



## رفتار مواد پیشرفته

کتابچه جمع آوری مطالب در مورد سازه های کامپوزیتی و مکانیک مواد مرکب  
ویرایش سوم، سال ۱۴۰۱

محمد آزادی، دانشیار دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه سمنان

## مطالب درسی

فصل اول: معرفی مواد مرکب  
فصل دوم: روابط پایه در مکانیک جامدات  
فصل سوم: الاستیسیته مواد مرکب تک لایه  
فصل چهارم: الاستیسیته مواد مرکب چند لایه  
بخش اول: ورق های کامپوزیتی  
بخش دوم: استوانه های کامپوزیتی  
بخش سوم: تیرهای کامپوزیتی  
فصل پنجم: معرفی مواد جدید مرکب  
بخش اول: مواد هدفمند  
بخش دوم: مواد نانوساختار  
بخش سوم: فرامواد با ساختار سلولی  
فصل ششم: تحلیل واماندگی در مواد مرکب  
فصل هفتم: روش انرژی در تحلیل مواد مرکب

## مطالب کتابچه

فصل اول: معرفی مواد مرکب  
فصل دوم: روابط پایه در مکانیک جامدات (مرجع: کتاب هراکویچ)  
فصل سوم: الاستیسیته مواد مرکب تک لایه (مرجع: کتاب هراکویچ)  
فصل چهارم: الاستیسیته مواد مرکب چند لایه (مرجع: کتاب هراکویچ)  
بخش اول: ورق های کامپوزیتی (مرجع: کتاب هراکویچ)  
بخش دوم: استوانه های کامپوزیتی (مرجع: کتاب هراکویچ)  
بخش سوم: تیرهای کامپوزیتی (مرجع: کتاب کاوو)  
فصل پنجم: معرفی مواد جدید مرکب  
بخش اول: مواد هدفمند  
بخش دوم: مواد نانوساختار  
بخش سوم: فرامواد  
فصل ششم: تحلیل واماندگی در مواد مرکب  
فصل هفتم: روش انرژی در تحلیل مواد مرکب (مرجع: کتاب هراکویچ)

### ۱- مقدمه

واژه کامپوزیت، از کلمه لاتین *to compose* و به معنای ترکیب کردن، گرفته شده است. معادل فارسی کلمه کامپوزیت، مواد مرکب است. کامپوزیت از ترکیب و اختلاط دو یا چند ماده تشکیل می شود. در تهیه کامپوزیت، اغلب اختلاط، بصورت فیزیکی می باشد نه شیمیایی، بدین صورت که اجزاء تشکیل دهنده ماهیت طبیعی شیمیایی خود را حفظ می کنند. البته در بعضی موارد، به منظور اصلاح و بهبود خواص، اصلاحات شیمیایی نیز صورت می گیرد.

سابقه استفاده از کامپوزیت ها یا مواد مرکب، به دهه ۱۹۴۰ باز می گردد. در آن زمان، ارتش های امریکا و شوروی سابق، در رقابتی تنگاتنگ، موفق به ساخت کامپوزیت پایه پلیمری الیاف بور با رزین اپوکسی، برای استفاده در صنعت هوافضا شدند.

### ۲- مشخصات مواد مرکب

تعاریف متفاوتی برای مواد کامپوزیتی ارائه شده است. از یک دیدگاه، کامپوزیت، ماده ای است که دارای ویژگی های زیر باشد: الف) جامد باشد؛ هدف از تهیه کامپوزیت، تولید ماده ای ترکیبی با استحکام و خواص مکانیکی برتر می باشد. بدین صورت ترکیبات غیر جامد از لحاظ خواص مکانیکی نامطلوب می باشند.

ب) مصنوعی باشد؛ بدین صورت که از ترکیب مواد مختلف حاصل شود. کامپوزیت های طبیعی مانند چوب، استخوان و عضله در این مقوله قرار نمی گیرد.

ج) حاصل آمیختن دو یا چند ماده یا فاز متفاوت، در مقیاس میکروسکوپی باشد؛ به طوری که خواص مکانیکی یکی از فازها یا مواد نسبت به دیگر فازها یا مواد برتر باشد. این فاز یا ماده با خواص مکانیکی برتر، تقویت کننده نامیده می شود.

د) دارای خواصی برتر از خواص هر یک از اجزاء تشکیل دهنده به تنهایی، باشد؛ به عنوان مثال دو ماده فایبرگلاس و رزین پلی استر غیر اشباع، هر دو شکننده هستند اما از ترکیب این دو، یک ماده کامپوزیت با مقاومت ضربه ای بسیار بالا نسبت به هر یک از اجزاء حاصل می شود که کاربرد فراوانی دارد.

ه) همچنین، باید اجزای تشکیل دهنده ویژگی خود را حفظ کرده، در یکدیگر حل نشده و با هم ممزوج نشوند.

نکته: آلیاژهایی که دارای ساختار دو فازی هستند و توسط فرآیند جامدسازی یا عملیات حرارتی ایجاد شده اند را نمی توان کامپوزیت نامید. ضمناً ماده حاصل از افزودن روان کننده ها یا پرکننده ها به پلاستیک ها، کامپوزیت نیست.

بطور کلی، خواص کامپوزیت ها شامل موارد استحکام، مقاومت به ضربه زیاد، انعطاف پذیری، مقاومت در برابر عوامل خوردنده محیطی و شیمیایی، سبکی، وجود روش های مختلف ساخت، امکان تولید اشکال پیچیده و متنوع، سهولت و سرعت زیاد در ساخت، صرفه اقتصادی، چقرمگی مناسب، مقاومت در برابر حرارت، سختی مناسب و ... می باشد.

### ۳- ساختار مواد مرکب

کامپوزیت ها یا مواد مرکب، بطور کلی، از یک بخش یا فاز ماتریس یا نگهدارنده (Matrix) و یک فاز تقویت کننده (Reinforcing Phase) تشکیل شده اند که فاز ماتریس، به عنوان یک فاز پیوسته و فاز تقویت کننده، به عنوان یک فاز ناپیوسته نیز، نامیده می شود.

معمولاً وظایف بستر، به شرح زیر است:

الف) احاطه کردن ماده تقویت کننده، بطوری که آنها را در محل و آرایش مطلوب نگه داشته و نمی گذارد ماده تقویت کننده، پراکنده شود.

ب) محافظت از ماده تقویت کننده در برابر عوامل شیمیایی (دما، رطوبت، ضربه و ...) است.

ج) چون مواد بستر را معمولاً نرم انتخاب می کنند، وقتی نیرو به کامپوزیت وارد می شود، توسط بستر به ماده تقویت کننده انتقال داده شود تا ماده تقویت کننده، نیرو را تحمل نماید.

بطور معمول، فاز ناپیوسته سخت تر و قوی تر از فاز پیوسته می باشد. استثنای این مطلب، حالت رابرهایی تقویت شده با پلیمر می باشد که به منظور افزایش خواص مکانیکی، رابر توسط ذرات پلیمری سخت که بصورت پراکنده در فاز ماتریس آن قرار می گیرند، تقویت می شود.

خواص مواد مرکب یا کامپوزیت ها، بطور عمده، وابسته به موارد زیر است:

الف) خواص اجزای تشکیل دهنده

ب) توزیع اجزای تشکیل دهنده

ج) میزان برهمکنش اجزای تشکیل دهنده

د) هندسه ماده تقویت کننده

هندسه ماده تقویت کننده وابسته به اندازه ذرات، شکل ذرات و توزیع ذرات می باشد. البته سیستم های کامپوزیتی شامل فاز تقویت کننده با هندسه یکسان نیز می توانند دارای خواص متفاوت باشند. به عنوان مثال، با تغییر درصد (یا غلظت) تقویت کننده و یا توزیع غلظت تقویت کننده در ماتریس پلیمری و میزان جهت گیری، خواص متفاوتی حاصل می شود.

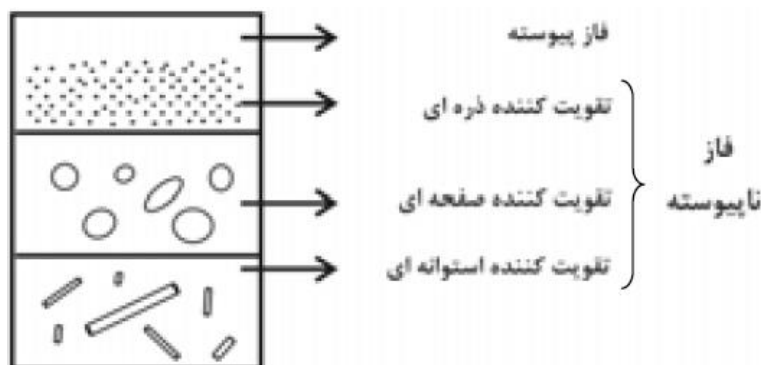
#### ۴- طبقه بندی کامپوزیت ها

هدف از تهیه کامپوزیت ها، افزایش خواص مکانیکی آنها (مانند استحکام، سختی و چقرمگی و توانایی کاربرد مواد در دماهای بالا) می باشد. مکانیزم استحکام، وابستگی شدیدی به هندسه تقویت کننده دارد. بدین ترتیب از یک دیدگاه مناسب، می توان مواد کامپوزیتی را بر اساس هندسه تقویت کننده تقسیم بندی نمود. شکل فاز ناپیوسته یا تقویت کننده، اغلب با شکل های کروی و استوانه ای تخمین زده می شود. از این دیدگاه و همچنین بر اساس نسبت طول به عرض و یا عدد نسبت طول به قطر (Aspect Ratio)، فاز ناپیوسته یا تقویت کننده، به دسته های زیر تقسیم می شود:

الف) ذره ای یا پودری (Particulate Composite): با نسبت طول به قطر برابر با یک، عملاً خنثی است. مانند کربن بلاک که سبب افزایش هدایت الکتریکی رابر می شود.

ب) کروی یا پولکی: با نسبت طول به قطر بیشتر از یک، عملاً فاز نیمه تقویتی است. مانند میکا که برای عایق بندی حرارتی و برقی استفاده می شود و به شکل پولک است.

ج) لیفی یا رشته ای (Fibrous Composite): با نسبت طول به قطر بسیار بیشتر از یک، عملاً تقویتی است. مانند الیاف کربن و الیاف شیشه که از این دسته می باشند.



از لحاظ نوع بستر، کامپوزیت ها به دسته های زیر طبق بندی می شوند:

الف) کامپوزیت های بستر پلیمری (PMC)

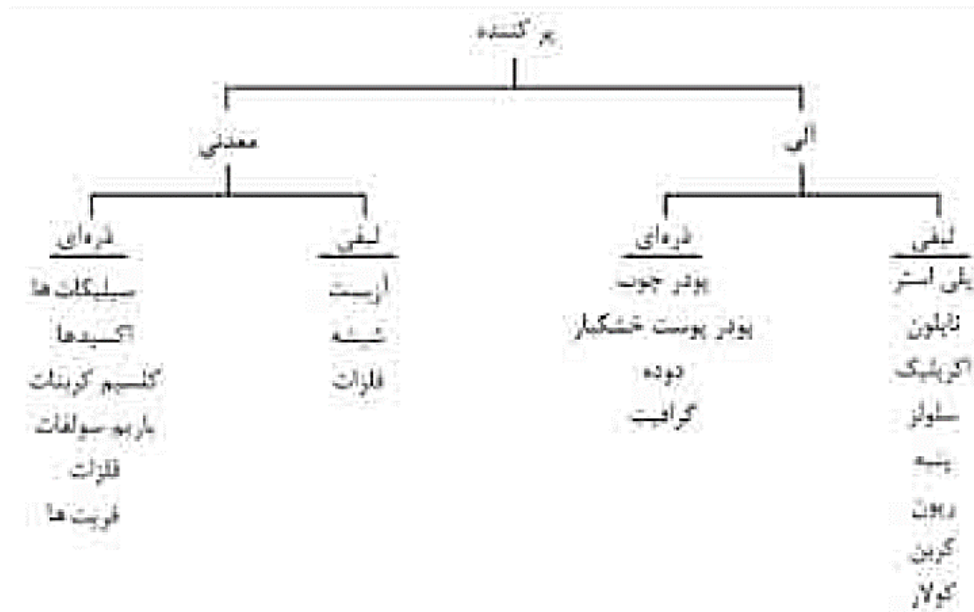
ب) کامپوزیت های بستر فلزی (MMC)

ج) کامپوزیت های بستر سرامیکی (CMC)

برای نوع سوم، مثال فایبرگلاس وجود دارد که گاه پلاستیک تقویت شده با الیاف (FRP) نیز گفته می شود. همچنین، امروز کاربرد کامپوزیت های پلیمری، روز بروز گسترش یافته و نوع فلزی و سرامیکی، محدودتر هستند. پلیمرها از نظر ساختاری بسیار پیچیده تر از فلزات و سرامیک ها هستند اما با هزینه کم و به سهولت تولید می شوند. از طرفی، پلیمرها دارای استحکام و مدول کشسانی کمتر و گستردگی در دمای کاربردی پائینتری می باشند. قرار گرفتن دراز مدت پلیمرها در معرض نور ماوراء بنفش یا بعضی حلال ها، تضعیف خواص آنها را به دنبال دارد. البته در مقایسه با فلزات، دارای مقاومت شیمیایی بهتری هستند. همچنین، اغلب به علت وجود پیوندهای کووالانسی در آنها، هدایت گرمایی و الکتریکی ضعیفی نشان می دهند. در بررسی استحکام و سختی مواد، به ترتیب، سرامیک ها، فلزات و پلیمرها هستند.

	Density ( $mg/m^3$ )	Young's Modulus (GPa)	Strength (MPa)	Ductility (%)	Toughness $K_{IC}$ ( $MPa\sqrt{m}$ )	Specific Modulus [(GPa)/ ( $mg/m^3$ )]	Specific strength [Mpa]/ ( $mg/m^3$ )
<b>CERAMICS</b>							
Alumina $Al_2O_3$	3/87	382	332	0	4/9	99	86
Magnesia $MgO$	3/60	207	230	0	1/2	58	64
Silicon Nitride $Si_3N_4$		166	210	0	4/0		
Zirconia $ZrO_2$	5/92	170	900	0	8/6	29	152
$\beta$ - Sialon	3/25	300	945	0	7/7	92	291
Glass-ceramic Silceram	2/90	121	174	0	2/1	42	60
<b>METALS</b>							
Aluminium	2/70	69	77	47		26	29
Aluminium -2%Zn -0.1%Zr	2/83	72	325	18		25	115
Brass Cu -30%Zn	8/50	100	550	70		12	65
Nickel -20%Cr -15%Co	8/18	204	1200	26		25	147
Steel mild	7/86	210	460	35		27	59
Titanium -2/5% Sn	4/56	112	792	20		24	174
<b>POLYMERS</b>							
Epoxy	1/12	4	50	4	1/5	4	36
Melamine formaldehyde	1/50	9	70			6	47
Nylon 66	1/14	2	70	60		18	61
Polyetheretherketone	1/30	4	70			3	54
Polymethylmethacrylate	1/19	3	50	3	1/5	3	42
Polystyrene	1/05	3	50	2	1/0	3	48
Polyvinylchloride rigid	1/70	3	60	15	4/0	2	35

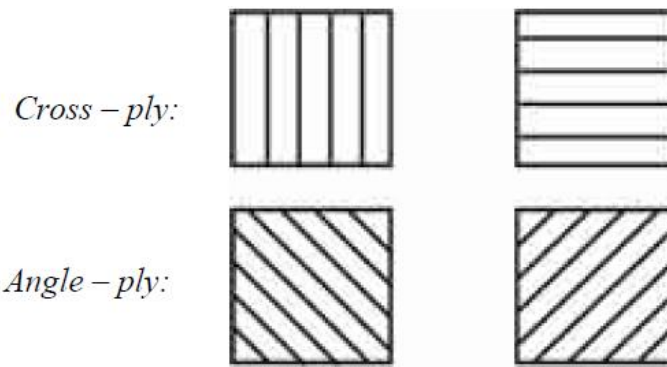
از یک دیدگاه دیگر، پرکننده ها یا تقویت کننده ها، به دو دسته آلی و معدنی نیز، تقسیم می شوند که هر یک، شامل دو گروه ذره ای و لیفی می باشد.



