





دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی شیمی

اثر هم افزایی اصلاح الیاف و ماتریس بر روی چسبندگی بین سطحی در کامپوزیت تک
جهته الیاف پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا و اپوکسی

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی پلیمر - صنایع پلیمر

مجتبی احمدی

استاد راهنما

دکتر محمود معصومی



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی شیمی

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی پلیمر آقای مجتبی احمدی

تحت عنوان

اثر هم افزایی اصلاح الیاف و ماتریس بر روی چسبندگی بین سطحی در کامپوزیت تک جهته الیاف پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا و اپوکسی

در تاریخ ۱۳۹۲/۱۱/۱ توسط کمیته زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

- | | |
|---------------------|----------------------------|
| دکتر محمود معصومی | ۱.استاد راهنمای پایان نامه |
| دکتر روح الله باقری | ۲.استاد مشاور پایان نامه |
| دکتر طیبه بهزاد | ۳.استاد داور |
| دکتر احمد اسدی نژاد | ۴.استاد داور |
| دکتر مرتضی صادقی | سرپرست تحصیلات تکمیلی |

تقدیر و تشکر

اعتراف می‌کنم که نه زبان شکر تو را دارم و نه توان تشکر از بندگان تو، اما بر حسب وظیفه از کلیه اساتید ارجمندم در طول سالهای به یاد ماندنی شاگردیشان تشکر می‌نمایم. از اساتید گرانقدرم آقای دکتر محمود معصومی و آقای دکتر روح الله باقری برای راهنمایی‌ها و حمایت‌های همه جانبه و بی‌دریغ ایشان در انجام این پایان‌نامه کمال تشکر را دارم.

از خانم دکتر طیبه بهزاد و جناب آقای دکتر احمد اسدی نژاد که زحمت بازخوانی و داوری این پایان‌نامه را به عهده گرفتند و در این راه نهایت همکاری را نمودند، تشکر می‌نمایم.

در پایان از خانواده عزیزم، پدر فداکار، مادر دلسوز، خواهرانم و برادرانم که بالهای محبت خود را گسترانیدند و با تحمل دشواری‌ها، سبب شدند تا در کمال آسودگی خیال و فراغت بال، شوق آموختن در من زنده بماند، صمیمانه سپاسگزارم و این نیست جز جلوه‌ای از لطف و رحمت پروردگاری که از ادای شکر حتی یک نعمت او ناتوانم.

مجتبی احمدی

بهمن ۱۳۹۲

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،
ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع
این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به پدر بزرگوار و مادر مهربانم

آن دو فرشته‌ای که از خواسته‌هایشان گذشتند، سختی‌ها را به جان خریدند، خود را سپر

بلای مشکلات و ناملایمات کردند و در تمامی مراحل حامی و پشتیبان من بوده‌اند تا من به

جایگاهی که اکنون در آن ایستاده‌ام برسم.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	هشت
چکیده	۱
فصل اول: مقدمه	
۱-۱ مقدمه	۲
۲-۱ تعاریف	۲
۳-۱ زمینه‌های پلیمری	۷
۱-۳-۱ رزین اپوکسی	۸
۴-۱ تقویت‌کننده‌ها در کامپوزیت با زمینه پلیمری	۱۱
۱-۴-۱ نانو کامپوزیت	۱۳
۲-۴-۱ کامپوزیت‌های ذره‌ای	۱۵
۳-۴-۱ کامپوزیت‌های لیفی	۱۵
۵-۱ فصل مشترک تقویت‌کننده-زمینه	۱۸
۱-۵-۱ خیس شوندگی	۱۸
۲-۵-۱ پیوند فصل مشترک	۲۰
۶-۱ تقویت فصل مشترک کامپوزیت لیفی الیاف پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا / اپوکسی	۲۳
۱-۶-۱ اصلاح سطحی الیاف پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا	۲۳
۲-۶-۱ تقویت رزین اپوکسی	۲۶
فصل دوم: مروری بر کارهای پژوهشی مرتبط	
۱-۲ مقدمه	۲۹
۲-۲ اصلاح سطحی الیاف پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا	۲۹
۳-۲ تقویت رزین اپوکسی	۳۱
۴-۲ دغدغه‌های تحقیقات انجام شده اخیر و هدف از انجام این پروژه	۳۸
۵-۲ ایده تحقیق	۳۹
۶-۲ هدف از انجام پایان نامه	۳۹
۷-۲ نوآوری	۴۰

