

## مقدمه

تقاضای روز افزون برای بهبود عملکرد فراورده ها به صورت خواسته های مختلف از قبیل : وزن کمتر، استحکام بیشتر و هزینه کمتر مطرح می شوند، تداوم خواسته ها برای بهبود ایفای نقش که ممکن است توسط معیار های مختلف از جمله وزن کم مطرح شود باعث شده است که مواد کنونی دیگر جواب گو نباشد.

سازندگان، طراحان و مهندسين توانایی مواد مرکب را جهت تولید محصولات با کیفیت بالا، با دوام و ارزان تشخیص داده اند مواد مرکب در محصولات زیادی در زندگی روزمره ما یافت می شوند از اتومبیل هایی که بر آن سوار می شویم تا قایقها، چوبهای اسکی و گلف که استفاده می کنیم. علاوه بر این در بسیاری از کاربردهای صنعتی حساس، هوافضا و نظامی استفاده می شوند.

کامپوزیتها خواص مختلفی نسبت به سایر مواد دارا هستند. برای مثال فلزات استحکام یکسانی در همه جهات دارند. کامپوزیتها می توانند طبق خواست مشتری جهت گیری شده یا در یک جهت خاص بیشترین استحکام را داشته باشند. اگر کامپوزیتی در یک جهت باید در قبال خمش مقاومت کند، بیشتر الیاف می توانند در جهت ۹۰ درجه عمود بر نیروی خمش قرار گیرند. این کار سازه ای خیلی سفت را در یک جهت ایجاد میکند. آنچه واقعاً اتفاق می افتد این است که بیشتر ماده می تواند به طوری که مؤثرتر است به کار برده شود، در عوض در

فلزات اگر استحکام بزرگ تری در یک جهت خواسته شده باشد ماده باید به طور کلی ضخیم تر ساخته شود که وزن را اضافه می کند .

کامپوزیتها نسبت به فلزات به خاطر دامنه وسیع ترکیبات مختلف از ماده که می توانند در آنها استفاده شوند تفاوت دارند. از این رو استفاده از هندبوک جهت طراحی کامپوزیت ها مشکل است، برای مثال اگر شخصی به دنبال یک تیر آهن I شکل به طول (دهانه تیر) ۲۰ فوت برای تحمل باری برابر ۲۰۰۰ پوند باشد بسادگی میتواند یک هندبوک را باز کند و ضخامت های مناسب جان تیر و پهنای فلنچ آن را از نمودار انتخاب نماید. در کامپوزیت ها کار قدری پیچیده تر می باشد مشخصه های عملکرد کامپوزیتها می توانند به طور عجیبی تغییر داده شوند و هیچ چیزی به عنوان یک کامپوزیت کلی و عمومی وجود ندارد. عوامل زیادی وجود دارند که باعث می شوند کامپوزیت ها به صورت یک ماده مهندسی قابل تعریف در آیند.

انواع زیادی از رزینها و تقویت کننده های مورد استفاده در کامپوزیت ها وجود دارند. هر یک از اینها در ایجاد خواص ویژه ای از محصولات پلاستیک های تقویت شده با الیاف (FRP) سهیم هستند. تعداد زیادی از رزین های گوناگون وجود دارند که در ساخت کامپوزیت ها استفاده می شوند. این سیستم های رزینی عبارتند از: پلی استر، وینیل استر، اکریلیک اصلاح شده، اپاکسی، فنولیک و اوره تان. اگر چه این لیست تمام می شود ولی نکته مهم قابل توجه این است که هر یک از این رزین ها مشخصه های عملکرد ویژه ای دارند برای مثال اگر محصولی نیاز است که در مقابل خوردگی مقاوم باشد، رزین وینیل استر یا ایزوفتالیک می تواند به کار برده شود. اگر استحکام بالا بحرانی باشد، یک اپاکسی می تواند رزین انتخابی باشد. اگر هزینه محصول یک عامل مهم باشد، رزین پلی استر متداول ترین مصرف می باشد در خود قلمرو رزین های پلی استر، اگر مسائل تزئینی مهم باشد، اگر بالابردن مقاومت به خوردگی مهم باشد، اگر تحمل دماهای بالا مد نظر باشد یا اگر هزینه فاکتور مهمتری به شمار آید فرمول

های مختلفی به کار برده خواهد شد. سیستم رزینی بر مبنای نیازهای هزینه ای و کاربرد محصول انتخاب می شود.

علاوه بر رزینهای مختلف انواع مختلفی از الیاف تقویت کننده در کامپوزیتها مصرف می شود، الیاف شیشه در بیش از ۹۰٪ همه کامپوزیت ها استفاده می شوند. هر چند در صورت نیاز، الیاف پیشرفته ای نظیر کولار (kevlar) یا کربن با قیمت بالا، میزان عملکرد بالایی را ارائه می دهند. در قلمرو الیاف شیشه شیشه های متعددی از تقویت کننده وجود دارد که بسته به فرایند قالبگیری و استحکام های مورد نیاز محصول، چندین انتخاب وجود دارند.

مزایای استفاده از کامپوزیتها عبارتند از :

استحکام بالا : مواد کامپوزیت برای نیازهای استحکامی خاص در یک کاربرد می توانند طراحی شوند. مزیت بازار کامپوزیتها نسبت به سایر مواد، توانایی استفاده کردن از تعداد زیادی از ترکیبهای رزینها و تقویت کننده ها و بنابر این رسیدن به خواست مشتری از نظر خواص مکانیکی و فیزیکی ساده می باشد.

سبکی : کامپوزیت ها، موادی را ارائه می دهند که می توانند هم برای استحکام بالا و هم برای وزن کم طراحی شوند. در حقیقت کامپوزیت ها جهت تولید سازه های با بالاترین نسبت استحکام به وزن شناخته شده برای بشر به کار برده می شوند.

مقاومت به خوردگی : کامپوزیت ها مقاومت طولانی مدت را در کار در محیط های شیمیایی و دمایی ارائه می دهند. کامپوزیت ها موادی منتخب برای قطعاتی که در معرض محیط های باز، کاربردهای شیمیایی و دیگر شرایط محیطی می باشند، هستند.

انعطاف پذیری طراحی : کامپوزیت ها نسبت به دیگر مواد این مزیت را دارند که می توانند با شکلهای پیچیده نسبت به هزینه کم، قالبگیری شوند. انعطاف پذیری در ایجاد شکل های پیچیده به طراحان آزادی عمل می دهد که نشانی از موفقیت کامپوزیت ها است.

با دوام بودن : سازه های کامپوزیتی عمری بادوام و طولانی را دارا هستند. این خصوصیت با حداقل نیازمندی های تعمیر و نگهداری توأم گشته است. طول عمر کامپوزیت ها در کاربردهای حساس مزیت به شمار می رود. مثال های بیشماری از کامپوزیت ها وجود دارد که دارای سرویس به مدت چهل تا پنجاه سال بوده است. در سال ۱۹۴۷ گارد ساحلی امریکا یک سری قایقهای گشتی ۴۰ فوتی را با استفاده از رزین پلی استر و فایبرگلاس ساخت، این قایقها تا اوایل دهه ۱۹۷۰ استفاده می شدند تا اینکه به دلیل منسوخ شدن طراحی از سرویس خارج شدند. تست های زیادی روی لایه ها بعد از ماموریت های آنها انجام شد و معلوم شد که فقط ۲٪ الی ۳٪ از استحکام اولیه بعد از ۲۵ سال سرویس سخت افت کرده است. مثال های بی شماری از قایقها، ساختمان هاو دیگر سازه های کامپوزیتی ساخته شده در دهه ی ۱۹۵۰ وجود دارند که هنوز در حال سرویس دهی هستند. مواردی از مجاری و لوله های فایبر گلاس که در کارخانجات شیمیایی به مدت ۲۵ سال به کار گرفته شده اند موجود هستند که در شرایط محیطی بسیار سخت شیمیایی و به صورت ۲۴ ساعته و هفت روز هفته در حال کار بوده اند.

### تاریخچه صنعت کامپوزیت :

استفاده از مواد کامپوزیت طبیعی، بخشی از تکنولوژی بشر از زمانی که اولین بناهای باستانی کاه را برای تقویت کردن آجرهای گلی به کار برده اند بوده است. مغولهای قرن دوازدهم، سلاحهای پیشرفته ای را نسبت به زمان خودشان با تیروکمانهایی که کوچکتر و قویتر از دیگر وسائل مشابه بودند ساختند. این کمانها سازه های کامپوزیتی ای بودند که به وسیله ترکیب زرد پی احشام (تاندون)، شاخ، خیزران (بامبو) و ابریشم ساخته شده

بودند که با کلوفون طبیعی (Rosin) پیچیده می شد. اخیراً بعضی از این قطعات موزه ای ۷۰۰ ساله کشیده و تست شدند آن ها از نظر قدرت حدود ۸۰٪ کمان های کامپوزیتی مدرن بودند. در اواخر دهه ۱۸۰۰ سازندگان کاند، قایقهای باریک و بدون بادبان و سکان تجربه می کردند که با چسباندن لایه های کاغذ محکم کرافت (Kraft) با نوعی لاک به نام شلاک (Shellac)، لایه گذاری کاغذی را تشکیل می دهند در حالی که ایده کلی موفق بود ولی مواد به خوبی کار نمی کردند. چون مواد در دسترسی ترقی نکرد، این ایده محو شد.

در سال های بین ۱۸۷۰ تا ۱۸۹۰ انقلابی در شیمی به وقوع پیوست، اولین رزین های مصنوعی (ساخت بشر) توسعه یافت به طوری که می توانست به وسیله پلیمریزاسیون از حالت مایع به جامد تبدیل شود. این رزین های پلیمری از حالت مایع به جامد توسط پیوند متقاطع مولکولی تبدیل می شوند، رزین های مصنوعی اولیه شامل سلولویید، ملامین و باکلیت (Bakelite) بودند.

در اوایل دهه ۱۹۳۰ دو شرکت شیمیایی که روی توسعه رزین های پلیمری فعالیت می کردند، عبارت بودند از "American Cyanamid" و "Dupont" در مسیر آزمایشاتشان هر دو شرکت به طور مستقل و در یک زمان به فرمول ساخت رزین پلی استر دست یافتند. هم زمان شرکت شیشه "Owens-Illinois" شروع به ساخت الیاف شیشه به همان صورت بنیادی بافت پارچه های نساجی نمود. در سال های ۱۹۳۴ و ۱۹۳۶ محققى به نام "Ray Green" در اوهایو این دو محصول جدید را ترکیب کرد و شروع به قالبگیری قایقهای کوچک نمود این زمان را شروع کامپوزیتهای مدرن می شناسند.

در حین جنگ جهانی دوم، توسعه رادار به محفظه های غیر فلزی نیاز پیدا کرد و ارتش امریکا با تعداد زیادی پروژه های تحقیقاتی تکنولوژی نو پای کامپوزیت ها را توسعه بخشید. فوراً به دنبال جنگ جهانی دوم کامپوزیت به عنوان یک ماده مهندسی اصلی پدیدار شد.

صنعت کامپوزیت در اواخر دهه ۱۹۴۰ با علاقه شدید به آن شروع شد و به سرعت در دهه ۱۹۵۰ توسعه یافت. بیشتر روشهای امروزی قالبگیری و فرایند انجام کار روی کامپوزیت ها در سال ۱۹۵۵ گسترش یافت. قالبگیری فشاری، استفاده از پاشش الیاف سوزنی، قالبگیری به روش انتقال رزین، روش فیلامنت وایندینگ، استفاده از روش کیسه خلاء و روش پاشش در خلاء همگی بین سالهای ۱۹۴۶ و ۱۹۵۵ توسعه یافتند و در تولید استفاده شدند.

محصولات ساخته شده از کامپوزیتها در طی این دوره شامل این مواد بودند : قایقها، بدنه اتومبیل، قطعات کامیونها، قطعات هواپیماها، مخازن ذخیره زیر زمینی، ساختمانها و بسیاری دیگر از محصولات مشابه.

### کامپوزیت ها چه هستند ؟

یک تعریف ویژه از کامپوزیت را می توان به عنوان ترکیبی از الیاف تقویت کننده و یک ماتریس زمینه بیان کرد. یک ماده مرکب ممکن است دارای زمینه ی سرامیکی فلزی یا پلیمری باشد. خواص این سه گروه از مواد به طور قابل ملاحظه ای با یکدیگر تفاوت دارند. به طور کلی میتوان خواص این سه گروه از مواد را که می توانند زمینه ی مواد مرکب را تشکیل دهند به این صورت خلاصه نمود که پلیمرها دارای استحکام و ضریب کشسانی پایین می باشند، سرامیک ها از استحکام و سختی بالایی برخوردار بوده و ترد و شکننده هستند و فلزات دارای استحکام و ضریب کشسانی متوسط هستند ضمن اینکه از شکل پذیری خوبی نیز برخوردار بوده و ترد و شکننده نمی باشند در جداول زیر کاربردهای مختلف این سه گروه مشاهده می گردد.

## برخی کاربردهای مواد مرکب زمینه ی پلی مری

مثال	زمینه ی صنعتی
بالها، بدنه ی هواپیما، برج های رادار، آنتن ها، دم هواپیما، تیغه های هلی کوپتر، صندلی ها، پانل های داخلی، مخزن های سوخت، محفظه های موتور راکت مخروطی های نوک، تیوپ های سکوی پرتاب	هوافضا
پانل های بدنه، کابین، بادگیرها، کنسولها، پانل های تجهیزات، محفظه ی لامپها، ضربه گیرها، فنرهای شمش، محورهای محرک، چرخ دنده ها	خودرو
بدنه ها، عرشه ها، دکل ها، محفظه های موتور، پانل های داخلی	کشتی
لوله ها، تانکها، مخازن تحت فشار، حوضچه های لجن گیر، شیرها، پمپها، پانل های داخلی و خارجی، صندلی ها، میزها، حمام ها، اجزای دوش ها، نردبان	شیمیایی
کلید آلات، عایق ها، اتصال دهنده ها	خانگی
تریلرها، کلوب های گلف، تنیس های دیواری، کلاه های محافظ، اسکی ها	الکتریکی
کمان تیروکمانها، تخته های موج سواری، چوب های ماهیگیری، بیلیاردها	رفاهی
تخته های شیرجه، تجهیزات زمین بازی	

## تعدادی از کاربرد های مواد مرکب زمینه ی سرامیکی و فلزی

کاربردهای صنعتی	ماتریس سرامیکی	ماتریس فلزی
هوافضا	پس سوزها، ترمزها، سپرهای حرارتی	ستون های هواپیما، آنتنها
خودرو	ترمزها	تاج پیستون ها
ساخت	عایق های حرارتی، ابزارهای برش	ابرهادی ها، اتصال ها
پزشکی	قالب های کشش عمیق	فیلامان ها، الکترودها
	پروتزها، صفحات تثبیت کننده	

جزء تشکیل دهنده ی دیگر (الیاف) به لحاظ این که سبب افزایش و یا تقویت خواص مکانیکی زمینه ماده مرکب می شود، فاز تقویتی یا تقویت کننده نامیده میشود. در بیشتر موارد فاز تقویت کننده سخت تر، مستحکم تر و سفت تر از زمینه است. البته استثنا ها یی نیز وجود دارد به عنوان مثال می توان از فاز تقویت کننده ی فلز(شکل پذیر)، در زمینه ی سرامیکی نام برد. شکل هندسی فاز تقویت کننده یکی از عامل های اصلی در تعیین شدت تاثیر تقویت کنندگی است. به عبارت دیگر خواص مکانیکی ماده مرکب تابعی از شکل و ابعاد جزء تقویت کننده می باشد.

ماده تقویت کننده معمولاً چقرمه و محکم است، ممکن است این سوال پیش آید که چرا از استحکام و ضریب کشسانی بالای این گونه مواد از طریق ساخت قطعات مختلف فقط از ماده تقویت کننده به تنهایی استفاده نمی شود، حقیقت امر این است که این فکر به مرحله اجرا در آمده است ولی این گونه مواد مانند قطعات ساخته شده از سرامیک های کاربرد سیلیسیم و آلومینا که به راحتی در دسترسی هستند با مسئله ی تردی و شکنندگی مواجه می باشند، اگر چه این مواد قادرند تنش زیادی را تحمل نمایند ولی به هنگام شکست بدون اخطار اولیه به شکل فاجعه آمیزی دچار شکست میشوند. الیاف میتوانند از نوع الیاف طبیعی، آرامید، الیاف شیشه و کربنی باشند. در صفحات آتی انواع الیاف، ماتریس های زمینه و روش های ساخت مواد مرکب به تفصیل توضیح داده خواهد شد.

## **انواع الیاف :**

### **۱. الیاف شیشه**

الیاف شیشه مشهورترین تقویت کننده مورد استفاده در صنعت کامپوزیت می باشد و انواع مختلفی از آن بصورت تجاری وجود دارند که برخی از آنها عبارتند از : AR, ECR, C, S, E. ترکیبات شیمیایی این الیاف با هم متفاوت است و هر کدام برای کاربرد خاصی مناسب است.



تقریباً ۹۰ درصد الیاف مورد استفاده در کامپوزیتهای مهندسی الیاف شیشه می باشد. الیاف شیشه استحکام و سختی مناسبی دارد، خواص مکانیکی خود را در دماهای بالا حفظ می کند، مقاومت رطوبت و خوردگی مناسبی دارد و نسبتاً ارزان است. تقسیم بندی شش نوع الیاف شیشه و ترکیب درصدهای آن در زیر نشان داده شده است:

مصارف عمومی	glass- E
خواص مکانیکی بالاتر	glass- R
خواص مکانیکی بالاتر	glass-S
مقاومت شیمیایی مناسب	glass-c
مقاومت اسید و باز خوب	glass-ECR
مقاومت اسید و باز خوب	glass-AR

در جدول ذیل ترکیب شیمیایی انواع الیاف شیشه مشاهده می شود.

AR	ECR	C	S	R	E	
61	58.4	64.6	64.4	60	54.2	SiO <sub>2</sub>
0.5	۱۱	۴,۱	۲۵	۲۵	۱۴,۰	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
5	۲۲	۱۳,۴	-	۹	17.2	CaO
0.05	۲,۲	۳,۳	۱۰,۳	۶	۴,۶	MgO
۱۴	۰,۹	۹,۶	-	-	۰,۸	Na <sub>2</sub> O, K <sub>2</sub> O, Li <sub>2</sub> O
-	۰,۰۹	۴,۷	-	-	۱۰,۶	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
-	-	0.9	-	-	-	BaO
-	3	-	-	-	-	ZnO

13	-	-	-	-	-	ZrO <sub>2</sub>
5.5	۲,۱	-	-	-	-	TiO <sub>2</sub>
۰,۵	۰,۲۶	-	-	-	0.4	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
۲,۷۴	۲,۶	۲,۴۵	۲,۴۹	۲,۵۸	۲,۵۶	Specific gravity
1.56	-	1.52	1.52	-	1.55	Refractive index
۲,۵	۳,۴	-	۴,۵	۴,۴	3.6	Single tensile fibre strength, GPa
80	73	-	86	85	76	Single fibre tensile modulus, GPa
860	900	690	1000	990		Softening point, C

فرآیند تولید الیاف شیشه را می‌توان بصورت زیر خلاصه نمود :

۱- آماده سازی مواد خام: بیش از نیمی از مواد اولیه مورد استفاده ماسه سیلیس است و قسمت اصلی هر نوع الیاف شیشه را تشکیل می‌دهد. سایر اجزاء شامل مقادیر ناچیز سایر ترکیبات شیمیایی می‌باشند.

