

چکیده

نانولوله‌های کربنی به دلیل خواص الکتریکی، مکانیکی و حرارتی که از خود نشان می‌دهند، موضوع تحقیقات علمی بسیاری در چند دهه‌ی اخیر بوده‌اند. در این تحقیق، پیش‌پخش‌های از نانولوله‌ی کربنی چند دی‌واره‌ی عامل‌دار با عاملیت هیدروکسی‌لی و بدون عامل در محیط آبی تهیه شد. برای افزایش پخش نانولوله‌ها در لاتکس استایرن بوتادین از دو عامل فعال سطحی سدیم دودسیل بنزن سولفونات و سدیم دودسیل سولفات و امواج فراصوت استفاده شده است. پس از تعیین روش مناسب برای تهیه‌ی پیش‌پخش و بررسی میزان پخش نانولوله با استفاده از دستگاه طیف‌سنجی مرئی فرابنفش، مشخص شد که نانولوله‌ی کربنی عامل‌دار بهتر از نوع بدون عامل در حضور سدیم دودسیل بنزن سولفونات بی‌شتری پخش را نشان می‌دهد که به برهم‌کنش خوب با گروه‌های هیدروکسیلی نانولوله و تشابه ساختاری با لاستیک استایرن بوتادین ربط داده شد. در ادامه برای بررسی بی‌شتتر پخش نانولوله در لاستیک استایرن بوتادین، از آزمون هدایت الکتریکی استفاده شد که آستانه‌ی تراوایی نانولوله‌ی کربنی عامل‌دار که در این آزمون حدود ۳-۲ phr نشان داد. رفتار رئولوژیکی لاتکس خالص و لاتکس حاوی پیش‌پخش نانولوله‌ی کربنی مورد بررسی قرار گرفته است. برای بررسی اثر اندازه‌ی تقویت‌کننده بر خواص حرارتی، پخت و خواص فیزیکی - مکانیکی از ۳ phr دوده‌ی N330 به عنوان مقایسه استفاده شد. خواص حرارتی آمیزه‌ها توسط آزمون گرماسنجی روبشی تفاضلی (DSC) و آزمون تخریب حرارتی (TGA) مطالعه شد. نتایج به دست آمده از این آزمون‌ها بیانگر افزایش پایداری حرارتی آمیزه‌ها با افزودن نانولوله به ماتریس پلی‌مری و بهبود انتقال حرارت در بین زنجیره‌های لاستیک هستند. پخش نانولوله‌ی کربنی در لاستیک استایرن بوتادین با روش میکروسکوپی الکترونی پویا بررسی شد و بهترین پخش برای نانولوله‌ی عامل‌دار تعیین شد. در بررسی منحنی پخت، افزایش گشتاور آمیزه‌های لاستیکی در اثر افزودن نانولوله‌ی کربنی به ماتریس، کاهش زمان امنیت پخت به دلیل انتقال حرارت بالای نانولوله با ماتریس و افزایش پایداری حرارتی آمیزه به برهم‌کنش بین تقویت‌کننده و لاستیک ربط داده شد. برای بررسی خواص فیزیکی - مکانیکی از آزمون آنالیز دی‌نامیکی مکانیکی

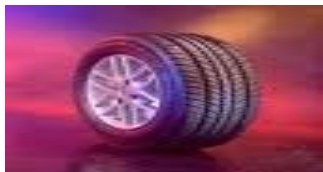
حرارتی (DMTA)، و آزمون کشش استفاده شده است. افزایش مدول ذخی‌ره و اتلافی و کاهش فاکتور اتلاف از نتایج نسبت منظر بالاتر و برهم‌کنش بیشتر نانولوله‌ی کربنی با لاستیک در مقایسه با دوده N330 است.

فصل اول: مقدمه

۱-۱. لاستیک استایرن بوتادی‌ن^۱

لاستیک استایرن بوتادی‌ن یکی از پر مصرف‌ترین انواع لاستیک سنتزی است که کوپلی‌مری از دو مونومر استایرن و بوتادی‌ن است که معمولاً حدود ۲۳/۵٪ آن استایرن است. این لاستیک معمولاً تحت نام تجاری مختلفی شناخته می‌شود که از این می‌ان می‌توان به Buna S اشاره کرد. اگر لاستیکی، همه منظوره نامیده شود احتمالاً لاستیک استایرن بوتادی‌ن در مقابل سایر لاستیک‌ها به این تعریف نزدیک‌تر است [۱]. در مقایسه با سایر لاستیک‌ها، این لاستیک نسبتاً ارزان بوده و به مقدار زیاد مصرف می‌شود. مقاومت شیمیایی آن مشابه لاستیک طبیعی است و دارای مقاومت پایین در مقابل اکسیدکننده‌ها، هیدروکربن‌ها و روغن‌های معدنی است. از این رو از نظر شیمیایی مزیت خاصی نسبت به دیگر لاستیک‌ها ندارد. این لاستیک در محصولات متنوعی استفاده می‌شود که در شکل ۱-۱ چند نمونه از کاربردهای لاستیک استایرن بوتادی‌ن نشان داده شده است [۱].

¹ Styrene butadiene rubber



تایر اتومبیل



واشر



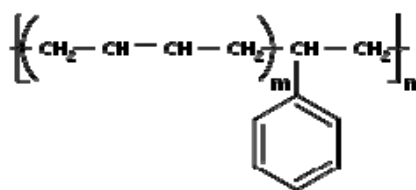
تسمه



لوله‌های خرطومی

شکل ۱-۱. چند نمونه از کاربردهای لاستیک استایرن بوتادین

لاستیک استایرن بوتادین به دو روش امولسیون و حلالی پلی‌مری‌زده می‌شود که بسته به دمای پلیمریزاسیون، روش امولسیون نیز به دو روش سرد و گرم تقسیم می‌شود. ساختار شیمیایی واحد تکرار شونده این لاستیک در شکل ۱-۲ نشان داده شده است.



شکل ۱-۲. ساختار شیمیایی واحد تکرار شونده لاستیک استایرن بوتادین [۱]

با توجه به وجود پیوند دوگانه در ساختار پلی بوتادین در شکل ۱-۲، سه حالت ۱-۴-سیس، ۱-۴-ترانس و ۲-۱-وی‌نیل محتمل است که به‌طور معمول ۶۵٪ ترانس، ۱۸٪ سیس و ۱۷٪ وی‌نیل است. اگر لاستیک استایرن بوتادین به روش امولسیون گرم تولید شود، حدود ۲۵٪-۲۰٪ از ۱-۲-وی‌نیل تولید می‌شود و فرآیند پذیری^۱ عالی خواهد شد. اگر با روش امولسیون سرد تولید شود حدود

^۱ Process ability

۱۲-۱۰٪ از ۲۱- وی نیل تولید می‌شود، فرآیند پذیری خوب می‌شود و اگر به روش محلولی، این لاستیک آماده شود حدود ۷-۸٪ از ۲۱- وی نیل تولید می‌شود و فرآیند پذیری بد می‌شود. حالت ۲۱- وی نیل در بوتادین می‌تواند اثرات مثبت و منفی را بر خواص لاستیک ایجاد کند. برای مثال می‌توان گفت که گروه وی نیل یک گروه جانبی است بنابراین باعث می‌شود که حرکت چرخشی زنجی‌ها کاهش پیدا کرده در نتیجه فرآیند پذیری بهبود یابد، از طرفی همین گروه جانبی دمای گذار شیشه‌ای (T_g) را بالا برده در نتیجه حرکت سخت تر خواهد شد بنابراین در دماهای پایینی، لاستیک استایرن بوتادین به ماده ای سخت و شکننده تبدیل می‌شود در نتیجه این لاستیک با درصد ۲۱- وی نیل زیاد، دمای T_g 35°C - است اما در حالت محلولی دمای T_g 75°C - است به همین دلیل در تایلرهای یخ شکن با وجود قیمت زیاد، از لاستیک استایرن بوتادین محلولی استفاده می‌کنند. در خصوص ایزومر ترانس باید گفت که هر چه حالت ترانس بیشتر شود قابلیت بلوری شدن بالا خواهد رفت در نتیجه مقاومت کششی لاستیک استایرن بوتادین خام افزایش پیدا می‌کند، زیرا در حالت ترانس، زنجیرها به شکل کشیده ای قرار می‌گیرند که راحت تر در سلول‌های بلور قرار می‌گیرند [۲]. هر چه دمای پلیمریزاسیون پایین تر باشد (در حالت امولسیون سرد) درصد ترانس بالاتر خواهد رفت بنابراین خواص مکانیکی افزایش پیدا می‌کند. لاستیک استایرن بوتادین پلی‌مری زده شده پلی‌مری آمورف و بی نظم است و تحت کشش بلوری نمی‌شود. این لاستیک در حالت خام استحکام کششی^۱ پایینی دارد اما با افزودن دوده و یا پرکننده های نظیر آن، این نقص بر طرف می‌شود. روش های دیگری نیز علاوه بر استفاده از پرکننده وجود دارد که می‌توان با بهره گیری از آنها به بهبود خواص مکانیکی و فیزیکی این لاستیک پرداخت که می‌توان به تغیری ساختار شیمیایی لاستیک استایرن بوتادین از طریق دست کاری در میزان درصد استایرن موجود، دست یافت [۱،۲].