فصل سوم: مواد، تجهیزات آزمایشگاهی و روش تولید نمونه

- ۱-۳ مواد آزمایشگاهی مورد استفاده در این پژوهش ۴۱
- ۲-۳ تجهیزات مورد استفاده شده در این پژوهش ۴۴
- ۳-۳ آزمون‌های مورد استفاده شده این پژوهش ۴۶
- ۱-۳-۳ طیف‌سنجی مادون قرمز با بازتاب کلی تضعیف شده ۴۶
- ۲-۳-۳ میکروسکوپ نوری ۴۷
- ۳-۳-۳ آزمون بیرون کشیدن لیف از قطره و بررسی استحکام لیاف ۴۷
- ۴-۳-۳ بررسی خواص کششی نمونه‌ها ۴۷
- ۵-۳-۳ بررسی رفتار خمشی نمونه‌ها ۴۸
- ۶-۳-۳ بررسی سطوح شکست نمونه‌ها با میکروسکوپ الکترونی روبشی ۴۹
- ۷-۳-۳ بررسی توپوگرافی سطح با دستگاه میکروسکوپ نیروی اتمی ۴۹
- ۸-۳-۳ آزمون زاویه تماس قطره آب ۴۹
- ۴-۳ بخش عملی ۵۰
- ۱-۴-۳ اصلاح شیمیایی سطح لیاف UHMWPE با مونومر GMA ۵۰
- ۲-۴-۳ اصلاح رزین اپوکسی با نانو لیاف کربن ۵۱
- ۳-۴-۳ ساخت نمونه‌های میکرو برای آزمون بیرون کشیدن لیف از قطره و روش انجام آزمون ۵۲
- ۴-۴-۳ ساخت نمونه‌های ماکرو برای آزمون کشش و خمش ۵۵

فصل چهارم: بحث و نتایج

- ۱-۴ بررسی فرآیند پیوندزنی GMA بر سطح لیاف UHMWPE ۵۸
- ۲-۴ بررسی اثر اصلاح شیمیایی سطح لیاف بر مورفولوژی سطح لیاف و خواص مکانیکی لیاف ۵۹
- ۱-۲-۴ بررسی مورفولوژی و توپوگرافی سطح لیاف ۵۹
- ۲-۲-۴ بررسی اصلاح شیمیایی سطح لیاف بر خواص کششی لیاف ۶۴
- ۳-۴ نتایج آزمون بیرون کشیدن لیف از قطره و مکانیزم بهبود چسبندگی بین سطحی ۶۶
- ۴-۴ بررسی پراکنش نانو لیاف کربن توسط میکروسکوپ نوری ۷۱
- ۵-۴ بررسی اثر اصلاح لیاف و ماتریس بر زاویه تماس ۷۶
- ۶-۴ نتایج آزمون مکانیکی از ماکرو نانو کامپوزیت ۷۹
- ۱-۶-۴ نتایج آزمون مکانیکی برای نانو کامپوزیت دو جزئی ۷۹

۲-۶-۴ نتایج آزمون مکانیکی برای نانو کامپوزیت سه جزئی ۸۱

۷-۴ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از سطوح شکست در آزمون کشش ۸۵

