نشریه مهندسی مکانیک
نشریه علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران
ISME

دوره ۳۱، شماره ۶، شماره پیاپی ۱۴۷، بهمن و اسفند ۱۴۰۱، صفحه ۷۰-۶۴
ISSN: 1605-9719

DOI: 10.30506/MMEP.2023.559834.2038
DOR: 20.1001.1.16059719.1401.31.6.6.3

بررسی مکانیزم های بهبود خواص مکانیکی با افزودن نانو ذرات به کامپوزیت ها

مهدی ثابت‌قدم
کارشناسی ارشد

روح‌اله حسینی*
استادیار
گروه مهندسی مکانیک
دانشکده فنی و مهندسی
دانشگاه جامع امام حسین(ع)
تهران

چکیده: نانوذره یا ذره بی نهایت ریز معمولاً به عنوان ذره ای از ماده تعریف می شود که قطری بین ۱ تا ۱۰۰ نانومتر (nm) دارد. خواص نانوذرات اغلب به طور قابل توجهی با ذرات بزرگتر ماده متفاوت است. نانوذرات مکانیک نابجایی متفاوتی را نشان می دهد که همراه با ساختار سطحی منحصر به فردشان، منجر به خواص مکانیکی متفاوت از مواد توده ای می گردد. امروزه با افزودن نانوذرات خواص مکانیکی کامپوزیت ها را بهبود می بخشند. نانوذرات به دلیل ریز بودن باعث افزایش سطح میان ماده زمینه و تقویت کننده شده و لذا باعث بهبود خواص مکانیکی خواهند شد. نوع نانوذره مورد استفاده، ابعاد، درصد وزنی و نحوه توزیع نانوذره از عوامل تعیین کننده در بهبود خواص مکانیکی می باشند. در مطالعه حاضر ضمن ارائه مفاهیم مربوط به نانوکامپوزیت، تاثیر پنج نانوذره مختلف بر خواص مکانیکی رایج مد نظر طراحان سازه بررسی می شود. نتایج نشان می دهند افزودن نانوذرات تا درصد وزنی مشخصی باعث بهبود خواص شده و بیش از آن مقدار گاهاً اثر عکس خواهد داشت که یکی از دلایل آن کلوخه شدن نانوذرات می باشد.

واژه‌های راهنما: کامپوزیت، نانوکامپوزیت، خواص مکانیکی، نانوذرات، نانورس، نانولوله

مقاله مروری
دریافت: ۱۴۰۱/۰۷/۲۲
پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۲۸

Investigating the mechanisms of improving mechanical properties by adding nanoparticles to composites

Mahdi Sabet Ghadam
M.Sc.

Rouhollah Hosseini*
Assistant Professor,
Departement of Mechanical Engineering,
Imam Hossein Comprehensive University,
Tehran

Abstract: A nanoparticle or an infinitesimal particle is usually defined as a particle of matter that has a diameter between 1 and 100 nanometers (nm). The properties of nanoparticles often differ significantly from larger particles of matter. Nanoparticles show different dislocation mechanics, which together with their unique surface structure, lead to different mechanical properties from bulk materials. Nowadays, by adding nanoparticles, the mechanical properties of composites are improved. Due to their small size, nanoparticles increase the surface area between the base material and the reinforcement and therefore improve the mechanical properties. The type of nanoparticle used, dimensions, weight percentage and the way of nanoparticle distribution are determining factors in improving mechanical properties. In the present study, while presenting the concepts related to nanocomposite, the effect of five different nanoparticles on the common mechanical properties considered by structural designers is investigated. The results show that the addition of nanoparticles up to a certain weight percentage improves the properties, and more than that amount sometimes has the opposite effect, one of the reasons for which is the clumping of nanoparticles.

Keywords: Composite, Nanocomposite, Mechanical properties, Nanoparticles, Nanoclay, nanotube

* نویسنده مسئول، kprhosseini@ihu.ac.ir

۱- مقدمه

آشنایی با مواد دارای قابلیت‌های بالاتر نظیر موادی با نسبت استحکام به وزن بالاتر همواره مطلوب بشر بوده است. بدین ترتیب بشر به استفاده از کامپوزیت‌ها روی آورد. از نخستین کامپوزیت‌ها می‌توان به کاه‌گل اشاره نمود. کامپوزیت‌ها را می‌توان به نحوی طراحی نمود که در راستاهای خاصی استحکام بسیار بالایی داشته باشند، لذا این خاصیت است که منجر به کاربرد گسترده کامپوزیت‌ها در صنعت هواپیماها و خودروهای مدرن شده است. از مزایای کامپوزیت‌ها می‌توان به این موارد اشاره نمود:

نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت در برابر خوردگی، مقاومت به ضربه بالا، انعطاف‌پذیری در طراحی، نارسانایی، خواص غیرمغناطیسی، هدایت گرمایی پایین و دوام بالا [۱].

در کامپوزیت‌ها به منظور دستیابی به خواص بهتر، ترکیب اجزای تشکیل دهنده در مقیاس اتمی انجام نمی‌گیرد [۲]. با توسعه‌ی علم نانو و ورود آن به حوزه‌های مختلفی از جمله کامپوزیت و دسترسی به خواصی منحصر به فرد، انقلابی در این حوزه پدید آمد [۳].

