



# کامپوزیتها

Composites (2)

تألیف: مهندس ماسیس اکبریان  
مهندس محمود محراب زاده

کلیدواژه:

کامپوزیتها، مواد و پلاستیکهای تقویت شده، الیاف، چندلایه‌ها

چکیده:

در شماره قبل در رابطه با نکات تاریخی و اهمیت کامپوزیتها، انواع ماتریسهای فلزی و سرامیکی مطالبی ارائه گردید. در این شماره در ادامه بحث، ابتدا به ماتریسهای پلی مری که از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند، پرداخته می‌شود و سپس در رابطه با تقویت کننده‌ها توضیحاتی آورده و تقویت کننده‌های بودی به تفصیل مورد بررسی قرار خواهد گرفت و بررسی تقویت کننده‌های لیفی که جایگاه برتری در کامپوزیتها دارند به شماره آینده موقوف می‌گردد.

## ماتریس‌های پلی مری

پلی مرها از نظر ساختاری بسیار پیچیده‌تر از فلزات و سرامیکها هستند، ولی با هزینه کم و به سهولت فرآیند می‌شوند. از طرف دیگر، این مواد استحکام و مدول کشسانی کمتر و گستره دمای کاربردی پائین‌تری دارند. قرار گرفتن دراز مدت پلی مرها در معرض نور ماوراء بنفش یا بعضی از حلالها، تضعیف خواص آنها را به دنبال دارد. چون در پلی مرها پیوندهای کووالانسی غالب‌اند، معمولاً این مواد رسانایی گرمایی هدایت حرارتی و الکتریکی ضعیفی از خود نشان می‌دهند. در هر صورت، معمولاً پلی مرها در مقایسه با فلزات در مقابل مواد شیمیایی مقاوم‌ترند.

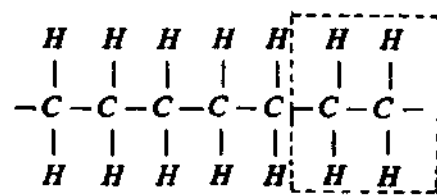
### Key Words:

1 - Composites 2 - Reinforced materials and plastics 3 - Fibers  
4 - Laminates

پلی مرها از نظر ساختاری مولکولهای زنجیری بزرگی هستند (از این رو به آنها ماکرو مولکول نیز اطلاق می شود) که پیوندهای کووالانسی انتهایی کربن استخوان بندی اصلی زنجیر را تشکیل می دهند. فرایند تشکیل مولکولهای بزرگ از مولکولهای کوچک (مونومر) را پلی مرشدن می نامند. بدین معنی که پلی مرشدن، فرایند اتصال تعدادی مونومر به یکدیگر و تشکیل پلی مر است. به طور کلی، فرایند پلی مرشدن، به دو گروه مهم طبقه بندی می شود:

۱ - پلی مر شدن تراکمی: در این فرایند واکنش مولکولها به صورت مرحله ای روی می دهد و در هر مرحله یک مولکول ساده که معمولاً آب است، به عنوان محصول جانبی تشکیل می شود.

۲ - پلی مرشدن افزایشی: در این فرایند مونومرها، بدون تولید محصول جانبی به یکدیگر متصل می شوند. پلی مرشدن افزایشی معمولاً در حضور کاتالیزور انجام می شود. افزایش خطی مولکولهای اتیلن ( $-CH_2-CH_2-$ ) منجر به تشکیل پلی اتیلن (زنجیر مولکولهای اتیلن) می شود که جرم نهایی پلی مر مجموع جرم مونومرهاست:



دو گروه اصلی پلی مرها که به وسیله هر دو روش پلی مرشدن تراکمی و افزایشی تولید می شوند و از نظر رفتار با یکدیگر متمایز اند، پلی مرهای گرما سخت و گرمانرم نامیده می شوند. تفاوت رفتار آنها، مبتنی بر ساختار و شکل مولکولی، اندازه وزن مولکولی و بسا مقدار و نوع پیوندها (کووالانسی یا نیروی وان دروالس) است. در این قسمت ابتدا ساختار اصلی مولکولی که اصطلاحاً آرایش فضایی مولکولهای زنجیره نامیده می شود، تشریح می گردد. شکل ۱ انواع مختلف آرایش های فضایی مولکولهای زنجیر پلی مرها را نشان می دهد.

۱ - پلی مرهای خطی: همان طور که از نام آنها مشخص می شود، این نوع پلی مرها شامل زنجیرهای طویل از آنها، حاوی گروههای جانبی هستند. از این گروه می توان پلی اتیلن، پلی وینیل کلراید و پلی متیل متاکریلات را نام برد. شکل ۱ الف) آرایش فضایی پلی مرهای خطی را نشان می دهد. در این شکل به بیخ خوردن و خم شدن زنجیر توجه کنید.

۲ - پلی مرهای شاخه دار: شاخه ها که از زنجیر اصلی معمولاً کوتاهتر و از همان مونومرها تشکیل شده اند، در پلی مرهای خطی، پلی مرهای پیوند عرضی شده و یا هر نوع پلی مر دیگر ممکن است وجود داشته باشد. شکل ۱ ب).

۳ - پلی مرهای دارای پیوندهای عرضی: در این حالت، مولکولهای یک زنجیر با مولکولهای زنجیر دیگر پیوند تشکیل می دهند. شکل ۱ ج).

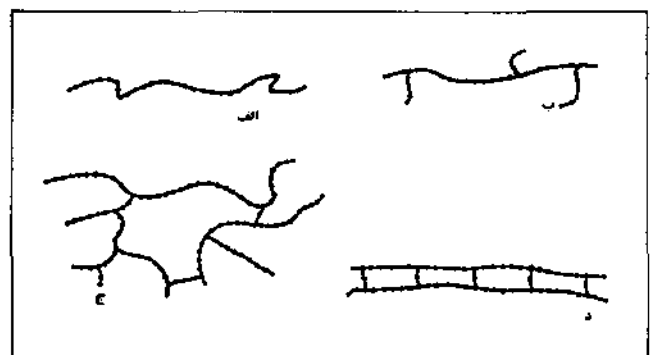
تشکیل پیوند عرضی بین زنجیرها منجر به شبکه ای سه بعدی می گردد. پیوندهای عرضی لغزش مولکولها بر روی یکدیگر را مشکل می سازند و در نتیجه پلی مر محکم و سخت می شود.

۴ - پلی مرهای نردبانی: اگر دو پلی مر خطی به طرز منظمی به یکدیگر متصل شوند (شکل ۱ د)) یک پلی مر نردبانی به دست می آید. غیر منتظره نیست که پلی مرهای نردبانی محکم تر از پلی مرهای خطی هستند.

### دمای انتقال شیشه ای

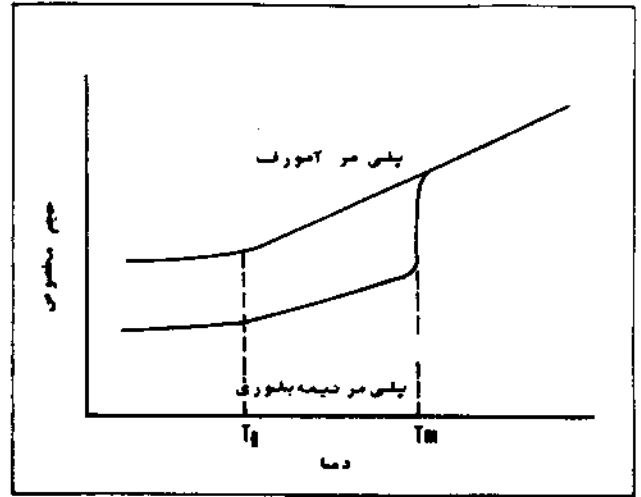
فلزات خالص و بلوری دمای ذوب کاملاً مشخصی دارند. نقطه ذوب، دمایی است که در آن دما بلورهای تشکیل شده در اثر گرما کاملاً منهدم و ذوب می شوند. ناپدید شدن بلورها در پلی مرها در گستره دمایی وسیعی رخ می دهد. شکل ۲ منحنی حجم ویژه (واحد جرم/حجم) را بر حسب دما برای پلی مرهای آمورف و نیمه بلوری نشان می دهد. هنگامی که پلی مر ذوب شده ای سرد می شود، منقبض می گردد. این انقباض به دلیل کاهش ارتعاش گرمایی مولکولها و کم شدن حجم آزاد روی می دهد. بدین معنی که مولکولها فضای کمتری را اشغال می کنند. در مورد پلی مرهای آمورف، این انقباض تا زیر  $T_g$  نقطه ذوب پلی مر بلوری و  $T_g$  دمای انتقال شیشه ای (دمائی که پلی مر مایع بسیار سرد شده و به علت ویسکوزیته بسیار زیاد، پشدت سخت می گردد) ادامه می یابد. ساختار ماده در زیر  $T_g$  عمدتاً همانند ساختار آن در حالت مایع است.