نکته: نمونه هایی از سیلیکات ها شامل خاک رس (کائولن)، تالک، میکا، فلدسپار، بنتونیت، دولومیت، پودرسنگ، کلسیم و سیلیکا می باشد. همچنین، نمونه هایی از اکسیدها شامل آلومینا، آلومینای هیدراته، اکسید آنتیموان، اکسید منیزیم، اکسید تیتان، اکسید روی و سیلیکا (شامل شیشه، کوارتز و هیدروژول ها) می باشد.

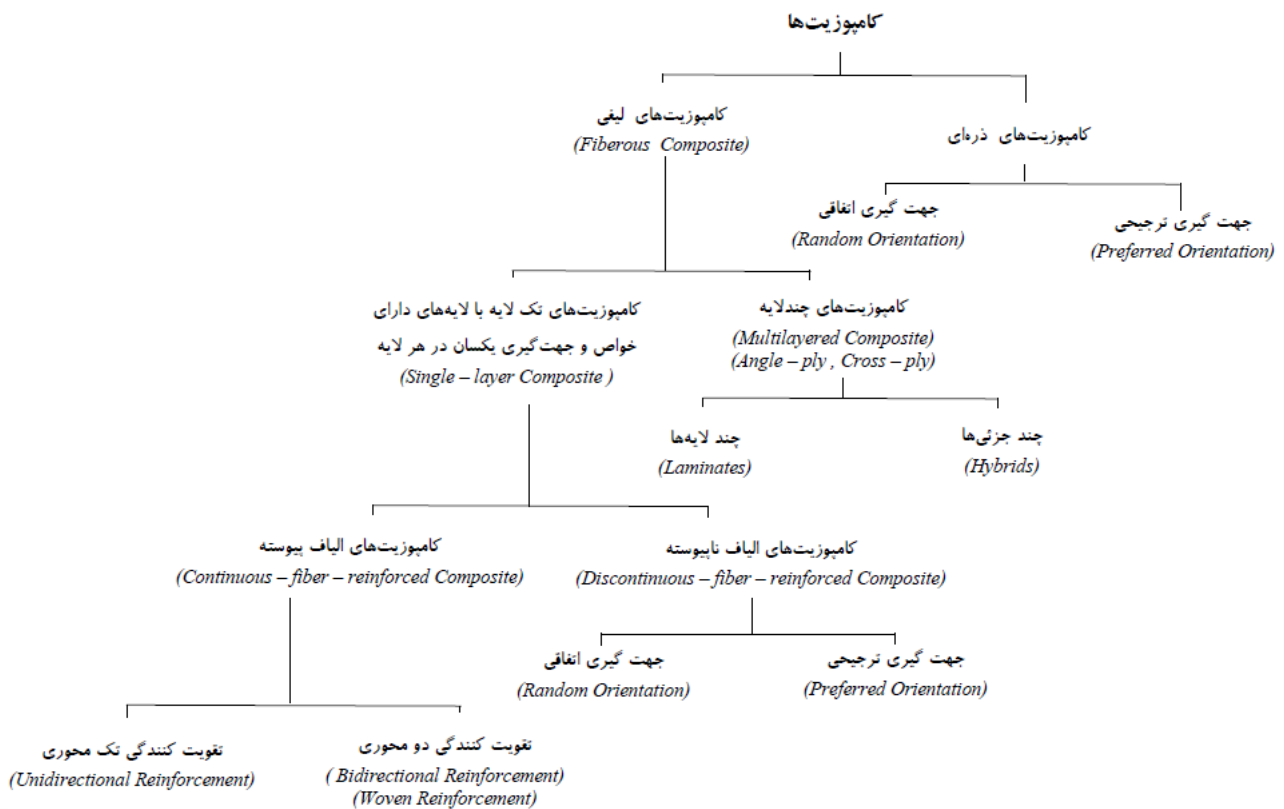
در مورد تقویت کننده های ذره ای، آرایش یافتگی یا جهت گیری مفهوم خاصی ندارد، اما در نوع لیفی، براساس جهت گیری، مواد به دو دسته ایزوتروپ یا همسان (Isotropic) و غیرایزوتروپ (Anisotropic) تقسیم می شوند. ماده ایزوتروپ، ماده ای است که خواص آن در جهت های مختلف یکسان می باشد. اما ماده غیرایزوتروپ، ماده ای است که در جهت های مختلف، دارای خواص متفاوت می باشد. اختلاف ماده ایزوتروپ با ماده همگن این است که در ماده همگن، خواص در نقاط مختلف، یکسان است. حال چنانچه، ماده در محورهای معینی، دارای خواص یکسان باشد، ارتوتروپ (Orthotropic) نامیده می شود. اغلب کامپوزیت های ذره ای، ایزوتروپ هستند، زیرا برای ذرات جهت گیری وجود ندارد و خواص در جهت های مختلف بارگذاری، یکسان می باشد.

براساس طبقه بندی هندسه تقویت کننده، کامپوزیت ها یا مواد مرکب ذره ای، ممکن است کروی، مکعبی، چهار وجهی، قرصی شکل و یا هر شکل هندسی منظم یا غیر منظم باشند. کامپوزیت ها یا مواد مرکب لیفی، در حالت کلی، به دو دسته تک لایه و چندلایه تقسیم می شوند. کامپوزیت های تک لایه، از تعداد لایه های زیادی تشکیل شده اند که همه لایه ها دارای جهت گیری و خواص یکسان می باشند و به همین دلیل، کل لایه ها را می توان بصورت یک لایه کامپوزیتی در نظر گرفت. کامپوزیت های چندلایه، ممکن است از تعداد کم یا زیادی از لایه ها تشکیل شده باشد. در این نوع کامپوزیت، الیاف می تواند زاویه های گوناگونی داشته باشد. در نوع کامپوزیت چندلایه cross-ply، زاویه الیاف ها، صفر یا نود درجه است اما در نوع angle-ply، زاویه ها بین مقادیر صفر و نود تغییر می کند.



نکته: هر لایه کامپوزیتی را Lamina و مجموع آنها را Laminate می گویند. چنانچه جنس فاز ماتریس و الیاف کامپوزیت در لایه ها یکی باشد، همچنان Laminate نامیده شده و در غیر اینصورت، Hybrid خواهد بود. در واقع، در نوع چند جزئی هیبرید، یک نوع رزین با چند نوع الیاف بکار برده می شود. به عنوان مثال، در کامپوزیت هیبرید، یک لایه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه و لایه ای دیگر، اپوکسی تقویت شده با الیاف گرافیت می باشد.

نکته: کامپوزیت های الیاف پیوسته را کامپوزیت های الیاف بلند (Long-fiber composite) و کامپوزیت های الیاف ناپیوسته را کامپوزیت های الیاف کوتاه (Short-fiber composite) نیز می گویند. به عنوان مثال، نمد، لایه ای شامل الیاف کوتاه با جهت گیری اتفاقی در ساختار ماتریس می باشد. بطور کلی، با جهت گیری الیاف ها می توان استحکام کامپوزیت را افزایش داد و میزان ایزوتروپی آنها را نیز کنترل نمود. در کامپوزیت های الیاف پیوسته (یا الیاف بلند)، ماتریس نقش کمتری دارد. همچنین سطح مشترک هم، نقش کمتری دارد. همچنین، تنش برشی سبب جهت دار شدن الیاف ناپیوسته (یا الیاف کوتاه) می شود. این تنش در دیواره های قالب بیشتر است. به منظور افزایش مقاومت کامپوزیت در جهت های مختلف، لایه های دارای الیاف پیوسته را در جهت گیری های زاویه ای مختلف، روی هم قرار می دهند.



## ۵- کامپوزیت های ذره ای

کامپوزیت های تقویت شده با ذرات، کامپوزیت ذره ای نامیده می شود. در حالت کلی، ذرات در بهبود مقاومت شکست چندان مؤثر نیستند. البته وجود ذرات رابری در پلیمر شکننده، با جلوگیری از رشد ترک در ماتریس پلیمری، سبب بهبود مقاومت شکست می شوند. دیگر انواع ذرات شامل ذرات سرامیکی، فلزی یا ذرات غیرآلی، سبب ایجاد تقویت در ماتریس های فلزی با مکانیزم های متفاوت می شوند. وجود ذرات در ماتریس پلیمری، سبب محدود شدن میزان تغییر شکل آن، به علت سختی ذاتی خود، می شود. در مجموع، ذرات در کامپوزیت های ذره ای، سبب افزایش سختی کامپوزیت می شوند اما منجر به کاهش استحکام ماده می شوند. به عنوان مثال، وجود ذرات سخت در ماتریس شکننده، سبب کاهش استحکام به علت ایجاد تمرکز تنش در نقاطی از ماتریس پلیمری، می شوند. تقویت کننده های ذره ای، اغلب در مواردی استفاده می شوند که مقاومت در برابر نیرو مطرح نباشد. از تقویت کننده های ذره ای جهت اصلاح هدایت حرارتی و الکتریکی، بهبود کاربرد در دمای بالا، کاهش اصطکاک، افزایش مقاومت سایشی، بهبود ماشینکاری، کاهش آبرفتگی، رنگ و بخصوص به منظور پرکنندگی (برای کاهش قیمت) استفاده می شود.

چند مثال کاربرد تقویت کننده های ذره ای عبارتند از:

(الف) استفاده از کربنبلک یا سیلیکا، به منظور بهبود مقاومت سایشی الاستومرها

(ب) استفاده از ذرات مس در اپوکسی، به منظور افزایش هدایت الکتریکی

(ج) استفاده از ذرات سرب در پلاستیک ها، به منظور افزایش مقاومت در برابر اشعه گاما

به منظور بررسی خواص فیزیکی تقویت کننده ای ذره ای، مهمترین پارامترها عبارتند از:

(الف) شکل ذرات: تقویت کننده های ذره ای، دارای شکل های هندسی منظم یا غیرمنظمی هستند که از خرد کردن یا آسیاب کردن و یا فرآیندهای دیگری حاصل می شوند.

(ب) اندازه و توزیع ذرات: ذرات ریز بطور معمول، دارای قدرت تقویت کنندگی بالاتری هستند. اغلب، میانگین مطلوب اندازه ذرات بین ۲ تا ۵ میکرون است. ذرات کوچکتر به علت افزایش بیشتر ویسکوزیته مذاب های پلیمری، سبب محدود شدن جریان یافتگی آنها می شوند.

(ج) نسبت بسته بندی ذرات: این نسبت حاصل حجم خالی بین ذرات و درون ذرات، به حجم کل این ذرات می باشد که تأثیر زیادی در پارامتر جذب روغن دارد. معمولاً میزان جذب روغن، مقدار روغنی است که توسط ۱۰۰ گرم پودر، در ماده جذب می شود.

(د) مساحت سطح: مساحتی است که یک گرم از ذرات اشغال می کند.

(ه) دانسیته پودری: نسبت جرم به حجمی است که تقویت کننده اشغال می کند.

پارامترهایی مانند شکل، اندازه، توزیع اندازه ذرات و مساحت سطح، وابستگی زیادی به یکدیگر دارند و لذا این پارامترها از مهمترین عوامل تعیین کننده در میزان تقویت و اصلاح خواص و شرایط فرایندهای شکل دهی در کامپوزیت های ذره ای هستند.



ذرات ریز (g/100g)	سختی (Mohs)	تست سفته بندی	مساحت سطح (m <sup>2</sup> /g)	دانسیته (g/cc)	شکل ذرات	وزن اذرات (Mw)	میانگین اذرات (Mm)	فرمول شیمیایی	برکننده
۹-۲۱ ۳۵-۴۰	۲/۵-۳ ۲/۵-۳	+۷-+۱۸ +۳-+۱۵	-۳-۲ ۱۱-۲۶	۲/۷ ۲/۶	مکعبی مکعبی و کروی	+۱۰-۶۰ +۱۰۵-۲۰	۳۰-۱۲۰ +۱۰۷-۱۰	CaCO <sub>3</sub> طبیعی CaCO <sub>3</sub> رسوب	کربنات کلسیم
۳-۵۰	۲	+۳۵-+۵۶	۸-۲۲	۲/۶	مکعبی و صفحه‌ای	+۱۳-۲۵	+۱۶-۵۰	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .۲SiO <sub>2</sub> .۲H <sub>2</sub> O	کائولن
۳-۶۵	۱	+۳-+۵۸	۶-۱۷	۲/۸	مکعبی و صفحه‌ای	+۱۰۵-۶۰	۱/۸-۶۰	۲MgO.۲SiO <sub>2</sub> .H <sub>2</sub> O	تالک
۴-۵۰	۲/۵-۳	+۲-+۱۵	۳۰	۲/۸۲	صفحه‌ای	+۱۵-۵۰	۳-۵	Al, K	میکا
۱-۲۵ ۳-۱۰۰	۶-۷ ۵-۶	+۵-+۱۶ +۳-+۱۴	+۸-۱/۵ ۲۰-۲۰۰	۲/۶۵ ۲/۵	مکعبی مکعبی و کروی	+۱۰-۷۰ +۱۰۳-+۲	۲-۱۰ +۱۰۲-+۰۸	SiO <sub>2</sub> طبیعی SiO <sub>2</sub> سنتزی	سیلیکا

مقدار مصرفی (g/hr)	خواص الکتریکی	کاهش هزینه	نیمه نفوذی	پلیمر	نوع پلیمر
۰-۳۰۰	کائولن تالک	کلسیم کربنات پنبه نسوز کائولن	دوده سیلیکا کائولن	پلی وینیل کلراید	پلاستیک‌های گرماترم
۰-۳۰	-	-	تالک	پلی پروپیلن	
۰-۴۰۰	تالک کائولن	کلسیم کربنات کائولن	سیلیکا کائولن	-	الاستومر
۰-۱۵۰	کائولن	کلسیم کربنات	بودر چوب	فولی	پلاستیک‌های گرماسخت
۰-۱۵۰	کائولن	کلسیم کربنات	بودر چوب سلولز	آمین	
۰-۶۰۰	آلومینای هیدراته	کلسیم کربنات بودر سنگ سیلیکا	سیلیکا	اپوکسی	
۰-۶۰۰	-	کلسیم کربنات	سیلیکا	پلی استر	

مکانیسم عمل تقویت کننده‌ها عبارتند از:

الف) تشکیل پیوند شیمیایی بین تقویت کننده و پلیمر: به عنوان مثال، با افزودن دوده به الاستومرها، با زنجیره‌های کربنی وارد واکنش رادیکالی می‌شود و با پیوند خوردن به آنها، سبب تقویت آنها می‌شود.

ب) اشغال فضا یا حجمی درون ماتریس و جلوگیری از تغییر شکل آن: بدین صورت با اشغال فضایی از ماتریس، حرکت زنجیره‌های کربنی کاهش می‌یابد و سبب کاهش تغییر شکل ماتریس می‌شود. در این حالت، میان ذرات و پلیمر، پیوند شیمیایی وجود ندارد اما نیروهای ضعیف وان دروالسی ایجاد می‌شود. توزیع یکنواخت ذرات در ماتریس پلیمری، سبب افزایش سطح تماس ذرات با زنجیره‌های کربنی می‌شود و در نتیجه استحکام ماتریس پلیمری افزایش می‌یابد.

ج) جذب انرژی توسط ذرات تقویت کننده: با اعمال تنش به ماتریس پلیمری، مولکول‌ها در معرض تنش قرار گرفته، انرژی وارده را جذب می‌کنند و براحتی در سطح ذرات پرکننده می‌لغزند. در نتیجه، خاصیت ضربه پذیری ماده، افزایش می‌یابد. کلیه تقویت کننده‌ها، اغلب مدول کشسانی را افزایش می‌دهند، در صورتی که افزایش استحکام کششی به مقدار قابل توجه، تنها با استفاده از تقویت کننده‌های نوع لیفی، امکانپذیر است. تقویت کننده‌های لیفی در مقایسه با تقویت کننده‌های ذره‌ای، دمای واپیچش گرمایی را بیشتر افزایش می‌دهند. همچنین تأثیر ذرات صفحه‌ای (مانند تالک و میکا) بر افزایش دمای واپیچش گرمایی بیشتر از ذرات مکعبی و کروی است.