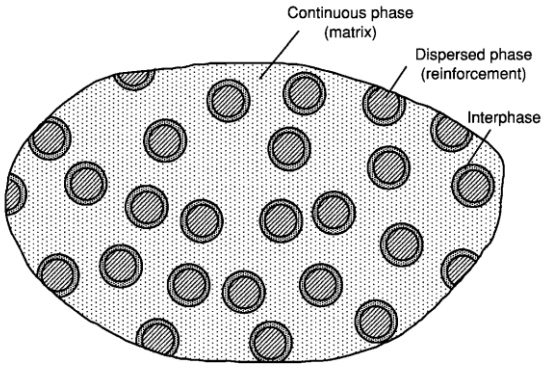
با توجه به کاربرد گسترده کامپوزیت‌ها در صنایعی هم‌چون هوافضا، خودروسازی و دریایی؛ بهبود کیفیت و افزایش طول عمر کامپوزیت‌ها به کاهش هزینه‌ها و افزایش راندمان قطعات کمک شایانی کرده است. یکی از راه‌های تحقق این امر استفاده از نانوذرات در کامپوزیت‌ها می‌باشد. امروزه تحقیقات زیادی راجع به این مبحث انجام شده است.

در این پژوهش، مفاهیم اصلی کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها بیان شده و اثر چند نانوذره نسبتاً پرکاربرد در بهبود خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها و مکانیزم بهبود آن‌ها، مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- کامپوزیت

کامپوزیت ماده‌ای چند جزئی است که خواص آن از خواص تک‌تک اجزای تشکیل‌دهنده بهتر می‌باشد و این ترکیب در مقیاس اتمی قرار نداشته و به صورت ماکروسکوپی بررسی می‌شود. یک فاز کامپوزیت محکم‌تر ، سفت‌تر و ناپیوسته است که بخش تقویت کننده[1] نام دارد و بخش دیگر که نسبتاً ضعیف‌تر بوده و به صورت پیوسته است زمینه[2] نام دارد. البته گاهی اوقات به دلیل وجود برهم‌کنش‌های شیمیایی، بخش دیگری به نام بین فاز[3]میان تقویت‌کننده و زمینه وجود دارد. شکل (۱) نمایانگر یک کامپوزیت می‌باشد.

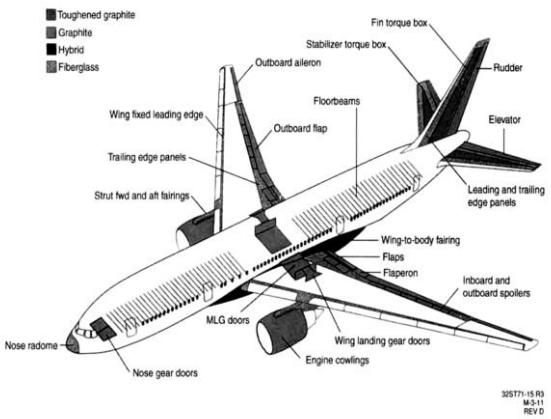
از عوامل مهم در خواص کامپوزیت، خاصیت هر کدام از مواد تشکیل دهنده، هندسه آن‌ها و نحوه توزیع فازهاست. توزیع فاز تقویت کننده، همگنی و یکنواخت بودن را تعیین خواهد کرد. همچنین جهت‌گیری و هندسه تقویت‌کننده در ناهمسانگری[4] موثر است [۴].



شکل ۱ اجزای مختلف کامپوزیت[۴]

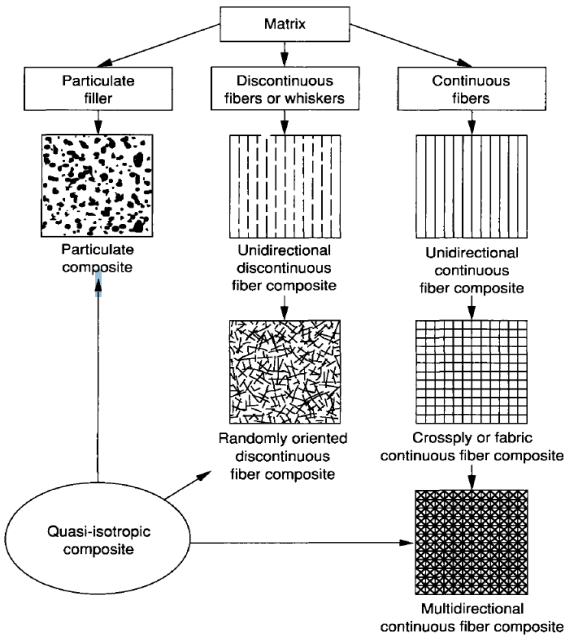
کامپوزیت در زمینه‌های زیادی از جمله هوافضا، هواپیما، خودرو، دریا، انرژی و زیست پزشکی کاربرد دارد. در شکل (۲) بخشی از کاربرد های کامپوزیت در مورد هواپیما نشان داده شده است[۴].

کامپوزیت‌ها را می‌توان به دو شکل دسته‌بندی نمود؛ بر اساس ویژگی‌های تقویت‌کننده و بر اساس ماده تشکیل‌دهنده زمینه. شکل (۳) نمایانگر این دسته‌بندی می‌باشد.



