



Investigation of the Relationship Between Microstructure and Thermal, Mechanical Properties and Diffusivity of Silicone Rubber/Clay Nanocomposites

E. Eshghi Nejad¹, O. Moini Jazani^{2*}, M. Sohrabian³, M. H. Karami^{4*}

1- MSc. in Chemical Engineering – Polymer, University of Isfahan

2- Associate Professors of Polymer Engineering, University of Isfahan

3- Instructor of Mechanical Engineering, Shahid Beheshti University

4- Postdoctoral Researcher and Research Assistant of Polymer Engineering, University of Isfahan

Email: o.moini@eng.ui.ac.ir

Abstract

The use of composites in various industries had significantly increased in recent decades. In composite structures subjected to thermal and mechanical loads, microcracks could lead to leakage and failure. To prevent this issue, sealing the structures with coating sealants and polymeric and elastomeric films was essential. These materials were resistant to gas permeation and thermal shocks. In this research, the properties of silicone nanocomposites were improved by adding nanoclay (Cloisite 5) and modifying its surface using APTES (silane agent). The results of TGA, XRD, and FTIR tests indicated the bonding of aminosilane groups with hydroxyl groups in Cloisite, with a bonding percentage of 3.66%. Additionally, the morphological analysis of the nanocomposites showed that the presence of modified nanoclays led to improved dispersion and enhanced mechanical properties. Thermal degradation tests revealed that the modified nanoparticles could increase thermal stability. Furthermore, the surface modification of nanoclays contributed to better rubber curing and reduced permeability in silicone nanocomposites. The results of the time-sweep test indicated that the surface modification of nanoclays further improved the curing of this rubber. Overall, this research demonstrated the positive impact of modified nanoclays on the thermal and mechanical properties of nanocomposites, which could enhance their performance in industrial applications.

Received: 6 February 2025

Accepted: 10 June 2025

Page Number: 113-134

Keywords:

Silicone Rubber,
Surface Modification,
Nanoclay,
Nanocomposite,
Permeability,
Thermal Stability

Please Cite this Article Using:

Eshghi Nejad, E., Moini Jazani, O., Sohrabian, M., & Karami, M. H. (2026). Investigation of the Relationship Between Microstructure and Thermal, Mechanical Properties and Diffusivity of Silicone Rubber/Clay Nanocomposites. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 25(144), 113-134, [In Persian].



بررسی ارتباط ریزساختار با خواص مکانیکی، حرارتی و نفوذپذیری نانوکامپوزیت‌های پایه سیلیکون حاوی نانوذرات رس اصلاح شده

عرفان عشقی نژاد^۱، امید معینی جزینی^{۲*}، مجید سهرابیان^۳، محمدحسین کرمی^{۴*}

۱- کارشناس ارشد مهندسی شیمی - پلیمر، دانشگاه اصفهان

۲- دانشیار مهندسی پلیمر، دانشگاه اصفهان

۳- مربی مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی

۴- پژوهشگر پسادکتر و دستیار تحقیقاتی مهندسی پلیمر، دانشگاه اصفهان

پیام‌نگار: o.moini@eng.ui.ac.ir

چکیده

استفاده از کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف در دهه‌های اخیر به‌طور چشم‌گیری افزایش یافته است. در سازه‌های کامپوزیتی تحت بارهای حرارتی و مکانیکی، میکروتکرک‌ها می‌تواند باعث نشتی و شکست شود. برای جلوگیری از این مشکل، آب‌بندی سازه‌ها با استفاده از آب‌بند‌های پوششی و فیلم‌های پلیمری و الاستومری ضروری است. این مواد در برابر عبور گاز و شوک‌های حرارتی مقاوم هستند. در این پژوهش، با افزودن نانورس کلوزیت (Cloisite 5) و اصلاح سطحی آن به کمک عامل سیلانی APTES، سعی شده است تا خواص نانوکامپوزیت‌های سیلیکونی بهبود یابد. نتایج آزمون‌های TGA، XRD و FTIR نشان‌دهنده پیوند خوردگی گروه‌های آمینوسیلانی با گروه‌های هیدروکسیل در کلوزیت با درصد پیوند خوردگی ۳/۶۶ بود. همچنین، بررسی ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت‌ها نشان داد که حضور نانورس‌های اصلاح‌شده منجر به بهبود پراکنش و افزایش خواص مکانیکی می‌شود. نتایج آزمون تخریب گرمایی نشان داد که نانوذرات اصلاح‌شده، می‌تواند پایداری گرمایی را افزایش دهد. همچنین، اصلاح سطحی نانورس‌ها به بهبود پخت لاستیک و کاهش تراوایی در نانوکامپوزیت‌های سیلیکونی کمک کرده است. بررسی نتایج آزمون روبشی - زمان نشان داد که اصلاح سطحی نانورس موجب بهبود بیشتر پخت این لاستیک شده است. به‌طور کلی، این پژوهش نشان‌دهنده تأثیر مثبت نانورس‌های اصلاح‌شده بر خواص حرارتی و مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها است و می‌تواند به بهبود عملکرد آن‌ها در کاربردهای صنعتی کمک کند.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۱/۱۸
 تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۲۰
 شماره صفحات: ۱۱۳ تا ۱۳۴

کلیدواژه‌ها:

سیلیکون،
 اصلاح سطحی،
 نانورس،
 نانوکامپوزیت،
 نفوذپذیری،
 پایداری حرارتی

* اصفهان، دانشگاه اصفهان، گروه مهندسی شیمی

استناد به مقاله:

عشق نژاد، عرفان، معینی جزینی، امید، سهرابیان، مجید، و کرمی، محمدحسین. (۱۴۰۵). بررسی ارتباط ریزساختار با خواص مکانیکی، حرارتی و نفوذپذیری نانوکامپوزیت‌های پایه سیلیکون حاوی نانوذرات رس اصلاح‌شده، نشریه مهندسی شیمی ایران، ۲۵(۱۴۴)، ۱۱۳-۱۳۴.

استفاده از کامپوزیت‌ها در صنایع مختلف در دهه‌های اخیر به‌طور قابل توجهی افزایش یافته‌است. در سازه‌های کامپوزیتی تحت بارهای حرارتی و مکانیکی ممکن است میکروتکرک، ایجاد و باعث بروز نشتی شود که در صورت تداوم منجر به شکست سازه می‌شود. یکی از راه‌کارهای جلوگیری از ایجاد نشتی، آب‌بندی سازه است [۱]. یکی از راه‌کارهای آب‌بندی در مخازن کامپوزیتی استفاده از آب‌بندهای پوششی و فیلم‌های پلیمری و الاستومری برای مقاومت در برابر عبور گاز و شوک‌های حرارتی است. ویژگی شاخص سیلیکون‌ها تحمل دمایی بالا و مشکل اصلی آن قدرت کششی و مقاومت پارگی پایین است.

سیلیکات‌های لایه‌ای به دو دسته طبیعی و سنتزی تقسیم می‌شود. سیلیکات‌های لایه‌ای طبیعی شامل مونت‌موریلونیت (MMT) و میکا است، در حالی که سیلیکات‌های لایه‌ای سنتزی شامل ماگادیت، لاپونیت و فلوروهکتوریت است [۲]. ساختار لایه‌ای سیلیکات‌ها از دو صفحه اتم‌های سیلیسیم به صورت چهاروجهی تشکیل شده‌است که با یک صفحه هشت‌وجهی میانی متصل می‌شوند و ضخامت هر لایه یک نانومتر است [۳].

لاستیک سیلیکون - که یک الاستومر متشکل از پلیمر سیلیکونی است - دارای زنجیره اصلی، شامل پیوندهای سیلیکون - اکسیژن است. انرژی بالای پیوند Si-O نسبت به پیوند C-C موجب پایداری حرارتی و مقاومت قابل توجه این لاستیک در برابر اکسیژن می‌شود [۴]. همچنین، لاستیک سیلیکون از نظر پایداری شیمیایی، مقاومت در برابر سایش و مقاومت در برابر هوا و ازن نسبت به لاستیک‌های آلی برتری دارد [۵].

سیلیکون‌ها به دلیل وجود هم‌زمان پیوندهای قوی Si-O و ترکیبات آلی، دارای پایداری حرارتی، آبی و هوایی مناسبی است؛ با این حال، عبوردهی گاز بالای آن‌ها محدودیت‌هایی را در کاربردهای آب‌بندی ایجاد می‌کند. با وجود پایداری حرارتی بالای لاستیک سیلیکون، برای کاربردهای آب‌بندی در صنایع هوایی نیاز به بهبود مقاومت دمایی وجود دارد [۶].

هدف اصلی آب‌بندی، جلوگیری از ورود و خروج هوا، آب و سایر اجسام از اتصالات و شکاف‌ها (منافذ) است. آب‌بند باید شکاف یا اتصال را به خوبی پر کند و یک مانع در برابر جریان گاز یا مایع

تشکیل دهد. یکی از راه‌کارهای آب‌بندی در مخازن استفاده از آب‌بندهای پوششی و فیلم‌های پلیمری و الاستومری برای مقاومت در برابر عبور گاز و شوک‌های حرارتی است [۷-۸]. در این حالت، پس از پخت پلیمر پایه اجزای آب‌بندی و تبخیر حلال آن روی سطح، یک فیلم آب‌بندی تشکیل می‌شود [۹].

بذلی و همکاران تأثیر نانورس کلوزیت را بر مخلوط سیلیکون / اتیلن پروپیلن دی‌ان مونومر (EPDM) بررسی کردند. نتایج نشان داد که با افزایش نسبت سیلیکون، سرعت پخت و چگالی اتصالات عرضی بهبود می‌یابد. همچنین، نانوذره‌ها تمایل به پخش در زمینه EPDM داشتند که منجر به افزایش سختی و کشسانی نانوکامپوزیت‌ها شد [۱۰].

وانگ و همکارانش، تأثیرات افزودن نانورس به لاستیک استایرن- بوتادین و لاستیک استایرن- وینیل پیرین- بوتادین را با استفاده از روش‌های لاتکس و محلول بررسی کردند. نتایج نشان داد که روش لاتکس به‌طور قابل توجهی ساده‌تر و برای تولید نانوکامپوزیت‌های پلیمری قابل اجرا است و همچنین، این نانوذرات می‌تواند به‌عنوان یک عامل تقویت‌کننده قابل اعتماد در صنعت لاستیک عمل کند [۱۱].

در پژوهشی دیگر، کیم و همکارانش به بررسی اثر اصلاح سطحی نانورس بر نانوکامپوزیت مونت‌موریلونیت آلی/نیتریل رابر (NBR) پرداختند. نتایج نشان داد که فاصله بین صفحه‌ای در نانورس‌ها افزایش پیدا کرده‌است که نشانگر باز شدن صفحات نانورس در زمینه لاستیک نیتریل بوده‌است و همچنین، مدول و دمای انتقال شیشه‌ای نسبت به لاستیک نیتریل خالص افزایش داشته‌است و خواص کششی و مدول بهتری پیدا کردند [۱۲].

لیانگ و همکاران، روشی جدید برای تهیه نانوکامپوزیت‌های لاستیکی ایزوبوتیلن- ایزوپرن نانورس برای بهتر شدن خاصیت ممانعت عبور گاز گزارش کردند. نتایج نشان داد که فاصله صفحات نانورس از ۴/۲ نانومتر به ۶/۲ نانومتر رسید و ساختار به ساختار ورقه‌ای نزدیک شده‌است. همچنین، نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد که خواص مکانیکی و منع عبور گاز نانوکامپوزیت‌ها با افزایش نانورس بیشتر می‌شود [۱۳].

گونزالز و همکاران، به بررسی اثر افزودن پلی‌اتیلن گلیکول به نانوکامپوزیت لاستیک طبیعی/مونت‌موریلونیت سدیم پرداختند. نتایج

OMMT در لاستیک سیلیکون ۲۰ phr از دوده سیلیکا به مخلوط قبل از این که اختلاط انجام شود برای افزایش گرانروی و نیروی برش مکانیکی به آن اضافه می شود که باعث بهبود پخش OMMT و خاصیت عدم عبور گاز در نانوکامپوزیت حاصله می شود [۱۵]. پژوهشگران، به کامپوزیت های لاستیک سیلیکون و نانولوله های کربنی و بررسی تأثیر نانولوله های چنددیواره کربنی در بهبود خواص لاستیک سیلیکون پرداختند. نتایج نشان داد که در مقادیر بیشتر از نانولوله ها این نانوذرات در هم جمع شدند و تجمع کردند. هم چنین، حضور نانولوله کربنی باعث بهبود پایداری حرارتی سیلیکون شده است. در جدول (۱)، مهم ترین پژوهش های انجام شده جمع آوری شده است [۱۶].

