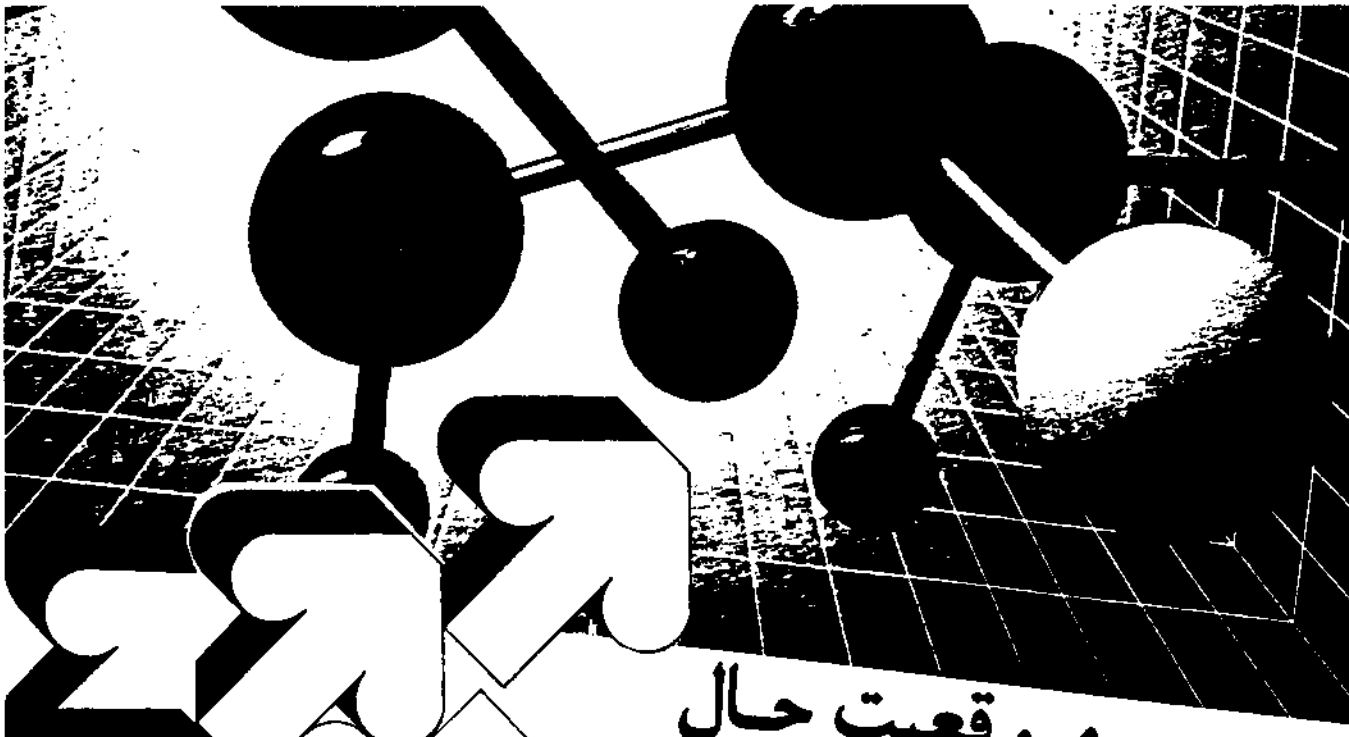


بررسی موقعیت حال و روندآیندهٔ کامپوزیتهای پلاستیکی تقویت شده

چکیده

تولید پلاستیکهای تقویت شده به‌طور پیوسته بعد از جنگ جهانی دوّم رو به‌افزایش نهاده است. و رشدی به‌میزان ۸ تا ۱۲ درصد در سال طی دههٔ آینده برای آن پیش‌بینی می‌شود. کامپوزیتهای پیشرفته بیشترین گسترش را به‌علت تقاضای زیاد در بازار صنایع فضایی و نظامی، نشان داده‌اند. نفوذ کامپوزیتهای پیشرفته در بازارهای بزرگ هنوز روی نداده است. امّا این اعتقاد وجود دارد که پیشرفت در زمینه مواد و ماشین‌آلات تولید انبوه این نوع کامپوزیتها را تسریع خواهد کرد. کامپوزیتهای با حجم بالا (*High – Volume Composites*) سرعت رشد کمتری خواهند داشت امّا تقاضا برای این مواد به‌طور پیوسته افزایش خواهد یافت. وسایل حمل و نقل زمینی بزرگترین بازار مصرف برای این نوع کامپوزیتها باقی خواهند ماند و این بازار برای کامپوزیتهای با حجم زیاد، همچنان سریعترین رشد را به خود اختصاص خواهد داد. موقعیت فعلی و روند آیندهٔ کاربرد الیاف تقویت کنندهٔ مختلف و رزینهای ماتریس در این مقاله ارائه شده است. ضمناً موانع موجود در سر راه توسعه پلاستیکهای تقویت شده نیز مورد بحث قرار گرفته‌اند.

Survey of Current Status and Trends in Reinforced Plastics Composites.

Polymer composites, December 1987, Vol. 8,No.6

By: T. VU – KHANH

Trans: M. Mehrabzadeh

ترجمهٔ: مهندس محمود محرابزاده

واژه‌های کلیدی

کامپوزیتها، پلاستیکهای تقویت شده، میزان رشد کامپوزیتها، کامپوزیتهای پیشرفته، کامپوزیتهای با حجم بالا

Key Words:

Composites, Reinforced plastics, Growth rate of composites, Advanced composites, High volume composites.

مقدمه:

پس از گذشت یک دوره رشد مداوم مصرف پلاستیکها، امروزه حجم پلاستیکها از حجم فولاد خام تجاوز می‌کند ولی از اوایل دهه هفتاد پیش بینیهای انجام شده که توسط برون‌یابی داده‌های گذشته شده همواره خوش‌بینانه بوده است. شکاف بین عرضه و تقاضای پلاستیکها در غرب همچنان گسترده‌تر می‌شود. فشار روی شرکتها آنها را ناگزیر کرده است تا توجه خود را بر موادی متمرکز کنند که کارکرد بهتری ارائه می‌دهند. بدیهی است که بازار بالقوهٔ آینده برای پلاستیکها در زمینهٔ جایگزینی مواد فلزی مرسوم در قسمتهای ساختاری پیدا خواهد شد و به منظور دستیابی به این هدف باید خواص مکانیکی پلاستیکها بهبود یابد. جاذبترین عقیده برای انجام این منظور افزودن تقویت کننده‌های سخت‌تر و محکمتر بوده است. از جنگ جهانی دوّم تاکنون، تولید پلاستیکهای تقویت شده به‌طور پیوسته افزایش یافته است. امروزه فعالیتهای چشم‌گیری در صنعت پلاستیکهای تقویت شده وجود دارد.

در این مقاله موقعیت فعلی پلاستیکهای تقویت شده در بازارهای مختلف بررسی می‌شود، و روند مصرف کامپوزیتهای پلاستیکی برای کاربردهای مختلف مشخص می‌گردد و سرعت رشد تقاضایی که برای این مواد در دههٔ آینده پیش‌بینی می‌شود، ارائه می‌گردد. نکات زیر مورد بررسی قرار خواهند گرفت:

- بررسی عمومی مصرف و سرعت رشد صنعت پلاستیکهای تقویت شده.
- روند حال و آینده در کاربرد کامپوزیتهای با کارکرد بالا (*High Performance Composites*).
- روند حال و آینده در کامپوزیتهای با حجم بالا.
- موانع موجود در سر راه توسعه پلاستیکهای تقویت شده.

مصرف و سرعت رشد پلاستیکهای تقویت شده.