۲- بخش اختلاط (House Batch): در اینجا مواد با هم مخلوط شده برای قسمت کوره آماده می‌شوند. اصطلاحاً به این توده مخلوط، Batch گفته می‌شود.

۳- کوره: دمای کوره به اندازه کافی زیاد است تا ماسه و سایر اجزاء را ذوب کند و بصورت شیشه مذاب در آورد. سطح داخلی کوره با آجرهای مخصوصی ساخته شده است که در دوره‌های زمانی مشخص تعویض می‌شوند.

۴- بخش Bushing: شیشه مذاب روی سینی‌های پلاتینی مقاوم حرارتی متعدد، جریان پیدا می‌کند. در این سینی‌ها هزاران روزنه وجود دارد که بوشینگ نامیده می‌شوند

۵- تشکیل الیاف: جریان شیشه مذاب از درون بوشینگ‌ها بیرون کشیده می‌شود و تا قطر معین نازک می‌شوند، سپس توسط آب یا هوا خنک می‌شوند تا الیاف تشکیل شوند.

6- آهار زنی: الیاف مو مانند، با یک مخلوط شیمیایی مایع که Sizing نامیده می‌شود، پوشش داده می‌شوند. آهار زنی به دو علت اصلی انجام می‌شود:

۱. برای محفوظ ماندن الیاف از سایش به یکدیگر در طی فرآیند ساخت و کار

۲. به منظور حصول اطمینان از چسبندگی الیاف به رزین

دسته (strand): یک دسته از چند تاو (tow) تشکیل شده است و هر تاو بیانگر تعداد لیفهایی (fiber) است که از یک بوش رسیده می‌شوند به عنوان مثال می‌تواند دویست لیف باشد. مجموعه‌ای از دسته‌ها، یک رشته (roving) نامیده می‌شود. یک تاب مختصر به رشته داده می‌شود تا کار کردن با آن آسانتر شود. برای کامپوزیتهای الیاف پیوسته، انتخاب نوع الیاف، بستگی به فرآیند شکل دهی و میزان آرایش یافتگی الیاف دارد.

تعداد تارهای (filament) یک رشته توسط تکس (tex) بیان می‌شود. به عنوان مثال ۶۰۰، ۲۰۰ ، ۱ ، ۲۴۰۰ (tex 1= 1000m/g)

می‌توان رشته‌ها را خرد کرد (chopped) و برای تولید نمد شیشه (strand mat chopped) استفاده کرد. در این حالت از یک بایندر (binder) برای ثابت نگاه شدن الیاف در کنار هم استفاده می‌کنند. بایندر فوق به هنگام آغشته سازی الیاف با رزین خیس خوردگی (wet-out)

را کنترل می‌کند و بنابراین آرایش اتفاقی الیاف در نمد حفظ می‌شود. انتخاب بایندر با توجه به کاربرد مواد انجام می‌گیرد و دوام یک قطعه کامپوزیتی می‌تواند متاثر از نوع بایندر باشد. نمدهای الیاف پیوسته (mat contruous random) شکل دیگری از الیاف مورد استفاده می‌باشند که در آنها الیاف پیوسته با آرایش اتفاقی نمد درست می‌شود. این شکل از الیاف برای قرار گرفتن در قسمت‌های تیز و کنج قالب مناسبند و در این حالت الیاف آن نمی‌شکنند. همچنین می‌توان از الیاف شیشه با طولهای متفاوت برای کاربرد مستقیم در آمیزه سازی (BMC) استفاده کرد. طول الیاف در نمد (CSM) معمولاً بیشتر از 20mm و بلندتر از الیاف مورد کاربرد در آمیزه سازی است. طول الیاف مورد استفاده در رزینهای گرماسخت نیز بیشتر از گرمانرم‌هاست. انواع پارچه‌ها با بافتهای مختلف نیز از رشته‌های شیشه بافته می‌شود.

## ۲. الیاف کربن :

الیاف کربن توسط شرکت های زیادی تولید می شوند و علی رغم ظرفیت تولید بالا هنوز نسبتاً گران هستند. ساختار و خواص این الیاف به شکل چشمگیری با هم متفاوتند و همیشه الیاف جدید تحت آزمایش هستند. به عنوان مثال دو ماده جدید، الیاف تو خالی و الیاف حلقه شده هستند. دسته اول برای بالا بردن چقرمگی ضربه در پلی مرهای تقویت شده با کربن طراحی شده اند در حالی که دسته دوم قابلیت ازدیاد طول تا چند برابر طول اولیه شان بدون از دست دادن خواص کشسانی شان را دارند.

کربن دو ساختار بلورین کاملاً شناخته شده دارد (الماس و گرافیت)، اما به حالت های نیمه بلورین و شیشه ای نیز یافت می شود. از لحاظ صنعت، الیاف گرافیت مهم ترین شکل ساختار کربن است. ساختار گرافیت شامل لایه های شش ضلعی با پیوندهای محکم اشتراکی است. این لایه ها که صفحات قاعده خوانده می شوند با ترتیب چیدمان ... ABAB روی هم قرار گرفته

اند. اتصال بین لایه ها از نوع ضعیف واندروالس است. جای تعجب نیست که به دلیل تفاوت فاحش پیوندهای درون صفحه ای و بین صفحه ای خواص گرافیت بسیار ناهمسان گرد باشد. ضریب کشسانی نظری در صفحه ی قاعده ۱۰۰۰ گیگا پاسکال و در امتداد جهت عمود به صفحه فقط ۳۵ گیگا پاسکال است. هم راستا شدن صفحات قاعده در امتداد محور رشته، الیاف سخت پایی به دست می آید که به علت وزن مخصوص نسبتاً کم سخت پایی نسبی فوق العاده بالایی دارند.

گرافیت در ۳۷۰۰ درجه سانتیگراد تصعید میشود، اما در هوا در حدود ۵۰۰ درجه سانتیگراد شروع به اکسید شدن می کند؛ البته اگر الیاف کربنی از اکسیژن محافظت شوند، می توان آنها را تا دمای بالا تر از ۲۵۰۰ درجه سانتیگراد به کاربرد. کربن هادی خوب برق است که بر حسب موقعیت ممکن است امتیاز یا عیب آن باشد؛ الیاف کربن را از منابع متنوعی تولید می کنند. خواص مکانیکی بر حسب نوع منبع و شرایط فراوری به شدت تغییر می کند زیرا این عوامل بر روی بی نقص بودن و هم راستایی بلورها تاثیر دارند. سه منبع اصلی وجود دارند، اما همان گونه که خواهیم دید از لحاظ اهمیت یکسان نیستند.

گرم کردن کنترل شده ی الیاف سلولزی یا ریون ها آن ها را به گرافیت تبدیل میکند. فرایند تجزیه پیچیده است ولی عملاً کاهش وزن و انقباض در حین آتش دادن در گستره دمایی ۲۰۰ تا ۴۰۰ درجه سانتیگراد اتفاق می افتد و ماده آلی به کربن تجزیه می شود. پس از این عمل کربنی شدن، یعنی منظم شدن تدریجی ساختار و سپس گرافیتی شدن در دماهای بالاتر انجام می شود. بازده فرایند پایین و فقط ۱۵ تا ۳۰ درصد است و با این که رشته بلورین است ولی هم راستایی الیاف خوب نیست. بنابر این در این مرحله الیاف استحکام و سخت پایی پایینی دارند. سخت پایی آنها فقط در حدود ضریب کشسانی در امتداد جهت عمود بر صفحه ی قاعده بلور گرافیت است. البته کشیدن الیاف تا حدود ۵۰ درصد در دمای بین ۲۷۰۰ تا

۳۰۰۰ از طریق ایجاد هم راستایی ترجیحی، ضریب کشسانی و استحکام را افزایش و تخلخل را کاهش میدهد. استقرار ترجیحی به گونه ایست که صفحات قاعده به موازات محور الیاف قرار می گیرند، اگر چه این هم راستایی خیلی از حالت کامل دور است. این روش تولید رو به افول است زیرا دستیابی به منبع اصلی ریون مرغوب رو به کاهش می باشد و کارایی تولید پایین بوده و مشکلاتی در رابطه با کشیدن در دمای بسیار بالا وجود دارد.

در مقایسه با الیاف ریون یا سلولوزی، رشته هایی که از پلی آکریلونیتریل تهیه می شوند هم راستایی بالایی دارند. از این گذشته، ماده منبع PAN کارایی بالاتر (تا ۵۰ درصد) در تبدیل به کربن دارند. جزییات تولید همه ی انواع الیاف سری است، ولی معلوم شده است که در فرایند تبدیل سه مرحله وجود دارد و ساختار حاصل به آهنگ گرم کردن حساس است.

مرحله ی اول شامل کشیدن و اکسایش است. ابتدا الیاف بین ۵۰۰ تا ۱۳۰۰ درصد کشیده می شوند تا هم راستایی مولکولی شان بهتر شود، سپس همان طور که در معرض کشش هستند بین حدود ۲۰۰ تا ۲۸۰ درجه سانتیگراد در هوا گرم می شوند. این عمل باعث باز آرایشی درون مولکولی و تشکیل یک پلی مر نردبانی شکل می شود، به گونه ای که دیگر زنجیرها در اثر حرارت دیدن واپیچش و خمش پیدا نمی کنند. پس از آن عمل اکسایش است که طی آن در حدود دو سوم مکان های اکسیژن به آهستگی اشغال شده و آب آن خارج می شود؛ این محصول گاهی اوقات اکسی پان خوانده میشود. گرم کردن اکسی پان در نیتروژن یا آرگون در ۹۰۰ تا ۱۲۰۰ درجه سانتیگراد، الیاف کربنی با ضریب کشسانی پایین و استحکام بالا تولید می کند که بلورهای ظریف جهت یافته به موازات محور رشته دارند. البته تخلخل آنها نسبتاً بالا و وزن مخصوص شان در حدود  $1.74 \text{ Mg/m}^3$  است .

گرم کردن در آرگون تا دمای ۲۸۰۰ درجه سانتیگراد موجب گرافیتی شدن می شود و رشته هایی با ضریب کشسانی بالا و وزن مخصوص بیشتر تولید می شود، ضریب کشسانی با

افزایش دمای گرافیتی شدن بالا می رود. در واقع با انتخاب شرایط عملیات حرارتی مناسب می توان خواص را در گستره ی وسیعی تغییر داد، لیکن ترکیب ضریب کشسانی و استحکام بالا دشوار است.

الیاف کربن در سه شکل اساسی عرضه می شوند : ضریب کشسانی بالا(HM)، ضریب کشسانی میانه(IM) و استحکام بالا (HS). تازه ترین نوآوری در زمینه ی الیاف با استحکام بالا، تولید الیاف مشهور به کرنش زیاد است که می توانند پیش از شکست تا ۲ درصد کرنش تحمل کنند.

الیاف کربن در حین تولید مورد عملیات سطحی قرار می گیرند تا چسبندگی شان به زمینه ی پلی مری (گرما نرم یا گرماسخت) بیشتر شود. سطح الیاف با اکسایش شیمیایی زبر (حکاکی) میشود و سپس تا ضخامت مناسب پوشیده میشود تا چسبیدن آن به زمینه ی مورد نظر تسهیل گردد.

قیرهای نفتی و زغال سنگی حاوی مخلوط پیچیده ای از هیدروکربن های حلقوی و خطی آلیفاتیک هستند و بنابر این به خاطر داشتن کربن زیاد، منابع مناسبی برای تولید الیاف کربنی می باشند. قیر تا دمای ورای ۳۵۰ درجه سانتیگراد حرارت داده می شود تا پلی مرهایی با وزن ملکولی حدود ۱۰۰۰ تولید شود. ساختار مولوکول ها به گونه ای است که یک بلور مایع نظم یافته یا فازمزو تشکیل می شود. پلی مرها از درون سوراخ های یک استوانه ی داغ چرخان حدیده کاری می شوند. این فرایند که چرخاندن مذاب خوانده می شود، قیر داغ فازمزو(mesophase) را جهت دهی میکند. پس از اکسایش به منظور ایجاد اتصالات عرضی، و در نتیجه جلوگیری از بهم چسبیدن و ذوب است. درجه ی گرافیتی شدن با عملیات حرارتی تا دماهای ۲۹۰۰ درجه سانتیگراد کنترل میشود. میزان گرافیتی شدن بالا همراه با هم راستایی

خوب صفحات قاعده حاصل می شود و جای تعجب نیست که رشته هایی با ضریب کشسانی و وزن مخصوص زیاد به دست می آیند.

یک ویژگی غیر عادی الیاف کربنی ضریب انبساط خطی بسیار کم یا حتی منفی شان است. ضریب انبساط حرارتی تابع مسیر تولید و در نتیجه میزان گرافیتی شدن و جهت استقرار بلورهاست.

### ۳. الیاف آرامید :

الیاف آرامید که در حدود سالهای ۱۹۷۰ معرفی شد، ترکیب آلی حلقوی از کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن می باشد. دانسیته کم و استحکام کششی بالا در این الیاف، موجب تشکیل یک ساختار چقرمه و مقاوم به ضربه با سفتی حدود نصف الیاف کربن می شود. الیاف آرامید در ابتدا به منظور جایگزینی فولاد در تایرهای رادیال ساخته شدند و بعداً کاربردهای دیگری پیدا کردند. جلیقه ضد گلوله از موفقیت آمیزترین کاربردهای الیاف آرامید می باشد .

چندین نوع از این الیاف در بازار تجارت وجود دارند که نمونه هایی از آن ها عبارتند از کولار (دوپونت)، توارلون (اکزو) و تکنورا (تی جین) که در میان اینها کولار از همه شناخته شده تر است.

این آرامیدها را می توانیم نایلون بنامیم که از حلقه های بنزن اضافی در زنجیره ی پلی مری برای افزایش سخت پایی آن استفاده شده است. نام جایگزین دیگر آن پلی آمید معطر یا پلی فنیلن ترفتلامید می باشد. مولکول سفت آرامید تا حد مشخصی حتی در محلول یا در مذاب در یک راستای معین قرار می گیرد. زنجیره های گسترده آنها تقریباً به موازات محور طولی شان مرتب می شوند و این در حالی است که مراکز این زنجیره ها به طور اتفاقی توزیع شده اند. این ساختار به نام کریستال مایع نماتیک (nematic liquid crystal) شناخته می شود. هم ردیف



شدن مولکولها در جریان تولید الیاف توسط شکل دادن چرخشی و اکستروژن (روزن رانی) و عملیات مکانیکی بعدی صورت میگیرد. فرایند تولید به شرح زیر است: محلولی از آرامید را در یک حلال مناسب مانند اسید سولفوریک در دمای پایین نگه داشته و سپس در دمای بالاتر در یک حمام انعقاد کننده جهت زدودن حلال های باقیمانده حل می نمایند. محصول این فرایند الیاف با استحکام و مدول یانگ پایینی است که مقادیر آنها به ترتیب ۸۵۰ مگا پاسکال و ۵ گیگا پاسکال می باشند.

نهایتاً الیاف کشیده و تحت عملیات کششی سرد قرار می گیرند تا ساختار آنها بیشتر هم ردیف گردد و بدین طریق سلول ها به شکل صفحات موازی هم با پیوندهای کوالانسی قوی در زنجیره های مولکولی به موازات محور الیاف شکل می گیرند اما پیوندهای هیدروژنی ضعیف در جهت عرضی آنان قرار دارند. این صفحات موازی روی هم تا خورده و چیده می شوند تا یک بافت سه بعدی با تقارن شعاعی از کولار ۴۹ به دست آید. کولار مدول پایین، یا کولار ۲۹ به نوعی یک کولار با تغییر ساختار ساده است. ساختار کولار ۲۹ از نظر جهت دار بودن و بی نقص بودن کامل نبوده ولی با انجام عملیات حرارتی مناسب می توان آن را به کولار ۴۹ تبدیل نمود.

الیاف آرامید در دماهای بالا خواص مناسب و خوب برای یک ماده پلی مری دارند، این الیاف دارای درجه حرارت تبدیل شکنندگی ۳۶۰ درجه سانتیگراد بوده و به سختی می سوزند و آنگونه که نایلون ذوب می شود ذوب نخواهند شد افت عملکرد به علت کربوره شدن در دمای حدود ۴۲۵ درجه سانتیگراد برای آنها اتفاق می افتد. اما میتوان از آنها در دمای بالا و زمان های مشخص حتی در ۳۰۰ درجه سانتیگراد در زمان محدود استفاده کرد. الیاف آرامید در نور آفتاب تمایل شدید به تجزیه شدن دارند، ثبات و پایداری ابعادی آنها به علت پایین بودن ضریب انبساط گرمایی خوب است خواص دیگری که در برخی کاربردهای آنها نقش عمده ای دارند عبارتند از رسانای گرمایی و نیز ظرفیت گرمایی بالای آنهاست.

#### ۴. الیاف طبیعی :

الیافی که از منابع طبیعی مانند معادن، حیوانات و گیاهان بدست می‌آیند، در گروه الیاف طبیعی قرار می‌گیرند. یک قرن پیش تولید تقریباً تمام وسایل و بسیاری از محصولات فنی از الیاف طبیعی ساخته می‌شد. پارچه، طناب، کرباس و کاغذ از الیاف طبیعی مانند کتان، شاهدانه، سیسال و کنف ساخته می‌شد.

می‌توان الیاف طبیعی را به سه دسته معدنی، حیوانی و گیاهی تقسیم نمود. الیاف معدنی : الیاف این گروه از سنگهای معدنی بدست می‌آیند. به عنوان نمونه می‌توان به آزبست اشاره نمود. آزبست می‌تواند استحکام و سفتی کامپوزیت را بهبود ببخشد ولی استحکام ضربه را کاهش می‌دهد. علاوه بر این فرآیند آن مشکل است. امروزه استفاده از این الیاف بدلیل ایجاد سرطان ریه در طولانی مدت، محدود و ممنوع شده است.

الیاف حیوانی : الیاف بدست‌آمده از ارگانسیم‌های زنده، الیاف حیوانی نامیده می‌شوند. به عنوان مثال، پشم از گوسفند اهلی بدست آید. الیاف ابریشم را کرم ابریشم می‌سازد. ابریشم بر خلاف تمام الیاف طبیعی دیگر از قبیل پنبه، کتان و پشم، یک ساختار سلولی ندارد و روش ساخت آن، شبیه الیاف مصنوعی می‌باشد. از الیاف حیوانی در ساخت کامپوزیتها استفاده نمی‌شود.

