

کاربرد فناوری نانو در محصولات پلیمری با خواص مکانیکی بالا

سال انتشار: ۱۳۹۹

ویرایش نخست



شناسنامه

ستاد ویژه توسعه فناوری نانو

گروه رصد و تولید محتوای بخش ترویج صنعتی

طراحی و اجرا:	توسعه فناوری مهر ویزن	تلفن:	۰۲۱-۶۳۱۰۰
نظارت:	داود قزایلو report@nano.ir	نمابر:	۰۲۱-۶۳۱۰۶۳۱۰
پست الکترونیک:	ind@nano.ir polymer@nano.ir	پایگاه اینترنتی:	www.nano.ir www.indnano.ir
تهیه کننده:	رجب علی سراج	صندوق پستی:	۱۴۵۶۵-۳۴۴

فهرست مطالب

۳	مقدمه
۳	جایگزینی فلزات به عنوان یک مزیت رقابت پذیری
۴	قطعات پلیمری با خواص مکانیکی بالا
۵	بازار جهانی پلیمرهای با خواص بالا
۶	نانوافزودنی بهبود خواص مکانیکی
۸	مکانیزم های بهبود خواص مکانیکی با نانوافزودنی ها
۹	نانوافزودنی های بر پایه کربن
۹	نانورس ها
۱۰	نانوذرات الماس
۱۱	شرکت های بین المللی تولیدکننده نانوکامپوزیت های پلیمری با خواص مکانیکی بالا
۱۲	شرکت های داخلی تولیدکننده نانوکامپوزیت های پلیمری با خواص مکانیکی بالا
۱۵	نتیجه گیری

مقدمه

فناوری نانو رشته‌ای از دانش کاربردی و فناوری است که حوزه‌های گسترده‌ای را در برمی‌گیرد. موضوع اصلی آن نیز کنترل ماده یا تجهیزات در محدوده ۱ تا ۱۰۰ نانومتر است. در واقع فناوری نانو فهم و به‌کارگیری خواص جدیدی از مواد و سیستم‌هایی در این ابعاد است که اثرات فیزیکی جدیدی، عمدتاً متأثر از غلبه خواص کوانتومی بر خواص کلاسیک از خود نشان می‌دهند. فناوری نانو در تمامی گرایش‌های علمی راه‌یافته و از فناوری‌های نوینی است که با سرعت بالایی در حال توسعه است.

پیش‌بینی شده است که فناوری نانو عامل اصلی در پیشبرد فناوری و کسب و کار در این قرن است و سبب ایجاد مواد با عملکرد بالاتر، سیستم‌های هوشمند و روش‌های تولیدی جدید با تأثیر قابل توجهی بر همه جنبه‌های جامعه می‌شود. در حال حاضر محصولات متنوع حاوی نانومواد مورد استفاده قرار می‌گیرند. محصولاتی با قابلیت‌های منحصربه‌فرد جدید شامل تجهیزات با سطوح آسان تمیزشونده، محصولات مقاوم نسبت به خراش، ضربه‌گیرهای خودرو، لباس‌های مقاوم به چروک، کرم‌های ضد آفتاب، استخوان‌های مصنوعی با استحکام بالا و... هستند. یکی از جنبه‌های فناوری نانو کاربرد آن در افزایش خواص قطعات پلیمری است. نانوکامپوزیت‌های پلیمری دسته‌بندی از مواد چندفازی هستند که شامل نانوذرات پرکننده شامل نانوذرات نانورس‌ها، نانولوله‌ها، نانورشته‌ها و... هستند. به دلیل ابعاد نانومتری و نسبت سطح به حجم بسیار بالای نانوذرات، این مواد ترکیبی دارای خواص چند عملکردی هستند که توسط مواد مرسوم قابل دستیابی نیستند [۱]. از جمله این موارد می‌توان به لوله‌های فاضلاب مستحکم، درپچه‌های آدم‌روی با استحکام بالا و... اشاره کرد. با استفاده از فناوری نانو میزان استحکام قطعات پلیمری به اندازه قابل ملاحظه‌ای افزایش می‌یابد.

جایگزینی فلزات به عنوان یک مزیت رقابت‌پذیری

نانوکامپوزیت‌ها دسته‌ای از مواد پلیمری با خواص مکانیکی عالی، مدول بهبود یافته و پایداری ابعادی، قابلیت تأخیر در شعله، خواص سایشی و خراشی بهبود یافته، خواص حرارتی و فرایندپذیری عالی هستند که این خواص آن‌ها را جایگزین مناسبی برای قطعات فلزی مورد استفاده در صنعت نموده است [۱]. جایگزینی فلزات عموماً منجر به کاهش وزن، هزینه و زمان تولید می‌شود. عموماً قطعات فلزی نیاز به ۶ مرحله تولید دارند اما در قطعات پلیمری در یک مرحله گرانوله‌ها تبدیل به قطعه نهایی می‌شوند. به عنوان مثال، در حال حاضر حدود ۱۶ درصد از وزن خودرو از پلاستیک تولید شده است و با این روند در ۵ سال آینده امکان رسیدن آن به ۲۵ درصد نیز فراهم است [۲]. صنعت خودرو در کاربردهای مختلف می‌تواند از قابلیت‌های پلیمرهای نانوکامپوزیت استفاده کند که شامل موتور، سیستم انتقال قدرت، سیستم ترمز و تعلیق، سیستم آگزوز، مبدل‌های کاتالیستی، بدنه، رنگ و پوشش، تجهیزات الکتریکی و الکترونیکی است [۱]. این موضوع نیاز به استفاده از پلیمرهای مهندسی در قطعات تحت تنش، ارتعاش، حرارت و محیط‌های شدید کاری دارد. شرکت DuPont محدوده وسیعی از رزین‌های با کارایی بالا را برای محصولات با استحکام بسیار بالا، مقاومت به حرارت و کم‌هزینه تولید می‌کند. این رزین‌ها در طیف وسیعی از صنایع شامل صنعت خودرو و انرژی کاربرد دارند [۲]. PVC یکی از پر استفاده‌ترین پلیمر ترموپلاستیک و قدیمی‌ترین پلیمر سنتز شده توسط بشر است. در قرن ۱۹ میلادی محققان به صورت تصادفی PVC را کشف کردند اما ترکیبات تولیدی قابلیت استفاده در قطعات

