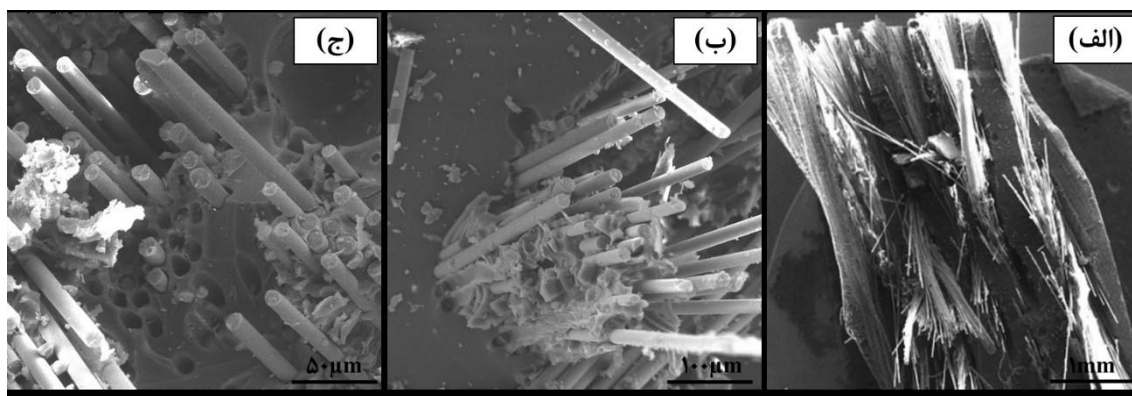
شده نسبت به رزین وینیل استر افزایش قابل توجهی یافته است. نتایج نشان می‌دهد که استحکام حدوداً ۳ برابر شده است. عامل افزایش استحکام، الیاف شیشه می‌باشد. در طول آزمون کشش هنگامی که نیرو به نمونه اعمال می‌شود، زمینه وینیل استر نیروی اعمالی را به الیاف شیشه منتقل می‌کند و از آنجایی که الیاف شیشه استحکام زیادی (۳۸۱۰ مگاپاسکال) دارند لذا تحمل نیروی زیادی داشته و استحکام کامپوزیت به این طریق افزایش می‌یابد [10,11].

تحقیقات نشان داده است که استحکام کششی کامپوزیت علاوه بر استحکام الیاف شیشه، به شدت وابسته به استحکام پیوند سطحی بین فاز تقویت کننده و فاز زمینه، جهت انتقال بار اعمال شده از فاز زمینه به فاز تقویت کننده است [10,12]. همچنین با مقایسه نمودار کامپوزیت الیافی و نانو کامپوزیت الیافی مشاهده می‌شود که با تقویت کامپوزیت الیافی توسط نانو ذرات، تغییری در استحکام کامپوزیت الیافی مشاهده نمی‌شود. به طور کلی پلیمرها می‌توانند به هر دو صورت آمورف و یا بلوری موجود باشند که لازمه‌ی یک ساختار بلوری وجود زنجیره‌های کوتاه می‌باشد. لازمه دستیابی به اثر استحکام بخشی نانو ذرات در پلیمر، احاطه هرچه بیشتر سطوح ذره توسط زنجیره‌های پلیمری است. به عبارت دیگر، می‌بایست ترشوندگی مناسب نانوذرات TiO_2 و نانو الیاف کربن توسط زنجیره‌های پلیمری صورت پذیرد. بدیهی است که با افزایش درصد نانو تقویت کننده، علاوه بر افزایش تعداد نانو ذرات، نسبت پلیمر به ذرات کاهش می‌یابد، بنابراین زنجیره‌های پلیمری نمی‌توانند به طور کامل نانو ذرات را تر نموده و در نتیجه بخش زیادی از تقویت کننده به صورت کلوخه در داخل زمینه باقی خواهد ماند و این پدیده منجر به کاهش استحکام می‌گردد. کلوخه شدن جزئی نانو ذرات در شکل ۳ قابل مشاهده است که سبب کاهش استحکام کامپوزیت الیافی در حضور نانو ذرات می‌باشد.

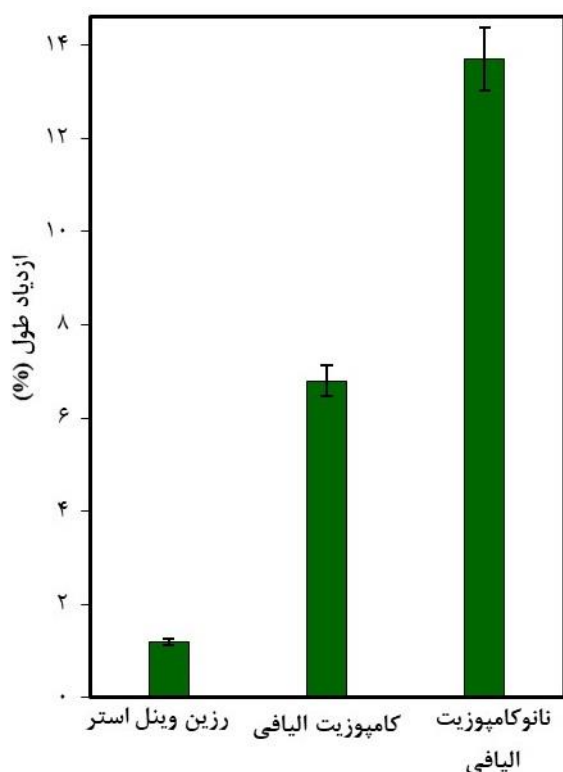
جهت بررسی نحوه شکست نمونه‌ها و نیز بررسی پیوند بین زمینه و تقویت کننده از سطح شکست نمونه‌ها بعد از آزمون کشش تصاویر SEM تهیه گردید. شکل ۴ سطح شکست رزین وینیل استر را بعد از آزمون کشش نشان می‌دهد. همانطور که دیده می‌شود