میزان تأثیر تقویت کننده‌های ذره‌ای بر خواص ماتریس‌های پلیمری، تابع نوع ذرات، نوع ماتریس، روش آمیزه‌سازی و شکل دهی کامپوزیت هاست. این تأثیرها برای کامپوزیت‌های شامل ماتریس پلاستیک گرمانرم و تقویت کننده‌های معدنی را اغلب می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود:

الف) خواصی که افزایش می‌یابد شامل دانسیته، مدول‌های کشسانی، خمشی و فشاری، سختی، دمای واپیچش گرمایی، خواص الکتریکی، هدایت گرمایی و شاخص جریان مذاب است.

ب) خواصی که کاهش می‌یابد شامل انقباض، وابستگی خواص مکانیکی به دما، خزش، استحکام کششی، فشاری و خمشی، کرنش در شکست، مقاومت در برابر ضربه، انبساط گرمایی و هزینه است.

قابل توجه است که در مورد بعضی خواص، مانند مقاومت شیمیایی، مقاومت در برابر عوامل محیطی، مقاومت پارگی، اصطکاک و میزان جذب آب، نمی‌توان در حالت کلی اظهار نظر نمود.

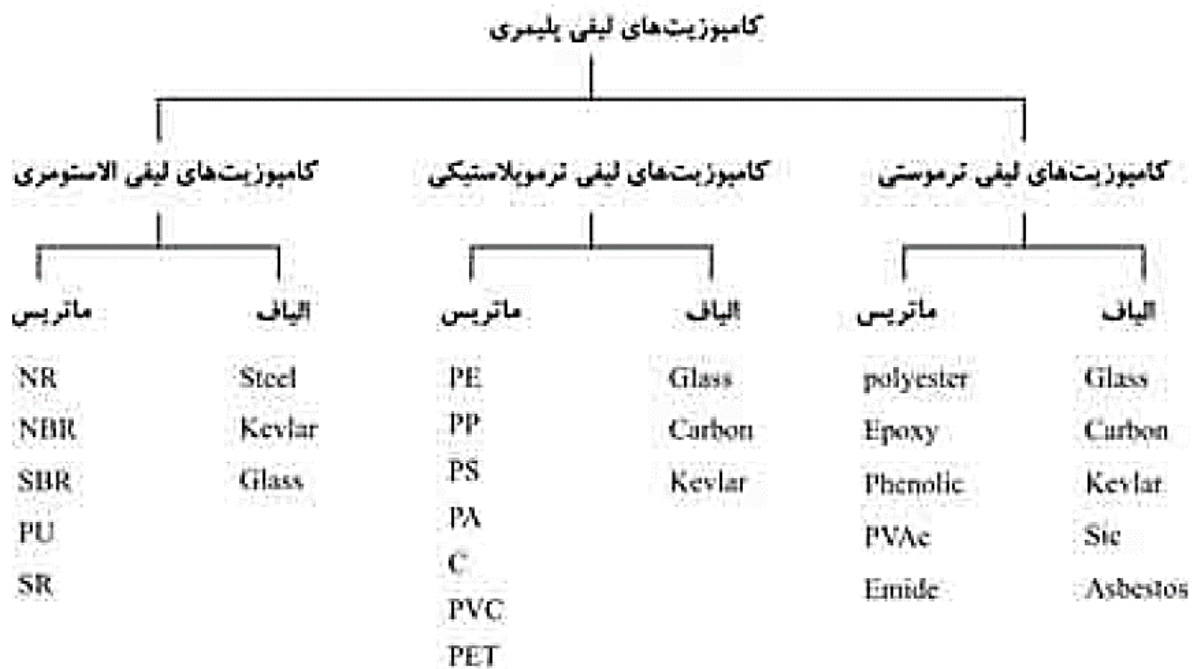
## ۶- کامپوزیت‌های لیفی

مقدار استحکام اندازه‌گیری شده، اغلب بسیار کمتر از مقدار استحکام محاسبه شده، می‌باشد. این امر به دلیل وجود نقص و حفره‌های ذاتی در مواد می‌باشد. بدین صورت، چنانچه بتوان این نقص‌ها را حذف کرد و یا حتی کاهش داد، میزان استحکام افزایش می‌یابد. ترک‌های قرار گرفته در جهت عمود بر نیروی اعمالی، تأثیر بیشتری بر استحکام ماده دارند. بدین صورت، الیاف‌ها به علت داشتن سطح مقطع کوچک، استحکام کششی بالاتری نشان می‌دهند. همچنین، جهت‌گیری زنجیری در الیاف‌ها یکی دیگر از دلایل بالا بودن استحکام کششی آنهاست.

نکته: استحکام بالای الیاف شیشه‌ناشی از سطح بدون نقص آن است، در حالی که در الیاف‌های آرامید و گرافیت، به علت جهت‌گیری ساختار مولکولی یا اتمی آنهاست. الیاف E-Glass، به علت قیمت پائین و خواص مکانیکی مطلوب، مهمترین الیاف تقویت کننده می‌باشد. الیاف‌ها به علت سطح مقطع کم، قابل استفاده در مصارف مهندسی نیستند و بدین منظور از ماتریس‌های پلیمری برای نگهداری آنها و تشکیل کامپوزیت لیفی استفاده می‌شود.

<i>Material</i>	<i>Tensile modulus (E) (GPa)</i>	<i>Tensile strength (<math>\sigma_u</math>) (GPa)</i>	<i>Density (<math>\rho</math>) (<math>g/cm^3</math>)</i>	<i>Specific modulus (E/<math>\rho</math>)</i>	<i>Specific strength (<math>\sigma_u / \rho</math>)</i>
<i>Fibers</i>					
<i>E – glass</i>	۷۲/۴	۳/۵	۲/۵۴	۲۸/۵	۱/۳۸
<i>S – glass</i>	۸۵/۵	۴/۶	۲/۴۸	۳۴/۵	۱/۸۵
<i>Graphite (high modulus)</i>	۳۹۰/۰	۲/۱	۱/۹۰	۲۰۵/۰	۱/۱
<i>Graphite (high tensile strength)</i>	۲۴۰/۰	۲/۵	۱/۹۰	۱۲۶/۰	۱/۳
<i>Boron</i>	۳۸۵/۰	۲/۸	۲/۶۳	۱۶۶/۰	۱/۱
<i>Silica</i>	۷۲/۴	۵/۸	۲/۱۹	۳۳/۰	۲/۶۵
<i>Tungsten</i>	۴۱۴/۰	۴/۲	۱۹/۳۰	۲۱/۰	۰/۲۲
<i>Beryllium</i>	۲۴۰/۰	۱/۳	۱/۸۳	۱۳۱/۰	۰/۷۱
<i>Kevlar ۴۹ (aramid polymer)</i>	۱۳۰/۰	۲/۸	۱/۵۰	۸۷/۰	۱/۸۷
<i>Conventional materials</i>					
<i>Steel</i>	۲۱۰/۰	۰/۳۴-۲/۱	۷/۸	۲۶/۹	۰/۰۴۳-۰/۲۷
<i>Aluminum alloys</i>	۷۰/۰	۰/۱۴-۰/۶۲	۲/۷	۲۵/۹	۰/۰۵۲-۰/۲۳
<i>Glass</i>	۷۰/۰	۰/۷-۲/۱	۲/۵	۲۸/۰	۰/۲۸-۰/۸۴
<i>Tungsten</i>	۳۵۰/۰	۱/۱-۴/۱	۱۹/۳۰	۱۸/۱	۰/۰۵۷-۰/۲۱
<i>Beryllium</i>	۳۰۰/۰	۰/۷	۱/۸۳	۱۶۶/۰	۰/۳۸

کامپوزیت های لیفی با بستر پلیمری نیز، مانند کامپوزیت های ذره ای، به سه دسته لیفی ترموست (گرماسخت)، لیفی ترموپلاست (گرمانرم) و لیفی الاستومری تقسیم می شوند. از بین مواد گرمانرم، موادی مانند پلی آمیدها، پلی استال ها، پلی کربنات ها، پلی پروپیلن، پلی اکریلونیتریل - بوتادین - استایرن و پلی ایمیدها، کاربرد بیشتری در تهیه کامپوزیت ها دارند. همچنین، ترموست های مهم با کاربرد بیشتر شامل اپوکسی ها، پلی استرها، فنلی ها، پلی ایمیدها می باشند. از مهمترین الاستومرها می توان به الاستومر طبیعی، پلی بوتادین، استارین - بوتادین رابر، اکریلونیترال بوتادین رابر اشاره نمود.



ترموپلاستیک‌ها یا گرمانرم‌ها در اثر حرارت، ذوب و سیال می‌شوند و آماده شکل‌گیری و قالب‌گیری می‌شوند و با سرد کردن آنها، دوباره حالت جامد ایجاد می‌گردد. از معایب عمده رزین‌های گرمانرم، انبساط و انقباض زیاد در اثر حرارت و خواص مکانیکی و گرمایی نسبتاً پائین آنهاست.

ترموست‌ها یا گرماسخت‌ها دارای شبکه‌های پیوندی بین زنجیری هستند و با حرارت دادن، ذوب نمی‌شوند و همچنین، قابلیت قالب‌گیری مجدد را ندارند. به علت امکان استفاده مجدد از گرمانرم‌ها، استفاده از رزین‌های گرمانرم در ساخت کامپوزیت‌ها، ساده‌تر از رزین‌های گرماسخت می‌باشد. به منظور قالب‌گیری ترموست‌ها، نیازی به دمای زیادی نیست و در دما و فشار معمولی می‌توان آنها را قالب‌گیری نمود. همچنین، دستگاه‌های مورد استفاده در تهیه ترموست‌ها نیز ارزان‌قیمت‌تر از ترموپلاستیک‌هاست.

مقاومت مواد در مقابل گسترش ترک و شکست وابسته به میزان شکنندگی یا چقرمگی آنهاست. به عنوان مثال، رزین‌های گرماسخت، دارای تعداد زیادی پیوندهای عرضی هستند و از استحکام، مدول و مقاومت خزشی مناسبی برخوردار می‌باشند. اما همین امر سبب شکنندگی بسیار زیاد آنها می‌شود. در مقابل، اغلب پلیمرهای گرمانرم، دارای مقدار انرژی شکست بالایی هستند، زیرا حجم آزاد زیادی برای جذب انرژی برای جلوگیری از رشد ترک دارند.

در مقایسه پلاستیک‌های گرمانرم و گرماسخت می‌توان گفت:

الف) شکنندگی گرماسخت‌ها بیشتر است.

ب) مقاومت حرارتی گرماسخت‌ها بیشتر است.

ج) چکش‌خواری (چقرمگی) گرمانرم‌ها بیشتر است.

د) مدول و سختی گرماسخت‌ها بیشتر است.

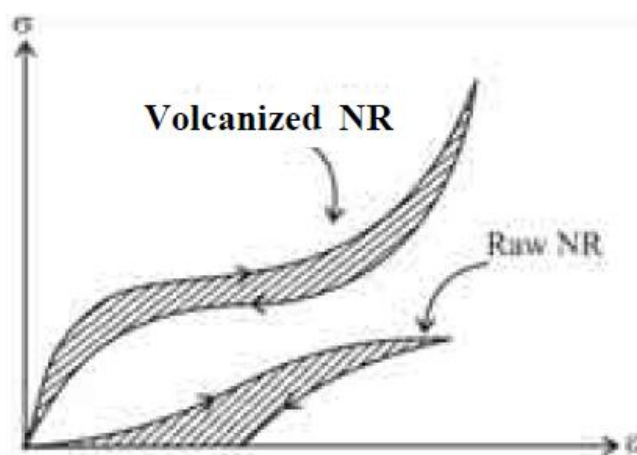
properties	Thermosets	Thermoplastics
Young's modulus(GPa)	۱/۳-۶/۰	۱/۰-۴/۸
Tensile strength (MPa)	۲۰-۱۸۰	۴۰-۱۹۰
Fracture toughness		
$K_{IC} (MPam^{1/2})$	۰/۵-۱/۰	۱/۵-۶/۰
$G_{IC} (kJ/m^2)$	۰/۰۲-۰/۲	۰/۷-۶/۵
Maximum service temperature (°C)	۵۰-۴۵۰	۲۵-۲۳۰

یک الاستومر، ماده ای پلیمری است که دارای ویژگی رابرالاستیسیته است. در واقع الاستومرها موادی هستند که دارای قابلیت تغییر شکل زیادی هستند که در حالت خام، غیر کاربردی می باشند. به همین علت، برای ایجاد اتصالات عرضی دائمی در ساختار آنها و رسیدن به خواص مکانیکی مطلوب، تحت فرآیند پخت قرار می گیرند. ضمناً این فرآیند پخت، ولکانیزاسیون نامیده می شود. سیستم پخت متداول در ولکانیزاسیون رابرها، سیستم پخت گوگردی و پراکسیدی است.

خاصیت رابرالاستیسیته از دو دیدگاه قابل بررسی است:

الف) از دیدگاه خواص مکانیکی: از این دیدگاه، ماده ای دارای خاصیت رابرالاستیسیته است که دارای ویژگی های زیر باشد: الف-۱) تحت تنش، تا چند برابر طول اولیه کشیده شود؛ به عنوان مثال، الاستومر طبیعی (NR) با ولکانیزاسیون مطلوب، تا حدود ۱۰ الی ۱۲ برابر طول اولیه کشیده می شود.

الف-۲) پس از حذف بار، ابعاد نمونه به مقدارهای اولیه برگردد؛ به عنوان مثال در یک نمونه الاستومر طبیعی (NR) ولکانیزه شده، ممکن است منحنی رفت و برگشت نمودار تنش- کرنش بر هم منطبق نباشد اما نمونه به ابعاد اولیه باز می گردد. در حالی که نمونه خام یا طبیعی، به علت دارا بودن بخش پلاستیک زیاد، پس از حذف نیرو به ابعاد اولیه بر نمی گردد.



ب) از دیدگاه خواص مولکولی و ساختاری: یک رابر پخت شده زمانی دارای خاصیت رابرالاستیسیته است که: ب-۱) پلیمری با وزن مولکولی بسیار بالا باشد.

ب-۲) دارای تحرکات زنجیری بالا باشد و در حالت کشیده نشده بالای  $T_g$  قرار داشته باشد.

ب-۳) برای جلوگیری از تغییر شکل دائمی و برگشت سریع به حالت اولیه، پس از حذف نیرو، می بایست زنجیرها دارای اتصالات عرضی کافی باشند.

