



مقایسه خواص مکانیکی بین نانومواد مرکب وینیل استر-خاک رس و وینیل استر-تیتان

حمزه شاهرجبیان^۱، سید یوسف احمدی بروغنی^{۲*}، سیدجواد احمدی^۳

۱- دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک ساخت و تولید، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۲- استادیار مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند

۳- استادیار شیمی، پژوهشگاه چرخه سوخت، سازمان انرژی اتمی، تهران
* syahmadi@birjand.ac.ir، ۹۷۱۷۵/۶۱۵

چکیده- در این مقاله مقادیر مختلف خاک رس و دی اکسید تیتانیم (تیتان) (۱، ۳ و ۵٪ وزنی رزین) به زمینه وینیل استر به وسیله همزن مکانیکی اضافه می‌شود. تأثیر این نانوذرات روی خواص مکانیکی (استحکام و مدول کششی، استحکام و مدول خمشی و چقرمگی شکست) بررسی می‌شود. به منظور بررسی تشکیل شدن نانوماده مرکب، آزمایش XRD و عکس‌برداری به وسیله میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) انجام می‌شود. آزمایش XRD نشان می‌دهد که لایه‌های خاک رس کاملاً از هم جدا شده و ساختار نانوماده مرکب اینترکالیت شده است. نتایج حاصل از آزمایش‌های کشش، خمش و چقرمگی شکست نشان می‌دهد که پرکننده خاک رس نسبت به تیتان در بهبود خواص مکانیکی بهتر است. نمونه تقویت شده با یک درصد خاک رس نسبت به بقیه نمونه‌ها دارای خواص مکانیکی بهتری است.
کلیدواژگان: نانوماده مرکب، وینیل استر، خاک رس، تیتان.

The Comparison of mechanical properties between vinyl ester-clay and vinyl ester-titan nanocomposites

H. Shahrajabian^{1*}, S.Y. Ahmadi-Brooghani², S. J. Ahmadi³

1- PhD Student, Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran

2- Assist. Prof., Mech. Eng., Birjand Univ., Birjand, Iran

3- Assist. Prof., Chemistry, Nuclear Science and Tech. Research Inst., Tehran, Iran

* P.O.B. 97175/615 Birjand, Iran. syahmadi@birjand.ac.ir

Abstract- In this study, various amounts of clay nanoparticles and titan nanoparticles (1, 3 and 5% wt.) were introduced into a vinyl ester resin matrix by mechanical mixer. The influence of these nanoparticles on the mechanical properties (tensile strength, tensile modulus, flexural strength, flexural strength and fracture toughness) is investigated. To investigate the structure of nanocomposites, X-ray diffraction (XRD) and transmission electron microscopy (TEM) tests are done. The XRD test shows that the structure of clay-vinyl ester nanocomposites is intercalated. The results of tensile, flexural and fracture toughness experiments show that clay is better than titan in the improvement of the mechanical properties. Clay- vinyl ester nanocomposite with 1% wt. of clay has the better mechanical properties than others samples.

Keywords: Nanocomposites, Vinyl Ester, Clay, Titan.

نانوپرکننده ها تقویت شوند. گزارش شده که اضافه کردن نانوذراتی از قبیل تیتان [۲،۱]، آلومینا [۴،۳]، کربنات کلسیم [۵]، خاک رس [۶]، اکسید سیلیس [۸،۷]، و کاربید سیلیس [۹] به زمینه پلیمری، باعث بهبود استحکام نهایی، کرنش در

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، پلیمرها و مواد مرکب زمینه پلیمری به خاطر وزن و هزینه کم و راحتی تولید مورد توجه زیادی قرار گرفته‌اند. پلیمرها می‌توانند به منظور بهبود خواصشان توسط

تجاری سی او ۲۳۴^۲، یک رزین وینیل استر بر پایه اپوکسی بیسفونل A (ساخت شرکت مکرر، ایران) بود که ترکیبی از ۶۵ درصد وزنی وینیل استر و ۳۵ درصد وزنی استایرن است. رزین مایع دارای چگال^۳ ۱/۱۳ گرم بر سی سی و ویسکوزیته ۶۰۰-۳۰۰ سی سی در دمای اتاق است [۱۶]. نانوذرات تیتان یا اکسید تیتانیوم^۳ با قطر متوسط ۲۱ نانومتر و سطح مخصوص ۵۰±۱۵ متر مربع بر گرم به عنوان پرکننده برای تهیه نانوماده مرکب استفاده شد. پرکننده دیگری که در این کار استفاده شد، مونت موریلونیت^۴ (خاک رس) از نوع کلوزایت سی سی ساخت آمریکا، اصلاح شده با نمک آمونیوم چهار واحدی بود. برای پخت نمونه‌ها در دمای اتاق ۲ درصد وزنی متیل اتیل کتون پراکساید به عنوان آغازگر و ۵٪ درصد وزنی کبالت نفتنات به عنوان شتاب‌دهنده استفاده شد.