شکل ۴) تصاویر SEM (الف) سطح شکست رزین وینیل استر ب، ج) ناحیه ۲ و ۳ سطح شکست رزین وینیل استر



شکل ۵) تصاویر SEM تهیه شده از الف) سطح شکست کامپوزیت الیافی ب، ج) سطح شکست کامپوزیت الیافی در ۲ بزرگنمایی بالاتر



شکل ۶) نمودار درصد ازدیاد طول کامپوزیت الیافی و رزین وینیل استر

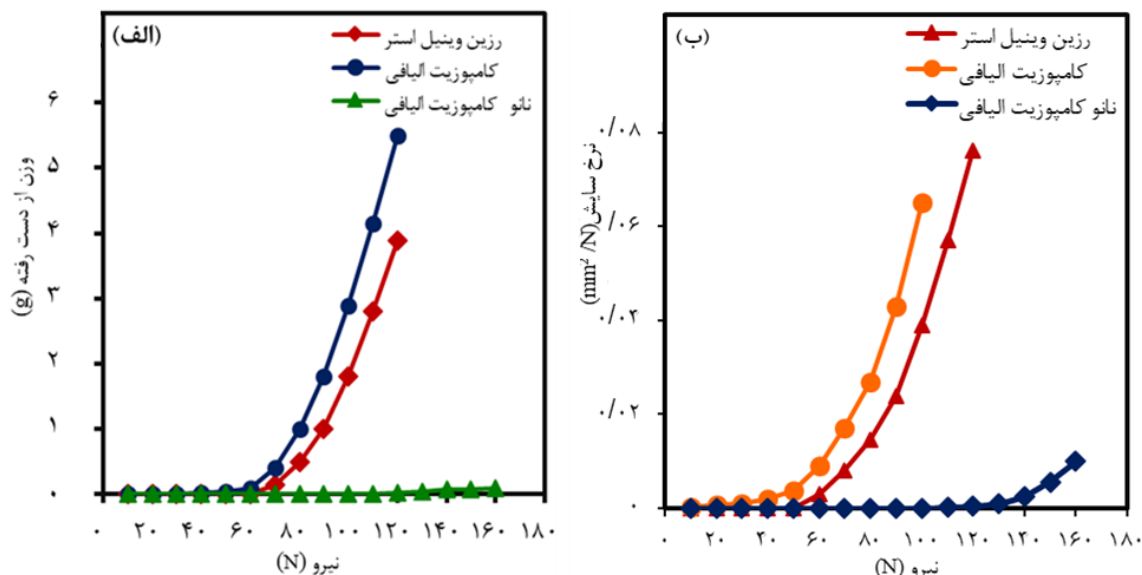
کم ذرات، انتقال تنش بین فصل مشترک از ذرات به زمینه به خوبی صورت نمی‌گیرد، اما با افزودن ذرات در مقیاس نانو، به دلیل تغییر مکانیزم انتقال تنش بین فصل مشترک (نسبت سطح به حجم بالا) و در نتیجه انتقال مناسب این تنش از ذرات به زمینه، درصد ازدیاد طول تا پارگی افزایش می‌یابد [15,16].

۳-۲-۲- بررسی نتایج آزمون سایش

شکل ۷ نرخ سایش و کاهش وزن رزین وینیل استر و کامپوزیت‌های فرآوری شده بر حسب نیرو را نشان می‌دهد. همانطور که در شکل ۷ دیده می‌شود، نرخ سایش و میزان کاهش وزن نانو کامپوزیت الیافی کمتر از رزین وینیل استر و کامپوزیت الیافی است. با توجه به شکل ۷-الف با افزایش بار، نرخ سایش افزایش می‌یابد و منجر به افزایش میزان کاهش وزن می‌شود