جدول ۱ مصرف پلاستیکهای تقویت شده و تقویت نشده را برای مناطق مختلف در سال ۱۹۸۵ نشان می‌دهد. در حال حاضر، مصرف جهانی پلاستیکها حدود ۶۰میلیون تن است که پلاستیکهای تقویت شده کمتر از ۵ درصد آن را به‌خود اختصاص داده‌اند و ۵۰ درصد کل تولید صنایع پلاستیکی را آمریکا در اختیار دارد. مصرف سرانه پلاستیکهای تقویت شده و سایر پلاستیکها در نواحی مختلف صنعتی در جدول ۲ نشان داده شده است. با توجه به‌این جدول می‌توان مشاهده کرد که میزان مصرف در کشورهای مختلف به‌طور قابل ملاحظه‌ای متفاوت است، و کاملاً محسوس است که آمریکا در مصرف پلاستیکها به‌خصوص پلاستیکهای تقویت شده، جلودار است و تقریباً دو برابر اروپای غربی و ژاپن مصرف دارد.

جدول ۱ ــ مصرف جهانی پلاستیکهای تقویت شده و سایر پلاستیکها در سال ۱۹۸۵ [1-3]

	میلیون تن		
	آمریکا	اروپای غربی	ژاپن (تخمینی)
پلاستیک‌های تقویت شده	۱/۱	۰/۸	۰/۳
سایر پلاستیکها	۲۳	۲۵	۱۱

جدول ۲ ــ مصرف سرانه پلاستیکهای تقویت شده و سایر پلاستیکها در نواحی صنعتی در سال ۱۹۸۵ (برحسب کیلوگرم)

	آمریکا	اروپای غربی	ژاپن
پلاستیک‌های تقویت شده	۹۲	۷۱	۷۳
سایر پلاستیکها	۴/۳	۲/۲	۲/۵

در طول دهه گذشته، سرعت رشد سالانه جهانی سایر پلاستیکها و پلاستیکهای تقویت شده بطور متوسط بترتیب حدود ۶ و ۸ درصد بوده است (جدول ۳). این سرعت رشدها به‌طور قابل ملاحظه‌ای، در مقایسه با

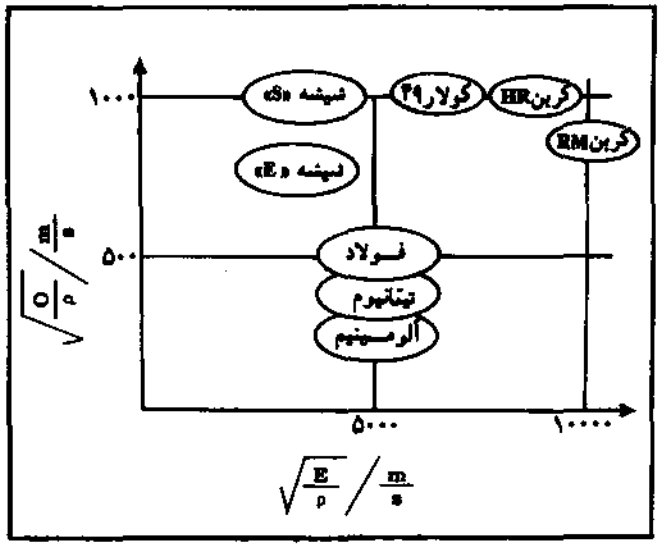
جدول ۳ ــ جدول میانگین میزان رشد سالانه جهانی پلاستیکهای تقویت شده و سایر پلاستیکها [8-4]

	۱۹۸۵ ــ ۱۹۷۵	۱۹۹۵ ــ ۱۹۸۵
پلاستیکهای تقویت شده	٪۸	۸ تا ۱۲٪
سایر پلاستیکها	٪۶	٪۴

سرعت رشد منطقی صنایع پلاستیک از ۱۹۵۰ تا ۱۹۷۰ کاهش یافته است. ولی باید توجه کرد که این کاهش تقاضا برای پلاستیکها و محصولات وابسته به آن نسبت به‌سایر موارد بعد از دو بحران انرژی کمتر جدی بوده است، و به‌نظر می‌رسد که در دهه آینده تخمینها باز هم محافظه‌کارانه‌تر باشد. سرعت رشد سالانه فقط حدود ۴ درصد برای مصرف تمام پلاستیکها، انتظار می‌رود. و این بدین معنی است که مقدار مصرف فعلی، تا آخر قرن حاضر به‌دو برابر نخواهد رسید. با وجود این چشم انداز تیره، برای پلاستیکهای تقویت شده رشد قابل توجهی بین ۸ تا ۱۲ درصد در هر سال تا سال ۱۹۹۵ پیش‌بینی می‌شود.

اولین عاملی که در توسعه پلاستیکهای تقویت شده سهم داشته است نسبت کارایی پردانسیته مواد است. افزودن الیاف تقویت کننده، استحکام و سختی پلاستیکها را افزایش می‌دهد. شکل ۱ ــ مقایسه‌ای بین

مواد فلزی مرسوم و کامپوزیتهای معمول یک جهتی با ماتریس اپوکسی را نشان می‌دهد. برحسب استحکام ویژه و سفتی (که به‌صورت استحکام و مدول تقسیم بردانسیته مواد تعریف شده است) کامپوزیتهای پلیمری می‌توان کارکرد بهتری را ارائه داد.



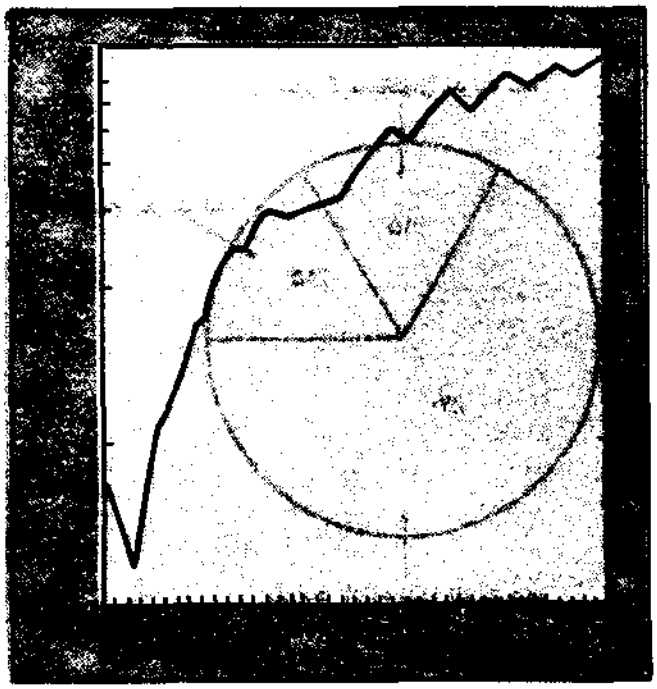
شکل ۱ ــ مقایسه استحکام ویژه و سفتی مواد فلزی مرسوم و کامپوزیتهای یک جهتی معمولی با ماتریس اپوکسی [13]

عامل دیگری که مواد کامپوزیتی را جالب توجه می‌سازد این است که می‌توان آنها را جفت و جور کرد تا از شرایط ویژه‌ای برخوردار شوند بنابراین کارکرد محصول نهایی را می‌توان به طور مؤثری بهینه کرد. علاوه بر این، رفتار مواد ناایزوتروپ را می‌توان جستجو کرد تا به اعمالی دست یافت که با مواد مرسوم قابل دستیابی نیستند.

پلاستیکهای تقویت شده در مراحل بسیار اولیه توسعه صنعت پلاستیکها به وجود آمدند و تولید آنها به طور پیوسته رو به افزایش است. حجم تولید پلاستیکهای تقویت شده توسط ایالات متحده از جنگ جهانی دوّم تا کنون در شکل ۲ نشان داده شده است. پلاستیکهای تقویت شده بواسطه مزایایی که در خواص دارند، کاربردهای بسیاری در بازارهای مختلف پیدا کرده‌اند. الگو مصرف پلاستیکهای تقویت شده در امریکا و در سال ۱۹۸۵ در جدول ۴ خلاصه شده است. بزرگترین بازار برای این مواد کاربرد آنها در وسایل حمل و نقل زمینی است که بیشتر از ۲۵ درصد کل مصرف را به خود اختصاص داده‌اند. دومین بازار مصرف این مواد که ۱۹/۵ درصد است مربوط به کاربردهای ساختمانی است.