نشان داد که، پلی اتیلن گلیکول به باز شدن فاصله بین صفحات نانورس به وسیله زنجیره های لاستیک کمک می کند و باعث پخش مناسب نانوذره در بستر لاستیک می شود. هم چنین، در این پژوهش استفاده از نانورس و عامل متورم کننده (پلی اتیلن گلیکول) محدوده برهم کنش را در نانوکامپوزیت افزایش داده است و در نتیجه، نیاز به روش هایی مانند آلی دوست سازی نانورس نیست. خواص نهایی نانوکامپوزیت در این روش برابر و گاهی بهتر از استفاده از اصلاح کننده های معمولی است [۱۴]. در پژوهشی دیگر، اثر مونت موریلونیت بر روی لاستیک سیلیکون با روش اختلاط مذابی بررسی شد. نتایج نشان داد که در نانوکامپوزیتی شامل ۳۰ phr از OMMT (۱/۴۴P) ضریب عبورپذیری نیتروژن ۳۱ درصد نسبت به نمونه خالص کاهش داشته است. برای بهبود بخش

جدول ۱. مروری بر پژوهش های انجام شده نانوکامپوزیت های سیلیکونی [۱۰-۱۵].

Table 1. Review of research conducted on silicon nanocomposites [10-15].

Elastomer type	Nanoparticle	Description
Silicone/EPDM	Cloisite 15A	Improving curing rate and increasing cross-link density
Styrene-butadiene, styrene-vinylpyridine-butadiene	Natural nanoclay	The latex preparation method is much simpler and widely applicable, and improves mechanical properties.
Nitrile rubber	Sodium montmorillonite	The nanocomposites were prepared by melt mixing method. The glass transition temperature, modulus and tensile properties were increased compared to the silicone sample.
Ethylene vinyl acetate	Sodium montmorillonite	Nanocomposites were prepared by solution mixing method and had increased storage modulus and tensile properties.
EPDM and Styrene-butadiene epichlorohydrin	1.30P	The nanocomposites were prepared by melt mixing method. Increasing the amount of nanoclay resulted in better dispersion and increased mechanical and gas permeability properties.
EPDM	Sodium montmorillonite	Montmorillonite with three surface modification agents, more hydrophobicity resulting in better dispersion of nanoparticles, and maleic anhydride as a compatibilizer, had a significant effect on nanoparticle distribution.
Silicone/EPDM	Cloisite 15A	Improving curing speed and increasing cross-link density
Styrene-butadiene, styrene-vinylpyridine-butadiene	Natural nanoclay	The latex preparation method is much simpler and widely applicable, and improves mechanical properties.
Nitrile rubber	Sodium montmorillonite	The nanocomposites were prepared by melt mixing method. The glass transition temperature, modulus and tensile properties were increased compared to the silicone sample.
Ethylene vinyl acetate	Sodium montmorillonite	Nanocomposites were prepared by solution mixing method and had increased storage modulus and tensile properties.
EPDM and Styrene-butadiene and epichlorohydrin	1.30P	The nanocomposites were prepared by melt mixing method. Increasing the amount of nanoclay resulted in better dispersion and increased mechanical and gas permeability properties.
EPDM	Sodium montmorillonite	Montmorillonite with three surface modification agents, more hydrophobicity resulting in better nanoparticle dispersion, and maleic anhydride as a compatibilizer, had a significant effect on nanoparticle distribution.
Silicone/EPDM	Cloisite 15A	Improving curing speed and increasing cross-link density
Styrene-butadiene, styrene-vinylpyridine-butadiene	Natural nanoclay	The latex preparation method is much simpler and widely applicable, and improves mechanical properties.
Nitrile rubber	Sodium montmorillonite	The nanocomposites were prepared by melt mixing method. The glass transition temperature, modulus and tensile properties were increased compared to the silicone sample.
Ethylene vinyl acetate	Sodium montmorillonite	Nanocomposites were prepared by solution mixing method and had increased storage modulus and tensile properties.
EPDM and Styrene-butadiene and epichlorohydrin	1.30P	The nanocomposites were prepared by melt mixing method. Increasing the amount of nanoclay resulted in better dispersion and increased mechanical and gas permeability properties.
EPDM	Sodium montmorillonite	Montmorillonite with three surface modification agents, more hydrophobicity resulting in better dispersion of nanoparticles, and maleic anhydride as a compatibilizer, had a significant effect on nanoparticle distribution.

خروج ارز باشد. همچنین، سرانجام با نهایی شدن فرمول آب‌بند، با تغییر در این فرمول، می‌توان آن را در طیف وسیعی از کاربردها به‌کار گرفت. در این پژوهش، به بررسی ارتباط ریزساختار نانوکامپوزیت‌های پایه‌سیلیکونی حاوی نانوس‌های اصلاح‌شده با گروه سیلانی و بررسی ریخت‌شناسی، خواص مکانیکی و حرارتی پرداخته شده‌است.

۲. مواد و دستگاه‌ها

۲-۱ مواد

مواد استفاده‌شونده در این پژوهش در جدول (۲)، نشان داده شده‌است.

۲-۲ دستگاه‌ها و روش‌ها

۲-۲-۱ آزمون تبدیل فوریهٔ فروسرخ

آزمون تبدیل فوریهٔ فروسرخ (FTIR) به‌منظور بررسی انجام واکنش بین عامل سیلانی و نانوس انجام شد. این آزمون، با استفاده از دستگاه طیف‌نگار مدل ۶۳۰۰ ساخت ژاپن، موجود در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان انجام شد.

پژوهش‌های مختلفی که در متن ذکر شده‌است، به بررسی تأثیر نانوذرات و اصلاحات مختلف بر خواص مکانیکی، حرارتی و عملکردی نانوکامپوزیت‌ها پرداخته‌است. این نتایج می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای نوآوری‌های جدید در طراحی و بهبود مواد آب‌بند در صنایع مختلف، به‌ویژه در صنایع هوایی و خودروسازی به‌کار رود. اصلاح سطح نانوس با گروه‌های سیلانی اهمیت زیادی دارد؛ زیرا این فرایند می‌تواند ویژگی‌های فیزیکی و شیمیایی نانوس را بهبود بخشد. با استفاده از گروه‌های سیلانی، می‌توان سطح نانوس را به‌گونه‌ای تغییر داد که قابلیت سازگاری آن با ماتریس‌های پلیمری یا دیگر مواد افزایش یابد. این اصلاح می‌تواند منجر به بهبود خواص مکانیکی، حرارتی و الکتریکی نانوکامپوزیت‌ها شود. همچنین، اصلاح سطح نانوس می‌تواند به افزایش پایداری و کاهش کلوخه‌ای شدن ذرات کمک کند که این امر در کاربردهای مختلف صنعتی و تحقیقاتی بسیار حائز اهمیت است. صنعت هوافضا از صنایع مهم و حساس در کشور است؛ با توجه به اهمیت آب‌بندهای پوششی در صنایع هوافضا و وارداتی بودن نمونه‌های آب‌بند موجود در این صنعت انجام این پژوهش و تلاش برای ساخت آب‌بندی که بتواند خواص مورد نیاز این صنعت را برآورده کند، می‌تواند گام مهمی در جهت بومی‌سازی ساخت این ماده و برطرف کردن نیاز کشور و جلوگیری از

جدول ۲. مواد استفاده‌شده در پژوهش.

Table 2. Materials used in the research.

Name of the substance (abbreviated name)	Specifications	The role of matter	Company name
Rubber Methyl vinyl silicone	Density (g/cm ³) : 1.1±5.0 Hardness (Shore A) : 40±3	Polymer for preparing nanocomposites	Ravago (Turkey)
Toluene	Molecular weight: 92.14 (g/mol) Density: 0.87 (g/ml) , Boiling point: 110.6 °C	Solvent	Merck (Germany)
Benzoyl peroxide	Molecular weight: 242.23 (g/mol) Density: 1.334 (g/ml), Melting point: 104 °C	Curing agent	Merck (Germany)
Montmorillonite C5A	Molecular weight: 221.37 (g/mol) Density: 0.946 (g/ml) , Boiling point: 217 °C	Nanoclay surface modification flow agent	Merck (Germany)
Aminopropyltriethoxysilane (APTES)	Appearance: White Density: 1.77 (g/ml) Particle size: less than 40 microns Bulk density: 480 (g/l)	Filler	Southern Clay Products (USA)

۲-۲-۲ آزمون پراش پرتو ایکس

موازی با قطر ۲۵ میلی‌متر مدل Physica MCR 501 ساخت شرکت Anton Paar کشور اتریش در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان انجام گرفت. بدین‌منظور، آزمون روبش زمان در دمای ثابت ۱۰۰ درجه سلسیوس بر روی نانوکامپوزیت سیلیکون/نانورس با نسبت ۲phr و لاستیک سیلیکون انجام شد. کرنش و فرکانس در این آزمون به ترتیب ۰/۰۱ و ۱ هرتز بوده است.

آزمون پراش پرتو ایکس (XRD) در آزمایشگاه مرکزی دانشگاه اصفهان با دستگاه بروکر مدل D8 ADVANC ساخت کشور آلمان دارای اشعه Cu-K α با طول موج ۰/۱۵۴ نانومتر با سرعت روبش ۲ درجه بر دقیقه انجام گرفت. فاصله بین لایه‌ای برای نانورس براساس رابطه براگ حساب می‌شود.

۲-۲-۳ آزمون گرماوزن‌سنجی**۲-۲-۷ آزمون تراوایی نیتروژن**

یکی از کاستی‌های الاستومر سیلیکون برای استفاده در پوشش‌های آب‌بندی، بالابودن میزان عبوردهی گاز است. بنابراین، الاستومر سیلیکون به‌عنوان یک پوشش آب‌بندی نیازمند اصلاح و بهبود مقاومت در برابر عبوردهی مولکول‌های گاز (نشستی) است. در این تحقیق، مقاومت در برابر مولکول‌های گاز با آزمون تراوایی نیتروژن با دستگاه اندازه‌گیری تراوایی حجم ثابت- فشار متغیر در دانشگاه اراک انجام شد. آزمون تراوایی در فشار ۲ اتمسفر و دمای ۲۵ °C انجام شد و تراوایی نیتروژن از فیلم سیلیکونی (PN₂) با واحد بار^۱ براساس نرخ افزایش فشار $(dp(t)/dt)$ در حالت پایدار محاسبه شد.

آزمون گرماوزن‌سنجی (TGA) به‌منظور بررسی پایداری حرارتی نانوکامپوزیت‌های سیلیکون/نانورس و همچنین، مشخص شدن مقدار پیوند ایجاد شده بین نانورس و عامل سیلانی انجام شد. این آزمون با دستگاه TGA-DSC1 Mettler Toledo در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی ایران انجام گرفت. آزمون تحت گاز خنثی نیتروژن در محدوده دمایی ۲۵ تا ۷۰۰ درجه سلسیوس و تحت نرخ گرمایش ۱۰ درجه سلسیوس بر دقیقه انجام شد.

۲-۲-۴ آزمون میکروسکوپ الکترونی

به‌منظور بررسی ریخت‌شناسی نانوکامپوزیت‌ها، عکس‌برداری از سطح مقطع عرضی نمونه‌ها با آزمون میکروسکوپ الکترون پویشی (SEM) و با دستگاه MIRA3 TESCAN تحت خلأ در شرکت دی‌پترونیک انجام گرفت. برای آماده‌سازی سطح مقطع نانوکامپوزیت‌ها، نمونه‌ها در نیتروژن مایع منجمد شد و به‌وسیله یک جفت پنس شکسته شد. پیش از انجام آزمون، سطح مورد تصویربرداری با روکش طلا پوشش داده شد.