۱-۱-۱. بهبود خواص لاستیک استایرن بوتادین

الف. تغیری ساختار شیمیایی لاستیک استایرن بوتادین

بیش از ۸۵٪ از لاستیک استایرن بوتادین مصرفی در جهان از نوع امولسیونی است و از مهم ترین متغیرهای موثر بر خواص این لاستیک، ترکیب درصد مونومرهای به کار رفته در آن است که مستقیماً بر روی دمای T_g اثر خواهند گذاشت [۳]. درصد استایرن، میزان الاستیسیته^۲ ای این لاستیک را تعیین می‌کند. با افزایش درصد استایرن، لاستیک استایرن بوتادین به سمت رفتار یک پلاستیک میل می‌کند و دمای T_g بالاتر می‌رود در نتیجه مقاومت سایشی^۴ و مقاومت پارگی^۱

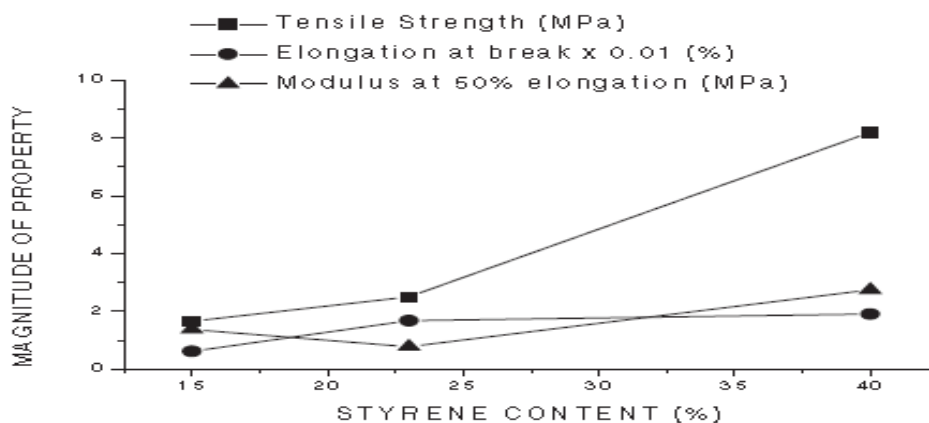
^۱: Glass transition temperature: T_g

^۲ Tensile strength

^۳ Elasticity

^۴ Abrasion resistance

کاهش پیدا می‌کند. پلی استایرن دمای T_g برابر 97°C دارد و حال آن که پلی بوتادین دمای T_g برابر $^\circ\text{C}$ $90-$ دارد و زمانی که کوپلی‌مر حاوی 25% وزنی استایرن باشد، T_g به $65^\circ\text{C}-$ می‌رسد. با افزایش ترکیب درصد استایرن تا 50% ، استحکام کششی نیز بالا خواهد رفت و بعد از آن کاهش می‌یابد این افزایش به نوع پلی‌مری‌زاسیون نیز بستگی دارد. در شکل ۱-۳ می‌توان تاثیر درصد استایرن موجود در لاستیک را بر روی خواص فیزیکی و مکانیکی مشاهده کرد. همچنین با افزایش درصد استایرن حرارت زای^۲ درون ماده افزایش پیدا می‌کند، به عبارتی تحت نیروهای دینامیکی اتلاف انرژی، زیاد خواهد شد. به طور کلی می‌توان گفت با افزایش درصد استایرن خواص مکانیکی لاستیک استایرن بوتادین کاهش می‌یابد [۴،۵].



شکل ۱-۳. اثر درصد استایرن در خواص لاستیک استایرن بوتادین [۵]

روش دی‌گر بهبود خواص لاستیک استایرن بوتادین، آلیاژ سازی این لاستیک با پلی‌مرهای دی‌گر است که در بخش ب به آن اشاره می‌شود.

ب. آلیاژ لاستیک استایرن بوتادین با پلی‌مرهای دی‌گر

لاستیک استایرن بوتادین با پلی‌مرهای مختلفی که با هم سازگاری دارند، آلیاژ می‌شود که در این میان می‌توان به پلی‌مرهای مثل پلی‌یورتان^۳، لاستیک بوتادین^۴، لاستیک طبیعی^۵ و لاستیک آکریلونیتریل بوتادین اشاره کرد. در آلیاژ لاستیک استایرن بوتادین با پلی‌یورتان،

¹ Tear resistance

² Heat Build up

³ Poly urethane

⁴ Butadiene rubber

⁵ Natural rubber

افزایش ترکیب درصد پلی‌ورتان سبب افزایش استحکام کششی آمیزه می‌شود و مقاومت اوزونی^۱ بهبود می‌یابد و پراکندگی دوده در آمیزه بیشتر می‌شود [۴]. آلیاژ با لاستیک طبیعی و با تغیری ترکیب درصد هر کدام از اجزای آلیاژ، باعث افزایش عمر خستگی^۲ و تغیری در استحکام کششی نمونه، می‌شود [۶]. آلیاژ کردن لاستیک استایرن بوتادین با لاستیک آکریلونیتریل بوتادین، و با تغیری ترکیب درصد لاستیک آکریلونیتریل بوتادین، زمان امنیت پخت^۳ و زمان پخت تغیری می‌کند این تغیرات به گونه ای است که با افزایش ترکیب درصد لاستیک آکریلونیتریل بوتادین، این خواص پخت کاهش می‌یابند [۶].

ج. تقویت کننده‌های مورد مصرف در لاستیک استایرن بوتادین

برای تقویت خواص لاستیک استایرن بوتادین از پرکننده‌های مختلف آلی و معدنی استفاده شده است، دوده^۴ از جمله پرکننده‌های تقویتی مورد استفاده در صنعت لاستیک است. ۹۰٪ دوده تولیدی دنیای در صنعت لاستیک به کار می‌رود [۲،۷]. این ماده برای افزایش مقاومت پارگی، مدول^۵ و خواص خوردگی و سایشی تایر به کار می‌رود. دوده به دلیل سازگاری با ماتریس پلی‌مری از مواد مناسب در مقاوم سازی لاستیک هاست [۵،۸]. در چند دهه‌ی اخیر از مواد دیگری برای جای‌گزینی دوده استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به کائولین، سیلیکا اشاره نمود که این مواد با ماتریس پلی‌مری سازگاری چندانی ندارند. امروزه محققان دریافته‌اند که اندازه‌ی ذره‌ی تقویت کننده و مشخصات سطحی آن از عوامل موثر بر خواص تقویت‌کنندگی آنها هستند. در سال‌های اخیر به دلیل خواص سطحی منحصر به فرد، استفاده‌ی زیادی از نانو ذرات شده است، در میان این تقویت کننده‌های نانویی می‌توان به نانو لوله کربنی و نانو خاک رس^۶ اشاره نمود [۷،۸].

