مجله مهندسی مکانیک مدرس، مرداد ۱۳۹۳، دوره ۱٤، شماره ۶، ص‌ص ۲۹-۳٤

ماهنامه علمی پژوهشی

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir

# مطالعه تأثیر افزودن نانوذرات رسی بر خواص کششی و خمشی سیستم رزین اپوکسی سخت شده با سخت کننده تِتا

غلامحسین رحیمی[۱*]، رضا زمانی[۲]، محمدحسین پل[۳]

۱- استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت مدرس، تهران
۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تفرش، تفرش
* تهران، صندوق پستی ۱۴۳-۱۴۱۱۵، rahimi_gh@modares.ac.ir

**اطلاعات مقاله**

مقاله پژوهشی کامل
دریافت: ۰۵ بهمن ۱۳۹۲
پذیرش: ۲۰ بهمن ۱۳۹۲
ارائه در سایت: ۲۱ تیر ۱۳۹۳

*کلید واژگان:*
نانوکامپوزیت
نانوذرات رسی
خواص مکانیکی
سخت کننده تِتا

**چکیده**

در این مقاله، تأثیر افزودن نانوذرات اصلاح شده رسی بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی بررسی شده است. سیستم رزین استفاده شده، از یک دیگلیسیدیل اتر بیس فنول نوع آ با نام تجاری اپیون ۸۲۸ به‌عنوان پایه اپوکسی و یک تری اتیلن تترامین با نام تجاری تِتا به‌عنوان سخت‌کننده ساخته شده است. نانوذرات رسی کلویسید سی بی با درصدهای وزنی ۰، ۱/۵، ۳ و ۵ درصد نسبت به مجموعه رزین (اپوکسی- نانوذرات رس) در سیستم اپوکسی پخش شده است. به‌منظور تعیین مورفولوژی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/ نانورس استفاده شده است. مشاهدات به روش پراش پرتو ایکس نشان می‌دهد که توزیع نانوذرات رسی اصلاح شده در زمینه پلیمری از نوع بین لایه‌ای می‌باشد. خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/ نانورس نیز با استفاده از آزمون‌های استاندارد کشش تک محوری و خمش سه نقطه‌ای تعیین شده است. نتایج مربوط به آزمایش‌های مکانیکی نیز نشان‌دهنده بهبود مدول کششی و همچنین مدول و استحکام خمشی رزین اپوکسی با افزودن نانوذرات رسی به ماتریس اپوکسی می‌باشد، این در حالی است که سایر خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی، کرنش شکست و میزان جذب انرژی تا شکست، با افزودن نانوذرات رسی به رزین اپوکسی کاهش می‌یابد. نتایج همچنین نشان می‌داد که افزودن نانوذرات رسی به ماتریس اپوکسی سخت شده با سخت-کننده تتا، سبب ترد شدن آن می‌شود.

# Studies on the tensile and flexural properties of TETA-cured epoxy resins modified with clay

**Gholam Hosein Rahimi[1*], Reza Zamani[2], Mohammad Hosein Pol[3]**

1- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
2- Department of Mechanical Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran.
3- Department of Mechanical Engineering, Tafresh University, Tafresh, Iran.
* P.O.B. 14115-143 Tehran, rahimi_gh@modares.ac.ir

**ARTICLE INFORMATION**

Original Research Paper
Received 25 January 2014
Accepted 09 February 2014
Available Online 12 July 2014

*Keywords:*
Nanocomposite
Clay nanoparticles
Mechanical properties
Epikure TETA

**ABSTRACT**

This study examines the reinforcing effect of organically modified layered clay on the structure and mechanical properties of the amine-cured epoxy/clay nanocomposites. The epoxy resin system is made of a diglycidyl ether of bisphenol A, Epon 828, as the epoxy prepolymer and Epikure 3234, namely TETA, as the curing agent. The organically modified clay, Closite 30B, is dispersed into the epoxy system in a 0%, 1.5%, 3% and 5% ratio in weight with respect to the matrix. The state of dispersion was characterized by X-ray diffraction method. The results of XRD show that the clay has been further intercalated by the epoxy matrix. The tensile and flexural properties of the epoxy/clay nanocomposites were investigated according to the standard tests. It is found that the tensile and flexural modulus and flexural Strength of the epoxy/clay nanocomposites increase with adding clay loading into the resin. However, the other mechanical properties such as tensile strength, strain at break and energy to break decrease as the clay nanoparticles is added into the resin. The results also approved that the TETA-cured epoxy resin can be more brittle when the clay nanoparticle is added into the epoxy resin.

## ۱- مقدمه

نانوکامپوزیت‌های پلیمر-نانوذرات رسی، موادی شامل یک ماتریس پلیمری و ذرات رسی با مقیاس نانومتر می‌باشند. این نانو کامپوزیت‌های پلیمری به جهت بهبود چشمگیری که در خواص مکانیکی و حرارتی پلیمر خالص ایجاد می‌کنند، در محدوده وسیعی از کاربردها امروزه مورد توجه هستند. از جمله کاربردهای اصلی این مواد می‌توان به صنایع بسته‌بندی، پوشش‌دهی، تولید قطعات اتومبیل، صنایع نظامی و هوافضایی اشاره نمود.