به دلیل اینکه این پدیده نوعی شیشه ای شدن است، این نقطه را دمای انتقال شیشه ای می نامند. توجه داشته باشید که در مورد پلی مرهای آمورف، بسا ساختاری شیشه ای که توسط مولکولهای آلی ساخته شده است، سروکار داریم. دمای انتقال شیشه ای،  $T_g$ ، از چند نقطه نظر به نقطه ذوب جامدات بلوری شباهت دارد. بعضی خواص فیزیکی مثل ویسکوزیته، گنجایش گرمایی، مدول کشسانی و ضریب انبساط گرمایی در  $T_g$  به طور ناگهانی تغییر می کند. مثلاً مقدار  $T_g$  در پلی استیرن در حدود  $100^\circ C$  است، بنابراین در دمای اتاق پلی استیرن سخت و سفید است. در صورتی که در لاستیک معمولاً مقدار  $T_g$  در حدود  $75^\circ C$  - بوده و بنابراین لاستیک در دمای اتاق انعطاف پذیر است. براین اساس مقدار  $T_g$  تابعی از ساختار



شکل ۱ - آرایش فضایی مولکولهای زنجیری متفاوت: الف) خطی، ب) شاخه دار، ج) پیوند عرضی شده، د) نردبانی

شیمیایی پلی مر است. مثلاً اگر یک پلی مره ساختاری با استخوان بندی سخت و یا گروههای شاخه‌ای حجیم داشته باشد، مقدار  $T_g$  در آن بسالاً خواهد بود.



شکل ۲ - حجم ویژه بر حسب دما برای یک پلی مر آمورف و یک پلی مر نیمه بلوری

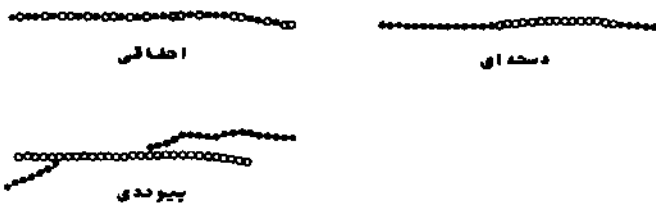
پلی مرهای پیوند عرضی شده، پلی مرهای گرماسخت نامیده می‌شوند. پلی مرهای گرماسخت در اثر گرمای زیاد تجزیه می‌شوند. پیوندهای عرضی، لغزش مولکولها را روی یکدیگر مشکل می‌کند. بنابراین پلی مر محکم و سخت می‌شود. به عنوان مثال لاستیک پیوند عرضی شده بسا گوگرد، که لاستیک و لکانیزه شده نامیده می‌شود، استحکام لاستیک ولکانیزه شده ده برابر لاستیک طبیعی است. نمونه‌های دیگر پلی مرهای گرماسخت عبارتند از: فنولیکها، پلی استر، پلی پورتان و سیلیکون.



شکل ۳ - امکان آرایش مولکولهای پلی مرها به صورت (الف) آمورف (ب) - نیمه بلوری

### کوپلی مرها

نوع دیگری طبقه بندی بر مبنای نوع واحد تکرار شونده وجود دارد. هنگامی که زنجیر پلی مر فقط از یک نوع واحد تکرار شونده تشکیل شود، پلی مر را هوموپلی مر می‌گویند. از طرف دیگر در کوپلی مرها، زنجیرهای پلی مری دو نوع مونومر مختلف دارند. در صورتی که دو مونومر مختلف در طول زنجیر پلی مر، به دو صورت اتفاقی و یا منظم توزیع شده باشند، کوپلی مر اتفاقی یا منظم به وجود می‌آید. اگر زنجیری بلند از یک نوع مونومر به دنبال زنجیری بلند از مونومر نوع دیگر قرار گیرد، یک کوپلی مر دسته‌ای تشکیل می‌شود. در صورتی که زنجیر اصلی از یک نوع مونومر و شاخه‌های آن از نوع دیگر باشد، کوپلی مر حاصل را پیوندی می‌نامند. شکل ۴ انواع مختلف کوپلی مرها را نشان می‌دهد.



شکل ۴ - انواع مختلف کوپلی مرها

### وزن مولکولی

یکی از عوامل بسیار مهم در پلی مرها، وزن مولکولی ( $M_n$ ) است. بعضی از خواص مکانیکی با افزایش وزن مولکولی افزایش می‌یابند. از جمله این خواص، مقاومت در مقابل تغییر شکل است که با ازدیاد وزن مولکولی افزایش می‌یابد. البته، افزایش وزن مولکولی، فرایند پذیری

پلی مرهای آمورف و شیشه‌ها هر دو دارای دمای انتقال شیشه‌ای  $T_g$  هستند. ولی مقدار  $T_g$  در شیشه‌ها، چند صد درجه سانتی گراد بیشتر از مقدار  $T_g$  در پلی مرهاست. دلیل این امر، تفاوت در نوع و مقدار پیوندهای عرضی در پلی مرها و شیشه‌هاست. شیشه‌ها دارای مخلوطی از پیوندهای کووالانسی پیوسته هستند و شدیداً به طور عرضی پیوند شده‌اند. این امر باعث می‌شود پیوند پایداری گرمایی بالاتری در شیشه‌ها نسبت به پلی مرها (که فقط پیوند کووالانسی دارند و مقدار پیوندهای عرضی آنها کمتر از پیوندهای عرضی شیشه است)، به وجود آید.

### پلاستیکهای گرما نرم و گرما سخت

بیشتر پلی مرهای خطی در اثر گرما، نرم و یا ذوب می‌شوند. این پلی مرها که گرما نرم نام دارند، برای شکل گیری به صورت سیال مناسب‌اند. از جمله پلی مرهای گرما نرم می‌توان پلی اتیلن با دانسیته کم یا زیاد، پلی استیرن و پلی متیل متاکریلات (PMMA) را نام برد. هنگامی که ساختار پلی مر آمورف است، نظام مشخص بین مولکولها وجود ندارد و زنجیرها به طور اتفاقی کنار هم قرار می‌گیرند. شکل ۴ (الف)، نواحی تک بلوری صفحه‌ای شکل که لاملا یا کریستالیت نامیده می‌شوند را می‌توان به وسیله رسوب دادن پلی مر از محلول رقیق آن به دست آورد. در لاملا زنجیرهای مولکولی بلند به طرز منظمی پیچ می‌خورند. شکل ۴ (ب)، تعدادی کریستالیت با هم جمع می‌شوند و تشکیل گویچه‌ها را می‌دهند که بسیار شبیه دانه‌ها در فلزات‌اند.

بس از اینکه مولکولهای پلی مر به علت ایجاد پیوندهای عرضی به شکل یک شبکه سه بعدی در آمد دیگر در اثر گرما نرم نخواهند شد. این

پلی‌مرها را مشکلتر خواهد کرد. درجه پلی‌مرشدن ( $DP_n$ ) تعداد واحدهای اصلی (مرها) را در پلی‌مر نشان می‌دهد. ارتباط این دو پارامتر با یکدیگر به صورت زیر است:

$$M_w = DP \times (M_0)_n$$

در این رابطه  $(M_0)_n$  وزن مولکولی واحد تکرار شونده است. پلی‌مرها از مولکولهای دقیقاً مشابهی تشکیل نشده‌اند. بلکه مخلوطی از مولکولهای متفاوت هستند که هر کدام وزن مولکولی و درجه پلی‌مرشدن متفاوتی دارد. بنابراین، وزن مولکولی یک پلی‌مر با تابع توزیع وزن مولکولی مشخص می‌شود. کاملاً واضح است که توزیع وزن مولکولی باریک، نشان‌دهنده همگنی زیاد پلی‌مر است. به همین دلیل در پلی‌مرها همیشه میانگین وزن مولکولی یا درجه پلی‌مرشدن، از اهمیت زیادی برخوردار است. با مقایسه اوزان مولکولی چند ماده ساده و پلی‌مری، قابل توجه بودن وزن مولکولی پلی‌مر مشخص شود. مولکول آب،  $(H_2O)$  دارای وزن مولکولی ۱۸ و بنزن  $(C_6H_6)$ ، که یک نوع حلال آلی است، دارای وزن مولکولی ۷۸ است. در مقایسه با این مواد، لاستیک طبیعی دارای وزن مولکولی بالاتری در حدود  $10^6$  است و وزن مولکولی پلی‌اتیلن که یک پلی‌مر سنتزی معمولی است، می‌تواند بیشتر از  $10^6$  باشد. اندازه مولکول پلی‌مرها نیز بسیار بیشتر از اندازه مولکول مواد ساده است. مثلاً قطر مولکول آب  $40 \text{ nm}$  است در صورتی که اندازه مولکول پلی‌اتیلن در حدود  $6400 \text{ nm}$  است.