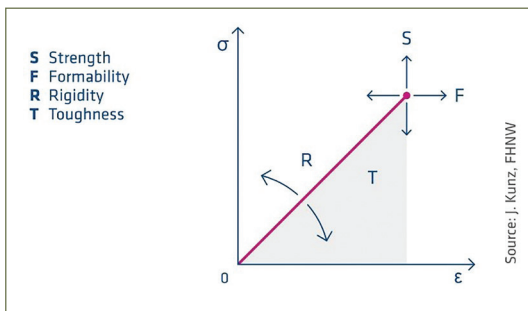
تجاری را نداشتند. در سال ۱۹۱۳ میلادی هاینریش پتنتی در مورد تولید PVC ثبت کرد که شامل پلیمریزاسیون وینیل کلراید با نور خورشید بود. در دهه ۵۰ میلادی بسیاری از شرکت ها شروع به تولید این ترکیبات کردند که به سرعت میزان تولید جهانی آن افزایش یافت. محصولات PVC به سرعت به در صنعت ساختمان به کار گرفته شدند. مقاومت آن ها به نور خورشید، ترکیبات شیمیایی و خورنده آن ها را گزینه مناسبی برای کاربردهای ساختمانی کرد. در حال حاضر PVC در ده سوم پر فروش ترین ماده پلیمری پس از پلی اتیلن و پلی پروپیلن است. هزینه کم، مقاومت بسیار عالی و قابلیت کارپذیری PVC را به عنوان انتخاب مناسبی برای صنایع ساختمان، نساجی، حمل و نقل و سلامت و بهداشت تبدیل کرده است [۳].

ترکیبات PVC با افزودنی های مختلف کاربردهای متنوعی در صنایع گوناگون یافته اند. تحقیقات نشان داده است که افزودن نانوذرات به PVC خواص آن را به صورت قابل ملاحظه ای افزایش می دهد. توزیع مناسب نانوذرات منجر به بهبود خواص مکانیکی، افزایش مدول بدون کاهش قابل توجه استحکام تسلیم و یا درصد افزایش طول می شود. در مقایسه با PVC بدون نانوذرات، دمای تجزیه حرارتی ۱۰ درصد از نانوکامپوزیت PVC کمی کاهش می یابد اما دمای تجزیه حرارتی ۵۰ درصد از ماده اولیه افزایش می یابد [۴].

قطعات پلیمری با خواص مکانیکی بالا

در کاربردهایی که قطعات پلیمری برای مقاومت در برابر تنش طراحی شده اند، خواص مکانیکی پلیمرها نقش مهمی بازی می کنند. خواص مکانیکی مواد شامل موارد زیر است:

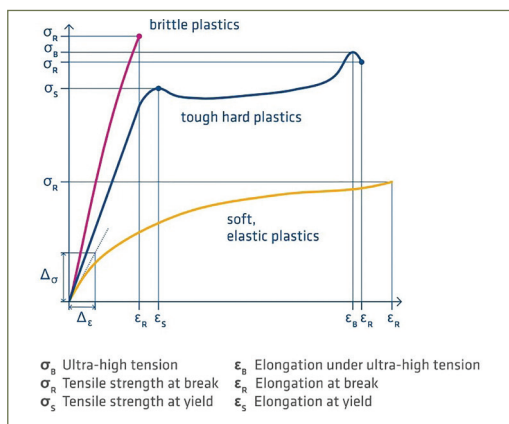
- استحکام^۱: مقاومت قطعه در برابر تنش های خارجی
 - سفتی^۲: مقاومت ماده در برابر تغییر شکل
 - سختی^۳: مقاومت ماده در برابر تغییر شکل ناشی از نیروی فشاری متمرکز
 - چقرمگی^۴: ظرفیت جذب ماده در حین ضربه
- در شکل ۱ این مفاهیم نشان داده شده است.



شکل ۱- مفاهیم استحکام، سفتی، سختی و چقرمگی در مواد [۵].

با استفاده از روش های استاندارد آزمون، امکان محاسبه این خواص در مواد وجود دارد. برای مثال، خواص کششی پلاستیک ها و صلبیت آن ها مطابق با استاندارد DIN EN ISO 527 و اعمال نیروی تک جهته با

دستگاه تست کشش اندازه‌گیری می‌شود. نتایج حاصل از این آزمون و رفتارهای محتمل براساس رفتار ماده در شکل ۲ نشان داده شده است [۵].



شکل ۲- حالت‌های مختلف رفتار ماده در برابر اعمال نیروی

کششی تک‌جهته [۵].

لازم به ذکر است که میزان بلورینگی، نوع و جهت‌گیری ذرات تقویت‌کننده و فرایند ساخت مورد استفاده اثر قابل ملاحظه‌ای بر خواص پلیمرها دارند که به منظور مقایسه خواص باید مدنظر قرار گیرند [۵].

بازار جهانی پلیمرهای با خواص بالا

پلیمرهای با خواص بالا از لحاظ خواص مکانیکی، پایدار حرارتی و شیمیایی با پلیمرهای مرسوم متفاوت هستند. این پلیمرها به منظور پاسخگویی به نیازهای خاصی تولید می‌شوند تا در محیط‌های خشن مورد استفاده قرار گیرند. پلیمرهای با خواص بالا در کاربردهای مختلف صنعتی استفاده می‌شوند و در تمام صنایع گسترش یافته‌اند. صنایع هوایی، نفت و گاز، پزشکی به دلیل نیاز به تجهیزات با خواص مکانیکی، شیمیایی بالا و در عین حال وزن کم، از جمله مصرف‌کنندگان پلیمرهای با خواص بالا هستند.