در سال‌های اخیر، تحقیق‌های بنیادی و کاربردی زیادی در زمینه نانوکامپوزیت‌های پلیمر-نانوذرات رسی صورت گرفته است. نتایج این تحقیقات نشان می‌دهد که خواص ترمومکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی-

**برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:**

**Please cite this article using:**
Gh.H. Rahimi, R. Zamani, M.H. Pol, Studies on the tensile and flexural properties of TETA-cured epoxy resins modified with clay, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 6, pp. 29-34, 2014 (In Persian)

[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.23.2 ]

نانوذرات رسی، تنها با افزودن میزان کمی از سیلیکات‌های لایه‌ای (کمتر از ۵ درصد وزنی) به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. دلیل اصلی این بهبود خواص در این دسته از نانوکامپوزیت‌ها برهم‌کنش سطحی بالای میان ماتریس و سیلیکات لایه‌ای و همچنین نسبت ابعادی بالای نانوذرات رسی پراکنده شده در ماتریس پلیمری می‌باشد[۱]. هیک و شمس‌الضحی[۲]، به مطالعه تأثیرات ذرات نانویی خاک رس مانند مونت موریلونیت بر بهبود خواص مکانیکی و حرارتی مواد کامپوزیتی پلیمری تقویت شده با الیاف پرداختند. آن‌ها از روش تزریق به کمک خلأ[1] برای ساخت نانوکامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف شیشه-نانورس استفاده کردند و توانستند به ساختار بین لایه-ای دست یابند. آن‌ها دریافتند که تنها با افزایش ۱ درصد وزنی نانو سیلیکات، استحکام برشی بین لایه‌ای، استحکام خمشی و چقرمگی شکست نانوکامپوزیت‌های اپوکسی-الیاف شیشه-نانورس به‌ترتیب ۴۴، ۲۴ و ۲۳ درصد نسبت به کامپوزیت‌های اپوکسی- الیاف شیشه بهبود می‌یابد. آن‌ها این بهبود خواص با افزایش میزان ناچیز از نانوذرات رس را با دلایل زیر توجیه نمودند:

- بهبود خواص ماتریس به دلیل ساختار بین لایه‌ای[2] آن؛
- برهم‌کنش یا اثر تشدیدکننده بین ماتریس پلیمری، الیاف شیشه و نانوذرات رس؛
- بهبود چسبندگی بین ماتریس و الیاف به‌دلیل حضور نانورس.

یاسمین و همکارانش[۳] دریافتند که با افزایش میزان نانوذرات رسی در ماتریس اپوکسی، مدول کششی (سفتی) نیز افزایش می‌یابد، این در حالی است که استحکام کششی و کرنش تا شکست با افزایش میزان نانوذرات رسی در ماتریس، کاهش می‌یابند.

مطالعه خواص مکانیکی و مورفولوژی سیستم اپوکسی و مونت موریلونیت اصلاح شده با اکتادسیل آمونیوم[3] که توسط بکر و همکارانش انجام شده است، نشان‌دهنده بهبود مدول و چقرمگی شکست نانوکامپوزیت در مقایسه با اپوکسی خالص و ایجاد ترکیبی از ساختار بین لایه‌ای و اکسفولیت شده می‌باشد[۴]. ژانگ و همکارانش[۵] بهبودی به میزان ۸۸ و ۲۱ درصد به‌ترتیب در استحکام ضربه‌ای و استحکام کششی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی-کلی با افزودن تنها ۳ درصد وزنی نانوذرات رسی طبیعی به ماتریس مشاهده نمودند.

لام و همکارانش[۶]، در پژوهشی به‌بررسی دقیق تأثیر امواج فراصوت بر ساختار نانوکامپوزیت و چگونگی پراکندگی ذرات نانو در ماتریس پلیمری پرداخته‌اند. در این پژوهش جهت ساخت نمونه‌ها، ٪۴ نانوکلی به‌صورت دستی در رزین مخلوط شده و سپس در مدت زمان‌های مختلف در دمای اتاق سونیکیت می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که با سونیکیت نمودن نمونه‌ها در مدت زمان ۱۰ دقیقه، بهترین خواص مکانیکی را برای نمونه‌ها با ۴ درصد وزنی نانوکلی به‌دست می‌دهد. در این پژوهش، همچنین نشان داده شد که با انجام عملیات سونیکشن ساده امکان ورقه ورقه شدگی ساختار وجود ندارد.

کی و همکارانش[۷] تأثیر افزودن نانورس بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان می‌داد هر چند که افزودن نانورس باعث افزایش قابل توجه مدول الاستیک و چقرمگی شکست رزین اپوکسی می‌شود اما استحکام شکست و کرنش شکست با افزایش میزان نانوذرات رسی به‌صورت قابل توجهی کاهش می‌یابند. آن‌ها استحکام و کرنش پایین را با دلایل زیر توجیه نمودند:

حباب‌های هوای تشکیل شده در مخلوط طی عملیات اختلاط به‌دلیل ویسکوزیته بالای مخلوط (مخصوصاً در مقادیر بالای نانوذرات رسی)، کلوخه‌ای شدن نانوذرات رس در رزین به‌دلیل پراکندگی ضعیف، وجود تمرکز تنش بالا در مرز مشترک نانوذرات رس و ماتریس. به‌دلایل ذکر شده، تحت بارگذاری کششی، ترک‌ها از نواحی ضعیف نمونه شروع به رشد کرده و در نتیجه استحکام و کرنش شکست اپوکسی کاهش می یابد.