فصل پنجم: جمع بندی نتایج و ارائه پیشنهادات

۱-۵ جمع بندی نتایج بدست آمده در این پایان نامه ۸۷

۲-۵ پیشنهادات ۸۸

مراجع ۸۹

فهرست شکل‌ها

فصل اول

- شکل ۱-۱: اهمیت نسبی چهار گروه از مواد ۵
- شکل ۲-۱: فازهای تشکیل دهنده‌ی کامپوزیت ۶
- شکل ۳-۱: واکنش تهیه رزین اپوکسی از بیس فنول A و اپی کلرو هیدرین ۹
- شکل ۴-۱: اشکال مختلف تقویت کننده‌ها ۱۱
- شکل ۵-۱: طبقه‌بندی انواع مختلف کامپوزیت‌ها ۱۳
- شکل ۶-۱: تقسیم بندی الیاف ۱۶
- شکل ۷-۱: مایع در حالت تعادل با یک جامد با زاویه تماس θ ۲۰
- شکل ۸-۱: نمایش مکانیزم پیوند خوردن فصل مشترک ۲۲
- شکل ۹-۱: دستگاه اصلاح پلاسما ۲۴
- شکل ۱۰-۱: نمایی از دستگاه تخلیه کرونا ۲۵
- شکل ۱۱-۱: ریز نگار میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانو الیاف کربن ۲۷
- شکل ۱۲-۱: نمایی از اثر پراکنش بر روی خیس کنندگی نانو الیاف کربن ۲۸

فصل دوم

- شکل ۱-۲: مکانیزم تهیه نانو الیاف کربن گرافیتی آمینه شده ۳۲
- شکل ۲-۲: مکانیزم تشکیل نانو الیاف کربن گرافیتی واکنشی ۳۳
- شکل ۳-۲: مکانیزم تشکیل نانو اپوکسی ۳۳
- شکل ۴-۲: طرحی از قرارگیری نانو الیاف واکنشی بر روی الیاف پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا ۳۵
- شکل ۵-۲: ریز نگار میکروسکوپ الکترونی عبوری از نانو الیاف گرافیتی قبل و بعد از ترکیب شدن با رقیق کننده ۳۶
- شکل ۶-۲: نمایی از شبکه‌ای شدن اپوکسی و پیوندهای نانو الیاف گرافیتی واکنشی ۳۷
- شکل ۷-۲: روشهای مختلفی برای بهبود خیس شوندگی و چسبندگی ۳۸

فصل سوم

- شکل ۱-۳: ساختار شیمیایی GMA ۴۲
- شکل ۲-۳: ساختار شیمیایی دی بنزویل پراکسید ۴۲
- شکل ۳-۳: دستگاه استخراج به روش سوکسله ۴۵
- شکل ۴-۳: قالب کامپوزیت و اجزا تشکیل دهنده ۴۶
- شکل ۵-۳: آزمون خمش سه نقطه‌ای ۴۸
- شکل ۶-۳: اصلاح شیمیایی سطح الیاف UHMWPE با مونومر GMA ۵۱
- شکل ۷-۳: مراحل تهیه نانو کامپوزیت ۵۲
- شکل ۸-۳: تصویر میکروسکوپ الکترون روبشی قطره بر روی لیف ۵۳
- شکل ۹-۳: قاب پلاستیکی شامل نمونه لیف همراه با قطره در آزمون بیرون کشیدن لیف از قطره ۵۴
- شکل ۱۰-۳: نمایی از یک نمونه قطره تشکیل شده بر روی لیف با بزرگنمایی ۱۰۰ برابر ۵۴

- شکل ۳-۱۱: نمایی شماتیک از آزمون بیرون کشیدن لیف از قطره..... ۵۵
- شکل ۳-۱۲: منفصل شدن قطره از لیف..... ۵۵
- شکل ۳-۱۳: لایه‌ی سبز رنگ نشان دهنده‌ی لایه پلی ونیل الکل محلول در آب به عنوان زیر لایه..... ۵۶
- شکل ۳-۱۴: پیش آغشته سازی الیاف..... ۵۷
- شکل ۳-۱۵: نمایی از الیاف بسته شده در قالب کامپوزیت..... ۵۷
- شکل ۳-۱۶: نمونه‌های برش داده شده..... ۵۷