۱-۲. نانو کامپوزیت

فناوری نانو و تولید مواد در ابعاد نانومتری موضوع جذابی برای تحقیقات است که در دهه‌ی اخیر توجه بسیاری را به خود معطوف داشته است. نانو کامپوزیت‌ها نیز به عنوان یکی از شاخه‌های این فناوری جدید، اهمیت بسیاری یافته است. تلاش‌های اولیه موفقیت آمیز در تهیه نانو کامپوزیت‌ها به دهه‌های شصت و هفتاد قرن بیستم میلادی باز می‌گردد. اما در سال ۱۹۸۰ با تهیه نانو کامپوزیت‌ها بر پایه نایلون ۶-خاک رس به صورت تجاری به وسیله شرکت تویوتای ژاپن، تحقیقات برای ساخت این مواد شدت و سرعت بیشتری پیدا کرد و شرکت‌های Honeywell و Bayer نیز نانو کامپوزیت‌هایی را بر پایه نایلون ۶ ارائه

¹ Ozone resistance

² Fatigue life

³ Schorch time

⁴ Carbon black; CB

⁵ Modulus

⁶ Nano clay

نمودند که عمده کاربرد آن‌ها در خودروسازی و صنایع بسته بندی بود [۷]. تعدادی دیگر از شرکت‌ها، نانوکامپوزیت‌ها را به منظور کاربردهای تجاری مورد مطالعه قرار دادند و در اواخر سال ۲۰۰۱ میلادی شرکت‌های General motors و Basell اولین کاربرد نانوکامپوزیت‌های بر پایه اولفین‌های گرمانرم را در قطعات خارجی اتومبیل ارائه کردند [۹،۱۰].

۱-۲-۱. تعریف نانوکامپوزیت

نانوکامپوزیت‌ها شامل ترکیب ذرات در حوزه مولکولی یا نانو در زمینه پلیمری، فلزی یا سرامیکی هستند. در همه موارد مشاهده می‌شود که مقدار نانوذرات در این زمینه‌ها می‌تواند به طور کامل خواص این مواد را تغییر دهد این نانوذرات به عنوان تقویت کننده زمینه^۱ و همچنین تغییردهنده رفتار الکتریکی مواد پایه به کار می‌روند [۷]. نانوکامپوزیت‌ها، مواد مرکبی هستند که حداقل یکی از اجزاء تشکیل دهنده آن‌ها دارای ابعادی در محدوده نانومتری، در محدوده ۱-۱۰۰nm، باشد؛ علاوه بر این، پودرهای نانوکامپوزیتی وجود دارد که این پودرها شامل ذراتی با ابعادی مختلف در محدوده نانومتری هستند [۱۱].

۲-۲-۱. کاربرد، مزایا و معایب نانوکامپوزیت

کاربرد نانوکامپوزیت‌ها در تهیه بخش‌های خارجی خودرو بر پایه اولفین‌های گرمانرم نظیر پروپیلن، فیلم‌های بسته بندی نایلونی، بطری‌های نگهداری مواد نوشیدنی، لوله‌های پلیمری، پوشش‌های کابل و سیم و غیره در حال گسترش است. از دیگر زمینه‌های کاربرد نانوکامپوزیت‌ها می‌توان به ضدحریق کردن پلاستیک‌ها، تهیه الیاف و فیلم‌ها، کاربردهای الکتریکی، سامانه‌های انتقال دارو، مهندسی بافت، ساختمان‌سازی، لوازم خانگی و... اشاره کرد. در ده سال گذشته، نانوکامپوزیت‌های پلی‌مری مهم-ترین حوزه‌ی دانش و فناوری پلی‌مرها بوده است. نکات جذاب نانوکامپوزیت‌های پلی‌مری در اثر تقویت کنندگی پرکننده‌های نانو برای ایجاد خواص مکانیکی بهتر، پایداری حرارتی و خواص حفاظتی است. نانوفناوری برای بهبود خواص فیزیکی مواد سنتی در سطح مولکولی، بدون تغییری در فرآورش آن‌ها، به وجود آمده است. عمده‌ی کارهای تحقیقاتی در زمینه‌ی نانوکامپوزیت‌های لاستیکی روی سامانه‌های لاستیک و سیلیکات‌های لایه‌ای هم شامل نوع بدون اصلاح و هم نوع اصلاح شده‌ی آن، انجام گرفته است. به عبارت دیگر، می‌توان گفت که لاستیک و سیلیکات‌های لایه‌ای^۲ نخستین نانوکامپوزیت لاستیکی ساخته شده است. به سبب نسبت ابعادی^۳ بالاتر سیلیکات‌های لایه‌ای امکان برهم کنش بهتر پلیمر و پرکننده نسبت به پرکننده‌های معمولی ایجاد شده است. یکی از مشکلات اصلی در این نوع نانوکامپوزیت‌ها، رسیدن به پراکندگی یکنواخت پرکننده‌ها در ماتریس است. اساساً

^۱ Matrix

^۲ Layered silicate

^۳ Aspect ratio

پرکننده ها می توانند ساختار از هم گسیخته^۱ و ورقه ورقه^۲ شده تشکیل دهد. ساختار ورقه ورقه شده می تواند خواص بهتری را نسبت به خواص از هم گسیخته در نانو کامپوزیت تولیدی ایجاد کند [۱۲]. این مشکل به طور نسبی و تا حدودی با اصلاحات شیمیایی سیلیکات های لایه ای قابل حل است.

با توسعه بی شتر نانوفناوری، محققان به ساخت انواع نانولوله های کربنی پرداختند و از آن ها به عنوان پرکننده های تقویت کننده در ماتریس های پلی مری استفاده کردند. در لاستیک ها، نانولوله های کربنی تک دیواره^۳ و چند دیواره^۴، و نانولوله های اصلاح شیمیایی شده برای تقویت ماتریس به کار رفته اند. افزودن پرکننده های طبیعی مانند سلولوز، نشاسته و ... به لاستیک ها زمینه ی دیگری است که به طور جدی در نانو کامپوزیت های لاستیکی مورد مطالعه است [۹، ۱۰]. توسعه ی کامپوزیت های لاستیکی و نانو پرکننده های زیست سازگار هنوز هم تازگی خود را به خاطر دشواری های استخراج نانو پرکننده ها از الیاف طبیعی، حفظ کرده است [۸]. چالش های بسیاری در زمینه ی نانو کامپوزیت های لاستیکی در برابر محققان وجود دارد. جدا کردن و پراکنش یکنواخت نانو پرکننده ها در ماتریس لاستیکی هنوز به صورت یکن مشکل حل نشده باقی مانده است. از این رو طراحی و ساخت مواد فعال سطحی^۵ موثرتر برای برهم کنش^۶ کامل، نیاز است. در مورد نانو کامپوزیت های لاستیکی تقویت شده با خاک رس، افزایش نسبت ورقه ورقه شدن به درهم رفتگی، هنوز به صورت عددی تعین نشده است. مکانیابی جریان نانو کامپوزیت های لاستیکی طی فرایند پذیری نیز نیازمند تحقیق و پژوهش فراوانی است [۱۳]. در نهایت این که هنوز راهی طولانی برای موفقیت در استفاده از نانو کامپوزیت های لاستیکی برای کاربردهای گوناگون صنعتی، در پیش است. ظهور مواد نانو کامپوزیت، تحولی اساسی در خواص مکانیکی و حرارتی مواد ایجاد کرده است. خواص منحصر به فرد مواد نانو کامپوزیت را می توان نسبت سطح به حجم بالای آن دانست. نسبت سطح به حجم در حالت بی شکل بیشتر از حالت بلوری است. با کنترل فرآیند در مقیاس نانومتری در ساخت نانو کامپوزیت ها با پودرهای نانومتری، ریزساختاری کاملاً یکنواخت بدست می آید [۱۱]. نانو کامپوزیت ها خواص فیزیکی و مکانیکی از قبیل استحکام، سختی، چقرمگی و مقاومت حرارتی بالایی در محدوده وسیعی از دما دارند. افزودن ۱۰-۵٪ حجمی فاز دوم به فاز ماتریس، باعث افزایش چشم گیری در خواص فیزیکی و مکانیکی نانو کامپوزیت ها می شود [۹]. در مقابل خواص منحصر به فرد مواد نانو کامپوزیت، در ساخت نانو کامپوزیت ها مشکلات فرآیندی قابل توجهی وجود دارد که نقش تعیین کننده ای دارند. از اساسی ترین این مشکلات می توان به مواردی از قبیل عدم توزیع یکنواخت فاز دوم در فاز زمینه در نانو کامپوزیت ها اشاره کرد که خواص مکانیکی نانو کامپوزیت ها را کاهش می دهد. تجمع ذرات پودر بسیار ریز در نانو کامپوزیت ها موجب افزایش انرژی سطحی آن ها شده و کاهش خواص مکانیکی نانو کامپوزیت ها را به دنبال دارد. استفاده از مواد