کاربرد این مواد در ساخت تجهیزاتی که در مقابل خورندگی مقاوم‌اند، مقام بعد را در اختیار دارد که ۱۴/۴ درصد است. جمعاً ۵۹ درصد کل مصرف را این سه صنعت به خود اختصاص داده‌اند.

متداولترین رزینی که در کامپوزیتها به عنوان ماده ماتریس به کار می‌رود پلی‌استر اشباع نشده است. این امر به خاطر ارزانی و شکل‌پذیری



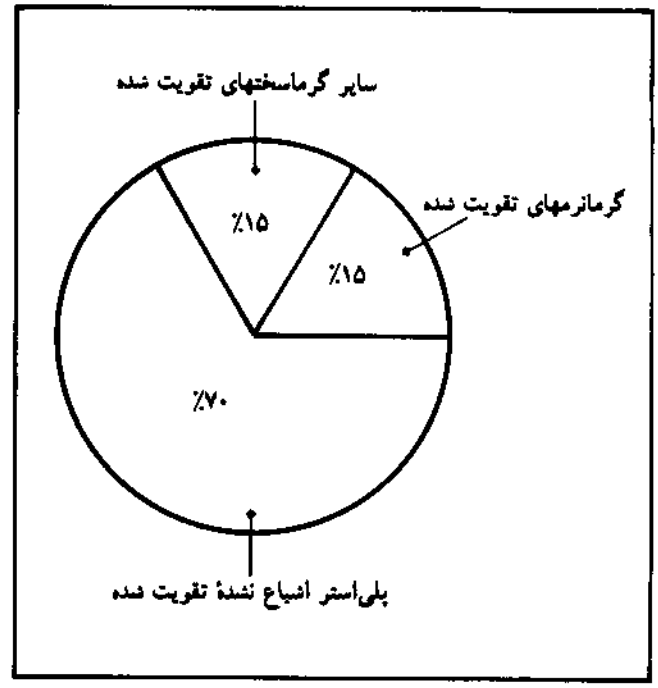
شکل ۲ ــ

جدول ۴ ــ الگوی مصرف پلاستیکهای تقویت شده در آمریکا در سال ۱۹۸۵ [11]

بازار	میلیون(کیلوگرم)	کل (٪)
هواپیما	۱۸	۱/۶
وسایل/تجهیزات تجاری	۶۵	۵/۶
ساختمان	۲۲۲	۱۹/۵
محصولات مصرفی	۷۵	۶/۶
تجهیزات مقاوم درمقابل خورندگی	۱۶۳	۱۴/۴
الکتریکی/الکترونیکی	۱۰۲	۹/۰۰
دریایی	۱۶۲	۱۴/۳
حمل‌ونقل(زمینی)	۲۸۵	۲۵/۱
سایر کالاها	۴۳	۳/۸
کل	۱۱۳۵	۱۰۰/۰

آن برای ساخت سازه‌های بزرگ است. شکل ۳ سهم بازار کامپوزیتهای با ماتریس پلیمری مختلف را نشان می‌دهد، پلی‌استر اشباع نشده حدود ۷۰ درصد کل مصرف را در برمی‌گیرد و قسمت باقیمانده بین سایر رزینهای گرما سخت و گرمانرم به طور مساوی تقسیم می‌شود.

الگوی مصرف کامپوزیتهای بر مبنای پلی‌استرهای اشباع نشده در جدول ۵ نشان داده شده است. همان طور که انتظار می‌رود این میزان نیز



شکل ۳ ــ الگوی کاربرد رزینها در کامپوزیتها [3و 2]

مشابه پلاستیکهای تقویت شده در جدول ۴ است.

با وجود این تفاوتهایی دیده می‌شود. کامپوزیتهایی بر مبنای پلی‌استر اشباع نشده که در وسایل حمل و نقل زمینی به کار می‌روند در ردهٔ چهارم قرار دارند در صورتیکه صنایع دریایی و محصولات مقاوم در مقابل خورندگی در مقام دوّم بعد از مصارف ساختمانی قرار گرفته‌اند.

جدول ۵ ــ الگوی مصرف کامپوزیتها بر مبنای پلی‌استرهای اشباع نشده در سال ۱۹۸۵ [1]

بازار	میلیون (کیلوگرم)	کل (٪)
هواپیما/ هوا ــ فضا	۱۴	۱/۸
وسایل/ تجهیزات‌تجاری	۴۲	۵/۲
ساختمان	۲۰۰	۲۴/۹
محصولات مصرفی	۶۶	۸/۲
تجهیزات مقاوم درمقابل خورندگی	۱۶۰	۲۰/۰
الکتریکی	۲۴	۳/۰
دریایی	۱۶۰	۲۰/۰
حمل نقل (زمینی)	۱۱۰	۱۳/۶
سایر کالا	۲۶	۳/۲
کل	۸۰۲	۱۰۰/۰

در گرمانرمهای تقویت شده متداولترین رزینهای مصرفی نایلون و پلی‌پروپیلن هستند و بیشتر از ۵۰ درصد کل تولیدات را به خود اختصاص می‌دهند. ۲۰ درصد را پلی‌استرهای گرمانرم در اختیار دارند و تولید باقیمانده مربوط به سایر گرمانرمهاست.

از نظر فرایند، حدود ۶۴ درصد حجم کل پلاستیکهای تقویت شده به وسیله روشهای قالب‌گیری باز (*Open Molding*)، مانند روشهای افشاندن، لایه‌گذاری دستی، رشته‌پیچی، پولتروژن و غیره ساخته می‌شوند. و ۳۶ درصد باقیمانده کل تولید به روش قالب‌گیری بسته (*Closed Molding*)، مانند قالب‌گیری تزریقی، قالب‌گیری فشاری، و غیره تهیه می‌شوند.

در بین سه الیاف تقویت کنندهٔ معمولی، شیشه، کربن و آرامید، الیاف شیشه از نظر حجم مصرف از همه متداولتر است (جدول ۶). و این امر به خاطر ارزانی قیمت و کارائی قابل توجه الیاف شیشه است. مشخصات عمومی آنها در جدول ۷ ارائه شده است. نوع ماتریس و الیاف بر مبنای کارائی و هزینه مورد نظر انتخاب می‌شوند.

جدول ۶ ــ مقدار فروش الیاف تقویت‌کننده توسط آمریکا [12] تخمین صنعتی بر حسب تن

نوع	۱۹۸۴	۱۹۸۵	۱۹۸۶
شیشه	۳۰۰،۰۰۰	۳۱۵۰۰۰	۳۲۰۰۰۰
آرامید	۱۴۰۰	۱۷۵۰	۲۱۸۵
کربن	۱۲۰۰	۱۵۶۰	۲۰۰۰

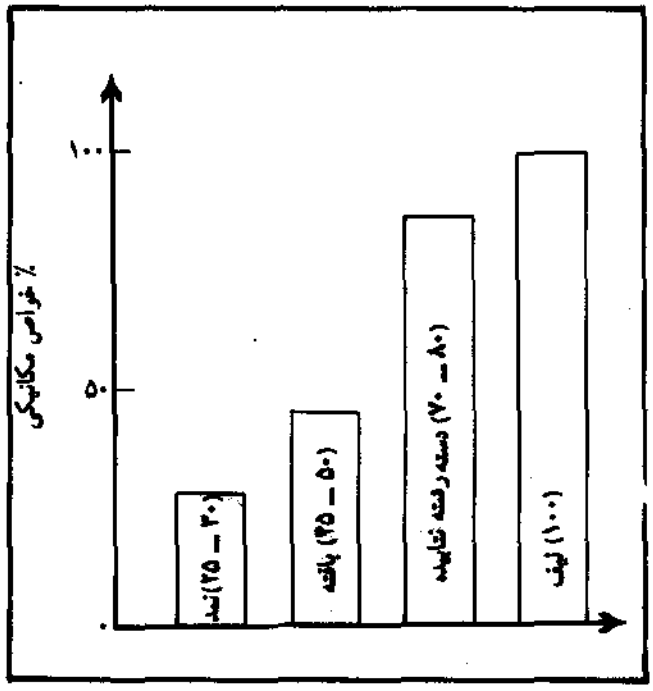
شکل تقویت کننده نیز یکی از عاملهای مهم است، و روش فرایند را تعیین می‌کند و اثر زیادی روی کارائی محصول نهایی دارد. شکل ۴ اثر شکل الیاف پیوسته تقویت کننده روی خواص مکانیکی کامپوزیت را نشان می‌دهد. اگر کارائی الیاف را ۱۰۰ درصد فرض کنیم، شکل دسته رشته نتابیده (*Roving*) الیاف می‌تواند ۷۰ تا ۸۰ درصد کارائی الیاف را به کامپوزیت بدهد و شکل پارچه بافته شدهٔ آن ۴۵ تا ۵۰ درصد و شکل نمدی الیاف تنها ۲۵ تا ۳۰ درصد کارائی الیاف را به کامپوزیت خواهند داد. به طور کلی، هزینه ساخت کامپوزیتها متناسب با میزان کارایی آنها است.