درجه تبلور

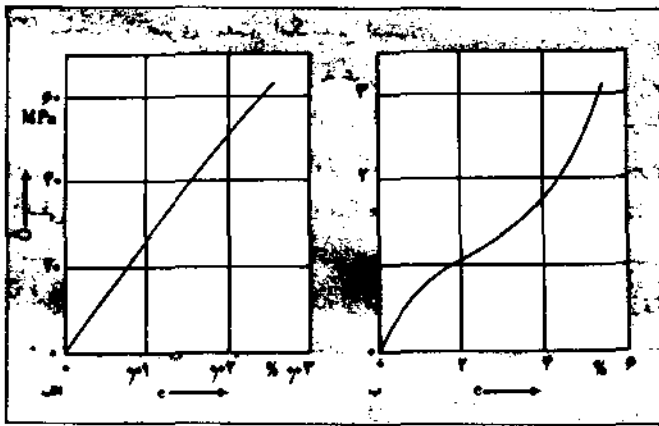
پلی‌مرها می‌توانند آمورف یا به مقدار جزئی بلوری باشند (شکل ۳). وجود یک پلی‌مر ۱۰۰٪ بلوری فقط یک تصور ایده‌آل است. در عمل بسته به نوع پلی‌مر، وزن مولکولی و دمای تبلور ممکن است میزان تبلور در پلی‌مرهای بلوری از ۳۰٪ تا ۹۰٪ تغییر کند. اشکال عمده در راه رسیدن به یک ساختار کاملاً بلوری، اساساً از ساختار زنجیرهای بلند پلی‌مرها ناشی می‌شود. بعضی از قطعه‌های زنجیر پلی‌مر که پیچ و تاب خورده و در بین نواحی بلور بدام افتاده‌اند، هرگز نمی‌توانند دوباره به طور منظم قرار گیرند یا به اندازه‌ای تغییر شکل دهند تا حالت کاملاً بلوری در پلی‌مر به وجود آید. مولکولهای خطی بدون گروه‌های جانبی و یا با گروه‌های جانبی کوچک به سهولت متبلور می‌شوند. به عنوان مثال، پلی‌اتیلن خطی با دانسیته بالا می‌تواند تا ۹۰٪ متبلور شود؛ در صورتیکه پلی‌اتیلن شاخه‌دار (پلی‌اتیلن با دانسیته کم) فقط می‌تواند تا حدود ۶۵٪ متبلور شود. به طور کلی، سختی و استحکام بکنه‌پلی‌مر با درجه تبلور افزایش می‌یابد. باید توجه کرد که فرایندهای تغییر شکل مانند لغزش و جفت شدن و همچنین انتقالات فازی که در مواد جامد بلوری ساده اتفاق می‌افتد، می‌تواند در بلورهای پلی‌مرها نیز روی دهد.

رفتار تنش - کرنش

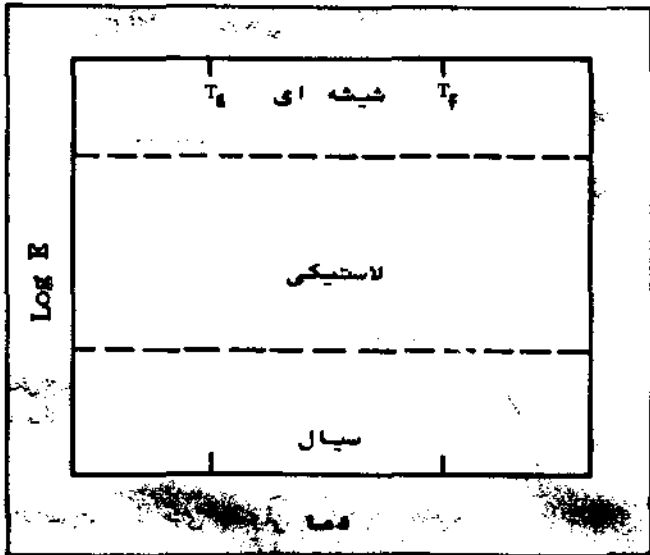
مشخصه منحنی‌های تنش - کرنش یک پلی‌مر آمورف و یک الاستومر

(یک پلی‌مر لاستیکی) به ترتیب در شکل ۵ الف و ب نشان داده شده است. قابل توجه است که الاستومر رفتار هوکین را از خود نشان نمی‌دهد، بلکه رفتار یک کشسان غیر خطی را دارد. مشخصه گستره کشسانی زیادی که در الاستومرها وجود دارد، ناشی از سهولت سازمان یافتن مجدد زنجیرهای پیچ خورده، تحت اثر تنش است.

نکته دیگر در مورد تفاوت پلی‌مرها با فلزات و سرامیکها، به وابستگی بسیار زیاد مدول کشسانی آنها به دما است. شکل ۶ تغییر مدول کشسانی یک پلی‌مر آمورف را نسبت به دما نشان می‌دهد. در گستره دمایی باین‌نر از  $T_g$ ، پلی‌مر سخت است و مقدار کشسانی آن حدود ۵ Gpa است. بالاتر از  $T_g$ ، مقدار مدول به میزان قابل توجهی کم می‌شود و پلی‌مر از خود رفتار لاستیکی نشان می‌دهد. بالاتر از  $T_g$  (دمایی که پلی‌مر سیال می‌شود) مدول به طور ناگهانی کاهش می‌یابد.



شکل ۵ - الف) رفتار کشسان هوکین یک پلی‌مر نیشه‌ای ب) رفتار غیر خطی کشسان یک الاستومر



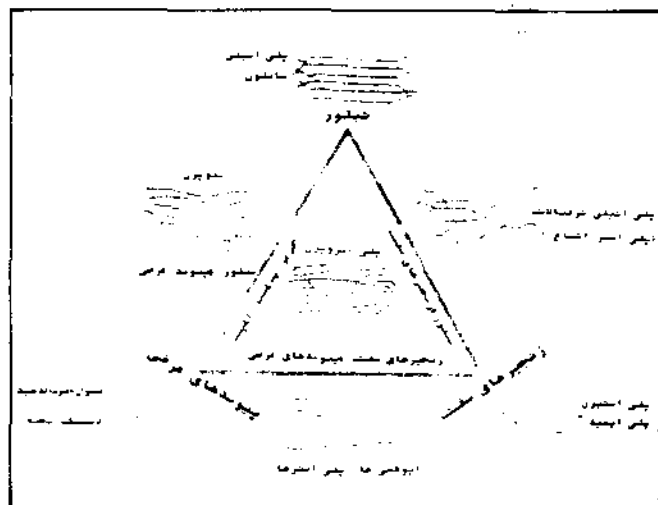
شکل ۶ - تغییر مدول کشسان یک پلی‌مر آمورف

به طور کلی پلی مرها انبساط گرمایی بیشتری در مقایسه با فلزات و سرامیکها دارند. علاوه بر این ضرایب انبساط گرمایی آنها کاملاً ثابت نیست. بدین معنی که پلی مرها مشخصاً با رابطهای غیر خطی در اثر افزایش دما منبسط می شوند. ضریب انبساط خطی رزینهای اپوکسی بین  $50 \times 10^{-6} k^{-1}$  تا  $100 \times 10^{-6} k^{-1}$  است. در صورتی که پلی استرها برای این خصوصیت مقادیری بین  $100 \times 10^{-6} k^{-1}$  و  $200 \times 10^{-6} k^{-1}$  را دارا هستند. به وجود آمدن تغییرات جزئی در ترکیب می تواند اثرات کاملاً محسوسی بر روی خصوصیات انبساط گرمایی پلی مر داشته باشد.

### روشهای استحکام بخشیدن به پلی مرها

از بحث های قبلی می توان چنین نتیجه گرفت که ایجاد استحکام در پلی مرها توسط سه روش یا مکانیزم کلی، (۱) تبلور (۲) ایجاد پیوند عرضی (۳) ساختار زنجیری سفت، امکانپذیر است.