الیاف گیاهی : در بین الیاف طبیعی، الیاف گیاهی بیشترین کاربرد را در کامپوزیتها دارند. بر اساس اینکه از کدام قسمت گیاه گرفته شده‌اند، به سه دسته تقسیم می‌شوند:

الیاف میوه : پنبه (cotton)، نارگیل (coir) و kapok

الیاف پوست یا ساقه : کتان، کنف (jute)، بوته شاهدانه (hemp) و رامی

الیاف برگ : سیسال (sisal)، آناناس

 <p>الیاف نارگیل</p>	 <p>درخت نارگیل</p>
 <p>الیاف شاهدانه</p>	 <p>شاهدانه</p>
 <p>الیاف کنف</p>	 <p>گیاه کنف</p>
 <p>الیاف سیسال</p>	 <p>گیاه سیسال</p>

الیاف طبیعی از قدیم در صنایع مختلف استفاده می‌شده‌اند و پتانسیل کاربرد در صنایع رو به رشد کامپوزیتهای مهندسی را دارا می‌باشند. اگر چه جایگزینی مستقیم الیاف شیشه با الیاف

طبیعی به راحتی امکان پذیر نیست، اما خواصی که این الیاف در مقایسه با شیشه از خود نشان می‌دهند در بسیاری جهات موجب برتری آنها می‌شود:

۱- دارای منابع تجدید شونده

۲- امکان استحصال نامحدود

۳- فواید محیطی ناشی از ایجاد تعادل در تولید و مصرف گاز CO<sub>2</sub>

۴- سبکی

۵- بازیافت بهتر

۶- کاهش فرسایش ابزار

۷- بهبود بازگشت انرژی (recovery Energy Enhanced)

۸- کاهش ناراحتی‌های پوستی و تنفسی

۹- زیست تخریب بودن

اجزاء الیاف طبیعی عبارتند از : سلولز، لیگنین، پکتین، واکس و مواد محلول در آب : سلولز: بخش اصلی تمام الیاف گیاهی می‌باشد. سلولز جامد، یک ساختار میکروکریستالین با نواحی کریستالی و آمورف تشکیل می‌دهد.

لیگنین: یک ترکیب حلقوی بیشتر سه بعدی، با جرم مولکولی بالاست که فقط در مقادیر جزئی می‌تواند هیدرولیز شود. خواص مکانیکی آن به وضوح پایین‌تر از سلولز می‌باشد.

پکتین: نام کلی هتروپلی ساکاریدهاست که اصولاً شامل اسید پلی‌گالاکتورن می‌باشد. این ماده تنها پس از خنثی سازی جزئی با قلیا یا هیدروکسید آمونیم قابل حل در آب می‌باشد.

واکس: ماده‌ای که می‌توان آنرا با ترکیبات آلی استخراج کرد ولی در آب غیر قابل حل است. اصلاح سطح تاثیرمهمی در افزایش خواص کامپوزیت دارد. علاوه بر آن ممکن است حساسیت به رطوبت الیاف را به حداقل برساند و دوام کامپوزیت را بیشتر کند.

توجه همگانی به شرایط محیطی علاقه‌مندی مجددی را در کاربرد الیاف طبیعی ایجاد کرده است. بازیافت و لحاظ شرایط محیطی برای معرفی کامپوزیت‌های جدید به بازار از اهمیت روز افزونی برخوردار است. قوانین محیط زیستی و فشار مصرف کننده، باعث شده است که تولید کنندگان مواد و قطعات، اثرات محصولات خود در محیط زیست را در تمام مراحل کار بسنجند. این نکات باعث شده است در سالهای اخیر کارهای زیادی در ساخت مواد کامپوزیتی بر پایه منابع تجدید پذیر از جمله الیاف طبیعی انجام بگیرد. اخیراً صنعت خودرو سازی به کاربرد کامپوزیت‌های الیاف طبیعی به عنوان یک راه خدمت به محیط زیست و در عین حال رعایت مسایل اقتصادی، توجه جدی داشته است. کاربردهای دیگر نیز در صنایع ساختمان در حال پیدایش هستند. شرایط آب و هوایی، عمر و فرآورش نه تنها بر ساختار الیاف، بلکه بر ترکیبات شیمیایی الیاف اثر می‌گذارد.

باید توجه داشت که بدلیل حضور گروه‌های آبدوست در الیاف، رطوبت تأثیر شدیدی روی کامپوزیت‌های الیاف طبیعی دارد. خشک کردن الیاف به هنگام فرآیند ساخت اهمیت فراوانی دارد چرا که رطوبت روی الیاف به عنوان یک عامل جداساز در فصل مشترک الیاف و رزین عمل می‌نماید. به همین جهت تمام روشهای ساخت در دماهای بالا انجام می‌گیرد. وجود هرگونه رطوبت، باعث کاهش استحکام و سفتی کامپوزیت می‌شود. اغلب الیاف گیاهی، ۱۰ درصد رطوبت اسمی دارند که پس از خشک کردن به ۱ درصد کاهش می‌یابد.

کیفیت فصل مشترک الیاف و رزین نقش مهمی در تعیین مقبولیت الیاف طبیعی به عنوان تقویت کننده مواد کامپوزیتی، دارد. به منظور بهبود چسبندگی الیاف و رزین، روشهای فیزیکی و شیمیایی مختلفی وجود دارد.

## سایر الیاف

در برخی کاربردها ذرات معدنی به عنوان تقویت کننده پلیمرها استفاده می‌شوند. ذرات معدنی به شرط دارا بودن نسبت (aspect) طول به قطر ( $d/l$ ) کافی و چسبندگی مناسب به ماتریس پلیمری، خواص خوبی به پلیمر می‌دهند. این الیاف به راحتی فرآورش می‌شوند و کمتر می‌شکنند و فرسایش کمی در تجهیزات تولید ایجاد می‌کنند. گاهی اوقات طبیعت شیمیایی این مواد می‌تواند ویژگی‌هایی چون مقاومت شعله در پلیمر ایجاد می‌نماید.

علاوه بر محصولات طبیعی مانند ولاستونیت (wolastonite) و آزبست، این الیاف شامل محصولات مصنوعی مانند کربنات کلسیم ته نشین شده و سولفات کلسیم نیز می‌باشد. همچنین گاهی الیاف بر پایه آلومینا و بر (boron) به منظور ایجاد خواص ویژه در کامپوزیت بکار برده می‌شوند. این سیستم‌ها نه تنها استحکام خوبی دارند، بلکه دارای خواص هدایت حرارتی و الکتریکی و مقاومت فرسایش نیز می‌باشند.

در گذشته تنها دو محصول طبیعی، دارای صرفه اقتصادی بود که آزبست و ولاستونیت نامیده می‌شوند. به دلیل شرایط زیست محیطی دیگر از آزبست به عنوان تقویت کننده استفاده نمی‌شود.

ولاستونیت در طبیعت بصورت سوزنی شکل وجود دارد و بیان شده که دارای سمیت کمی است. این ماده پس از استخراج بصورت پودری سفید رنگ با  $l/d$  های مختلف بدست می‌آید. بالاترین نسبت aspect قابل دستیابی در این الیاف ۲۰:۱ می‌باشد. این امر پتانسیل تقویت کنندگی این ماده را کاهش می‌دهد. با این وجود، محدوده‌ای از محصولات با انجام اصلاح سطح به منظور بهبود چسبندگی وجود دارد. علیرغم پایین بودن  $l/d$ ، ولاستونیت می‌تواند تلفیق خوبی از خواص با یک قیمت معقول ایجاد نماید، بویژه وقتی به همراه الیاف شیشه استفاده شود.

تعدادی از مواد معدنی می‌توانند به روش ته نشینی از محلول به صورت ذرات سوزنی شکل در آیند و به عنوان تقویت کننده‌های تجاری استفاده شوند. از جمله این مواد می‌توان به کربنات کلسیم تهیه شده به روش ته نشین، سولفات کلسیم، اکسی سولفات و فسفات منیزیم اشاره نمود. نسبت  $v/d$  این مواد بین ۱:۲۰ تا ۱۰۰/۱ می‌باشد .

### الیاف آلومینا:

در تئوری آلومینا می‌تواند به عنوان یک ماده با استحکام بالا مطرح باشد. پیوندهای چند ظرفیتی اشتراکی قوی این ماده موجب ایجاد کریستال‌های محکم با مدول شصت گیگاپاسکال و مقاومت حرارتی بالا می‌شود. در عمل پلی کریستالینهای آلومینا به عنوان یک سرامیک مهندسی مطرح هستند. افزودن سایر اکسیدها می‌تواند به فرآورش، تراکم و کنترل اندازه ذرات کمک کند. به دو دلیل بسط الیاف پیوسته آلومینا به کندی صورت می‌گیرد: اول آنکه دانسیته آن نسبتاً بالا خواهد بود و برای کاربردهایی که خواص ویژه اهمیت دارند، جذاب نیست. و دوم اینکه آلومینا، مانند شیشه دارای خواص ذوب و ریسندگی مذاب نیست و اصولاً تهیه الیاف عاری از حباب (freevoid) بسیار مشکل است.

### الیاف بُر

بُر یک ماده مناسب برای ساخت الیاف با کارایی بالاست. اتمهای سبک بُر چند ظرفیتی هستند و پیوندهای با ظرفیت بالا ایجاد می‌نمایند و درعین حال دانسیته پایینی دارند. تولید تجاری الیاف بُر، انحصاراً توسط روش deposition بخار شیمیایی (Cvd = vapour chemical) انجام می‌گیرد.

بُر شکل deposite شده فاز بخار روی رشته نازکی از یک فلز نسوز (معمولاً تنگستن) به قطر 12 mm است. رشته تنگستن به عنوان بستر deposition عمل می‌نماید. هم‌هالید بُر و هم

هیدرید بُر برای انتقال بُر به بستر رشته‌ای استفاده می‌شوند. در یک سیستم‌هالیدی، هیدروژن برای احیاء هالید به بُر استفاده می‌شود. در سیستم هیدریدی، از تخریب حرارتی در فشار پایین استفاده می‌شود.

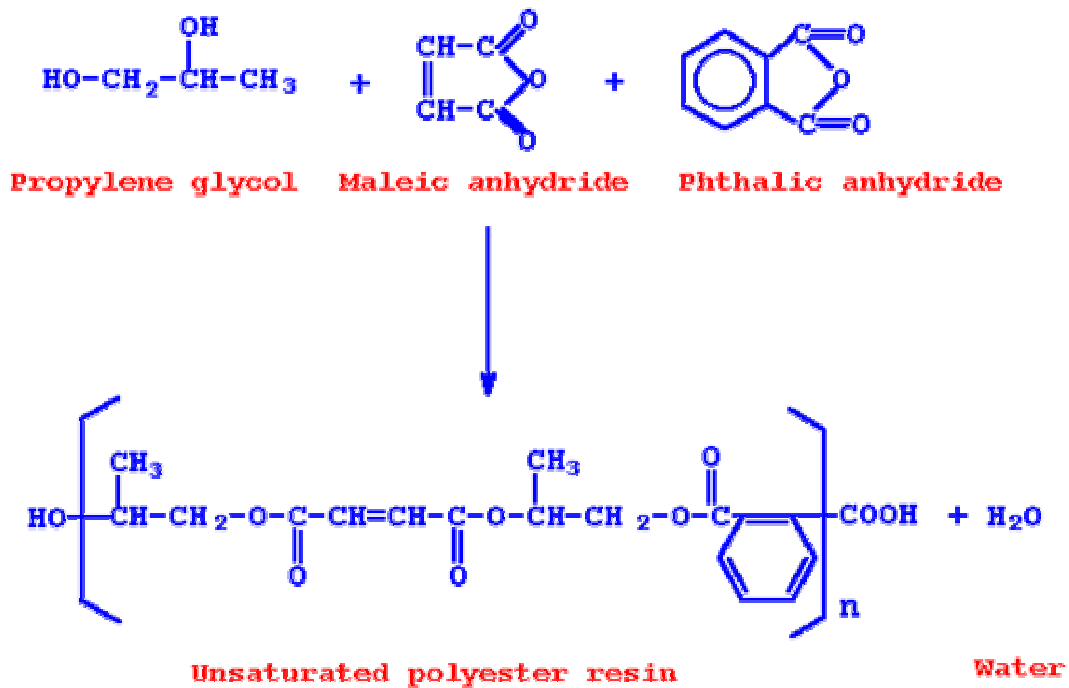
قطر رشته‌های بر صد میکرومتر می‌باشد و استحکام کششی آنها می‌تواند در محدوده دو تا چهار گیگاپاسکال و مدول آنها در حدود سیصد و هشتاد مگاپاسکال باشد. در مجموع می‌توان گفت این الیاف خواص بسیار جالبی دارند ولی گران قیمتند.

## انواع رزین های پلی مری :

### ۱. رزین پلی‌استر :

رزینهای پلی‌استر غیر اشباع بطور گسترده‌ای در سراسر دنیا استفاده میشوند. زنجیر اصلی پلیمری این رزین دارای اتصالات استری میباشد که از واکنش تراکمی یک ترکیب الکلی چند عاملی و یک اسید چند عاملی مانند گلیکول و اسید فوماریک تهیه میشود. در مثال اخیر بدلیل استفاده از یک اسید غیر اشباع، پیوندهای دوگانه در فواصل منظمی در زنجیر بوجود می‌آیند. این پیوندهای دوگانه، سایتهای دارای امکان شبکه‌ای شدن توسط استایرن هستند و میتوانند موجب سخت شدن رزین و پخت شدن آن شوند. بنابراین با طراحی فرمول و کنترل اسیدهای اشباع و غیر اشباع، کاتالیستها، دما و زمان واکنش، مجموعه کاملی از رزینها را میتوان تولید نمود که برای کاربردهای مختلف مناسب باشند.





پلی استر غیر اشباع با استایرن مخلوط می‌شود و میتواند از طریق پیوندهای دوگانه موجود در هر دو جزء، شبکه‌ای شود. معمولاً رزین به هنگام مصرف با استایرن مخلوط بوده و برای رسیدن به خواص مختلف دارای اجزای ذیل می‌تواند باشد:

- سیستم پخت؛ به منظور شروع و تسریع واکنش شبکه‌های شدن، در دمای محیط یا دمای بالا

- عوامل کنترل جریان پذیری؛ به منظور کنترل جریان رزین و جلوگیری از شرّه کردن رزین در لایه گذاری سطوح عمودی و ریخته گری رزین

- جاذب UV به منظور افزایش مقاومت در برابر نور خورشید

- فیلر به منظور کاهش جمع شدگی و قیمت و ایجاد خواصی چون مقاومت شعله و آتش

- پیگمنت؛ به منظور رنگ دادن به قطعه و زیبایی آن

- تغلیظ کننده‌ها؛ به منظور تغلیظ کردن فرمولاسیونهای مورد استفاده در SMC و BMC

- عوامل آغشته سازی؛ به منظور بهبود آغشته سازی فیلرها و الیاف با رزین به منظور حصول چسبندگی مناسب

- رها ساز حباب؛ به منظور سهولت در خروج حباب از رزین و کاهش حفره در محصول نهایی

- رها سازی قالب؛ به منظور تسهیل جدا شدن قطعه از قالب و جلوگیری از تابیدگی و صدمه به سطح قطعه رزینهای پلی استر در فرایندهای مختلفی از قبیل لایه گذاری دستی، پاشش رزین، RTM، ریخته گری، پلترژن، SMC و BMC قابل استفاده‌اند.

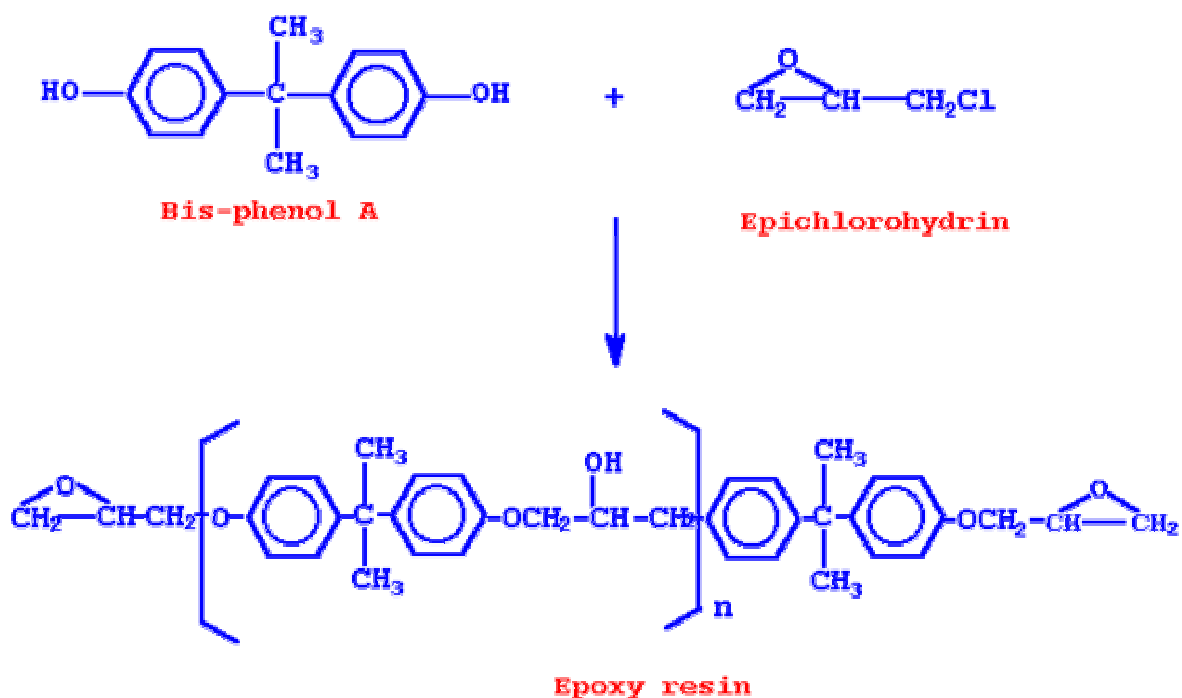
کامپوزتهای پلی استر-شیشه به لحاظ حجم مصرف، بیشترین اهمیت را دارا هستند و یافتن نمونه هایی از این مواد در محل کار و زندگی ما بسیار آسان است. کامپوزیتهای پلی استری تا دمای حدود ۲۵۰ درجه سانتیگراد مقاومند ولی مداومت حضور در این دما و دماهای بالاتر موجب افت خواص آن میشود. همچنین بعد از پخت، حدود ۵ تا ۸٪ حجمی جمع شدگی (Shrinkage) دارند. در مورد کاربرد الیاف شیشه به همراه رزین پلی استر باید از ژل کوت مناسب استفاده کرد تا از نفوذ رطوبت به فصل مشترک الیاف و رزین جلوگیری شود. به دلیل طبیعت قطبی ساختار پلیمری، کاربرد آنها در نزدیکی وسایل الکتریکی با فرکانس بالا محدودیت دارد.