۲-۲-۵ آزمون استحکام کششی**۲-۳-۱ روش اصلاح سطحی نانورس با عامل سیلانی APTES**

در ابتدا، کلوزیت 5A به حجم مشخصی از حلال آب اضافه شد و pH محلول حاصل در ادامه، به کمک محلول اسید کلردریک روی pH=۴ تنظیم شد. سپس، به محلول با نسبت جرمی ۱:۱ عامل سیلانی APTES اضافه شد محلول به مدت ۴۸ ساعت تحت رفلاکس قرار گرفت و در ادامه، حلال با ارلن و قیف بوختر و کاغذ صافی جداسازی و با اتانول شسته شد [۱۷]. اما با توجه به آزمون طیف‌سنجی پیک‌های مربوط به گروه‌های سیلانی مشاهده نشد. به همین دلیل و در ادامه، با تعویض حلال و استفاده از حلال آب- اتانول (۷۵ درصد اتانول) و فرایند مشابه با زهم پیک جدیدی که حاکی از وجود گروه‌های سیلانی باشد، مشاهده نشد. سپس، در ادامه از حلال تولوئن استفاده شد. روش کار چنین بود که ابتدا، کلوزیت 5A به حجم مشخصی از تولوئن اضافه و در ادامه، عامل سیلانی APTES با نسبت ۱:۱ به محلول یاد شده اضافه می‌شود [۱۸]. در این محلول به مدت ۳۰ دقیقه با همزن فراصوت اختلال ایجاد شد. سپس، محلول در

آزمون استحکام کششی به‌منظور بررسی خواص مکانیکی در نانوکامپوزیت‌های سیلیکون/نانورس انجام شد. این آزمون با دستگاه Santam مدل ساخت کشور ایران با سرعت کشش ۵۰۰ میلی‌متر بر دقیقه در دانشگاه اصفهان انجام شد. پس از آن که نمونه به روش قالب‌گیری فشاری پخت شد، مطابق با استاندارد ASTM D-412 برش داده و برای آزمون کشش استفاده می‌شود.

۲-۲-۶ طیف‌سنج رنومتر مکانیکی

به‌منظور بررسی نحوه پخت نمونه‌های بهینه و همین‌طور لاستیک سیلیکون، آزمون طیف‌سنجی رنومتری مکانیکی با رنومتر صفحات

جدول ۳. مشخصات نمونه‌های مورد بررسی در آزمون‌ها.

Table 3. Characteristics of the samples examined in the tests.

Sample name	Filler amount	Curing agent amount
Silicone rubber (SR)	0	5
Silicone rubber – Cloisite -2 (SR-C-2)	2	5
Silicone rubber – Cloisite -4 (SR-C-4)	4	5
Silicone rubber – Cloisite -6 (SR-C-6)	6	5
Silicone rubber - Silane modifier - Cloisite-2 (SR-AC-2)	2	5
Silicone rubber - Silane modifier - Cloisite-4 (SR-AC-4)	4	5
Silicone rubber - Silane modifier - Cloisite-6 (SR-AC-6)	6	5

که از دو طرف به صفحات هشت‌وجهی متصل هستند، گروه‌های هیدروکسیلی که در لبه‌های صفحات آن‌ها وجود دارد، توانایی برقراری واکنش بسیار بالایی به‌خصوص با عامل‌های اتصال سیلانی چندعاملی دارد. گروه‌های هیدروکسیلی توانایی واکنش تراکمی با اجزای $\text{SiOCH}_2\text{CH}_3$ موجود در محیط حلال دارد [۲۲]. واکنش پیوند بین گروه‌های سیلانی از عامل APTES و گروه‌های هیدروکسیل در سه موقعیت انجام می‌شود که عبارت است از: در فضای بین‌لایه‌ای، بر روی سطوح خارجی و بر روی لبه‌ها. همچنین، در نانورس‌های اصلاح‌شده آلی، این پیوند بین گروه‌های سیلانی با گروه‌های هیدروکسیلی در نمک‌های آمونیوم برقراری می‌شود. در این پژوهش، برای بررسی انجام اصلاح سطحی از آزمون‌های FTIR، XRD و TGA استفاده شد.

۲-۳ آزمون FTIR

یکی دیگر از روش‌های بررسی انجام اصلاح سطحی که در این پژوهش استفاده شده است، آزمون طیف‌سنجی فرسرخ است که نتایج آن در شکل (۱) و (۲) نشان داده شده است.

همان‌طور که در شکل مشخص است؛ پیک ایجاد شده در عدد موج 693 cm^{-1} که در نمونه اصلاح شده ایجاد شده است، مربوط به N-H است که نشان‌دهنده پیوند عامل سیلانی به‌صورت فیزیکی یا

مرحله بعد به مدت ۴۸ ساعت به منظور ایجاد پیوند عامل سیلانی تحت رفلکس قرار گرفت و سپس، حلال با کیف بوختر و کاغذ صافی جداسازی شد و در ۳ مرحله با حلال تولوئن شسته شد تا عامل سیلانی اضافه آن حذف شود. نانورس اصلاح شده به مدت ۱۶ ساعت در دمای ۸۰ درجه سلسیوس خشک شد [۱۸].

۲-۳-۲ روش ساخت نانوکامپوزیت‌های سیلیکون - نانورس

در ابتدا، سیلیکون با مقدار مشخص در حلال تولوئن به مدت ۴۸ ساعت به کمک همزن مغناطیسی حل شد. نانوذرات رس به مدت ۳۰ دقیقه در تولوئن تحت امواج فراصوت پراکنده شد. سپس، نانوذرات پراکنده شده به محلول حل شده سیلیکون داخل تولوئن، اضافه و اختلاط کامل نانوذرات داخل حلال به کمک همزن مکانیکی طی مدت ۲ ساعت انجام شد [۱۹].

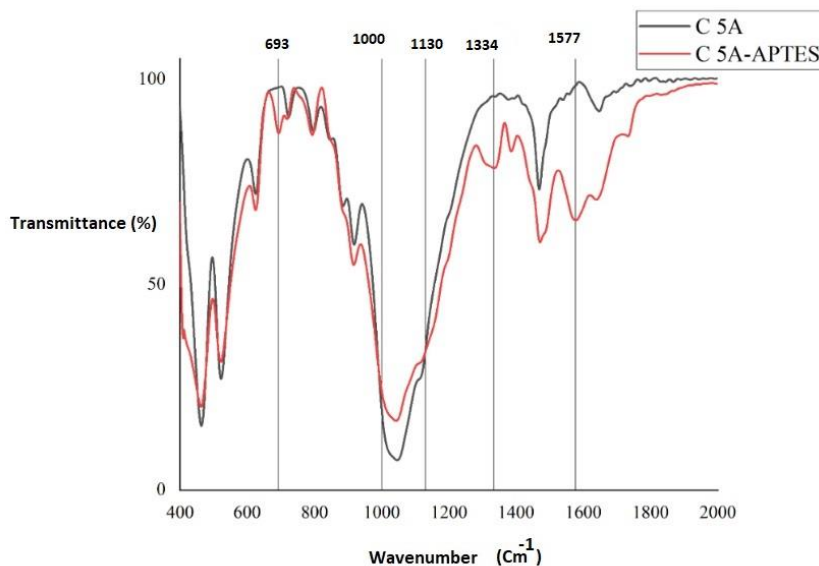
در شیمی، "Phr" مخفف "Parts per hundred" است که به معنای «قسمت در صد» است. این واحد معمولاً برای بیان غلظت یا نسبت یک ماده به کل ترکیب استفاده می‌شود.

در ادامه، عامل پخت بنزوئیل پراکسید به میزان ۲ phr به محلول اضافه و دوباره به مدت ۳۰ دقیقه تحت همزن مکانیکی به هم زده شد. این محلول در ادامه، در آن در دمای ۶۰ درجه سلسیوس و مدت ۴۸ ساعت قرار گرفت و پس از جداسدن حلال، نمونه‌ها تحت دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس به مدت ۲۰ دقیقه پخت شد و برای انجام پخت تکمیلی به مدت ۴ ساعت در دمای ۱۵۰ درجه سلسیوس قرار گرفت. لاستیک سیلیکون با این روش پخت شد، اما در نمونه‌های حاوی نانورس پخت اصلاً انجام نشد. در ادامه، حتی با افزایش میزان عامل پخت پراکسیدی و افزایش آن به میزان ۵ Phr نیز پخت اصلاً انجام نشد [۲۰]. پس از آن که پخت در حضور نانورس انجام نگرفت، توده جامد پس از جداسدن حلال به‌طور کامل با ۵ Phr از عامل پخت به‌روش قالب‌گیری فشاری تحت دمای ۱۲۰ درجه سلسیوس و فشار ۱۵۰ اتمسفر به مدت ۲۵ دقیقه در پژوهشگاه پلیمر و پتروشیمی پخت شد. مشخصات هر نمونه و مقدار اجزای آن در جدول (۳)، آورده شده است [۲۱].

۳. بحث و نتایج

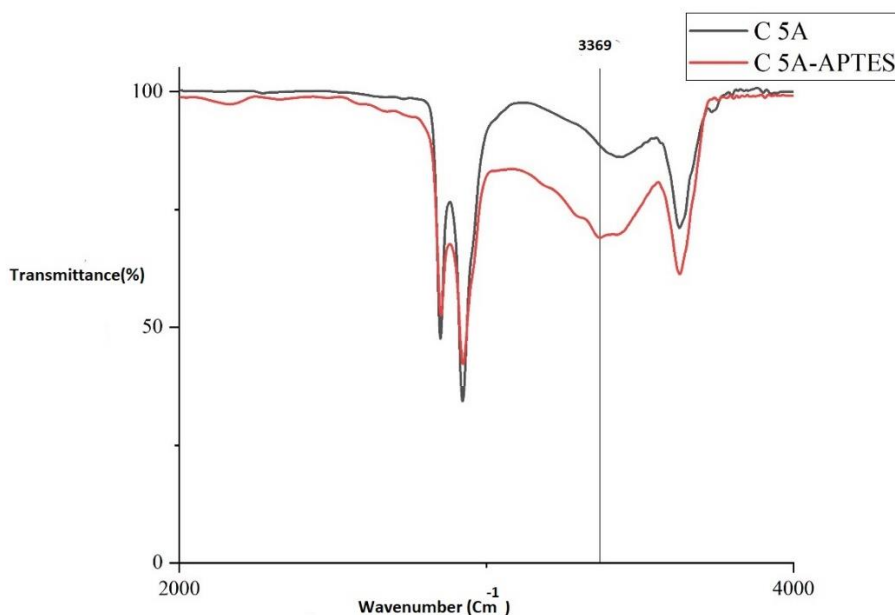
۳-۱ بررسی اصلاح سطحی کلوزیت (C5A)

در ساختار مونت‌موریلونیت‌ها که شامل دو صفحه چهاروجهی است



شکل ۱. طیف FTIR کلوزیت خالص و اصلاح شده کلوزیت 5A ($400-2000\text{ cm}^{-1}$).

Figure 1. FTIR spectra of pure and modified 5A closite.



شکل ۲. طیف FTIR کلوزیت خالص و اصلاح شده کلوزیت 5A ($2000-14000\text{ cm}^{-1}$).

Figure 2. FTIR spectrum of pure and modified closite 5A (2000-14000 cm-1).

نمونه اصلاح شده مربوطه گروه‌های متیل در ساختار APTES است. پیک بعدی ایجاد شده بعد از اصلاح سطحی در 1577 cm^{-1} مربوطه خمش N-H است و در انتها، پیک در عدد موجی 3369 cm^{-1} مربوطه ارتعاش کششی N-H است. وجود این طیف‌ها اصلاح سطحی و پیوند عامل APTES با کلوزیت 5A را تأیید می‌کند.

شیمیایی بر روی صفحات کلوزیت است. همچنین، در ناحیه بین 1000 تا 1130 cm^{-1} در کلوزیت خالص وجود پیک مربوطه ارتعاش کششی گروه‌های Si-O-Si است، در طیف نمونه اصلاح شده پهن شدن این پیک در نمونه اصلاح شده بیانگر افزایش پیوندهای Si-O-Si است [۲۳]. همچنین، پیک ایجاد شده در 1334 cm^{-1} در

سطحی پیک در زاویه ۲/۷۶ درجه به سمت زاویه کمتر حرکت کرده است. با استفاده از رابطه براگ، فاصله بین صفحات حساب می شود [۲۵]. همان طور که از نتایج برمی آید، در نمونه اصلاح سطحی شده، فاصله صفحات بیشتر شده است. به طور کلی با افزایش مقدار آمینوسیلان پیوندشده در نانوسرها فاصله بین صفحات در آنها افزایش می یابد که با توجه به رابطه برگ این امر متناظر با جابه جایی زاویه پیک به سمت زوایای کمتر است [۲۶].