شکل ۲ کاربرد کامپوزیت در هواپیما [۴]

[1] Rainforcement
[2] Matrix
[3] Interphase
[4] Anisotropy



شکل ۳ دسته‌بندی کامپوزیت‌ها بر اساس ماده تقویت‌کننده [۴]

۲-۱- براساس تقویت کننده

۱-۲-۱- کامپوزیت‌های ذره‌ای[1] که در آن ذرات با اندازه و اشکال مختلف به صورت تصادفی در ماده زمینه توزیع شده‌اند. این کامپوزیت‌ها می‌توانند به صورت‌های زیر باشد:

- زمینه غیرفلز-تقویت‌کننده غیرفلز؛ مانند: پلیمرهای ترد تقویت‌شده با ذرات لاستیک، نانوکامپوزیت‌های پلیمر/رس.
- زمینه غیر فلز-تقویت‌کننده فلز؛ لاستیک پلی‌یورتان تقویت شده با ذرات آلومینیوم.
- زمینه فلز-تقویت‌کننده فلز؛ ذرات سرب در آلیاژ مس جهت بهبود ماشین‌کاری.
- زمینه فلز- تقویت‌کننده غیرفلز؛ آلومینیوم تقویت شده با ذرات سیلیکون کاربید.

۱-۲-۲- کامپوزیت‌های با الیاف کوتاه یا ناپیوسته؛ که از فیبرهای کوتاه، نانو لوله‌ها یا ویسکر[2] به عنوان تقویت‌کننده استفاده می‌کنند. این الیاف می‌توانند دارای جهت‌گیری یکسان و یا متفاوت باشند. از نمونه‌های این دسته نانو کامپوزیت‌های تقویت شده با نانو لوله (دارای طول ۱۰۰۰ نانومتر و قطر ۱ نانومتر) را می‌توان نام برد.

۱-۲-۳- کامپوزیت‌های با الیاف تقویت کننده پیوسته؛ که دارای تقویت کننده‌هایی با طول بلند هستند و از نظر سختی و استحکام مقاوم‌تر می‌باشند. این تقویت‌کننده‌ها می‌توانند به صورت موازی بوده و یا جهت‌گیری‌های متفاوت داشته باشند.

۲-۲- بر اساس ماده زمینه

این کامپوزیت‌ها به دسته‌های زمینه پلیمری، زمینه فلزی و زمینه سرامیکی و زمینه کربنی تقسیم می‌شوند. جدول (۱) انواع مواد رایج مربوط به هر دسته‌بندی را نشان می‌دهد.

جدول ۱ انواع مواد کاربردی بر اساس دسته بندی ماده زمینه [۴]

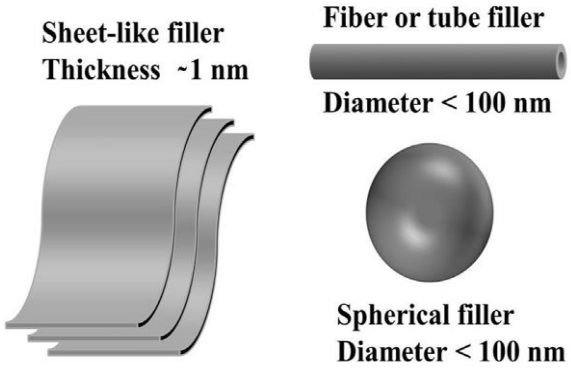
نام ماده	ماده تقویت‌کننده	ماده زمینه
پلیمر	E-glass	اپوکسی
	S-glass	فنولیک
	کربن (گرافیت)	پلی آمید
	آرامید (کولار)	Bismaleimide
فلز	بورن	آلومینیم
	کربن	تیتانیوم
	سیلیکون کاربید	مس
سرامیک	سیلیکون کاربید	سیلیکون کاربید
	سیلیکون نیترات	سرامیک-شیشه
کربن	کربن	کربن

۳- نانوکامپوزیت

کامپوزیتی که دارای تقویت‌کننده‌ای با اندازه نانو (بین یک تا صد نانومتر) باشد را نانوکامپوزیت گویند. بخش‌های مختلف یک نانوکامپوزیت عبارتند از پایه نانو (فاز اول) و پرکننده (فاز دوم) که درصد وزنی فاز دوم نسبت به فاز اول بیشتر می‌باشد. افزودن فاز دوم به فاز اول به جهت بهبود خواصی از قبیل استحکام و مقاومت حرارتی می‌باشد[۵]. همان‌طور که قبلا اشاره شد هدف استفاده از کامپوزیت دستیابی به مواد با خواص مطلوب‌تر است. چنانچه از نانوکامپوزیت استفاده شود به دلیل ریز بودن پرکننده‌ها، سطح تماس بیشتری بین ماده زمینه و تقویت‌کننده وجودخواهدداشت که باعث بهبود خواص مکانیکی می‌گردد. بر اساس ماده زمینه، نانوکامپوزیت‌ها را می‌توان به چهار دسته تقسیم نمود: نانوکامپوزیت زمینه پلیمری، نانوکامپوزیت زمینه فلزی، نانوکامپوزیت زمینه کربنی و نانوکامپوزیت زمینه سرامیکی[۶]. نانوذرات تقویت‌کننده معمولا به شکل‌های ذرات، الیاف و صفحات می‌باشندکه در شکل (۴) نشان داده شده است [۸].

[1] Particulate composites

[2] Whisker



شکل ۴ انواع پرکننده[۸]

۳-۱- نانوکامپوزیت‌های زمینه سرامیکی

سرامیک‌ها ترد بوده و به راحتی می‌شکنند که علت آن انتشار ترک می‌باشد. البته جهت ایجاد سرامیک مناسب کاربردهای مهندسی کارهایی صورت گرفته که از طریق ترکیب فاز چکش‌خوار یا سرامیک دیگر به ماده زمینه می‌باشد . این امر منجر به بهبود خواص مکانیکی مانند سختی و چقرمگی شکست می‌شود [۹].