<i>Elastomer</i>	<i>Density (kg/m<sup>3</sup>)</i>	<i>Engineering Stress (MPa) at 300% strain</i>	<i>Breaking stress (MPa)</i>	<i>Ultimate strain (%)</i>
<i>Natural Rubber (NR)</i>	۱۱۳۰	۱۵/۴	۲۸/۱	۴۹۰
<i>Polyisoprene Rubber (IR)</i>	۱۱۳۰	۱۶/۸	۳۰/۷	۵۱۰
<i>Styrene – Butadiene Rubber (SBR)</i>	۱۱۴۰	۱۷/۹	۲۲/۱	۳۳۰
<i>Chloroprene Rubber (CR)</i>	۱۴۳۰	۲۰/۳	۲۲/۹	۳۵۰
<i>Acrylonitrile – Butadiene- Styrene (NBR)*</i>	۱۲۱۰	۱۶/۲	۲۲/۱	۴۴۰
<i>Butyl Rubber (IIR)</i>	۱۱۳۰	۵/۵	۱۵/۷	۶۵۰
<i>Butadiene Rubber (BR)</i>	۱۱۵۰	۸/۴	۱۸/۶	۶۱۰
<i>Ethylene – propylene- Diene-Monomer (EPDM)</i>	۱۰۷۰	۷/۶ **	۱۸/۱	۴۲۰

## ۷- کاربردهای مواد مرکب

کاربردهای مواد مرکب در صنایع زیر است:

- ۱- صنایع دریایی: کامپوزیتهای بستر پلیمری، به دلیل پایداری بسیار زیاد و مقاومت بسیار خوب آنها در محیطهای خورنده، کاربردهای وسیعی در ساخت بدنه قایقها، کشتیها و تاسیسات فراساحلی دارند.
- ۲- صنایع هوافضا: ساخت بدنه هواپیما، پره های هلیکوپتر، پوشش رادار، لباس فضانوردان و ...
- ۳- صنایع نفت، گاز و پتروشیمی: به منظور ترمیم و تقویت سازه های فرسوده بخصوص لوله های فرسوده نفت و گاز که معمولاً دچار خوردگی می شوند، بکار می روند.
- ۴- صنایع راه و ساختمان: تراورس (چوبهای عرضی راه آهن)، پلها، تعمیر و تقویت سازه های ساختمانی
- ۵- صنایع دفاعی
- ۶- صنایع خودروسازی
- ۷- صنایع انرژی: به عنوان عایق گرما، در دیواره توربینها و در قاب لامپهای روشنایی مصرف می شوند.
- ۸- صنایع ورزشی و تفریحی
- ۹- صنایع پزشکی

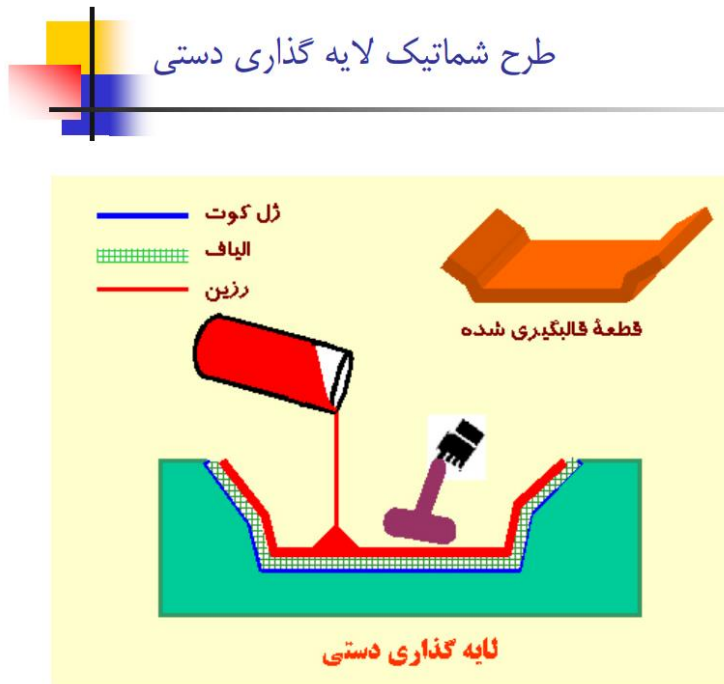
## ۸- روش های ساخت مواد مرکب

روشهای ساخت کامپوزیتهای زمینه پلیمری به شرح زیر است:

- الف) بصورت قالب باز: دستی (Hand Lay-up)، اتوکلاو، VARTM، RTM، پیچش الیاف (Filament winding)، پالترورژن، Pre-perg forming، Pressure molding، خلاء و اسپری
- ب) بصورت قالب بسته: قالب گیری تزریقی، قالب گیری واکنش- تزریق، قالب گیری چرخشی، قالب گیری ورقه ای، قالب گیری فشاری، ریخته گری

روش های ساخت کامپوزیت های زمینه فلزی به شرح زیر است:  
استفاده از مذاب، پودری، استفاده از ورق، استفاده از زمینه های مولکولی یا اتمی، ترکیبی  
روش های ساخت کامپوزیت های زمینه سرامیکی به شرح زیر است:  
همزمان، غیرهمزمان  
روش های ساخت نانوکامپوزیت های زمینه فلزی به شرح زیر است:  
مایع (ریخته گری)، متالوژی پودر، آلیاژسازی مکانیکی

## روش های ساخت کامپوزیت های پلیمری



### مزایا:

- استفاده در سالیان متمادی
- سادگی روش
- ابزار آلات ارزان قیمت
- پخت در دما و فشار محیط
- کاربرد وسیع

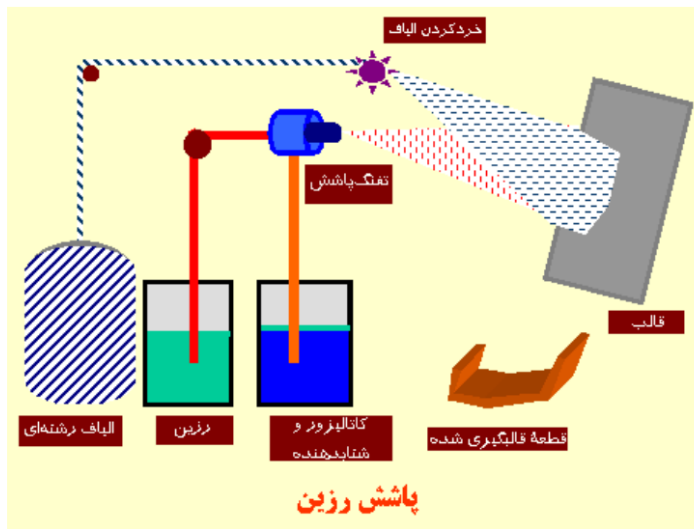
### معایب:

- نیاز به تبحر کارگر
- تماس مستقیم با رزین

### کاربردها:

- ساخت کشتی، گنبد ها، کانالهای آب، استخر، تانکر، میز و صندلی، قطعات خودرو، اتاقک و خانه های پیش ساخته، کیوسکها، قطعات معماری ساختمان...

## طرح شماتیک لایه گذاری پاششی



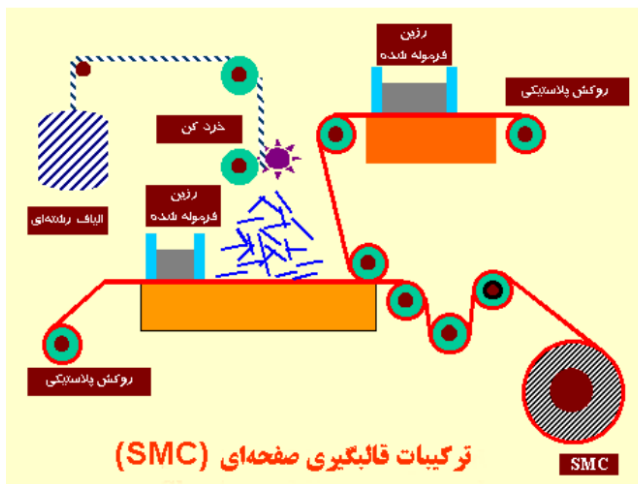
### مزایا:

- اختلاط کامل و با اندازه مناسب ذرات
- صرفه جویی در هزینه ها و مواد
- پاشش اجزا بصورت یکنواخت و با ضخامت ثابت
- کیفیت بالای قطعات

### کاربردها:

- صفحاتی که نیروی کمی تحمل می کنند
- مثل: بدنه کاروانها، بادگیرهای کامیونها، وانهای حمام، سینی های زیر دوشی، قایقهای کوچک

## طرح شماتیک قالب گیری حرارتی



### مزایا:

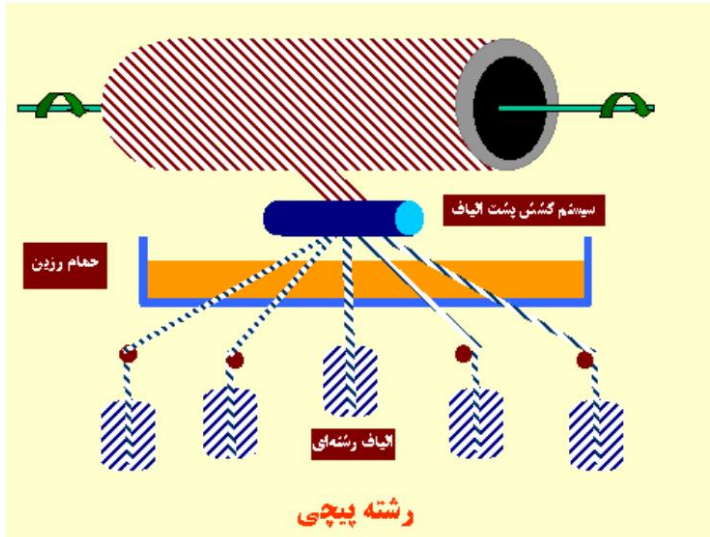
- نسبت الیاف بیشتر در چند لایه
- میزان حباب کمتر در سازه
- عدم انتشار گازهای سمی و مواد فرار در محیط

### کاربردها:

- حمل و نقل (قطعات خودرو مانند کاسه چراغ)
- الکتریک (کلید فیوز)
- ساختمان (کاشیها)
- سایر (قایقهای بزرگ تفریحی و مسافرتی، قطعات ماشینهای مسابقه ای)



## رشته پیچی Filament Winding



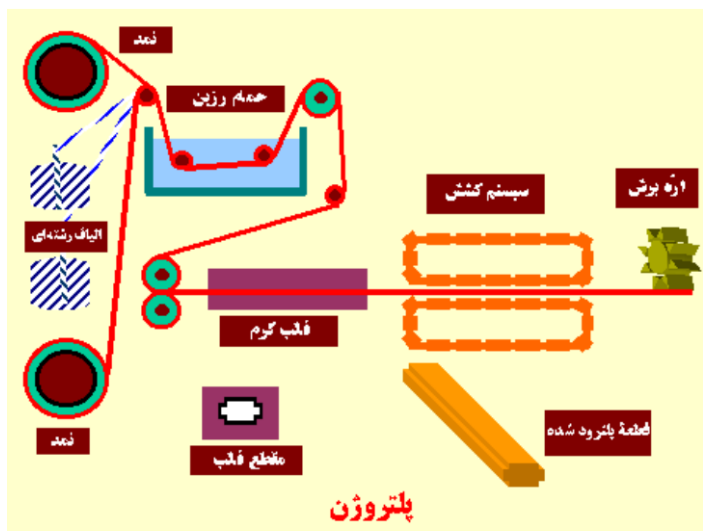
### مزایا:

- سرعت اجرای بالا
- صرفه اقتصادی
- تنظیم دقیق نسبت رزین به الیاف
- استفاده از الیاف در ساده ترین شکل آن
- استحکام بالای کامپوزیت تولیدی در برابر نیروهای وارده

### کاربردها:

- خطوط لوله آبرسانی
- خطوط لوله و مخازن نگهداری مواد شیمیایی
- کپسولهای گاز CNG
- کپسولهای تنفسی آتش نشانی
- کپسولهای اطفاء حریق

## کشش رانی Pultrusion



### مزایا:

- سرعت بالا
- صرفه اقتصادی
- تنظیم دقیق نسبت رزین به الیاف
- استفاده از الیاف در شکل رشته ای آن
- خواص ساختی بسیار خوب سازه
- عدم انتشار گازهای سمی و مواد فرار در محیط

### کاربردها:

- تیرکها و تیرهای حمل سقف ساختمان
- پلها
- نردبانها و چارچوب
- عایقها در صنایع الکترونیک مانند مقره های الکتریکی

## فصل پنجم: معرفی مواد جدید مرکب بخش اول، معرفی مواد هدفمند

### ۱- مقدمه

همگام با رشد سریع علوم و تکنولوژی در دهه‌های اخیر، نیاز به مواد جدیدی که مهندسان را در طراحی و ساخت سازه‌های مهندسی یاری کند، به شدت در جای جای صنعت احساس می‌شود. موادی که در زمینه‌های مختلف مهندسی قابل استفاده بوده و با بهبود خواص مورد نظر، مشخصه‌های بهتری را در عمل نتیجه دهند. به طور مثال، بسیاری از سازه‌ها و قطعات همچون سازه‌های هوایی، فضایی، مخازن تحت فشار در نیروگاه‌های هسته‌ای و موتورهای احتراق داخلی تحت نیروهای مکانیکی مختلف و نیروهای حرارتی با گرادینانهای بالا قرار دارند. از این رو در اینگونه سازه‌ها بایستی از موادی استفاده نمود که هم در برابر بارهای حرارتی با گرادینانهای بالا مقاوم باشند و هم در برابر بارهای مکانیکی استحکام لازم را از خود نشان دهند و در عین حال یکپارچگی مکانیکی خود را نیز حفظ کنند.

از سوی دیگر این نکته نیز مشخص گردیده است که تغییر ناگهانی در ترکیب و خواص مواد در یک جزء، تمرکزهای تنش موضعی شدیدی را به وجود می‌آورد. اگر در این اجزاء تغییر در ترکیب و خواص مواد از یک ماده تا ماده دیگر به صورت تدریجی ایجاد گردد، این تمرکز تنشها به میزان زیادی کاهش می‌یابند.

ملاحظات فوق در دهه‌های اخیر منجر به پیدایش نسل جدیدی از مواد به نام مواد هدفمند یا FGM شده است که تا حد زیادی خواسته‌های مطلوب مهندسان طراح را برآورده می‌سازد. مواد هدفمند که در اصل، اولین بار به منظور مواد مقاوم در برابر بارهای حرارتی با گرادینان بالا طراحی شدند، موادی غیر همگن ولی ایزوتروپیک<sup>۱</sup> هستند که خواص آنها از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر می‌کند. به طور مثال مقاومت به سایش، مدول الاستیسیته، ضریب هدایت حرارتی، چگالی و سختی در این دسته از مواد به طور پیوسته و تدریجی تغییر می‌کنند. چنین تغییرات پیوسته‌ای مشکلات مربوط به تغییرات ناگهانی در سطح تماس بین دو ماده متفاوت را که در مورد مواد مرکب وجود داشت، مرتفع می‌سازد.

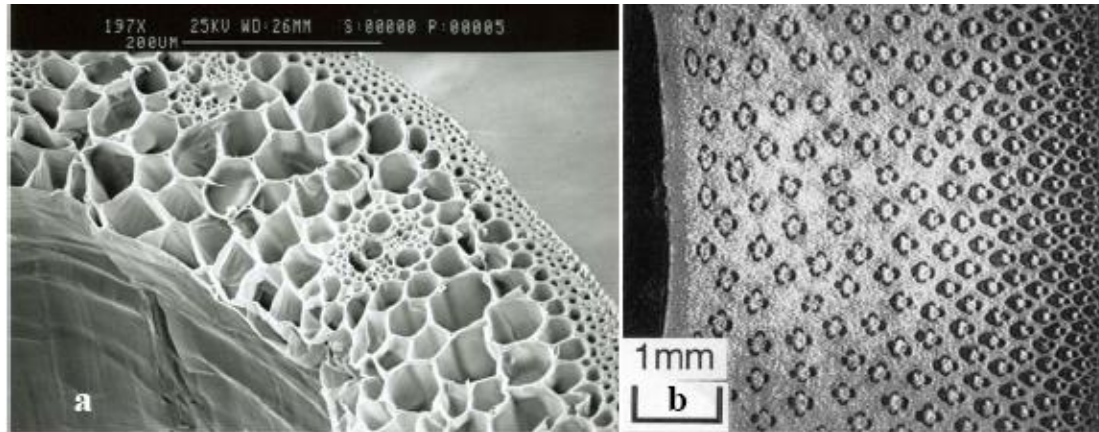
### ۲- ماهیت مواد هدفمند

مواد هدفمند (FGMs) مواد یا ساختارهایی هستند، که در آنها خواص ماده با مکان به گونه ای تغییر داده می‌شود که بعضی از توابع و کاربردها در کل FGM در راستایی مشخص بهینه شود. تغییر خواص می‌تواند بوسیله تغییر تدریجی کسر حجمی مواد تشکیل دهنده، بوسیله استفاده از تقویت کننده‌ها با خواص و اندازه‌ها و اشکال متفاوت و یا بوسیله تغییر درصد ترکیب فازهای تقویت کننده و ماتریس به صورت پیوسته و همچنین تنظیم کردن آرایش ریز ساختار حاصل شود. نتیجه، یک ریزساختار است که تغییری پیوسته در خواص مکانیکی و حرارتی در سطح درشت ساختاری یا محیط پیوسته ایجاد می‌کند.

### ۳- تاریخچه پیدایش مواد FGM

در طبیعت نمونه‌های متعددی از مواد هدفمند وجود دارند که در بسیاری از موارد شامل سازه‌هایی هدفمند بر مبنای برخی توابع و کاربردی مکانیکی است. استخوان‌ها چارچوب سبک و محکمی برای بدن جانداران می‌باشند، چوب از درخت بارگذاری محیطی محافظت می‌کند و آوندهای برگ‌ها، سیالات را منتقل می‌کنند.

بامبو یکی از نمونه‌های گیاهی از نظر ساختاری هوشمند می‌باشد. گیاه بامبو در مقیاس درشت ساختاری در مقابل بارهای باد مقاومت می‌کند، در حالیکه در ریز ساختار مشابهتی بسیار به کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف تک جهت دارد و توزیع این الیاف در داخل گیاه باعث خواص هوشمند بامبو می‌گردد.