نگو و همکارانش[۸]، به‌بررسی اثر دما، مدت زمان و سرعت پیش هم زنی[4] در پراکندگی نانوذرات رس درون اپوکسی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان دهنده تأثیر بیشتر سرعت پیش هم‌زنی نسبت به دما در پراکندگی و همگنی نانوذرات رس بود. آن‌ها همچنین دریافتند که با انجام عمل اختلاط در دمای ۱۲۰°C و با سرعت ۲۴۰۰۰ دور بر دقیقه بهترین توزیع و پخش شدگی نانوذرات رس در اپوکسی ایجاد می‌گردد.

شفیع الله خان و همکارانش [۹،۱۰] اثر افزودن نانوذرات رسی را بر رفتار خستگی و خواص باقیمانده پس از اعمال تنش‌های چرخه‌ای کششی-کششی در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن مورد بررسی قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان می‌داد که افزودن نانوذرات رسی در کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف کربن نه تنها باعث بهبود خواص مکانیکی آن‌ها در بارگذاری استاتیکی می‌گردد بلکه سبب بهبود عمر خستگی در یک بارگذاری دوره ای معین و افزایش خواص باقیمانده پس از اعمال بارگذاری خستگی نیز می‌گردد. آن‌ها دلیل این بهبود خواص در هر دو حالت بارگذاری استاتیکی و خستگی را به جهت تأثیر نانوذرات رسی در بهبود چسبندگی بین سطح مشترک ماتریس و الیاف کربنی می‌دانستند. در این پژوهش نیز، بیشترین بهبود در عمر خستگی، در نمونه های با ۳ درصد وزنی نانوکلی به میزان ۷۴ درصد مشاهده شده است.

میرعابدینی و همکارانش[۱۱] خواص مکانیکی، حرارتی و ضد خوردگی پوشش‌های نانوکامپوزیتی پایه اپوکسی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها برای ساخت نمونه های نانوکامپوزیتی اپوکسی/کلی از هاردنر F205 و رزین ایپون ۸۲۸ استفاده نمودند و برای بهبود پراکندگی نانوذرات رسی از حلال بهره بردند. نتایج برای نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/ نانورس نشان دهنده کاهش خواص مکانیکی با افزایش درصد وزنی نانوکلی بود که این امر احتمالاً به‌دلیل عدم حذف کامل حلال از سیستم و وجود حباب در بین توده های نانورس بوده است.

پل و همکارانش در پژوهش‌هایی جداگانه[۱۲،۱۳] به‌بررسی تأثیر افزودن نانوذرات کلویسید سی بی بر رفتار بالستیکی و خواص مکانیکی مواد مرکب لایه ای الیاف شیشه-اپوکسی با بافت دوبعدی ساخته شده با روش تزریق به کمک خلأ پرداخته اند. آن‌ها دریافتند که حالت بهینه افزایش خواص بالستیکی در سرعت‌های نزدیک به حد بالستیک با افزودن ۳ درصد وزنی نانوذرات رسی به مقدار ۱۰ درصد و برای سرعت‌های نسبتاً بیش از حد بالستیک با افزودن ۱۰ درصد وزنی نانوذرات رسی به مقدار ۲۰ درصد به‌دست می‌آید. همچنین نتایج آن‌ها نشان می‌داد با وجود این که کرنش شکست نانو مواد مرکب هیبریدی با افزایش درصد وزنی نانوذرات رسی تقریباً ثابت باقی می‌ماند، ولی افزایش حداکثری ۱۵/۵ درصدی در مدول یانگ و ۱۱ درصدی در مقاومت شکست، در حالت ۳ درصد وزنی نانوذرات مشاهده می‌شود و با افزایش بیشتر میزان نانوذرات رسی در ماتریس اپوکسی خواص مکانیکی کاهش چشم‌گیری می‌یابد.

در این مقاله، تأثیر افزودن نانوذرات اصلاح شده رسی بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی سخت شده با سخت کننده تتا بررسی شده است. به‌منظور تعیین خواص مکانیکی نانوکامپوزیتی اپوکسی/ نانورس از آزمون‌های کشش

1- Vacuum Assisted Resin Infusion Method (VARIM)
2- Intercalated
3- Nanomer I.30E
4- Pre-mixing



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.23.2 ]

تک محوری و خمش سه نقطه‌ای استفاده شده است. همچنین از پراش پرتو ایکس برای بررسی نوع ساختار و چگونگی پراکندگی نانوذرات رسی در ماتریس اپوکسی استفاده شده است.

## ۲- آزمایش

### ۲-۱- مواد

مواد مورد استفاده در این پژوهش، شامل رزین اپوکسی و خاک رس اصلاح شده می‌باشد. اپوکسی مورد استفاده، سامانه دو جزئی شامل رزین اپوکسی دیگلیسیدیل اتر بیس فنول نوع آ با نام تجاری ایپون ۸۲۸ تولید شده توسط شرکت شل و سخت کننده‌تری اتیلن تترامین با نام تجاری TETA ساخته شده توسط شرکت هانتسمن آمریکا می‌باشد که با نسبت وزنی ۱۳:۱۰۰ نسبت به پایه اپوکسی (قسمت اول) با آن مخلوط می‌شود. در این پژوهش از یک نانورس طبیعی (MMT) اصلاح شده به شکل صفحه‌ای با نام تجاری کلویسید سی بی (مونت موریلونیت اصلاح شده با نمک آمونیوم) تولید شده توسط شرکت ساترن کلی آمریکا استفاده شده است.