¹ intercalated

² exfoliated

³ Single wall Carbon nanotube; SWNT

⁴ Multi wall carbonnanotube; MWNT

⁵ Surfactant

⁶ Interaction

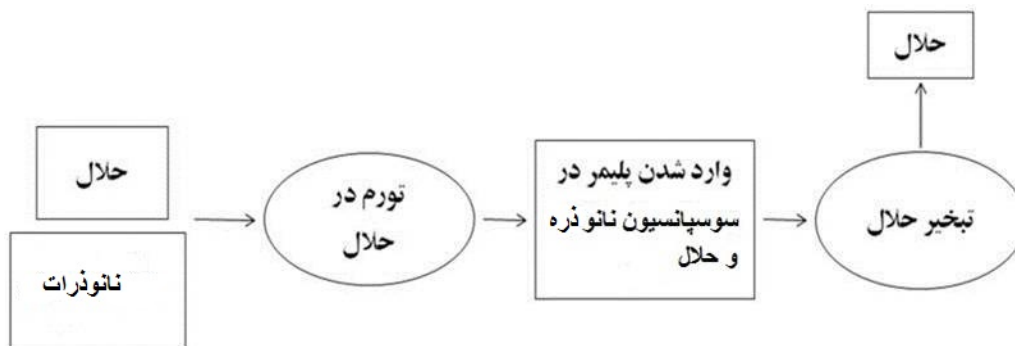
شیمیایی گران قیمت برای توزیع یکنواخت فاز دوم در داخل فاز زمینه و جلوگیری از به هم چسبیدن ذرات پودر نانوکامپوزیتی و ساخت نانوکامپوزیت هایی با ریزساختاری همگن و خواص مکانیکی بالا، باعث غیراقتصادی شدن و همچنین پیچیده تر شدن فرآیند می گردد [۹،۱۱].

۳-۲-۱. روش های تهیه ی نانوکامپوزیت

سه روش اصلی در تهیه ی نانوکامپوزیت ها وجود دارد: روش اختلاط محلولی^۱، پلی مری زاسیون هم زمان (درجا)^۲، روش اختلاط مذاب^۳.

الف. روش اختلاط محلولی

با استفاده از روش اختلاط محلولی می توان میزبان تجمع و کلوخه شدن نانوذرات در ماده پلی مری را کاهش داد. در این روش به دو صورت می توان نانوکامپوزیت های پلی مری را تولید کرد. اگر ماتریس پلی مری و ذرات نانو امتزاج پذیری باشند، محلول حاصل را می توان در قالب، ریخته گری کرده و نانوکامپوزیت تولید نمود، در غیر این صورت مخلوط مواد نانوکامپوزیت در یک حلال حل شده و در نهایت با تبخیر حلال، نانوکامپوزیت مورد نظر به دست می آید. اگرچه مزیت اصلی این روش، امکان سنتز نانوکامپوزیت های پلی مری های غیر قطبی یا با قطبیت کم است، ولی مصرف زیاد حلال، قیمت حلال و آلودگی های زیست محیطی استفاده از این روش را برای تولید در مقیاس صنعتی محدود کرده است [۹]. روش فرآوری محلولی در شکل ۱-۴ آمده است.



شکل ۱-۴. روش فرآوری محلولی نانوکامپوزیت های پلی مری

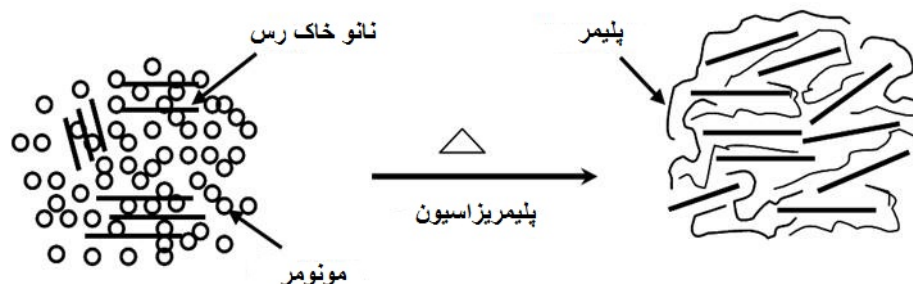
ب. روش پلی مری زاسیون درجا

در روش پلی مری زاسیون درجا، نانوذرات در مایع مونومر متورم شده که در نهایت پلی مری زاسیون در بین ذرات تقویت کننده رخ می دهد. مراحل این روش که در سنتز نانوکامپوزیت های پلی مری - رس نیز متداول است در شکل ۱-۵ آمده است. نکته ی کلیدی در این روش، نحوه ی توزیع نانوذرات در مونومر است.

¹ Solvent mixing

² In situ polymerization

³ Melt mixing



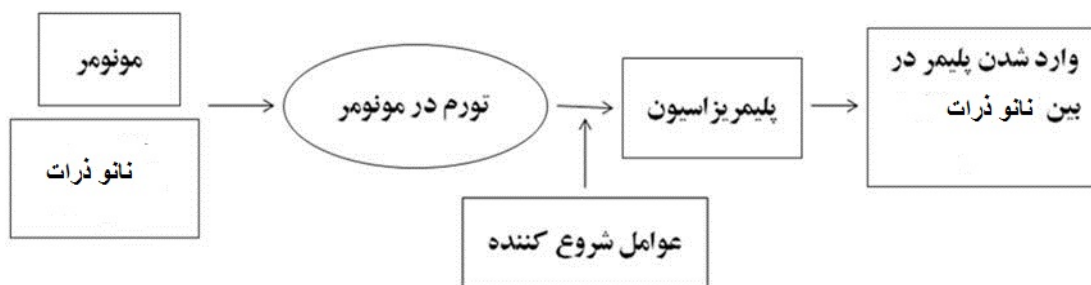
شکل ۱-۵. تصویری از تهیه نانو کامپوزیت به روش پلی‌مری‌زاسیون درجا [۵]

مطابق شکل ۱-۵ در این روش ابتدا خاک رس اصلاح شده با ترکیبات آلی در مونومر پخش می‌شود. این مرحله نیاز به زمان معینی دارد که این زمان وابسته به میزان قطبیت مولکول‌های مونومر، آمایش سطحی^۱ ذرات خاک رس و دمای تورم است. پس از این که ذرات خاک رس درون مونومر متورم شد، بسته به نوع پلی‌مر، عوامل پخت برای گرماسخت‌های^۲ نظیر اپوکسی یا شروع‌کننده‌ی پراکسیدی برای پلی‌استرهای غیر اشباع به سیستم افزوده می‌شود و پلی‌مری‌زاسیون در حضور ذرات خاک رس انجام می‌گیرد و در نهایت نانو کامپوزیت پلی‌مری تشکیل می‌گردد. باید توجه داشت که اگر سرعت پلی‌مری‌زاسیون در میان لایه‌های خاک رس کمتر از خارج لایه‌ها باشد جدا شدن لایه‌ها به صورت ناقص انجام شده و ساختار نانو کامپوزیت از نوع ورقه ورقه شده نخواهد بود. پیشرفت پلی‌مری‌زاسیون در این روش به قطبیت مولکول‌های مونومر وابسته است به این ترتیب که در مرحله‌ی متورم شدن ذرات خاک رس درون مونومر، انرژی سطحی بالای این ذرات سبب جذب مولکول‌های قطبی مونومر می‌شود و در نتیجه مونومرها بین لایه‌های خاک رس نفوذ می‌کنند و سبب افزایش فاصله‌ی بین لایه‌ای می‌شوند. هنگامی که عوامل شروع‌کننده به سیستم پلی‌مری‌زاسیون افزوده می‌شود مونومرها با این عوامل وارد واکنش می‌شوند و زنجیره‌های پلی‌مری را می‌سازند. به دلیل کم بودن قطبیت زنجیره‌های پلی‌مری در مقایسه با مونومرها بر اساس قوانین ترمودی نامیکی زنجیره‌ها از داخل لایه‌های سیلیکاتی خارج شده و مونومرها جای‌گزین آن‌ها می‌شوند تا در نهایت به شیوه‌ی ذکر شده، مولکول‌های مونومر، لایه‌های سیلیکاتی را از هم جدا کنند و زنجیره‌های پلی‌مری مابین این لایه‌ها قرار گیرند. نانو کامپوزیت‌های پلی‌کاپرولاکتون و نایلون عموماً با این روش سنتز می‌شوند [۹، ۱۴].