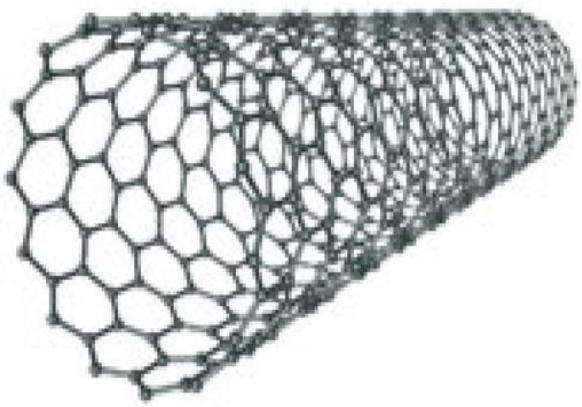
۳-۲- نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی

نانوکامپوزیت‌های ماتریس فلزی، کامپوزیت‌هایی با زمینه متشکل از یک فلز یا آلیاژ هستند که تقویت‌کننده آن در اندازه نانو باشند. این مواد ویژگی‌های فلز و سرامیک، یعنی شکل‌پذیری و چقرمگی را با استحکام و مدول بالا ترکیب می‌کنند. بنابراین نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی برای تولید مواد با استحکام بالا مناسب می‌باشند [۹].

۳-۳- نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری

تقویت‌کننده‌های مورد استفاده در این نانوکامپوزیت‌ها براساس ابعاد دسته‌بندی می‌شوند [۱۰]. به عنوان مثال، هنگامی که بحث سه‌بعدی مطرح است، به آن‌ها نانوذرات ایزودایمنشن گفته می‌شود و هر سه بعد آن‌ها در مقیاس نانو بررسی می‌شوند، مانند ذرات کروی سیلیکا-فلز [۱۱]. نوع دوم تقویت‌کننده‌ها که در دو بعد مورد بحث بوده و اجزای طویلی را شکل می‌دهند نانولوله‌ها می‌باشند که دو بعد آن‌ها در مقیاس نانو می‌باشد. شکل (۵) یک نمونه نانو لوله را نشان می‌دهد.

نوع سوم عبارت است از تقویت‌کننده‌هایی که به صورت یک بعدی بررسی می‌شوند [۱۲-۱۴]، بدین صورت که صفحاتی با ضخامت یک یا چند نانومتر و طولی به اندازه صدها تا هزاران نانومتر است [۱۰, ۱۵, ۱۶].



شکل ۵ نانو لوله[۷]

۳-۴- اثر نانو ذرات بر خواص نانوکامپوزیت

بهبود خواص مکانیکی پلیمرها باعث افزایش طول عمر، کیفیت و در مواردی هم موجب ایجاد قابلیت‌های جدیدی می‌شود. برای نخستین بار گروه تحقیقاتی تویوتا با استفاده از نانوذرات رس خواص نایلون-۶ را بهبود بخشیدند [۱۷, ۱۸].

تاکنون کارهای تحقیقاتی زیادی پیرامون بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها صورت پذیرفته است. در ادامه تاثیر چند نانوذره بر خواص نانوکامپوزیت‌ها بیان می‌گردد.

- نانو صفحات گرافن

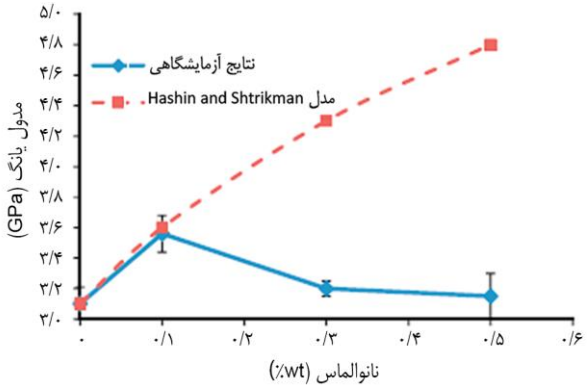
با توزیع نانوصفحات گرافن در شبکه پلی‌پروپیلن خواص پایداری حرارتی و بلورینگی افزایش یافته و خاصیت الکتریکی نانوکامپوزیت نیز بهبود پیدا کرد [۱۹]. نانوصفحات گرافیتی ورقه شده از طریق اختلاط مذاب در شبکه پلی‌پروپیلن توزیع شده و نتایج بدین شکل شد که طی افزودن تا ٪۵ نانوصفحات گرافیتی، استحکام خمشی، استحکام ضربه و مدول یانگ بهبود داشته و در مقادیر بیش از ٪۵ به دلیل کلوخه شدن، خواص مذکور کاهش یافته و روند معکوس شد [۲۰]. طی اختلاط توده‌ای نانوصفحات گرافیتی ورقه‌ای شده تا ٪۲,۵ در شبکه پلی‌پروپیلن، استحکام تسلیم ٪۶۰ و مدول یانگ ٪۱۰۰ بهبود پیداکرد [۲۱]. نتایج توزیع یکنواخت اکسیدگرافن در پلی‌پروپیلن به روش اختلاط محلولی نشان می‌دهد که افزودن ٪۰/۱، ٪۰/۳ و ٪۰/۵ باعث افزایش ٪۴/۲۵، ٪۱۳/۲۵ و ٪۴۷ در استحکام تسلیم می‌گردد[۲۲].