### ۲-۲- ساخت نانوکامپوزیت پایه اپوکسی تقویت شده با نانوذرات رسی

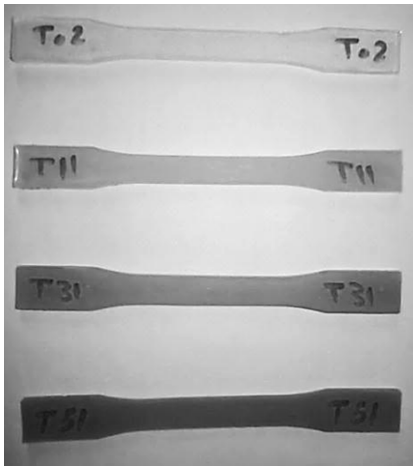
برای تولید نانوکامپوزیت‌های اپوکسی- نانورس بایستی ابتدا به‌منظور خشک نمودن نانوذرات رسی، کلویسید سی بی به مدت ۲۴ ساعت در درجه حرارت ۸۰ درجه سانتی‌گراد در آون خلأ قرار داده شود. علاوه‌بر این با توجه به بالا بودن ویسکوزیته رزین انتخاب شده، رزین را تا دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۳۰ دقیقه حرارت داده تا ویسکوزیته آن کاهش یابد. سپس نانوذرات رسی خشک شده با درصدهای وزنی ۰، ۱/۵، ۳ و ۵ نسبت به کل سیستم رزین (اپوکسی و سخت کننده) به اپوکسی (ایپون ۸۲۸) اضافه شده و با همزن مکانیکی به‌صورت اختلاط برشی با سرعت ۳۰۰۰ دور بر دقیقه به مدت ۲ ساعت مخلوط گردید. در طول مدت هم زدن سعی شده تا دمای مخلوط، در ۶۰ درجه سانتی‌گراد ثابت نگه داشته شود. سپس مخلوط با استفاده از دستگاه آلتراسونیک به مدت ۲۰ دقیقه تحت امواج فراصوتی قرار گرفت تا نانوذرات رسی درون پایه اپوکسی پخش شود. در طی این مرحله هر ۵ دقیقه دستگاه خاموش می‌شد و میله دستگاه آلتراسونیک تمیز می‌شد. پس از آن برای حذف حباب‌های ایجاد شده در مخلوط طی عمل اختلاط، اپوکسی-نانورس تهیه شده برای مدت ۳۰ دقیقه در دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد در آون خلأ قرار داده شد و پس از حباب زدایی در محیط آزمایشگاه قرار گرفت تا دمای آن تا درجه حرارت محیط کاهش یابد.

### ۲-۳- ساخت نمونه های آزمون‌های مکانیکی

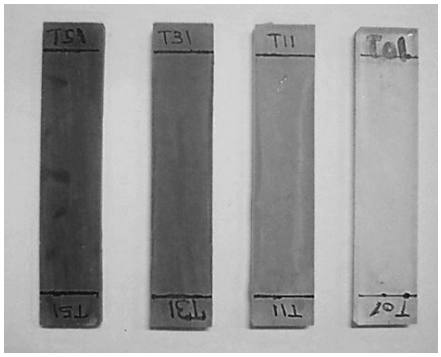
برای تعیین خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/کلی از آزمون‌های استاندارد کشش و خمش سه نقطه‌ای استفاده شده است. برای ساخت نمونه‌های این آزمون‌ها از قالب‌های لاستیکی سیلیکونی استفاده شده است. این قالب‌ها با استفاده از مدل‌های اولیه موجود به‌وسیله قالب‌گیری ساخته شده اند. مزیت قالب‌های سیلیکونی دقت ابعادی بسیار بالا، مقاومت حرارتی بالا، انعطاف‌پذیری بالا و انتقال حرارت مناسب می‌باشد.

نمونه‌های مربوط به آزمون‌های کشش تک محوری و خمش سه نقطه‌ای در شکل ۱ نشان داده شده‌اند.

برای ساخت نمونه‌ها، پس از ساخت مخلوط اپوکسی-نانورس و بعد از انجام عملیات حباب زدایی و سرد شدن آن تا درجه حرارت محیط، میزان محاسبه شده از سخت‌کننده به مخلوط تهیه شده اضافه می‌شود و به مدت ۵ دقیقه به آرامی با دست هم‌زده می‌شود.




الف) نمونه‌های کشش تک محوری




ب) نمونه‌های خمش سه نقطه‌ای

**شکل ۱** نمونه‌های نانوکامپوزیتی تولید شده جهت تعیین خواص مکانیکی

در این مرحله سعی شده تا درجه حرارت اپوکسی-نانورس تولید شده قبل از افزودن سخت‌کننده تا دمای محیط کاهش یابد تا عمل پخت[1] با سرعت کمتری صورت گیرد. پخت نمونه‌ها به‌صورت هوا پخت و در دمای محیط صورت می‌گیرد. سپس محلول تهیه شده به آرامی به قالب‌های سیلیکونی مربوط به نمونه‌های کشش و خمش ریخته می‌شوند. تعداد نمونه‌های ساخته برای انجام هر یک از آزمون‌های کشش و خمش در هر درصد وزنی از نانوذرات رسی، ۵ عدد بوده است.