پلاستیکهای تقویت شده غالباً به دو دسته تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از: کامپوزیتهای با کارایی بالا (پیشرفته): (*High Performance Composites*) و کامپوزیتهای با حجم بالا (*High Volume Composites*) اصطلاح کامپوزیتهای پیشرفته برای موادی با صلبیت ویژه و استحکام بیشتر نسبت به مواد فلزی مرسوم به کار می‌رود. ویژگی این دسته از کامپوزیتها این است که عموماً از الیاف پیوسته ساخته می‌شوند. اصطلاح کامپوزیتهای با حجم بالا برای سایر پلاستیکهای

جدول ۷ ــ مشخصات عمومی مکانیکی الیاف معمولی [11]

		دانسیته ($10^3 Kg/m^3$)	قطر لیف (μm)	استحکام (MPa)	مدول کشسانی (GPa)	افزایش طول تا پارگی
شیشه	E	۲/۵۴	۳/۸ـ۱۳	۳۲۰۰ـ۳۹۰۰	۷۳	۴/۸
	S	۲/۴۸		۴۴۰۰ـ۴۹۰۰	۸۶	۵/۴
آرامید	۲۹	۱/۴۴	۶ـ۱۲	۲۷۰۰	۶۰	۴
	۴۹	۱/۴۵			۱۳۰	۲/۱
کربن	بااستحکام‌زیاد	۱/۷۸	۸	۲۳۰۰ـ۳۱۰۰	۲۱۰	۰/۹ـ۱/۲
	بامدول بالا	۱/۸۷		۱۷۰۰ـ۱۲۰۰	۳۵۰	۰/۵

تقویت شده به کار برده می‌شود. این مواد اساساً در حجم زیاد در بازار مصرف می‌شوند، و کارائی آنها بسیار کمتر از دستهٔ قبلی است. ضریب اطمینان مورد نیاز در طراحی این کامپوزیتها عموماً بسیار زیاد است (بیشتر از ۵).



شکل ۴ ــ اثر شکل تقویت کننده روی کارایی مکانیکی کامپوزیتها [13]

کامپوزیتهای پیشرفته

کاربرد اصلی این کامپوزیتها به واسطه هزینه بالا، دانسیته کم و کارائی مکانیکی خوب، در صنایع هوا ــ فضا است. و همانطور که در جدول ۸ نشان داده شده است حدود ۴۰ درصد کل این مواد به این صنعت اختصاص یافته است. وسایل ورزشی با ۳۰ درصد دومین بازار را دارد و بعد از آنها محصولات صنعتی (۲۰ درصد) و قطعات اتوموبیل و سایر موارد (۱۰ درصد) قرار دارند.

جدول ۸ ــ بازار جهانی برای کامپوزیتهای پیشرفته [13]

هواپیما / هوا ــ فضا	٪۴۰
مصارف تفریحی	٪۳۰
محصولات صنعتی	٪۲۰
اتوموبیل و سایر کالاها	٪۱۰

این طرح مصرف کامپوزیتها در تمام نواحی یکسان نیست و بستگی زیادی به صنعت نظامی آن منطقه دارد. جدول ۹ مصرف کامپوزیتهای پیشرفته را در سه منطقه اصلی صنعتی نشان می‌دهد. این جدول نشان می‌دهد که کاربرد کامپوزیتهای پیشرفته در صنایع

جدول ۹ ــ مصرف کامپوزیتهای پیشرفته در نواحی صنعتی [13]

مصرف	اروپای غربی	آمریکا	ژاپن
هواپیما / موشک	٪۸۰	٪۶۰	٪۱۰
مصارف تفریحی	٪۱۰	٪۱۰	٪۸۰
سایر کالاها	٪۱۰	٪۱۰	٪۱۰

هواپیماسازی و صنایع موشکی در اروپای غربی، ۸۰ درصد کل مصرف، در امریکا ۶۰ درصد و در ژاپن فقط ۱۰ درصد است. از طرف دیگر، فقط ۱۰ درصد کامپوزیتهای پیشرفته در اروپای غربی برای کاربردهای ورزشی مصرف می‌شوند، درصورتیکه این مقدار در امریکا به ۳۰ درصد و در ژاپن به ۸۰ درصد می‌رسد.

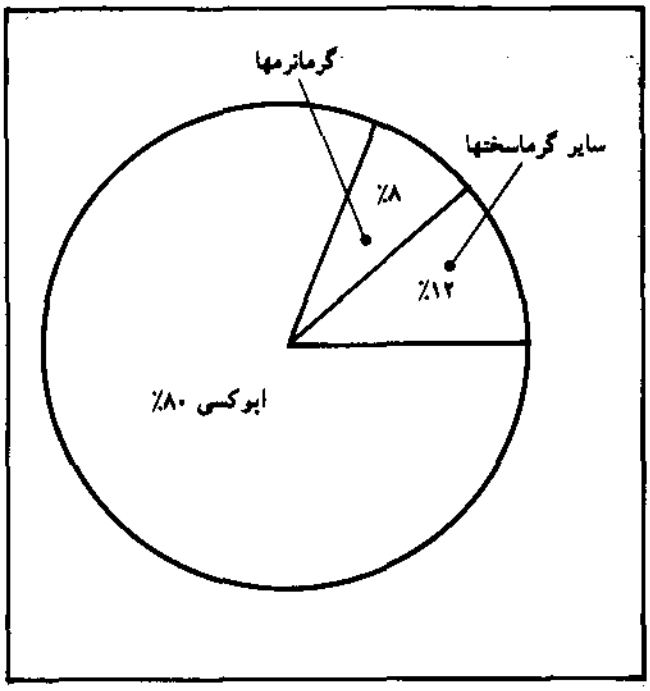
طبق مطالعاتی که اخیراً انجام شده است [14]، برای بازار کامپوزیتهای پلیمری پیشرفته رشدی معادل ۱۶ درصد در هر سال طی دهه آینده پیشنهاد شده است. سرعت رشد معتدل‌تری، حدود ۷ درصد، در گزارش دیگری [15] پیش‌بینی شده است. درهر دو مطالعه، بیشترین فرصت برای بازار صنایع هوا ــ فضا پیش‌بینی می‌گردد. میزان رشد سالیانه در این مطالعات برای کاربردهای هوا ــ فضا به ترتیب ۲۲ درصد و ۸/۵ درصد پیشنهاد شده است. اگرچه در این پیش‌بینی‌ها تفاوت فاحشی به چشم می‌خورد ولی از هر دو گزارش این طور برداشت می‌شود که نفوذ کامپوزیتهای پیشرفته در تولید انبوه هنوز اتفاق نیفتاده است و کاربردهای صنایع هوا ــ فضا هنوز هم بیشترین مصرف را خواهند داشت. بهرحال، عقیده بر این است که عامل زمان یک عامل مهم و تعیین کننده است. پیشرفتهای اخیر در ماشین‌آلات و مواد، تولید انبوه کامپوزیتهای پیشرفته را تسریع خواهند کرد. تحصیل تجارت تثبیت شده در کامپوزیتهای پیشرفته به وسیله تولیدکنندگان اصلی پلاستیکها [16] نیز تعیین کنندهٔ آینده است.