ولکانیزه کردن الاستومرها نیز به عبارتی تولید پیوندهای عرضی در آنهاست. همان طور که اشاره شد ایجاد استحکام در بعضی از پلی مرها می تواند از طریق مکانیزم های متفاوتی انجام گیرد. در شکل ۷ سه مکانیزم اصلی و ترکیبی از این مکانیزمها و مثال هایی در هر مورد نشان داده شده است. پلی مرهایی که با هر سه مکانیزم مستحکم می شوند (وسط مثلث) شامل پلی مرهایی با انهمای متفاوت، از قبیل پلی ایمیدازول ها، پلی بنزی ایمیدازول ها و پلی دیازول ها هستند.



شکل ۷ - نمودار سه مکانیزم اصلی و ترکیب این مکانیزمها در فرایند استحکام بخشیدن به پلی مرها

### ماتریس های پلی مری معمولی

در بین مواد پلی مری که با الیاف بلند به کار برده می شوند، رزینهای پلی استر و اپوکسی بیشتر از همه مورد استفاده قرار می گیرند. مزایای این

مواد مقاومت مناسب در مقابل آب، هوا و مواد مختلف شیمیایی، عمر طولانی و هزینه بسیار کم آنهاست. این مواد می توانند دما را تا حدود  $80^{\circ}C$  در درازمدت و به صورت مداوم تحمل کنند و به سهولت با الیاف نیتسه مخلوط شوند. پلی استرها در اثر بخت، بین ۴ تا ۸ درصد در هم رفتگی پیدا می کنند این رزینها در اکثر کامپوزیتها به عنوان ماتریس مورد استفاده قرار می گیرند. رزینهای گرما سخت دیگری که در کامپوزیتها با الیاف بلند به کار برده می شوند، رزینهای فنولی و سیلکونی هستند.

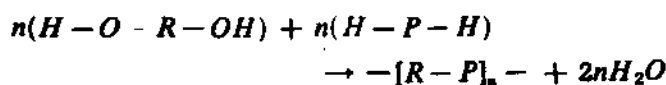
از بین مواد گرما نرم، موادی از قبیل پلی آمیدها، پلی استالها، پلی کربنات، پلی پروپیلن، ABS (اکریلونیتریل-بوتادین - استیرن) و اخیراً پلی ایمیدها، در کامپوزیتها به عنوان آمیزه قالب گیری به کار برده می شوند. استفاده از رزینهای گرما نرم در ساخت کامپوزیتها، ساده تر از به کار بردن رزینهای گرما سخت است. از طرف دیگر استفاده مجدد از رزینهای گرما نرم نیز امکانپذیر است و برای شکل دهی با استفاده از گرما و فشار آنها را به کار می برند. معمولاً با رزینهای گرما نرم الیاف کوتاه به کار برده می شود، ولی از سال ۱۹۷۰ به بعد، تقویت رزینهای گرما نرم با الیاف بلند نیز آغاز شده است. معایب رزینها گرما نرم انبساط و انقباض زیاد و خواص مکانیکی و گرمایی نسبتاً پائین آنهاست.

یک عیب مهم ماتریس های پلی مری تأثیری پذیری آنها از محیط است، بدین ترتیب که در دماهای نسبتاً بالا و در اثر جذب رطوبت ممکن است پلی مرها از هم پاشیده و تخریب شوند. جذب رطوبت از محیط علاوه بر کاهش  $\sigma$  و  $E$  سبب تورم پلی مر نیز می شود و در صورت وجود الیاف اثرات دماهای بالا همراه با جذب رطوبت، می تواند تنشهای داخلی جدی در کامپوزیتها به وجود آورد. علاوه بر این وجود تنش های گرمایی ناشی از نابرابر بودن گرمایی ماتریس و الیاف، مشکل تمامی انواع مواد کامپوزیتها به خصوص کامپوزیتهای پلی مری است.

در ادامه بحث بعضی از ماتریس های پلی مری که در تهیه کامپوزیتها بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند، تشریح شده اند.

### رزین پلی استر

واکنش عمومی در پلی مر شدن استری، ترکیب منومرهای یک اسید دو عاملی و یک باز دو عاملی، طبق فرمول زیر است.



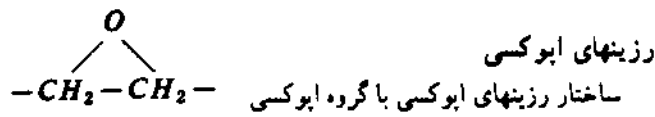
منومرهایی با دو عامل بازی مانند اتیلن گلیکول و اسیدهای دو عاملی مانند فوماریک اسید، می توانند با حذف آب و تشکیل پلی استر اشباع نشده، متراکم شوند.

البته در تهیه رزینهای تجارتهای از فتالیک اسید نیز به همراه فوماریک اسید استفاده می شود.

پیوند دوگانه بین دو اتم کربن مجاور، نشان می دهد که مولکولهای

می‌تواند در گستره زمانی از چند روز تا کمتر از چند دقیقه و در دمای ۲۰°C تا ۱۵۰°C انجام می‌گیرد. وزن مولکولی و ویسکوزیته رزین سلی استر حاصل را می‌توان با تغییر مدت زمان واکنش در این گستره دما کنترل کرد. نگهداری رزینهای پلی استر حاصله، باید در دمای اتاق و دور از نور خورشید انجام گیرد. ویسکوزیته زیاد رزین پلی استری را که از تولیدکننده به دست می‌آید، می‌توان با حاصل کردن آن در استرین اصلاح کرد و ویسکوزیته مورد نظر را به دست آورد. بیشتر پلی استرها را می‌توان به طور رضایت بخشی تا دمای ۲۵۰°C مورد استفاده قرار داد. استحکام رزینهای پلی استر، همانند سایر پلی مرها با افزایش دمای کار کاهش می‌یابد. عمده ترین اشکال رزینهای پلی استر، در هم رفتگی آنها پس از بخت است. در اثر این در هم رفتگی که میزان آن ۴ تا ۸ درصد است، به دست آوردن سطوح صاف در محصول نهایی مشکل می‌شود. البته این اشکال را در قالبگیری مواد پلی استری می‌توان با افزایش مواد مناسب کاملاً بر طرف ساخت.

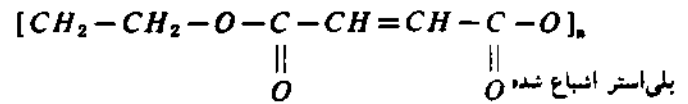
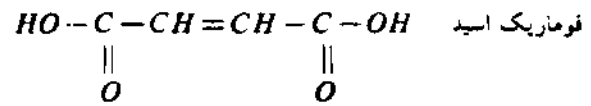
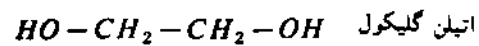
رزینهای پلی استر به سادگی با مواد تقویت کننده در هم آمیخته می‌شوند. برای این منظور غالباً پرکننده‌های معدنی به رزین پلی استر افزوده می‌گردد. به کار بردن مواد پرکننده علاوه بر اینکه باعث کاهش قیمت رزینها می‌شوند، سطح ظاهری، مقاومت در مقابل آب و در هم رفتگی رزینها را نیز بهبود می‌بخشند.



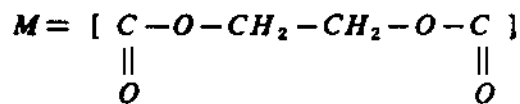
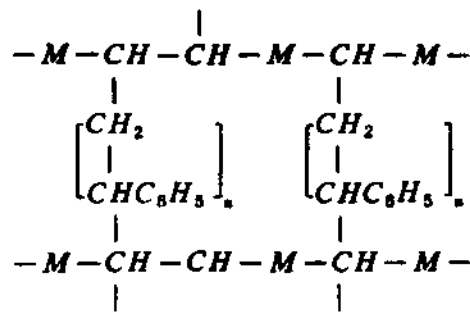
که اپوکسید نیز نامیده می‌شود، مشخص می‌شود. در حال حاضر خانواده های متعددی از رزینها در دسترس هستند که گستره وسیعی از مایعات ویسکوز تا جامدات با نقطه ذوب بالا را در بر می‌گیرند. در بین آنها رزینهای اپوکسی تجارتي که از اپی کلر و هیدرین و بیس فنول A تولید می‌شوند، به عنوان نوع اصلی مورد استفاده قرار می‌گیرند. رزینهای تجارتي موجود ممکن است حساسی اصلاح کننده و یا مخلوط چند نوع رزین باشند.

برای رزینهای اپوکسی معمولاً عوامل بخت متفاوتی موجود است. اغلب ترکیبات نوع آمین در کاربردهای ساختمانی به کار می‌روند. عمل بخت و سخت شدن رزین از اثر تشکیل پیوند عرضی بین زنجیر پلی مر و عامل بخت و یا به وسیله اتصال مستقیم بین گروه های اپوکسی حاصل می‌شود.