## ۲. رزین اپوکسی :

رزینهای اپوکسی به عنوان رزینهای اپوکسید نیز شناخته میشوند. ویژگی شناسه این رزینها دارا بودن بیش از یک گروه epoxy-2 و ۱ در ساختار مولکولی است. این گروه ممکن است در بدنه زنجیر باشد ولی معمولاً در انتها قرار دارد

در شرایط مناسب واکنش، گروه اپوکسی میتواند با اسیدها، ایندرید اسیدها، آمینها و الکل واکنش تراکمی به همراه جابجایی هیدروژن به گروه اتیلن اکسید بدهد. این واکنشها امکان افزایش طول زنجیر یا شبکه ای شدن را بدون آزاد کردن مولکولهای کوچک مانند آب فراهم میکند. بنابراین محصولات اپوکسی در مقایسه با اکثر رزینهای گرما سخت، جمع شدگی کمتری در اثر پخت نشان میدهند.

باید متذکر شد که محدوده وسیعی از رزینهای اپوکسی و محصولات شبکه ای شده متنوعی وجود دارد. ساختار شیمیایی رزینهای اپوکسی شامل دو بخش اپوکسی و غیر اپوکسی میباشد. بخش غیر اپوکسی ممکن است آلیفاتیک، سیلکوالیفاتیک و یا هیدروکربن شدیداً حلقوی باشد. در عمل محصول واکنش بیس-فنل A و اپی کلروهیدرین اغلب رزینهای اپوکسی متداول را تشکیل میدهند. این محصولات ۸۰ تا ۹۰٪ سهم بازار را به خود اختصاص داده اند.



قبلا رزین اپوکسی تقریباً تنها به عنوان پوشش سطح استفاده میشد. قبل از جنگ جهانی دوم، بالا بودن هزینه های تولید بیس فنل A و اپی کلروهیدرین مانع از تجاری شدن کاربرد

رزین اپوکسی شده بود. تلاشهای بعدی و ابداع روشهای تولید جدید، موجب پیدایش مقبولیت اقتصادی این رزینها شد. در حال حاضر نیمی از رزینهای تولید شده در کاربردهای روکش سطح استفاده میشوند. باقیمانده در صنایع الکتریکی و الکترونیک، هوا فضا و ساختمان و سایر کاربردها، استفاده میشوند. بر حسب تناژ، مصرف اپوکسی حدود یک دهم پلی استر میباشد. اپوکسی گروههای عاملی فعال زیادی دارد و میتواند در حضور عوامل پخت و هاردنرها، یک ساختار شبکه ای را تشکیل دهد. خواص محصولات پخت شده اپوکسی بستگی دارد به:

-نوع اپوکسی

-نوع و مقدار هاردنر

-میزان شبکه ای شدن

-طبیعت و حجم مواد افزودنی

در بازار عوامل پخت متنوعی با ویژگیهای طول عمر، انعطاف، پخت سریع و سمیت کم وجود دارند. ساختار مولکولی و خواص رزین پخت شده، بستگی به طبیعت سیستم پخت دارد. اگر چه سیستمهای پخت مختلفی وجود دارد، ولی میتوان آنها را به دو گروه آمینها و انیدریدها تقسیم کرد.

رزینهای اپوکسی و عوامل پخت تنها اجزاء یک فرمولاسیون نیستند. برای برخی کاربردها، ممکن است اپوکسی اصلاح نشده دارای خواص نامطلوبی از قبیل ویسکوزیته بالا، گران قیمت بودن و مقاومت ضربه پایین در برخی کاربردهای ویژه باشد. بنابراین باید در اغلب موارد توسط موادی چون رقیق کننده، چقرمه کننده، فیلر و تقویت کننده همراه شود. انتخاب صحیح رزین، هاردنر و افزودنیها اجازه میدهد که خواص مورد نظر تامین شود. این تنوع عامل عمده رشد پایه اپوکسیها در مدتهای طولانی است.

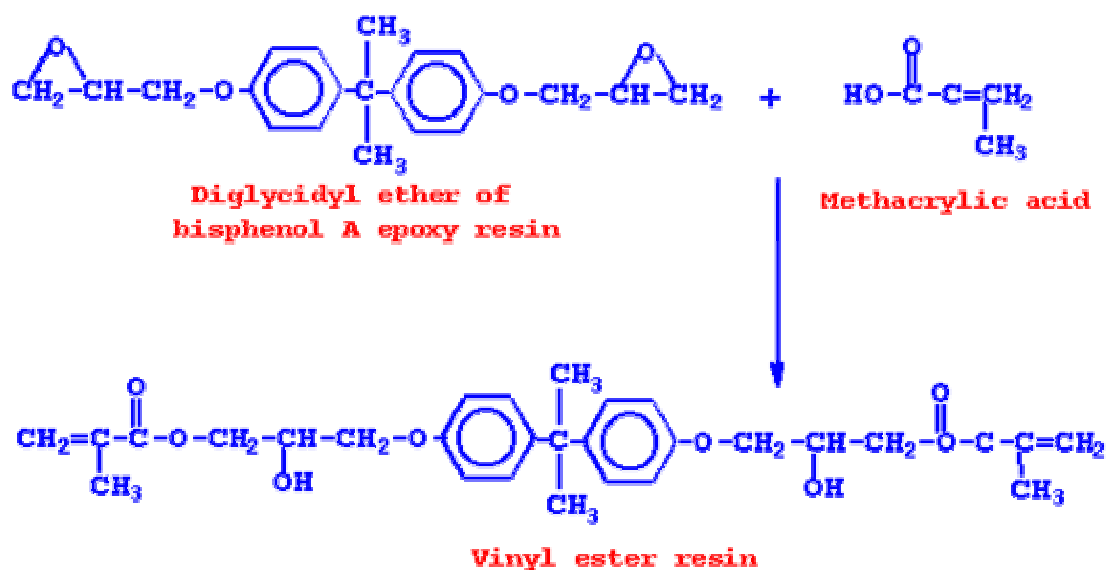
علاوه بر این ساختار متنوع، اپوکسیها دارای ویژگیهای ذیل نیز هستند:

- مقاومت شیمیایی عالی (بوئزه در محیطهای قلیایی)
  - چسبندگی خوب به مجموعه ای از بسترهای مختلف
  - استحکام کششی، فشاری و خمشی بسیار بالا
  - پایین بودن جمع شدگی پخت
  - پایداری ابعادی
  - عایق عالی الکتریسیته
  - دوام بالا در پیری و شرایط سخت محیطی
  - قابلیت پخت در دماهای مختلف
  - مقاومت خستگی ممتاز
  - بی بو و بی مزه
- رزینهای اپوکسی در کاربردهای مختلفی از قبیل پوشش سطح، چسب، روکش دهی، ابزار سازی و کامپوزیتها، استفاده میشوند.
- چند لایه های رزین اپوکسی از اهمیت فوق العادهای در صنایع هواپیماسازی برخوردارند. بسیاری از قطعات ساختاری از جنس الیاف کربن و رزین اپوکسی جایگزین آلیاژهای فلزی مرسوم شده و نتایج مطلوبی نیز داشته اند. همچنین از این رزین به همراه الیاف آرامید، در ساخت موتور راکت و کپسولهای تحت فشار به روش رشته پیچی استفاده میشود
- علاوه بر آن رزینهای اپوکسی بطور وسیعی به همراه الیاف و ساختارهای لانه زنبوری برای ساخت ملخ هلی کوپتر استفاده میشود. رزینهای اپوکسی تقویت شده با الیاف کربن و آرامید در ساخت قایقهایی که در آنها ضمن حفظ وزن، استفاده بیشتر از فضا در همان استحکام مورد نظر است، بجای پلی استر- شیشه استفاده می شوند. همچنین کامپوزیتهای آرامید - اپوکسی برای جایگزین فولاد در کلاه خودهای جنگی استفاده میشوند.

### ۳. رزین وینیل استر :

وینیل استرها محصول واکنش رزینهای اپوکسی با اسیدهای غیر اشباع اتیلنی میباشند بجز حالات خاص، معمولا رزینهای وینیل استر دارای انتهای غیر اشباع میباشند. این انتها میتواند واکنش شبکه ای شدن را انجام دهد و نیز میتواند پلیمریزاسیون زنجیرهای وینیل استر را انجام دهد و یا اینکه به همراه استایرن کوپلیمر شود.

اکثر وینیل استرهای مرسوم با استریفیکاسیون یک رزین دی اپوکسید با یک اسید مونوکرپوکسیلیک غیر اشباع، ساخته میشوند. میتوان آنها را به تنهایی با واکنش رادیکال آزاد پخت نمود و یا در مونومری مانند استایرن حل نمود و رزین مایع بدست آورد. در این صورت، وینیل استر را میتوان مانند رزین پلی استر استفاده نمود .



رزینهای وینیل استر خواص چقرمگی و مقاومت شیمیایی بسیار بهتری نسبت به رزینهای پلی استر دارند. زنجیر اصلی اپوکسی سازنده وینیل استر، موجب پیدایش چقرمگی و ازدیاد طول کششی بالاتر میشود. جرم مولکولی رزینهای وینیل استر به انتخاب نوع اپوکسی بکار رفته بستگی دارد. به این دلیل، استحکام کششی، ازدیاد طول، نقطه نرمی و واکنش پذیری رزین

نهایی توسط جرم مولکولی و ساختار اولیه تعیین میشود. این موضوع، این امکان را بوجود میآورد که برای کاربردهای مختلف خواص مختلف طراحی شود.

رزینهای وینیل استر در مقایسه با پلی استرهای غیر اشباع مقاومت شیمیایی خوبی دارند. بخشی از این ویژگی مربوط به عدم حضور پیوندهای استری در زنجیره اپوکسی میباشد. اتصالات اجزاء پلیمر، توسط پیوندهای فنیل استری انجام میگردد. این اتصالات در مقایسه با اتصالات استری در برابر اکثر محیطهای شیمیایی بویژه در شرایط قلیایی شدید مقاومترند. اتصال استری تنها در انتهای زنجیر وینیل استر وجود دارد. این امر حملات عوامل شیمیایی را به حداقل می‌رساند.

#### ۴. رزین فنولیک :

رزینهای فنولیک از واکنش تراکمی فنلها و فرم آلدهید تهیه میشوند. مکانیزم واکنش بین فنل و فرم آلدهید هنوز بطور کامل شناخته شده نیست. با این وجود این مشخص است که واکنش شروع توسط فعال شدن حلقه بنزنی با گروههای هیدروکسیل مانند متیلول صورت میگردد. در واکنش فنل-فرم آلدهید سه مرحله اصلی وجود دارد:

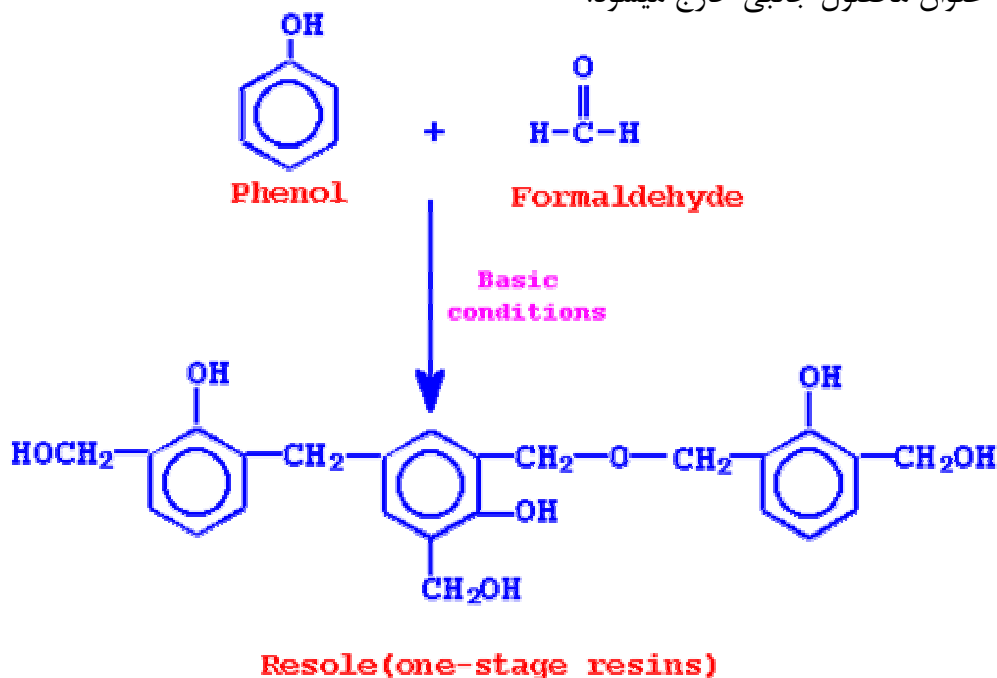
مرحله A : اغلب محصولات اولیه تراکم، الکلها هستند. رزین در این مرحله، گرمانرم است و در حلالهای غیر آلی (معدنی) حل میشود.

مرحله B : پیشرفت بیشتر واکنش تراکمی و شبکه ای شدن جزئی به همراه افزایش جرم مولکولی و ویسکوزیته و کاهش انحلال. در این حالت رزین پخت کامل نشده و گرمانرم و ذوب میشود ولی به هنگام سرد شدن، سخت و شکننده میشود.

مرحله C : میزان پلیمریزاسیون و شبکه ای شدن بسیار زیاد است. رزین غیر قابل ذوب و انحلال میباشد.

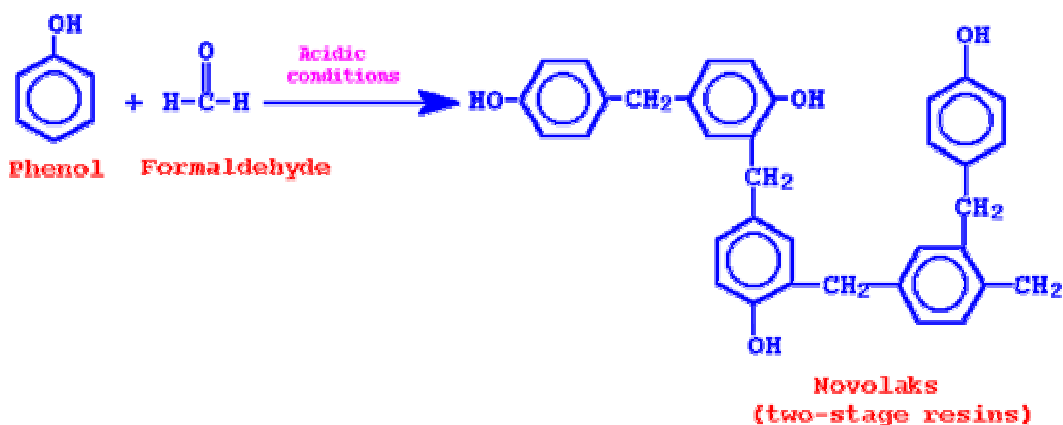
این واکنش دو نوع رزین فنولیک تولید میکند که رزول و نوالاک نامیده میشوند. رزینهای رزول در حضور یک کاتالیست قلیایی مانند آمونیاک، کربنات سدیم یا هیدروکسید سدیم تولید میشوند. واکنش پخت محصول توسط گرما دادن در یک قالب با دمای بالاتر از نقطه ژل قابل انجام است. رزینهای رزول دارای گروههای فعال متیلول و هیدروکسیل هستند.

در دمای بالاتر، رزولها بدون افزودن عامل پخت، مولکولهای بزرگتر و با شبکه های متیلنی تشکیل میدهند. در این حالت واکنش فنل-آلدهید یک نوع واکنش تراکمی است چون آب به عنوان محصول جانبی خارج میشود.



پلیمریزاسیون فنل-فرم آلدهید به رزین نوالاک با حضور یک کاتالیست اسیدی انجام میشود. اسید اکسالییک و اسید سولفوریک دو کاتالیست مرسوم در این واکنش هستند. معمول است که نسبت فنل به فرم آلدهید ۱ به ۸/۰ باشد، محصول مذاب حاصل سرد میشود و به تدریج شیشه ای میگردد. این ماده شیشه ای به دقت خرد شده، پودر حاصل با کاتالیست پخت هگزامتیلن تترامین (HMTA)، فیلر و تقویت کننده مخلوط میگردد تا یک ترکیب قالبگیری بدست آید.





رزینهای فنولیک معمولا کدر هستند و رنگ آنها از کهربایی (amber) کم رنگ و قهوه ای تیره تا سیاه تغییر میکند. رنگ تیره رزینهای فنولیک کاربرد آنها را محدود میکند. رزینهای فنولیک در اشکال پولک، فیلم مایع و پودر موجودند.

رزینهای فنولیک جزء رزینهای با کاربرد عمومی محسوب میشوند ولی میتوان آنها را برای سازه های مهندسی آمیزه سازی نمود. فنولیکها دومین رتبه را در رزینهای گرما سخت پر مصرف دارا هستند.

رزینهای فنولیک بدون فیلرها شکننده هستند و کاربرد فیلرها و سایر افزودنیها به منظور ایجاد خواص مطلوب در آنها عادی است. رزینهای فنولیک بدلیل تفاوتهای فیزیکی و شیمیایی اجزاء خواص متنوعی را در بر میگیرند. برخی از انواع رزینهای فنولیک عبارتند از:

- گرید کاربرد عمومی (پر شده با خرده چوب)
- گرید Non Bleeding رزول مایع، پر شده با شیشه
- گرید مقاوم در برابر دما (پر شده با میکا و مواد معدنی)
- گرید مقاوم در ضربه (پر شده با سلولز، لاستیک، شیشه و الیاف)
- گرید ویژه یا الکتریکی (پر شده با میکا و شیشه)

رزینهای قالبگیری فنولیک از نوالاک ساخته میشوند اگر چه رزول نیز در برخی موارد بکار

میرود. خواص رزینهای قالبگیری فنولیک عبارتند از:

- سهولت قالبگیری
- پایداری ابعادی بسیار خوب و دقیق
- مقاومت در برابر خزش
- مقاومت بالا در برابر تغییر شکل
- مقاومت حرارتی خوب
- مقاومت الکتریکی خوب
- مقاومت شیمیایی خوب
- مقاومت در برابر شرایط آب و هوایی خوب
- جذب آب پایین
- کیفیت مناسب در ماشینکاری

کاربردهای مرسوم از این مواد عبارتند از: سازه های عایق برای ولتاژبالا، چرخنده ها،

water lubricater bearing، مغزی میز دکوری.

از دیگر کاربردهای رزینهای فنولیک، ساخت فوم است. البته فوم فنولیک در مقایسه با فوم

پلی پورتان و پلی استایرن، گرانتر است ولی بدلیل خود خاموش کن بودن و سمیت پایین

گازهای حاصل از سوختن، خواص برتری دارد.