پیشرفت پیش‌بینی شده عمدتاً به واسطه تقاضاهای فزاینده از سوی صنایع هواپیماسازی مسافربری و هلیکوپترسازی است [15]. درحال حاضر، هواپیماهای تجارتی مانند بوئینگ ۷۵۷ و ۷۶۷ شامل فقط حدود ۴ درصد وزنی کامپوزیتهای پیشرفته است. اگر انتخاب کامپوزیتها مد نظر قرار گیرد، می‌توان انتظار داشت که ظرف ده سال آینده، پلاستیکهای تقویت شده ۶۵ درصد از مواد را به خود اختصاص دهند. درصورتی که آلیاژهای آلومینیم نیز موردنظر قرار گیرند باز هم ۲۵ درصد بازار مواد دراختیار کامپوزیتها قرار خواهد گرفت. بهرحال، افزایش کاربرد کامپوزیتها در هواپیماهای نظامی ادامه خواهد داشت. در دهه آینده شتابی در کامپوزیتهای پیشرفته در قسمتهای اصلی سازه‌ای مشاهده خواهد شد. ساخت کامل بدنه از کامپوزیتها توسط تولیدکنندگان هلیکوپتر توسعه یافته است. علاوه بر مزیت کاهش وزن، با کاربرد کامپوزیتها، هزینه ساخت نیز کمتر می‌شود. اکنون فرایندهایی مانند رشته پیچی (*Filament winding*) برای تولید بدنه کامل هواپیما با استفاده از مراحل تولید معدود، مورد مطالعه قرار گرفته است.

باتوجه به توسعه تکنولوژی در صنایع هوا ــ فضا انتظار می‌رود که تولید کامپوزیتهای پیشرفته وارد بازار تولیدات انبوه نیز بشود. ولی، هزینه کم و تکنولوژیهای با تولید بالا برای سرعت بخشیدن به پذیرش عمومی کامپوزیتهای پیشرفته در سایر بازارها مورد نیاز است. نمونه‌های بسیاری از کاربرد کامپوزیتهای پیشرفته برای قطعات اتوموبیل وجود دارد، قطعاتی مانند کمک فنرها و میل فرمان که به‌وسیله رشته پیچی ساخته می‌شوند و اجزاء موتور و غیره. امروزه ساخت اتوموبیلهای تمام کامپوزیتی امکان‌پذیر است، امّا فقدان تجهیزات برای تولید انبوه، تولید آنها را ازنظر اقتصادی مقرون بصرفه نمی‌سازد. در این زمینه پیشرفتهایی حاصل شده و این اعتقاد وجود دارد که فرایندهای ساخت خودکار (مانند پولتروژن، قالب‌گیری با انتقال رزین، رشته پیچی و غیره) پتانسیل‌های بسیار امیدبخش دارند.

متداولترین الیاف تقویت کننده مورد استفاده در کامپوزیتهای پیشرفته شیشه نوع S، گرافیت و کولار (*Kevlar*) هستند. با توجه به کل مصرف جهانی کامپوزیتهای پیشرفته که حدود ۱۲ هزارتن است، ۴۲ درصد الیاف شیشه نوع S، ۳۰ درصد الیاف کربن و ۲۷ درصد الیاف آرامید در این کامپوزیتها مصرف می‌شوند. [14]

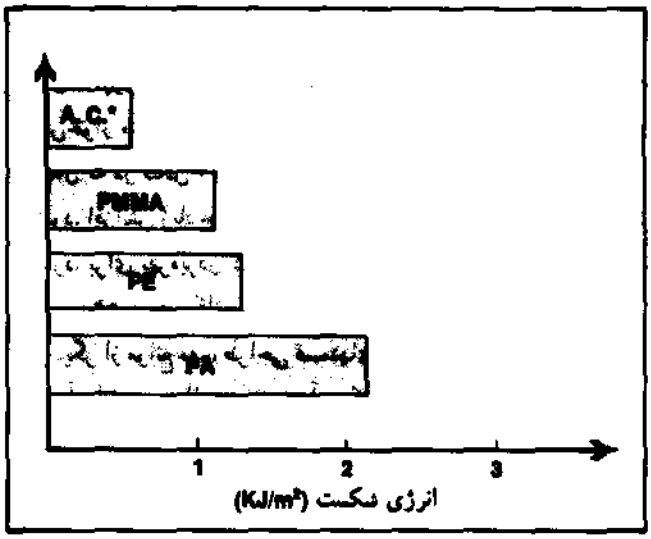
رزینهای متفاوتی با کارائی بالا می‌توان به عنوان مواد ماتریس در کامپوزیتهای پیشرفته به کاربرد ولی هنوز متداولترین آنها رزین اپوکسی است. شکل ۵ نسبت مصرف جهانی رزینهای ماتریس را در سال ۱۹۸۵ نشان می‌دهد. رزینهای اپوکسی ۸۰ درصد کل مصرف را به خود اختصاص داده‌اند و گرمانرمها و سایر گرما سختها به ترتیب ۸ و ۱۲ درصد را دراختیار دارند.



شکل ۵ــ رزینهای مصرفی به عنوان ماتریس در کامپوزیتهای پیشرفته [14]

پیش‌بینی می‌شود که مصرف گرمانرمها (مانند پلی اتر اترکتون، پلی سولفون، پلی (فنیلن سولفید) و غیره) بطور قابل ملاحظه‌ای در آینده نزدیک افزایش پیدا کند. این رزینها می‌توانند هزینه ساخت را پایین آورند و سختی و تحمل آسیب که عامل بهبود مهمی است، را بهبود به بخشند.

زیرا یکی از مهمترین صفتهای کامپوزیتهای پیشرفته شکنندگی آنها است. شکل ۶، میزان انرژی لازم فعلی برای لایه‌لایه‌سازی در کامپوزیتهای پیشرفته را در مقایسه با انرژی شکست بعضی گرمانرمهای مورد مصرف



شکل ۶: مقایسه بین انرژی لایه‌لایه شدگی جاری در کامپوزیتهای پیشرفته و انرژی شکست متداول گرمانرمها [31-28]

* . کامپوزیتهای گرماسخت پیشرفته: انرژی لایه‌لایه شدگی معمولی

متداول را نشان می‌دهد. جدول ۱۰ مقایسه‌ای بین رزینهای ماتریس گرماسخت و گرمانرم مورد مصرف در کامپوزیتهای پیشرفته را نشان می‌دهد. پلی اتر اترکتون (PEEK) و پلی اتیلن سولفون (PES)، نسبت به اپوکسی و پلی‌استر، افزایش طول تا پارگی حدود ۱۰ برابر بیشتر نشان می‌دهند. گرمانرمها، علاوه بر بهبود سختی، می‌توانند مقاومت در مقابل حلالها را بالا برند، هزینه ساخت را کاهش دهند، هزینه نگهداری مواد را پایین آورند و هزینه کنترل کیفیت را نیز کاهش دهد [19].

جدول ۱۰ ــ مقایسه رزینهای گرمانرم و گرماسخت انتخابی [17, 18]

خواص	PEEK	PES	اپوکسی مرسوم	پلی‌استر مرسوم
دانسیته (g/cc)	۱/۳۰	۱/۳۷	۱/۲۱	۱/۱۲
استحکام کششی (MPa)	۹۳	۸۴	۵۹ ــ ۷۴	۵۵ ــ ۷۰
مدول کششی (GPa)	۳/۸	۲/۸	۲/۸ ــ ۳/۵	۳/۴ ــ ۳/۹
افزایش طول تا پارگی (٪)	۱۰۰<	۴۰ ــ ۸۰	۸	۳

کامپوزیتهای با حجم بالا

اشکال فروش برای کامپوزیتهای با حجم زیاد، بعد از یک دوره توسعه شدید، کاهش یافت. در دههٔ آینده، سرعت رشد این دسته از مواد قابل مقایسه با رشد کامپوزیتهای با کارائی بالا نخواهد بود. توسعه مواد جدید که کارایی بیشتری نشان می‌دهند و بهبود نیروی تولید عوامل اصلی ادامه تقاضا برای این مواد هستند. تکنولوژی‌های جدید و بهبود خواص، کمک می‌کند تا کامپوزیتهای با حجم بالا کاربردهای جدیدی در بازارهای موجود پیدا کنند. مثلاً، در بخش دریایی، رشد کند در بازار قایقها یا کرجیهای بادی ادامه خواهد داشت و کاهش بیشتری نیز پیش‌بینی می‌شود. با وجود این کاربردهای جدید، در بازار قایقهای موتوری انتظار می‌رود.