به طور کلی تفاوت‌های عمده‌ای بین ساختار با تغییر تدریجی زنده و آنچه به صورت مصنوعی ساخته می‌شود، وجود دارد، از جمله اینکه FGM زنده هوشمند می‌باشد و می‌تواند محیط در بردارنده تنش موضعی خود را حس کند، در حالیکه FGM ساخت بشر حداقل در حال حاضر فاقد چنین قابلیت‌هایی می‌باشد. پس این مواد، جدید نیستند. از طرفی دیگر با پیدایش مواد مرکب و با تعریف و ترکیب فازهای مختلف مواد، امکان ایجاد ساختاری با اجزای تشکیل دهنده قابل کنترل و همراه با تغییرات تدریجی ایجاد شده است.

یکی از موارد جالب استفاده از مواد FG در عمل کاشت دندان در دندانپزشکی است. روش ساختی برای ریزساختارهای FG مورد بررسی و تأیید قرار گرفت و ثابت شد که سازگاری ایمپلنت‌های تیتانیوم-هیدروکسی آپاتیت (ترکیب فسفات کلسیم  $Ca_5(PO_4)_3OH$  که ماده‌ای معدنی و همچنین ماده اصلی ساختار استخوان‌های ستون فقرات می‌باشد) با بدن نسبت به ایمپلنت‌های تیتانیوم خالص بسیار بهتر می‌باشند.

تغییر خواص مواد FG را می‌توان با تغییر تدریجی کسر حجمی مواد تشکیل دهنده، استفاده از تقویت کننده‌ها با خواص، اندازه و شکل‌هایی متفاوت، تغییر دادن نقش فازهای تقویت کننده و ماتریس در حالتی پیوسته و همچنین تنظیم نمودن ساختار سلول یا چگالی ماده ایجاد کرد. نتیجه ریزساختاری است که تغییر پیوسته یا تکه‌ای خواص مکانیکی و حرارتی را در مقیاس درشت ساختاری تولید می‌نماید.

مفهوم مواد هدفمند یا مواد تابع گون در دهه ۸۰ توسط دانشمندان مواد در ژاپن به عنوان راهی برای ایجاد موادی جهت سپر حرارتی ارائه گشت. کویزومی پروژه‌های اولیه در این زمینه را به اختصار شرح داد. ایده مطرح شده، ترکیب تدریجی رفتار بین سرامیک‌های مقاوم به حرارت با فلزات چقرمه دارای هدایت حرارتی مناسب بود. ماحصل، پنبلی دارای مقاومت حرارتی زیاد در معرض درجه حرارت بالا و استحکام مکانیکی بالا در طرف دیگر بود. این مواد جدید با چهار روش بدست می‌آمدند:

➤ متالورژی پودر<sup>۱</sup>

➤ اسپری پلاسما<sup>۲</sup>

➤ رسوبگیری بخار شیمیایی (CVD)<sup>۳</sup>

➤ سنتز احتراق خود به خود افزایشنده (SHS)<sup>۴</sup>

با افزایش استفاده از مواد FG، برای مثال در هوافضا، صنعت اتومبیل، ارتباطات و کاربردهای درمانی و دارویی، متدولوژی‌هایی برای توصیف رفتار مواد FG و همچنین جهت طراحی و تحلیل اجزای سازه‌ای ساخته شده از این مواد ارائه شدند. اگرچه فناوری

1 Powder Metallurgy

2 Plasma Spray

3 Chemical Vapor Deposition

4 Self-propagating Combustion Synthesis

ساخت مواد FG نوپا و در ابتدای راه است، اما این مواد فواید بسیاری را ارائه می‌دهند. برای مثال به تعداد اندکی از روش‌های ساخت اشاره می‌شود.

فوکویی و همکارانش از روش ریخته‌گری گریز از مرکز با سرعت بالا استفاده کردند، بطوریکه لایه‌ها در جهت شعاعی بخاطر چگالی جرمی متفاوت شکل می‌گرفتند. آلیاژ آلومینیوم-نیکل ذوب شده در داخل لوله جدار ضخیمی قالب‌گیری شده و با سرعتی دوران نموده تا فلز مذاب شتاب بگیرد، بدین طریق گرادیانی از دو ماده مختلف شکل می‌گرفت. کسر حجمی فاز  $Al_3Ni$  بطور کمی با میکروسکوپ نوری تخمین زده شد.

در روشی تحقیقاتی دیگر پلی منوکسید دی کربن اتیلن ( $ECO^1$ ) برای ساخت مواد FG بوسیله تابش نور ماورای بنفش<sup>2</sup>، به علت از هم پاشیدگی سریع آن تحت نور ماورای بنفش انتخاب شد. پلی منوکسید دی کربن اتیلن مورد تابش قرار گرفته به مرور با افزایش زمان سفت‌تر، مستحکم‌تر و در نهایت خیلی شکننده می‌گردد. در نتیجه زمان پرتوگیری می‌تواند کاملاً خواص و ساختار FGM را تنظیم نماید، و لذا رابطه‌ای بین مدول الاستیسیته و تابش وجود دارد. دیگر روش ساخت رسوب‌گیری الکتروفوروتیک ( $EPD^3$ ) است که شامل ترکیب دو فرایند الکتروفورز<sup>4</sup> و رسوب‌گیری<sup>5</sup> است. الکتروفورز حرکت ذرات باردار تحت اثر گرادیان میدان الکتریکی است. فرایند دوم رسوب‌گیری است، یعنی لخته شدن (انعقاد) ذرات معلق به شکل جرمی فشرده. ال هادک و تیپور ورق‌های فومی ترکیبی FG را بوسیله پراکنده ساختن میکروبالون‌ها در اپوکسی (با کسر حجمی که بطور خطی در راستای ضخامت تغییر می‌کرد) ایجاد نمودند. آنها مدول یانگ و چگالی را با استفاده از سرعت موج و چگالی را با استفاده از سرعت موج و چگالی میکروبالون‌هایی که بطور همگن داخل فوم‌ها پراکنده شده بودند بدست آوردند. ورق‌های فومی حاصل نسبت پواسون تقریباً ثابتی داشتند.

#### ۴- کاربرد

با توجه به آنچه در مورد کاربردهای مواد FGM در مقدمه فصل عنوان شد، در موتورهای پر سرعت استفاده از منیفولد فلزی با پوشش سرامیکی متداول گشته است. مقاومت حرارتی بالای سرامیک و ضربه‌پذیری فلز باعث می‌شوند که ماده FGM ساخته شده از سرامیک و فولاد که در صد اجزاء آن به صورت پیوسته در ضخامت استوانه تغییر می‌کند، همزمان خواص حرارتی و ضربه‌پذیری بالایی را ایجاد نماید.



1 Ethylene Co-Carbon Monoxide (ECO)  
2 Ultraviolet (UV)  
3 Electrophoresis Deposition  
4 Electrophoresis  
5 Deposition

## ۵- مدل های ریاضی مواد FGM

در این قسمت به معرفی انواع مدل‌های ریاضی رایج در اکثر مقالات و مراجع برای مواد FGM پرداخته می‌شود.

### مدل اول: استفاده از رابطه غیرخطی (تابع توانی)

یکی از بهترین روابطی که در اکثر تحقیقات به منظور بیان خواص مکانیکی مواد هدفمند به کار می‌رود، رابطه‌ای است که در آن خواص به صورت یک رابطه غیرخطی توانی، و ترکیبی از خواص سرامیک و فلز تغییر می‌کنند.

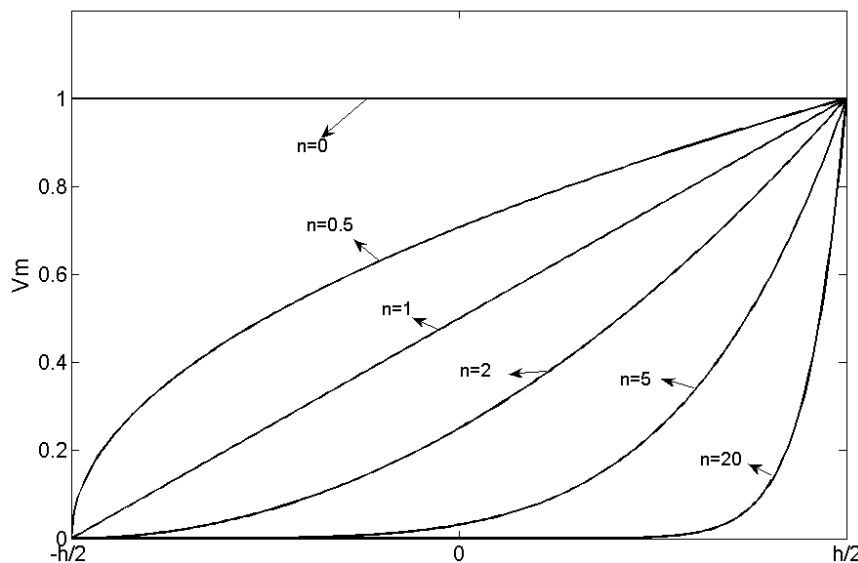
$$P = P_m V_m + P_c V_c$$

$$V_m + V_c = 1$$

$$V_m = \left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^n \quad -\frac{h}{2} \leq z \leq \frac{h}{2}$$

$$P(z) = (P_m - P_c)\left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^n + P_c$$

در این رابطه  $P$  بیانگر خواص مکانیکی ماده،  $V$  کسر حجمی مواد تشکیل‌دهنده استوانه،  $Z$  مختص ضخامت استوانه،  $h$  ضخامت استوانه و اندیسهای  $m$  و  $c$  به ترتیب بیانگر فلز و سرامیک می‌باشند. روشن است که در این رابطه می‌توان حالات مختلفی را جهت بیان تغییرات خواص ماده با تغییر توان ثابت  $n$  ارائه داد. همچنین با تغییر مکان محل فلز و سرامیک می‌توان آرایشهای مختلفی از یک استوانه از جنس مواد هدفمند را ایجاد کرد. شکل زیر تغییرات کسر حجمی فلز در طول ضخامت استوانه را به ازای  $n$  های مختلف نشان می‌دهد.



### مدل دوم: استفاده از رابطه غیر خطی (تابع نمایی) متاثر از دما

این مدل همانند مدل اول می‌باشد با این تفاوت که در این مدل اثر دما در تغییر خواص فلز و سرامیک منظور شده است.

$$P(z) = (P_m - P_c)\left(\frac{z}{h} + \frac{1}{2}\right)^n + P_c$$

$$P_c \text{ (or) } P_m = P' \left( \frac{P-1}{T} + 1 + P_1 T + P_2 T^2 + P_3 T^3 \right)$$

در رابطه فوق  $T$  دمای مواد سرامیک و فلز و ضرایب  $P'$ ،  $P_1$ ،  $P_2$ ،  $P_3$  و ضرایب ثابتی هستند که برای مواد مختلف در کتابهای مرجع ذکر شده است.

### مدل سوم: استفاده از توابع یک یا چند جمله‌ای (تابع توانی)

در این مدل خواص ماده به صورت یک یا چند جمله‌ای مرتبه  $m$  بیان می‌شود. از این مدل بیشتر جهت ارائه راه‌حلهای تحلیلی استفاده می‌گردد.

$$P = P_0 r^m \quad a \leq r \leq b$$

که  $P_0$  و  $m$  ضرایب ثابتند.

### مدل چهارم: استفاده از تابع نمایی با ضرایب ثابت

$$P = P_0 e^{\lambda r} \quad a \leq r \leq b$$

در این رابطه  $P_0$  و  $\lambda$  ضرایب ثابت هستند. از این مدل نیز جهت ارائه راه‌حلهای تحلیلی استفاده می‌شود. در اکثر تحلیلهایی که روشهای عددی جهت تحلیل سازه‌های از جنس مواد هدفمند بکار گرفته شده‌اند، از مدل‌های اول و دوم به منظور بیان خواص مکانیکی ماده FGM استفاده شده است، چون خواص مواد هدفمند در استوانه را به صورت جامع تری بیان می‌کنند.

### ۶- رابطه تنش و کرنش

$\alpha$  ضریب انبساط حرارتی و  $E$  مدول یانگ و  $\nu$  ضریب پواسون ماده FGM هستند و همانند آنچه خصوصیات ماده بایستی با عبارتهای زیر بصورت زیر جایگذاری شود:

$$E = E(z, T)$$

$$\alpha = \alpha(z, T)$$

$$\nu = \nu(z)$$

به خاطر سهولت در ادامه روند به دست آوردن معادلات حرکت پوسته می‌توان عبارتهای معادله زیر را به صورت زیر نیز بیان کرد:

$$\{\sigma\} = [D] (\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_T\})$$

$$\{\sigma\}^T = \langle \sigma_x \sigma_\theta \sigma_{xz} \sigma_{\theta z} \sigma_{x\theta} \rangle$$

$$\{\varepsilon\}^T = \langle \varepsilon_x \varepsilon_\theta \gamma_{xz} \gamma_{\theta z} \gamma_{x\theta} \rangle$$

و ماتریس کرنش حرارتی به صورت رابطه زیر:

$$\{\varepsilon_T\}^T = \alpha(1+\nu)(\Delta T)[1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

که در آن بالانویس  $T$  نشان دهنده ترانهاده ماتریس و پایین نویس  $T$  نشان دهنده آثار ناشی از حرارت و همچنین  $\Delta T$  بیانگر میزان افزایش دما نسبت به دمای محیط و  $\alpha, \nu$  بیانگر ضریب پواسون و ضریب انبساط حرارتی می‌باشند.

همچنین ماتریس خواص مواد به صورت زیر تعریف می‌شود ( $E$  مدول یانگ):

$$[D] = \frac{E(z, T)}{1 - \nu(z)^2} \begin{bmatrix} 1 & \nu(z) & 0 & 0 & 0 \\ \nu(z) & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1 + \nu(z)}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1 + \nu(z)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 + \nu(z)}{2} \end{bmatrix}$$

## ۷- خصوصیات مواد به کار گرفته شده

از دو نوع ماده FGM در مثالهای این بخش استفاده شده است:

(۱) ماده FGM تشکیل شده از  $Si_3N_4$  به عنوان سرامیک و SUS304 به عنوان فلز

(۲) ماده FGM تشکیل شده  $Ti-6Al-4V$  به عنوان فلز و  $ZrO_2$  به عنوان سرامیک

برای معکوس کردن خواص سرامیک و فلز در سطوح داخلی و خارجی استوانه از واژه FGM نوع A و B بهره گرفته شده است. بنابراین:

- FGM نوع A شامل مخلوط سرامیک و فلزی است که سطح داخلی آن کاملاً فلز و سطح خارجی آن کاملاً سرامیک است.

- FGM نوع B شامل سطح داخلی کاملاً سرامیک و سطح خارجی کاملاً فلز است.

نام	سرامیک	فلز	سطح داخلی	سطح خارجی
A-1	$Si_3N_4$	SUS304	کاملاً فلز	کاملاً سرامیک
B-1	$Si_3N_4$	SUS304	کاملاً سرامیک	کاملاً فلز
A-2	$ZrO_2$	$Ti-6Al-4V$	کاملاً فلز	کاملاً سرامیک
B-2	$ZrO_2$	$Ti-6Al-4V$	کاملاً سرامیک	کاملاً فلز

با توجه به آنکه خصوصیات مواد FGM در حالت کلی وابسته به دما می باشد، با نوشتن مجدد معادله زیر ضرائب  $P_0$  تا  $P_3$  به صورت جدولی برای مواد به کار گرفته شده ارائه می گردد.

$$P = P_0(P_{-1}T^{-1} + 1 + P_1T + P_2T^2 + P_3T^3)$$

توضیح آنکه  $P_0$  مقدار کمیت در دمای محیط بوده و ضرائب  $P_{-1}$  تا  $P_3$  ضرائب ثابتی که برای هر ماده متفاوت هستند، می باشند. برای مواد مورد بررسی در این بخش، می توان از اطلاعات جدول ۴-۲ بهره جست. در رابطه بالا  $T$  میزان افزایش دما نسبت به دمای محیط بر حسب درجه کلین بوده و ضریب  $P_{-1}$  بدان دلیل که در همه تحقیقات صورت گرفته صفر منظور شده است در جداول کنونی ظاهر نشده است.