۲-۲- تهیه نانوماده مرکب

نانوذرات تیتان و خاک رس با ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی (جدول ۱) درون ۵۰ میلی لیتر رزین وینیل استر پراکنده شدند. قبل از اختلاط، نانوذرات به مدت ۴ ساعت در دمای ۸۰ درجه درون آن خشک شدند. اختلاط توسط همزن با انرژی بالا به مدت ۹۰ دقیقه با ۱۵۰۰ دور بر دقیقه انجام شد. به منظور گاززدایی، نمونه‌ها داخل حمام التراسونیک به مدت ۲۰ دقیقه قرار داده شدند. سپس ۲ درصد وزنی پروکساید و ۵٪ درصد وزنی نفتنات به ترتیب به رزین اضافه شدند و بطور دستی مخلوط شدند. عملیات پخت نمونه‌ها در دمای اتاق به مدت ۲۴ ساعت انجام شد و سپس برای پخت کامل نمونه‌ها به مدت ۵ ساعت در دمای ۹۰ درجه سانتی‌گراد نگهداری شدند.

جدول ۱ نمونه‌های تهیه شده.

نمونه	درصد وزنی خاک رس	درصد وزنی رزین	نمونه	درصد وزنی تیتان وزنی رزین	درصد
VE	-	۱۰۰	VT3	۱	۹۹
VC1	۱	۹۹	VT3	۳	۹۷
VC3	۳	۹۷	VT5	۵	۹۵
VC5	۵	۹۵			

2. CO-234
3. AEROXIDE® TiO2 P25
4. Montmorillonite

نقطه شکست، انرژی ضربه، چقرمگی شکست، مقاومت خزش و پایداری حرارتی شده است.

پلیمرها به دو طبقه مهم پلاستیک‌ها و الاستومترها طبقه‌بندی می‌شوند که که خود پلاستیک‌ها نیز به دو گروه گرماسخت و گرمانرم طبقه‌بندی می‌شوند. رزین وینیل استر به عنوان یک گرماسخت، دارای خواص عالی شامل مقاومت شیمیایی، ویسکوزیته کم و خواص مکانیکی نسبتاً بالا همراه با قابلیت پخت در دمای اتاق است [۱۰]. به همین دلایل بسیاری از پژوهشگران از رزین وینیل استر به عنوان زمینه نانوماده مرکب استفاده کرده‌اند تا با اضافه کردن نانوپرکننده از قبیل نانوذرات سرامیکی [۱۲، ۱۱]، نانولوله کربنی [۱۳] و خاک رس [۱۴] خواص آن را بهبود بخشند.

چترجی^۱ و همکاران [۲] خواص مکانیکی (کشش و خمش) و حرارتی نانوماده مرکب اپوکسی-تیتان را بررسی کردند. نتایج کار آنها نشان داد که مدول کششی، مدول خمشی، مدول ذخیره‌ای، دمای انتقال شیشه‌ای و پایداری حرارتی برای ماده پرشده با یک درصد تیتان با اندازه ۵ نانومتر بهبود یافت. اما برای نمونه پرشده با ۲ درصد تیتان با کاهش همراه بود.

جودار و همکاران [۱۵] تأثیر نانو خاک رس را بر خواص مکانیکی و جذب آب نانوماده مرکب پایه وینیل استر بررسی کردند. آنها خاک رس را با نسبت وزنی ۱، ۳ و ۵ درصد رزین به رزین اضافه کردند و مشاهده کردند که با اضافه کردن نانو خاک رس خواص مکانیکی از قبیل استحکام و مدول کششی و خمشی و خواص جذب آب بهبود پیدا کرده است. نمونه با ۳ درصد وزنی خاک رس بهترین خواص مکانیکی را نسبت به بقیه دارا بوده است. در این مقاله نانوذرات خاک رس و تیتان به نسبت ۱، ۳ و ۵ درصد حجمی به زمینه وینیل استر توسط همزن مکانیکی اضافه شد. نانومواد مرکب تهیه شده تحت آزمایش XRD، عکسبرداری بوسیله TEM و آزمایشهای مکانیکی (کشش، خمش و چقرمگی شکست) قرار گرفتند. نتایج آزمایش‌های مکانیکی نشان داد که خاک رس نسبت به تیتان تقویت کننده مناسب‌تری برای وینیل استر است.