قابلیت تغییر و اصلاح در طراحی که با ترکیبهای نوظهور رزین و تقویت‌کننده ایجاد می‌شود و ابداع ماشین‌آلات و فرآیندهای جدید می‌تواند کامپوزیتهای با حجم بالا را قابل رقابت با فلزات در بیشتر زمینه‌ها کند. در نتیجه، در بازارهای در حال افت مانند تجهیزات مقاوم در مقابل خورندگی و سازه‌ای، تقاضا برای پلاستیکهای تقویت شده به رشد خود ادامه خواهد داد. مثلاً، در وسایل خانگی و تجاری، پلاستیکهای جدید احتیاج به خلاقیت در طراحی دارند، در حالی که فرآیندهای جدید یک پارچه ساختن قطعات بزرگ را امکان‌پذیر می‌سازد. اگر چه هزینه ساخت پلاستیکهای تقویت شده هنوز بالاست. ولی این مواد را معمولاً می‌توان به گونه‌ای قالب‌گیری کرد یا شکل داد که قابلیت مونتاژ شدن به طور خودکار را پیدا کنند. خودکار شدن راههای جدید رسیدن به طراحی محصول را می‌طلبد که معمولاً هزینه سوار کردن را کاهش می‌دهد. این عامل مهمی در توسعه آینده خواهد بود.

در بین تعداد زیاد بازارهای مصرف، وسایل حمل و نقل بزرگترین بازار را برای کامپوزیتهای با حجم بالا داراست. و این وضعیت در دهه آینده بدون تغییر خواهد ماند. جستجوی مدام صنایع اتومبیل‌سازی برای وزن کم با استحکام بیشتر و مقاومت در مقابل خورندگی زیادتر، به همراه مراحل کمتر مونتاژ، پلاستیکهای تقویت شده را یک راه‌حل مناسب و جاذب ساخته است. جدول ۱۱ امکان کاهش وزن بوسیله کامپوزیتها در قسمتهای مختلف اتومبیل را نشان می‌دهد. علاوه بر سایر مزایا مانند کارایی بهتر و هزینه تولید کمتر، کاهش وزن نیز یک پارامتر مهم برای سازندگان اتومبیل است زیرا نتیجه مستقیم این امر کاهش مصرف در انرژی است.

جدول ۱۱ ــ امکان کاهش وزن با پلاستیکهای تقویت شده در اجزاء اتومبیل [20]

	کاهش وزن (٪)
اجزاء داخل موتور	۳۰ ــ ۷۰
ساختارهای حایل	۴۰ ــ ۷۵
متفرقه	۳۰ ــ ۵۰

پیش‌بینی شده که برای ۵ سال آینده، تعداد ماشینهایی که در آمریکای شمالی ساخته می‌شود، به میزان ثابتی برسد. برای تولید ماشین و کامیون رشدی برابر فقط ۲/۸ درصد در سال تا ۱۹۸۹ انتظار می‌رود. ولی سرعت رشد زیادی برای کاربرد پلاستیکهای تقویت شده پیش‌بینی می‌شود. استفاده از پلاستیکهای تقویت شده، قضیه انتخاب نیست بلکه به علت پیچیدگی طراحی و گزینش مواد مطرح است. به هرحال رشد کاربرد کامپوزیتها با حجم بالا ناهموار خواهد بود. صفحات خارجی و قسمتهای سازه‌ای بزرگ خوش آیندترین زمینه‌های کاربرد هستند.

گرما سختها از دسته رزینهایی هستند که هنوز برای ساخت کامپوزیتهای با حجم بالا ترجیح داده می‌شوند. جدول ۱۲ الگوی مصرف پیشنهادی کامپوزیتهای گرماسخت در اتوموبیلها را برای فرایندهای ساخت مختلف تا سال ۱۹۸۹ نشان می‌دهد. پیش‌بینی می‌شود که فرایند تقویت کردن *RIM* (قالب‌گیری تزریقی واکنشی)، (*Reaction Injection Molding*) سریعترین رشد را داشته باشد. قالب‌گیری فشاری برای کامپوزیتهای گرماسخت با حجم بالا به عنوان فرایند حاکم باقی خواهد ماند ولی طی دوره پیش‌بینی شده درصد کاربرد این فرایند از ۸۳ به ۷۲ درصد تقلیل خواهد یافت.

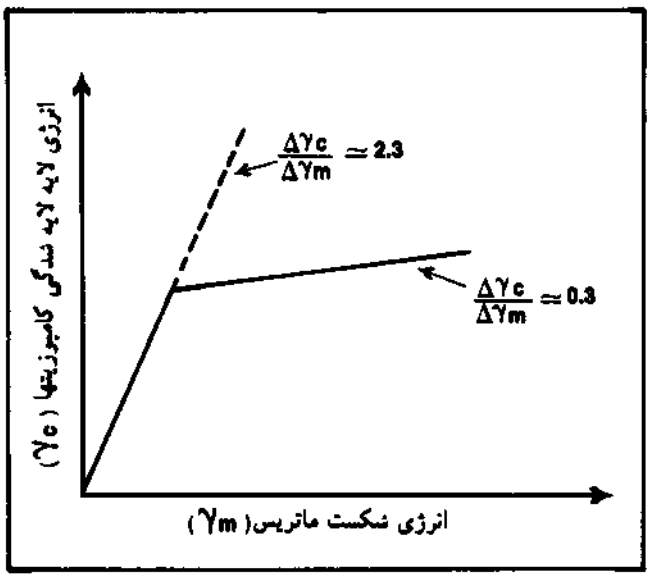
جدول ۱۲ ــ الگوی طرح‌ریزی شده مصرف (برحسب تن) کامپوزیتهای گرماسخت در اتوموبیلهای آمریکای شمالی برای فرایندهای ساخت متفاوت

فرایند	۱۹۸۵	۱۹۸۷	۱۹۸۹
فشاری	۱۱۳	۱۳۱	۱۶۶
تزریقی	۱۵	۱۴	۱۵
فشار کم	۹	۹	۹
رشته پیچی	۳	۵	۶
قالب‌گیری تزریقی واکنشی تقویت شده (*RRIM*)	۱۶	۳۲	۳۵
پولتروژن	۱۵۶	۱۹۱	۲۳۳

موانع موجود در سر راه توسعه پلاستیکهای تقویت شده

اگر چه پیش‌بینی‌ها خوش‌بینانه است ولی موانع بسیاری وجود دارد که باید بر آنها غلبه کرد تا توسعه سریع کاربرد کامپوزیتها امکان‌پذیر شود. این موانع را می‌توان به جنبه‌های فنی، دلایل صنعتی و اقتصادی و یا مشکلات نیروی انسانی و تربیت نیروی متخصص نسبت داد. بسته به بازار، ماهیت این موانع می‌تواند فرق داشته باشد.