کامپوزیت ساخته شده را بعد از آزمون کشش در دو بزرگنمایی مختلف نشان می‌دهد. مکانیزم غالب شکست در کامپوزیت الیافی خرد شدن رزین، جدایش الیاف از پلیمر و پارگی الیاف می‌باشد، در نتیجه استحکام الیاف در تعیین استحکام نهایی شکست کامپوزیت تاثیر بسزایی داشته و موجب افزایش استحکام زمینه (رزین وینیل استر) می‌شود. در شکل ۵-الف نمای کامل سطح شکست کامپوزیت الیافی پس از آزمون کشش که شامل شکست رزین وینیل استر و الیاف تقویت کننده در سطح می‌باشد، قابل مشاهده است. شکل ۵-ب نشان می‌دهد که رزین وینیل استر بین الیاف قرار گرفته است که حاکی از ترشوندگی مناسب الیاف توسط رزین است. نشان داده شده است که ترشوندگی اثر مستقیم بر استحکام کامپوزیت ساخته شده دارد [12]. در شکل ۵-ج دیده می‌شود که در برخی از نقاط، خارج شدن الیاف از زمینه رخ داده است که این پدیده به خاطر عدم چسبندگی مناسب بین الیاف و زمینه می‌باشد و اثر منفی بر استحکام کامپوزیت تولیدی دارد [10,12]. به هر حال همانطور که شکل‌های ۵-ب و ۵-ج نشان می‌دهند، مقدار خارج شدن الیاف از زمینه، کم است و نشان از چسبندگی نسبتاً مناسب بین زمینه و الیاف در کامپوزیت‌های تولیدی دارد.

با توجه به شکل ۶، مقدار ازدیاد طول رزین وینیل استر، کامپوزیت الیافی و نانو کامپوزیت الیافی به ترتیب 0.6 ± 0.1 ، 1.1 ± 0.1 و 13.7 ± 0.9 درصد می‌باشد. افزایش درصد ازدیاد طول رزین وینیل استر، توسط الیاف شیشه ناشی از میزان درصد ازدیاد طول بالای الیاف شیشه [14] و انتقال بار اعمال شده به کامپوزیت الیافی از زمینه رزین وینیل استر به الیاف شیشه می‌باشد. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که تقویت رزین وینیل استر توسط الیاف شیشه، موجب افزایش درصد ازدیاد طول به میزان حدود ۶ برابر شد. همچنین پراکنده سازی نانو ذرات TiO_2 و نانو الیاف کربن در زمینه پلیمری موجب بهبود ۱/۵ برابری درصد ازدیاد طول کامپوزیت الیافی شد. در نانو کامپوزیت الیافی ضمن حضور الیاف و بهبود درصد ازدیاد طول زمینه در حضور الیاف زمانی که ذرات تقویت کننده در مقیاس میکرومتر باشند، به دلیل نسبت سطح به حجم



شکل ۷) نمودار الف) کاهش وزن رزین وینیل استر، کامپوزیت الیافی و نانو کامپوزیت الیافی در طول آزمون سایش ب) نرخ سایش مربوط به رزین وینیل استر، کامپوزیت الیافی و نانو کامپوزیت الیافی

حالی که حضور نانو ذرات در زمینه، موجب افزایش این نیرو تا ۸۰ نیوتن می‌شود.

در شکل ۸، رد سایش نمونه‌های رزین وینیل استر، کامپوزیت الیافی و نانو کامپوزیت الیافی پس از آزمون سایش قابل مشاهده است.

همانگونه که در شکل ۸-الف قابل مشاهده است در رزین وینیل استر با افزایش نیرو از ۱۲۰ نیوتن به ۱۶۰ نیوتن پهنای رد سایش، افزایش یافته است. همچنین رد سایش کامپوزیت الیافی تحت نیروی ۸۰ نیوتن و رد سایش نانو کامپوزیت الیافی در نیروی ۱۶۰ نیوتن به ترتیب در شکل‌های ۸-ب و ۸-ج قابل مشاهده است.

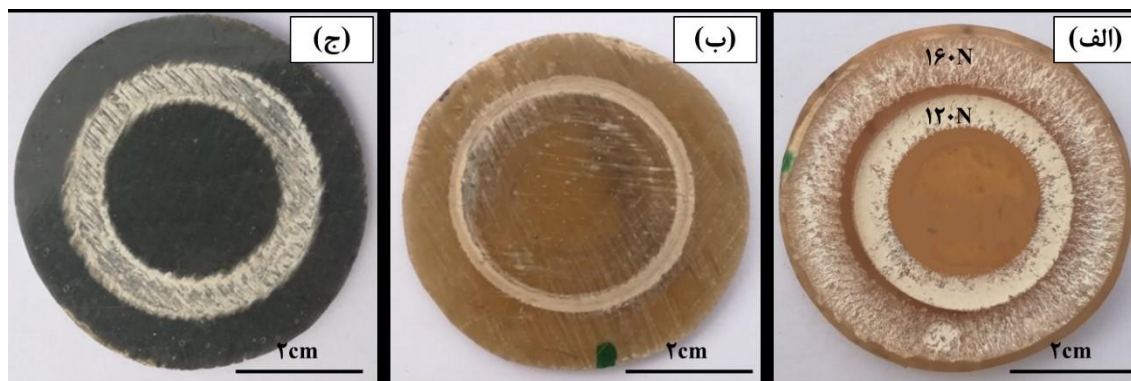
به منظور بررسی نحوه سایش نمونه‌ها و نیز بررسی مکانیزم سایش، از سطح نمونه‌های آزمون سایش پس از انجام آزمون تصاویر SEM تهیه گردید. شکل ۹ سطح ساییده شده نمونه‌های کامپوزیت الیافی را نشان می‌دهد. از آنجا که سطح کامپوزیت الیافی توسط پلیمر پوشیده شده است مکانیزم سایش سطح، سایش چسبان و در برخی نقاط سایش خراشان می‌باشد. در شکل ۹-الف نمای کامل