۲- کار آزمایشگاهی

۲-۱- مواد

زمینه پلیمری استفاده شده در این کار، رزین وینیل استر

1. Amit Chatterjee

۲-۳- آزمایش کشش

آزمایش کشش بر روی دستگاه کشش سنتام^۱ با سرعت ۳ میلی‌متر بر دقیقه بر اساس استاندارد ای اس تی ام دی ۶۳۸^۲ انجام شد. برای هر درصد و نوع پرکننده، ۵ نمونه آزمایش شد. با انجام این آزمایش مدول ینگ، استحکام شکست و کرنش در نقطه شکست برای نمونه‌ها بدست آمد. سطح مقطع نمونه تست کشش دارای ۵ میلی‌متر ضخامت و ۱۳ میلی‌متر عرض است. نمونه کشش ساخته شده در شکل ۱ نشان داده شده است.

۲-۴- آزمایش خمش

آزمایش خمش بر روی دستگاه کشش سنتام با سرعت ۱ میلی‌متر بر دقیقه بر اساس استاندارد ای اس تی ام دی ۳۷۹۰^۳ انجام شد. برای هر درصد و نوع پرکننده، ۵ نمونه آزمایش شد. با انجام این آزمایش استحکام خمشی (σ_f) و مدول خمشی (E) بدست آمدند. نمونه آزمایش خمش دارای ۶۰ میلی‌متر طول، ۲۵ میلی‌متر عرض و ۲/۴ میلی‌متر ضخامت است. نمونه خمش ساخته شده در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۱ نمونه آزمایش کشش



شکل ۲ نمونه آزمایش خمش

استفاده روابط زیر بدست می‌آید [۱۷].

$$\sigma_f = \frac{3p_m l}{2wt^2} \quad (1)$$

$$E = \frac{p_m l^3}{4wt^2 \delta} \quad (2)$$

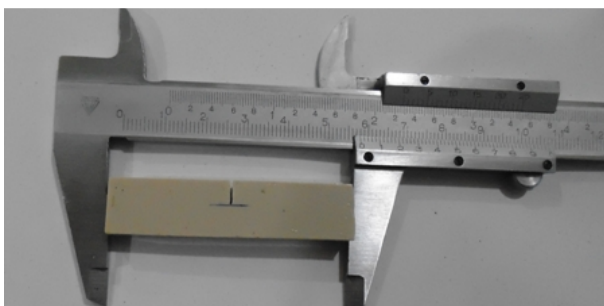
که در آن P_m حداکثر بار، l فاصله دو تکیه‌گاه، t ضخامت نمونه، w پهنای نمونه و δ حداکثر انحراف مرکز نمونه است.

۲-۵- آزمایش چقرمگی شکست

نمونه‌های خمش سه نقطه‌ای با طول ۶۰ میلی‌متر، عرض ۱۳/۴ میلی‌متر و ضخامت ۶/۷ میلی‌متر بر اساس استاندارد ای اس تی ام دی ۵۰۴۴^۴ به منظور ارزیابی چقرمگی شکست (K_{IC}) تهیه شدند. ترکی با طول ۶/۵ میلی‌متر و عرض ۰/۵ میلی‌متر روی نمونه‌ها ایجاد شد. آزمایش روی دستگاه سنتام با سرعت ثابت ۱ میلی‌متر بر دقیقه در دمای اتاق انجام شد. حداقل ۵ نمونه بر اساس استاندارد برای هر شرایط آزمایش شد. برای ایجاد ترک روی نمونه‌ها از یک تیغه فرز اره‌ای با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر روی دستگاه فرز استفاده شد که در نهایت ترکی با عرض ۰/۵ میلی‌متر و طول ۶/۵ میلی‌متر روی نمونه ایجاد شد. حتی الامکان سعی شد تیغه فرز به نحوی ساخته شود که لبه آن تیز بوده و به تیغ ریش تراشی نزدیک شود. نمونه ساخته شده برای آزمایش چقرمگی شکست در شکل ۳ نشان داده شده است. مقدار K_{IC} را می‌توان با استفاده از رابطه (۳) محاسبه کرد [۱۷].

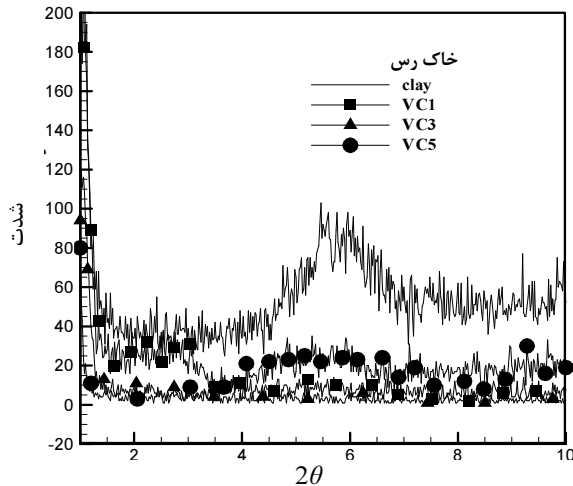
$$K_{IC} = \frac{PS}{BW^{3/2}} \times f(x) \quad (3)$$

که در رابطه فوق P بار شکست، S فاصله بین دو تکیه‌گاه، B عرض نمونه، W ارتفاع نمونه و a طول ترک اولیه بوده و رابطه (۴) برقرار بوده و $x=a/w$ است.