شکل ۱-۶ روش پلی‌مری‌زاسیون درجا را در تهیه‌ی نانو کامپوزیت‌های پلی‌مری نشان می‌دهد.

¹ Surface treatment

² Thermoset



شکل ۱-۶. روش پلی‌مری‌زاسیون درجا در تهیه‌ی نانو کامپوزیت‌های پلی‌مری

ج. روش اختلاط مذاب

روش اختلاط مذاب اولین بار توسط Vaia و همکارانش در سال ۱۹۹۳ گزارش شد [۱۴]. این روش شامل اختلاط پلی‌مر و نانوذرات در دماهای بالای T_g و یا نقطه‌ی ذوب پلی‌مر است. در دماهای بالاتر زنجیره‌های پلی‌مری تحرک کافی برای نفوذ بین ذرات نانو ابعادی را دارند [۱۴]. زمان و دمای اختلاط با توجه به خصوصیات پلی‌مر، میزان سازگاری و غیره قابل تنظیم است. پس از اختلاط، مخلوط تا بالای دمای T_g سرد شده و ساختار نانو کامپوزیتی تشکیل می‌گردد. در این روش با توجه به حالت مذاب ماتریس، از مخلوط‌کننده‌هایی که منجر به تولید نیروهای برشی و کششی قوی مانند اکسترودرهای تک پیچه و دو پیچه و مخلوط‌کننده‌های داخلی^۱ استفاده می‌شود. این روش در مقایسه با روش‌های دیگر به دلیل سهولت، آلودگی زیست‌محیطی کمتر و همچنین قابلیت کاربری در اغلب سیستم‌های پلی‌مری در مقیاس صنعتی، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. دامنه‌ی وسیعی از نانو کامپوزیت‌های بر پایه‌ی پلی‌مرهای گرمانرم از پلی‌آمید تا پلی‌استایرن و همچنین پلی‌الفین‌ها با این روش تولید می‌گردند.

۳-۱. استفاده از فناوری نانو در افزایش کارایی لاستیک

طبق مطالعات سال ۲۰۰۸ میلادی، مصرف جهانی لاستیک‌ها به مرز ۲۲/۷ میلیون تن رسیده است [۱۱]. این گزارش آماری نشان از اهمیت بالای کالاهای لاستیکی در زندگی روزمره‌ی بشر دارد و در این میان کشور چین بیشترین مصرف لاستیک را دارد. از کل مصرف لاستیک‌ها، مقداری حدود ۴۳٪ آن مربوط به لاستیک طبیعی و مابقی به لاستیک مصنوعی اختصاص دارد [۱۲]. مصرف اصلی لاستیک‌ها در بخش تولید تایرها و تیوپ‌های داخل آن در صنایع خودرو سازی است. از دیگر صنایع کالاهای لاستیکی می‌توان به انواع تسمه‌ها، انواع شیلنگ، آب بندها، واشرها و کاسه‌نمد و... اشاره کرد. گرچه مصرف لاستیک مصنوعی در حال افزایش است، اما هنوز هم لاستیک طبیعی بیشتر مورد علاقه‌ی صنایع وابسته‌ی لاستیکی است. زیرا استحکام قبل از پخت^۲ آن به دلیل حضور ترکیبات غیر لاستیکی مانند پروتئین‌ها بالاست. همچنین رفتار بلورینگی کشش القای^۳ داشته و به

^۱ Internal mixer

^۲ Green strength

^۳ Induced crystallization

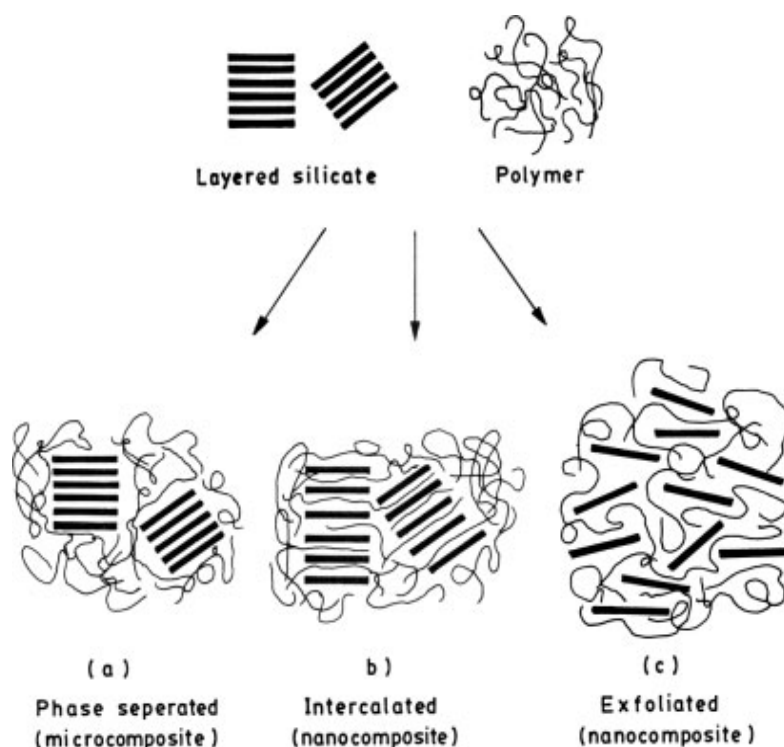
سادگی پخت شده و دارای نظم فضایی مناسبی است. لاستیک استایرن بوتادین و بعد از آن لاستیک پلی بوتادین، پر مصرف ترین نوع لاستیک های مصنوعی هستند [۱]. به هر حال، برای اینکه لاستیک-ها بتوانند به مقاومت و استحکام مکانیکی لازم برسند، نیازمند تقویت با پرکننده های ذره ای، مانند دوده و سیلیکا هستند. عموماً بسته به کاربرد، درصد زی ادی در حدود ۲۰٪ تا ۴۰٪ از پرکننده های معمولی برای رسیدن به تقویت کنندگی کافی نیاز خواهد بود [۷]. برای این پرکننده های سنتی همواره مشکلات و موانعی وجود داشته است. استفاده از درصد بالای این پرکننده باعث کاهش فرایندپذیری و افزایش وزن قطعه ی تولید شده می شود. در این شرایط استفاده از پرکننده های نانو برای تقویت ترکیبات لاستیکی اهمیت خود را نشان می دهد. در سال های اخیر، نانوکامپوزیت های پلی مری بر پایه ی لاستیک به خاطر اندازه ی کوچک پرکننده، و فعالیت سطحی نانوذرات توجه زی ادی را به خود معطوف ساخته اند، چرا که بدین طریق امکان رسیدن به خصوصیات مطلوب در شرایط مقادیر کمی از پرکننده میسر می شود. لاستیک استایرن بوتادین که مورد مصرف آن در صنعت پلی مری به ویژه صنعت تایر سازی است، با افزودن چند درصد نانو ذره، مقاومت سایشی لاستیک بالا می رود که، امکان افزایش تا ۵ برابر را دارد [۱،۲].