یکی از مهم‌ترین دلایل رشد بازارهای پلیمرهای با خواص بالا، وزن کمتر و قیمت به صرفه در برابر کارایی آن‌هاست. صنایعی چون خودرو، ساختمان و هوافضا نیاز به جایگزینی مواد سبک با خواص مشابه یا بالاتر از فلزات بدون کاهش کیفیت آن‌ها دارند. مزایای منحصربه‌فرد پلیمرها در مقابل قطعات فلزی منجر به رشد تقاضا برای این گونه از پلیمرها و گسترش قابل توجه بازار آن‌ها شده است [۶، ۷]. بررسی بازار این دسته از پلیمرها نشان می‌دهد که حجم این بازار در سال ۲۰۱۸ معادل ۱۳٫۲ میلیارد دلار بوده است و تا سال ۲۰۲۳ با رشد حدود ۴۰ درصدی به رقمی معادل ۱۸٫۲ میلیارد دلار خواهد رسید [۸].

برخی از مهم‌ترین شرکت‌های تولیدکننده پلیمرهای با خواص بالا DuPont، 3M، Solvay، Resirene، MC Polymers، Celanese، Arkema، Chevron Phillips، Victrex، Sabic Global technologies هستند [۶].

نانوافزودنی بهبود خواص مکانیکی

در چهاردهه اخیر استفاده از کامپوزیت های زمینه پلیمری^۵ (PMCS) افزایش چشمگیری داشته است. علت آن داشتن خواصی نظیر سفتی و استحکام ویژه بالا، پایداری ابعادی، خواص الکتریکی کافی و مقاومت به خوردگی عالی است. در ساخت نانوکامپوزیت ها از پلیمرهای ترموست نظیر اپوکسی، وینیل استر، پلی استر اشباع نشده، فنولیک، پلی آمیدها و سیانات استر استفاده می شود. علت آن فراوانی، قابلیت اجرای فرایند روی آن ها، قیمت پایین تجهیزات ساخت و هزینه پایین مواد خام است. با این حال عیب کامپوزیت های پایه اپوکسی احتمال بالای تخریب به دلیل تردی ذاتی رزین پخت شده است؛ بنابراین برای موارد خاص باید استحکام به ضربه آن ها افزایش یابد. از نقطه نظر ابعاد و مورفولوژی پرکننده سه نوع کامپوزیت الیافی (FRP)^۶، میکروکامپوزیت های ذره ای و نانوکامپوزیت موجود است. در بخش نانوکامپوزیت، پرکننده از جنس نانوذرات سیلیکا، نانوکلسیم کربنات، نانورس، نانوالیاف کربنی و نانولوله های کربنی است که با روش مخلوط کردن مکانیکی و گریز از مرکز و به دنبال ریخته گری معمولی یا قالب گیری فشاری تولید می شود. با استفاده از نانوکامپوزیت ها، بدون اینکه سایر خواص تحت تأثیر قرار گیرند، می توان خواص مکانیکی را بهبود داد. به عنوان مثال هم زمان می توان هم سفتی و هم چقرمگی را افزایش داد. افزایش مقاومت در برابر شعله ور شدن بدون کاهش خواص مکانیکی و رنگ رخ می دهد. با افزودن ۱/۰۱ درصد حجمی پرکننده با نسبت طول به عرض ۱۰۰۰ مدول یا نیک قطعه کامپوزیتی تا ۶ برابر افزایش می یابد؛ اما باید در نظر داشت که با افزودن نانوذرات، به تدریج کرنش شکست کاهش می یابد [۹].

جدول ۱- انواع کامپوزیت های پلیمری تقویت شده با نانوافزودنی ها

منبع	فرایند تولید	تقویت کننده	زمینه
[۱۱، ۱۰]	اختلاط مکانیکی، قالب گیری فشاری یا ریخته گری	نانوسیلیکا، نانوکلسیم، کربنات، نانورس، نانوالیاف، نانولوله کربنی، نانوذرات الماس	اپوکسی
[۱۱، ۱۰]		نانوذرات الماس، نانوذرات رس	شامل پلی آمید (PA)
[۱۰]		نانوذرات الماس	پلی آمید ایمید (PAI)
[۱۰]		نانوذرات الماس	پلی اتر اکتون (PEEK)
[۱۰]		نانوذرات الماس	پلی تترافلوئورو اتیلن (PTFE)

[۱۲، ۱۱]	اختلاط مکانیکی، قالب‌گیری فشاری یا ریخته‌گری	نانولوله کربنی، نانوهیدروکسی آپاتیت، نانوذرات رس	پلی اتیلن با وزن مولکولی بالا (UHMWPE)
[۱۱، ۸]	قابلیت فرایندپذیری عالی، استحکام بالا	نانوذرات رس	نایلون ۶، پلی استایرن، پلی اورتان، پلی پروپیلن
[۹]	اختلاط مذاب، اختلاط محلول، ریخته‌گری مذاب	نانولوله کربنی چندجداره	پلی اتیلن با وزن مولکولی کم، پلی پروپیلن، پلی استایرن، پلی وینیل کلراید
[۹]	اختلاط مذاب، فراوری مذاب، اختلاط محلول	گرافن	پلی اتیلن با وزن مولکولی بالا، پلی پروپیلن، پلی استایرن، پلی وینیل کلراید
[۱۳]		نانوسلیلیکات آمورف	پلی وینیل کلراید

مواد نانویی که به منظور پرکننده کامپوزیت‌های پلیمری استفاده می‌شوند، ویژگی‌های زیر را در کامپوزیت نهایی ایجاد می‌کنند:

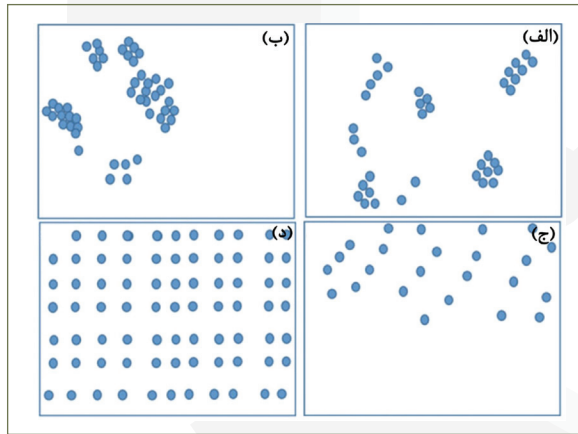
■ افزایش صلبیت و مدول الاستیک زمینه؛

■ افزایش استحکام و کرنش شکست؛

■ افزایش مقاومت به شروع ترک و رشد آن (تافنس شکست)؛

■ کاهش ضریب انبساط حرارتی، انقباض حرارتی، افزایش پایداری حرارتی پلیمر زمینه که باعث کاهش تنش حرارتی می‌شود.

برای دستیابی به اهداف بالا معمولاً از پرکننده‌هایی استفاده می‌شود که مدول الاستیک بالا و ضریب انبساط حرارتی کمتر نسبت به زمینه دارند این مواد که امروزه مورد مصرف قرار گرفته‌اند عبارت‌اند از نانورس، نانوسیلیکا، نانوالیاف کربنی و نانولوله‌های کربنی. چالش اصلی تولید نانوکامپوزیت‌های پلیمری توزیع مناسب ذرات تقویت‌کننده در زمینه پلیمری است. با توجه به تمایل بالای ذرات نانومتری به کلوخه‌ای شدن ناشی از انرژی سطحی بالا، توزیع این ذرات در زمینه پلیمری اهمیت بسیار بالایی دارد. کلوخه‌ای شدن نانوذرات در زمینه پلیمری به عنوان نقاط تمرکز تنش عمل کرده و خواص مکانیکی را کاهش می‌دهد. شکل ۳ نمودار شماتیکی از حالات مختلف توزیع نانوذرات را در زمینه پلیمری نشان می‌دهد. بهترین حالت قرارگیری نانوذرات در زمینه پلیمری توزیع و پراکندگی یکنواخت نانوذرات است که در شکل ۳-د نشان داده شده است.



شکل ۳- تصویر شماتیک توزیع و پراکندگی نانوذرات در زمینه پلیمری [۹].

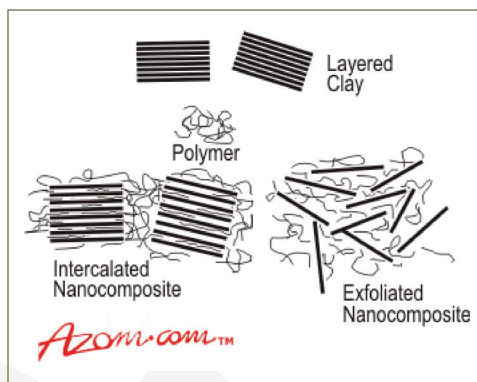
نانوذرات کروی سیلیکا به عنوان فیلر تقویت کننده پلیمرها استفاده می شوند زیرا مدول الاستیک بالا (70 GPa) سطح ویژه بالا ($380-50 \text{ m}^2/\text{g}$) پایداری حرارتی بالا (1200°C)، چگالی پایین (1.8 g/cm^3) و ضریب انبساط حرارتی پایین دارد و قیمت آن پایین ($18.5 \text{ USD } \$/\text{Kg}$) است. بررسی اثر افزودن نانوذرات سیلیکا بر اپوکسی DGEBA با نام تجاری Epikote 828 نشان می دهد که با افزودن نانوسیلیکا استحکام تسلیم و مدول کششی با افزایش مقدار نانوسیلیکا دائماً در حال افزایش بوده و در مقدار ۲۰ درصد وزنی نسبت به حالت اولیه بدون ذرات نانویی ۲۵ درصد افزایش داشته است. همچنین با افزودن نانوذرات SiO_2 با سایز 12 nm پیش فراوری شده در استون و در درصدهای مختلف به پلیمر اپوکسی Bisphenol-A جهت ساخت کف پوش پلیمری سختی، استحکام کششی، درصد ازدیاد طول، مقاومت سایشی و دمای شیشه ای شدن افزایش یافت. افزودن نانوذرات بنتونیت بر خواص مکانیکی اپوکسی DGEBA نیز بهبود خواص مکانیکی را نشان می دهد. حضور نانوذرات رس باعث بهبود استحکام و سفتی زمینه اپوکسی می شود که در نتیجه آن استحکام فشاری اپوکسی افزایش می یابد. استفاده از نانوافزودنی هایی مانند گرافیت لایه ای نانومتری علاوه بر بهبود خواص مکانیکی، پایداری حرارتی و ضریب انبساط حرارتی اپوکسی نیز بهبود می یابد.

مکانیزم های بهبود خواص مکانیکی با نانوافزودنی ها

کامپوزیت های پلیمری که اندازه ذرات تقویت کننده آن ها در محدوده نانومتری باشد، نانوکامپوزیت پلیمری نامیده می شوند. این مواد عموماً وزن کمتری دارند و خواص آن ها نسبت به کامپوزیت های مرسوم به صورت قابل ملاحظه ای بهبود می یابد. مثال هایی از تقویت کننده های مورد استفاده در نانوکامپوزیت های پلیمری عبارت اند از: نانولوله کربنی، نانوذرات رس نانوسیلیکات، نانوبلورهای سلولزی، نانوپولک های گرافیت و ابعاد این نانوافزودنی ها در محدوده نانومتری است. با افزودن این نانوذرات به زمینه پلیمری به دلیل استحکام بالاتر آن ها، خواص کامپوزیت حاصل افزایش می یابد. از طرف دیگر به دلیل ابعاد ریزتر نانوذرات، حفرات

موجود در زمینه پلیمری پرمی شود و ساختار متراکم تری ایجاد می شود و میزان عیوب ساختاری در قطعه نهایی کاهش می یابد و خواص مکانیکی قطعه نهایی بهبود می یابد [۱۲].