ماده	کمیت	$P_0$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
$ZrO_2$	$E$	243/27e9	-1.3714e-3	1.214e-6	-3.0681e-10
	$\nu$	0.25	0	0	0
	$\alpha$	12.76e-6	-1.49e-3	1.006e-5	-6.778e-11
$Si_3N_4$	$E$	348.43e9	-3.07e-4	2.16e-7	-8.964e-11
	$\nu$	0.28	0	0	0
	$\alpha$	5.8723e-6	5.8723e-6	0	0
$Ti-6Al-4V$	$E$	122.56e9	-4.586e-4	0	0
	$\nu$	0.3	0	0	0
	$\alpha$	7.58e-6	6.638e-4	-3.147e-6	0
SUS304	$E$	201.04e9	3.079e-4	-6.534e-7	0
	$\nu$	0.3	0	0	0
	$\alpha$	12.33e-6	0	8.086e-4	0



**TABLE 1.1**Modulus of Elasticity of Ceramics and Metals in Pa for  $E_f$ 

Materials	$P_0$	$P_{-1}$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
Zirconia	244.27e+9	0	-1.371e-3	1.214e-6	-3.681e-10
Aluminum oxide	349.55e+9	0	-3.853e-4	4.027e-7	-1.673e-10
Silicon nitride	348.43e+9	0	-3.070e-4	2.160e-7	-8.946e-11
Ti-6Al-4V	122.56e+9	0	-4.586e-4	0	0
Stainless steel	201.04e+9	0	3.079e-4	-6.534e-7	0
Nickel	223.95e+9	0	-2.794e-4	-3.998e-9	0

Source: Reddy, J.N. and Chin, C.D., *J. Therm. Stresses*, 21, 593, 1998. With permission.**TABLE 1.2**Coefficient of Thermal Expansion of Ceramics and Metals in  $K^{-1}$  for  $\alpha_f$ 

Materials	$P_0$	$P_{-1}$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
Zirconia	12.766e-6	0	-1.491e-3	1.006e-5	-6.778e-11
Aluminum oxide	6.8269e-6	0	1.838e-4	0	0
Silicon nitride	5.8723e-6	0	9.095e-4	0	0
Ti-6Al-4V	7.5788e-6	0	6.638e-4	-3.147e-6	0
Stainless steel	12.330e-6	0	8.086e-4	0	0
Nickel	9.9209e-6	0	8.705e-4	0	0

Source: Reddy, J.N. and Chin, C.D., *J. Therm. Stresses*, 21, 593, 1998. With permission.**TABLE 1.3**Thermal Conductivity of Ceramics and Metals in  $W mK^{-1}$  for  $\kappa_f$ 

Materials	$P_0$	$P_{-1}$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
Zirconia	1.7000	0	1.276e-4	6.648e-8	0
Aluminum oxide	-14.087	-1123.6	-6.227e-3	0	0
Silicon nitride	13.723	0	-1.032e-3	5.466e-7	-7.876e-11
Ti-6Al-4V	1.0000	0	1.704e-2	0	0
Stainless steel	15.379	0	-1.264e-3	2.092e-6	-7.223e-10
Nickel <sup>a</sup>	187.66	0	-2.869e-3	4.005e-6	-1.983e-9
Nickel <sup>b</sup>	58.754	0	-4.614e-4	6.670e-7	-1.523e-10

Source: Reddy, J.N. and Chin, C.D., *J. Therm. Stresses*, 21, 593, 1998. With permission.<sup>a</sup> For  $300 K \leq T \leq 635 K$ .<sup>b</sup> For  $635 K \leq T$ .**TABLE 1.4**Poisson's Ratio of Ceramics and Metals for  $\nu_f$ 

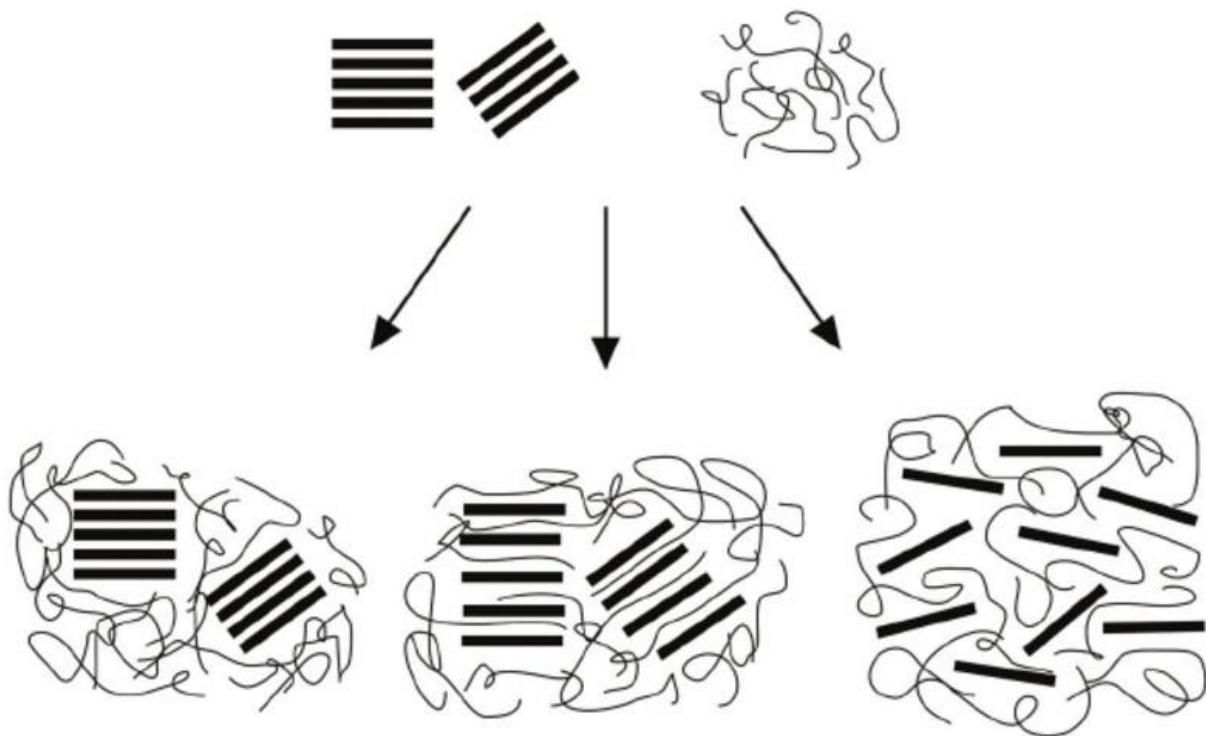
Materials	$P_0$	$P_{-1}$	$P_1$	$P_2$	$P_3$
Zirconia	0.2882	0	1.133e-4	0	0
Aluminum oxide	0.2600	0	0	0	0
Silicon nitride	0.2400	0	0	0	0
Ti-6Al-4V	0.2884	0	1.121e-4	0	0
Stainless steel	0.3262	0	-2.002e-4	3.797e-7	0
Nickel	0.3100	0	0	0	0

Source: Reddy, J.N. and Chin, C.D., *J. Therm. Stresses*, 21, 593, 1998. With permission.



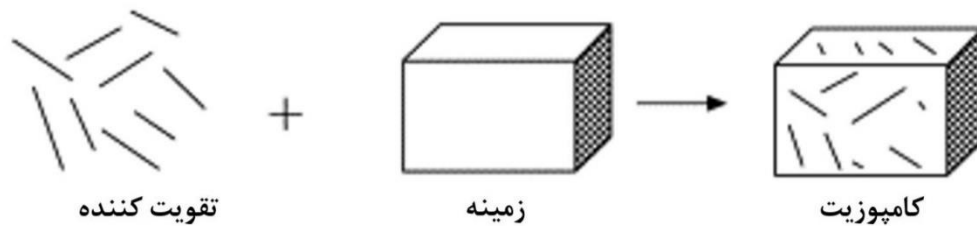
## ۱- مقدمه

نانوکامپوزیت‌ها به خاطر مزایای فراوانی که دارند بسیار مورد توجه صنعت قرار گرفته‌اند. دسته‌بندی نانوکامپوزیت‌ها بر اساس طبیعی یا مصنوعی بودن و همچنین نوع زمینه (فلز، پلیمر یا سرامیک) صورت می‌گیرد (شکل ۱). استفاده از نانوکامپوزیت‌ها به خاطر جبران نقص‌های ذاتی زمینه یا بهبود خواص آنها به کمک نانوساختارهای مختلف می‌باشد. از جمله این نانوساختارهای متداول که در اغلب زمینه‌ها به کار رفته‌اند می‌توان به نانولوله کربنی، گرافن، نانوذرات تیتانیا و سیلیکا، نانوصفحات رس و نانوذرات کاربید سیلیسیوم اشاره کرد. با استفاده از این نانوساختارها در درصد‌های وزنی بسیار کم می‌توان به خواص ویژه‌ای رسید.



شکل ۱: کلیت نانوکامپوزیت‌ها

قبل از تعریف نانوکامپوزیت ابتدا باید کامپوزیت را تعریف کرد. به مجموع جزء زمینه و جزء تقویت‌کننده کامپوزیت (شکل ۲) گفته می‌شود. معمولاً جزء زمینه یک سری نقص (مثل خواص مکانیکی، الکتریکی و حرارتی پایین) دارد که با افزودن جزء تقویت‌کننده این نقص‌ها رفع می‌شود. برای مثال می‌توان کاه‌گل را مثال زد که یکی از اولین و مرسوم‌ترین کامپوزیت‌های مورد استفاده بشر است. استفاده از گل مثلاً برای ساخت دیوار، نتیجه مطلوبی ایجاد نمی‌کند و دیوار بسیار شکننده خواهد بود. با افزودن کاه به عنوان جز تقویت‌کننده به زمینه (گل) خواص مکانیکی بهبود می‌یابد و دیواری با استحکام بالا در برابر ضربه ساخته می‌شود. حال اگر جزء تقویت‌کننده یک نانوماده باشد به ترکیب حاصله نانوکامپوزیت گفته می‌شود. نانوکامپوزیت‌ها مزایای بسیار کاربردی دارند که در بخش‌های بعد توضیح داده می‌شود.



شکل ۲: کامپوزیت از اضافه کردن جزء تقویت کننده به زمینه به منظور بهبود خواص

## ۲- مزایای نانوکامپوزیت‌ها

یکی از مشکلاتی که در ساخت کامپوزیت‌ها مطرح است، نیاز به افزودن مقادیر زیادی از جزء تقویت کننده به زمینه است که باعث می‌شود خاصیت قطعه کامپوزیت حاصله تفاوت قابل توجهی با خواص زمینه داشته باشد که این تفاوت در بسیاری از موارد یک عیب به شمار می‌رود. برای مثال فرض کنید که با افزودن پودر فلزی مثل مس به زمینه پلیمری به دنبال ایجاد رسانایی الکتریکی در کامپوزیت حاصله هستیم. ایجاد رسانایی الکتریکی با مقادیر بالا در این کامپوزیت نیازمند مقادیر بالایی از پودر مس است. در این صورت قطعه کامپوزیتی به دست آمده به ناچار وزن بسیار بالاتری نسبت به پلیمر زمینه خواهد داشت که این مورد در مکان‌هایی که از پلیمرها استفاده می‌شود بسیار غیر مطلوب است. هم‌چنین در این حالت خواص مکانیکی کامپوزیت حاصله نسبت به زمینه پلیمری افت خواهد کرد، برای مثال از یاد طول و ضربه پذیری در این قطعه کامپوزیتی به‌طور قابل توجهی کمتر از زمینه پلیمری آن هست. حال در صورتی که به جای تقویت کننده عادی با ابعاد بزرگ از نانو ساختارهای رسانای الکتریکی مثل نانولوله کربنی استفاده شود این اشکال پیش نمی‌آید. در این حالت با مقادیر بسیار کمتری از جزء تقویت کننده (مثلاً حدود ۲ درصد وزنی در مقایسه با ۲۰ درصد وزنی پودر فلزی) رسانایی الکتریکی بالا حاصل می‌شود. در نتیجه این امر به علت کمتر بودن مقدار جزء تقویت کننده در حالت نانوکامپوزیت، عملاً خواص ذاتی مطلوب زمینه نیز حفظ می‌شود و صرفاً خاصیت رسانایی الکتریکی که مدنظر بود به آن اضافه می‌شود. در نتیجه در این حالت علاوه بر افزایش رسانایی الکتریکی، از یاد طول و ضربه‌پذیری به مقدار کمتری افت می‌کند و هم‌چنین وزن نانوکامپوزیت نیز افزایش نمی‌یابد که در کاربردهای صنعتی بسیار مورد نیاز است.

در واقع در این حالت با مقادیر بسیار کمتر از جزء نانومتری می‌توان به خاصیت مورد نظر دست یافت. هم‌چنین با استفاده از مقادیر کمتری از جزء تقویت کننده قیمت تمام شده نیز در اکثر موارد کاهش می‌یابد، چراکه معمولاً جزء تقویت کننده قیمت بالاتری را نسبت به جزء زمینه دارد و کم کردن مقدار آن از لحاظ اقتصادی بسیار به صرفه است.

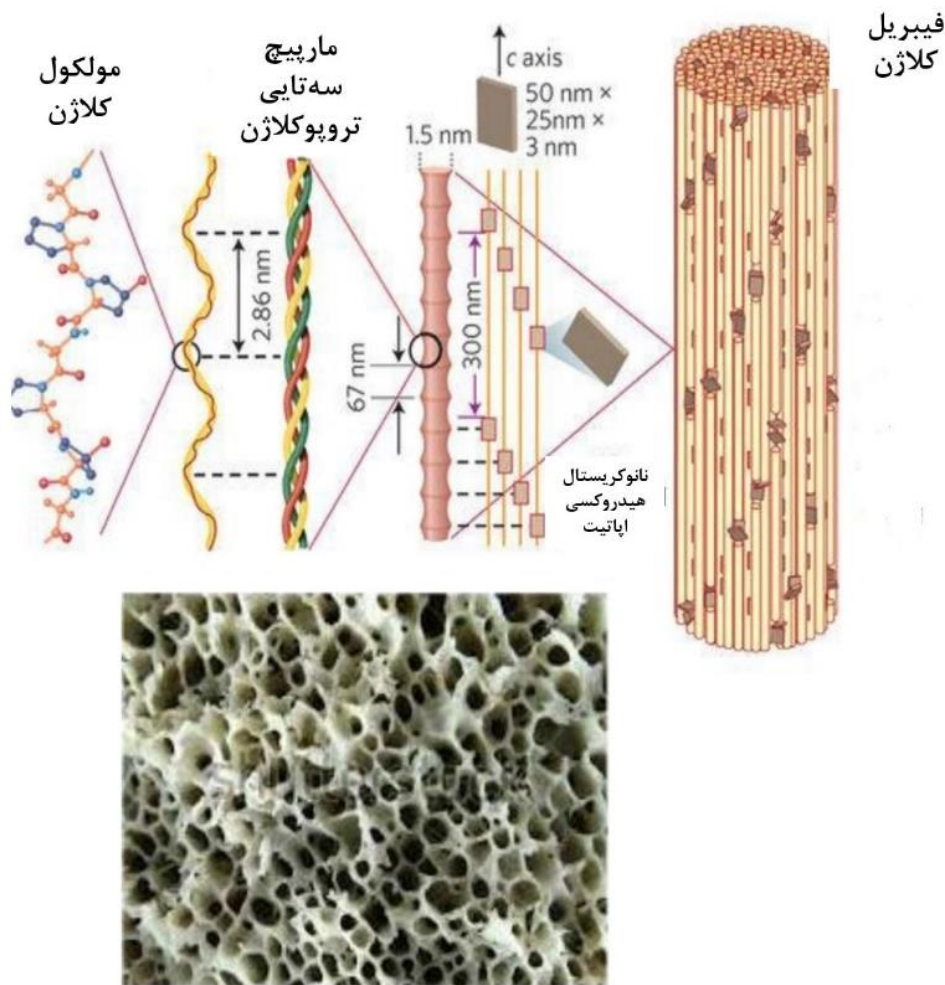
به صورت کلی می‌توان گفت نانوکامپوزیت‌ها در مقایسه با کامپوزیت‌ها خواص ویژه بالاتری دارند. منظور از خواص ویژه، میزان یک خاصیت تقسیم بر چگالی آن ماده است. در واقع خاصیت ویژه بیان می‌کند که با در نظر گرفتن وزن یکسان بین دو یا چند ماده کدام یک خاصیت مورد نظر بالاتری دارد. برای مثال منظور از استحکام کششی ویژه بین دو ماده این است که در وزن یکسان از آن دو ماده کدام یک استحکام کششی بالاتری دارد. همانطور که بیان شد در نانوکامپوزیت‌ها به دلیل استفاده از مقادیر بسیار کمتری از جزء تقویت کننده، معمولاً وزن سبک‌تر است.