در جدول خلاصه پیکها و تفسیر آنها آورده شده است (جدول (۴) و (۵)[۲۴].

۳-۳ آزمون XRD

در این پژوهش، بررسی اصلاح سطحی انجام شده به کمک بررسی ریزساختار با آزمون XRD و تعیین فاصله صفحات انجام شد. نتایج آزمون XRD به صورت شدت بر حسب زاویه در شکل (۳)، آمده است. همان طور که در شکل پیدا است و مطابق جدول (۶)، پس از اصلاح

جدول ۴. پیکهای آزمون FTIR و مشخصه آنها برای کلوزیت 5A.

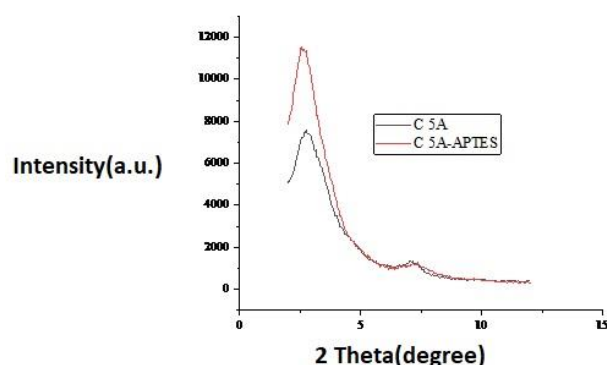
Table 4. FTIR test peaks and their characteristics for Cloisite 5A.

Wavenumber (cm ⁻¹)	Characteristic
3630	O-H stretching vibration of surface hydroxyl groups
3388	O-H stretching vibration of water molecules
3410	O-H stretching vibration of hydroxyl groups on external surfaces
2926,2854	Asymmetric C-H stretching vibration
1636	O-H bending vibration of water molecules
1469	C-H stretching vibration
1048	Si-O stretching vibration
918	Al-OH-Al bending vibration
799	Mg-OH-Mg bending vibration
522	Si-O bending vibration
461	Si-O deformation vibration

جدول ۵. پیکهای آزمون FTIR و مشخصه آنها برای کلوزیت 5A اصلاح شده.

Table 5. FTIR peaks and their characteristics for modified Cloisite 5A.

Wavenumber (cm ⁻¹)	Characteristic
693	N-H vibration
1334	Methyl vibration
1577	C-H bending vibration
3369	N-H asymmetric stretching vibration



شکل ۳. نمودار XRD برای نمونه های خالص و اصلاح شده کلوزیت 5A.

Figure 3. XRD pattern for pure and modified cloisite 5A samples.

جدول ۶. زاویه پیک و فضای بین لایه‌های برای کلوزیت 5A خالص و اصلاح‌شده.

Table 6. Peak angle and interlayer spacing for pure and modified 5A.

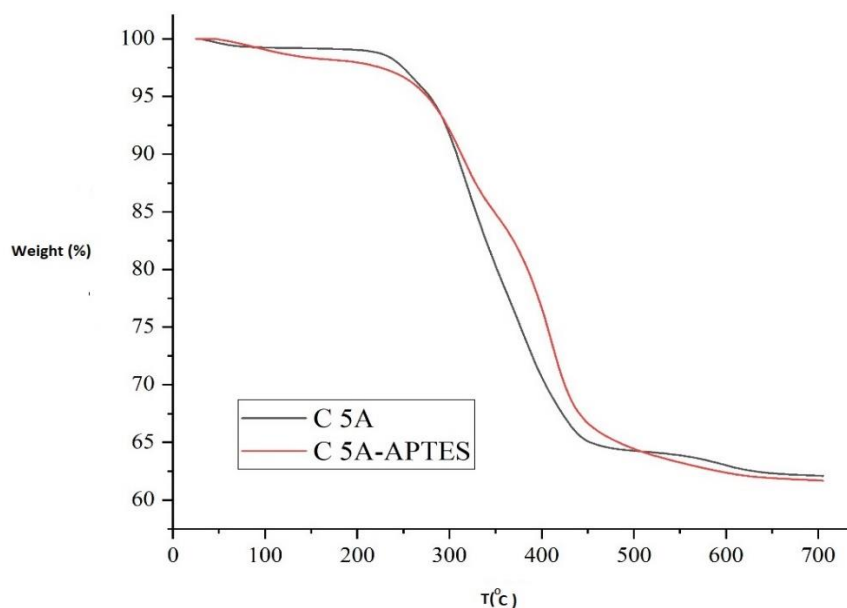
Sample	Peak angle (°)	Interlayer spacing (nm)
C5A	2.76	3.197
C5A -A (APTES)	2.56	3.447

در این معادله M وزن مولکولی عامل سیلانی است (برای APTES این مقدار ۲۲۱/۳۷ g/mol است). هم‌چنین، با تقسیم میزان پیوندشدن بر غلظت اولیه عامل سیلانی بازده پیوند به‌دست می‌آید. در جدول (۷)، میزان و درصد پیوندشدن برای کلوزیت اصلاح‌شده آمده‌است [۲۸].

$$\text{Exacted grafted amount} \left(\frac{\text{mequiv}}{\text{g}} \right) = \frac{10^3 W_{200-600}}{(100 - W_{200-600})M} \quad (1)$$

۳-۴ آزمون TGA

برای تعیین میزان عامل سیلانی شاخه‌ای‌شده بر روی کلوزیت 5A قبل و بعد از اصلاح سطحی، آزمون وزن‌سنجی حرارتی انجام شد. با استفاده از رابطه (۱) و افت وزنی - که در محدوده دمای ۲۰۰ تا ۶۰۰ درجه سلسیوس رخ می‌دهد - میزان پیوندشدن آمینوسیلان و بازده پیوندشدن عامل سیلانی حساب می‌شود. منحنی مرتبط به آزمون TGA که در آن میزان افت وزنی نانورس بر حسب دما نمایش داده شده در شکل (۴)، پیدا است [۲۷].



شکل ۴. نمودار آزمون TGA در نانوذره‌ها.

Figure 4. TGA test diagram on nanoparticles.

جدول ۷. درصد و میزان پیوندشدن گروه‌های سیلانی بر روی کلوزیت 5A.

Table 7. Percentage and degree of grafting of silane groups on closite 5A.

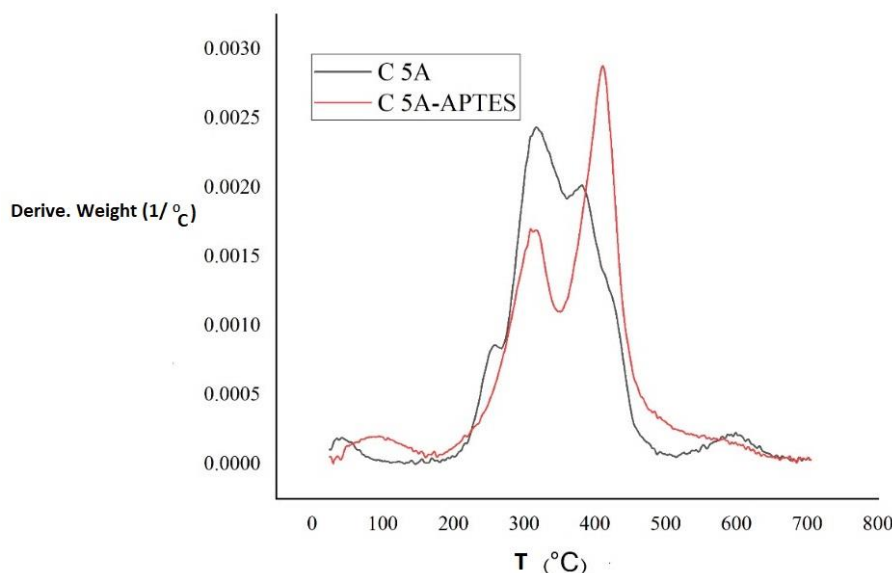
Sample	The rate of grafting ($\frac{\text{mequiv}}{\text{g}}$)	Percentage of grafting
C5A -A (APTES)	0.17	3.77

کرده و اندازه ذرات با متراکم شدن آن‌ها بیشتر شده است. این نتیجه با نتایج موجود در بخش قبل مربوط به آزمون XRD منطبق بود و آن را تأیید می‌کند که با افزایش نانوذره ساختار به فرم میان‌صفحه‌ای و تجمعی ایجاد شده است. همچنین، در بخش خواص حرارتی این افت در خواص نشان داده شده است که باتوجه به ارتباط خواص با ریزساختار نتایج توجیه می‌شود [۳۰]. در کلوزیت‌های اصلاح شده نیز در نسبت ۲ phr بیشتر ساختارهای میان‌صفحه‌ای و تا حدی ورقه‌ای وجود دارد و پخش بهتری ایجاد شده است. با افزایش نسبت وزنی در نسبت‌های ۴ و ۶ phr ساختارهای میان‌صفحه‌ای و تجمعی بیشتر ایجاد شده است. در پژوهش‌های عسگری و همکاران با افزایش مقدار آمینوسیلان در اصلاح کلوزیت با افزایش نسبت آمینوسیلان از حدی بیشتر فاصله میان‌صفحه‌ای کمتر شده است که دلیل این رخداد، تشکیل شبکه و پیوند بین گروه‌های آمینوسیلان است [۳۱]. در این پژوهش به نظر می‌رسد که با افزایش میزان کلوزیت اصلاح سطحی شده و نزدیک‌تر شدن صفحات کلوزیت به یکدیگر و باتوجه به فاصله صفحات نسبتاً بالا در کلوزیت 5A (۳/۱۹ نانومتر) در مقایسه با دیگر کلوزیت‌ها (نانورس‌های اصلاح سطحی شده تجاری) گروه‌های آمینوسیلان با افزایش میزان کلوزیت اصلاح شده در بستر پلیمر با هم‌دیگر جاذبه برقرار کرده‌اند و تشکیل شبکه داده‌اند و در نهایت، موجب ایجاد ساختارهای تجمعی شده است [۳۲].

در ادامه، از داده‌های آزمون وزن‌سنجی مشتق گرفته شد و نمودار تفاضلی وزن‌سنجی برحسب دما ترسیم شد که در شکل (۵)، آورده شده است. مطابق نمودار در نمونه کلوزیت اصلاح نشده یک پیک در دمای ۶۰۰ درجه سلسیوس مشاهده می‌شود که مربوط به هیدروکسیل زدایی از صفحات کلوزیت است. این پیک در نمونه اصلاح شده با APTES از بین می‌رود که دلیل آن به واکنش‌های اصلاح سطحی انجام شده بین عامل سیلانی و گروه‌های هیدروکسیلی کلوزیت مربوط می‌شود. همچنین، برای نمونه اصلاح شده با APTES دو پیک در محدوده دمایی ۲۰۰ تا ۵۰۰ درجه سلسیوس مشاهده می‌شود که این پیک اول مربوط به گروه‌های سیلانی است که به صورت فیزیکی به لبه‌ها و سطوح خارجی متصل شدند. پیک دوم نیز مربوط به گروه‌های سیلانی جذب شده در فاصله بین صفحات کلوزیت است [۲۹].