دسته دیگری از رزینها با نام آمینو رزین نیز میتوانند همراه رزینهای فنولیک دسته بندی

شوند. این رزینها کم مصرفند. رنگ سفید آنها باعث طرح امکان جایگزینی بجای فنولیکها شد.

رزینهای فنولیک بدلیل تیرگی رنگ، فقط در ساخت قطعات تیره کاربرد دارند.

رزینهای آمینو، گرما سختهایی هستند که از واکنش گروه آمینو یک ماده با فرم آلدهید ساخته میشوند. دو آمینوی معروف و مرسوم اوره و ملامین و رزینهای حاصل اوره-فرم آلدهید و ملامین- فرم آلدهید میباشند.

در مقایسه با فنولیکها رزینهای اوره- فرم آلدهید ارزاترند و رنگ آنها روشنتر است. همچنین مقاومت آنها در برابر ترک خوردگی الکتریکی بیشتر است ولی مقاومت حرارتی کمتری دارند. محدوده کاربرد فیلرها معمولا محدود به فیلرهای سفید کننده برای پودر چوب و الیاف خرد سلولز و نیز امکان کاربرد تقویت کنندههای معدنی یا لیفی است.

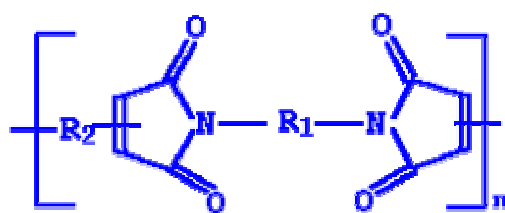
رزینهای ملامین فرم آلدهید در مقایسه با فنولیکها و اوره-فرم آلدهید عملکرد بهتری دارند ولی گرانترند. ویژگیهای مطلوب آنها عبارتند از: جذب آب پایین، مقاومت حرارتی و لکه پذیری، سختی و عایق الکتریکی.

## سایر رزینها

### پلی ایمیدها :

صنعت هوافضا پس از جنگ جهانی دوم رشد سریعی داشت. و موجب افزایش تقاضا برای کامپوزیتهای مهندسی در تکنولوژیهای جدید شد. فلزات موسوم و کامپوزیتهای معمول در آن زمان نمی توانستند نیازهای فنی جدید را تامین نمایند.

آنها به مواد جدیدی احتیاج داشتند که سبک باشند، پایداری حرارتی و اکسیداسیونی خوبی داشته باشند و خواص مکانیکی خوبی داشته باشند. تا آن زمان پلیمرهای جدیدی با خواص عالی حرارتی معرفی شده بودند ولی تنها عده ای از آنها موفقیت تجاری داشتند. علت این امر مشکلات فنی ساخت و قیمت بالای آنها بود.



### Polyimide

اولین دسته پلی ایمیدهای تجاری اوایل سالهای دهه ۶۰ معرفی شد. تداوم موفقیت این پلیمرها حاصل از فراوانی و ارزانی مواد اولیه آنها و امکان ساخت و طراحی پلیمرهایی با خواص مورد نظر از آنها بود.

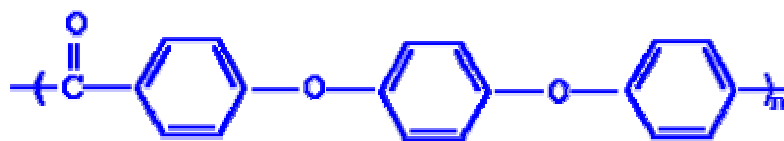
پلی ایمیدها از گروهی از مونومرهای دی ایندریدی و دی آمینی تهیه میشوند و مشخصه آنها واحدهای تکراری ایمید در زنجیر مولکول است. این ساختار موجب پایداری حرارتی و اکسیداسیونی آنها میشود. پایداری بالای اکسیداسیون حرارتی توسط مونومرهای با ساختار حلقوی، قابل دستیابی است. پلی ایمیدها معمولاً از طریق تبدیل یک اسید آمیک به یک ساختار ایمیدی شده با واکنش تراکمی، فرآیند میشوند و این امر فرآیند آنها را مشکل میکند. استفاده از آنها به عنوان ترکیبات قالبگیری دشوار است. برای ساخت سازه های کامپوزیتی، فشار بسیار بالا و کنترل دقیق فرآیند پس-پخت برای خروج محصولات جانبی حاصل از پلیمریزاسیون تراکمی ضروری است.

به منظور کاهش این مشکل الیگومرهای زنجیر کوتاه قابل ذوب و حل پلی ایمید ساخته و معرفی شدند. آنها با اعمال حرارت، پلیمریزاسیون را از طریق گروههای انتهایی انجام میدهند. این پلیمرهای قابل پخت از طریق واکنش اضافی، مسایل ناشی از خروج محصول جانبی را حل کردند. برخی از انواع پلی ایمیدهای گرما سخت به موفقیتهای تجاری دست یافته اند. اگرچه پلی ایمیدها به عنوان رزینهای گرما سخت دسته بندی میشوند (بدلیل شرایط خاص

فرآیند و دمای ذوب بالای آنها)، یک دسته از پلی ایمیدها در گروه مواد گرمانرم قرار میگیرند. پلی ایمیدهای گرمانرم با روشهای مشابه سایر گرمانرمها، شکل داده میشوند، به دلیل آنکه پلی ایمیدهای ترموپلاستیک شبکه نمیشوند، میتوان آنها را در حلالهای منتخب حل کرد.

### : PEEK

کامپوزیتهای گرما سخت تقویت شده با الیاف معمول، استحکام و سفتی بالایی از خود نشان میدهند ولی رفتار شکننده ای دارند. این رزینها امکان جذب مقادیر بالای انرژی را بدون تخریب و صدمه و کاهش استحکام ندارند. حتی ضربه های با سرعت پایین میتواند کاهش شدیدی در استحکام فشاری این مواد ایجاد نماید. اخیرا کامپوزیتهای با ماتریس گرمانرم توسعه یافتهاند. شناخته شده ترین آنها کامپوزیتهای الیاف کربن و رزین پلی اتر اتر کتون ( PEEK ) میباشد .



### Poly ether ether ketone (PEEK)

PEEK یک پلیمر حلقوی است و  $T_g$  آن  $143^{\circ}\text{C}$  و نقطه ذوب آن  $334^{\circ}\text{C}$  میباشد. یک پلیمر نیمه کریستالی است و در شرایط عادی فرآیند به حداکثر درجه کریستالینیتی  $50\%$  میرسد. با این وجود معمولا میزان کریستالینیتی محصول پایین است و به حدود  $30\%$  میرسد. در دمای اتاق و سرعت پایین کرنش، PEEK قادر به تغییر شکل پلاستیک و رسیدن به کرنش شکست تا  $100\%$  میباشد. کامپوزیتهای بر پایه PEEK با فرآیند قالبگیری فشاری ساخته میشوند.

پیش آغشته PEEK در چهار چوب قالب به صورت توده قرار میگیرد و تحت فشار در دمای  $380^{\circ}\text{C}$  قالبگیری میشود. سایر روشها مانند قالبگیری اتوکلاو، فشاری و شکل دهی دیافراگمی

نیز قابل استفاده است. محصولات حاصل کیفیت بسیار خوبی دارند و دارای حداقل حباب و سطح بسیار خوب نهایی میباشند.

### رزینهای طبیعی

بدلیل نگرانیهای زیست محیطی، و امکان پایان ذخایر نفتی ساخت کامپوزیتهای با پایه رزینهای طبیعی از منابع قابل تجدید اهمیت یافته است. کم کردن وابستگی صنایع کامپوزیتهای پلیمری به نفت، با کاربری رزینهای طبیعی امکان پذیر است.

دانشمندان علاقه زیادی به تحقیق و توسعه پلیمرهای حاصل از منابع قابل تجدید کشاورزی به جای هیدروکربنها دارند. آنها تلاشهایی برای استفاده های روغن سویا (soybean) برای تولید کامپوزیتهای زیست تخریب پذیر، ارزان و سبک، انجام داده اند.

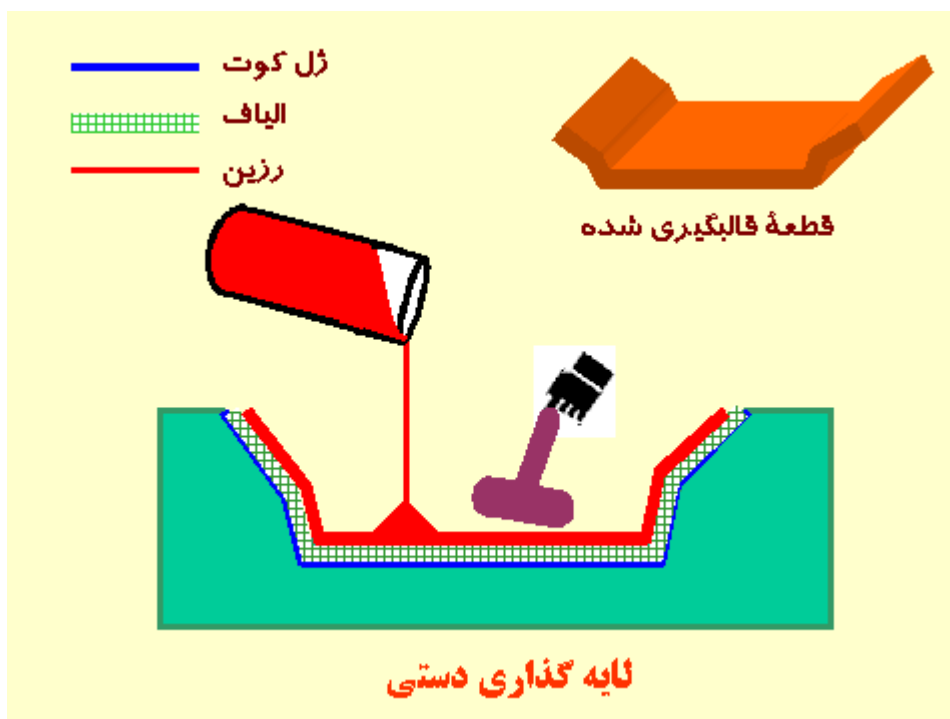
اخیرا روشهایی برای ایجاد سایتهای فعال روی مولکولها و امکان ایجاد شبکه متراکم ابداع شده است. افزودن گروههای عاملی مختلف به مولکول میتواند شکل واکنشهای شیمیایی را تغییر دهد. خواص رزینهای بر پایه روغن سویا میتواند توسط دستکاری های ژنتیکی در حال انجام توسط شرکتهایی مانند DUPONT و MONSANTO تغییر یابد.

دانشمندان آمریکایی قطعه ای با ابعاد یک درب از مواد جدید ساختند. مغزی فومی این قطعه از دو طرف توسط کامپوزیت روغن سویا-الیاف شیشه روکش شده بود و با ابعاد ۳ × ۸ فوت تنها ۲۵ پوند وزن داشت. امروزه با کاربرد الیاف کنف، کتان، سیسال و سایر الیاف طبیعی با رزینهای طبیعی، امکان ساخت کامپوزیتهای کاملا زیست تخریب پذیر وجود دارد و قطعات حاصل در برخی قسمتهای داخلی خودروها بکار میروند.

## انواع فرایندهای تولید کامپوزیت ها :

### ۱. لایه گذاری دستی یا hand lay up

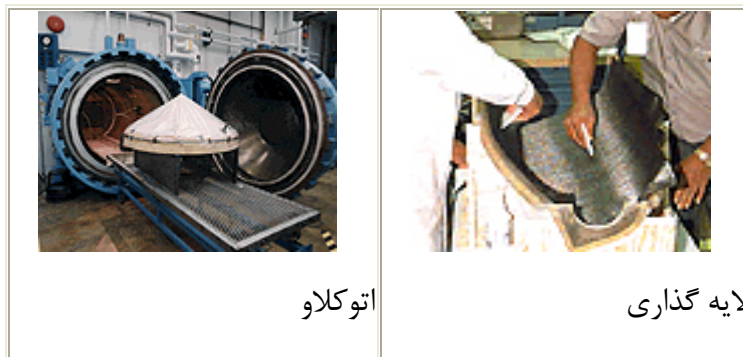
در این روش، ابتدا رها ساز روی سطح قالب اسپری می‌شود تا جدا کردن قطعه ساخته شده به سهولت انجام بگیرد. سپس ژل کوت روی آن اعمال می‌شود تا سطح قطعه از نظر کیفیت و ظاهر، سطح مطلوبی باشد. آنگاه الیاف رو یا درون قالب قرار می‌گیرند و رزین با دست روی آنها ریخته شده، توسط قلم و یا غلطک آغشته سازی کامل می‌شود. همچنین این امکان وجود دارد که الیاف ابتدا به رزین آغشته شود و بعد لایه گذاری انجام گیرد. حبابهای هوای گیر کرده در قطعه با حرکت قلم یا غلطک و فشار دادن الیاف خارج می‌شوند. لایه گذاری و آغشته سازی تا رسیدن به ضخامت مورد نظر ادامه می‌یابد. قطعه معمولاً در فشار و دمای محیط پخت می‌شود. با کاتالیزور و شتاب دهنده زمان پخت را می‌توان تنظیم نمود .



بیشترین رزینهای مورد استفاده، پلی استر و اپوکسی می‌باشد. پلی استر بدلیل قیمت ارزان، در دسترس بودن و سهولت کار، رزین مطلوبی محسوب می‌شود. همچنین پلی استر به راحتی با رهاسازهای استاندارد، از قالب جدا می‌شود. به منظور کاهش جمع شدگی قطعه که منجر به تابیدگی و موجدار شدن سطح می‌شود، از فیلرهایی مانند تالک و کربنات کلسیم استفاده می‌کنند.

اپوکسی‌ها گران قیمتند ولی خواص بهتری دارند. رهاسازهای قالب برای فرمولاسیون ضروری است و در غیر اینصورت قطعه به قالب می‌چسبد و منجر به مشکلات جداکردن قطعه از قالب، تابیدگی، صدمه به قطعه و حتی قالب می‌شود.

در فرمولاسیون هر دو رزین می‌توان افزودنی‌های ضد شعله یا خود خاموش کن را وارد کرد. اپوکسی بیشتر به خاطر پایداری ابعادی و استحکام بالا استفاده می‌شود در حالیکه پلی استر در حجمهای بالا و در کاربردهای معمولی استفاده می‌شود.



الیاف شیشه متداولترین تقویت کننده در کامپوزیتهای ساخته شده به روش لایه گذاری دستی می‌باشند. این الیاف از رشته‌های نازکی که با سیلان اصلاح شده‌اند، تشکیل شده‌اند. سیلان چسبندگی رزین به الیاف را بهبود می‌بخشد.



در این فرآیند انواع الیاف از قبیل پارچه، نمد، الیاف کوتاه و رشته‌ای استفاده می‌شود و شکل الیاف خیلی نقش بحرانی در این فرآیند ندارد. ولی البته الیاف پارچه‌ای و نمد بیشتر استفاده می‌شود.

لایه گذاری دستی در حدود سالهای ۱۹۴۰ ابداع شد و مواد و روشها تفاوت‌های چندانی از آن وقت تا کنون نکرده‌اند، لایه گذاری دستی هنوز وابسته به مهارت کارگر می‌باشد. این فرآیند در ساخت کشتی با موفقیت بکار گرفته شده است. سایر قطعات ساخته شده به این روش عبارتند از گنبد‌ها (radomes)، کانالهای آب، استخر، تانکر، میز و صندلی، تجهیزات محیط‌های خورنده، قطعات خودرو، اطاقک و خانه‌های پیش ساخته، صفحات صاف و موجدار، نمونه سازی و قالب های کامپوزیتی.

مهمترین امتیازات سیستم‌های پلی استر یا اپوکسی در روش لایه گذاری دستی عبارتند از: سهولت ساخت، ارزانی ابزار کار، رنگ آمیزی‌های مختلف، خواص مناسب برای کاربردهای مورد نظر، امکان ساخت قطعات بزرگ.

یک فرآیند ساده لایه گذاری دستی، روی یک قالب نر یا درون قالب ماده امکان پذیر است. انتخاب قالب بستگی دارد به این دارد که کدام طرف قطعه از نظر ظاهری دارای اهمیت است. اگر سطح بیرونی مهم باشد از قالب ماده استفاده می‌شود و اگر سطح داخلی اهمیت داشته باشد از قالب نر.

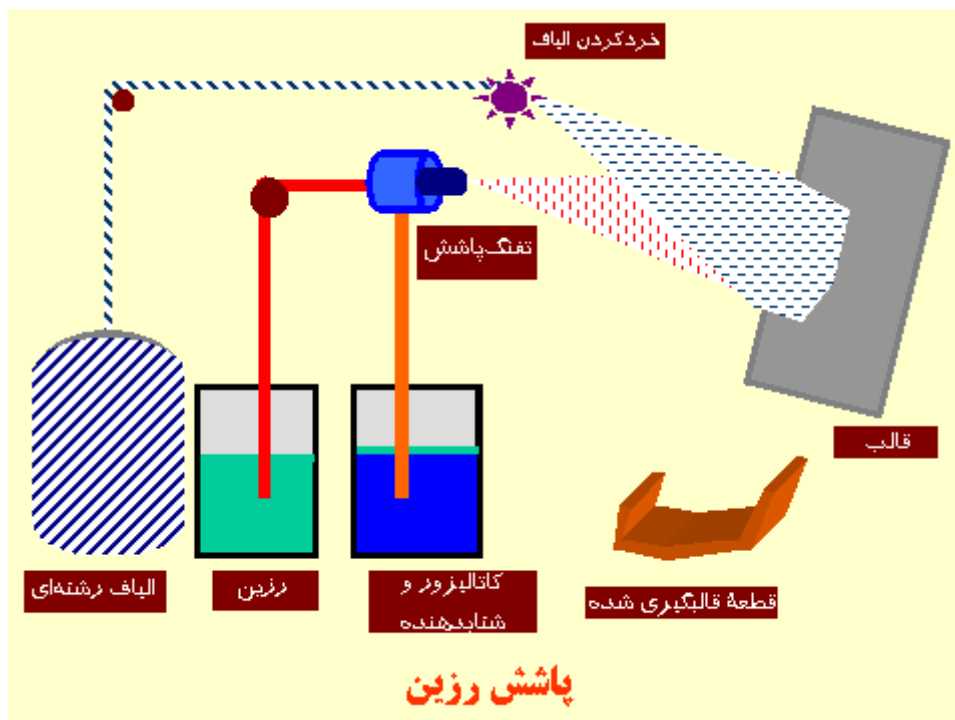
اگر کیفیت بالای سطح مورد نظر باشد، یک لایه از رزین دارای کاتالیزور روی قالب اسپری می‌شود و اجازه می‌یابد تا نیم پخت شود. این لایه رزینی ژل کوت نامیده می‌شود و یک لایه محافظ غیر قابل نفوذ روی الیاف تشکیل می‌دهد. رزینهای ژل کوت برای اینکار فرموله می‌شوند تا منعطف بوده، در برابر تاول و تخریب مقاوم باشند.