۱-۳-۱. استفاده از نانو خاک رس برای بهبود خواص مکانیکی لاستیک

نانو خاک رس به دلیل شکل صفحه ای، باعث افزایش فوق العاده ای در خواص حرارتی و نفوذ ناپذیری^۱ در برابر گازها می شود. دلیل این امر، طولانی شدن مسیر عبور گاز از میان فاز ماتریس به دلیل وجود پرکننده های نانومتری است. زمانی که نانو خاک رس وارد لاستیک می شود، زنجی رهای لاستیک وارد فضای بین لایه های اصلاح شده ی آن می شود. در اثر ورود زنجی رهای پلی مری به فضای بین لایه ها، فاصله ی بین لایه ها افزایش می یابد و ذره های نانو خاک رس متورم می شود و زنجی رهای پلی مری بین لایه های پرکننده نفوذ کرده و به آن افزوده می شود. افزایش فاصله بین لایه ها تا حدود ۶ برابر فاصله ی اولیه ی بین لایه های نانو خاک رس اصلاح نشده، به صورتی انجام می شود که نیروهای برهم کنش بین لایه ها از بین نرفته و توازی لایه ها حفظ می شود. در این حالت به نانوکامپوزیت حاصل نانوکامپوزیت میان لایه ای^۲ می گویند. اگر فاصله ی بین لایه ها از ۶ برابر فاصله ی اولیه ی آن بیشتر شود، نیروی جاذبه ی بین صفحه ها ضعیف می شود و لایه های نانو خاک رس در اثر نیروهای برشی حاصل از اختلاط و نیز با میل ترمودی نامیکی به افزایش هر چه بیشتر آنتروپی، از یکدیگر جدا می شوند و به صورت نامنظم در بستر پلی مری خود پراکنده می گردند. در این حالت به آن نانو کامپوزیت ورقه ورقه ای می گویند. و توازی بین لایه ها در چنین نانو کامپوزیتی از بین می رود [۱۴]. شکل ۱-۷ ساز و کار پخش نانو خاک رس در ماتریس پلی مری را نشان می دهد [۵،۶].

¹ Barrier properties

² Intercalated



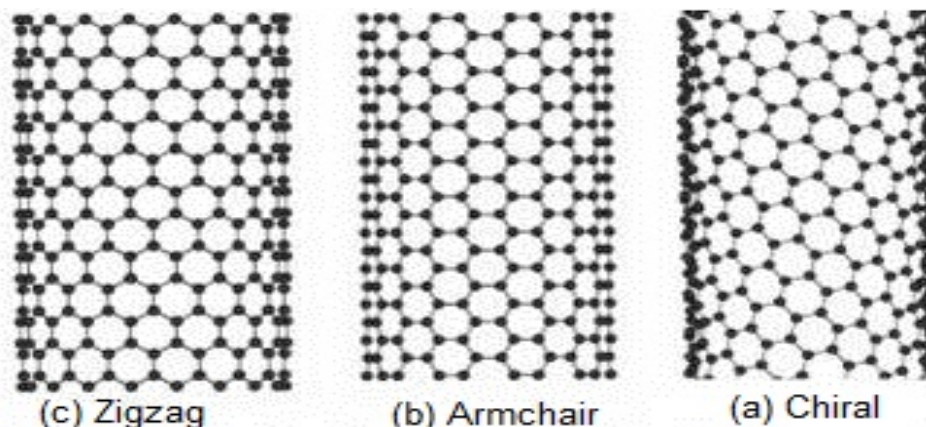
شکل ۱-۷. نانو خاک رس در ماتریس پلی‌مری [۵]

۱-۳-۲. استفاده از نانولوله‌های کربنی برای بهبود خواص مکانیکی لاستیک

الف. معرفی نانولوله‌های کربنی

نانو لوله‌های کربنی که از عناصر پایه در فناوری نانو به شمار می‌روند و از صفحات کربن به ضخامت یک اتم و به شکل استوانه‌های تو خالی ساخته شده است در سال ۱۹۹۱ توسط Sumio Iijima (از شرکت NEC ژاپن) کشف شد [۱۴]. خواص ویژه و منحصر به فرد آن از جمله مدول یانگ بالا و استحکام کششی خوب از یک طرف و طبیعت کربنی نانو لوله‌ها (به خاطر اینکه کربن ماده ای است کم وزن، بسیار پایدار و ساده جهت انجام فرایندها که نسبت به فلزات برای تولید ارزان تر هستند) باعث شده است که تحقیقات زیادی در زمینه‌های مربوط به نانولوله‌ها انجام شود. وجود یک سری مختصات ویژه‌ی نانو لوله‌های کربنی، آن‌ها را به انتخابی ایده آل برای بسیاری از کاربردها تبدیل کرده است. نانو لوله‌ها از ورق‌های کربنی ۶ گوشه ای منظم با گستره قطری کمتر از مقیاس آنگسترم تا کمتر از ۱۰۰ nm، پوشیده شده اند. این لوله‌ها در مقیاس نانو در دو شکل وجود دارند. لوله‌های کربنی تک دی‌واره، که این نوع، از یک لایه اتم‌های کربنی گرافیتی تشکیل شده است. نانو لوله‌های چند دی‌واره که از چندین لایه لوله‌های کربنی هم محور تشکیل شده است. آرایش شبکه‌ی شش ضلعی کربن در یک

نانو لوله می تواند به ۳ دسته ی لوله های زی گزاگ^۱، دسته دار^۲ و کای رال^۳ طبقه بندی گردد. در شکل ۸-۱ حالت های فضای نانو لوله های کربنی نشان داده شده است.



شکل ۸-۱ آرایش شبکه ی شش ضلعی کربن در نانو لوله (a) کای رال (b) دسته دار (c) زی گزاگ [۱۴]

لازم به توضیح است که حالت رسانا و نیمه رسانای نانو لوله ها بر حسب شکل هندسی شان قابل شناسایی است. قدرت رسانای گرمایی خیلی بالا، بروز خواص الکتریکی و مکانیکی منحصر به فرد در امتداد طول نانو لوله ها، مدول یانگ بالا، گسیل و جذب نور، که می توانند نور مادون قرمز را جذب و دفع نمایند، و استحکام و مقاومت کششی بسیار بالا، از ویژگی های نانو لوله ها هستند [۱۴، ۱۳، ۱۱].

ب. کاربرد نانو لوله های کربنی

از کاربردهای نانو لوله های کربنی می توان به استفاده در ترانزیستورها، نمای شگرهای گسیل میدانی و ... اشاره کرد [۶]. خواص مکانیکی عالی نانو لوله، آن را به یک پرکننده ی مستحکم در کامپوزیت های پلی مری مبدل کرده است. افزودن نانو لوله های کربنی، باعث افزایش خصوصیات مکانیکی، الکتریکی، پایداری گرمایی، اشتعال پذیری ماتریس های لاستیکی می شود. به ویژه تلاش هایی در جهت استفاده از نانو لوله های چند دیواره در لاستیک ها به منظور ارتقاء مقاومت در برابر سایش صورت گرفته است. اما پی شرفت های نانو کامپوزیت های پلی مری حاوی نانو لوله، به علت مشکل توزیع آن در ماتریس، برای انتقال بار در سطح تماس نانو لوله با پلی مر، محدود شده است. انتقال بار از

¹ zigzag

² Armchair

³ Chiral

ماتریس به نانو لوله ها نقش مهمی را در خواص مکانیکی این نوع نانو کامپوزیت ها ایفا می - نماید [۱۴].