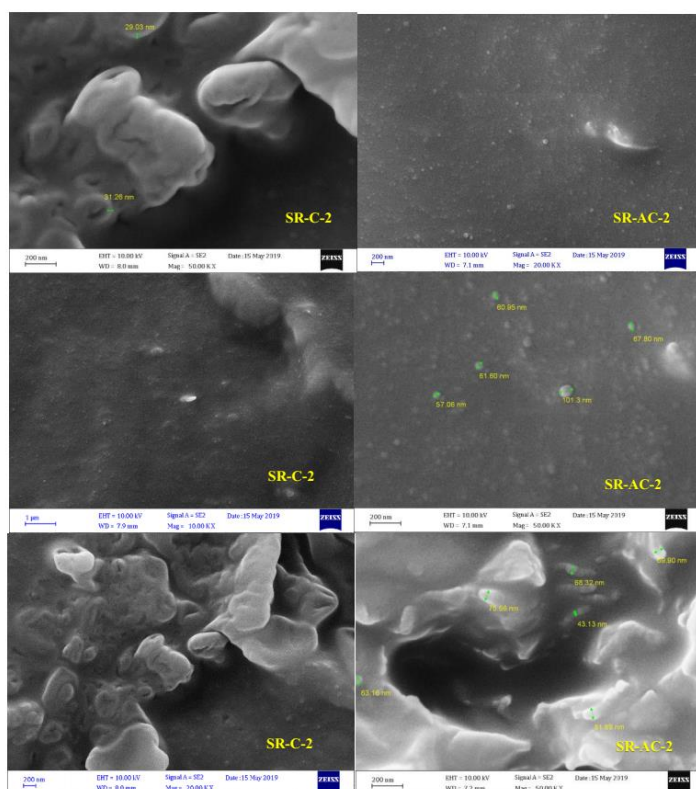
۳-۵ بررسی شکل‌شناسی نانوکامپوزیت‌های سیلیکون

بررسی شکل‌شناسی از سطح مقطع شکست نانوکامپوزیت‌های سیلیکونی حاوی ۲، ۴، ۶ و ۸ کلوزیت 5A خالص و اصلاح سطحی شده با بزرگ‌نمایی‌های مختلف در شکل (۶)، (۷) و (۸) نشان داده شده است. چنان‌که پیدا است، با افزایش میزان کلوزیت 5A خالص از ۲ به ۶ phr، ساختار به سمت آرایش میان‌صفحه‌ای حرکت

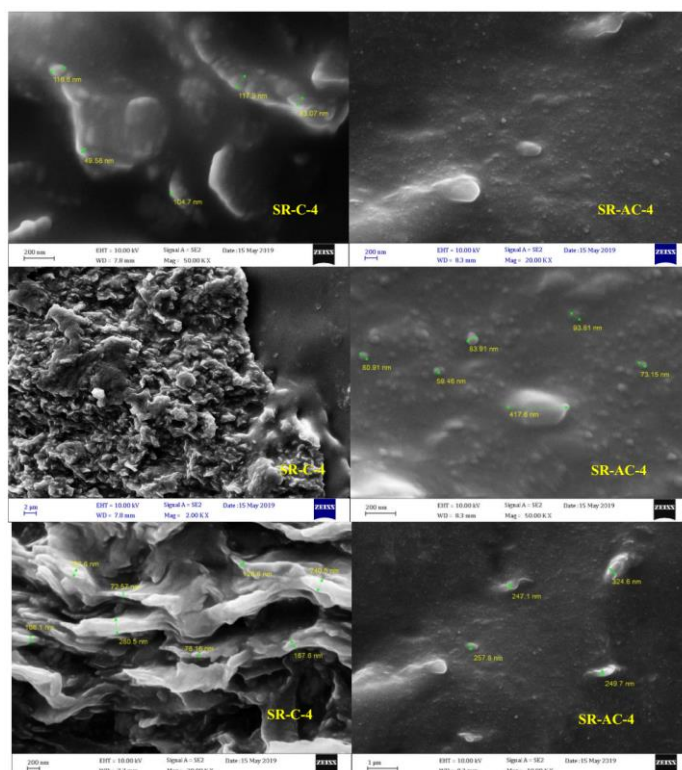


شکل ۵، نمودار DTG برای کلوزیت 5A خام و اصلاح شده.

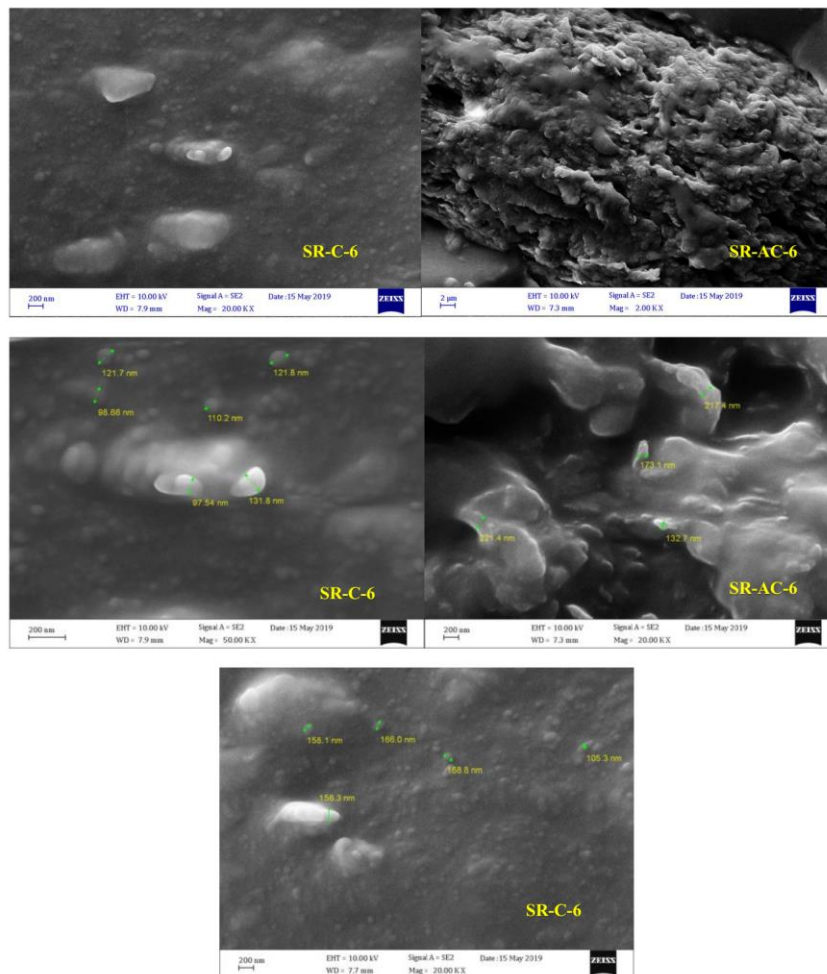
Figure 5, DTG plot for raw and modified 5A cloisite.



شکل ۶. تصاویر SEM نانوکامپوزیت‌های سیلیکون/نانورس با نسبت ۲phr.
 Figure 6. SEM images of silicon/nanoclay nanocomposites with a ratio of phr2.



شکل ۷. تصاویر SEM نانوکامپوزیت‌های سیلیکون/نانورس با نسبت ۴phr.
 Figure 7. SEM images of silicon/nanoclay nanocomposites with a ratio of phr4.



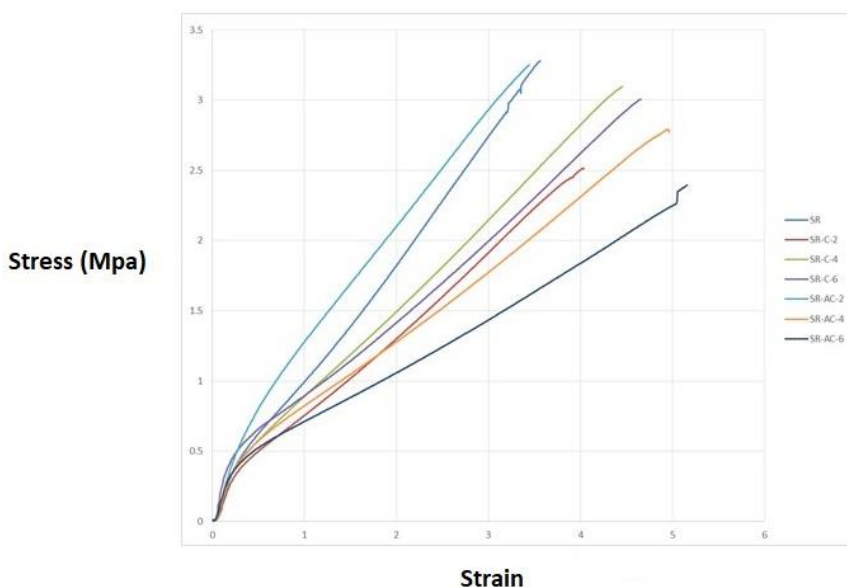
شکل ۸. تصاویر SEM نانوکامپوزیت‌های سیلیکون/نانورس با نسبت ۶phr.
Figure 8. SEM images of silicon/nanoclay nanocomposites with a ratio of phr6.

۳-۶ بررسی خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های سیلیکون/نانورس

پس از تهیه نانوکامپوزیت‌ها در این پژوهش، آزمون کشش بر روی آن‌ها انجام شد. این آزمون برای هر نمونه ۳ بار تکرار شد. نتایج به صورت نمودار تنش کرنش برای هر نمونه به دست آمد که در شکل‌های (۹) و (۱۰)، آمده است. مقادیر تنش در نقطه شکست و ازدیاد طول (کرنش) در نقطه شکست به دست آمد و میانگین آن‌ها محاسبه شد. خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های سیلیکون، سیلیکون/نانورس و سیلیکون/نانورس اصلاح شده که شامل مقاومت کششی و ازدیاد طول در نقطه شکست هستند، در شکل آورده شده است.

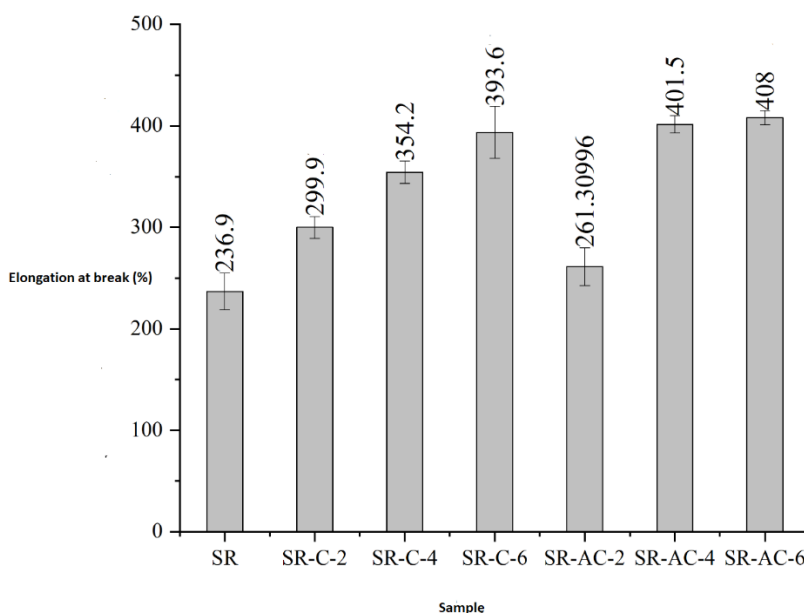
باتوجه به شکل، ازدیاد طول در نقطه شکست در همه نمونه‌ها نسبت به سیلیکون خالص بهبود پیدا کرده است. همچنین، با افزایش

میزان نانورس در نانوکامپوزیت‌ها میزان افزایش طول بیشتر می‌شود. تقویت کرنش در نقطه شکست با افزودن کلوزیت 5A نشان‌دهنده پخش مناسب کلوزیت در بستر پلیمر است [۳۴]. این افزایش با وجود ایجاد ساختار میان‌صفحه‌ای و حتی تجمع در بستر پلیمر در نانوکامپوزیت‌های اصلاح شده بیشتر شده است. در پژوهش اسماعیل و همکاران در بررسی ازدیاد طول در نقطه شکست در نانوکامپوزیت‌های سیلیکون با سه نانوذره Na Cloisite، Cloisite 20A و Cloisite 30B در نانوکامپوزیت با پرکننده Cloisite 20A حتی با وجود ایجاد ساختارهای میان‌صفحه‌ای ازدیاد طول در نقطه شکست بیشتری نسبت به نانوکامپوزیت‌های با دو پرکننده دیگر - که در آن‌ها پخش مناسب‌تر ایجاد شده و ساختار به فرم ورقه‌ای مشاهده شد - ایجاد شده است [۳۵].



شکل ۹. نمودار تنش- کرنش نانوکامپوزیت‌های سیلیکون/ کلوزیت.

Figure 9, Stress-strain diagram of silicon/ cloisite nanocomposites.



شکل ۱۰. نمودار مقایسه‌ای از زیاد طول در نقطه شکست نانوکامپوزیت‌های سیلیکون/ کلوزیت خالص و اصلاح‌شده.

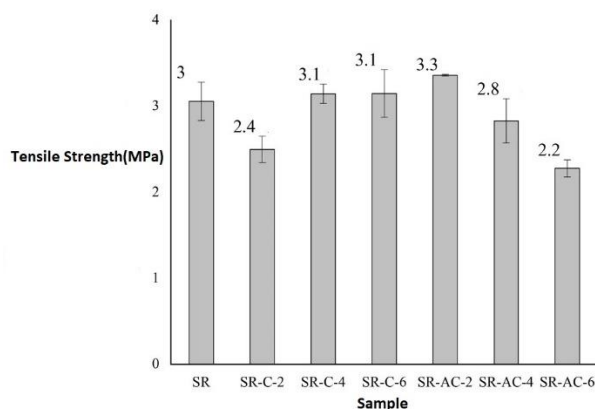
Figure 10. Comparative diagram of elongation at break of pure and modified silicon/ cloisite nanocomposites.