(شکل ۷-ب). برای محاسبه میزان سایش از رابطه ۱ استفاده شد [17]:

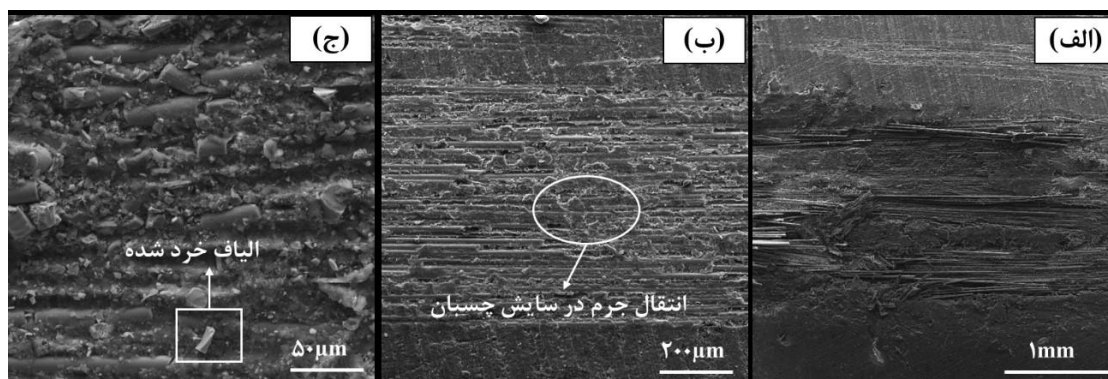
$$WR(mm^2/N) = m/\rho.F.L \quad (1)$$

در این رابطه WR نرخ سایش، m میزان کاهش وزن، F نیروی اعمالی، L میزان جابجایی بین سایشی بر روی نمونه و ρ چگالی کامپوزیت می‌باشد. نرخ سایش کامپوزیت الیافی و رزین وینیل استر در نیروهای کمتر از ۳۰ نیوتن، به دلیل پوشیده شدن سطح کامپوزیت الیافی توسط رزین برابر است.

به طور کلی وجود ذرات در مقیاس نانو در فاز زمینه و نیز چسبندگی مناسب میان فاز زمینه و ذرات، منجر به افزایش مقاومت به سایش نمونه خواهد شد [18,19]. با مقایسه نرخ سایش کامپوزیت الیافی و نانو کامپوزیت الیافی مشاهده می‌شود که افزودن نانو ذرات به زمینه وینیل استر به عنوان ماده استحکام‌بخش، موجب بهبود خواص سایشی زمینه شده به طوری که در تمامی بارها میزان کاهش وزن نمونه‌های نانو کامپوزیت الیافی نسبت به نمونه‌های کامپوزیت الیافی، کاهش قابل توجهی داشت. دیده می‌شود که رزین وینیل استر در نیروی ۵۰ نیوتن شروع به سایش می‌کند در



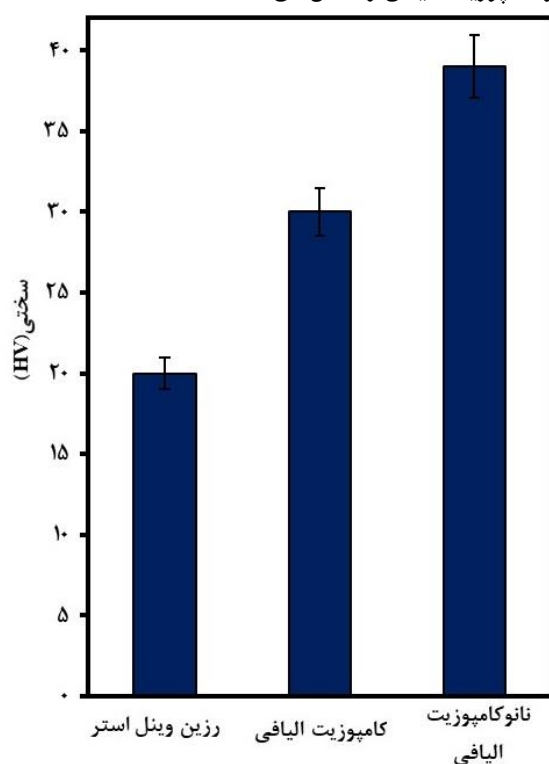
شکل ۸) نمونه‌های بعد از آزمون سایش



شکل ۹) تصاویر SEM (الف) سطح سایش کامپوزیت الیافی (ب، ج) سطح سایش کامپوزیت الیافی در ۲ بزرگنمایی مختلف

۳-۲-۳- بررسی نتایج آزمون سختی سنجی

شکل ۱۱ مقادیر سختی ویکرز رزین وینیل استر، کامپوزیت الیافی و نانو کامپوزیت الیافی را نشان می‌دهد.