۱-۴. برهم کنش های لاستیک و پرکننده

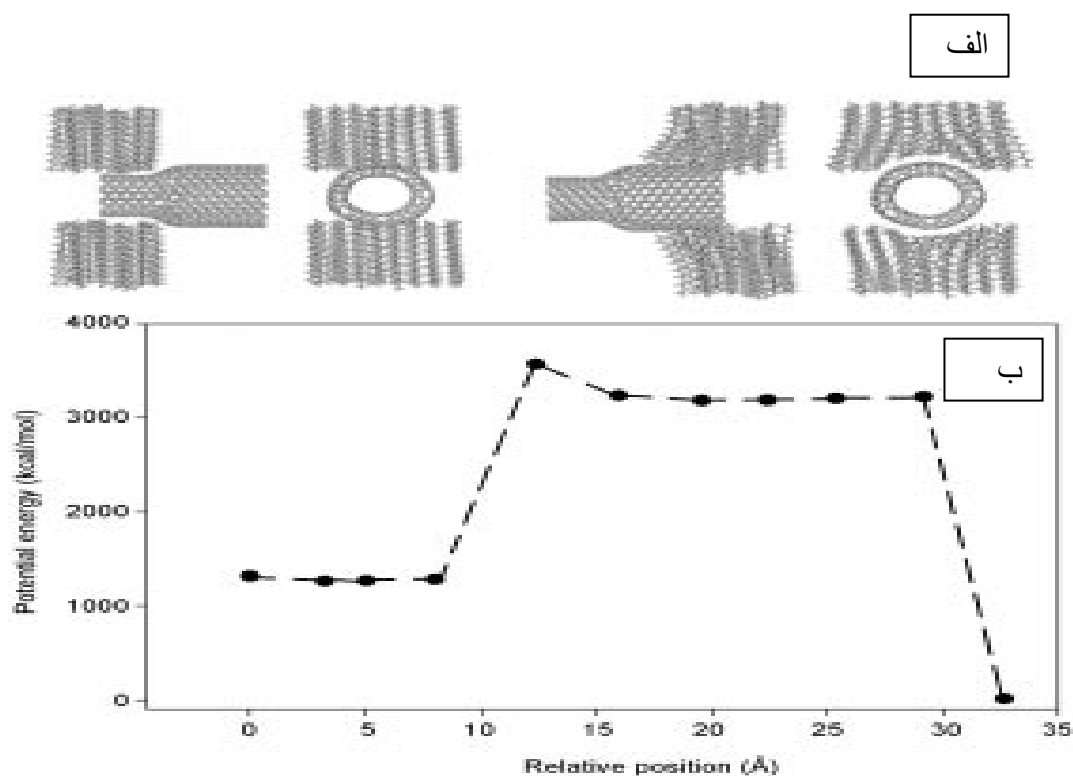
برهم کنش های بین لاستیک و پرکننده تاثیر بسزایی بر خواص کامپوزیتی لاستیک می گذارد. خواص فیزیکی و شیمیایی پرکننده و لاستیک و میزان حضور هریکی از آنها در کامپوزیت نهایی بر این برهم کنش ها تاثیر گذارند. برهم کنش های بین لاستیک - لاستیک که در آلیاژهای لاستیکی وجود دارند، به اندازهی برهم کنش های لاستیک - پرکننده و پرکننده - پرکننده دارای اهمیت نیستند. برهم کنش های لاستیک - پرکننده بر اساس میزان سازگاری پرکننده با لاستیک توصیف می گردد، در حالی که برهم کنش های پرکننده - پرکننده با توجه به میزان تمایل جذب پرکننده به هم نوع خود و توانایی تشکیلی شبکه مورد ارزیابی قرار می گیرد. مهم ترین اثر برهم کنش های لاستیک - پرکننده در انسداد لاستیک ظهور می یابد. اصطلاح لاستیک مسدود شده^۱ به بخشی از لاستیک اطلاق می شود که در میان توده های پرکننده به دام افتاده است و جزیی از بخش فعال کششی و الاستیکی ماتریس لاستیک محسوب نمی شود. در عوض لاستیک محدود به عنوان بخشی از شبکه ی پرکننده عمل کرده و حجم موثر پرکننده را افزایش می دهد [۱۵]. برهم کنش های پرکننده - پرکننده عمده ترین ساز و کار تقویت کنندگی، به ویژه در درصد های بالای پرکننده است. این برهم کنش ها به برهم کنش های بین سطوح ذرات پرکننده (پرکننده - پرکننده، پرکننده - لاستیک)، برهم کنش های فیزیکی (نیروی واندروالسی، پیوند هیدروژنی)، ساختار پرکننده و کسر حجمی پرکننده بستگی دارد. انرژی سطحی پرکننده بر چگونگی سازگاری پرکننده با لاستیک تاثیر می گذارد [۱۶]. برای مثال سیلیکا بسیار قطبی است و نمی تواند با لاستیکی غیر قطبی مانند لاستیک استایرن بوتادی ن برهم کنش خوبی ایجاد کند، اما با لاستیک های قطبی مانند پلی دی - متیل سیلوکسان برهم کنش برقرار می کند. ساختار پرکننده نیز میزان سازگاری آن را با لاستیک تعیین می کند. با افزایش سطح پرکننده، مکان های ایجاد برهم کنش با لاستیک و دیگر پرکننده ها را فراهم می سازد. در پرکننده های با ساختار شاخه ای این امکان وجود دارد که بخش هایی از لاستیک به طور مکانیکی بین توده ها گیر کند [۱۷].

۱-۴-۱. برهم کنش ماتریس پلی مری و نانولوله های کربنی

ناهمگونی ساختاری نانولوله های کربنی که در اثر تفاوت در اندازهی قطر لوله ها رخ می دهد، و خمش ها و پیچش های موضعی به دلیل نقص در ساختار شش ضلعی نانولوله و متقارن نبودن لوله ها،

¹ blocked

عاملی برای چسبندگی پلی‌مر-نانو لوله از طریق اتصالات مکانیکی است. بیرون کشیدن^۱ نانو لوله، در اتصالات ناصاف بین پلی‌مر-نانو لوله در مقایسه با سطوح صاف نانو لوله باعث ایجاد یک کار مکانیکی اضافی می‌گردد. برای نشان دادن این نظریه، یک مدل مولکولی از نانو لوله با قطرهای متفاوت در پلی‌مری با آرایش خطی ساخته شده است و نانو لوله از انتهای قطر کوچکترش از پلی‌مر خارج می‌گردد.



شکل ۹-۱. (الف). نانولوله جاسازی شده در ماتریس پلی‌مری با آرایش خطی (ب). نمودار انرژی پتانسیل بر حسب موقعیت نسبی نانولوله [۱۴]

شکل ۹-۱ نشان‌دهنده نانو لوله جاسازی شده در پلی‌مری با آرایش خطی است و از این نمودار این گونه دریافت می‌شود که با افزایش قطر نانو لوله، به انرژی بیشتری برای بیرون کشیدن نانو لوله از ماتریس نیاز است.

محدوده ی قطری در این مدل $20/1A - 13/3A$ است. از این رو اتصالات مکانیکی می‌تواند یک اثر مهم در چسبندگی به پلی‌مر داشته باشند [۱۴].

بررسی برهم کنش پلی‌مر-نانو لوله در مقیاس نانومتریک، نتایج زیر را به همراه دارد:

^۱ Pull off

۱- اگر پیوند شیمیایی بین پلیمر- نانو لوله ایجاد نگردد، ماهیت برهم‌کنش، از نوع نیروهای واندروالسی و الکترواستاتیکی است.

۲- غیریکنواختی موضعی در نانولوله جاسازی شده در ماتریس پلیمر، ممکن است در اتصالات نانو مکانیکی، اثری مشابه درگیری سخت دنده‌ها در هم را داشته باشد.

انتقال تنش بین سطحی نانو لوله و ماتریس پلیمری با سه روش توجیه می‌شود:

۱. پیوندهای کووالانسی (در صورتی که پیوند شیمیایی برقرار شود)

پیوند کووالانسی بین اتم‌های نانو لوله و ماتریس از واکنش شیمیایی در سطح نانولوله حاصل می‌شود، به هر حال پیوند کووالانسی نیاز به عامل‌دار کردن سطح نانو لوله - ماتریس دارد. این عمل ممکن است فرایند را دچار مشکل نموده و نقص‌هایی را در نانو لوله ایجاد نماید که بر روی کارایی کامپوزیت اثر می‌گذارد.

۲. درگیری مکانیکی^۱

این مسئله در اثر نقص‌های موجود در کامپوزیت‌های رایج رخ می‌دهد ولی به‌ندرت در نانو لوله‌ها به‌وقوع می‌پیوندد که به‌دلیل ساختار اتمی تقریباً بی‌نقص آن است.

۳. نیروهای واندروالسی

نیروی واندروالسی بین نانو لوله و ماتریس بی‌شتترین دلیل رایج برای انتقال بار بین سطوح است، چون به‌طور معمول این نیرو وجود دارد و نیاز به عامل‌دار کردن ندارد [۶].

۵-۱. پخش نانولوله‌ی کربنی در ماتریس پلیمری

می‌توان توسط میکروسکوپی الکترونی انتقالی^۲ و میکروسکوپی نیرو اتمی^۳، ریخت شناسی^۴ و نحوه‌ی توزیع نانو لوله در ماتریس پلیمری را بررسی کرد. در شکل ۱-۱۰ تصویر میکروسکوپی الکترونی پوی^۵ از نانو لوله چند دی‌واره آورده شده است.