سطح دیگر کامپوزیت معمولاً زبر می‌باشد ولی با بکارگیری یک سلفون یا فیلمی از جنس پلی وینیل الکل یا مواد مشابه، کمی با کیفیت تر می‌شود. مواد زیادی برای ساخت قالب استفاده می‌شوند از جمله چوب، پلی استر، اپوکسی، لاستیک و فولاد. روش پیش آغشته می‌تواند به عنوان ادامه روش لایه گذاری دستی در نظر گرفته شود. در این فرایند الیاف با رزین فرمول شده آغشته می‌شود. تقویت کننده معمولاً بصورت نوارهای تک جهت از الیاف یا پارچه بافته شده می‌باشد و به منظور سهولت حمل و نقل و انبار، نیم پخت می‌شوند. پیش آغشته نیم پخت، چرم مانند است و کمی چسبنده، بنابراین لایه‌ها روی شکل‌های پیچیده سر نمی‌خورند و می‌توانند شکل برجستگی‌های قالب را به خود بگیرند و در نتیجه شکل‌های پیچیده به دقت قابل قالبگیری می‌باشند.

از آنجا که فرمولاسیون رزین در پیش آغشته دارای شروع کننده می‌باشد، دارای تاریخ مصرف می‌باشد و پیش از چند روز یا چند هفته نمی‌توان آنرا در دمای اطاق نگهداری نمود. بنابراین آنها را در فریزر نگهداری می‌کنند تا تاریخ مصرف آنها به یک سال و یا حتی بیشتر برسد. معمولاً پیش آغشته‌ها با تجهیزات ساخت مخصوص ساخته می‌شوند تا درصد رزین و الیاف کنترل شود. آغشته سازی کامل الیاف با رزین مشکل نواحی آکنده از رزین و عاری از آن را حل می‌کند. در نتیجه همگونی بهتری نسبت به لایه گذاری دستی حاصل می‌شود. بنابراین از پیش آغشته در جاهایی استفاده می‌شود که کارایی قطعه حساس است. تقریباً تمام رزینهای مورد مصرف صنایع کامپوزیت، به شکل پیش آغشته نیز وجود دارند.

## ۲. پاشش رزین (spray up)

در تلاش برای افزایش اتوماسیون فرآیند دستی، روشهای مختلف پاشش رزین ابداع شده‌اند. این روشها با کاربرد رشته‌های (roving) ارزانتر، کاهش زمان اعمال رزین و آغشته سازی الیاف و به حداقل رساندن اتلاف مواد، قیمت کلی کامپوزیت حاصل را کاهش می‌دهند.



در فرآیند پاشش رزین، الیاف و رزین بطور همزمان رو یا درون یک قالب پاشیده می‌شوند. الیاف رشته‌ای به یک خردکن وارد شده و بعد داخل جریان رزین همراه کاتالیست قرار می‌گیرند. رزین و کاتالیست ممکن است در یک تفنگ پاشش (spray gun) و یا از دو تفنگ پاشش وارد شوند و در هر حال وقتی به قالب می‌رسند، با هم مخلوط شده‌اند. سیستم پاشش ممکن است با هوا باشد. به منظور سهولت کار با دستگاه، معمولاً تفنگ پاشش به یک میله متحرک آویزان است.

پس از پاشش رزین و الیاف و نشست آنها روی قالب، از الیاف آغشته به رزین، حبابهای هوا توسط غلطک کاری خارج می‌شوند و الیاف کاملاً خوابانده می‌شوند و سطح صاف می‌شود. لایه‌های بعدی رزین و الیاف را نیز می‌توان تا رسیدن به ضخامت مطلوب اعمال نمود. سپس قطعه را در فشار و دمای محیط پخت می‌کنند، هر چند می‌توان با اعمال حرارت، پخت را سریع کرد.

رزینهای مورد استفاده در این فرآیند معمولاً پلی استر و اپوکسی هستند. با پاشش ژل کوت روی قالب می توان یک سطح نهایی عالی ایجاد کرد. طی فرآیند پاشش رزین، به منظور افزایش مقاومت در یک جهت یا محل خاص می توان الیاف پارچه ای را به آن اضافه نمود. قالبهای فرآیند می توانند از جنس چوب، وینیل پلی استر، اپوکسی، لاستیک و یا فولاد باشند.



فرآیند پاشش رزین برای حجم تولید کم تا متوسط ایده آل است. بخصوص برای ساخت قطعات بزرگ بسیار مناسب است. علاوه بر این، انتخاب لایه گذاری دستی یا پاشش رزین بستگی به خواص مکانیکی و محدودیتهای فرآیند دارد. خواص مکانیکی لایه گذاری دستی، به دلیل پیوسته بودن الیاف، بالاتر است. مزایای هر دو روش بسیار شبیه هم است. فرآیند پاشش رزین هنوز برای تولید وان حمام، اتاقک دوش، قطعات اتومبیلهای تفریحی، اتاق و سقف کامیون، صفحات بزرگ، اتاقک نگهبانی و خانه پیش ساخته، اثاثیه منزل و قطعات معماری استفاده می شود، اگر چه فراگیری این فرآیند توسط سایر روشهای شکل دهی مانند آر تی ام تحت الشعاع قرار گرفته است.

### 3. آمیزه های قالبگیری (SMC, BMC, Compression Molding)

بطور کلی آمیزه قالبگیری را می توان مخلوطی از رزین، مواد پرکننده، الیاف تقویت کننده، آغازگر، رها ساز، رنگدانه، پایدار کننده و دیگر مواد افزودنی دانست. این آمیزه ها معمولاً به شکلی که مناسب برای قالبگیری نهایی است تولید می گردند. بسته به شکل آمیزه فرآیند

قالبگیری می‌تواند فشاری، تزریقی و یا انتقالی باشد. کاربرد گسترده این مواد به بهای نسبتاً پائین و امکان بهینه سازی خواص آنها جهت کاربردهای ویژه نسبت داده می‌شود. آمیزه‌های قالبگیری بر پایه اغلب رزین‌های گرما سخت وجود دارند اما آمیزه‌های بر پایه رزین پلی استر غیر اشباع سهم عمده را بخود اختصاص می‌دهند لذا در اینجا تأکید روی آنها بوده است.

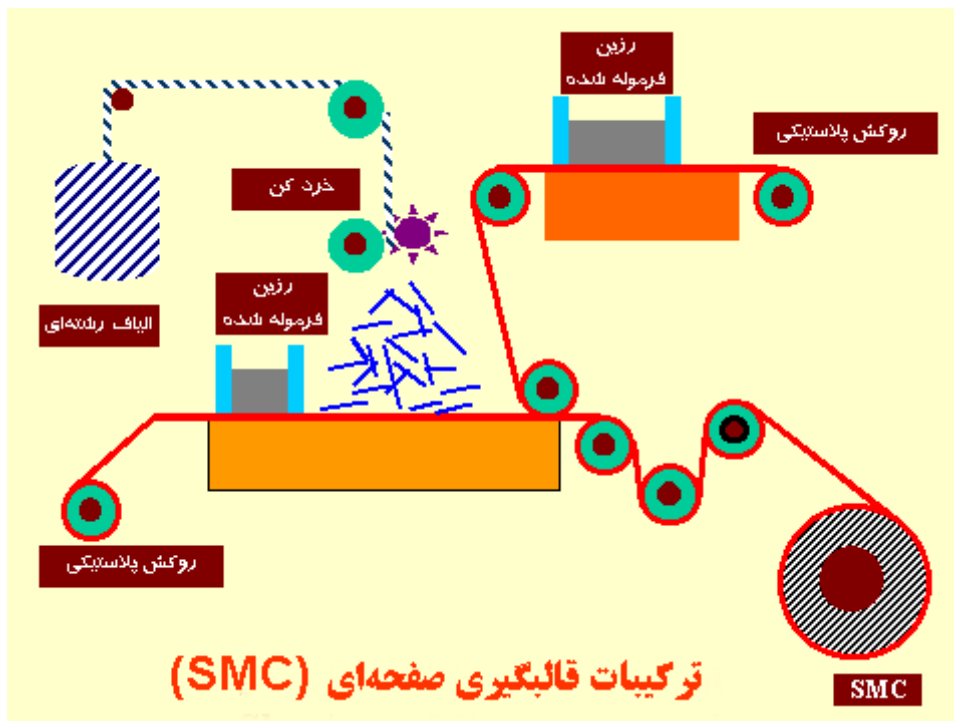
### آمیزه قالبگیری ورقه‌ای SMC (Sheet Moulding compound) :

این آمیزه ورقه‌ای چرم - مانند با ضخامت ۳-۵ میلی متر از مواد است که بین دو فیلم نازک از پلی اتیلن عرضه می‌گردد (این فیلم‌ها قبل از قالبگیری آمیزه برداشته می‌شوند). ماده مورد استفاده در این آمیزه مخلوطی از الیاف شیشه بریده شده و خمیری از پلی استر غیر اشباع می‌باشد. یک ترکیب درصد نمونه از این خمیر در جدول ۲ آورده شده است. در این جدول ۷۰٪ وزنی SMC را خمیر تشکیل می‌دهد و ۳۰٪ باقیمانده را الیاف شامل می‌شود.

ترکیب درصد نمونه از خمیر آمیزه قالبگیری ورقه‌ای

درصد وزنی	مواد
۹.۲۳	رزین پلی استر غیر اشباع
۷.۴۰	پرکننده
۷.۰	تغلیظ کننده
۲۵.۰	آغازگر
۴۵.۳	افزودنی ضد جمع شدگی
۱	رها ساز
جزئی	تاخیر انداز

تولید SMC با تهیه محلول آبی (slurry) از مواد در یک دستگاه مخلوط ساز با سرعت بالا آغاز می‌گردد. همه اجزاء باستثناء تغلیظ کننده بمدت ۱۵ دقیقه با هم مخلوط می‌شوند. در طی این مدت دمای مخلوط تا حدود  $30^{\circ}\text{C}$  بالا می‌رود. در این مرحله ویسکوزیته مخلوط حدود Pas 20-30 می‌باشد. پس از اینکه عمل مخلوط سازی باتمام رسید ماده تغلیظ کننده (Thickener) اضافه گردیده و بسرعت طی مدت زمان حدود ۵ دقیقه با بقیه اجزاء مخلوط می‌گردد. در این مرحله خمیر آماده است و جهت تلفیق با الیاف به ماشین SMC منتقل می‌گردد.



در اینجا خمیر تهیه شده با ضخامت معین بر روی یک فیلم پلی اتیلنی ( با پهنای یک متر و ضخامت 15-20 mm) که از رول فیلم بر بستر متحرک دستگاه باز می‌شود ریخته می‌شود. سرعت حرکت این فیلم بین 5-9 m/min می‌باشد. این فیلم از زیر دستگاه برش الیاف عبور می‌کند و الیاف بلند به طولهای 25 mm بریده شده و با سرعتی که درصد حجمی مورد نظر را فراهم سازد روی فیلم آغشته به خمیر بصورت راندم می‌نشینند. این فیلم به همراه فیلم دیگر که

فقط خمیر روی آن ریخته شده و فاقد الیاف است با هم ساندویچ شده و از یکسری غلطک عبور می‌کنند. این غلطک‌ها باعث آغشتگی الیاف به رزین، خروج هوا از آمیزه و همچنین تنظیم ضخامت ورق و در نتیجه تنظیم ترکیب درصد الیاف می‌شود. در انتها ساندویچ تهیه شده بر روی یک غلطک بصورت رول جمع‌آوری می‌گردد و در یک فیلم نایلون یا سلوفان پیچیده شده تا از فرار مونومر جلوگیری شود. این رول سپس به محیط‌های کنترل از لحاظ دمائی منتقل شده تا مرحله تغلیظ شدن در آن سپری شود. در مرحله تغلیظ اجازه داده می‌شود تا ویسکوزیته ترکیب به حدی برسد که ورق SMC براحتی قابل جابجائی، برش و قالبگیری باشد. وجود پرکننده باعث بهبود کیفیت سطح قطعه شده و تغییرات ابعادی (انقباض) قطعه را که ناشی از پخت رزین است کاهش می‌دهد. همچنین تأثیر عمده‌ای در کاهش قیمت تمام شده محصول دارد.

درصد وزنی پرکننده در آمیزه بستگی به نوع پرکننده، خواص رئولوژیکی رزین و درصد الیاف دارد. بطور کلی میزان پرکننده باید در حدی باشد که خیس شدگی مناسب سطح الیاف با رزین را مانع نشده و جریان رزین را در قالب دچار اشکال نکند. هر چه درصد الیاف بیشتر باشد نسبت پرکننده به رزین کمتر می‌شود. بطوریکه نسبت پرکننده به رزین برای آمیزه‌های قالبگیری ورقه‌ای با ۳۰٪، ۵۰٪ و ۶۵٪ الیاف به ترتیب ۱/۵، ۰/۵ و صفر باشد.

آغازگر نقش شروع واکنش پخت را به عهده دارد. بطور معمول آغازگرهای مورد استفاده در آمیزه‌های قالبگیری رزین پلی استر، پراکسیدهای آلی با فرمول عمومی ROOR می‌باشد که در شرایط دمائی خاص به رادیکال‌های مربوط (RO<sup>o</sup>) تجزیه گشته و این رادیکال‌ها با حمله به نواحی غیر اشباع در زنجیره پلیمری منجر به پخت رزین می‌گردند.

معمول‌ترین آنها ترت بوتیل پربنزوات (TBPB) و ۱-دی (ترت بوتیل پراکسی) سیلکوهگزان می‌باشند که در دمای قالبگیری ۱۴۰-۱۶۰ °C بکار گرفته می‌شود. برای کم

کردن زمان قالبگیری و همچنین دمای قالبگیری از پراکسیدهای فعال تر مانند t-Butyl Peroctoate استفاده می‌شود. البته بکارگیری چنین سیستم‌هایی منجر به کوتاه‌تر شدن عمر نگهداری ورقه‌های SMC می‌شود. برای کاهش زمان پخت می‌توان از سیستم آغازگر دوتایی نیز استفاده کرد. در این صورت به آغازگر در دمای بالا درصدی از آغازگر با دمای پائین اضافه می‌شود.

در حین تهیه ترکیب قالبگیری و در مدت ذخیره سازی آن امکان آغاز تدریجی واکنش پخت رزین وجود دارد. نقش جلوگیری کننده‌ها، ممانعت از شروع واکنش پخت از آغاز تهیه تا پایان ذخیره سازی ترکیب می‌باشد. این مواد از خانواده ترکیبات کینونی می‌باشد و در مقادیر بسیار کم (حدود ۰.۲۰٪) به فرمولاسیون اضافه می‌شوند. هیدروکینون و پارا بنزوکینون از مواد معمول بدین منظور می‌باشند. وجود این مواد در فرمولاسیون سرعت پخت و در نتیجه افزایش ویسکوزیته را در مراحل اولیه قالبگیری کاهش می‌دهد. این امر به بهبود جریان آمیزه و پرشدن قالب کمک می‌کند و لذا از بروز نقایص چون پر نشدن کامل قالب و ایجاد فضاهای خالی (Void) در قطعه جلوگیری می‌نماید.

در هنگام قالبگیری، ورق SMC می‌باید براحتی قابل انتقال به داخل قالب و برش به اندازه‌های مورد نیاز باشد. نقش تغلیظ کننده افزایش ویسکوزیته آمیزه به اندازه‌ای است که شرایط مورد نظر را فراهم سازد. در واقع عمل تغلیظ خمیر رزین را از مایعی با ویسکوزیته حدود 30 Pas به ماده‌ای چرم - مانند با ویسکوزیته در محدوده  $10^4 - 10^5$  Pas تبدیل می‌نماید. در این شرایط آمیزه غیر چسبنده بوده و قابلیت انعطاف دارد. تغلیظ کننده‌های معمول برای رزین پلی استر غیر اشباع، اکسیدها و هیدرواکسیدهای فلزات گروه IA I مانند  $CaO$ ,  $Mg(OH)_2$ ,  $MgO$  می‌باشند. عقیده براین است که افزایش ویسکوزیته رزین بدلیل واکنش یون فلزی با گروه‌های کربوکسیلیک انتهایی موجود در زنجیره پلیمری و تشکیل



زنجیرها و کمپلکس‌های با جرم ملکولی بالاتر است. نوع، میزان و اندازه ذره تغلیظ کننده و همچنین شرایط رطوبت و دمای نگهداری SMC بر روند افزایش ویسکوزیته در طی فرآیند تغلیظ و همچنین ویسکوزیته نهائی ترکیب اثر دارند. ویسکوزیته نهائی ورقه SMC در کیفیت قطعه قالبگیری شده نقش بسزائی دارد و باید در محدوده خاصی باشد که بین ۱۰<sup>۶</sup> و ۵۰<sup>۶</sup> و ۱۰<sup>۶</sup> و ۱۳۰<sup>۶</sup> سانتی پواز است. در طی فرآیند قالبگیری ورقه SMC، پیوندهای تشکیل شده در عمل تغلیظ بدلیل افزایش حرارت شکسته شده و ویسکوزیته آمیزه کاهش یافته بگونه‌ای که در قالب جاری می‌شود و آنرا پر می‌کند. بدنبال آن رزین شروع به ژل شدن نموده که افزایش سریع ویسکوزیته را شاهد خواهیم بود.

### ترکیبات قالبگیری DMC, BMC

این ترکیبات بمنظور استفاده از فرآیندهای اتوماتیک تر برای قالبگیری سیستم‌های رزینی توسعه یافته‌اند. این مواد ترکیبات خمیری شکل بوده که به طور ناپیوسته در مخلوط ساز ژاکت دار با تیغه Z یا زیگما تولید می‌گردند. مخلوط ساز متشکل از دو ظرف یکسان U-شکل از جنس فولاد زنگ نزن بوده که درون هر ظرف تیغه‌ای وجود دارد. این تیغه‌ها در جهت مخالف هم چرخش دارند. ظرفیت این مخلوط سازها بین چند کیلوگرم تا حدود ۱۰ تن می‌باشد. DMC مخلوطی است از الیاف شیشه بریده شده و خمیری از رزین پلی استر غیر اشباع که با افزودنی‌های مختلف پر شده است. ترکیب نمونه‌ای از این خمیر در جدول زیر آورده شده است.