افزایش می‌یابد، اما در نمونه‌های سیلیکون پر شده با کلوزیت سطح‌اصلاحی در نمونه ۲ phr بیشترین استحکام در نقطه شکست رخ داده است. در نمونه‌های ۴ phr و ۶ phr با تجمع نانوذرات و ایجاد ساخت توده‌ای استحکام نانوکامپوزیت‌ها دچار افت شده است و با افزایش میزان نانوذره کمتر شده است [۳۶]. یکی از عوامل مهم در

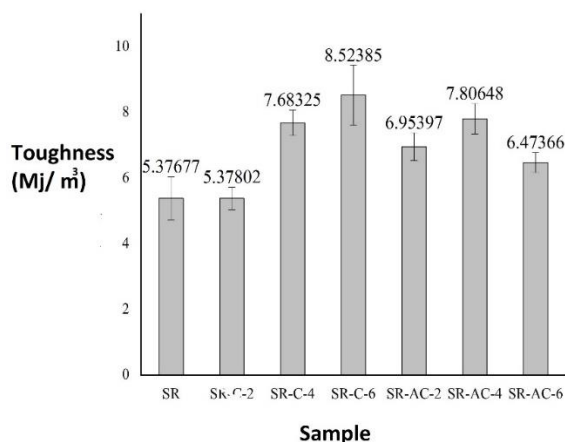
نتایج استحکام کششی نانوکامپوزیت‌های سیلیکونی نیز در شکل‌های (۴) تا (۱۰) آمده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود در نمونه‌های سیلیکون پر شده با کلوزیت خالص، خواص کششی در مقایسه با نانوکامپوزیت سیلیکون خالص تغییر چندانی نکرده است. استحکام کششی در این نانوکامپوزیت‌ها با افزایش میزان نانوذره

بهبود چقرمگی شده است، اما باتوجه به افت شدید استحکام در نانوکامپوزیت سیلیکون/کلوزیت اصلاح شده در ۶phr چقرمگی برای این نمونه افت کرده و روند کاهشی داشته است [۳۸].
 افت خواص در نمونه حاوی ۶ درصد نانورس اصلاح شده نسبت به نمونه اصلاح نشده ممکن است به چند عامل مرتبط باشد. یکی از دلایل ممکن است تغییر در ساختار یا توزیع نانورس اصلاح شده باشد که می تواند منجر به کاهش همگنی و در نتیجه، افت خواص مکانیکی یا فیزیکی شود. همچنین، فرایند اصلاح نانورس ممکن است باعث تغییر در تعاملات بین نانورس و ماتریس پلیمری شود که می تواند بر روی خواص نهایی تأثیر بگذارد. در نهایت، نسبت بالای نانورس اصلاح شده ممکن است باعث تجمع ذرات و کاهش کارایی آن ها در بهبود خواص شود [۴۰-۳۸].

استحکام مواد کامپوزیتی، انتقال مؤثر تنش است. در سامانه هایی که بین نانوذره و پلیمر برهم کنش به خوبی ایجاد نمی شود، انتقال تنش از پلیمر به نانوذره انجام نمی شود و با افزایش میزان نانوذره میزان استحکام کششی کمتر می شود. در اینجا، همان طور که مشخص است استحکام کششی در نانوکامپوزیت با کلوزیت اصلاح نشده تغییر چندانی نکرده است. با اصلاح سطحی اما این مقدار تا حدودی بهتر شده؛ ولی در ادامه، تجمع نانوذره موجب تضعیف انتقال تنش و ایجاد تمرکز تنش در نانوکامپوزیت و در نهایت، کاهش استحکام کششی شده است [۳۷].
 محاسبه سطح زیر نمودار تنش- کرنش برای نانوکامپوزیت ها میزان انرژی ذخیره شده برای شکست (چقرمگی) حساب شد، که نتایج آن در شکل های (۱۱) و (۱۲)، آورده شده است. باتوجه به شکل و نتایج ازدیاد طول در نقطه شکست، افزایش کرنش نقطه شکست موجب



شکل ۱۱. نمودار استحکام کششی نانوکامپوزیت های سیلیکون/کلوزیت خالص و اصلاح شده.
 Figure 11. Diagram of tensile strength of pure and modified silicon/ Cloisite nanocomposites.



شکل ۱۲. نمودار مقایسه ای چقرمگی نانوکامپوزیت های سیلیکون/کلوزیت خالص و اصلاح شده.
 Figure 12. Comparative toughness chart of pure and modified silicon/ Cloisite nanocomposites.

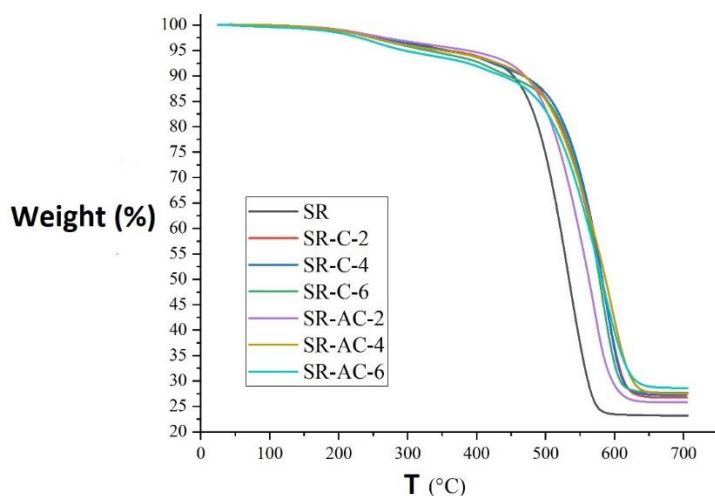
۷-۲ بررسی پایداری حرارتی نانوکامپوزیت‌های سیلیکون

نتایج بررسی پایداری حرارتی لاستیک سیلیکون و نانوکامپوزیت‌های سیلیکون به‌همراه نانورس و نانورس‌اصلاح‌شده در درصدهای متفاوت از Cloiste5A با آزمون حرارتی TGA انجام شد و در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل مشخص شده است، با اضافه شدن نانورس به لاستیک سیلیکون در پایداری حرارتی بهبود قابل توجهی ایجاد شده است. هم‌چنین، مشخصه‌های دماهای شروع تخریب اولیه (دمای افت وزنی به مقدارهای ۵ و ۱۰ درصد) و دمای تخریب ۵۰ درصد و هم‌چنین، میزان خاکستر باقی‌مانده در دمای ۷۰۰ درجه از منحنی‌های آزمون حرارتی استخراج شد و در جدول آورده شده است [۳۹].

باتوجه به نتایج، مطابق جدول (۸)، در نانوکامپوزیت‌های اصلاح‌نشده با افزایش مقدار نانورس از ۲ به ۶ phr دماهای تخریب نانوکامپوزیت‌ها کم شده است که علت آن می‌تواند مربوط به عدم توزیع مناسب در بستر پلیمر باشد. توزیع مناسب نانورس‌ها عامل مهمی در بهبود پایداری حرارتی نانوکامپوزیت‌ها است. به‌طور کلی، در میزان بارگذاری کم از نانورس‌های صفحه‌ای، توزیع بهتر در بستر پلیمر ایجاد و پایداری حرارتی بالاتر حاصل می‌شود و بالعکس، تجمع نانولایه‌ها در بستر پلیمر و میزان بالای نانورس می‌تواند عملیات تخریب حرارتی را تسهیل کند. در نانوکامپوزیت‌های اصلاح‌شده نیز همین اتفاق رخ داده است و علت افت حرارتی با افزایش مقدار نانورس از ۲ به ۶ phr به‌همین دلیل است. در میزان ۲ phr از کلوزیت

اصلاح‌شده، اصلاح سطحی نتیجه چشم‌گیری داشته و باعث بهبود قابل توجه خواص حرارتی شده است [۴۰]. گروه‌های آمینوسیلان بر روی سطح کلوزیت با ایجاد برهم‌کنش قوی بین نانوپرکننده و زنجیره سیلیکونی موجب توزیع بهتر در بستر پلیمر و باعث ارتقای خواص نانوکامپوزیت شده، با ایجاد شبکه در لاستیک سیلیکون منجر به بالا رفتن پایداری حرارتی سامانه می‌شود. تجمع شدیدتر کلوزیت‌های سطح‌اصلاحی در نانوکامپوزیت‌های سیلیکون موجب شده است تا نانوذرات تجمع کرده موجب تقویت عملیات تخریب شود و دمای شروع تخریب در این نانوکامپوزیت‌ها کمتر باشد [۳۰].

پایداری حرارتی رابطه مستقیمی با نحوه توزیع نانوذره‌ها در بستر پلیمری دارد. به‌طور کلی، در نانوکامپوزیت‌های پلیمر/نانورس بهبود حرارتی نتیجه تشکیل یک ساختار پلیمر/خاکستر است که باعث می‌شود تا محصول نتیجه‌شده از سوختن نانوکامپوزیت پلیمر/نانورس به‌طور کامل تبدیل به شکل گازی نباشد و باقی‌مانده کربنی تشکیل می‌دهد. ساختار رس/خاکستر مانع نفوذ گازهای حاصل از احتراق در پلیمر/رس طی تجزیه حرارتی می‌شود [۳۱]. وجود این گازها برای ادامه سوختن لازم است. ضخامت و استحکام مکانیکی این خاکستر با میزان نزدیکی به ساختار لایه‌ای نانورس در بستر پلیمر و هم‌چنین، میزان نانورس افزوده شده به پلیمر مرتبط است. خاکسترها در پلیمرهایی با آرایش ورقه‌ای و نانورس بیشتر دارای ظاهر منسجم‌تر و بدون شکست هستند [۳۲].



شکل ۱۳. بررسی تخریب حرارتی نانوکامپوزیت‌های سیلیکون/کلوزیت خالص و اصلاح‌شده.

Figure 13. Thermal degradation study of pure and modified silicon/cloisite nanocomposites.

جدول ۸. مشخصه‌های آزمون حرارتی نانوکامپوزیت‌های سیلیکون/کلوزیت 5A.

Table 8. Thermal test parameters of silicon/cloosite 5A nanocomposites.

Sample	R _{700°C} (%)	T _{50%} (°C)	T _{10%} (°C)	T _{5%} (°C)
SR	23.19	533	453	357
SR-C-2	26.7	580	469	358
SR-C-4	27.2	582	467	353
SR-C-6	27.7	578	446	328
SR-AC-2	25.8	562	470	386
SR-AC-4	27.5	586	468	347
SR-AC-6	28.369	581	437	294

نمونه ۲phr از کلوزیت 5A اصلاح شده است که این امر نیز با خواص حرارتی و مکانیکی تطبیق دارد. در ادامه، نمودار مقایسه‌ای نمونه‌های XRD در شکل (۱۴)، آورده شده است [۳۴].

۳-۸ بررسی مدول ذخیره و درجه پخت نانوکامپوزیت‌های سیلیکونی

بررسی نتایج مکانیکی، حرارتی و شکل‌شناسی نمونه‌های نانوکامپوزیتی سیلیکونی حاوی کلوزیت 5A خالص و اصلاح شده نشان می‌دهد که با افزایش میزان نانوذره به تدریج پخش و توزیع در زمینه پلیمر تضعیف شده است. هم‌چنین، اصلاح سطحی در نسبت ۲phr وزنی نتیجه بخش بوده و خواص نانوکامپوزیت را تا حد زیاد ارتقا داده است. بنابر این موارد تا به این‌جا نمونه ۲phr وزنی اصلاح شده در مجموع، نمونه بهینه از لحاظ بهبود خواص انتخاب شده است. در دو بخش بعد، خواص پخت و نفوذپذیری این نمونه بهینه به همراه لاستیک سیلیکون و نانوکامپوزیت سیلیکونی / کلوزیت 5A بررسی شده است [۳۵].