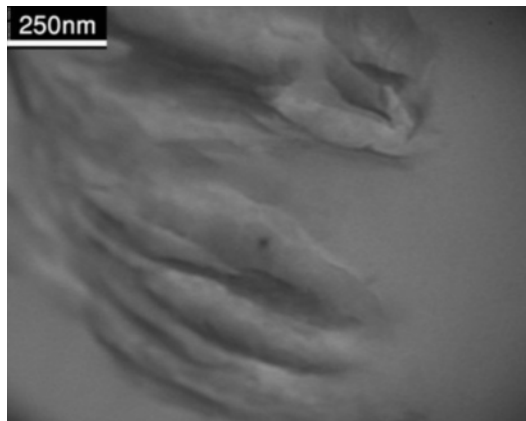


شکل ۳ نمونه آزمایش چقرمگی شکست

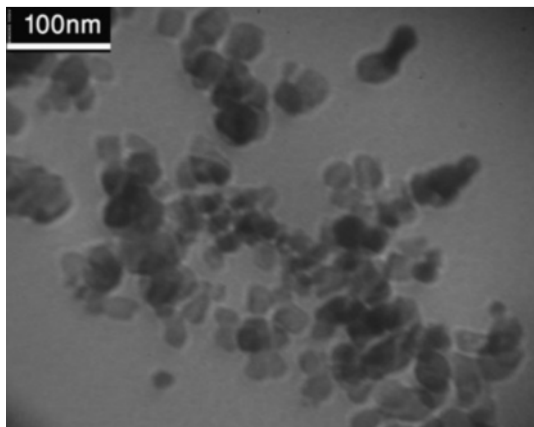
بیشترین افزایش در استحکام نهایی برای VC1 با ۲۰ درصد افزایش بوده است. افزایش ۵ درصد کلی باعث افت خواص شده بطوری که استحکام نهایی ۲۰ درصد کاهش پیدا کرده است.



شکل ۴ پراش پرتو ایکس خاک رس و نانومواد مرکب تقویت شده با خاک رس



شکل ۵ عکس TEM از نمونه VC3



شکل ۶ عکس TEM از نمونه VT3

$$f(x) = \frac{3x^{1/2}[1.99 - x(1-x)(2.15 - 3.93x + 2.7x^2)]}{2(1+2x)(1-x)^{3/2}} \quad (4)$$

۲-۶- مورفولوژی

عموماً ساختار نانومواد مرکب بوسیله میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) و برای نمونه‌های تقویت شده با خاک رس از پراش پرتو ایکس (XRD) استفاده می‌شود.

با تعیین پیک نمونه در آزمایش XRD می‌توان ساختار نانوماده مرکب تقویت شده با خاک رس (اینترکالیت یا اکسفولیت) را تعیین کرد. آزمایش XRD در دمای اتاق و به وسیله دستگاه تفرق اشعه ایکس فیلیپس^۱ انجام شد. اسکن زاویه (2θ) در بازه ۱۰-۲ درجه و در ولتاژ شتاب دهنده ۴۰ کیلو ولت و جریان ۳۰ میلی‌آمپر انجام شد. به منظور تهیه عکس TEM از دستگاه با ولتاژ کاری ۳۰ کیلو ولت استفاده شد. نمونه‌های بسیار نازک با ضخامت ۶۰ نانومتر توسط میکروتوم در دمای اتاق تهیه شدند.

شکل ۴ پراش پرتو ایکس خاک رس و نانومواد مرکب تقویت شده با خاک رس را نمایش می‌دهد. همان طور که در شکل دیده می‌شود خاک رس اصلاح شده روی ۵ درجه دارای پیک است. اما با توجه به شکل ۴، نانومواد مرکب تقویت شده با ۱، ۳ و ۵ درصد وزنی خاک رس هیچکدام دارای پیک نیستند، که نشان دهنده این است که ساختار همه نانومواد مرکب اینترکالیت شده است و رزین بین لایه‌های سیلیکاتی نفوذ کرده است. شکل‌های ۵ و ۶ به ترتیب عکس TEM برای نمونه‌های تقویت شده با ۳ درصد وزنی خاک رس و تیتان را نمایش می‌دهند.