به دلیل مزایای مذکور یکی از اصلی‌ترین حوزه‌هایی که فناوری نانو در آن ورود پیدا کرده و بازار نیز روی خوشی به آن نشان داده است، در حوزه نانوکامپوزیت‌ها می‌باشد.

اما دلیل استفاده از مقادیر کمتری از جزء تقویت کننده در حالت نانو چیست؟ علت این امر نسبت سطح به حجم بالای نانومواد است. در این حالت به علت نسبت سطح به حجم بسیار بالا، برهمکنش بین جز تقویت کننده و زمینه بسیار بالاست و با مقادیر بسیار کم نیز برهمکنش کافی بین تقویت کننده و زمینه اتفاق می‌افتد (البته به شرط پخش یکنواخت). هم‌چنین خواص ویژه در نانومواد مثل انتقال بالستیک الکترون یا فوتون، خواص نوری و مغناطیسی ویژه نیز که در اثر افزایش سطح به حجم و یا تبدیل نوارهای انرژی به ترازهای انرژی اتفاق می‌افتد نیز باعث ایجاد کاربردهای ویژه‌ای از نانومواد در نانوکامپوزیت‌سازی شده است.

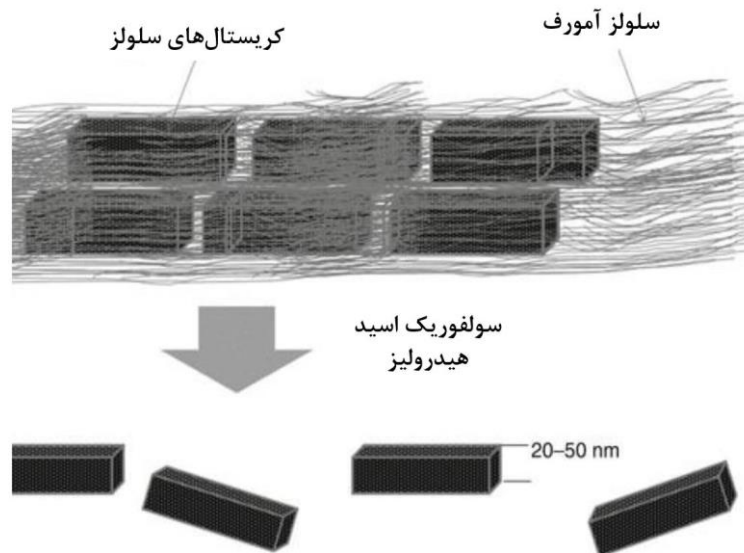
### ۳- انواع نانوکامپوزیت‌ها

نانوکامپوزیت‌ها را از چندین جنبه می‌توان دسته‌بندی نمود. از یک جنبه آنها را می‌توان به دو دسته نانوکامپوزیت‌های طبیعی و نانوکامپوزیت‌های مصنوعی تقسیم‌بندی نمود. از معروف‌ترین نانوکامپوزیت‌های طبیعی می‌توان به چوب و استخوان اشاره کرد. استخوان را می‌توان مجموعه‌ای از فیبریل‌های کلاژنی در نظر گرفت. خود این فیبریل‌های کلاژنی از مارپیچ‌هایی از مولکول‌های کلاژن تشکیل شده‌اند که بر روی آنها نانوکریستال‌های هیدروکسی آپاتیت به عنوان اجزا تقویت‌کننده خواص مکانیکی قرار دارند. این ساختار ویژه استخوان است که مجموعه‌ای از خواص مکانیکی عالی را مثل استحکام مکانیکی بالا و مقاومت به ضربه بالا را حاصل کرده است. در شکل ۳ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ساختار استخوان و همین‌طور تصویر شماتیک واحدهای تشکیل‌دهنده استخوان آورده شده است.



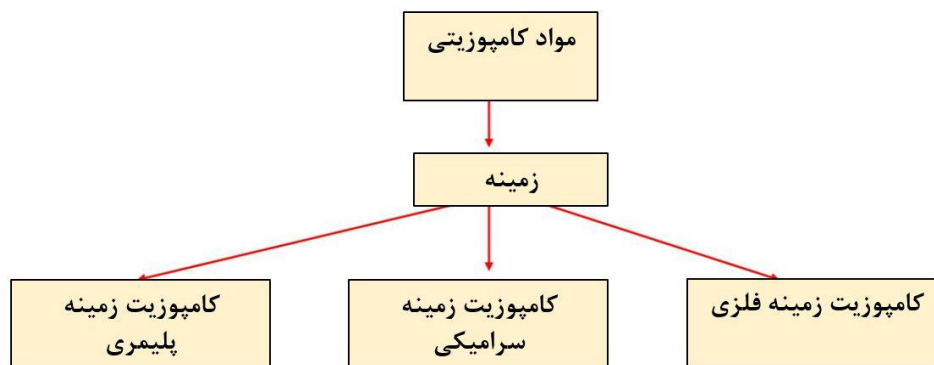
شکل ۳: تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از استخوان و تصویر شماتیک از اجزای تشکیل‌دهنده استخوان

هم‌چنین از چوب نیز می‌توان به عنوان نانوکامپوزیت طبیعی دیگری نام برد. در چوب زمینه‌ای از سلولز آمورف و چسب طبیعی وجود دارد که توسط نانوکریستال‌های سلولزی تقویت شده است. این نانوکریستال‌های سلولزی بر خلاف سلولز آمورف، استحکام مکانیکی بالایی دارند و به زمینه که دارای ضربه‌پذیری بالاست، مدول الاستیک و استحکام مکانیکی بالایی نیز می‌بخشند. در شکل ۳ تصویر شماتیک اجزا تشکیل‌دهنده چوب آورده شده است. قابل ذکر است که مطابق شکل ۴، در صورت هیدرولیز چوب با اسید، قسمت‌های آمورف که مقاومت کمتری دارند از بین می‌روند و جزء تقویت‌کننده نانویی که نانوکریستال‌های سلولز است باقی می‌ماند.



شکل ۴: شماتیک اجزا تشکیل‌دهنده چوب و هیدرولیز اسیدی چوب

جنبه دیگر تقسیم‌بندی نانوکامپوزیت‌ها (و کامپوزیت‌ها) که بسیار مرسوم است، تقسیم‌بندی آنها بر اساس نوع زمینه است (شکل ۵). بر طبق این دسته‌بندی، نانوکامپوزیت‌ها به سه دسته نانوکامپوزیت‌های زمینه فلزی، زمینه پلیمری و زمینه سرامیکی تقسیم‌بندی می‌شوند. اضافه کردن جزء تقویت‌کننده نانویی به هریک از این زمینه‌ها به دلیل رفع نقوص اصلی آنهاست. در پلیمرها این نقوص می‌توانند استحکام مکانیکی کم، مقاومت حرارتی پایین، رسانایی الکتریکی و حرارتی بسیار پایین، تخریب در برابر فرابنفش نور خورشید باشد که بدین منظور می‌توان از تقویت‌کننده‌های نانویی مختلفی استفاده نمود. در فلزات این نقوص می‌توانند مدول الاستیک یا استحکام مکانیکی پایین، مقاومت کم در برابر خزش یا استحکام شکست پایین باشد که معمولاً برای فلزات سبکی مثل آلومینیوم، تیتانیوم یا منیزیم صدق می‌کند. در سرامیک‌ها نیز نقص اصلی مرتبط با چقرمگی یا تافنس پایین زمینه سرامیکی است که سعی می‌شود با افزودن نانومواد آن را بهبود بخشید.



شکل ۵: دسته‌بندی کامپوزیت‌ها و نانوکامپوزیت‌ها بر حسب فاز زمینه (فلز، پلیمر یا سرامیک)

#### ۴- بررسی نانوکامپوزیت‌های مختلف طبق زمینه

همان‌طور که در بالا بیان شد، یکی از جنبه‌های تقسیم‌بندی نانوکامپوزیت‌ها بر حسب زمینه آنهاست. نانوکامپوزیت‌ها طبق زمینه به سه دسته زمینه فلزی، سرامیکی و پلیمری تقسیم‌بندی می‌شوند. در اینجا به بررسی مباحث مهم در هریک از نانوکامپوزیت‌ها پرداخته می‌شود.

در نانوکامپوزیت‌های زمینه پلیمری هدف استفاده از جزء نانو همان‌طور که در بالا اشاره شد رفع نقوص ذاتی پلیمرها مثل استحکام مکانیکی کم، مقاومت حرارتی پایین، رسانایی الکتریکی و حرارتی کم، تخریب در برابر امواج فرابنفش می‌باشد. از نانومواد در هر دو نوع پلیمر گرمانرم و گرماسخت استفاده می‌شود که از زمینه‌های متداول گرمانرم می‌توان به پلی‌اتیلن، پلی‌پروپیلن، پلی‌آمید، پلی‌کربنات و پلی‌استایرن نام برد و از گرماسخت‌ها نیز می‌توان از اپوکسی، پلی‌استر، وینیل‌استرها نام برد. از نانومواد که اکثراً در این زمینه‌های پلیمری استفاده می‌شود می‌توان به نانولوله کربنی، گرافن، کربن‌بلک، تیتانیا، کربنات کلسیم و نانورس اشاره کرد. برای مثال با نانولوله کربنی و گرافن می‌توان به زمینه پلیمری رسانایی الکتریکی، رسانایی حرارتی، خاصیت کندسوزی و در مواردی بهبود خواص مکانیکی بخشید. همچنین از نانوتیتانیا به عنوان جاذب فرابنفش نور خورشید و سفیدکننده در زمینه‌های پلیمری استفاده می‌شود. همچنین از نانوذرات کربنات کلسیم نیز می‌توان به عنوان پرکننده (جهت کاهش استفاده از پلیمر) استفاده نمود که در مواردی بهبود خواص مکانیکی مثل استحکام مکانیکی را منجر می‌شود. همچنین نانورس نیز در بهبود خواص مکانیکی زمینه‌های پلیمری و همچنین کندسوز کردن آنها در اثر خاصیت سدگری (برای مثال جلوگیری از ورود اکسیژن به بسته‌بندی مواد غذایی) مورد استفاده است. با استفاده از نانوساختارها است که می‌توان قطعات پلیمری با کاربردهای مهندسی و خواص ویژه تولید کرد.

در بسیاری از کاربردها که نیاز به وزن کم و یک خاصیت ویژه هست، این نانوکامپوزیت‌ها بهترین گزینه هستند چراکه به خاطر زمینه پلیمری وزن بسیار کمی دارند و از طرف دیگر نیز میزان تقویت‌کننده کمی در آنها به کار رفته است و بهبود خواص نیز به علت نانوساختار بودن آن قابل توجه است.

در استفاده از نانوساختارها در زمینه‌های فلزی اکثراً منظور فلزات سبک، یعنی آلومینیوم، تیتانیوم و منیزیم است. این فلزات به علت وزن سبکی که دارند گزینه بسیار مناسبی در حوزه‌هایی که حرکت وجود دارد مثل هوافضا و خودروسازی هستند. که در این بین اصلی‌ترین گزینه مطرح آلومینیوم است که قیمت مناسب‌تری هم دارد. اما مشکلی که این فلزات دارند این است که خواص مکانیکی مطلوبی برای این کاربردها مثل فولاد ندارند و استحکام تسلیم، مدول و استحکام کششی پایینی دارند. با استفاده از نانومواد مثل نانولوله کربنی، کاربید سیلیسیوم، آلومینا و گرافن می‌توان خواص مکانیکی این فلزات را بهبود بخشید. همچنین در مواردی نیز از این نانومواد به دلیل جلوگیری از خزش (در یک تنش ثابت و در دمای بالا) در زمینه فلزی استفاده می‌شود. در زمینه‌های سرامیکی نیز مهم‌ترین مشکل چقرمگی یا تافنس پایین آن است. به همین دلیل سرامیک‌ها بسیار شکننده هستند و قابلیت تغییر شکل پلاستیک پایینی دارند. یکی از راهکارهای بهبود چقرمگی سرامیک‌ها استفاده از نانومواد در آنهاست. این نانو مواد با جلوگیری از رشد ترک به افزایش تافنس زمینه سرامیکی و به تعویق انداختن شکست در آن کمک می‌کنند. از جمله این موارد می‌توان به استفاده از نانوذرات آلومینا یا سیلیکا در زمینه سرامیکی زیرکونیا یا سرامیک دوجزئی زیرکونیا-آلومینا اشاره کرد.

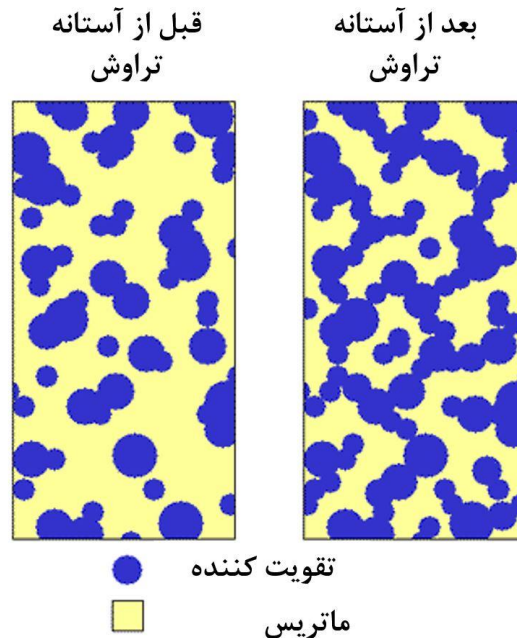
حتی در صورتی که این افزایش تافنس قابل توجه باشد می‌توان نانوکامپوزیت زمینه سرامیکی با قابلیت سوپرپلاستیسیته ساخت، در این صورت می‌توان آن قطعه نانوکامپوزیتی را به اشکال دلخواه تغییر شکل داد. با استفاده از این راهکار بوده است که در حال حاضر می‌توان چاقوهای سرامیکی تولید کرد. در صورتی که تا قبل از این امکان تغییر شکل و ماشینکاری سرامیک‌ها برای ایجاد شکل تیغه چاقو به علت شکنندگی بالای آنها فراهم نبود.

#### ۴-۱- مفهوم آستانه تراوش در نانوکامپوزیت‌سازی

یکی از مفاهیمی که در نانوکامپوزیت‌سازی مهم است مفهوم آستانه تراوش برای یک خاصیت است. این آستانه بیشتر برای خاصیتی مثل رسانایی الکتریکی یا حرارتی مطرح است. در واقع برای رخ دادن رسانایی حرارتی یا الکتریکی در یک زمینه عایق نیاز به این هست که مقادیر کافی از نانوساختار رسانای مورد استفاده در زمینه وجود داشته باشد تا یک شبکه سه بعدی برای عبور الکتریسیته یا حرارت (به وسیله الکترون یا فوتون) ایجاد کند. به مقدار درصد وزنی از نانوساختار که نیاز است تا این شبکه سه‌بعدی



در زمینه شکل گیرد، آستانه تراوش گفته می‌شود. این مفهوم در شکل ۶ نمایش داده شده است. بدیهی است که تا قبل از اینکه نانوساختار موردنظر به آستانه تراوش برسد خاصیت مورد نظر (برای مثال رسانایی الکتریکی) حاصل نمی‌شود و با رسیدن به آستانه تراوش ناگهان خاصیت موردنظر ایجاد می‌شود. در نتیجه حتما باید میزان نانوساختار تقویت‌کننده بزرگتر مساوی آستانه تراوش باشد.



شکل ۶: نانوکامپوزیتی قبل و بعد از آستانه تراوش

## ۵- ساخت و مدل‌سازی رفتار نانوکامپوزیت

روش‌های سنتز نانو مواد، شامل روش تراکم گاز، روش تراکم بخار شیمیایی، سنتز در فاز مایع، روش صوت شیمیایی و ... است. این تکنیک‌ها منجر به ساخت پودرهای با مقیاس نانو می‌شود. در مقابل، روش‌های دیگری مطرح است که منجر به ساخت پوشش‌های مقاوم در مقیاس نانو می‌شود. این پوشش‌ها برای مقاومت به خستگی، خوردگی، سایش و حتی خودپاک‌شوندگی است. این نانو پوشش‌ها گاهی را به دو دسته سخت (با سختی کمتر از ۴۰ گیگاپاسکال) و ابرسخت (با سختی بیشتر از ۴۰ گیگاپاسکال) تقسیم می‌کنند.