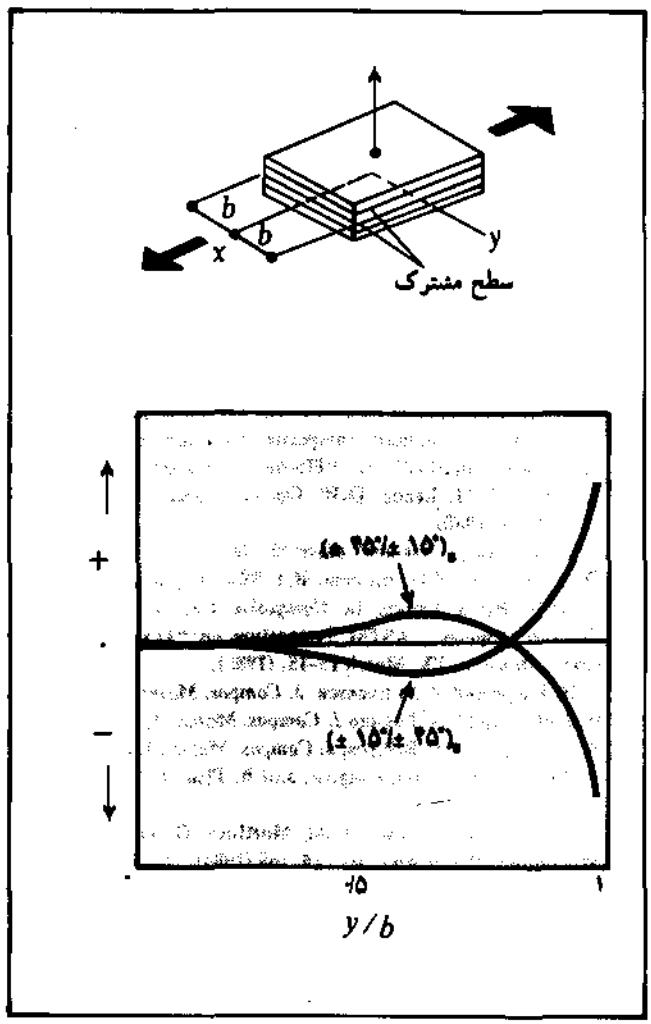
در کاربردهای هوا ــ فضا، مهمترین مشکلات به جنبه‌های فنی مربوط می‌شود. کامپوزیتهای پیشرفته دارای صلبیت و استحکام زیادی هستند اما مقاومت در مقابل ضربه آنها نسبتاً کم است. به واسطه ضعیف بودن چقرمگی (*toughness*) ماتریسها، کامپوزیتهای پیشرفته انرژی شکست بین لایه‌ای کمی از خود نشان می‌دهند. گرچه بنظر می‌رسد که گرمانرمها چکش‌خواری بهتری داشته باشند ولی کار بیشتری در زمینه توسعه آنها موردنیاز است. برای یک ماتریس شکننده، افزایش در چکش‌خواری ماتریس سبب افزایش قابل توجهی در انرژی شکست بین لایه‌ای کامپوزیت می‌شود. با وجود این، با یک ماتریس گرمانرم چکش‌خوار مشاهده شده است که سطوح انرژی شکست بین لایه‌ای همچنان که در شکل ۷ نیز نشان داده شده است، به مقادیر ثابتی نزدیک می‌شود. افزایش زیاد چقرمگی یک ماتریس موجب بهبود اندک کامپوزیت می‌شود. برای بهره‌بردن کامل از خاصیت چکش خواری گرمانرمها، بررسی بیشتر روی مکانیسم شکست کامپوزیتهای پیشرفته موردنیاز است. یکی دیگر از موانع مهم، طراحی قسمتهای کامپوزیت است که اساساً بر مبنای آزمایش و خطا به دست می‌آید، که در هزینه فرایند اثر می‌گذارد.



شکل ۷ ــ نمودار نشان دهندهٔ اثر چقرمگی ماتریس روی انرژی شکست بین لایه‌ای کامپوزیتهای پیشرفته [20]

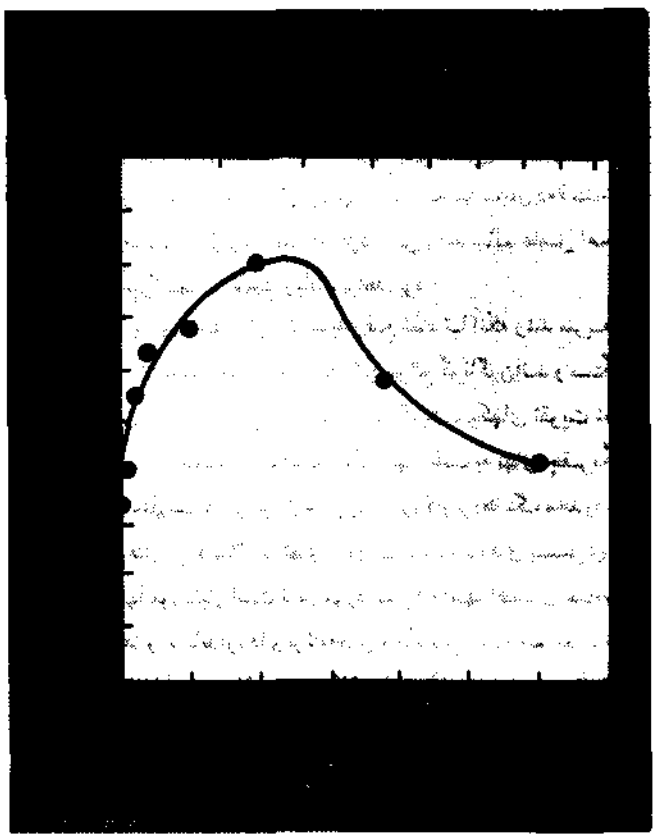
به نظر می‌رسد که در کاربردهای صنعتی، مقاومت در مقابل گرما و بازدارندگی شعله در بیشتر زمینه‌ها برای مصرف کامپوزیتهای پلاستیکی محدودیت‌هایی به وجود آورد. به هرحال، مانع اصلی احتمالاً مشکل نیروی انسانی است. مهندسین طراح در کاربرد مواد جدید مانند کامپوزیتها بسیار بی‌میل‌اند. کمبود دانش فنی و کافی نبودن دانش مربوط به رفتار مواد غالباً منجر به عدم قبول پلاستیکهای تقویت شده می‌گردد. ویژگیهای این مواد ترکیبی از دانش مواد و طراحی را می‌طلبد تا دستیابی به مصرف بهینه امکان‌پذیر گردد. علاوه بر این، فقدان برنامه‌های محاسباتی ساده نیز محدودیتی در راه توسعه است. نمونه‌ای از نیاز برای برنامه محاسباتی ساده در شکل ۸ نشان داده شده است. در مورد لایه‌های متقارن که شامل

لایه‌های (*Ply*) جهت یافته مشخص هستند، توسعه تنش بین لایه‌ای در اثر انقباض‌های ساده بستگی به ترتیب دسته رشته‌ها (*stackingsequence*) دارد. همانطوری که نشان داده شده است می‌تواند از حالت تنش به فشار تبدیل شود، که این امر روی استحکام لایه‌ها اثر خواهد گذاشت. بنابراین به منظور روشن شدن رفتار خاص مواد کامپوزیتی نیاز به یک برنامهٔ سادهٔ کامپیوتری است.



شکل ۸ ــ اثر ترتیب دسته رشته‌ها روی تنش معمولی لایه داخلی [23-25]

در تولید انبوه، هزینه هنوز یک عامل اصلی در بسیاری از کاربردهاست. به منظور کاهش هزینه ساخت و به وجود آوردن جاذبه بیشتر برای کامپوزیتها، تجهیزات بیشتر و مناسب برای تولید انبوه موردنیاز است. همچنین فقدان نیروی انسانی ماهر و متخصص نیز وجود دارد. آموزش طراحان و مهندسین باید به عنوان یکی از اولویت‌های ویژه صنایع کامپوزیتها و پلاستیکهای تقویت شده در نظر گرفته شود. کوشش بیشتر در کنترل کیفیت نیز لازم است. برنامه‌های آموزشی و روشها و استانداردهای کیفیت باید تکمیل شوند تا سطح کیفی مواد کامپوزیتی بهبود پیدا کند. مثلاً برای تعیین خصوصیات مقاومت در مقابل ضربه آزمایشهای ایزود (*Izod*) و چارپی (*Charpy*) به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. به هرحال، چون صلبیت پلاستیکها با افزایش تقویت کننده به شدت افزایش می‌یابد، غالباً انرژی ضربه‌پذیری اندازه‌گیری شده پایینتر خواهد بود حتی اگر انرژی واقعی شکست ضربه‌پذیری پلاستیکها بهبود یافته باشد. به عنوان مثال پلی‌پروپیلن تقویت شده با میکا در شکل ۹ نشان داده شده است. چقرمگی شکست پلی‌پروپیلن با افزودن میکا تا حدود ۲۰ درصد وزنی افزایش می‌یابد [26]، امّا در همان گسترهٔ غلظت آزمایش ایزود (*Izod*) کاهشی در انرژی شکست نشان می‌دهد [27].