خصوصیات سیستم رزین - عامل بخت را می‌توان با افزودن اصلاح کننده تغییر داد. نوعی از اصلاح کننده ها، به عنوان رقیق کننده به کار می‌روند. معمولاً رقیق کننده ها، در جهت کاهش ویسکوزیته رزین عمل می‌کنند. بعضی از رقیق کننده ها در اثر ترکیب با رزین، تخریب خواص مکانیکی را به تعویق می‌اندازد. رزینهای اپوکسی توسط نرم کننده ها نیز اصلاح می‌شوند. نرم کننده ها، افزودنی هایی با وزن مولکولی کم هستند و زنجیرهای مولکولی را از یکدیگر جدا می‌کنند. افزودن نرم کننده ها منجر به بهبود خواص ضربه پذیری و دیگر خواص در دماهای پائین می‌شود.



پلی استر اشباع نشده اند. این مکانهای اشباع نشده، تشکیل پیوندهای عرضی را میسر می‌سازند، این پیوندهای عرضی بین زنجیرهای مولکولی و یک ماده اشباع نشده مانند مونومر استرین، برقرار می‌گردد. بدین ترتیب ممکن است شبکه سه بعدی محکمی تشکیل شود. واکنشی که باعث تشکیل پیوند عرضی می‌شود، به عنوان واکنش بخت شناخته شده است، و عامل بخت قسمتی از ساختار شبکه است، امکان انتخاب های بسیار گوناگونی از بین واکنش دهنده ها وجود دارد که تغییر وزن مولکولی رزین و فاصله بین مکانهای اشباع نشده در طول زنجیر را میسر سازد. به طور مثال، اگر یک پلی استر اشباع نشده با یک مونومر اشباع نشده مانند استرین ترکیب شود، تشکیل پیوندهای عرضی منجر به شبکه ای می‌شود که در زیر نشان داده شده است.



است.

این انتخاب های متفاوت تشکیل خانواده ای از رزینهای پلی استر را امکان پذیر می‌سازد که هر عضو این خانواده دارای مجموعه خواص متفاوتی است. چون استحکام و همچنین پایداری گرمایی و شیمیایی بستگی به میزان پیوند عرضی دارد، انتخاب ترکیب مناسبی از واکنش دهنده ها و مونومرها برای به دست آوردن محصول نهایی مورد نظر، از اهمیت خاصی برخوردار است. درجه و سرعت بخت با کاتالیزور کنترل می‌شود. عامل کاتالیزور به عنوان یک شروع کننده فرایند پلی مر شدن، برای تشکیل رادیکالهای آزاد، عمل می‌کند. بنابراین، سرعت تشکیل رادیکالها و زمان بخت متأثر از دماست. بسته به نوع کاتالیزور، بخت کامل

مواد پرکن را در رزینهای اپوکسی نیز مانند رزینهای پلی استر، می توان به عنوان اصلاح کننده به کار برد.

به طور کلی کامپوزیت‌های تهیه شده از رزینهای اپوکسی، در مقایسه با کامپوزیت‌های تهیه شده از رزینهای پلی استر، مقاومت فوق العاده بهتری را در مقابل مواد شیمیایی و آب نشان می دهند. در اپوکسی درهم رفتگی کمتر از ۲٪ است. در طی بخت هیچ نوع محصول جانبی مانند آب یا مواد فرار، تولید نمی شود. عمل بخت روی رزینهای اپوکسی می تواند در گستره دمایی از ۵°C تا ۱۸۰°C صورت پذیرد. اپوکسی بخت شده تا حد ۲۵۰°C، پایداری گرمایی از خود نشان داده است. با انتخاب مناسب رزین، عوامل بخت و اصلاح کننده، می توان به گستره وسیعی از کاربرد این سیستمها رسید. قیمت رزینهای اپوکسی بیشتر از رزینهای پلی استر و فنلی است. به علت خطرات مسلم ناشی از این رزینها و عوامل بخت، هنگام کار کردن با آنها باید نهایت دقت را به عمل آورد. خواص انواع مختلف اپوکسیها با ویسکوزیته، نقطه نرم شدن و عدد اپوکسیدی آنها مشخص می شود. خواص نوعی از رزینهای اپوکسی در جدول ۱ آمده است.

تنوع شکل و خواص رزینهای اپوکسی، گستره وسیعی از کاربردها را دربر می گیرد که از کاربردهای سیاهمنامی تا کاربردهای الکتریکی گسترش یافته است. کاربرد آنها در فرآیندهای رشته پیچی، بینهایت توسعه یافته است، که از آن جمله می توان تولید لوله‌ها، مخازن تحت فشار، قطعات صنایع هوایی و فضایی و غیره را نام برد.

### پلی‌مرهای مقاوم در مقابل دماهای بالا رزینهای فنولی

رزینهای فنولی از تراکم فنولها (C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>O) و آلدهیدها مانند فرمالدهید (HCHO) ایجاد می شوند. در طی بخت، رزینهای فنولی سه مرحله مشخص را می گذرانند. در مرحله شروع با مرحله تراکم، آب به عنوان یک محصول جانبی تشکیل می شود. در اثر گرما، رزینهای فنولی از یک ماده گرما نرم قابل حل به یک پلی‌مر گرما سخت غیر قابل ذوب و غیر قابل حل تبدیل می شوند. استحکام رزینهای فنولی بستگی به میزان پیوندهای عرضی تشکیل شده توسط فرمالدهید در پلی‌مر نهایی دارد. رزینهای فنولی را می توان در دماهای بالا، تا حد ۳۰۰°C به کار برد. قیمت رزینهای فنولی در مقایسه با سایر مواد پلاستیکی گرما سخت کمتر است. ممکن است بعضی از انواع رزینهای فنولی طی مرحله بخت محصولات جانبی فرار تولید کنند، بنابراین در ساخت چند لایه‌هایی از این رزین و الیاف، اعمال فشار ضروری است.

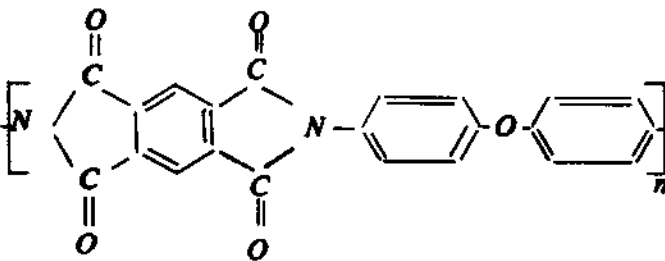
### رزینهای سیلیکونی

رزینهای سیلیکونی با ساختاری مشخص می شود که در آن اتمهای اکسیژن و سیلیسیم به طور متناوب در زنجیر پلی‌مر قرار می گیرند، طی مرحله تراکم محصولات جانبی نیز تولید می شوند. این رزینها به دلیل مقاومت گرمایی و اکسایشی، مرغوب شناخته شده‌اند. رزینهای سیلیکونی می توانند در گستره دمایی از ۲۶۰°C تا ۵۴۰°C به کار روند. گرچه قیمت

این مواد نسبتاً بالاست، ولی به علت خواص مکانیکی و الکتریکی عالی آنها در دماهای بالا موادی ایده‌آل برای کاربردهای خاصی هستند. به عنوان مثال کاربرد رزینهای سیلیکونی تقویت شده با الیاف برای پوشش آنتن رادار هواپیما و همچنین اجزاء وسایل نقلیه‌ای که با سرعت مافوق صوت حرکت می کنند.

### پلی‌مرهای با کارکرد عالی

چون ماتریس‌های پلی‌مری مزایای فراوانی دارند که قبلاً تشریح شد، تلاشهای زیادی به منظور افزایش گستره دمای کاربردی آنها، به عمل آمده است. در این زمینه مواد پلی‌مری متعددی تولید شده‌اند که می توانند در گستره دمایی بین ۳۱۵°C تا ۵۴۰°C مورد استفاده قرار گیرند. خواص این پلی‌مرهای بسیار مؤثر، بستگی به سختی و سفتی زنجیر پلی‌مر دارد، که این امر با وارد کردن انواع ساختارهای حلقوی به دست می آید. از بین انواع پلی‌مرهای بسیار مؤثر، کاربرد پلی‌ایمیدها متداولتر و وسیعتر است. واحد تکرار شونده در نوعی پلی‌ایمید در زیر آمده است.