ترکیب درصد نمونه‌ای از خمیر DMC

ماده	مقدار	جزئیات
رزین پلی استر غیر اشباع	۱۰۰	رزین ارتوفتالیک با ویسکوزیته ۱۰ سانتی پویز
افزودنی ضد جمع شدگی	۶۵-۴۰	محلول ۳۰٪ وزنی از ماده‌ای مانند پلی استایرن در استایرن
پرکننده	۲۰۰- ۱۵۰	کربنات کلسیم
روان ساز	۵-۳	استئارات روی و کلسیم
آغازگر	۲-۱	ترشیو بوتیل پربنزوئات
رنگدانه	۱۰-۵	رنگدانه‌های معمول

تولید DMC معمولاً در درجه حرارت اتاق انجام می‌شود هر چند امکان گرم کردن یا سرد کردن مخلوط از طریق گردش روغن در ژاکت مخلوط ساز وجود دارد. در فرآیند تولید ابتداء مواد پودری وزن گردیده و بمدت یک دقیقه با هم مخلوط می‌شوند. رزین و دیگر مواد افزودنی اضافه شده و مخلوط سازی بمدت ۱۵-۳۰ دقیقه ادامه می‌یابد. در طی این مدت می‌توان مخلوط سازی را بمنظور پاک سازی دیواره ظرف متوقف نمود. پس از هموژن شدن مخلوط الیاف تقویت کننده بتدریج اضافه شده و با مخلوط آبکی رزین مخلوط می‌شوند. این عمل حدود ۵ دقیقه بطول می‌انجامد و هدف آن صرفاً توزیع مناسب الیاف در سراسر رزین است. برای مخلوط سازهای با تیغه Z یا زیگما فاصله بین تیغه و دیواره ظرف در محدوده ۳ تا ۱۲ میلی متر است. هر چه این فاصله کمتر باشد عمل مخلوط سازی بهتر صورت می‌گیرد اما

احتمال آسیب رساندن به الیاف بیشتر می‌شود. نهایتاً ترکیب حاصله در فیلم‌هایی که مانع از تبخیر مواد فرار می‌شوند بسته بندی گردیده و یا بصورت رشته اکسترود شده و در بشکه های خاص نگهداری می‌شوند.

BMC عموماً به ترکیبی اطلاق می‌گردد که بر پایه رزین ایزوفتالیک است و همچنین عمل تغلیظ سازی در آن بوسیله MgO صورت می‌گیرد. عمل تغلیظ سازی می‌تواند میزان پرکننده را تا 100 phr تقلیل دهد و لذا امکان افزایش میزان تقویت کننده را فراهم سازد. کاهش میزان پرکننده در BMC ظاهر سطحی بهتری را نسبت به DMC برای آن فراهم می‌سازد.

### قالبگیری فشاری آمیزه های قالبگیری:

بمنظور قالبگیری آمیزه‌های BMC, DMC, SMC می‌توان از قالبگیری فشاری استفاده کرد. مراحل کلی فرآیند را می‌توان بصورت زیر بیان نمود.

مرحله اول: در این مرحله آمیزه باید باندازه مورد نظر در قالب قرارداده شود. آمیزه DMC, BMC را می‌توان پس از وزن نمودن بصورت توپ گرد درآورد و در وسط قالب قرار داد. آمیزه SMC را می‌توان بصورت لایه‌های مختلف برید و بگونه‌ای در قالب چید که حدود 70-80٪ سطح قالب پوشانده شود.

مرحله دوم: قسمت بالائی قالب (فک متحرک) بسرعت پائین آورده می‌شود. تا در تماس با سطح مواد قرار گیرد. سپس سرعت کم می‌شود و بآرامی قالب بطور کامل بسته می‌شود. سرعت بسته شدن قالب اهمیت دارد، چرا که سرعت بالا منجر به بدام افتادن هوا در قطعه و سرعت پائین منجر به پخت رزین و احتمال پرنشیدن قالب می‌شود.

مرحله سوم: در این مرحله و پس از بسته شدن قالب برای مدتی قطعه در قالب نگه داشته می‌شود تا مراحل پخت رزین با تمام برسد. سپس قالب باز شده و قطعه پخت شده بوسیله میله‌های خارج کننده به بیرون رانده می‌شود.

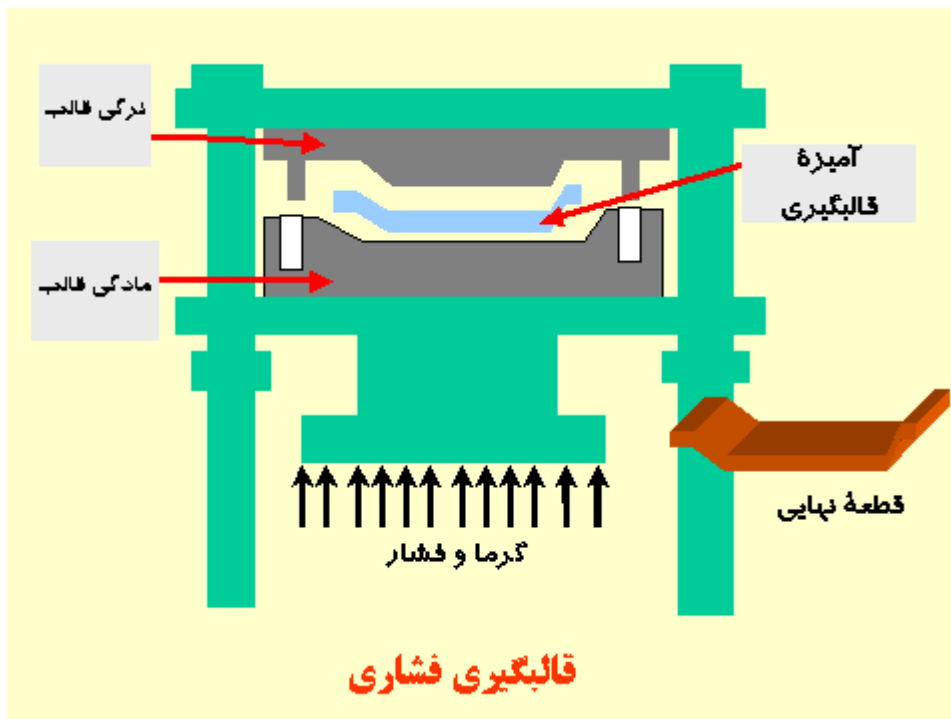
سیکل قالبگیری بستگی به سیستم رزین-آغازگر، ضخامت قطعه و پارامترهای دیگر دارد اما بطور نمونه می‌توان گفت که در حدود ۴۵ ثانیه بازای هر میلی متر ضخامت در درجه حرارت بین  $120^{\circ}\text{C}$ - $160^{\circ}\text{C}$  و فشار بین 200-1000 psi، می‌باشد.

موارد زیر می‌توانند در کیفیت قطعه حاصله مؤثر باشند

- پیش حرارت دهی مواد قالبگیری

- قالبگیری در محیط خلاء

- پوشش دهی درون قالبی

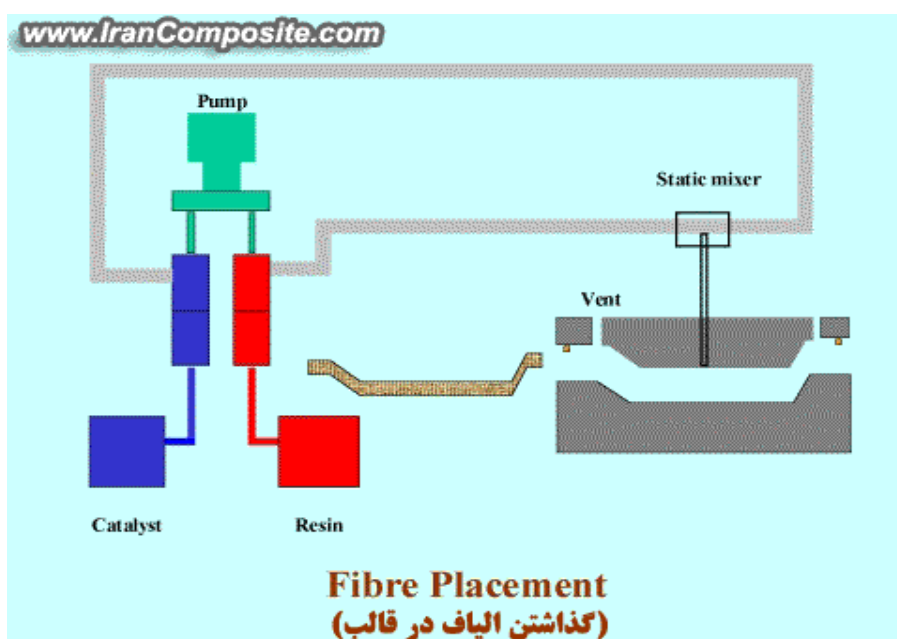


#### ۴. تزریق رزین (RTM)

RTM یک فرآیند قالب بسته می‌باشد. در این فرآیند ابتدا الیاف را در یک قالب دو کفه نر و ماده قرار می‌دهند. سپس رزین مایع و کاتالیست توسط یک میکسر ایستا مخلوط می‌شوند و مخلوط آنها از طریق منافذ تزریق با یک فشار مختصر وارد قالب می‌شود. فشار تزریق معمولاً کمتر از 700 KPa می‌باشد. هوای محبوس در بین الیاف با ورود رزین، به سمت خروجی‌های قالب رفته، از قالب خارج می‌شوند. کنترل شکل پر شدن قالب برای دستیابی به آغشته سازی کامل الیاف، از اهمیت خاصی برخوردار است. تشکیل نواحی عاری از رزین و آکنده از آن باعث از رده خارج شدن قطعه می‌شود. چرخه پخت به ضخامت قطعه، نوع رزین و دمای قالب دارد. قطعات معمولاً در قالب گرم پخت می‌شوند و عملیات پس پخت برای بهبود خواص مکانیکی بکار می‌رود RTM. برای تولید قطعات بزرگ و پیچیده دارای مزیت است. سرعت نسبتاً بالا، مطلوب بودن دو طرف سطح، به راحتی قابل دستیابی است. امکان پخت قطعه در قالب موجب کاهش قابل ملاحظه زمان فرآیند در مقایسه با فرآیند لایه گذاری دستی است.

از آنجایی که RTM مانند اتوکلاو دارای محدودیت ابعاد و فشار نیست، ابزارهای جدید برای

ساخت قطعات بزرگ و پیچیده قابل استفاده‌اند.



فرآیند RTM هیچگاه بدون حل مسایل مربوط به اتوماسیون فرآیند ساخت و پیش شکل ابزارکاری، تحلیل جریان پر شدن قالب و شیمی رزین، تا این حد گسترش و تعمیم نمی‌یافت. در دو دهه گذشته پیشرفت سریع در RTM، این مشکلات را حل کرد و پتانسیل فرآیند RTM را برای ساخت کامپوزیتهای پیشرفته اثبات نمود. مزایای این فرآیند می‌تواند بصورت ذیل خلاصه شود:

- امکان ساخت قالبها و قطعات با تلورانس ابعادی دقیق

- کیفیت مناسب دو روی قطعه

- امکان چینش دلخواه الیاف

- امکان کاربرد ۶۵٪ حجمی الیاف

- یکنواختی جمع شدگی با توجه به همگونی ضخامت و بارگذاری الیاف

- امکان تعبیه الحاقات فلزی و غیره درون قالب

- پایین بودن نسبی قیمت تجهیزات

- پایین بودن فشار تزریق

- کم کردن انتشار مواد فرار

- کاهش اتلاف مواد

- قابلیت ساخت قطعات پیچیده و توخالی

- امکان اتوماسیون و بالا بردن سرعت تولید

- کاهش حباب در قطعه

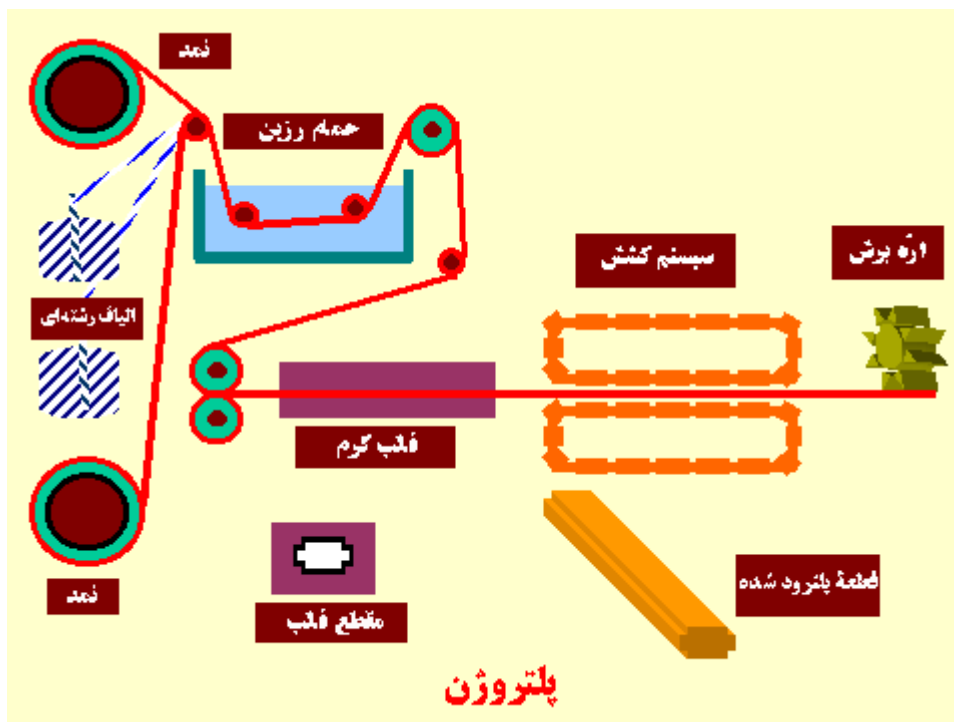
- امکان ساخت قطعات با ضخامت یک دهم تا نود میلی متر

از سوی دیگر، RTM دارای معایبی نیز هست؛ طراحی قالب، حساس است و نیاز به مهارت دارد. درگاه نامناسب تزریق و خروجی می‌تواند منجر به ایجاد نقص در قطعه شود. کنترل

آغشته سازی و شکل جریان مشکل است. در گوشه‌ها و لبه‌ها نقاط آکنده از رزین بوجود می‌آید. در مجموع می‌توان گفت خواص قطعه حاصل از این فرآیند معادل قطعات حاصل از قالبگیری می‌باشد ولی به خوبی پلتروژن و رشته پیچی نیست.

## ۵. پلتروژن :

پلتروژن فرآیند پیوسته‌ای برای تولید انواع پروفیل‌های کامپوزیتی است. در این فرآیند، الیاف تقویت کننده را از یک حمام عبور می‌دهند تا به رزین آغشته شود. سپس الیاف آغشته شده را وارد یک قالب گرم می‌نمایند و نمونه پخت شده را توسط یک دستگاه کشش بیرون می‌کشند. بعد از این مرحله امکان برش محصول در اندازه‌های دلخواه وجود دارد. این فرآیند تا حدودی مشابه فرآیند اکستروژن پلاستیکها و تولید پروفیل‌های پلاستیکی است .



از جمله مزایای این روش که یکی از باصرفه‌ترین روشهای تولید کامپوزیتهاست، این است که درصد الیاف در آن بالاست و چون الیاف بصورت طولی آرایش می‌یابند، محصول دارای

استحکام کششی و فشاری بسیار بالایی است. همچنین سطح محصول نهایی کاملاً صاف است و نیازی به فرآیندهای تکمیلی نیست.

مراحل فرآیند :

- ورودی الیاف: الیاف تقویت کننده به شکلی هستند که بطور پیوسته فرآیند امکان پذیر باشد. قفسه الیاف پیوسته، اولین قسمت خط فرآیند می باشد. بعد از قفسه الیاف، قفسه نمد الیاف شیشه یه پارچه ها سطح قرار دارد. حرکت الیاف از ناحیه آغشته سازی می بایست کنترل شود تا از هرگونه پیچش و گره و آسیب محفوظ بماند. اینکار می تواند توسط راهنماهای فلزی، سرامیکی و یا تفلونی انجام شود.

- حمام آغشته سازی: آغشته سازی الیاف تقویت کننده، از اصول فرآیند پلتروژن می باشد. غوطه وری در حمام یک راه برای این کار است. در این روش الیاف از رو و زیر میله های آغشته سازی عبور داده می شوند تا از هم باز، و به رزین آغشته گردند. معمولاً در ساخت پروفیل های پیچیده، بعد از حمام و قبل از قالب، از صفحاتی برای شکل دادن به الیاف آغشته به رزین، استفاده می کنند. پوشش این صفحات باید از جنسی مناسب باشد تا از وارد ساختن هرگونه تنش به الیاف آغشته ضعیف شده، جلوگیری به عمل آید. معمولاً این قطعات از جنس تفلون، پلی اتیلن با جرم مولکولی بسیار بالا، فولاد با پوشش کرم و یا آلیاژهای مناسب فولادی می باشند.

- قالب: قالب پلتروژن، قلب این فرایند محسوب می شود. چرا که دما، کنترل کننده سرعت واکنش پخت، محل پخت رزین در قالب و شدت گرمای حاصل از پخت رزین می باشد. قطعه ای که کامل پخت نشده باشد، خواص فیزیکی و مکانیکی ضعیفی از خود نشان می دهد. همچنین اگر گرمای اضافی در قالب وجود داشته باشد، نقص و ترک حرارتی، موجب افت خواص الکتریکی، شیمیایی و مکانیکی قطعه می شود.



• گیره و کشش: حداقل ۳ متر فاصله بین خروجی قالب و محل کشش می‌بایست تعبیه شود تا قطعه فرصت سرد شدن پیدا کند و در برابر فشار گیره کشش تغییر شکل ندهد. سه روش برای کشش مرسوم است؛ کشش رفت و برگشتی متناوب، کشش رفت و برگشتی پیوسته و کشش توسط سیستم تسمه نقاله‌ای.

• برش: هر خط پیوسته پلترژن احتیاج به یک سیستم برش دارد تا طولهای مناسب از قطعه تحویل شود. هردو روش برش خشک و تر قابل استفاده می‌باشند. ولی در هر حال تیغه برش می‌بایست الماسه باشد. در صورتیکه سرعت خط بالا باشد، تیغه برش همراه پروفیل حرکت می‌کند.

**مواد:** با توجه به خواص مورد نظر، می‌توان از الیاف و رزینهای مختلفی استفاده نمود. الیاف تأمین کننده خواصی چون استحکام کششی و ضربه، سفتی و مانند آن می‌باشند ولی رزین تأمین کننده خواص فیزیکی مانند آتشگیری، مقاومت در برابر شرایط جوی، هدایت حرارتی و مقاومت شیمیایی می‌باشند. برای بهبود خواص نیز از انواع افزودنی‌ها استفاده می‌شود.

**الیاف:** در انتخاب الیاف سه ویژگی مورد بررسی قرار می‌گیرد: نوع الیاف (شیشه، آرامید و کربن)، شکل آنها ( Roving, Mat, Fabrics ) و آرایش یافتگی آنها.