- نانوالماس

نانوالماس تولید شده با فرایند انفجاری دارای خواص مکانیکی و رسانندگی بالایی هستند و در زیست پزشکی، سامانه‌های تحویل دارو، الکتروشیمی، روانکاری و هم‌چنین نانوکامپوزیت پرکاربرد است که قیمت پایینی نیز دارد و اولین بار در سال ۱۹۶۰ به روش انفجاری تولید شد [۲۳, ۲۴]. برخی از مزایای نانوذرات الماس عبارتند از:

- سطح زیادی دارد که بیش‌ترین تماس را با ماده زمینه ممکن می‌سازد.
- سطح غنی شیمیایی که جهت طراحی سطح، انعطاف پذیری زیادی را ایجاد می‌نماید.
- مدول یانگ و سختی زیاد، رسانندگی گرمایی بالا، ضریب اصطکاک کم و پایداری شیمیایی [۲۵].

در کامپوزیت اپوکسی-نانوالماس با درصد حجمی نانوالماس تا ٪۳۵ مدول یانگ و سختی این کامپوزیت به ترتیب ٪۳۰۰ و ٪۷۰۰ افزایش یافته است [۲۳]. مدول یانگ بعد از افزودن نانوالماس با درصد وزنی بیش از ٪۰/۱ نانوالماس به نانوکامپوزیت اپوکسی-نانوالماس دچار افت می‌شود که این مطلب در شکل (۶) نیز بیان شده است. این کاهش، ناشی از کلوخه شدن ذرات نانوالماس و در نتیجه جلوگیری از انتقال تنش به تقویت‌کننده می‌باشد [۲۶].



شکل۶ تغییرات مدول یانگ در درصدهای وزنی نانوالماس [۲۶]

در اثر افزودن نانوذرات الماس اصلاح شده با درصد وزنی ٪ ۰/۳ در پلی‌استر غیراشباع، مدول یانگ نسبت به پلیمر خالص ٪۵۵ افزایش داشته است [۲۷].

- نانوذرات کربنات کلسیم

از مزایای این نانو ذره می‌توان به ارزان بودن، دردسترس بودن، سبکی، سهولت در تولید و قابلیت تحمل بار بالا اشاره کرد. با افزودن ٪۴ وزنی نانو ذره اصلاح شده به نانوکامپوزیت کلسیم-اپوکسی استحکام فشاری و مدول الاستیک به ترتیب ٪۱۳/۵ و ٪ ۶/۱ بهبود می‌یابند [۲۸].

نانوذرات کلسیم کربنات تا ٪۳ وزنی در کامپوزیت اپوکسی-الیاف بازالت، استحکام خمشی، مدول خمشی، استحکم کششی و مدول کششی را به ترتیب تا ٪۲۸، ٪۳۵، ٪۲۰ و ٪۳۰ افزایش می‌دهند که این امر از افزایش توانایی انتقال بار میان ماده زمینه و تقویت‌کننده و همچنین بهبود خواص مکانیکی ماده زمینه ناشی می‌گردد [۲۹].

استحکام ضربه کامپوزیت اپوکسی تقویت‌شده با نانوذرات کلسیم‌کربنات در طی افزایش نانوذرات تا کمتر از ۶ درصد وزنی بهبود می‌یابد، ولی بیش از ٪۶ وزنی نانوذرات، استحکام ضربه کاهش خواهد یافت. این نتیجه نشان‌دهنده این است که میزان زیاد نانوذرات باعث آگلومره‌شدن ذرات در ماده زمینه و در نتیجه کاهش چقرمگی کامپوزیت می‌شود [۳۰]. اضافه کردن ۳ درصد وزنی نانوذرات کربنات کلسیم اصلاح شده سبب می‌گردد تا استحکام برشی بین لایه‌ای، استحکام خمشی و مدول خمشی به ترتیب ٪۲۵، ٪۳۶ و ٪۲۷ بهبود یابد [۳۱].

- نانو ذرات خاک رس

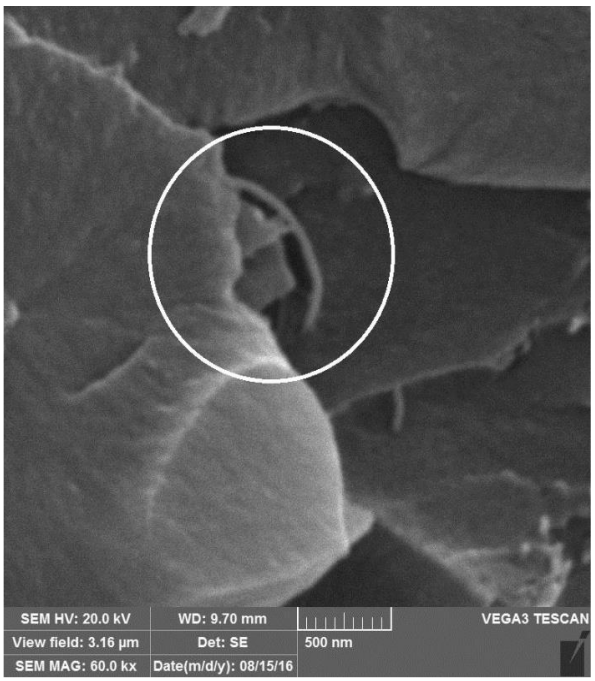
افزودن نانوذرات خاک رس به نانوکامپوزیت ترموپلاستیک الاستومر موجب افزایش سختی شده که بیشینه آن در ۵ درصد وزنی نانوذره خاک رس رخ می‌دهد [۳۲]. نانوذرات رس در ماده زمینه پلیمری باعث بهبود مدول کششی، مقاومت کششی و سختی می‌شود که این امر از ساختار لایه‌ای این پرکننده و در نتیجه پراکنش بهتر ذرات در ماده زمینه ناشی می‌گردد [۳۳]. وجود نانوذرات رس در کامپوزیت سبوس برنج-پلاستیک، مقاومت کششی و مدول کششی را تا ٪۵ افزایش خواهد داد، چرا که چسبندگی بین سطوح نانوذرات رس و ماده زمینه افزایش یافته است. از طرفی افزایش مقدار نانوذرات به ٪۷ باعث کاهش مدول کششی و مقاومت کششی می‌شود که این امر به علت تجمع و تراکم نانوذرات و تشکیل توده‌های درهم‌رفته می‌باشد [۳۴].