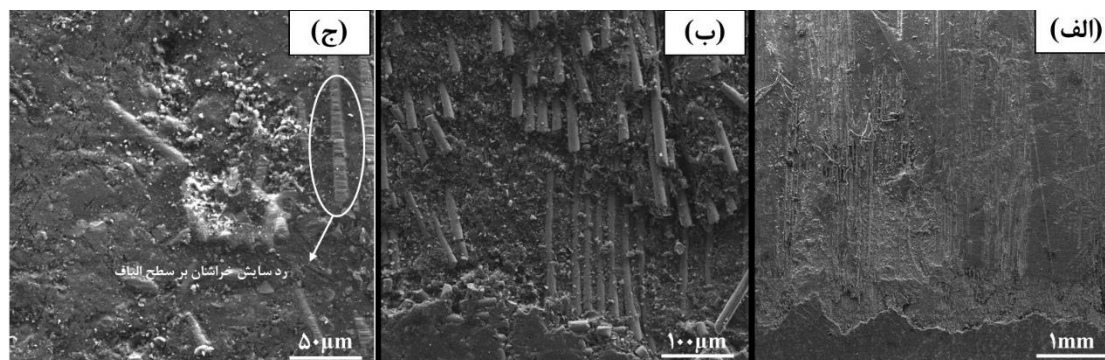


شکل ۱۱) تغییرات سختی ویکرز رزین وینیل استر، کامپوزیت الیافی و نانو کامپوزیت الیافی

سطح سایش روی سطح کامپوزیت الیافی در نیروی ۸ نیوتن قابل مشاهده است. سطح کامپوزیت در ابتدا دچار سایش چسبان می‌شود (شکل ۹-ب). با رسیدن پین به ناحیه الیافی، الیاف خرد شده و به همراه رزین خرد شده، به عنوان ذرات سایشی بین پین در حال حرکت و سطح قرار گرفته و با ایجاد خراش موجب تشدید سایش خراشان سطح می‌شوند (شکل ۹-ج).

مکانیزم سایش نانو کامپوزیت الیافی همانند کامپوزیت الیافی سایش چسبان همراه با سایش خراشان می‌باشد با این تفاوت که در نانو کامپوزیت الیافی در مقایسه با کامپوزیت الیافی سایش در نیروی بالاتری انجام می‌شود. شکل ۱۰ سطح سایش نانو کامپوزیت الیافی در نیروی ۱۲۰ نیوتن را نشان می‌دهد.

در شکل ۱۰-الف شمای کلی رد سایش دیده می‌شود. همانطور که شکل ۱۰-ب نشان می‌دهد، رزین و الیاف خرد شده روی سطح وجود دارد. این الیاف خرد شده در طول آزمون سایش، مقدار سایش را تشدید می‌کنند و باعث تغییر مکانیزم سایش از چسبان به خراشان می‌شود. در شکل ۱۰-ج شیارهای ناشی از سایش خراشان روی سطح الیاف قابل مشاهده است. به هر حال حضور نانو ذرات TiO_2 و نانو الیاف‌های کربن باعث افزایش مقاومت به سایش می‌شود، زیرا نانو ذرات موجود در کامپوزیت، سختی کامپوزیت را افزایش می‌دهند. گزارش شده است که سختی و مقاومت به سایش نسبت مستقیم دارند و افزایش سختی باعث افزایش مقاومت به سایش می‌شود^[20]. از طرفی نانو ذرات زیر پین می‌لغزند و مانع از سایش می‌شوند^[21].



شکل ۱۰) تصاویر SEM (الف) سطح سایش نانو کامپوزیت الیافی (ب، ج) سطح سایش کامپوزیت الیافی در ۲ بزرگنمایی مختلف

با توجه به نمودار، میزان نیروی لازم جهت جداسازی پوشش کامپوزیت الیافی و نانو کامپوزیت الیافی از سطح بتن به ترتیب برابر با 50 ± 750 و 100 ± 2800 نیوتن می‌باشد. نتایج حاصل از آزمون چسبندگی نشان می‌دهد که حضور نانو ذرات در زمینه پلیمری موجب افزایش استحکام چسبندگی می‌شود. در شکل ۱۳ نمونه بتن پوشش داده شده بعد از انجام آزمون چسبندگی قابل مشاهده است. با توجه به شکل ۱۳-الف در جدایش کامپوزیت الیافی از سطح بتن، مقداری از بتن همراه با کامپوزیت جدا شده است اما در اکثر نقاط، جدایش در فصل مشترک بتن-کامپوزیت اتفاق افتاده است در صورتی که جدایش نانو کامپوزیت الیافی از سطح بتن همراه با انهدام بتن می‌باشد (شکل ۱۳-ب). با مقایسه نحوه جدایش کامپوزیت الیافی و نانو کامپوزیت الیافی از سطح بتن، می‌توان نتیجه گرفت که استحکام بتن بیشتر از استحکام چسبندگی کامپوزیت الیافی به سطح بتن می‌باشد در صورتی که استحکام چسبندگی نانو کامپوزیت الیافی به بتن بیشتر از استحکام بتن می‌باشد.