نام‌گذاری نمونه‌ها در این مقاله به‌صورت Tn می‌باشد که حرف T معرف نمونه‌های سخت شده با هاردنر تتا بوده و n یک مقدار عددی بوده که بیانگر درصد نانوذرات رسی در ماتریس می‌باشد و رقم صحیح درصد نانوذرات رسی در ماتریس اپوکسی است. برای مثال T1 معرف نمونه‌های نانوکامپوزیتی اپوکسی/ نانورس سخت شده با هاردنر تتا و با ۱/۵ درصد وزنی از نانوذرات رسی می‌باشد.

### ۲-۴- شناسایی نمونه‌ها و آزمون‌های کشش و خمش سه نقطه‌ای

توزیع نانوذرات رسی در زمینه اپوکسی و مورفولوژی ساختار نانوکامپوزیت‌های اپوکسی-نانورس، به روش پراش پرتو ایکس بررسی شده است. برای این منظور از دستگاه فیلیپس[2] آزمایشگاه اشعه ایکس دانشگاه تربیت مدرس استفاده شده است. الگوهای پراش اشعه ایکس با تابش Cu kα در ۴۰kV و جریان ۳۰mA در محدوده ۱ تا ۱۰ درجه و نرخ روبش ۰/۰۲ درجه بر ثانیه تهیه شده‌اند.

علاوه‌بر این، از آزمون‌های کشش تک‌محوری و خمش سه نقطه‌ای جهت تعیین خواص مکانیکی نمونه‌های نانوکامپوزیتی استفاده شده است. این

1- Curing
2- Philips X'Pert



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.23.2 ]

آزمون‌ها، رایج‌ترین نوع آزمون‌های مواد برای تعیین مشخصات اولیه مکانیکی می‌باشد. این آزمون‌ها به‌طور گسترده‌ای برای مواد کامپوزیتی مورد مطالعه قرار گرفته است. با استفاده از این آزمون‌ها می‌توان مدول و استحکام کششی و خمشی و همچنین کرنش نهایی شکست و چقرمگی (مساحت زیر نمودار تنش- کرنش) را گزارش نمود. نمونه‌های کشش و خمش به‌ترتیب تحت استانداردهای ASTM D 638 و BS ISO 178، تحت آزمون قرار گرفته اند که برای این منظور از دستگاه اینسترون[1] آزمایشگاه خواص مواد دانشگاه تربیت مدرس استفاده شده است. برای اندازه‌گیری دقیق کرنش و مدول کششی، از یک اکستنسیومتر تک‌محوری در آزمون کشش استفاده شده است. در شکل‌های ۲-الف و ۲-ب نمونه‌های نانوکامپوزیتی اپوکسی/ نانورس به‌ترتیب تحت آزمون‌های کشش تک‌محوری و خمش سه نقطه‌ای نشان داده شده است.

## ۳- نتایج و بحث

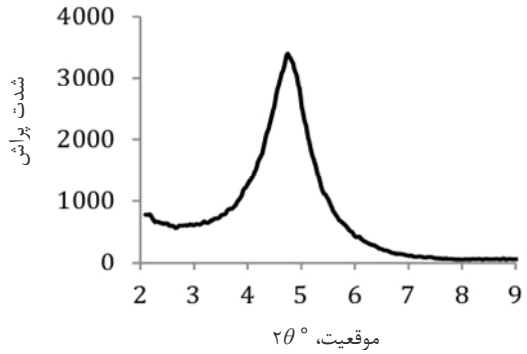
پراش پرتوی ایکس امکان شناخت مورفولوژی نمونه‌های نانوکامپوزیتی و چگونگی توزیع نانوذرات رسی در زمینه اپوکسی را فراهم می‌کند.

الف) نمونه کشش در حین آزمایش

ب) نمونه خمش سه نقطه‌ای در حین آزمایش

**شکل ۲** نمونه‌های کشش و خمش در حین آزمایش

1- INSTRON 5500R




**شکل ۳** پراش پرتوی ایکس مربوط به نانوذرات رسی اصلاح شده

**جدول ۱** نتایج مربوط به آزمون پراش اشعه ایکس برای نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/ نانورس با درصد های وزنی ۱/۵، ۳ و ۵ درصد از نانورس

| کد نمونه | T1 | T3 | T5 |
|---|---|---|---|
| موقعیت [°2 θ] | ۲/۵۸ | ۲/۵۶ | ۲/۶۳ |
| فاصله صفحات نانورس[2] [Å] | ۳۹/۷۳ | ۴۰/۰۸ | ۳۹/۰۳ |

در شکل ۳ نتایج مربوط به پراش پرتوی ایکس نانوذرات رسی اصلاح شده، نشان داده شده است و همان‌طور که از شکل مشخص است نانوذرات رسی کلویسید سی بی دارای بیشینه مقداری در منحنی پراش اشعه ایکس در موقعیت $2\theta = 4/73^{\circ}$ می‌باشند که براساس رابطه براگ فاصله بین صفحه‌ای نانوذرات رسی برابر با ۱۸/۶۵ آنگستروم می‌باشد.

نتایج مربوط به پراش پرتوی ایکس مربوط به نانوکامپوزیت‌های اپوکسی- نانورس سخت شده با هاردنر تتا با درصدهای وزنی مختلف از نانوذرات رسی در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به نتایج آزمون XRD مربوط به نمونه‌های نانوکامپوزیتی، فاصله صفحات نانوذرات رسی در نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/ نانورس حدوداً به بیش از ۲ برابر افزایش یافته و زاویه پراش پرتوی ایکس تا حدود $2/5^{\circ}$ کاهش می‌یابد.