میزان بهبود خواص مکانیکی پلیمرها و انتقال مؤثر نیرو از زمینه به ذرات تقویت کننده شدیداً وابسته به توزیع نانوذرات در زمینه پلیمری است. به عنوان مثال حالت توزیع نانوذرات رس در زمینه پلیمری به صورت *intercalated* و *exfoliated* است که در شکل ۴ نشان داده شده است. بهترین حالت برای ساخت نانوکامپوزیت پلیمری با ذرات رس توزیع یکنواخت نانوذرات رس و *exfoliation* کامل آن هاست و هرگونه تجمع نانوذرات رس منجر به کاهش خواص نهایی قطعه خواهد شد [۱۱].



شکل ۴- دو نوع حالت *intercalated* و *exfoliated* در نانوکامپوزیت های رسی

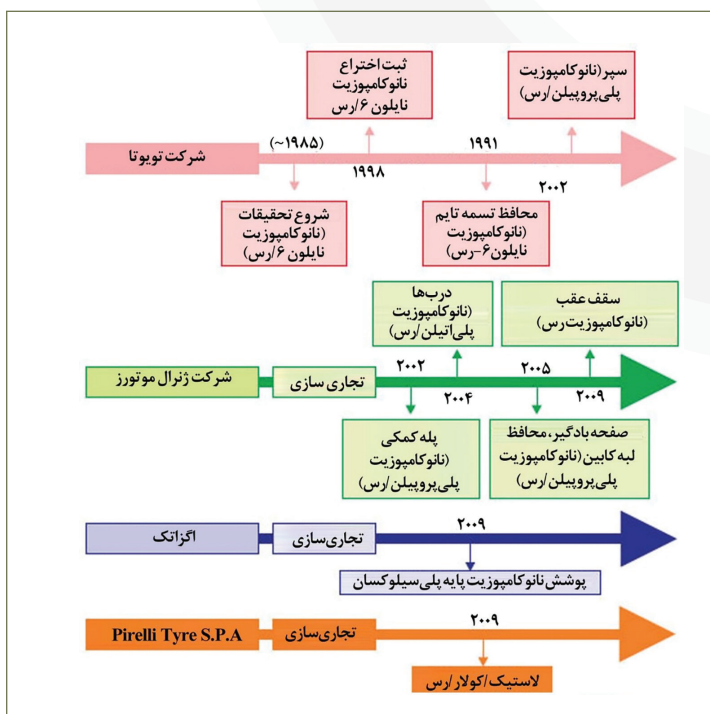
نانوافزودنی های بر پایه کربن

نانولوله های کربنی (به ویژه چند لایه)، نانوپولک های گرافیت و نانورشته های کربنی با بهبود خواص و فرایند پذیری و همچنین کاهش هزینه به صورت تجاری در تولید نانوکامپوزیت های پلیمری استفاده شده اند. استحکام کششی نانولوله کربنی تک لایه در حدود $300-100$ GPa و مدول یانگ آن ها در حدود 1100 GPa است. نانوپولک های گرافیت و صفحات گرافن مدول یانگ معادل 1100 GPa دارند.

نانورس ها

از میان نانومواد مختلف، نانورس ها به عنوان افزودنی تجاری برای تولید نانوکامپوزیت ها استفاده شده اند و حدود ۸۰ درصد حجم نانومواد مصرفی در این بخش را شامل می شوند [۱]. دلیل تقاضای بالا برای نانوذرات رس هزینه کمترین ترکیبات و بهبود هم زمان سفتی و چقرمگی و خواص مکانیکی آن هاست. نانوذرات رس به منظور تولید نانوکامپوزیت در پیش ماده پلیمرهای مختلفی از جمله نایلون ۶، اپوکسی ها، پلی آمیدها، پلی استایرن، پلی اورتان، پلی اوفین ها مانند پلی پروپیلن و پلی اتیلن استفاده شده است. شرکت تویوتا به از نانوذرات رس در بهبود چقرمگی، استحکام و مدول نایلون ۶ استفاده کرده است [۱۱]. تجاری سازی

پلیمرهای نانوکامپوزیت از سال ۱۹۹۱ در شرکت تویوتا آغاز شده است. این شرکت پوسته تسمه تایم را با نایلون ۶/۶ رس تولید کرده است. تیم تحقیقاتی تویوتا بهبود خواص قطعات کامپوزیتی پلیمری دیگر را از جمله پلی استایرن، آکریلیک، پلی ایمیدها، رزین اپوکسی و الاستومرها گزارش کرده است. به طور هم زمان، شرکت یونیتی کای ژاپن نیز از نانوکامپوزیت نایلون ۶ در پوسته موتور میتسوبیشی GDI استفاده کرده است که منجر به ۲۰ درصد کاهش وزن خودرو شده است. در سال ۲۰۰۲ شرکت جنرال موتورز پلی اولفین تقویت شده با ۳ درصد نانورس را با همکاری شرکت Basell تولید و در پله کمکی خودروهای سافاری و شورلت آسترو و درب های شورولت ایمپالاس استفاده کرده است [۱۴]. شکل ۵ روند تجاری سازی قطعات نانوکامپوزیت پلیمری را در شرکت های مختلف تولید خودرو نشان می دهد.