شکل ۱۴ تصاویر SEM تهیه شده از سطح پوشش کامپوزیت الیافی بعد از آزمون چسبندگی را نشان می‌دهد. به طور کلی پیوند کامپوزیت الیافی به سطح بتن شامل الف) مقاومت چسبندگی بتن و پوشش ناشی از پیوند شیمیایی، ب) مقاومت سایشی پوشش در مقابل لغزش بتن روی سطح آن و ج) قفل و بست مکانیکی پوشش در بتن، ناشی از ناهمواری‌های سطحی بتن^[27] می‌باشد. در شکل ۱۴-الف، تصویر پوشش کامپوزیت الیافی جدا شده از سطح بتن قابل مشاهده است. جدایش در فصل مشترک رزین- بتن صورت گرفته است. ناهمواری سطح بتن (قفل و بست‌های مکانیکی) که به صورت جزیره‌ای در سطح رزین پس از جدایش بتن از کامپوزیت باقی مانده‌اند، در این شکل قابل مشاهده است. در شکل ۱۴-ج سطح پوشش نانو کامپوزیت الیافی قابل مشاهده است همانطور که در تصویر دیده می‌شود جدایش در سطح زمینه پلیمری-الیاف و توسط انهدام بتن صورت گرفته است که نشان دهنده بهبود چسبندگی کامپوزیت الیافی با تقویت زمینه توسط نانو ذرات می‌باشد. از آنجا که ناهمواری سطح بتن در هر دو نمونه به صورت تقریباً یکسان در نظر گرفته شده است، افزایش



شکل ۱۳) سطح نمونه‌های بتن بعد از آزمون چسبندگی برشی، الف) کامپوزیت الیافی ب) نانو کامپوزیت الیافی

با توجه به شکل ۱۱، میزان سختی رزین وینیل‌استر، کامپوزیت الیافی و نانو کامپوزیت الیافی تحت نیروی ۱۰ نیوتن به ترتیب برابر با 1 ± 20 و $1/5 \pm 30$ و $2/5 \pm 39$ ویکرز می‌باشد. حضور الیاف شیشه در زمینه وینیل‌استر موجب توزیع بار وارد شده به کامپوزیت، بر روی الیاف و افزایش سختی کامپوزیت می‌شود^[22,23]. بررسی نتایج نشان می‌دهد که با تقویت رزین وینیل‌استر توسط الیاف شیشه میزان سختی $1/5$ برابر می‌شود. همچنین با توزیع نانو ذرات در زمینه وینیل‌استر سختی به میزان ۹ ویکرز افزایش یافت. تاکنون نظرات مختلفی پیرامون چگونگی افزایش سختی نمونه بر اثر افزایش محتوای نانو ذرات در ساختار زمینه ارائه گردیده است. برخی از آن‌ها عبارتند از:

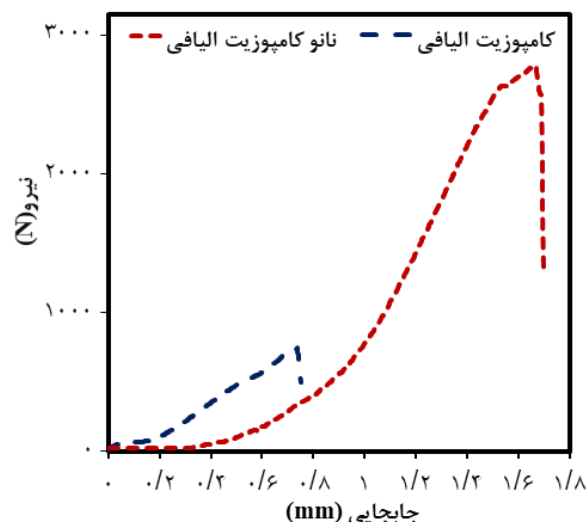
الف) نوع پیوند نانو ذرات با زمینه پلیمری و میزان ترشوندگی آن‌ها توسط زمینه، تعیین کننده میزان افزایش سختی در نمونه است^[24].

ب) فاز تقویت کننده دارای سختی بالاتر نسبت به فاز زمینه است. لذا، افزایش سختی به واسطه توانایی نانو ذرات در تحمل نیرو می‌باشد^[25].

ج) حجم محدود شده پلیمر در میان سطوح تقویت کننده، افزایش سختی را به دنبال دارد. لذا بدیهی است که در راستای ارتقاء سختی نانو کامپوزیت، درجه توزیع در راستای به حداکثر رساندن درجه برهم‌کنش زمینه/تقویت کننده، می‌بایست بهینه گردد^[26]. اگرچه مکانیزم دقیق افزایش سختی به واسطه افزایش نانو تقویت کننده‌ها به ساختار زمینه کاملاً مشخص نیست با این حال بررسی نتایج نشان می‌دهد که با تقویت زمینه پلیمری توسط نانو ذرات میزان سختی $1/3$ برابر می‌شود.