فصل چهارم

- شکل ۴-۱: ATR-IR الیاف UHMWPE قبل و بعد از اصلاح شیمیایی سطح..... ۵۸
- شکل ۴-۲: ساختار شیمیایی سطح الیاف UHMWPE بعد از پیوند زنی با مونومر GMA..... ۵۹
- شکل ۴-۳: مورفولوژی سطح الیاف UHMWPE..... ۶۰
- شکل ۴-۴: تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی از سطح الیاف UHMWPE..... ۶۱
- شکل ۴-۵: بررسی شیارهای سطح الیاف UHMWPE..... ۶۲
- شکل ۴-۶: شماتیکی از اثر اصلاح شیمیایی سطح الیاف UHMWPE با مونومر GMA بر میزان زبری سطح..... ۶۲
- شکل ۴-۷: تصاویر میکروسکوپ نیروی اتمی از سطح الیاف UHMWPE..... ۶۳
- شکل ۴-۸: شکل الیاف UHMWPE..... ۶۴
- شکل ۴-۹: ابعاد قاب کاغذی..... ۶۴
- شکل ۴-۱۰: نمودار تنش- کرنش مربوط به آزمون کششی از تک لیف..... ۶۵
- شکل ۴-۱۱: مقایسه میزان بهبود چسبندگی فصل مشترک الیاف UHMWPE و اپوکسی..... ۶۶
- شکل ۴-۱۲: مکانیزم بهبود چسبندگی در کامپوزیت الیاف UHMWPE و اپوکسی..... ۶۷
- شکل ۴-۱۳: عکس‌های میکروسکوپ الکترون روبشی تهیه شده از محل جدایی قطره از لیف..... ۶۸
- شکل ۴-۱۴: شماتیکی از تغییر در نوع شکست در اثر اصلاح الیاف و ماتریس..... ۶۹
- شکل ۴-۱۵: تصویر ماکرو و میکروسکوپ الکترونی روبشی از فصل مشترک نانو اپوکسی و الیاف اصلاح شده..... ۷۰
- شکل ۴-۱۶: شماتیکی از درگیری مکانیکی در فصل مشترک..... ۷۱
- شکل ۴-۱۷: نمونه‌ای از نانو کامپوزیت اپوکسی/ نانو الیاف کربن بر روی لام آزمایشگاهی..... ۷۲
- شکل ۴-۱۸: تصاویر میکروسکوپی با بزرگنمایی ۵۰۰ و ۱۰۰ از پراکنش نانو الیاف کربن در رزین بعد از پخت نهایی... ۷۲
- شکل ۴-۱۹: تاثیر زمان اختلاط با همزن مافوق صوت بر پراکنش و طول نانو الیاف کربن..... ۷۴
- شکل ۴-۲۰: تاثیر ۱۵۰ دقیقه همزن مافوق صوت بر طول نانو الیاف کربن..... ۷۵
- شکل ۴-۲۱: شکل شماتیک تشکیل قطره بر روی یک تک لیف..... ۷۶
- شکل ۴-۲۲: نتایج حاصل از اندازه گیری زاویه تماس و رسم پروفایل‌های مربوطه..... ۷۷
- شکل ۴-۲۳: تصاویر آزمون زاویه تماس آب بر روی نمونه‌ها..... ۷۹
- شکل ۴-۲۴: نمودار تنش- کرنش نانو کامپوزیت دو جزئی اپوکسی/ نانو الیاف کربن..... ۸۰
- شکل ۴-۲۵: نمودار تنش- کرنش کامپوزیت سه جزئی اپوکسی/ نانو الیاف کربن / الیاف UHMWPE..... ۸۱
- شکل ۴-۲۶: نمودارهای نرمال شده‌ی مربوط به آزمون مکانیکی بر روی کامپوزیت سه جزئی..... ۸۳
- شکل ۴-۲۷: مانع شدن نانو الیاف کربن از رشد ترک در رزین اپوکسی..... ۸۴