شکل ۵- روند استفاده از نانوکامپوزیت پلیمر-رس در صنعت خودرو [۱].

نانوذرات الماس

کامپوزیت های پلیمر/نانوذرات الماس خواص مختلفی در مقایسه با پلیمرهای اصلاح نشده از خود نشان می دهند. بهبود خواص مکانیکی و حرارتی این نانوکامپوزیت ها به دلیل خواص حرارتی و مکانیکی الماس و اندازه نانومتری و توزیع مناسب این ذرات در زمینه پلیمری است. عامل دار کردن سطح نانوذرات الماس

باعث برهم کنش آن‌ها با مولکول‌های پلیمر و سایر مواد پُرکننده می‌شود. به خصوص در شرایطی که پلیمرها محتوی پُرکننده‌ها باشند، بهبود خواص قابل ملاحظه خواهد بود حتی زمانی که مقدار کمی نانوذرات الماس افزوده می‌شود. این نانوذرات به منظور افزایش مقاومت سایشی، افزایش استحکام تسلیم و مدول یانگ، افزایش چقرمگی شکست، افزایش هدایت حرارتی بدون تأثیر بر عایق الکتریکی بودن، کاهش ضریب انبساط حرارتی، افزایش محدود کاری دمای بالا و پایین کاربرد دارند. پلیمرهایی که امکان بهبود خواص آن‌ها فراهم است شامل پلی‌آمید (PA)، پلی‌آمید ایمید (PAI)، پلی‌اتر اترکتون (PEEK)، پلی‌تترافلوئورو اتیلن (PTFE) و... هستند.

توزیع مناسب نانوالماس‌ها در زمینه پلیمر اهمیت بسیار بالایی دارد و ممکن است نیاز به مرحله اختلاط با استفاده از اکسترودر دو مارپیچی باشد، ترکیب اولیه نانوذرات الماس و سایر پُرکننده‌ها در حین فرایند آسیاکاری و یا افزودن نانوذرات الماس در حلال باید مناسب باشد. ممکن است از فرایند اختلال مکانیکی برشی و یا اولتراسونیک نیز استفاده شود [۱۰].

شرکت‌های بین‌المللی تولیدکننده نانوکامپوزیت‌های پلیمری با خواص مکانیکی بالا

■ شرکت DuPont

شرکت دوپنت طیف وسیعی از نانوکامپوزیت‌های ترموپلاستیک را طراحی و تولید کرده است که امکان ساخت قطعات با وزن کمتر، استحکام بالا و قابلیت قالب‌گیری بالا را دارند. این قطعات در صنایع خودرو، برق، الکترونیک و کاربردهای صنعتی قابل استفاده هستند. نانوکامپوزیت تقویت شده با شیشه، یکی از محصولات شرکت دوپنت است که با وجود درصد بسیار کمتر شیشه خواص مشابهی با PET تقویت شده با ذرات شیشه دارد؛ بنابراین وزن قطعات ساخته شده با این نانوکامپوزیت بسیار کمتر است [۱۵].

■ شرکت UGENT

محصولات نانوکامپوزیتی پلیمری تقویت شده شرکت UGENT طیف وسیعی از پلیمرها از جمله پلیمرهای عمومی، پلیمرهای مهندسی و پلاستیک‌های با خواص بالا را شامل می‌شود [۱۶]. این شرکت از افزودنی‌های نانوالیاف کربن، نانولوله کربنی و گرافن برای اصلاح نانوکامپوزیت‌های پلاستیکی استفاده می‌کند. محصولات نانوکامپوزیتی این شرکت با خواص مکانیکی بسیار عالی حاوی نانوالیاف کربن هستند که در مقایسه با مواد کامپوزیتی مرسوم برتری‌های زیر را دارند:

■ وزن کم، استحکام بالا، کاهش هزینه حمل و نقل؛

■ مقاومت در برابر خوردگی و مقاومت در دمای بالا؛

■ فراوری آسان و قابلیت بازیافت؛

■ و مناسب با روند فعلی و آینده جایگزینی پلیمرها با فولاد.

نانوکامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده شرکت Ugent در کاربردهای مختلفی از جمله هوافضا، خودرو، پره توربین بادی، نظامی، ساختمان، تجهیزات ورزشی، صنعت شیمی و... کاربرد دارد. نمونه‌ای از کاربردهای این نانوکامپوزیت‌های پلیمری در شکل ۶ نشان داده شده است.



شکل ۶- نمونه‌ای از کاربرد نانوکامپوزیت پلیمری شرکت UGENT [۱۶].

شرکت کربودئون Carboneon

شرکت کربودئون (Carboneon) جزء پیشتازان فرمولاسیون پلیمرهاست. افزودن الماس باعث افزایش استحکام، چقرمگی، سایش و هدایت حرارتی ترموپلاستیک‌ها می‌شود. نانوذرات الماس با نام تجاری uDiamond® به پلیمرهای PAEK، PA، PAI، PC، PLA و PTFE افزوده می‌شوند تا خواص آن‌ها بهبود یابد. با افزودن این نانوذرات استحکام تسلیم، مدول یانگ و چقرمگی شکست را افزایش داده و محدوده عملکرد این مواد پلیمری را گسترش می‌دهند. ترکیبات مختلفی که این شرکت تولید می‌کند در جدول ۲ نشان داده شده است [۱۰].