بنابراین نتایج پراش پرتوی ایکس نشان می‌دهد که فاصله صفحات نانوذرات رسی به بیش از دو برابر افزایش یافته و بنابراین نانوکامپوزیت‌های تولید شده از نوع بین لایه‌ای می‌باشند. بیشترین بازشدگی صفحات نانوذرات رسی در نمونه‌های پخت شده با هاردنر تتا محتوی ۳ درصد وزنی نانورس به مقدار Å ۴۰/۰۷ اتفاق می‌افتد.

تهیه نانوکامپوزیت‌هایی با مورفولوژی بین لایه‌ای به معنای قرار گرفتن زنجیره‌های پلیمری بین لایه‌های نانوذرات رسی و در نتیجه افزایش فاصله صفحات نانوذرات رسی می‌باشد که این امر سبب افزایش سطح تماس و بهبود خواص می‌شود و بهره برداری از مزایای فاز نانو را فراهم می‌سازد[۱].

شکل ۴ تغییرات مدول کششی، استحکام کششی، کرنش تا شکست و میزان جذب انرژی تا شکست نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/ نانورس را در درصدهای وزنی مختلف از نانوذرات رسی نشان می‌دهد. خلاصه این نتایج در جدول ۲ ذکر شده است. همان‌طور که می‌توان دید مدول کششی با افزودن نانوذرات رسی به زمینه افزایش می یابد و بیشترین افزایش مدول کششی مربوط به نمونه های با ۳ درصد وزنی نانوذرات رسی و به میزان ۱۳/۴۳ درصد می‌باشد. این در حالی است که با افزودن نانوذرات رسی تا ۵ درصد وزنی، سایر خواص کششی مربوط به این نانوکامپوزیت‌ها از جمله استحکام کششی، کرنش شکست و میزان جذب انرژی تا شکست، به‌صورت پیوسته کاهش می‌یابد و بیشترین کاهش این خواص به ترتیب به میزان ۲۹/۸۸-، ۲۹/۰۴- و

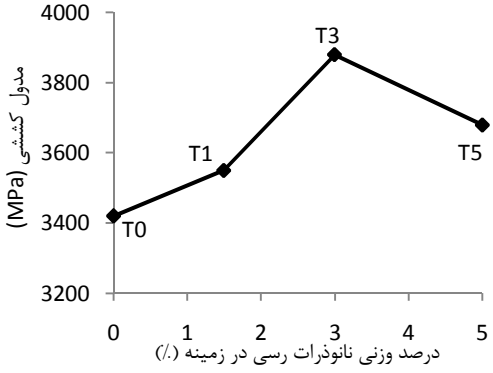
2- D-spacing



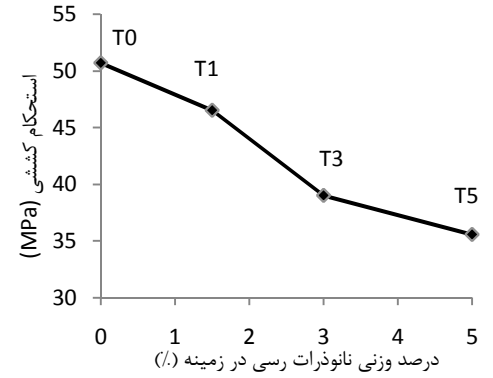
[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.23.2 ]

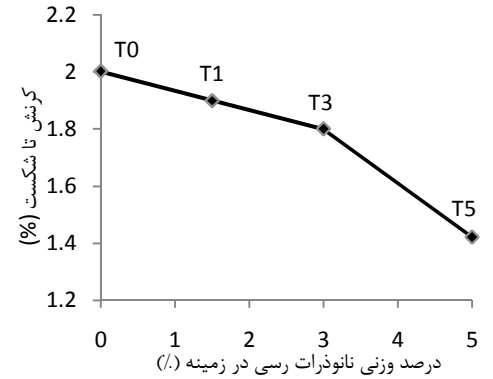
۴۶/۸۰- درصد در مقایسه با اپوکسی خالص می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهند که با افزودن نانوذرات رسی به ماتریس اپوکسی سخت شده با هاردنر تتا، نمونه های تردتری نسبت به اپوکسی خالص حاصل می‌شود.



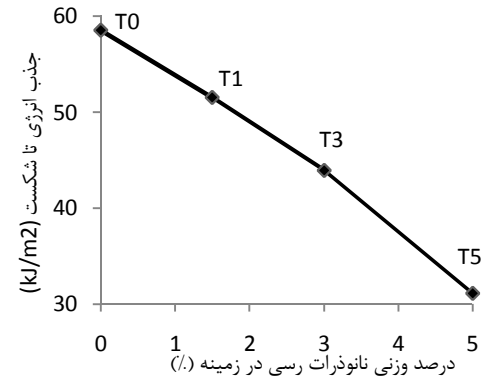

الف) مدول کششی (MPa)




ب) استحکام کششی (MPa)