۳- نتایج و بحث

۳-۱- آزمایش کشش

نمودار تنش-کرنش مربوط به نانومواد مرکب تقویت شده با خاک رس و تقویت شده با تیتان به ترتیب در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

نتایج مربوط به آزمایش کشش برای همه نمونه‌ها در جدول ۲ آمده است. همان‌طور که نتایج نشان می‌دهد اضافه کردن خاک رس به وینیل استر تا ۳ درصد وزنی باعث افزایش استحکام نهایی و مدول الاستیسیته شده است بطوری که

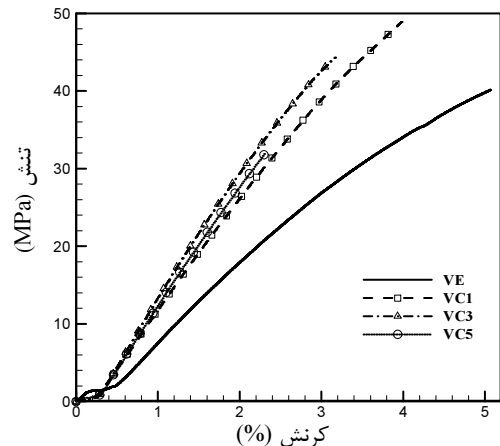
1. Philips X'Pert

اما مدول الاستیسیته افزایش یافته است. علت افزایش مدول الاستیسیته به دلیل بالا بودن مدول الاستیسیته تیتان (۲۰۰ الی ۳۰۰ گیگاپاسکال [۲]) نسبت به رزین وینیل استر است. استحکام نهایی و کرنش در نقطه شکست برای رزین خالص نسبت به نانو مواد مرکب تقویت شده با تیتان بیشتر است. از آنجایی که رزین مانند یک ماده ترد رفتار می‌کند و مدول الاستیسیته آن نسبت به نانو ذره خیلی کمتر است، بنابراین نانو ذرات مانند پرکننده‌های صلب داخل رزین عمل می‌کنند. در نتیجه تجمع نانو ذرات در زمینه به عنوان نقاط تمرکز تنش عمل می‌کند. این تجمع ذرات را می‌توان در شکل ۶ مشاهده کرد. تحقیقات دیگری نیز گزارش کرده‌اند که اضافه کردن نانو پرکننده به خصوص در درصد‌های بالا نیروی وان در والسی بین پرکننده‌ها و زمینه را افزایش داده و باعث ایجاد تمرکز تنش شده است [۱۸،۲].

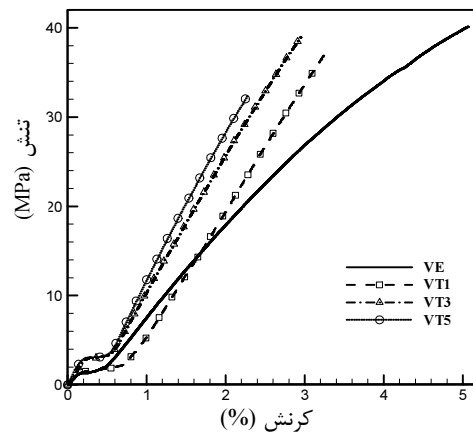
قدرت چسبندگی و سختی سطحی تأثیر شایانی روی خواص مکانیکی دارند [۱۹]. اگر برهم‌کنش زمینه و پرکننده ضعیف باشد، ذرات قادر نخواهند بود که هیچ بخشی از بار خارجی را انتقال دهند [۱۹]. بنابراین کاهش در استحکام و کرنش در نقطه شکست نانو مواد مرکب تقویت شده با تیتان نسبت به رزین خالص می‌تواند تجمع ذرات، برهم‌کنش ضعیف بین زمینه و پرکننده و همچنین وجود حباب‌های تولید شده حین اختلاط باشد.

۳-۲- آزمایش خمش

نتایج آزمایش خمش در جدول ۳ آمده است. شکل‌های ۹ و ۱۰ تأثیر میزان پرکننده را روی خواص خمشی (استحکام خمشی و مدول خمشی) نانو مواد مرکب تقویت شده با تیتان و خاک رس نشان می‌دهد. مدول خمشی همان‌طور که انتظار بود با افزایش میزان پرکننده برای هر دو نوع پرکننده افزایش نشان داده است. استحکام خمشی برای پرکننده خاک رس با ۱ درصد وزنی بیشترین افزایش را نشان داده است بطوری که استحکام خمشی این نمونه ۳۰ درصد نسبت به رزین خالص افزایش یافته است. برای نمونه‌های با ۳ و ۵ درصد پرکننده استحکام خمشی نسبت به نمونه ۱ درصدی کاهش نشان داده که این می‌تواند ناشی از افزایش تجمع ذرات و افزایش حباب‌های ریز داخل نمونه باشد.