شکل ۹ ــ اثر غلظت میکا روی حداکثر مقاومت در مقابل توسعه ترک در پلی‌پروپیلن تقویت شده با میکا

تعداد بسیاری از این موانع در برابر پذیرش عمومی کامپوزیتها را می‌توان نقل کرد. ولی مقصود از توضیحات بالا فقط نشان دادن موارد معمولی‌تر از عوامل متعددی است که از توسعه سریعتر پلاستیکهای تقویت شده جلوگیری می‌کنند.

خلاصه و نتیجه‌گیری

با پیش‌بینی میزان رشد سالانه ۸ تا ۱۲ درصد، کامپوزیتهای پلاستیکی تقویت شده یکی از بخشهای صنایع پلاستیک است که

سریعترین رشد را در دهه آینده خواهد داشت. به هر حال، توسعه پلاستیکهای تقویت شده یکنواخت نیست. کامپوزیتهای پیشرفته درخشانترین آینده، از نظر کارایی، را با سرعت رشد قابل توجه حدود ۱۶ درصد در سال را همچنان در اختیار خواهند داشت. این امر اساساً در نتیجه افزایش زیاد تقاضا در بازارهای هوا ــ فضا و نظامی است. انتظار می‌رود که مصرف کامپوزیتهای پیشرفته در صنایع هوا ــ فضا در سال ۱۹۹۵ دو برابر شود که این توسعه به واسطه افزایش کاربردهای جدید در هواپیماها و هلیکوپترهای غیرنظامی است. اگر چه نفوذ کامپوزیتهای پیشرفته در بازارهای با حجم زیاد هنوز روی نداده است، ولی به نظر می‌رسد که تولید انبوه بستگی به زمان دارد. پیشرفت در ماشین‌آلات و مواد سبب شتاب این روند خواهد شد، انتظار می‌رود که بازارهای با حجم زیاد بالقوهٔ بعدی برای این مواد، صنایع اتوموبیل است.

کامپوزیتهای با حجم زیاد توسعه آهسته‌تری خواهند داشت. ولی، تقاضا برای این مواد در برخی بخشها به طور قابل توجهی افزایش خواهد یافت. مثلاً کاربرد کامپوزیتها در اتوموبیلها، دست کم تا پایان دههٔ هشتاد، بیشتر از ۱۰ درصد در سال رشد خواهد کرد. این رشد سالم عامل اصلی برای توسعه کامپوزیتها با حجم زیاد خواهد بود.

موانع بسیاری وجود دارد که باید رفع شود تا آنکه رشد سریعتر پلاستیکهای تقویت شده امکان‌پذیر گردد. این موانع گوناگون‌اند و بستگی به علتهای بسیاری دارند. اولین نکته این است که پلاستیکهای تقویت شده نقاط ضعفی دارند. استحکام و صلبیت بالای آنها اغلب به بهای چقرمگی به دست می‌آید. مقاومت در برابر گرما در بسیاری کاربردها یک محدودیت است. به دلیل رفتار ویژه پلاستیکهای تقویت شده، داده‌های بیشتری در مورد خواص آنها موردنیاز است تا در مورد مصرف آنها اطمینان حاصل شود. فقدان کُدها و استانداردها و برنامه‌های محاسباتی ساده موانع آیندهٔ در برابر توسعه آنها است. علاوه بر مشکلات فنی، اکراه مهندسین طراح در استفاده از این مواد نیز یک عامل اصلی است. آموزش باید در اولویت قرار گیرد تا اینکه پذیرش این مواد سریعتر انجام گیرد.

REFERENCES

[1] *Trends in End Use Markets for plastics, January December 1985.*

[2] *"Modern Plastics International Special Report", Mod. Plast. Int., 16, 24 (1986)*

[3] *"Materials 86", Mod, Plast., 63, 43 (1986).*

[4] *"Industry news", Plastics in Building Construction*, 8, 2 (1985).

[5] H. Rudolph, *Polym.*, J., 17, 13 (1985).

[6] *Mod. Plast.* 53–63, (1976–1986)

[7] *Mod. Plast. Int.*, 11–16, (1981–1986).

[8] Markets Newsletter; *Chem. Week*, 20 (11), 37 (1985).

[9] M. Deltsch and V. Kollomitsh, Eds., "The Kline Guide to the Plastics Industry", C. H, Kline & Co. Inc., Fairfield, N.J., (1982).

[10] "Business Outlook", *Plast. World*, 43, 6 (1985).

[11] "Reinforced Plastics", *Trends in End-Use Markets for Plastics*, March. 0606 (1985).

[12] A.S. Wood, *Mod. Plast. Int.*, 15, 52 (1985).

[13] C. Bord. J.P. Durand M. Reyne. and M. Weiss. "Materiaux Composites, Evolution, Aspects Technico-Economiques", Etude 123221, Ministère de la Recherche et de l'Industrie, France, N° 80-2-37-0239 (DICTD).

[14] D. Prown "Advanced Polymer Composites", C.H. Kline & Co. Inc., Fairfield, N.J., (1985).

[15] "High Performance Composites", Frost & Sullivan Inc., New York, N. Y., (1985).

[16] A.S. Wood, Mod. Plast., 63, 44 (1986).

[17] C.K.Hall, "Continuous fibre reinforced thermoplastics in new generation randomes", Int. Conf. Fibre Reinforced Composites 84, pp. 19.1–19.12, Liverpool, England, 3–5 April (1984).

[18] "Advances in fibre reinforced plastics", *Reinfor. Plast.*, 28, 154 (1984).

[19] "Advanced Composites News", *Plast. Technol.*, 32, 13 (1986).

[20] K.R.Berg. "Advanced composite materials compete in the automotive market". In "Fibrous Composites in Structural Design", E.M. Lenoe, D.W. Oplinger, and J. J. Burke, Eds, New York (1980).

[21] "Plastics/ Market Trends", *plast. World*, 43, 106 (1985).

[22] D.L. Hunston, W.D. Bascom, R.J, Moulton, and N.J. Johnston, "Matrix Resin Effects in Composite Delamination: Mode-1 Fracture Aspects", ASTM Symposium on "Toughened Composites", Houston, TX, March 13–15, (1985).

[23] A.H. Puppo and H.A. Evensen. *J. Compos. Mater*, 4, 204 (1970).

[24] R.B.Pipes and N.J. Pagano *J. Compos. Mater.*, 4, 538 (1970).

[25] N.J. Pagano and R.B.Pipes, *J. Compos. Mater.*, 5.50(1971).

[26] T. Vu-Khank. B. Sanschagrin, and B. Fisa. *Polym Compos.*, 6, 249 (1985).

[27] C. Busigin, R. Lahtinen, G.M. Martinez, G. Thomas, and R.T Woodhams, *Polym Eng. Sci.*, 24, 169 (1984).

[28] D.J. Wilkins, J.R. Eisenmann, R.A. Camin, W.S. Margolis, and R.A. Benson, in *Damage in Composite Materials*, ASTM STP 775, K.L. Reifsnider, Ed., American Society for Testing and Materials, 168 (1982)

[29] A.J. Russel and K.N. Street, in *Progress in Science and Engineering of Composites* (ICCM IV), T. Hayashi, K. Kawata, and S. Umekawa, Eds., 279 (1982).

[30] F.X. de Charentenay, J. M. Harry, Y. J. Prel, and M. L. Benzeggagh, in *Effect of Defects in Composite Materials*, ASTM STP 836, American Society for Testing and Materials, 84 (1984).

[31] J.G. Williams. "Fracture Mechanics of Polymers", Ellis Horwood Ltd., Chichester, West Sussex, England (1984).