وجود نانوذرات خاک رس با درصد وزنی ٪۳ در نانوکامپوزیت لاستیک نیتریل-خاک رس مدول کششی و مقاومت کششی را به ترتیب ٪۳۰۲ و ٪۲۱۹ بهبود می‌بخشد [۳۵]. طی افزودن ٪۱ نانوذره رس به نانوکامپوزیت چوب پلاستیک، مقاومت خمشی ٪۲۰ ، مقاومت کششی ٪۲۴ و مدول کششی ٪۱۳ افزایش یافت[۳۶]. استحکام خمشی، کششی، سختی و ضربه نانوکامپوزیت مونتموریلونیت-پلی‌پروپیلن با افزودن ٪۲ خاک رس افزایش خواهد یافت و مقدار بیش‌تر نانو رس این خاصیت‌ها

را کاهش می‌دهد که علت آن را می‌توان بدین صورت بیان کرد که با افزایش نانورس، تراکم رس‌ها، خاصیت‌های مکانیکی را کاهش می‌دهد [۳۷]. عوامل ساختاری مانند نسبت حجمی، ضریب ظاهری نانورس و فاصله میان ذرات و میزان درهم‌رفتگی ذرات نانورس بر خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌های پلیمر خاک رس تاثیر دارد. دیگر آنکه درصد رس هم بسیار موثر است [۳۸]. البته با افزایش درصد رس، در ساختمان‌های جدید درهم‌رفتگی و نهایتاً توده‌های رس ایجاد خواهد شد و پس از عبور از مقدار مشخصی روند افزایش خواص کم و یا معکوس می‌گردد. افزایش مدول در کامپوزیت را می‌توان به قابلیت رس در برقراری اتصال قوی با ماده زمینه پلیمر نسبت داد [۳۷].

- نانولوله‌های کربنی

نانو لوله‌های کربنی بین نانو ذرات مختلف مورد استفاده در نانوکامپوزیت‌های پلیمری، بیش‌تر مطرح بوده‌اند؛ علت آن‌را می‌توان مدول یانگ و استحکام کششی بالا، طبیعی بودن، وزن پایین و پایداری بالا عنوان کرد [۳۹]. افزودن ٪۱ نانولوله به پلی‌اتیلن باعث افزایش مقاومت برشی به اندازه ۱۰ برابر می‌شود [۴۰]. با اضافه‌کردن نانولوله‌های کربنی با درصد وزنی ٪۱ به رزین وینیل‌استر، مدول یانگ ٪۵۳/۱۶ افزایش می‌یابد. دیگر آن‌که با افزایش درصد وزنی نانولوله‌های کربنی چند دیواره، چقرمگی شکست و استحکام کششی کاهش خواهد یافت که علت آن‌را می‌توان توزیع نامناسب‌تر نانولوله‌ها در پی افزایش درصد نانولوله دانست که نهایتاً باعث ایجاد مناطق دارای تمرکز تنش بالا می‌شود. از همین مناطق ترک شروع شده و موجب شکست زود هنگام قطعات می‌گردد[۴۱]. افزایش phr ۰/۵ نانولوله کربنی باعث می‌شود مدول کششی، مدول خمشی و مقاومت خمشی به ترتیب ٪۲۵، ٪۱۰ و ٪۷ بهبود یابد [۳۹]. طی افزودن ۰/۱ درصد وزنی نانولوله کربنی به رزین اپوکسی، استحکام کششی ۱۸/۸۳ درصد افزایش می‌یابد. البته افزایش بیش از حد درصد نانولوله‌ها (۰/۷۵ درصد وزنی) باعث کلوخه‌شدن نانولوله‌ها شده که منجر به کاهش استحکام نهایی نانوکامپوزیت خواهد شد. دیگر آنکه با افزودن نانولوله‌های کربنی به رزین وینیل‌استر چقرمگی افزایش می‌یابد. علت آن را می‌توان به عواملی مانند پل‌زدن نسبت داد. مکانیزم پل زدن موجب قرارگیری نانولوله در مسیر پیشرفت ترک شده و به بسته ماندن ترک کمک خواهد کرد. در شکل (۷) مکانیزم پل زدن نشان داده شده‌است [۴۲].