شکل ۷ نمودار تنش-کرنش نانومواد مرکب تقویت شده با خاک رس



شکل ۸ نمودار تنش-کرنش نانومواد مرکب تقویت شده با تیتان

جدول ۲ خواص کششی وینیل استر و نانومواد مرکب

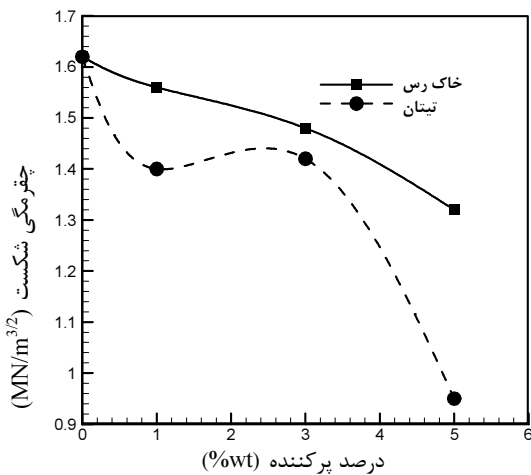
نمونه	استحکام نهایی (MPa)	کرنش در نقطه شکست (%)	مدول یانگ (GPa)
VE	40 ± 2/2	5/12 ± 0/45	1/12 ± 0/25
VC1	48 ± 4/5	3/91 ± 0/42	1/54 ± 0/83
VC3	44 ± 3/5	3/16 ± 0/34	1/78 ± 0/63
VC5	32 ± 5	2/31 ± 0/21	1/63 ± 0/45
VT1	37 ± 2/5	3/25 ± 0/32	1/34 ± 0/32
VT3	39 ± 3/5	2/95 ± 0/25	1/67 ± 0/27
VT5	32 ± 3	2/25 ± 0/15	1/89 ± 0/23

این کاهش خواص در VC5 به خاطر افزایش حباب‌های ریز و همچنین تجمع پرکننده می‌تواند باشد. برای همه نمونه‌های پرشده با خاک رس میزان کرنش در نقطه شکست کاهش پیدا کرده است که این پدیده ناشی از ترد شدن زمینه به خاطر اضافه شدن خاک رس است. برای همه نمونه‌های پرشده با تیتان استحکام نهایی و کرنش در نقطه شکست کاهش یافته

داده است که دلیل آن می‌تواند قدرت چسبندگی ضعیف نانو ذرات به زمینه، تجمع ذرات و وجود حباب حین اختلاط باشد. در میان نانو مواد مرکب تقویت شده با تیتان نمونه VT3 بیشترین استحکام خمشی را از خود نشان داده است.

۳-۳- آزمایش چقرمگی شکست

نتیجه آزمایش چقرمگی شکست روی نانو مواد مرکب تقویت شده با خاک رس و تیتان در شکل ۱۱ نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده میزان چقرمگی شکست زمینه (K_{Ic}) با اضافه شدن نانو پرکننده‌های خاک رس و تیتان کاهش پیدا کرده است. البته این کاهش برای نانو مواد مرکب وینیل استر-تیتان بیشتر از نانو مواد مرکب وینیل استر-خاک رس بوده است.



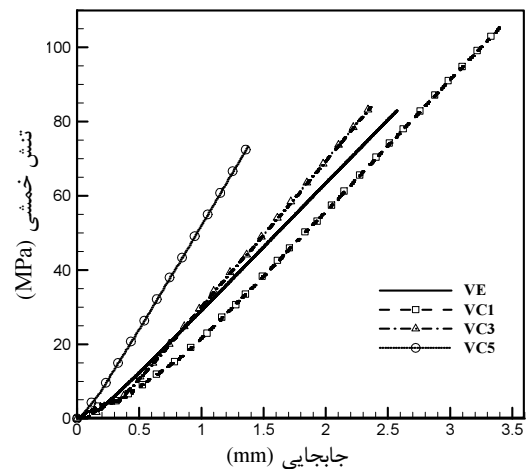
شکل ۱۱ چقرمگی شکست نانومواد مرکب تقویت شده با خاک رس و تیتان

در میان نانو مواد مرکب وینیل-استر خاک رس و وینیل استر-تیتان به ترتیب بیشترین کاهش مربوط به نمونه VC5 (۱۴٪ کاهش) و VT5 (۴۱٪ کاهش) بوده است. نتایج آزمایش چقرمگی شکست نشان می‌دهد که اضافه کردن نانو پرکننده‌ها باعث تردی زمینه شده و به همین دلیل چقرمگی شکست کاهش پیدا کرده است. البته این کاهش برای نانوتیتان بیشتر بوده است.