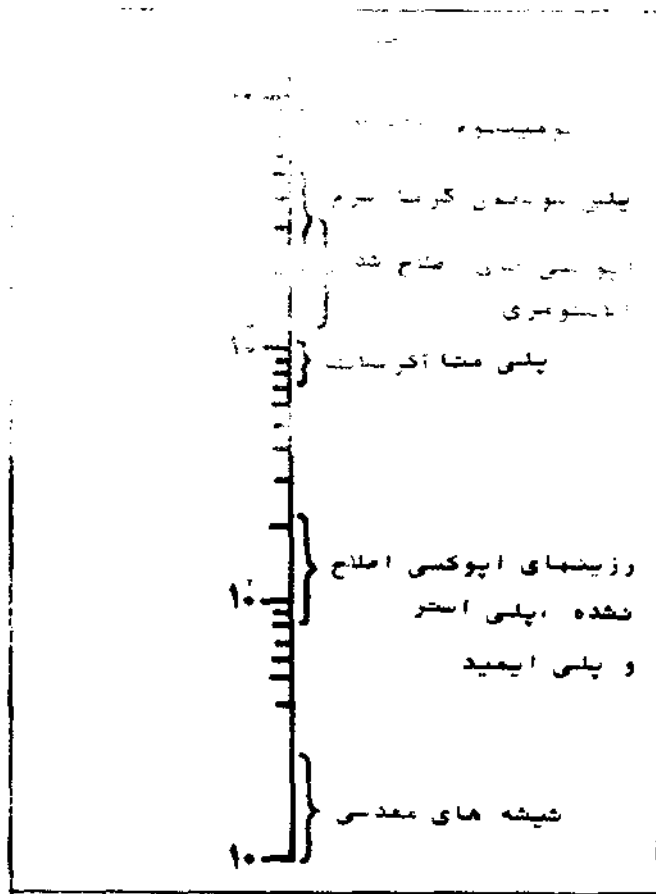
اگرچه افزایشی سفتی زنجیر، سبب بالا رفتن استحکام، مدول و مقاومت گرمایی پلی‌مر می شود، ولی پلی‌مرهای حاصل شکننده‌اند و مقاومت کمتری در مقابل گسترش ترک از خود نشان می دهند. به علاوه این پلی‌مرها، بیشتر مستعد درهم رفتگی ناشی از بخت و گرما هستند. خواص گرمایی و مکانیکی رزینهای پلی‌استر، اپوکسی، فنولی، و پلی‌ایمید در جدول ۱ نشان داده شده است.

جدول ۱ - خواص بعضی از ماتریسهای پلی‌مری گرما سخت

خواص	پلی‌استر	اپوکسی	فنولی	پلی‌ایمید
استحکام کششی (Mpa)	۴۰ - ۵۵	۳۵ - ۸۵	۵۰ - ۵۵	۱۲۰
مدول خمشی (Mpa)	۳۵	۱۵ - ۳۵	۴۰	۳۵
دانشیه (g/cm <sup>3</sup> )	۱/۲۸	۱/۳۸	۱/۳۰	۱/۴۶
دمای کاربرد مداوم (°C)	۲۵ - ۱۰۰	۲۵ - ۸۵	۱۷۵ - ۱۵۰	۲۶۰ - ۲۲۵
ضریب انبساط گرمایی (۱۰ <sup>-۶</sup> /°C)	۱۰	۸ - ۱۱	۱۱ - ۲۱۵	۹
جذب آب (درصد، در ۲۴ ساعت)	۰/۲	۰/۱	۰/۱ - ۰/۲	۰/۳

## مقاومت در مقابل ضربه مکانیکی و گسترش ترک

رزینهای گرما سخت (مثلاً پلی استرها، اپوکسی ها و پلی ایمیدها) دارای تعداد زیادی پیوندهای عرضی هستند و استحکام، مدول و مقاومت خزشی مناسبی دارند، اما وجود همین پیوندهای عرضی در زنجیرهای مولکولی سبب شکنندگی فوق العاده ای می شوند. بدین معنی که این نوع رزینها در مقابل شکست مقاومت بسیار کمی نشان می دهند. با توجه به مقاومت در مقابل شکست می توان به مقاومت در مقابل گسترش ترکها پی برد. در شکل ۸ انرژی شکست بعضی از مواد معمولی با یکدیگر مقایسه شده اند. توجه داشته باشید که مقادیر انرژی شکست رزینهای گرما سخت، کمی بالاتر از مواد شیشه ای است. انرژی شکست رزینهای گرما نرم مانند پلی متیل متا اکریلات (PMMA) حدود  $2 KJ/m^2$  است، در صورتی که انرژی شکست دارای پلی سولفون گرما نرم چند  $2 KJ/m^2$  تقریباً نزدیک آلیاژ آلومینیم  $T_g = 70-75$  است. اغلب پلی مرهای گرما نرم آمورف دارای مقادیر انرژی شکست بالایی هستند، زیرا حجم آزاد زیادی برای جذب انرژی جمع شده توسط گسترش ترک را دارند. در بین پلی مرهای گرما نرم اصلاح شده، که مقاومت در مقابل شکست خوبی دارند می توان از کو پلی مر اکریلونیتریل - بوتادین - استایرن (ABS) و پلی استیرن مقاوم در مقابل ضربه (HIPS) نام برد. طبقه ای از رزینهای گرما سخت که مقاومت در مقابل شکست آنها نزدیک به پلی سولفونهاست، اپوکسی های اصلاح شد با الاستومراند.



شکل ۸ - انرژی شکست بعضی از پلی مرها

## تقویت کننده ها

### تقویت کننده های ذره ای

تقویت کننده های ذره ای یا پرکننده ها، ذرات جامد از نوع معدنی یا آلی هستند که از نظر ساختاری و ترکیب شیمیایی از یکدیگر مشخص می شوند. پرکننده ها را می توان به سه دسته عمده غیر تقویتی یا خنثی، نیمه تقویتی و تقویت کننده یا فعال تقسیم کرد. نوع خنثی حجم پلی مر را افزایش و قیمت آن را کاهش می دهد، در صورتی که انواع فعال باعث بهبود قابل توجه بعضی از خواص فیزیکی و مکانیکی پلی مرها می شوند. تقویت حقیقی یا واقعی را نمی توان دقیقاً توضیح داد، زیرا واژه تقویت، ممکن است به عنوان مثال، به افزایش همزمان استحکام کششی و مدول خنثی اطلاق شود.

مصرف گسترده وسیعی از پرکننده های پودری (حدود ۸۰ گونه مختلف) که امروزه در صنایع پلی مر مرسوم شده است، نشانگر اهمیت فراوانی است که این مواد دارند گرچه منظور اصلی و اولیه از کاربرد پودرهای پرکننده، کاهش هزینه پلی مرها و آمیزه های قالبگیری بوده است، لیکن امروزه املاح انتخابی بیشتر از همه اهمیت دارد.

### طبقه بندی پرکننده ها

یکی از روشهای مرسوم طبقه بندی پرکننده ها بر اساس خصوصیات شیمیایی و فیزیکی آنهاست. جدول ۲ این طبقه بندی را برای پرکننده های مهم نشان می دهد.

### خواص فیزیکی پرکننده ها

مهمترین خواص فیزیکی پرکننده ها به شرح زیر است:

شکل ذرات: در پرکننده ها شکلهای مختلف منظم یا غیر منظمی که نتیجه خرد کردن، آسیاب کردن و تولید سنتزی آنهاست به دست می آید. شکل ۹ انواع شکلهای را مشخص می کند.

اندازه ذرات و توزیع آنها: ذرات ریز معمولاً قدرت تقویت کنندگی بالاتری دارند. اغلب میانگین مطلوب اندازه ذرات بین ۲ تا ۵ میکرون است. ذرات کوچکتر و بسکوزیته پلی مرهای مایع و مذاب را بیشتر افزایش می دهند و فرایندهای شکل دهی را با اشکال روبرو می سازند. شکل ۱۰ یک نمونه منحنی توزیع اندازه ذرات را نشان می دهد.

نسبت بسته بندی ذرات: این کمیت عبارت است از نسبت حجم خالی بین ذرات و درون ذرات به حجم کل ذرات. این کمیت تأثیر بسزایی در میزان جذب روغن دارد.