شکل ۷ مکانیزم پل زدن نانولوله‌های کربنی[۴۲]

۴- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مکانیزم بهبود خواص مکانیکی نانوکامپوزیت‌ها از طریق افزودن نانوذرات مورد بررسی قرار گرفت. بدین صورت که اثر چند نانوذره پرکاربرد نانوگرافن، نانو الماس، نانو رس، نانو لوله‌های کربنی و نانوذرات کلسیم کربنات بر خواصی همچون استحکام کششی، مدول کششی، مدول خمشی و چقرمگی بیان گردید. به طور کلی می‌توان نتیجه گرفت که خواص مکانیکی کامپوزیت‌ها با افزودن نانوذرات بهبود می‌یابند. البته درصد نانوذره حد مشخصی داشته و بیش از آن باعث کند شدن و در برخی موارد اثر معکوس بر روند بهبود خواص مکانیکی می‌گردد. توزیع نانوذرات در ماده زمینه بسیار حائز اهمیت می‌باشد، به طوری که در صورت زیاد بودن درصد نانو ذره و یا توزیع نامناسب آن، امکان کلوخه شدن و عدم انتقال صحیح تنش به تقویت‌کننده وجود داشته که خود باعث کاهش خواصی مانند مدول یانگ می‌گردد.

۵- مراجع

[1] Ahmad, J., Machining of Polymer Composites, *Springer US*, pp. XII, Vol. 315, (2009).

[2] Soltani, M., Sotoudeh, A., and Sokhandani, N., Explaining the factors affecting the construction of composites by vacuum injection method, *Scientific*

Journal of Mechanical Engineers, Vol. 26, No. 1, pp. 79-87, (2017). (in Persian فارسی)

[3] Fischer, H., Polymer nanocomposites: from fundamental research to specific applications, *Materials Science and Engineering*, Vol. 23, No. 6, pp. 763-772, (2003).

[4] Daniel, I.M., and Ishai, O., Engineering Mechanics of Composite Materials, 2nd Edition, *Oxford University Press*, New York, (2006).

[5] Ghamati, M., and Sadeghian, M.S.S., Nano Composite, *The third national conference of new technologies of chemistry and chemical engineering*, (2014). (in Persian فارسی)

[6] Guo, Z., Chen, Y., and Lu, N.L., Multifunctional Nanocomposites for Energy and Environmental Applications, *John Wiley & Sons*, Vol. 1, (2018).

[7] Bikiaris, D., Microstructure and properties of polypropylene/carbon nanotube nanocomposites, *Materials*, pp. 2884-2946, (2010).

[8] Fu, Sh., Sun, Z., Huang, P., Li, Y., and Hu, N., Some basic aspects of polymer nanocomposites: A critical review, *Nano Materials Science*, Vol. 1, pp. 2-30, (2019).

[9] Camargo, P.H.C., Satyanarayana, K.G., and Wypych, F., Nanocomposites: synthesis, structure, properties and new application opportunities, *Materials Research*, Vol. 12, pp. 1-39, (2009).

[10] Alexandre, M., and Dubois, P., Polymer-layered silicate nanocomposites: preparation, properties and uses of a new class of materials, *Materials Science and Engineering: C*, Vol. 28, pp. 1-63, (2000).

[11] Herron, N., and Thorn, D.L., Nanoparticles: uses and relationships to molecular cluster compounds, *Advanced Materials*, pp. 1173-1184, (1998).

[12] Favier, V., Cavaille, J.Y., Canova, G.R., and Shrivastava, S.C., Mechanical percolation in cellulose whisker nanocomposites, *Polymer Engineering Science*, pp. 1732-1739, (1997).

[13] Chazeau, L., Cavaillé, J.Y., Canova, G., Dendievel, R., and Boutherin, B., Viscoelastic properties of plasticized PVC reinforced with cellulose whiskers, *Journal of Applied Polymer Science*, pp. 1797-1808, (1999).

[14] Ogawa, M., and Kazuyuki, K., Preparation of inorganic–organic nanocomposites through intercalation of organoammonium ions into layered silicates, *Bulletinn of the Chemical Society of Japan*, pp. 2593-2618, (1997).

[15] Schmidt, D., Shah, D., and Giannelis, E., New advances in polymer/layered silicate nanocomposites, *Current Opinion in Solid State & Materials Science*, pp. 205-212, (2002).

[16] Ray, S.S., and Okamoto, M., Polymer - layered silicate nanocomposites: a review from preparation to processing, *Progress in Polymer Science*, pp. 1539-1641, (2003).

[17] Shokrieh, M., Zeinedini, A., and Ghoreishi S.M., Effects of adding multiwall carbon nanotubes on mechanical properties of Epoxy resin and Glass/Epoxy laminated composite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 9, pp. 125-133, (2015).

[18] Shameli, M., Choupani, N., and Razavi, M.K., Measurement of mixed-mode fracture toughness of polypropylene using multispecimen J-integral method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, pp. 333-334, (2016). (in Persian فارسی)

[19] Yang, F., Jin, C., Yang, D., Jiang, Y., Li, J., Di, Y., Hu, J., Wang, C., Ni, Q., and Fu, D., Magnetic functionalised carbon nanotubes as drug vehicles for cancer lymph node metastasis treatment, *European Journal of Cancer*, Vol. 47, pp. 1873-1882, (2011).

[20] Kalaitzidou, K., Fukushima, H., and Drzal, L.T., A new compounding method for exfoliated graphite–polypropylene nanocomposites with enhanced flexural properties and lower percolation threshold, *Composites Science and Technology*, Vol. 67, pp. 2045-2051, (2007).

[21] Torkelson, J., and Wakabayashi, K., Polymer-graphite nanocomposites via solid-state shear pulverization, *US Patent No. US 7906053 B1*, (2011).