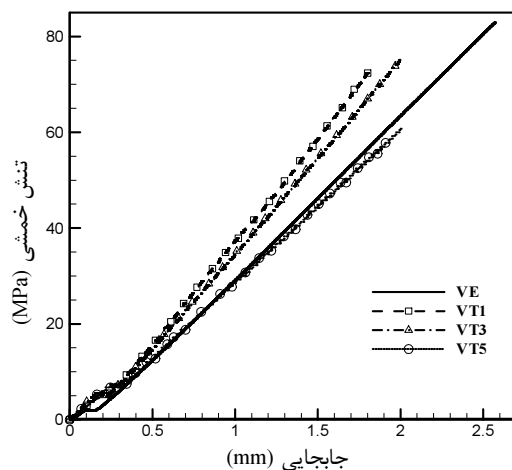
از نتایج کار آزمایشگاهی می‌توان نتیجه گرفت که پرکننده خاک رس نسبت به تیتان مناسب‌تر است و در بین همه نمونه‌ها، نمونه پر شده با ۱ درصد خاک رس بهترین خواص

جدول ۳ خواص خمشی وینیل استر و نانومواد مرکب

نمونه	استحکام خمشی (MPa)	مدول خمشی (GPa)
VE	82 ± 6	$3/21 \pm 0/18$
VC1	108 ± 12	$4/83 \pm 0/23$
VC3	85 ± 10	$5/73 \pm 0/34$
VC5	73 ± 8	$6/82 \pm 0/51$
VT1	72 ± 8	$4/12 \pm 0/24$
VT3	75 ± 6	$4/85 \pm 0/28$
VT5	61 ± 10	$5/16 \pm 0/27$



شکل ۹ تأثیر درصد نانوپرکننده خاک رس روی خواص خمشی وینیل استر-خاک رس



شکل ۱۰ تأثیر درصد نانوپرکننده تیتان روی خواص خمشی وینیل استر-تیتان

اما برای نانو مواد مرکب تقویت شده با تیتان استحکام خمشی برای همه نمونه‌ها نسبت به رزین خالص کاهش نشان

- characterization of TiO₂-epoxy nanocomposite”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 487, 2008, pp. 574-585.
- [3] Zhao S., Schadler L.S., Duncan R., Hillborg H., Auletta T., “Mechanisms leading to improved mechanical performance in nanoscale alumina filled epoxy”, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, 2008, pp. 2965-2975.
- [4] Guoliang P., Qiang G., Aiguo T., Zhiqiang H., “Mechanical behaviors of Al₂O₃ nanoparticles reinforced polyetheretherketone”, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 492, 2008, pp. 383-391.
- [5] Ashenai Ghasemi F., Islami Farsani M., “Effect of nano-CaC of Polypropylene CO₃ on dynamic mechanical properties”, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 6, 1392, pp. 1-10. (In Persian)
- [6] Saraeian P., Golzar M., Jafari Amanabadi S.H., “Experimental study of the Effect of Nanoclay Modifier on Tensile and Bending Module of Polyamide/Nanoclay Nanocomposite”, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 11, No. 3, 1390, pp. 85-94. (In Persian)
- [7] Yao X.F., Zhou D., Yeh H.Y., “Macro/microscopic fracture characterizations of SiO₂/epoxy nanocomposites”, *Aerospace Science and Technology*, Vol. 12, 2008, pp. 223-230.
- [8] Zhou T. H., Ruan W. H., Yang J. L., Rong M. Z., Zhang M. Q., Zhang Z., “A novel route for improving creep resistance of polymers using nanoparticles”, *Composites Science and Technology*, Vol. 67, 2007, pp. 2297-2302.
- [9] Chisholm N., Mahfuz H., Rangari V. K., Ashfaq A., Jeelani Sh., “Fabrication and mechanical characterization of carbon/SiC-epoxy nanocomposites”, *Composite Structures*, Vol. 67, 2005, pp. 115-124.
- [10] Yang H., and Lee L. J., “A kinetic model for free radical cross linking Copolymerization of styrene/vinyl ester resin”, *Polymer composites*, Vol. 22, 2001, pp. 121-1129.
- [11] Guo Zh., Kenny Lei K., Li Y., Wai H., “Fabrication and characterization of iron oxide nanoparticles reinforced vinyl-ester resin nanocomposites”, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, 2008, pp. 1513-1520.
- [12] Guo Zh., Liang X., Pereira T., Scaffaro R., Hahn H. Th., “CuO nanoparticle filled vinyl-ester resin nanocomposites: Fabrication, characterization and property analysis”, *Composites Science and Technology*, Vol. 67, 2007, pp. 2036-2044.
- [13] Zhu J., Imam A., Crane R., Lozano K., Khabashesku V. N., Barrera E. V., “Processing a glass fiber reinforced vinyl ester composite with nanotube enhancement of interlaminar shear strength”, *Composites Science and Technology*,