یکی از انواع نانو مواد پر استفاده، نانو لوله‌های کربنی است که به دو صورت تک دیواره و چند دیواره مطرح است. این مواد دارای واکنش‌پذیری شیمیایی، استحکام و مقاومت بالا، خواص حرکتی، خواص الکتریکی، خواص حرارتی و ... هستند. روش‌های ساخت آنها شامل تخلیه قوس الکتریکی، گدازش لیزری و رسوب بخار شیمیایی است. ماده مشابه دیگر، نانو صفحات گرافن است که امروز، در صنایع مختلف به آنها پرداخته می‌شود.

برای شبیه‌سازی رفتار مواد نانو، از مدل‌های میکرومکانیکی استفاده می‌شود که شامل موارد زیر است:

➤ نانو لوله‌های هم‌ردیف و منظم همچون مدل موری-تاناکا

➤ استقرار تصادفی نانو لوله‌ها

➤ استقرار تصادفی نانو لوله‌ها با تراکم زیاد

یکی دیگر از روش‌های مدل‌سازی، شبیه‌سازی دینامیک مولکولی است. در کنار این روش، تکنیک‌های مکانیک پیوسته و مدل‌سازی اجزای محدود (المان محدود) نیز وجود دارد.

## بخش سوم، معرفی فرامواد

عنوان مقاله: مروری بر انواع فراماده، روش ساخت افزایشی و کاربرد آن در صنعت خودرو  
عنوان مجله: مهندسی مکانیک (مجله علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران)  
دسترسی به لینک آنلاین:

[http://mmep.isme.ir/article\\_247223.html](http://mmep.isme.ir/article_247223.html)

عنوان مقاله: مروری بر تایرهای غیرپنوماتیک ساخته شده از فرامواد با پریتر سه بعدی  
عنوان مجله: مهندسی مکانیک تبریز  
دسترسی به لینک آنلاین:  
**بزودی اعلام می شود!**

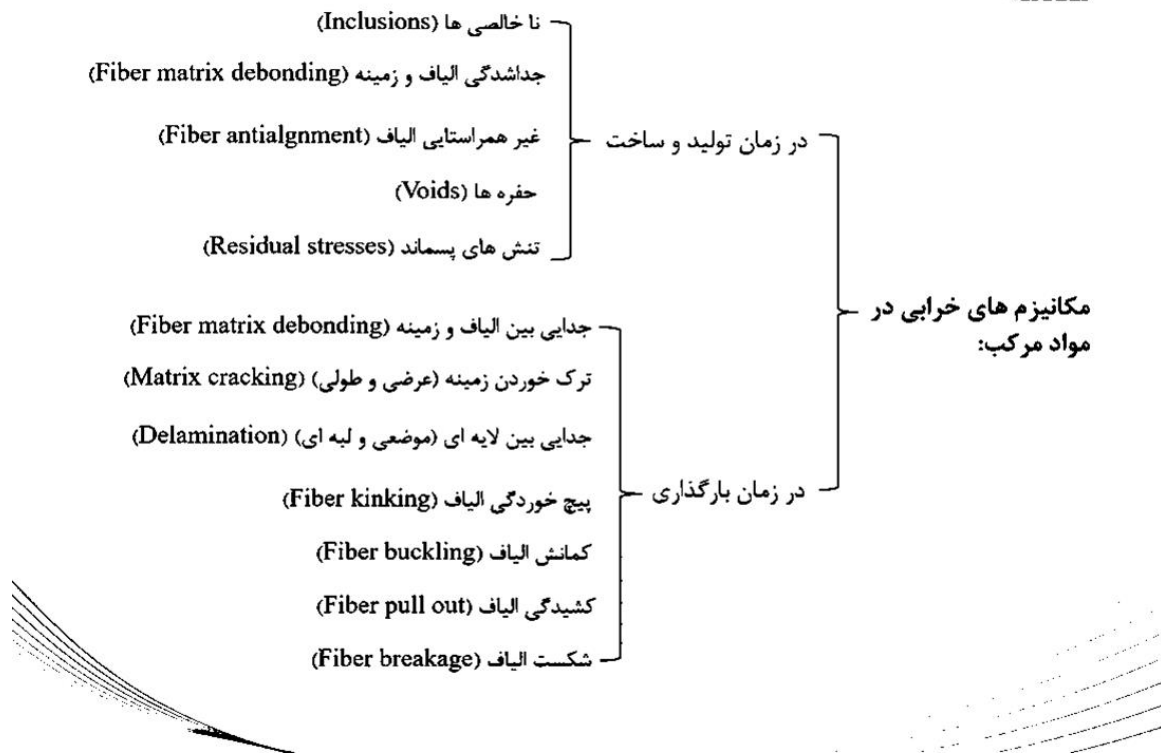
عنوان وینار: فرامواد: فراتر از مواد با خواص غیر طبیعی  
لینک آنلاین:

[https://www.aparat.com/v/lK2ro/%D9%88%D8%A8%DB%8C%D9%86%D8%A7%D8%B1\\_%D8%AA%D8%AE%D8%B5%D8%B5%DB%8C\\_%D9%85%D8%AA%D8%A7%D9%85%D8%AA%D8%B1%DB%8C%D8%A7%D9%84\\_%D8%A8%D8%A7\\_%D8%AD%D8%B6%D9%88%D8%B1\\_%D8%AF%DA%A9%D8%AA%D8%B1\\_%D9%85%D8%AD%D9%85%D8%AF\\_%D8%A2%D8%B2%D8%A7%D8%AF%DB%8C](https://www.aparat.com/v/lK2ro/%D9%88%D8%A8%DB%8C%D9%86%D8%A7%D8%B1_%D8%AA%D8%AE%D8%B5%D8%B5%DB%8C_%D9%85%D8%AA%D8%A7%D9%85%D8%AA%D8%B1%DB%8C%D8%A7%D9%84_%D8%A8%D8%A7_%D8%AD%D8%B6%D9%88%D8%B1_%D8%AF%DA%A9%D8%AA%D8%B1_%D9%85%D8%AD%D9%85%D8%AF_%D8%A2%D8%B2%D8%A7%D8%AF%DB%8C)

عنوان وینار: سازه های متامتریال چندماده ای (Multi-material metamaterial - 4M - Structures)  
لینک آنلاین:

<https://www.aparat.com/v/0X5Rw>

مقدمه



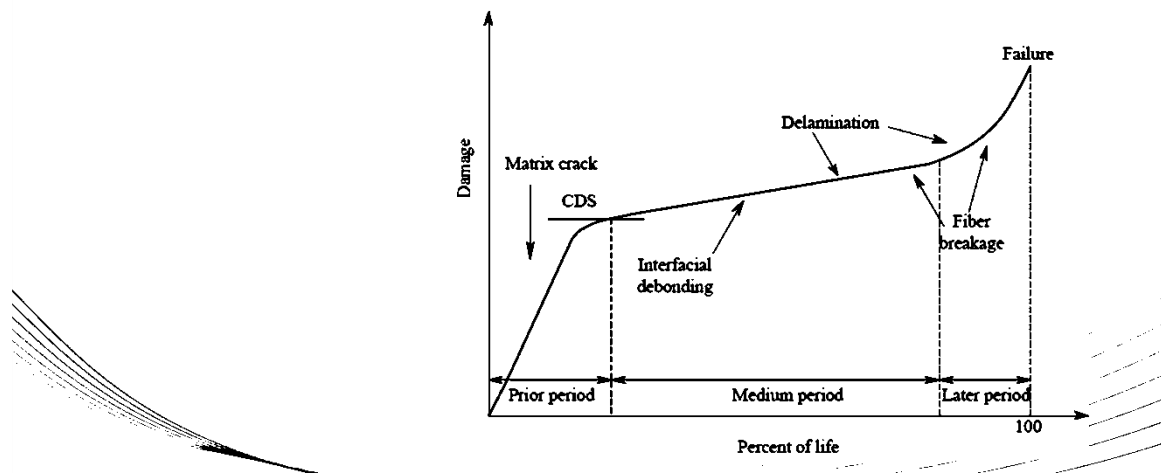
مقدمه

ترک خوردن زمینه (عرضی و طولی) (Matrix cracking)

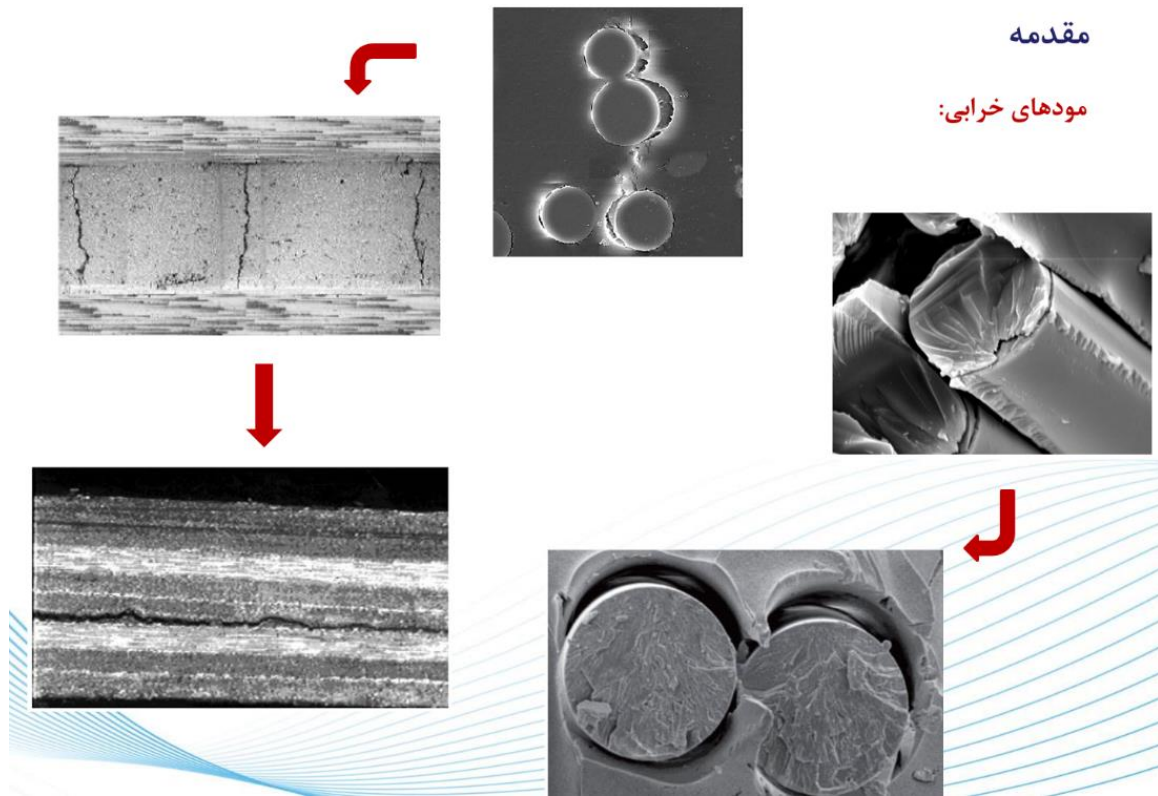
جدایی بین لایه ای (موضعی و لبه ای) (Delamination)

شکست الیاف (Fiber breakage)

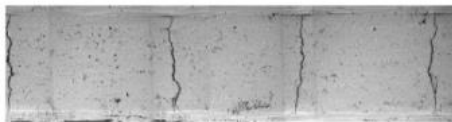
جدایی بین الیاف و زمینه (Fiber matrix debonding)



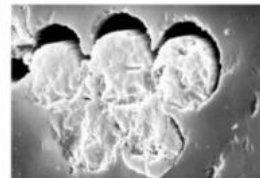




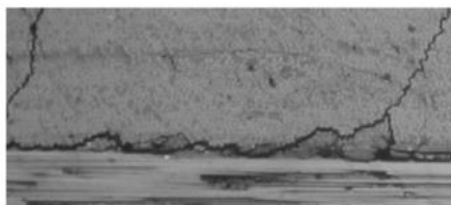
### Various mechanisms of damage in composite laminates



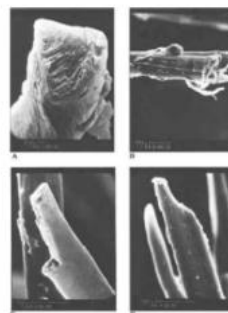
(a) Matrix Cracking



(c) Fiber/Matrix Debonding

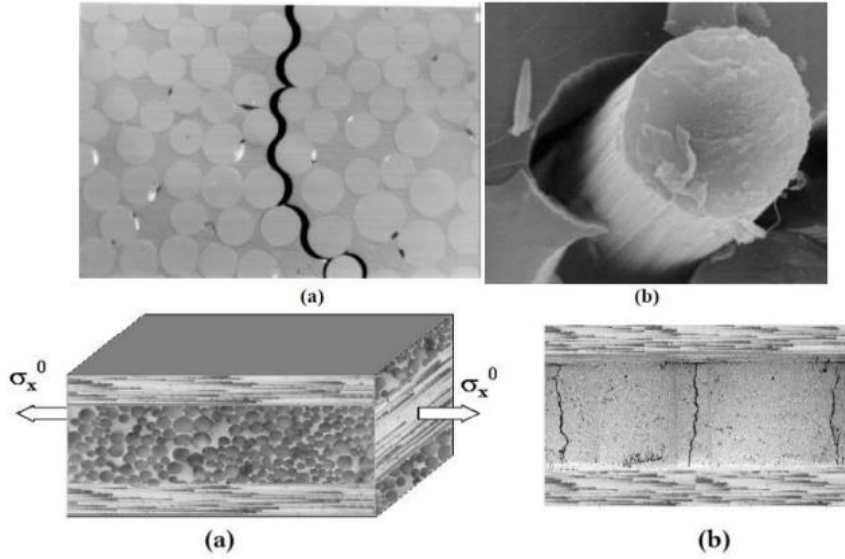


(b) Delamination



(d) Fiber Fracture

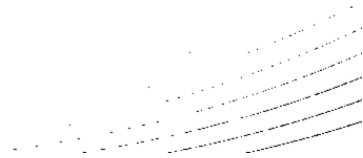
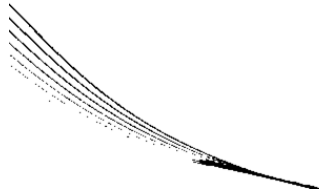
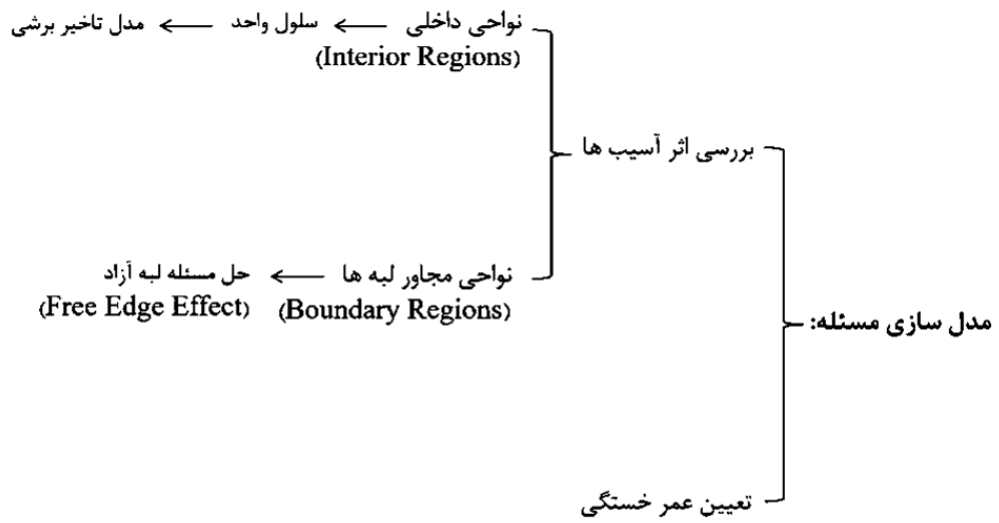
### Matrix Cracking Formation



### مقدمه



مقدمه



مقدمه