۳-۲-۴- بررسی نتایج آزمون چسبندگی برشی

شکل ۱۲ نمودار نیرو بر حسب جابجایی کامپوزیت الیافی و نانو کامپوزیت الیافی فرآوری شده را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲) نمودار نیرو - جابجایی کامپوزیت الیافی و نانو کامپوزیت الیافی

۶- افزودن الیاف شیشه به زمینه رزین وینیل استر موجب افزایش انرژی نرمال ضربه از $3/4$ کیلوژول بر مترمربع به $9/84$ کیلوژول بر مترمربع شد. همچنین حضور نانو ذرات موجب افزایش انرژی نرمال ضربه تا $47/115$ کیلوژول بر مترمربع شد.

۷- توزیع نانو ذرات در بستر رزین موجب افزایش ۴ برابری چسبندگی رزین وینیل استر به بتن شد.

تشکر و قدردانی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

تأییدیه اخلاقی: محتویات علمی و ادبی مقاله از فعالیت علمی خود نویسندگان بوده و صحت و اعتبار نتایج و متن مقاله بر عهده نویسندگان مقله است.

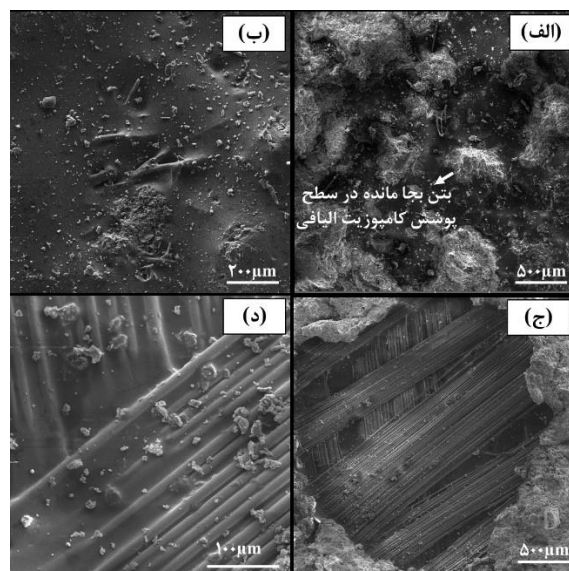
تعارض منافع: هیچ‌گونه تعارضی منافی با اشخاص و سازمان‌های دیگر وجود ندارد.

سهم نویسندگان: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع مالی: نویسندگان این مورد را بیان نکردند.

منابع

- 1- Jawaid M, Khalil HA, Bakar AA, Khanam PN. Chemical resistance, void content and tensile properties of oil palm/jute fibre reinforced polymer hybrid composites. *Materials & Design*. 2011 Feb 1;32(2):1014-9.
- 2- Hensher DA. Fiber-reinforced-plastic (FRP) reinforcement for concrete structures: properties and applications. Elsevier; 2016 Jan 22.
- 3- Tamimi AK. High-performance concrete mix for an optimum protection in acidic conditions. *Materials and Structures*. 1997 Apr;30(3):188-91.
- 4- Rodriguez F, Cohen C, Ober CK, Archer L. Principles of polymer systems. CRC Press; 2014 Dec 9.
- 5- Liu B, Wang Y. A novel design for water-based modified epoxy coating with anti-corrosive application properties. *Progress in Organic Coatings*. 2014 Jan 1;77(1):219-24.
- 6- Agarwal BD, Broutman LJ, Chandrashekhara K. Analysis and performance of fiber composites. John Wiley & Sons; 2017 Oct 30.
- 7- Brauer SJEIMR, Network K. Polymer nanocomposites: nanoparticles, Nanoclays and Nanotubes. 2004:126-64.
- 8- Guchhait PK, Bhandari S, Singh S, Rahaman M. Study on the effect of nanosilica particles on morphology, thermo-mechanical and electrical properties of liquid polysulfide modified epoxy hybrid nanocomposites. *International Journal of Plastics Technology*. 2011 Dec 1;15(2):150-62.
- 9- Haque A, Shamsuzzoha M, Hussain F, Dean D. S2-glass/epoxy polymer nanocomposites: manufacturing, structures, thermal and mechanical properties. *Journal of Composite materials*. 2003 Oct;37(20):1821-37.
- 10- Wonderly C, Grenestedt J, Fernlund G, Čepus E. Comparison of mechanical properties of glass fiber/vinyl ester and carbon fiber/vinyl ester composites. *Composites Part B: Engineering*. 2005 Jul 1;36(5):417-26.



شکل ۱۴ تصاویر SEM تهیه شده از الف، ب) سطح پوشش کامپوزیت الیافی ج، د) سطح پوشش نانو کامپوزیت الیافی بعد از آزمون چسبندگی برشی

چسبندگی مربوط به پیوند شیمیایی خوب نانو کامپوزیت و بتن توسط پرایمر (نانوکامپوزیت الیاف کربن و دی‌اکسیدتیتانیوم رقیق شده توسط تینر) و برتری مقاومت به سایشی نانو کامپوزیت الیافی نسبت به کامپوزیت الیافی توسط بتن می‌باشد که در آزمون سایش مورد بحث و بررسی قرار گرفت.