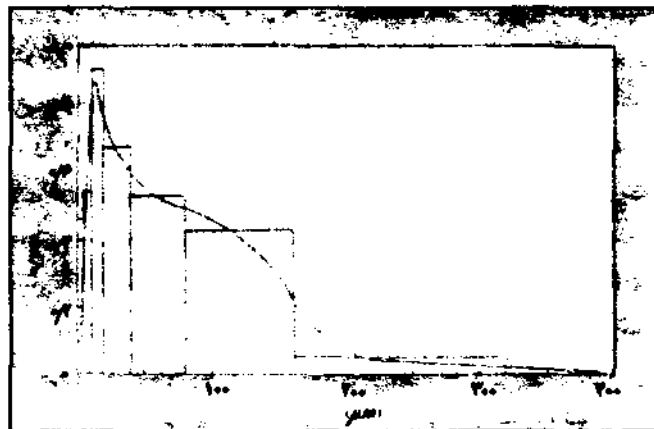
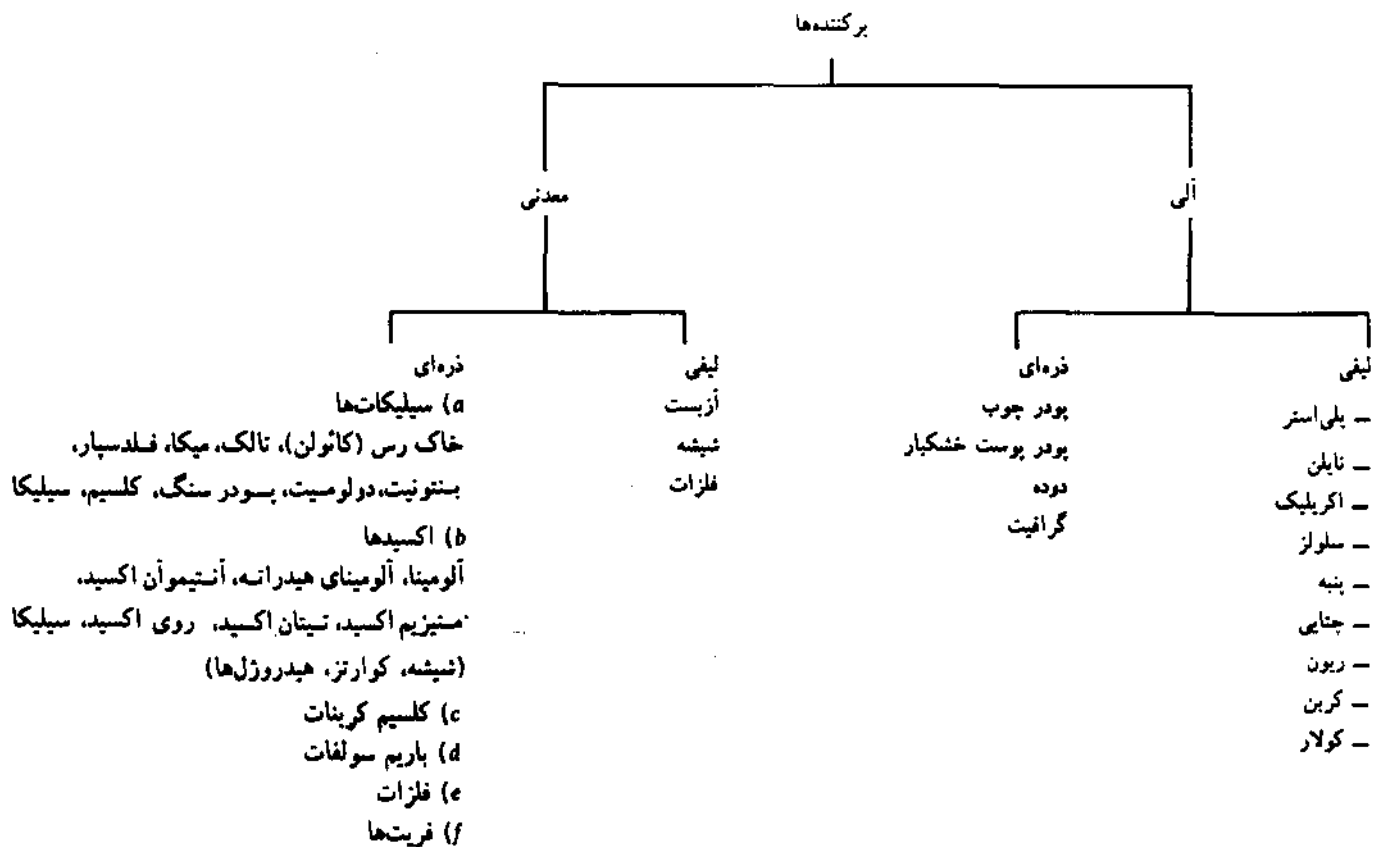
مساحت سطح: مساحتی است که یک گرم از ذرات اشغال می کنند.

دانشیته پودری: نسبت وزن به حجمی است که پرکننده اشغال می کند.

جذب روغن: مقدار روغنی است که ۱۰۰ گرم پودر را جذب می کند.

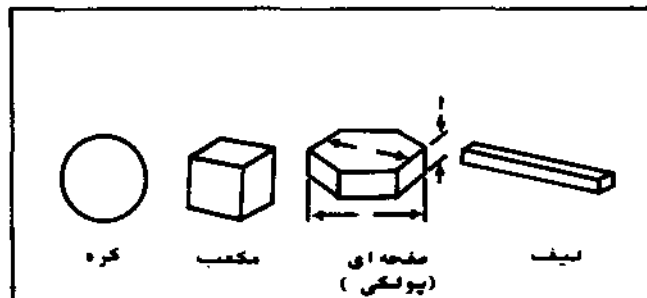
باید خاطر نشان کرد که پارامترهایی چون، شکل، اندازه، توزیع اندازه ذرات و مساحت سطح، بستگی شدیدی به یکدیگر دارند و از جمله





شکل ۱۰ یک نمونه منحنی توزیع اندازه ذرات

بعضی از پرکننده‌ها با پلی‌مره‌پیوندهای شیمیایی تشکیل می‌دهند، دوده‌ها در اثر تشکیل پیوندهای عرضی با زنجیرهای الاستومرها، از طریق واکنشهای رادیکالی و جذب این زنجیرها به داخل ذرات، اکثر الاستومرها



شکل ۹ - شکل‌های مختلف ذرات برخی از پرکننده‌ها

مهمترین عوامل تعیین کننده میزان تقویت و اصلاح خواص و شرایط فرآیندهای شکل‌دهی کامپوزیت‌های پودری هستند. در جدول ۳ نمونه‌ای از خواص مهمترین پرکننده‌های معدنی ذره‌ای و صفحه‌ای مقایسه شده‌اند.

تئوری عمل پرکننده‌ها

روش عملی پرکننده‌های فعال و نیمه‌فعال را می‌توان با سه مکانیزم شرح داد.

جدول ۳. نمونه‌ای از مهمترین پرکننده‌های معدنی ذره‌ای و صفحه‌ای شکر

پرکننده	فرمول شیمیایی	میانگین اندازه ذرات (Mm)	توزیع اندازه ذرات (Mm)	شکل ذرات	دانسیته (g/cc)	مساحت سطح (m <sup>2</sup> /g)	نسبت بسته بندی	سختی (mohs)	چگلی روغن (g/100g)
کربنات کلسیم	$CaCO_3$	3-120	0.1-600	مکعبی	2.7	0.3-2	0.7-0.8	2.5-3	9-21
کائولن	$Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$	0.8-5.0	0.03-45	مکعبی و صفحه‌ای	2.6	8-22	0.35-0.56	2	30-50
تالک	$3MgO \cdot 4SiO_2 \cdot H_2O$	1.8-6.0	0.05-60	مکعبی و صفحه‌ای	2.8	6-17	0.4-0.56	1	30-65
میکا	Al و K کپلکس	3-5	0.05-50	صفحه‌ای	2.82	30	0.4-0.5	2.5-3	40-50
سیلیکا	$SiO_2$	2-10	0.1-70	مکعبی	2.65	0.8-1.5	0.5-0.6	6-7	10-25
	ستری $SiO_2$	0.02-0.08	0.03-0.2	مکعبی و کروی	2.5	40-200	0.3-0.4	5-6	30-100

را تقویت می‌کنند. پرکننده‌های دیگر صرفاً از طریق حجمی که در کامپوزیت اشغال می‌کنند عمل می‌نمایند. زنجیرهای پلی‌مری در حضور ذرات پرکننده، کلبه حالات فضایی ممکن را نمی‌توانند اختیار کنند. شواهد زیادی در دست است که نشان می‌دهد، پلی‌مر حاوی ذرات، از نظر ساختاری و خواص ممکن است با پلی‌مر اصلی متفاوت باشد. بخش‌هایی از پلی‌مر که توسط پیوندهای واندروالس به ذرات اتصال دارند، بخش‌های دیگر را از حرکت باز داشته و سبب جهت‌یافتگی آنها می‌شوند. دلیل این کاهش تحرک زنجیرهای پلی‌مر را می‌توان در ثبات بعدی فوق‌العاده ذرات پرکننده جستجو کرد. توزیع یکتواخت ذرات در ماتریس از اهمیت زیادی برخوردار است، زیرا تعداد بیشتری از زنجیرهای پلی‌مری با سطح ذرات در تماس خواهند بود. انرژی آزاد و قطبیت پیوند بین پلی‌مر و پرکننده نیز بر استحکام این پیوندها تأثیر دارد.