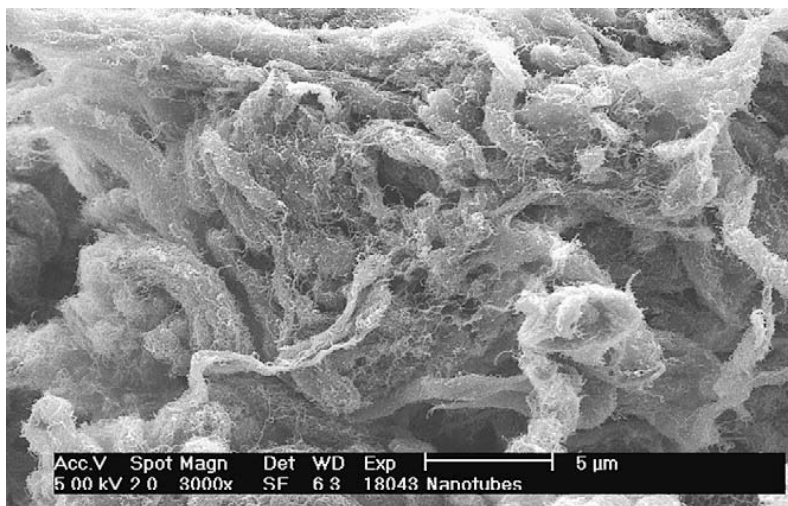
¹ Mechanical interlocking

² Transmission electron microscopy; TEM

³ Atomic force microscopy; AFM

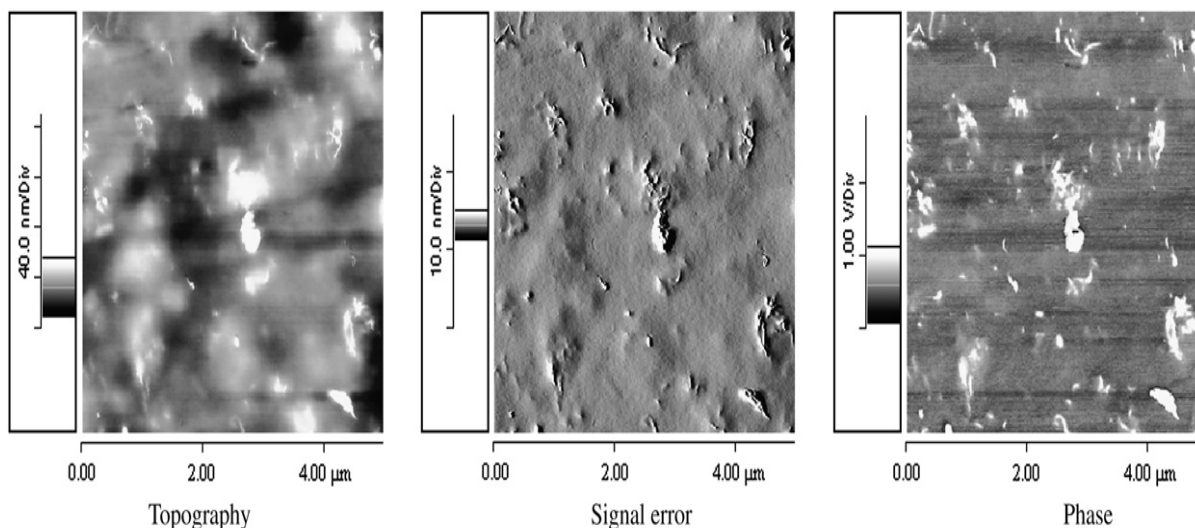
⁴ morphology

⁵ Scanning electron microscopy; SEM



شکل ۱-۱۰. تصویری میکروسکوپی الکترونی پوی شی نانولوله چند دیواره [۱۸]

شکل ۱-۱۰ نشان می‌دهد، نانولوله‌ی کربنی همانند نمدی از الیاف‌های بافته شده است [۱۸]. اطلاعات دی‌گر در زمینه‌ی نحوه‌ی توزیع نانولوله در ماتریس با تصاویری میکروسکوپی نیرو اتمی بدست می‌آید. در شکل ۱-۱۱ میکروسکوپی نیرو اتمی مربوط به نانوکامپوزیت لاستیک استایرن بوتادین تقویت شده با ۱۰phr^۱ نانولوله دیده می‌شود. نواحی روشن‌تر که نسبتاً به صورت یکنواخت پخش شده‌اند، مشخص‌کننده‌ی توده‌ی پلی‌مر است.



شکل ۱-۱۱. تصویری میکروسکوپی نیرو اتمی نانوکامپوزیت لاستیک استایرن بوتادین تقویت شده با ۱۰phr نانولوله کربنی چند دیواره [۱۹]

^۱ Part hundred rubber; phr

بر اساس شکل ۱-۱۱ توپوگرافی^۱ و سیگنال خطا^۲، زبری سطح را نشان می‌دهند، در حالی که تصاویر فازی^۳، تفاوت در سختی سطوح را تعیین می‌کند، که در کامپوزیت های لاستیکی تقویت شده نانولوله کربنی، به دلیل اختلاف زیادی که بین مدول نانولوله و ماتریس پلی‌مری وجود دارد، کاربرد فراوانی دارد [۱۹].

۱-۵-۱. بهبود پخش نانولوله‌ی کربنی در ماتریس پلی‌مر

از آنجا که نانولوله خالص از لایه‌های گرافیتی استوانه‌ای ساخته شده است و این لایه‌های گرافیتی هیچ گروه عامل‌داری برای ایجاد برهم‌کنش پلی‌مر-پرکننده ندارند تا بتوانند خواص تقویتی نانوذرات را در کامپوزیت افزایش دهند، عمدتاً نانولوله‌ها برهم‌کنش ضعیفی با ماتریس پلی‌مری دارند [۲۰]. عدم برقراری تماس بین سطحی قوی بین نانولوله و پلی‌مر باعث می‌شود انتقال بار از پلی‌مر به پرکننده، به خوبی انجام نشود. انتقال نامناسب بار از پلی‌مر به نانولوله سبب بی‌رون آمدن لایف از ماتریس^۴ شده و باعث از هم‌پاشی نانوکامپوزیت می‌گردد. نانولوله‌های کربنی به دلیل نیروی برهم‌کنش واندروالسی در امتداد محور طولی، دارای طبیعت آب‌گریز^۵ هستند و تمایل به رسوب و تجمع در محلول‌های آبی را دارند. ویژگی آب‌گریزی قوی نانولوله‌های کربنی، سبب پخش نامناسب و تشکیک سوسپانسیون‌های ناپایدار می‌شود که مانعی در برابر بسیاری از کاربردهای صنعتی است. پخش نانولوله‌ها و تهیه یک سوسپانسیون پایدار، یک فاکتور ضروری برای کاربرد آن در فازهای محلولی مثل لاتکس‌ها و کامپوزیت‌هاست [۲۱]. چندی‌ن‌روش برای پخش بهتر این نانوذرات در ماتریس‌های پلی‌مری وجود دارد. از میان این روش‌ها می‌توان از، آلیاژسازی فیزیکی یا همان روش مکانیکی، اتصال کووالانسی گروه‌های عامل‌دار بر روی دیواره‌ی نانولوله‌ها یا عامل‌دار سازی شیمیایی و اتصال غیر کووالانسی مولکول‌ها نام برد. در روش مکانیکی می‌توان از دستگاه‌های فراصوت^۶، آسیاب گلوله-ای^۷ و روش اختلاط مذاب استفاده کرد. در میان روش‌های مکانیکی، امواج فراصوت و برش با سرعت بالا، مناسب‌ترین روش در بهبود پخش نانولوله‌ها در ماتریس هستند [۲۲، ۲۳]. از مضرات این روش می‌توان به شکسته و کوتاه‌تر شدن طول نانولوله‌ها و در نتیجه کاهش نسبت منظر آن‌ها اشاره کرد [۲۲]. به منظور بهبود فرایند جداسازی به روش مکانیکی می‌توان پس از انجام فرایند، کلوخه‌های باقی‌مانده را با روش‌های گریز از مرکز^۸ و یا فیلتر^۹ جدا کرد. گریز از مرکز و فیلتر، روش‌های فیزیکی-

¹ Topography

² Signal error

³ Phase image

⁴ Pull out

⁵ hydrophobicity

⁶ Ultrasonic

⁷ Ball- mill

⁸ Centrifuge

⁹ Filtration