۴- نتایج

در پژوهش حاضر کامپوزیت الیافی و نانو کامپوزیت الیافی به روش لایه گذاری دستی ساخته شد و خواص مکانیکی آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. که نتایج بدست آمده به اختصار به صورت زیر می‌باشد.

۱- حضور الیاف شیشه در زمینه پلیمری موجب افزایش استحکام شکست رزین وینیل استر از 30 مگاپاسکال به 90 مگاپاسکال شد.

۲- توزیع نانو ذرات در زمینه آمورف رزین وینیل استر تاثیری بر افزایش استحکام نداشت.

۳- با تقویت زمینه وینیل استر توسط الیاف شیشه، میزان درصد ازدیاد طول از $1/1$ درصد به $8/8$ درصد افزایش یافت. همچنین توزیع نانو ذرات دی‌اکسیدتیتانیوم و کربن در بستر رزین وینیل استر موجب افزایش میزان درصد ازدیاد طول کامپوزیت الیافی تا $13/8$ درصد شد.

۴- حضور الیاف شیشه در بستر رزین موجب کاهش مقاومت سایشی رزین شد. توزیع نانو ذرات در بستر رزین موجب افزایش چشمگیر مقاومت سایشی رزین شد.

۵- میزان سختی رزین وینیل استر با تقویت آن توسط الیاف شیشه از 20 ویکرز به 30 ویکرز افزایش یافت همچنین حضور نانو ذرات موجب افزایش سختی از 30 ویکرز به 39 ویکرز شد.

polypropylene- clay hybrids. *Macromolecules*. 1997 Oct 6;30(20):6333-8.

27- Chao SH, Naaman AE, Parra-Montesinos GJ. Bond behavior of reinforcing bars in tensile strain-hardening fiber-reinforced cement composites. *ACI Structural Journal*. 2009 Nov 1;106(6):897.

11- Tayyebi M, Eghbali B. Microstructure and mechanical properties of SiC-particle-strengthening tri-metal Al/Cu/Ni composite produced by accumulative roll bonding process. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2018 Mar;25(3):357-64.

12- El-Wazery MS, El-Elamy MI, Zoalfakar SH. Mechanical properties of glass fiber reinforced polyester composites. *International journal of applied science and engineering*. 2017 Feb;14(3):121-31.

13- Thostenson ET, Chou TW. Aligned multi-walled carbon nanotube-reinforced composites: processing and mechanical characterization. *Journal of physics D: Applied physics*. 2002 Aug 6;35(16):L77.

14- Uddin MF, Sun CT. Strength of unidirectional glass/epoxy composite with silica nanoparticle-enhanced matrix. *Composites Science and Technology*. 2008 Jun 1;68(7-8):1637-43.

15- Xanthos M, editor. *Functional fillers for plastics*. John Wiley & Sons; 2010 Jan 7.

16- Tanaka K, Uchiyama Y, Toyooka S. The mechanism of wear of polytetrafluoroethylene. *Wear*. 1973 Feb 1;23(2):153-72.

17- Fung CP. Manufacturing process optimization for wear property of fiber-reinforced polybutylene terephthalate composites with grey relational analysis. *Wear*. 2003 Feb 1;254(3-4):298-306.

18- Maiti P, Nam PH, Okamoto M, Hasegawa N, Usuki A. Influence of crystallization on intercalation, morphology, and mechanical properties of polypropylene/clay nanocomposites. *Macromolecules*. 2002 Mar 12;35(6):2042-9.

19- Maiti P, Nam PH, Okamoto M, Hasegawa N, Usuki A. Influence of crystallization on intercalation, morphology, and mechanical properties of polypropylene/clay nanocomposites. *Macromolecules*. 2002 Mar 12;35(6):2042-9.

20- Khedkar J, Negulescu I, Meletis EI. Sliding wear behavior of PTFE composites. *Wear*. 2002 Mar 1;252(5-6):361-9.

21- Wang QH, Xue QJ, Liu WM, Chen JM. The friction and wear characteristics of nanometer SiC and polytetrafluoroethylene filled polyetheretherketone. *Wear*. 2000 Aug 28;243(1-2):140-6.

22- Mirmohseni A, Zavareh S. Epoxy/acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer/clay ternary nanocomposite as impact toughened epoxy. *Journal of polymer research*. 2010 Mar;17(2):191-201.

23- Tayyebi M, Rahmatabadi D, Adhami M, Hashemi R. Manufacturing of high-strength multilayered composite by accumulative roll bonding. *Materials Research Express*. 2020 Jan 10;6(12):1265e6.

24- Kim JW, Liu F, Choi HJ, Hong SH, Joo J. Intercalated polypyrrole/Na⁺-montmorillonite nanocomposite via an inverted emulsion pathway method. *Polymer*. 2003 Jan 1;44(1):289-93.

25- Morgan AB, Gilman JW. Characterization of polymer-layered silicate (clay) nanocomposites by transmission electron microscopy and X-ray diffraction: A comparative study. *Journal of Applied Polymer Science*. 2003 Feb 22;87(8):1329-38.

26- Kawasumi M, Hasegawa N, Kato M, Usuki A, Okada A. Preparation and mechanical properties of