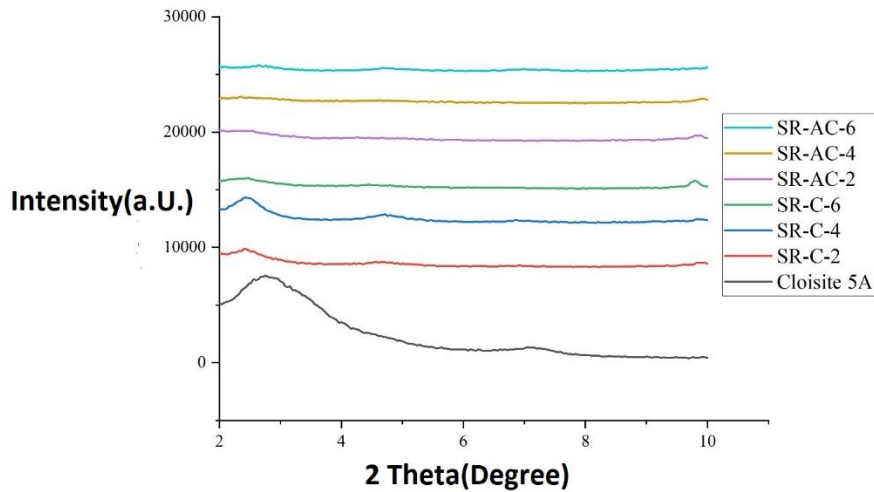
۳-۷-۱ بررسی ریزساختار نانوکامپوزیت‌های سیلیکونی

برای بررسی توزیع کلوزیت 5A در بستر پلیمر آزمون XRD در نسبت‌های مختلف نانورس انجام گرفت (جدول (۹)). در شکل (۴) تا (۹) نمودار طیف XRD نانوکامپوزیت‌های سیلیکونی پر شده با کلوزیت 5A و هم‌چنین، کلوزیت 5A نشان داده شده است. در طیف مربوط به کلوزیت 5A یک پیک در محدوده ۲/۷۶ وجود دارد که مطابق رابطه برگ فضای بین لایه‌های متناظر این پیک در کلوزیت 5A معادل ۳/۴۴۷ nm است. با افزودن کلوزیت 5A خالص به لاستیک سیلیکون، همان‌طور که مشاهده می‌شود این پیک به سمت اعداد کمتر رفته است که نشان‌دهنده ایجاد ساختار میان‌صفحه‌ای و تاحدی ورقه‌ای در زمینه پلیمر است. تغییر پیک‌های XRD ایجاد شده در نانوکامپوزیت‌ها و به تبع آن فاصله میان صفحات کلوزیت در آن‌ها در جدول آمده است [۳۳]. مطابق جدول (۹) با افزایش میزان نانوذره، احتمال ایجاد ساختار ورقه‌ای کمتر شده است. این امر در خواص مکانیکی و حرارتی دیده شده است و با افزایش میزان نانوذره، خواص دچار افت شده‌اند. هم‌چنین، مطابق اعداد جدول بیشترین فاصله بین صفحه‌ای در

جدول ۹. زاویه پیک و فاصله بین صفحه‌ای نانوکامپوزیت‌های سیلیکون/کلوزیت 5A.

Table 9. Peak angle and interplanar spacing of silicon/cloosite 5A nanocomposites.

Sample	Inter-plane distance (nm)	XRD peak angle (°)
Cloisite 5A	3.2	2.76
SR-C-2	3.68	2.4
SR-C-4	3.62	2.44
SR-C-6	3.56	2.48
SR-AC-2	4.41	2
SR-AC-4	3.74	2.36
SR-AC-6	3.34	2.64

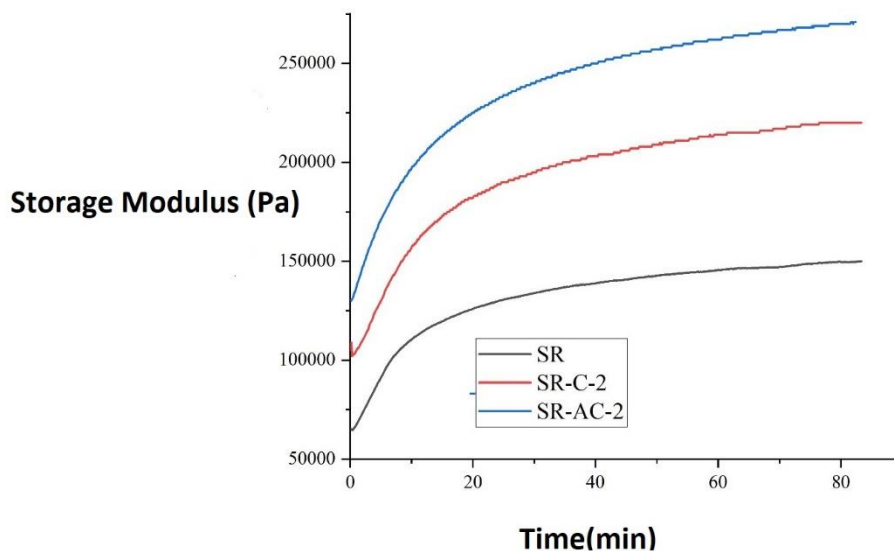


شکل ۱۴. نمودار مقایسه‌ای XRD نانوکامپوزیت‌های سیلیکون و کلوزیت 5A.

Figure 14. XRD comparison chart of silicon and callosite 5A nanocomposites.

بهبود در اتصالات عرضی آن شده‌است. همچنین، اصلاح سطحی کلوزیت 5A موجب بهبود بیشتر پخت این لاستیک شده‌است. علت این اتفاق به گروه‌های آمینی موجود در عامل سطح اصلاحی کلوزیت است که موجب بهبود پخت می‌شود. این اتفاق در کلوزیت اصلاح سطحی شده به دلیل حضور گروه‌های آمینوسیلانی APTES بیشتر است [۳۶].

بررسی نتایج آزمون روبش- زمان در دمای ثابت ۱۰۰ درجه سلسیوس در شکل (۱۵)، برای نانوکامپوزیت‌های سیلیکون، سیلیکون/کلوزیت 5A و سیلیکون/کلوزیت 5A سطح اصلاحی شده، نشان داده شده‌است. با افزایش اتصالات عرضی در لاستیک‌ها چگالی اتصالات عرضی در آن‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش اتصالات عرضی مدول ذخیره در لاستیک افزایش می‌یابد. با توجه به شکل زیر مشاهده می‌شود که افزودن کلوزیت 5A به لاستیک سیلیکون موجب



شکل ۱۵. بررسی مدول ذخیره در نانوکامپوزیت‌های سیلیکون.

Figure 15. Investigation of storage modulus in silicon nanocomposites.

۳-۹ بررسی تراوایی نمونه بهینه

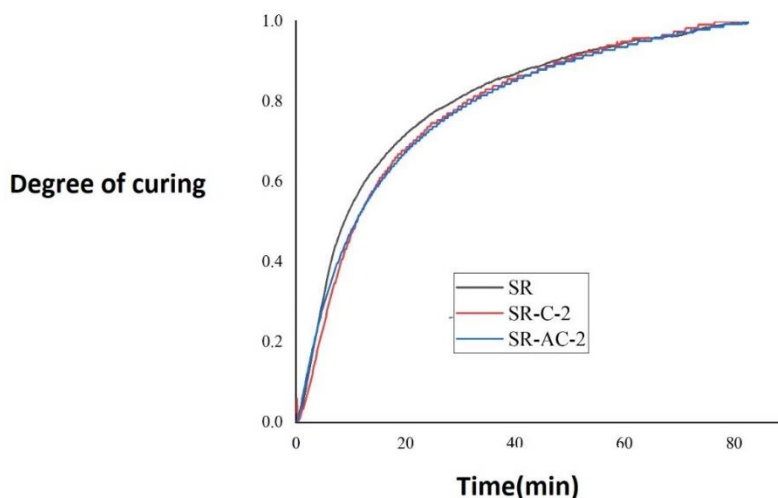
یکی از خواص مهم نانوکامپوزیت به خصوص در کاربردهای آببندی سطوح خاصیت نفوذپذیری آنها است. در این پژوهش بررسی خاصیت نفوذپذیری فقط برای نانو کامپوزیت اصلاح شده ۲ phr (به عنوان نمونه بهینه) و لاستیک سیلیکون (به عنوان نمونه شاهد) انجام شده است (جدول (۱۰)).

همان طور که مشاهده می شود، پخش مناسب در بستر پلیمر در نانوکامپوزیت اصلاح شده موجب کاهش مناسب تراوایی در لاستیک سیلیکون شده است. دلیل این اتفاق در ارتباط با ظرفیت ذاتی صفحات رس در ایجاد پیچاپچی در مسیر عبور سیال در عبور از آن و هم چنین، پخش مناسب با اصلاح سطحی در بستر پلیمر است. اثر اصلاح سطح نانو کامپوزیت (SR-AC-2)، منجر به کاهش تراوایی به مقدار ۲۹/۶۴ شده است [۳۸-۴۰].

هم چنین، با رابطه (۲) می توان با اطلاعات آزمون روبش- زمان درجه پخت را در لاستیک سیلیکون و نمونه های نانوکامپوزیتی لاستیک سیلیکون با نسبت وزنی ۲phr از کلوزیت 5A خالص و اصلاح شده حساب کرد. روند تغییرات درجه پخت با زمان در شکل زیر گزارش شده است (شکل (۱۶)). همان طور که در شکل پیدا است؛ درجه پخت لاستیک سیلیکون نسبت به نانوکامپوزیت های سیلیکونی با نسبت ۲phr از کلوزیت 5A خالص و اصلاح شده بیشتر است. که این به دلیل تشکیل شبکه به وسیله کلوزیت 5A خالص و اصلاح شده در زمینه سیلیکون و محدود کردن دسترسی رادیکال های آزاد به لاستیک سیلیکون و در نهایت، کند شدن سرعت پخت است [۳۷].

$$\alpha(t) = \frac{G'(t) - G'(t_{\alpha=0})}{G'(t_{\alpha=1}) - G'(t_{\alpha=0})} \quad (2)$$

در رابطه فوق، $G'(t)$ مدول ذخیره به عنوان تابعی از دما، هم چنین، $G'(t_{\alpha=1})$ و $G'(t_{\alpha=0})$ مقادیر مدول ذخیره حداقل و حداکثر هستند.



شکل ۱۶. درجه پخت نانوکامپوزیت های سیلیکون.

Figure 16. Curing degree of silicon nanocomposites.

جدول ۱۰. میزان تراوایی نانوکامپوزیت های سیلیکون/نانورس در مقایسه با لاستیک سیلیکون.

Table 10. Permeability of silicone/nanoverse nanocomposites compared to silicone rubber.

Sample	Nitrogen gas permeability (Barrer)	Permeability ratio of nanocomposite to pure silicon
SR	90.54	0
SR-AC-2	60.9	67.2

۴. نتیجه‌گیری

اصلاح سطحی نانورس در محیط تولوئن به‌وسیلهٔ عامل سیلانی APTES انجام‌گرفت و برای بررسی اصلاح سطحی، آزمون‌های FTIR، XRD و TGA انجام‌شد. نتایج آزمون TGA و نمودار DTG، سطح‌اصلاحی و پیوند خوردن گروه‌های سیلانی را تأیید کردند. همچنین، به‌کمک نتایج این آزمون مشخص‌شد که درصد پیوند خوردگی میزان ۳/۶۶ درصد بوده‌است. نتایج XRD نیز افزایش فاصلهٔ میان صفحه‌ای را تأیید کرد. درمقایسهٔ طیف به‌دست‌آمده از آزمون FTIR وجود گروه‌های جدید بر روی نانورس محرز شد. نتایج این سه آزمون همگی اصلاح سطحی انجام‌شده بر روی نانورس با عامل سیلانی را تأیید کرد. نانوکامپوزیت‌های سیلیکونی در سه نسبت وزنی ۲، ۴ و ۶ از نانورس خالص و اصلاح‌شده تهیه‌شد. برای بررسی خواص نانوکامپوزیت‌های سیلیکونی آزمون‌های کشش برای بررسی خواص مکانیکی، TGA به‌منظور بررسی خواص پایداری حرارتی، XRD و SEM به‌منظور بررسی ریزساختار انجام‌گرفت. در بخش خواص مکانیکی از دیاد طول در نقطهٔ شکست با افزایش میزان نانوذره افزایش پیدا کرد. برای نانوکامپوزیت سیلیکون با میزان ۶ phr از کلوزیت اصلاح‌شدهٔ از دیاد طول از ۲۳۷ درصد نانوکامپوزیت سیلیکون تا ۴۰۸ درصد افزایش داشته‌است. در استحکام کششی نیز خواص در نانوکامپوزیت‌های پر شده با کلوزیت خالص با افزایش میزان نانوذره نسبت به نانوکامپوزیت سیلیکون افزایش یافت؛ ولی در نانوکامپوزیت‌های اصلاح‌شده پس از نسبت ۲ phr خواص به‌علت تجمع نانوذرات افت کردند. اصلاح سطحی در نانوکامپوزیت‌های اصلاح‌شده در میزان ۲ phr، نتیجهٔ چشم‌گیری داشته و باعث بهبود قابل توجه خواص حرارتی شده‌است. گروه‌های آمینوسیلان بر روی سطح نانورس با ایجاد برهم‌کنش قوی بین نانوپرکننده و زنجیرهٔ سیلیکونی موجب توزیع بهتر در بستر پلیمر و منجر به بالارفتن پایداری حرارتی سامانه می‌شود. با توجه به خواص و نتایج تعیین‌شدهٔ نمونه‌های نانوکامپوزیتی سیلیکون/کلوزیت خالص و اصلاح‌شده در نسبت ۲ phr به‌عنوان نمونه‌های بهینه تعیین‌شدند و خواص آن‌ها در زمینهٔ پخت و تراوایی بررسی‌شد؛ که در زمینهٔ پخت میزان چگالی عرضی‌سازی نانوکامپوزیت سیلیکون/کلوزیت اصلاح‌شده به‌ترتیب

۲۳ و ۸۰ درصد بیشتر از نانوکامپوزیت سیلیکون حاوی نانورس و لاستیک سیلیکون بوده‌است. مطابق آزمون تراوایی مشخص شد که اصلاح سطحی موجب کاهش ۳۲/۸ درصدی تراوایی شده‌است.