[22] Gharehbeyglou, M., S.Izadhkah, M., Erfannya, H., and Entezami, A., Improvement of mechanical and thermal properties of chemically modified graphene oxide/polypropylene nanocomposite, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, pp. 206-196, (1395). (in Persian فارسی)

[23] Neitzel, I., Mochalin, V., Knoke, I., Palmese G.R., and Gogotsi, Y., Mechanical properties of epoxy composites with high contents of nanodiamond, *Composites Science and Technology*, Vol. 71, pp. 710-716, (2011).

[24] Mochalin, V.N., Shenderova, O., Ho, D., and Gogotsi, Y., The properties and application of nanodiamonds, *Nature Nanotechnology*, Vol. 7, pp. 11-23, (2012).

[25] Mochalin, V.N., and Gogotsi., Y., Nanodiamond-polymer composites, *Diamond & Related Materials*, Vol. 58, pp. 161-171, (2015).

[26] Ayatollahi M.R., Alishahi, E., Doagou-R, S., and Shadlou, S., Tribological and mechanical properties of low content nanodiamond/epoxy nanocomposites, *Composites Part B*, Vol. 43, pp. 3425-3430, (2012).

[27] Hashemi, M., and Shojaei, A., Morphology development and mechanical properties of unsaturated polyester resin containing nanodiamond, *Polymer International*, Vol. 66, pp. 950-959, (2017).

[28] He, H., Zhang, Z., Wang, J. and Li, K., Compressive properties of nano-calcium carbonate/epoxy and its fibre composites, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 45, pp. 919-924, (2013).

[29] Abdi, A., Eslami Farsani, R., and Khosravi, H., Evaluating the mechanical behavior of basalt fibers/epoxy composites containing surface-modified CaCO3 nanoparticles, *Fibers and Polymers*, Vol. 19, pp. 635-640, (2018).

[30] Li, L., Zou, H., Shao, L., Wang, G., Chen, J., Study on mechanical property of epoxy composite filled with nano-sized calcium carbonate Particles, *Journal of Materials Science*, Vol. 40, pp. 1297-1299, (2005).

[31] Shahbakhsh, S., Khosravi, H., Tohidlou, E., Improvement in interlaminar shear strength and flexural properties of carbon fiber/epoxy composite using surface-modified carbonate calcium, *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 6, Issue 3, pp. 343-350, (2019).

[32] Farahba, I., Manafi, S., Shahedi Asl, M., and Nayebi, B., Investigating mechanical and thermal properties of NBR/PP elastomer thermoplastic nanocomposite and clay nanoparticles, Vol. 8, pp. 28-17, (1397). (in Persian فارسی)

[33] Wang, L., Wang, K., Chen, L., Zhang, Y., and He, C., Preparation, morphology and thermal/ mechanical properties of epoxy/clay nanoclay composite, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Volume 37, Issue 11, pp. 1890-1896, (2006).

[34] Alinaghizadeh, E., Hashemyan, S., and Nateghi, M., The use of nanoclay particles in improving the functional properties of rice bran-plastic composite, *Journal of Textile and Clothing Science and Technology*, Vol. 8, pp. 30-25, (2018). (in Persian فارسی)

[35] Bagheryan Mahmoudabadi, A., Nodehi, A., and Ataei, M., Properties of nitrile rubber/clay nanocomposites prepared by in situ emulsifier-free emulsion polymerization, *Polymer Science and Technology*, Vol. 28, pp. 242-233, (1394). (in Persian فارسی)

[36] Wu, Q., Lei, Y., Yao, F., Xu, Y., and Lian, K., Properties of HDPE/clay/wood Nanocomposites, *Journal of Plastic Technology*, Vol. 27, pp. 108-115, (2007).

[37] Samal, S.K., Nayak, S.K., Mohanty, S., Polypropylene nanocomposites: effect of organo-modified layered silicates on mechanical, thermal and morphological performance, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 8, pp. 243-263, (2008).

[38] Zhao, Y., Wang, K., Zhu, F., Xue, P., and Jia, M., Properties of poly(vinylchloride)/woodflour/montmorillonite composites: effects of coupling agents and layered silicate, *Journal of Polymer Degradation and Stability*, Vol. 91, pp. 2874-2883, (2006).

[39] Rezanezhad, S., Hour, M., Joudat, H., and Shaabani, H., Investigating the effect of increasing carbon nanotubes on the mechanical properties of pre-impregnated glass fibers/epoxy resin used in wind turbine blades, *The second specialized conference on nanotechnology in the electricity and energy industry*, (2014). (in Persian فارسی)

[40] Frankland, S.J.V., Caglar, A., Brenner, D.W., and Griebel, M., Molecular simulation of the in uence of chemical cross-links on the shear strength of carbon nanotube-polymer interfaces, *The Journal of Physical Chemistry B*, vol. 106, pp. 3046-3048, (2002).

[41] Dehghan Baniyani, D., J.Jahromi, S.A., and Zebarjad, S.M., Investigating the role of carbon nanotubes on the tensile behavior of vinyl ester nanocomposite, *New Processes in Material Engineering*, Vol. 8, pp. 64-57,(2013). (in Persian فارسی)

[42] Vahedi, F., Shahverdi, H.R., Shokrieh, M.M., and Esmkhani, M., Effects of carbon nanotube content on the mechanical and electrical properties of epoxy-based composites, *New Carbon Materials*, Vol. 29, pp. 419-425, (2014).