در مکانیزم سوّم هنگامیکه مولکولهای ماتریس در معرض تنش قرار گرفته و انرژی وارده را جذب می‌کنند، براحتی می‌توانند در سطح ذرات بلغزند. با این عمل انرژی ضربه بطور یکتواخت در جسم توزیع می‌شود و مقاومت کامپوزیت در برابر ضربه افزایش می‌یابد. در بعضی موارد، احتمال تشکیل ترکهای مویی که انرژی وارده را در سطح مشترک پلی‌مر و پرکننده تلف می‌کند نیز فزونی می‌یابد.

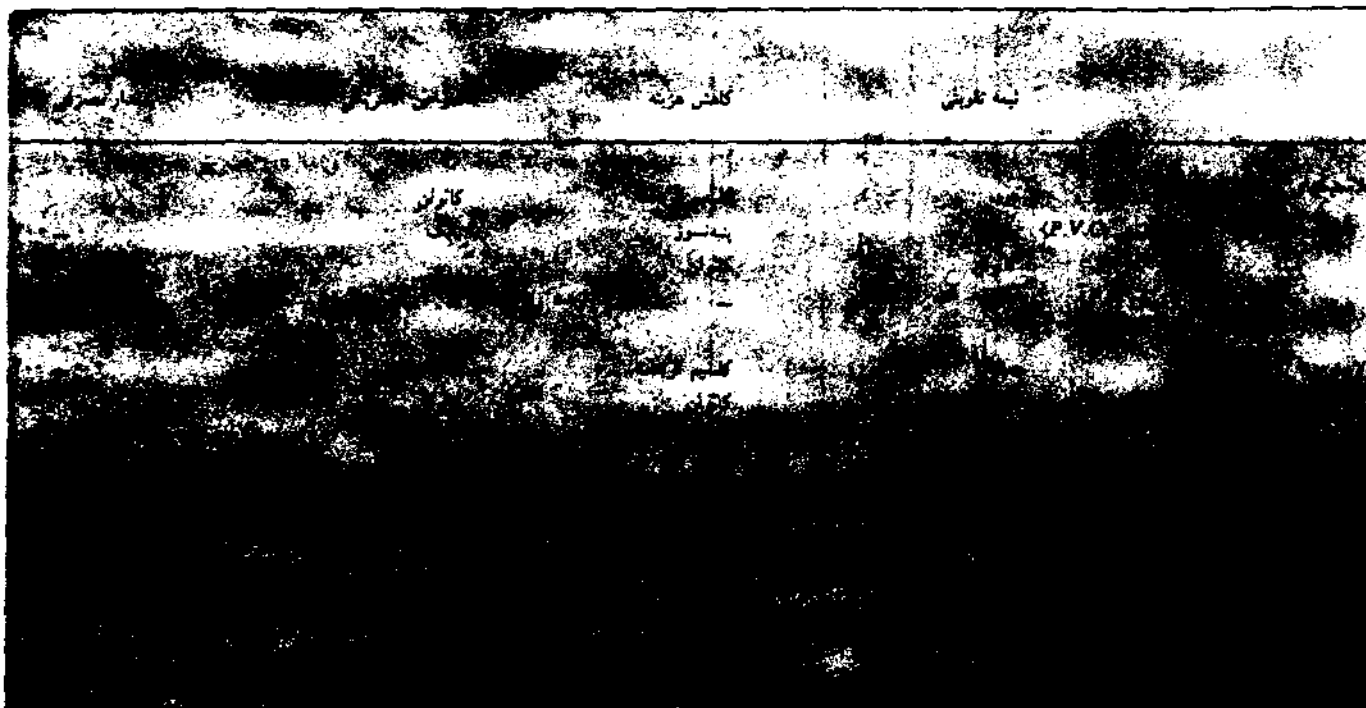
تفاوت عمده بین پرکننده‌های خنثی و فعال در این است که کلبه پرکننده‌ها کم و بیش مدول کشسانی را افزایش می‌دهند، در صورتی که افزایش استحکام کششی به مقدار محسوس، تنها با استفاده از پرکننده‌های فعال (اکثراً از نوع لیفی) امکانپذیر است. افزایش دمای و ایلچش گرمایی نیز با استفاده از نوع لیفی، در مقایسه با به کارگیری نوع پودری چشم‌گیرتر است. ذرات صفحه‌ای (مثلاً تالک و میکا) از این نظر بر ذرات مکعبی و کروی شکل برتری دارند.

کامپوزیت‌های تهیه شده از پرکننده‌های ذره‌ای تقریباً ایزوتروپی هستند، در صورتی که کامپوزیت‌های لیفی به دلیل جهت‌یافتگی الیاف خواص غیر ایزوتروپیک دارند.

کاهش هزینه معیار مهمی در انتخاب و استفاده از پرکننده‌هاست. تقویت پلی‌مرها تنها در صورتی قابل توجه است که بهبود محسوس خواص مکانیکی یا کاهش هزینه را موجب شود و با مواردی که به دست آوردن ترکیب خاص از خواص با روشهای دیگر غیرممکن باشد.

تأثیر پرکننده‌های ذره‌ای بر خواص ماتریسهای پلی‌مری گرچه میزان تأثیر پرکننده‌های ذره‌ای بر خواص ماتریسهای پلی‌مری تابع نوع ذرات، خواص فیزیکی است، نوع پلی‌مر و روش آمیزه‌سازی و شکل دادن کامپوزیت است، لکن این تأثیرات را در مورد پلاستیکهای گرما نرم و پرکننده‌های معدنی می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

افزایش: دانسیته، مدول‌های کشسانی، خمشی و فشاری، سختی، دمای و ایلچش گرمایی، خواص الکتریکی، رسانایی گرما و شاخص جریان ذوب.



Slip	لغزش
Twining	جفت شدن
Stress - Strain Behavior	رفتار تنش - کرنش
Hookean	هوکین
Chain - Stiffening	ساختار زنجیری سفت
Shrinkage	درهم رفتگی
Filament Winding	استریجی
High Performance Polymers	پلی‌مرهای پاکار کرد عالی
Matrix Toughness	مقاومت در مقابل ضربه مکانیکی ماتریسها
Particulate reinforcement	تقویت کننده‌های ذره‌ای
Heat distortion Temperature	دمای وابستگی گرمایی
Isotropic	ایزوتروپی

**References**

- 1) K. K. Chawla, *Composite Materials Science and Engineering*, Springer - Verlag, New York, 1987
- 2) J. R. Vinson and Tsu - Weiclau, *Composite Materials and Their Use in Structures*, Allied Science, London, 1975
- 3) P. D. Ritchie, Ed., *Plasticizers, Stabilizers and Fillers*, Hliffe Books, London, 1972
- 4) L. Maschia, *The Role of Additives in Plastics*, Edward Arnold Publishers, 1974
- 5) R.B. Seymour, Ed., *Additives for Plastics, Vol. 1*, Academic Press, 1978
- 6) H. Katz and J.Milewski, *Handbook of Fillers and Reinforcements for Plastics*, Van Nostrand Reinhold, New York, 1977 ... ادامه دارد...

کاهش: انقباض، وابستگی خواص مکانیکی به دما، خزش، استحکام کششی، فشاری و خمشی، کرنش در شکست، مقاومت در برابر ضربه، انبساط گرمایی و هزینه.

یادآوری می‌شود که در بعضی موارد (ترکیب پرکننده پلاستیک گرما نرم خاص) امکان تغییر خواص در جهتی عکس حالات فوق را نباید نادیده گرفت.

در مورد سایر خواص از قبیل مقاومت شیمیایی مقاومت در برابر عوامل جوی و سایش و پارگی، اصطکاک و جذب آب، تنها پس از بررسی ترکیب مورد آزمایش می‌توان اظهار نظر کرد.

جدول ۴ برخی از موارد استفاده پرکننده‌های ذره‌ای و صفحه‌ای را در پلی‌مرهای مختلف نشان می‌دهد.

	واژه‌نامه:
Polymerization	پلی‌مر شدن
Condensation Polymerization	پلی‌مر شدن تراکمی
Addition Polymerization	پلی‌مر شدن افزایشی
Thermoset	گرما سخت
Thermoplastic	گرما نرم
Crosslinked Polymers	پلی‌مرهای دارای پیوند عرضی
Glass Transition Temperature	دمای انتقال شیشه‌ای
Lamellae	لاملا
Crystallite	کریستالیت
Spherulites	گویچه‌ها
Block	دسته‌ای