الیاف شیشه مرسوم ترین نوع الیاف مورد مصرف می‌باشند. الیاف شیشه نوع الکتریکی ( E-grade )، استحکام کششی حدود 3450 Mpa و مدول کششی 70 Gpa و ازدیاد طول ۳ تا ۴ درصد دارند و با قطر و وزن مختلف در دسترس می‌باشند. سطح الیاف نیز متناسب با رزین کاربردی پوشش داده شده‌اند. برای کاربردهای خاص می‌توان از الیاف نوع S یا R استفاده نمود.

### ماتریس پلیمری :

پلی استر غیر اشباع: هر دو نوع ایزو و ارتو فتالیک قابل استفاده می‌باشند. پلی استر مورد مصرف در فرآیند پلترژن باید امکان ژل شدن و پخت سریع را داشته باشد تا قطعه از قالب

جدا شود و بیرون کشیدن آن به سهولت انجام پذیرد. ویسکوزیته رزینهای معمول پلترژن 500Pc می باشد. اگر ویسکوزیته رزین بالا باشد، می توان آنرا با مقادیری استایرن مخلوط نمود تا ویسکوزیته مناسب بدست آید. البته باید توجه داشت مقدار استایرن آنقدر زیاد نشود که بصورت واکنش نکرده یا پلی استایرن درآید.

پراکسیدهای مورد استفاده در این فرآیند، باید در دمای بالاتر از محیط فعال شوند. به عنوان نمونه می توان به موارد زیر اشاره نمود:

انواع تجاری	دمای استفاده	حالت فیزیکی	نام پراکسید
Lucidol	>80	جامد	بنزوتیل پراکسید
Trigonox	100-150	مایع	t-بوتیل پربنزوئات
Perkadox	>60	جامد	پرکربنات فعال (پراکسید کمکی)

به علت پیوندهای غیر اشباع، پلی استر پس از پخت ۷ درصد جمع شدگی نشان می دهد. این نقص می تواند توسط فیلر و افزودنی های Low Profile جبران گردد .

خواص الکتریکی پلی استر، قطعات آنرا مناسب برای کاربردهای ولتاژ بالا ساخته است. مقاومت در برابر شرایط محیطی پلی استر، متوسط تا خوب است. خواص بهتر توسط افزودنی ها و پارچه و پوشش (حتی بعد از فرآیند) قابل دستیابی است.

وینیل استر: این رزین نسبت به پلی استر دارای مقاومت خوردگی، خواص مکانیکی و حرارتی بهتری می باشد ولی حدود ۷۵ درصد گرانتز می باشد .

رزین اپوکسی: این رزین برای استفاده در دماهای بالاتر مناسبتر است ضمن آنکه خواص مکانیکی آن عالیست.

سایر رزینها: از رزینهای دیگری مانند فنولیک، پلی متیل متاکریلات و حتی ترموپلاستها استفاده نمود.

## مواد افزودنی :

فیلر: در فرآیند پلتروژن پرکردن قالب اهمیت فراوانی دارد. برای این منظور از پرکننده‌ها استفاده می‌شود. بعد از رزین و الیاف، سومین بخش رزین را تشکیل می‌دهد. از معمولترین فیلرها، کربنات کلسیم، سیلیکات آلومینیم و هیدروکسید آلومینیم را می‌توان نام برد. با توجه به ویسکوزیته فرمولاسیون، تا ۵۰ درصد وزنی فیلراستفاده می‌شود.

عامل جدا کننده: ( release agent ) : به منظور جدا شدن قطعه از قالب، می‌بایست از یک عامل جداساز استفاده شود. این عامل نباید کاملاً ناسازگار با رزین باشد و همچنین سازگاری آن به حدی نباشد که به سطح قطعه مهاجرت نکند. همچنین باید قبل از پخت رزین مذاب شده باشد .

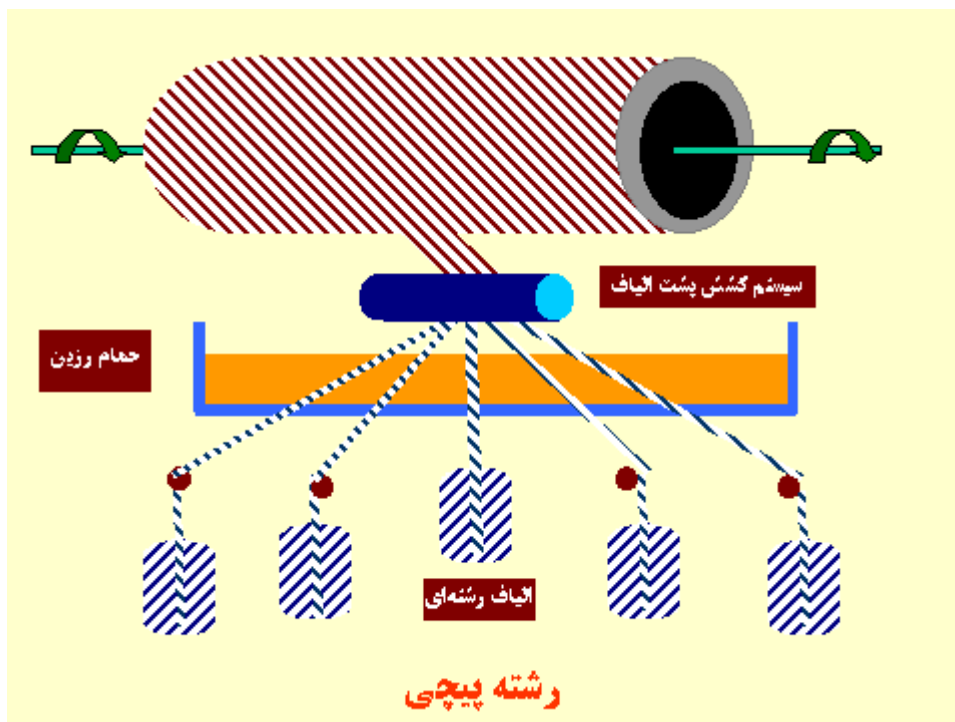
سایر افزودنی‌ها: در فرآیند پلتروژن می‌توان از انواع رنگدانه‌ها، افزودنی‌های بهبود خواص حرارتی و سایر مواد مرسوم در صنعت کامپوزیت استفاده نمود.

**مزایای پلتروژن:** پلتروژن یکی از اقتصادی‌ترین روشهای تولید پروفیل‌های کامپوزیتی مورد مصرف در صنایع ساختمان است. از این فرآیند در ساخت قطعات سبک مقاوم در برابر خوردگی، سیستم‌های عایق الکتریکی، سازه‌های ساحلی و بسیاری از کاربردهای دیگر استفاده می‌شود.

## رشته پیچی (filament winding)

رشته پیچی یک روش ساده و کارا برای تولید قطعات مدور مانند لوله و ظروف استوانه‌ای در اندازه‌های مختلف می‌باشد. قطعات با قطر 25mm تا 6m در این فرآیند متداول می‌باشد. در این فرآیند الیاف رشته ای یا نوارهای پیوسته الیاف با شرایط کنترل شده روی یک مغزی پیچیده می‌شوند. لایه‌ها با یک طرح یکسان و یا متفاوت پیچیده می‌شوند. به هنگام پیچش

الیاف، کشش الیاف بین لایه‌های پخت نشده کامپوزیت فشار ایجاد می‌کند. این فشار بر فشردگی الیاف و درصد حباب هوا در قطعه -که کنترل کننده استحکام و سفتی قطعه می‌باشد- مؤثر است. رزین ممکن است قبل، به هنگام و بعد از پیچش روی الیاف اعمال شود. در نهایت رزین در دمای محیط و یا دمای بالاتر و بدون اعمال فشار پخت شده، مغزی از درون آن بیرون کشیده می‌شود. عملیات تکمیلی مانند ماشین کاری و سنباده زنی معمولاً احتیاج نیست.



چرخه تولید کامپوزیتهای رشته پیچی شده را می‌توان به مراحل ذیل تقسیم نمود:

- پیچش قطعه روی مغزی

- حرارت دهی و پخت رزین که منجر به شکل‌گیری قطعه می‌شود.

- سرد کردن قطعه

- بیرون کشیدن قطعه از مغزی

در ابتدا فقط از الیاف شیشه به عنوان تقویت کننده در این فرآیند استفاده می‌شد ولی امروزه برای قطعات با استحکام بالا از الیاف کربن و برای قطعات چقرمه و سبک از الیاف آرامید استفاده می‌شود. این الیاف به شکل‌های فیلامنت تنها، رشته‌ای، پارچه و نوارهای بافته و نبافته می‌توانند استفاده شوند.

پلی استرها و وینیل استرها بدلیل قیمت پایین، خواص خوب مکانیکی و شیمیایی، بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. در برخی قطعات نظامی و هوافضایی از رزین اپوکسی استفاده می‌شود. سیلیکونها، فنولیکها و پلی ایمیدها محدود به کاربرد ویژه الکتریکی یا دمای بالا می‌باشند.

انتخاب یک رزین خاص در یک سیستم مشخص بستگی به شرایط فرآیند، الزامات پخت و خواص فیزیکی مورد نظر دارد. ویسکوزیته و تاریخ مصرف سیستمهای مخلوط با کاتالیست از نظر فرآیندی دارای اهمیت فراوانی است. زمان ژل شدن و رفتار جریان نیز متغیرهای مهمی محسوب می‌شوند. برای خیس خوردگی الیاف و خروج هوای محبوس، ویسکوزیته پایین رزین الزامی است.

اگرچه رزینهای گرماسخت در فرآیند رشته پیچی متداول هستند، ولی تحقیق و توسعه در بکارگیری ماتریسهای گرمانرم نیز در این فرآیند پیشرفتهای خوبی داشته است و قطعات حاصله خواص ممتازی از خود نشان داده‌اند.

عمده‌ترین عوامل مؤثر بر خواص قطعات تهیه شده به روش رشته پیچی عبارت است از:

- درصد رزین و توزیع آن

- کشش به هنگام پیچش الیاف

- شرایط الیاف آغشته شده

- پهنای نوار الیاف مورد استفاده

- آرایش الیاف

- سیکل پخت

جدا کردن تأثیر هرکدام از عوامل فوق دشوار است و به هم مربوط می‌باشند. از جمله نقایص یا ضعف‌هایی که در قطعه به چشم می‌خورد می‌توان به موارد ذیل اشاره نمود:

حباب هوا، نقاط خشک، نقاط آکنده از رزین، شکست زودهنگام، نواحی شکست موضعی پخت ناقص یا ناهمگون.

درصد رزین و توزیع آن برای کنترل وزن و ضخامت اهمیت فراوانی دارد. اکثر قطعات هوافضا دارای تلورانس وزنی ۲٪ می‌باشند. از نظر استحکام تغییرات مفرط درصد رزین، موجب ناهمگونی توزیع تنش و شروع شکست می‌شود. درصد رزین به کشش هنگام پیچش بسیار وابسته است. جریان رزین حاصل از فشار الیاف، جهت خارج کردن حبابهای هوا و سایر مواد فرار سودمند است ولی کشش به هنگام پیچش یک متغیر حساس در کنترل و کاهش مقدار حبابهاست. حبابهای اضافی موجب کاهش استحکام برشی بین لایه‌ای و افت استحکام فشاری و مقاومت در برابر خمش و شکم دادن می‌شود.

دما، رطوبت، شرایط آب و هوایی، پیری و سایر شرایط محیطی بر خواص کامپوزیتهای رشته پیچی شده تأثیر می‌گذارند. تأثیر این عوامل همانند تأثیر بر قطعات کامپوزیتی تهیه شده با سایر روشها، می‌باشد. مسئله‌ای که وجود دارد این است که پایین بودن درصد رزین در کامپوزیتهای رشته پیچی شده، موجب می‌شود که آنها برای نفوذ رطوبت و تخریب در

محیطهای شدیداً مرطوب مستعدتر شوند. تأثیر منفی دوره‌های گرما-رطوبت می‌تواند با استفاده از رزینهای کارا تر در لایه‌های آخر به حداقل برسد.

قطعات رشته پیچی شده از نظر کمیت هم در صنایع هوافضا و هم کاربردهای تجاری، اهمیت قابل توجهی دارند. البته تکنولوژی پیچش و طراحی در این دو زمینه متفاوت است زیرا کارایی‌های مورد نظر متفاوت می‌باشد.

تکنولوژی پیچش در صنایع هوافضا بسیار ویژه و طراحی شده برای کارهای خاص و با قیمت‌های بالاتر می‌باشد. عمده تلاشها در راستای بکارگیری این تکنولوژی در ساخت بدنه موتور راکت‌ها، مخازن تحت فشار، لوله‌های شلیک موشک و ملخ هلی کوپتر بوده است. در آنجا نسبت استحکام به دانسیته بیشترین اهمیت را داراست و هدف این است که الیاف در جهت نیروی اعمالی آرایش داده شوند. از سوی دیگر در بخش تجاری نگاهها بسوی کاهش قیمت تولید و استحکام متوسط می‌باشد. سیستم الیاف شیشه - رزین پلی استر به همراه تجهیزات ساده پیچش، برای سرعت بالای تولید و قیمت پایین با موفقیت بکار گرفته شده‌اند. برای تانکهای ذخیره سازی، لوله‌های انتقال مواد مورد مصرف در صنایع شیمیایی، فنرها، محور خودرو و پره‌های توربین بادی از مواد مقاوم شیمیایی و گریدهای الکتریکی استفاده می‌شود.

### مقایسه روش‌های شکل‌دهی

در جداول ذیل، متغیرهای فرآیندی، مزایا و معایب، قیمت و مواد مورد مصرف در فرآیندها با هم مقایسه شده است .

مزایا و معایب فرآیندهای مختلف شکل دهی

معایب	مزایا	فرآیند شکل دهی
<p>وابستگی به مهارت کارگر</p> <p>سرعت کم تولید</p> <p>ضعف در کنترل وزن و ضخامت</p> <p>کیفیت سطح فقط در یک طرف قطعه</p> <p>باز بودن قالب و آلودگی محیط زیست</p> <p>وابستگی زیاد به مهارت کارگر</p> <p>کنترل ضعیف ضخامت قطعه</p> <p>کیفیت سطح فقط در یک طرف قطعه</p> <p>امکان کاربرد انیاف با آرایش اتمافی</p> <p>باز بودن قالب و آلودگی محیط زیست</p> <p>وابسته به مهارت کارگر</p> <p>کندی سرعت</p> <p>هزینه اولیه بالا</p>	<p>سرمایه گذاری اندک</p> <p>امکان اتصال قطعات چند تکه بعد از ساخت</p> <p>عدم وجود محدودیت اندازه</p> <p>ارزانی مواد</p> <p>سرعت بالای تولید</p> <p>ارزانی تجهیزات</p> <p>امکان تولید قطعات بزرگ</p> <p>کیفیت بسیار بالا</p> <p>درصد انیاف بالا</p> <p>درصد حباب پایین</p> <p>کنترل پخت</p> <p>قالب بسته</p>	<p>لایه گذاری دستی</p> <p>پاشش رزین</p> <p>اتوکلاو</p>
<p>قالب باز</p> <p>محدودیت در شکل قطعات تولیدی</p> <p>محدودیت عملی در طرح پیچش</p>	<p>خواص مکانیکی عالی</p> <p>سرعت بالای تولید</p> <p>کنترل خوب آرایش انیاف</p> <p>کنترل خوب ضخامت</p> <p>کنترل خوب درصد انیاف</p> <p>سطح داخلی خوب</p> <p>امکان انجام فرآیند پیوسته</p>	<p>رشته پیچی</p>
<p>گرانی تجهیزات</p> <p>درصد انیاف نسبتاً پایین</p> <p>گرانی تجهیزات</p>	<p>سرعت تولید بسیار بالا</p> <p>امکان ساخت طرحهای پیچیده</p> <p>تلورانس مناسب</p> <p>قالب بسته</p> <p>کیفیت سطح مناسب در دو طرف قطعه</p> <p>دقت ابعادی</p> <p>محدوده وسیع شکل هندسی</p> <p>امکان ساخت سازههای ساندویچی</p> <p>قالب بسته</p> <p>خواص مکانیکی بالا</p> <p>سرعت بالای تولید</p> <p>تلورانس پایین ابعادی</p> <p>پیوستگی در فرآیند</p>	<p>BMC و SMC</p> <p>RTM</p> <p>پلتر وزن</p>



مقایسه پارامترهای فرآیندی در روشهای شکل دهی

سرعت تولید	دماي عملياتي	فشار عملياتي	محدودة ابعاد m <sup>2</sup> الياف	درصد حجمي الياف	
۱-۲ در روز با يك قالب	دماي محيط	فشار محيط	۰/۲۵-۲۰۰۰	۰/۱۲-۰/۵	لايه گذاري دستي
۱-۲ در روز با يك قالب	دماي محيط	فشار محيط	۲/۰-۱۰۰	۰/۱۲-۰/۲۱	پاشش رزين
۱-۵ در روز با يك قالب	دماي محيط	فشار محيط	۰/۱-۱۰۰	۰/۵۵-۰/۷	رشته بيچي
۲-۳۰ قطعه در ساعت	۱۲۰-۱۵۰ °C	۵۰-۱۵۰ Bar	۰/۱-۲/۵	۰/۱۲-۰/۴	BMC و SMC
۱-۲ در ساعت با يك قالب	۲۰-۵۰ °C	حد اکثر ۲ Bar	۰/۲۵-۵/۰	۰/۱-۰/۴	RTM
۱۰-۶۰ m/h	۱۲۰-۱۵۰ °C	درون قالب متغير	تا عرض ۱/۵ متر	۰/۳-۰/۶۵	پلتروژن

مقایسه مواد مورد استفاده در فرآیندهای شکل دهی مختلف

مغزي	فيلر	رزينهاي متداول	شكل الياف	
فوم، سازه‌هاي لانه زنبوري	تا ۱۰% حجمي	پلي استر، فنوليك، اپوكسي	اکثر اشکال	لايه گذاري دستي
فوم، بالسا	معمول نيست	پلي استر، وينيل استر	Roving خرد شده	پاشش رزين
فوم، بالسا	مي‌توان استفاده کرد	پلي استر، وينيل استر، اپوكسي	Roving	رشته بيچي
-	تا ۴۰%	پلي استر، وينيل استر، اپوكسي	Roving خرد شده	BMC و SMC
فوم، بالسا	معمول نيست	پلي استر، فنوليك، اپوكسي	انواع مختلف	RTM
-	تا ۲۵% وزني	پلي استر، وينيل استر، اپوكسي	تمام اشکال	پلتروژن

مقایسه فاکتورهای هزینه‌ای در فرآیندهای مختلف:

هزینه تجهیزات	هزینه ابزار	هزینه مواد	هزینه تولید	
بسیار پایین	پایین	متوسط	بالا	لایه گذاری دستی
متوسط	پایین	پایین	پایین	پاشش رزین
متوسط تا بالا	متوسط	پایین	پایین	رشته پیچی
بسیار بالا	بسیار بالا	پایین	بسیار پایین	BMC و SMC
متوسط	متوسط	متوسط	متوسط	RTM
بالا	بالا	متوسط	پایین	پلتروژن