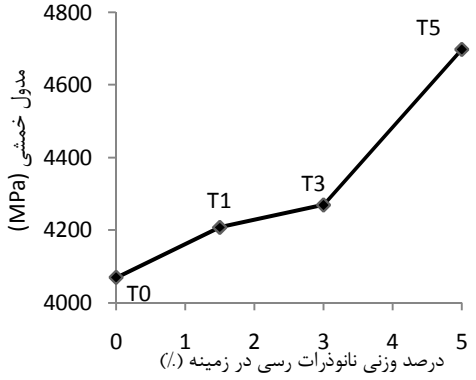



ج) کرنش تا شکست (٪)

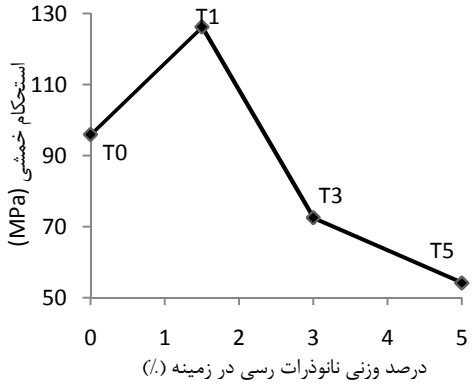



د) انرژی شکست ($kJ/m^2$)

**شکل ۴** تغییرات خواص کششی نمونه‌های نانوکامپوزیتی




الف) مدول خمشی (MPA)




ب) استحکام خمشی (MPa)

**شکل ۵** تغییرات خواص خمشی نمونه های نانوکامپوزیتی

**جدول ۲** خلاصه‌ای از روند تغییرات خواص کششی اپوکسی با افزودن درصدهای مختلف نانوذرات رسی به آن

| کد نمونه | جذب انرژی تا شکست | کرنش تا شکست | استحکام کششی | مدول کششی |
|---|---|---|---|---|
| | تغییرات خواص نسبت به اپوکسی خالص (٪) | | | |
| T1 | ۳/۸ | -۸/۲۷ | -۵/۰۹ | -۱۱/۹۶ |
| T3 | **۱۳/۴۳** | -۲۳/۰۷ | -۱۰/۰۷ | -۲۴/۸۸ |
| T5 | ۷/۶ | **-۲۹/۸۸** | **-۲۹/۰۴** | **-۴۶/۸۰** |

**جدول ۳** تأثیر افزودن نانوذرات رسی بر خواص مکانیکی (مدول و استحکام خمشی) نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/کلی پخت شده با هاردنرهای TETA

| کد نمونه | T1 | T3 | T5 |
|---|---|---|---|
| | تغییرات خواص نسبت به اپوکسی خالص | | |
| مدول خمشی (٪) | ۳/۴۱ | ۴/۹۱ | **۱۵/۴۴** |
| استحکام خمشی (٪) | **۳۱/۵۱** | -۲۴/۴۵ | -۴۳/۴۵ |

نتایج مربوط به آزمون خمش سه نقطه‌ای برای نمونه‌های نانوکامپوزیتی نیز در شکل ۵ و جدول ۳ نشان داده شده است. همان‌طور که می‌توان دید مدول خمشی نمونه‌های نانوکامپوزیتی به‌صورت پیوسته با افزایش نانوذرات رسی در ماتریس افزایش یافته به‌طوری که نمونه‌های با ۵ درصد وزنی از نانوذرات رسی دارای بیشترین مدول خمشی می‌باشند. این در حالی است که استحکام خمشی این نانوکامپوزیت‌ها با افزودن ۱/۵ درصد وزنی نانوذرات رسی افزایش یافته و سپس با افزایش بیشتر میزان نانوذرات رسی در ماتریس، کاهش می‌یابد.

نتایج استخراج شده از آزمون‌های کشش تک محوری و خمش سه نقطه‌ای، که در قسمت‌های قبل ارائه شد، را می توان به‌صورت زیر توجیه نمود:

- با انجام بررسی‌های دقیق بر روی سطح مشترک نانوذرات رسی و ماتریس پلیمری در کامپوزیت‌های پایه پلیمری در حضور نانوکلی، نشان داده



[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21 ]
[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.23.2 ]

شده است که سیلیکون موجود در نانوذرات رسی با اتم‌های اکسیژن و کربن موجود در اپوکسی و در نتیجه اپوکسی واکنش داده و باعث ایجاد پیوند شیمیایی بین سطح مشترک نانوذرات رسی و ماتریس اپوکسی می‌شود. بنابراین افزایش خواص مکانیکی (مدول کششی و خمشی) کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با نانوذرات رسی که در این پژوهش نتیجه شده است به‌دلیل وجود همین چسبندگی بین سطح مشترک ماتریس پلیمری و نانوذرات رسی می‌باشد[۱۴،۱۵].

– از آنجایی که رزین انتخابی دارای ویسکوزیته نسبتاً بالایی بوده و همچنین با افزودن نانوذرات رسی به رزین اپوکسی، ویسکوزیته آن به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد؛ بنابراین در درصدهای وزنی بالا از نانوذرات رسی، پراکندگی مناسب نانوذرات رسی در زمینه حاصل نمی‌شود و همچنین امکان حذف کامل حباب‌های ایجاد شده در مراحل پراکندگی نانوذرات در زمینه در درصدهای وزنی بالا از نانوذرات امکان پذیر نمی‌باشد. بنابراین با افزایش درصد وزنی نانوذرات رسی در زمینه پلیمری، استحکام کششی و خمشی این نانوکامپوزیت‌ها کاهش می‌یابد و نمونه‌ها پیش از آن که به بیشینه تحمل خود برسند در مقادیر کمتری از بارهای اعمالی خواهند شکست[۷].