مکانیکی (به غیر از چقرمگی شکست) را از خود نشان داده است. علت بهتر بودن خواص مکانیکی نانومواد مرکب تقویت شده با خاک رس نسبت به نانومواد مرکب تقویت شده با تیتان را می‌توان به شکل پرکننده خاک رس که حالت صفحه‌ای دارد نسبت داد. زیرا صفحه‌ای بودن شکل آن باعث افزایش نسبت سطح به حجم شده و در نتیجه باعث افزایش چسندگی بیشتر پرکننده به زمینه می‌شود و در نتیجه بار بیشتری از زمینه به پرکننده منتقل می‌شود.

۴- نتیجه گیری

در این مقاله نانوماده مرکب وینیل استر-خاک رس و وینیل استر-تیتان بوسیله همزن با انرژی بالا تهیه شدند. نانو مواد مرکب تحت آزمایش‌های مکانیکی شامل کشش، خمش و چقرمگی شکست قرار گرفتند تا مقایسه‌ای بین دو نوع نانوماده مرکب انجام گیرد. نتایج آزمایش مکانیکی نشان داد با اضافه کردن تیتان به وینیل استر خواص کششی، خمشی و چقرمگی شکست کاهش پیدا کرد. از میان درصد‌های پرکننده، نمونه پر شده با ۳ درصد تیتان بهترین خواص را نسبت به بقیه درصد‌های پرکننده تیتان داشت. در مقابل با اضافه کردن خاک رس به وینیل استر، نمونه‌های VC1 و VC3 در آزمایش کشش به ترتیب باعث بهبود استحکام شکست به اندازه ۲۰٪ و ۱۰٪ شدند. در آزمایش خمش نمونه‌های VC1 و VC3 استحکام خمشی را به اندازه ۳۱٪ و ۴٪ بهبود دادند. در آزمایش چقرمگی شکست همه نمونه‌ها نسبت به رزین خالص دارای چقرمگی شکست کمتری بودند.

بطور کلی از این کار نتیجه گرفته شد که خاک رس بر خلاف تیتان باعث بهبود خواص مکانیکی (استحکام کششی، مدول کششی، استحکام خمشی و مدول خمشی) وینیل استر شد که دلیل آن را می‌توان به صفحه‌ای بودن شکل پرکننده خاک رس نسبت داد که باعث می‌شود سطح تماس نانو خاک رس نسبت به نانو ذرات کروی تیتان با رزین بیشتر باشد و در نتیجه بار بیشتری از زمینه به پرکننده منتقل می‌شود.

۵- مراجع

- [1] Hamad A., Al-Turaif., “Effect of nano TiO₂ particle size on mechanical properties of cured epoxy resin”, *Progress in Organic Coatings*, Vol. 69, 2010, pp. 241-246.
- [2] Chatterjee A., Islam M. S., “Fabrication and

- [17] Low IM, McGrath M, Lawrence D, Schmidt P, Lane J, Latella BA, et al. "Mechanical and fracture properties of cellulose-fibre-reinforced epoxy laminates", *Composites: Part A*, Vol. 38, 2007, pp. 963-74.
- [18] Wetzel B, Hauptert F., Zhang M. Q., "Epoxy nanocomposites with high mechanical and tribological performance", *Composites Science and Technology*, Vol. 63, 2003, pp. 2055-2067.
- [19] Wu C. L., Zhang M. Q., Rong M. Z., Friedrich K., "Tensile performance improvement of low nanoparticles filled-polypropylene composites", *Composites Science and Technology*, Vol. 62, 2002, pp. 1327-1340.
- Vol. 67, 2007, pp. 1509-1517.
- [14] Ji G., Li G., "Effects of nanoclay morphology on the mechanical, thermal, and fire-retardant properties of vinyl ester based nanocomposite", *Materials Science and Engineering A*, Vol. 498, 2008, pp. 327-334.
- [15] Jowdar E., Beheshty M. H., Atai M., "Nano Clay Effect on Morphology, Mechanical Properties and Water Absorption of Vinyl Ester- Based Nanocomposites", *Iranian Journal of Polymer Science and Technology*, Vol. 24, No. 2, 1390, pp. 83-92. (In Persian)
- [16] Mokarrar Engineering Co., Epoxy Unit, Vinyl ester resin CO-234, www.mokarrar.com, Farvardin 92. (In Persian)