مراجع

- [1] Karami, M. H., & Kalaei, M. R. (2022). Investigation of curing kinetics modeling of epoxy nanocomposites in the presence of nano graphene oxide: A review study. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 21(124), 71-83, [In Persian].
- [2] Ehdizadeh, H., & Moradi, G. R. (2024). Investigation and optimization of effective parameters in the process of desalination of crude oil by electrostatic method. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(136), 22-34, [In Persian].
- [3] Abbasi, H., Hashemizadeh, A., & Navaie, F. (2023). Evaluation of the efficiency of polymers, polymeric nanoparticles, and surfactant additives in improving the rheology and loss control of drilling fluids: A review. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(129), 7-25, [In Persian].
- [4] Mousavi, S. A., & Khademzadeh Yeganeh, J. (2023). Effect of nanoclay and its hybrid with carbon black on physical and mechanical properties of styrene-butadiene rubber. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 22(126), 66-81, [In Persian].
- [5] Masoudi, M., & Salem, S. (2025). Simultaneous removal of chromium (VI) and methylene blue by nano titanium dioxide/graphene oxide/carbon nanotube photocatalyst and P25. *Iranian Chemical Engineering Journal*, 23(137), 75-87, [In Persian].
- [6] Mohammed, M., Rahman, R., Mohammed, A. M., Adam, T., Betar, B. O., Osman, A. F., & Dahham, O. S. (2022). Surface treatment to improve water repellence and compatibility of natural fiber with polymer matrix: Recent advancement. *Polymer Testing*, 115, 107707.
- [7] Karthik, A., Bhuvaneshwaran, M., Senthil Kumar, M. S., Palanisamy, S., Palaniappan, M., & Ayrilmis, N. (2024). A review on surface modification of plant fibers for enhancing properties of biocomposites. *ChemistrySelect*, 9(21), e202400650.
- [8] Kini, A. U., Shettar, M., Gowrishankar, M. C., & Sharma, S. (2023). A technical review on epoxy-nanoclay nanocomposites: Mechanical, hygrothermal and wear properties. *Cogent Engineering*, 10(2), Article 2257949.

- [9] Ahmad, S. M., & Shettar, M. (2024). Water-soaking effect and influence of nanoclay on mechanical properties of bamboo/glass fiber reinforced epoxy hybrid composites. *Cogent Engineering*, 11(1), Article 2338160.
- [10] Binti Mohd Hafidz, N. S., Bin Mohamed Rehan, M. S., & Binti Mokhtar, H. (2022). Effect of alkaline treatment on water absorption and thickness swelling of natural fibre reinforced unsaturated polyester composites. *Materials Today Proceedings*, 48, 720–727.
- [11] Melkamu, A., Kahsay, M. B., & Tesfay, A. G. (2019). Mechanical and water-absorption properties of sisal fiber (Agave sisalana)-reinforced polyester composite. *Journal of Natural Fibers*, 16(6), 877–885.
- [12] Gunti, R., Ratna Prasad, A. V., & Gupta, A. V. S. S. K. (2018). Mechanical and degradation properties of natural fiber-reinforced PLA composites: Jute, sisal, and elephant grass. *Polymer Composites*, 39(4), 1125–1136.
- [13] Chee, S. S., Jawaid, M., Sultan, M. T. H., Alothman, O. Y., & Abdullah, L. C. (2020). Effects of nanoclay on physical and dimensional stability of Bamboo/Kenaf/nanoclay reinforced epoxy hybrid nanocomposites. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 5871–5880.
- [14] Ramakrishnan, S., Krishnamurthy, K., Rajasekar, R., & Rajeshkumar, G. (2019). An experimental study on the effect of nano-clay addition on mechanical and water absorption behaviour of jute fibre reinforced epoxy composites. *Journal of Industrial Textiles*, 49(5), 597–620.
- [15] Ng, L. F., Yahya, M. Y., & Muthukumar, C. (2022). Mechanical characterization and water absorption behaviors of pineapple leaf/glass fiber-reinforced polypropylene hybrid composites. *Polymer Composites*, 43(1), 203–214.
- [16] Khorshidi, G. H., Zhang, C., & Najafi, E. (2023). Fresh, mechanical and microstructural properties of alkali-activated composites incorporating nanomaterials: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 384, Article 135390.
- [17] Shi, M., Zhu, H., Chen, C., Jiang, J., Zhao, L., Yan, C. (2023). Synergistically coupling of graphene quantum dots with Zn-intercalated MnO₂ cathode for high-performance aqueous Zn-ion batteries. *International Journal of Mineral Metallurgy and Materials*, 30, 25–32.
- [18] Shaheen, S., Saeed, Z., Ahmad, A., Pervaiz, M., Younas, U., Mahmood Khan, R. R., Luque, R., & Rajendran, S. (2023). Green synthesis of graphene-based metal nanocomposite for electro and photocatalytic activity; recent advancement and future prospective. *Chemosphere*, 311, Article 136982.
- [19] Dallaev, R., Pisarenko, T., Papež, N., Sadovský, P., & Holcman, V. (2023). A brief overview on epoxies in electronics: Properties, applications, and modifications. *Polymers (Basel)*, 15(19).
- [20] Kangishwar, S., Radhika, N., Sheik, A. A., Chavali, A., & Hariharan, S. (2023). A comprehensive review on polymer matrix composites: Material selection, fabrication, and application. *Polymer Bulletin*, 80, 47–87.
- [21] Kaushik, Y., Sooriyaperakasam, N., Rathee, U., & Naik, N. (2023). A mini review of natural cellulosic fibers: Extraction, treatment and characterization methods. *Journal of Computational Mechanics and Management*, 2, 23057.
- [22] Galukhin, A., Nosov, R., Taimova, G., Nikolaev, I., Islamov, D., & Vyazovkin, S. (2021). Polymerization kinetics of adamantane-based dicyanate ester and thermal properties of resulting polymer. *Reactive and Functional Polymers*, 165, 104956.
- [23] Hosseini, S. M., Abdouss, M., Mazinani, S., Soltanabadi, A., & Kalace, M. R. (2022). Modified nanofiber containing chitosan and graphene oxide-magnetite nanoparticles as effective materials for smart wound dressing. *Composites Part B: Engineering*, 231, 109557.
- [24] Xu, J., Jia, L., Lan, Q., & Wu, D. (2024). Enhanced thermal and mechanical properties of cardanol epoxy/clay-based nanocomposite through Girard's reagent. *Polymers*, 16(11), 1528.
- [25] Muralishwara, K., Sudhakar, Y. N., Kini, U. A., et al. (2022). Moisture absorption and spectroscopic studies of epoxy clay nanocomposite. *Polymer Bulletin*, 79, 5587–5611.
- [26] Su, L., Fang, C., & Luo, H. (2024). Functionalized montmorillonite/epoxy resin nanocomposites with enhanced thermal and mechanical properties. *RSC Advances*, 14, 31251.
- [27] Merzah, Z. F., Fakhry, S., Allami, T. G., Yuhana, N. Y., & Alamiery, A. (2022). Enhancement of the properties of hybridizing epoxy and nanoclay for mechanical, industrial, and biomedical applications. *Polymers*, 14(3), 526.
- [28] Naik, N., Bhat, R., Shivamurthy, B., Thimmappa, B. H. S., Shetty, N., & Kaushik, Y. (2023). Biodegradability of Musa acuminata (banana)-fiber-reinforced bio-based epoxy composites: The influence of montmorillonite clay. *Engineering Proceedings*, 59, 6.
- [29] Ramakrishnan, S., Krishnamurthy, K., Rajeshkumar, G., et al. (2021). Dynamic mechanical properties and free vibration characteristics of surface modified jute fiber/nano-clay reinforced epoxy composites. *Journal of Polymers and the Environment*, 29, 1076–1088.
- [30] Surendran, A., Geethamma, V. G., Kalarikkal, N., & Thomas, S. (2019). Mechanical and thermal

- properties of epoxy/poly(styrene-co-acrylonitrile) (SAN)/organoclay nanocomposites. *Macromolecular Symposia*, 398(1), 1.
- [31] Drakopoulos, S. X., Loukelis, K., Triantafyllou-Rundell, M. E., et al. (2024). Epoxy/clay nanodielectrics: From relaxation dynamics to capacitive energy storage. *Advanced Composite Materials and Hybrid Structures*, 7, 118.
- [32] Mohammadkhah, S., Sarabi, A. A., Eivaz Mohammadloo, H., & Ghamsarizade, R. (2023). Improvement of active/passive anti-corrosion/weathering properties of epoxy-siloxane structure via Cloisite 30B/polyaniline inclusion as new hybrid nanocomposite coatings. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 666, 131297.
- [33] Sharif, M., & Tavakoli, S. (2023). Biodegradable chitosan-graphene oxide as an effective green filler for improving properties in epoxy nanocomposites. *International Journal of Biological Macromolecules*, 233, 123550.
- [34] George, J. S., Vijayan, P. P., Ponçot, M., Paduvilan, J. K., & Thomas, S. (2024). Viscoelastic and rheokinetic behaviour of cellulose nanofiber/Cloisite 30B hybrid nanofiller reinforced epoxy nanocomposites. *Chemical Engineering Journal*, 498, 155170.
- [35] Karami, M. H., Kalae, M. R., Mazinani, S., Martínez, V. G., Wellen, R. M. R., Shanmugaraj, A. M., & Kim, K. (2020). Isoconversional model approach and cure kinetics of epoxy/NBR nanocomposites. *Proceedings of the 14th International Seminar on Polymer Science and Technology (ISPST 2020)*, 9-10.
- [36] Karami, M. H., & Kalae, M. R. (2021). A review of the applications of cross-linked elastomeric nanoparticles. *Iranian Rubber Magazine*, 25, 37-56.
- [37] Ganvir, V. Y., & Ganvir, H. V. (2025). Moisture absorption behavior of epoxy-kenaf composites enhanced with surface-modified nano-clay. *Interactions*, 246, 3.
- [38] Al-kawaz, A. E., Al-Mutairi, N. H., & Alobad, Z. K. M. (2024). Tribological behavior of epoxy/nano-clay nanocomposites used as a floor coating. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 38(23), 4299-4315.
- [39] Shahrajabian, H., & Vaezzadeh, H. (2024). The nano-clay effect on the improvement of the thermal, flammability, and mechanical behavior of epoxy/glass fiber/ATH hybrid composites. *Journal of Composite Materials*, 58(23), 2545-2554.
- [40] Zaccone, M., Kociolek, I., Frache, A., Bellini, C., Di Cocco, V., & Monti, M. (2023). Abrasion resistance of a carbon fiber reinforced composite based on a nanoclay epoxy nanocomposite matrix. *Polymer Composite*, 45(4), 2919-2926.