## ۴- نتیجه گیری

در تحقیق حاضر، اثر افزودن نانوذرات رسی بر خواص مکانیکی رزین اپوکسی سخت شده با هاردنر تتا به‌صورت آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته است. مورفولوژی نمونه‌های نانوکامپوزیتی تولید شده با استفاده از آزمون پراش اشعه ایکس مورد بررسی قرار گرفته و مشاهدات نشان می‌دهد که توزیع نانوذرات رسی اصلاح شده در زمینه پلیمری از نوع بین لایه‌ای می‌باشد. خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های اپوکسی/ نانورس نیز با استفاده از آزمون‌های استاندارد کشش تک‌محوری و خمش سه نقطه‌ای در درجه حرارت محیط تعیین شده اند. نتایج مربوط به آزمون‌های مکانیکی نیز نشان دهنده بهبود مدول کششی و خمشی و همچنین استحکام خمشی رزین اپوکسی با افزودن نانوذرات رسی به آن می‌باشد، این در حالی است که سایر خواص مکانیکی اپوکسی از جمله استحکام کششی، کرنش شکست و میزان جذب انرژی تا شکست با افزودن نانوذرات رسی به آن کاهش می‌یابند. نتایج همچنین بیان می‌کنند که حضور نانوذرات رسی در ماتریس اپوکسی سبب تردتر شدن آن می‌گردد.

## ۵- مراجع


[1] A. A. Azeez, K. Y. Rhee, S. J. Park, D. Hui, Epoxy clay nanocomposites–processing, properties and applications: A review, *Composites Part B: Engineering,* Vol. 45, No. 1, pp. 308-320, 2013.

[2] A. Haque, M. Shamsuzzoha, F. Hussain, D. Dean, S2-glass/epoxy polymer nanocomposites: manufacturing, structures, thermal and mechanical properties, *Journal of Composite materials,* Vol. 37, No. 20, pp. 1821-1837, 2003.

[3] A. Yasmin, J. L. Abot, I. M. Daniel, Processing of clay/epoxy nanocomposites by shear mixing, *Scripta Materialia,* Vol. 49, No. 1, pp. 81-86, 2003.

[4] O. Becker, R. Varley, G. Simon, Morphology, thermal relaxations and mechanical properties of layered silicate nanocomposites based upon high-functionality epoxy resins, *Polymer,* Vol. 43, No. 16, pp. 4365-4373, 2002.

[5] K. Zhang, L. Wang, F. Wang, G. Wang, Z. Li, Preparation and characterization of modified - clay - reinforced and toughened epoxy - resin nanocomposites, *Journal of Applied Polymer Science,* Vol. 91, No. 4, pp. 2649-2652, 2004.

[6] C. k. Lam, K. t. Lau, H. y. Cheung, H. y. Ling, Effect of ultrasound sonication in nanoclay clusters of nanoclay/epoxy composites, *Materials Letters,* Vol. 59, No. 11, pp. 1369-1372, 2005.

[7] B. Qi, Q. Zhang, M. Bannister, Y. W. Mai, Investigation of the mechanical properties of DGEBA-based epoxy resin with nanoclay additives, *Composite structures,* Vol. 75, No. 1, pp. 514-519, 2006.

[8] T. D. Ngo, M. T. Ton-That, S. Hoa, K. Cole, Effect of temperature, duration and speed of pre-mixing on the dispersion of clay/epoxy nanocomposites, *Composites Science and Technology,* Vol. 69, No. 11-12, pp. 1831-1840, 2009.

[9] S. U. Khan, A. Munir, R. Hussain, J. K. Kim, Fatigue damage behaviors of carbon fiber-reinforced epoxy composites containing nanoclay, *Composites Science and Technology,* Vol. 70, No. 14, pp. 2077-2085, 2010.

[10] S. U. Khan, K. Iqbal, A. Munir, J. K. Kim, Quasi-static and impact fracture behaviors of CFRPs with nanoclay-filled epoxy matrix, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,* Vol. 42, No. 3, pp. 253-264, 2011.

[11] S. Mirabedini, M. Behzadnasab, K. Kabiri, Effect of various combinations of zirconia and organoclay nanoparticles on mechanical and thermal properties of an epoxy nanocomposite coating, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2012.

[12] M. H. Pol, G. H. Liaghat, F. Hajiarazi, Experimental investigation of effect of nanoclay on ballistic properties of composites, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 12, No. 1, pp. 11-20, 2012. (In Persian)

[13] M. H. Pol, G. H. Liaghat, S. Mazdak, Effect of nanoclay particles on the ballistic behavior of glass/epoxy composites- ex[eroments investigation, *Modares Mechanical Engineering,* Vol. 13, No. 4, pp. 98-104, 2013. (In Persian)

[14] M. l. Chan, K. t. Lau, T. Wong, F. Cardona, Interfacial bonding characteristic of nanoclay/polymer composites, *Applied Surface Science,* Vol. 258, No. 2, pp. 860-864, 2011.

[15] M. l. Chan, K. t. Lau, T. t. Wong, M. p. Ho, D. Hui, Mechanism of reinforcement in a nanoclay/polymer composite, *Composites Part B: Engineering,* Vol. 42, No. 6, pp. 1708-1712, 2011.


[ Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-09-21 ]

[ DOR: 20.1001.1.10275940.1393.14.6.23.2 ]