جدول ۲- مشخصات نانوآفزودنی بر پایه الماس تولید شرکت کربودئون [۱۰]

ردیف	نام محصول	توضیحات
۱	uDiamond® Amine P	پودر نانوذرات الماس عامل دار شده با آمین، مناسب برای کاربردهای ترموپلاستیک و اپوکسی
۲	uDiamond® Vox P	نانوذرات الماس کربوکسیله شده، برای کاربردهای سیلیکونی
۳	uDiamond® Hydrogen P	پودر نانوالماس هیدروژنه شده
۴	uDiamond® Blend Nuevo	مخلوط نانوالماس و گرافیت

شرکت‌های داخلی تولیدکننده نانوکامپوزیت‌های پلیمری با خواص مکانیکی بالا

شرکت پیشگام پلاست اهواز



شرکت پیشگام پلاست اهواز تولیدکننده انواع لوله و اتصالات UPVC با بهره‌گیری از فناوری نانو است. اتصالات این شرکت خواص مکانیکی و حرارتی بهتری نسبت به نمونه‌های مشابه دارند. کاربرد عمده این نوع اتصالات در سیستم‌های لوله‌کشی ساختمان‌هاست. وجود پرکننده‌های نانویی باعث افزایش استحکام، مدول و چقرمگی زمینه پلیمری می‌شوند. این خواص غیرمعمول به دلیل سطح ویژه بسیار

بالای نانوذرات است.



شکل ۷- انواع لوله و اتصالات فاضلاب تولید شرکت پیشگام پلاست اهواز.

مجتمع تولید لوله و اتصالات پلیمر یاس



شرکت تولید لوله و اتصالات پلیمر یاس، با بهره‌گیری از فناوری نانو، محصولات PVC مقاوم به ضربه و سخت تولید می‌نماید. حضور نانوذرات پرکننده در زمینه پلیمری PVC به‌طور قابل توجهی استحکام، مدول و سفتی زمینه پلیمری را افزایش می‌دهند. در جدول ۳ اثر افزودن نانوذرات بر خواص قطعات PVC نشان داده شده است. در این آزمون‌ها «دمای نرمی و یکات» (دمایی است که در آن فرورونده به میزان ۱ میلی‌متر در نمونه فرو می‌رود)، «پایداری حرارتی» (میزان تشکیل حباب یا ایجاد ترک در اثر حرارت است که طبق استاندارد وسعت پوسته شدگی سطحی باید کمتر از ۵ درصد باشد)، «آزمون ضربه» (بررسی ظاهر نمونه‌ها پس از رها سازی از ارتفاع ۴ متری در دمای ۰ درجه سانتی‌گراد است که طبق استاندارد TIR (نرخ واقعی ضربه) باید کمتر از ۱۰ درصد باشد) و «میزان خوردگی» محصول با قراردادن آن در محلول دی‌کلرومتان سنجیده می‌شود [۱۷].

جدول ۳- مقایسه خواص قطعه PVC پس از افزودن نانوذرات [۱۷]

میزان خوردگی	مقاومت در برابر ضربه	مقاومت حرارتی	دمای نرمی و یکات (°C)	
بدون خوردگی	$TIR \geq 10\%$	$\geq 5\%$ (بدون حباب یا ترک)	$78 \geq$	حد قابل قبول استاندارد
بدون خوردگی	20%	2% (بدون حباب یا ترک)	83,1	نمونه شاهد
بدون خوردگی	6%	3% (بدون حباب یا ترک)	81,4	نمونه نانو

شاهین سازه فجر

درب و پنجره های UPVC از محصولات پلیمری مستحکم و بادوامی هستند که در صنعت ساختمان مورد توجه قرار گرفته اند. محصول نانویی UPVC (ماژول)، برای تولید قاب ها و پایه پنجره های دوجداره مستحکم و مقاوم استفاده می شود تا قطعه بازشوی پنجره یا بازشوی درب روی آن سوار شود. این محصول با خواص مکانیکی بالا، به عنوان ستون میانی پنجره ثابت یا جهت پوشاندن قسمتی از درب و پنجره یا جهت ساخت درب دولنگه یا پنجره های فرانسوی نیز مورد استفاده قرار می گیرد تا بتوان هر دولنگه درب یا پنجره را باز کرد. به علاوه هنگام بازسازی پنجره های قدیمی می توان این پروفیل را برای پوشش بافت قدیمی مورد استفاده قرار داد.



شکل ۸- درب و پنجره های UPVC با استحکام و دوام بالا

بویا پلیمر ظریف کار برتر

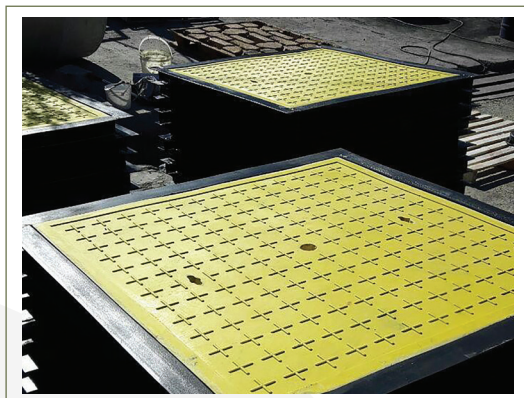
پلی وینیل کلراید (PVC) سومین پلیمر سنتزی رایج بعد از پلی اتیلن (PE) و پلی پروپیلن (PP) است. PVC یک پلاستیک سبک و محکم است که در صنعت ساختمان سازی به کار می رود. این ماده با اضافه کردن پلاستی سائیزرها نرم تر و قابل انعطاف تر می شود. اگر پلاستی سائیزرها اضافه نشوند این ماده به عنوان پلی وینیل کلراید پلاستی سائیز نشده (UPVC) شناخته می شود. UPVC دارای مقاومت شیمیایی بالا در محدوده دمای کاری و گسترده وسیع فشارهای عملیاتی است. به دلیل ویژگی های استحکام طولانی مدت، سختی بالا و مقرون به صرفه بودن، سیستم های UPVC برای بخش عظیمی از اتصالات و لوله های پلاستیکی در نظر گرفته می شوند. افزودن نانومواد استحکام و سختی UPVC را به طور قابل توجهی بهبود می بخشد [۱۹].

طراحی مهندسی متین (توسعه هنر متین)

دریچه آدمرو (Manhole) سرپوشی است که برای ورودی های آدمرو و به عنوان دریچه و درپوش های فاضلابی استفاده می شود. برای جلوگیری از افتادن کسی یا چیزی درون دریچه و ممانعت از ورود افراد و مواد غیرمجاز به درون آن به کار می رود. استفاده از سرپوش دریچه های آدمرو به رم باستان برمی گردد که از جنس سنگ و برای



دریچه‌های فاضلاب به کار می‌رفتند. این نوع سرپوش‌ها معمولاً از چدن، بتن و یا ترکیبی از هر دو ساخته می‌شوند که باعث ارزان بودن، مقاوم و سنگین بودن (معمولاً با وزن بیشتر از ۵۰ کیلوگرم) آن‌ها می‌شود. دریچه‌های آدم‌رو همچنین می‌توانند از پلیمرهای تقویت شده با الیاف شیشه یا دیگر مواد کامپوزیتی ساخته شوند. سرپوش‌های رایج به سادگی فرسوده شده و عمر کمی دارند. به همین دلیل استفاده از دریچه‌های پلیمری به دلیل تولید ارزان قیمت، مقاومت مکانیکی و هیدرولیکی بالا و همچنین دارا بودن مقاومت شیمیایی و مقاومت در برابر خوردگی در سراسر جهان در حال افزایش است. این محصول دریچه آدم‌رو (Manhole) حاوی نانوذرات است. ذرات دارای توزیع اندازه‌ای بین ۲۰ تا ۵۰ نانومتر بوده و خلوص آن ۹۹ درصد است. با افزودن نانوذرات به عنوان نانو پرکننده به طور ویژه استحکام، مدول و سختی زمینه پلیمری را با نفوذ در آن افزایش می‌دهند [۱۳].



شکل ۹- دریچه آدم‌رو (دریچه و درپوش‌های فاضلابی)

نتیجه‌گیری

قابلیت‌های منحصر به فرد نانوکامپوزیت‌های پلیمری توجه صنایع مختلفی را به این ترکیبات جدید مهندسی جلب کرده است. نیاز روزافزون صنایع به قطعات مستحکم و سبک منجر به گسترش سرمایه‌گذاری در این زمینه شده است. به عنوان مثال در صنایع خودرو سازی اروپایی بیش از ۵ درصد گردش مالی در زمینه تحقیق و توسعه صرف می‌شود و تمرکز آن‌ها بر توسعه قطعات با دوام، مستحکم و همچنین پوشش‌ها و رنگ‌ها بوده است. به همین جهت پیش‌بینی می‌شود طی سال‌های آینده انواع پلیمرهای نانوکامپوزیت در صنعت خودرو استفاده شود. روند مشابهی در تمامی صنایع ایجاد شده است، با توجه به بازار روبه‌رشد نانوکامپوزیت‌های پلیمری در سراسر جهان، ضروری است توجه بیشتری به این حوزه شود و صنایع مختلف با قابلیت‌های این دسته از مواد جدید آشنا شده و در محصولات خود از آن استفاده نمایند. نمونه‌های موفق استفاده از نانوکامپوزیت‌های پلیمری در داخل کشور وجود دارد و با توجه به پیش‌بینی‌های انجام شده، رشد قابل توجه بازار این محصولات در آینده رخ خواهد داد؛ بنابراین ضروری است براساس یک برنامه مدون و با حمایت همه جانبه از شرکت‌ها و فناوران این حوزه، زمینه رشد و توسعه این محصولات در داخل کشور فراهم شود.

پی‌نوشت‌ها

۱ Strength

۲ Stiffness

۳ Hardness

۴ Toughness

۵ Polymer Matrix Composites

۶ Fiber Reinforced Polymer

مراجع

۱ <https://www.nanowerk.com/spotlight/spotid=23934.php>.

۲ <http://www.dupont.com/products-and-services/plastics-polymers-resins/articles/innovative-ideas-for-metal-replacement.html>.

۳ <http://www.pvc.org/en/p/history>.

۴ <https://pdfs.semanticscholar.org/3b2a/054c387c7bf8f6bab31a2dcc03ca00921d42.pdf>.

۵ <https://www.ensingerplastics.com/en/shapes/plastic-material-selection/mechanical-properties>.

۶ <https://www.industryarc.com/Report/11659/high-performance-polymers-market.html>.

۷ <https://www.psmarketresearch.com/market-analysis/high-performance-plastic-market>.

۸ <https://www.bccresearch.com/market-research/plastics/high-performance-plastics-applications-and-global-markets.html>.

۹ S.S. Ray, Processing of Polymer-based Nanocomposites: Processing-structure-property-performance relationships, Springer International Publishing 2018.

۱۰ <http://www.carbodeon.com/index.php/en/applications/high-strength-harsh-environment-polymers>.

۱۱ https://deepblue.lib.umich.edu/bitstream/handle/2027.42/77887/akaushik_1.pdf?sequence=1.

۱۲ https://www.iaeme.com/MasterAdmin/uploadfolder/IJMET_09_11_015/IJMET_09_11_015.pdf.

۱۳ <https://www.matinfrp.com/>.

۱۴ P.G.S. Nahin, B. P., Organoclay-polyolefin compositions, UNION OIL CO, United States, 1963.

۱۵ <https://www.plasticsnet.com/doc/dupont-develops-advanced-nanocomposites-for-e-0001>.

۱۶ [http://www.ugenttech.com/Products-UG%20nanocomposite%20high%20strengt%20polymer%20\(UG-HSP\)%20.html](http://www.ugenttech.com/Products-UG%20nanocomposite%20high%20strengt%20polymer%20(UG-HSP)%20.html).

۱۷ <https://polymeryas.com/>.

۱۸ <https://www.mehrsazgostar.com/#>.

۱۹ <http://www.paydarpolymer.ir/fa/>