شکل ۴-۲۸: تصاویر ماکرو و میکروسکوپ الکترون روبشی از سطح شکست نمونه‌های ۸۵

شکل ۴-۲۹: نمایش شماتیک مکانیزم شکست در نمونه‌ها با کدهای مشخص شده ۸۶

فهرست جدول‌ها

فصل اول

- جدول ۱-۱: مثالهایی از ماده کامپوزیت ۴
- جدول ۱-۲: دسته بندی کامپوزیت از نظر نوع زمینه ۷
- جدول ۱-۳: انواع مختلف سخت کننده‌های رزین اپوکسی؛ مزایا، معایب و کاربرد آنها ۱۰
- جدول ۱-۴: مقایسه‌ی خواص الیاف ۱۶
- جدول ۱-۵: مقایسه الیاف کربن، نانو الیاف کربن و نانو لوله‌های کربنی ۲۷

فصل سوم

- جدول ۱-۳: خواص الیاف داینیما SK60 ۴۱
- جدول ۲-۳: خواص گلیسیدیل متاکریلات ۴۲
- جدول ۳-۳: مشخصات بنزوئیل پراکسید ۴۳
- جدول ۴-۳: مشخصات سیستم رزین و عامل پخت ۴۳
- جدول ۵-۳: ویژگی‌های نانو الیاف کربن ۴۴
- جدول ۶-۳: داده‌های مربوط به فرآیند پیوند زنی مونومر GMA به سطح الیاف UHMWPE ۵۱
- جدول ۷-۳: کدگذاری نمونه‌های کامپوزیتی ۵۳

فصل چهارم

- جدول ۱-۴: میزان عدد زبری برای انواع لیف ۶۳
- جدول ۲-۴: مقایسه خواص کششی لیف UHMWPE در درصد‌های مختلف پیوند زنی ۶۵
- جدول ۳-۴: نتایج آزمون بیرون کشیدن لیف از قطره ۶۶
- جدول ۴-۴: مقایسه‌ی زاویه تماس در نمونه‌های مختلف اصلاح شده ۷۸
- جدول ۵-۴: مقایسه زاویه تماس آب برای رزین اپوکسی و رزین اصلاح شده ۷۸
- جدول ۶-۴: خواص کششی نانو کامپوزیت دوجزئی اپوکسی/نانو الیاف کربن ۸۱
- جدول ۷-۴: خواص کششی نانو کامپوزیت سه جزئی اپوکسی/نانو الیاف کربن/الیاف UHMWPE ۸۲
- جدول ۸-۴: نتایج آزمون خمش سه نقطه‌ای برای کامپوزیت سه جزئی ۸۲

چکیده

در این پژوهش تاثیر اصلاح ماتریس اپوکسی با درصدهای مختلف نانو الیاف کربن شامل سه درصد وزنی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ بر خواص مکانیکی و چسبندگی بین سطحی الیاف پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا و رزین اپوکسی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق سطح الیاف با مونومر گلیسیدیل متاکریلات به میزان ۵ درصد وزنی اصلاح شد. سپس، آزمون طیف سنجی مادون قرمز تبدیل فوریه با بازتاب کلی تضعیف شده نیز به منظور تایید صحت فرآیند پیوندزنی انجام شد. در راستای اصلاح الیاف، اثر اصلاح شیمیایی سطح الیاف به ترتیب بر مورفولوژی، زبری و خواص مکانیکی الیاف توسط میکروسکوپ الکترون روبشی، میکروسکوپ نیروی اتمی و آزمون کشش مورد ارزیابی قرار گرفت. همزمان با اصلاح الیاف، رزین اپوکسی با نانو الیاف کربن اصلاح شد و میزان پراکنش نانو الیاف کربن در رزین توسط میکروسکوپ نوری بررسی شد. پس از آن، به منظور بررسی تغییرات چسبندگی بین سطحی و خیس شونده‌گی در اثر اصلاح الیاف و ماتریس، آزمون بیرون کشیدن لیف از قطره و محاسبه‌ی زاویه تماس بر روی نمونه‌های مختلف انجام گرفت. همچنین به منظور بررسی اثر فرآیند اصلاح الیاف و ماتریس بر خواص کامپوزیت‌ها و نانو کامپوزیت‌ها، نمونه‌های کامپوزیتی دو جزئی الیاف/اپوکسی و نانو کامپوزیت سه جزئی الیاف/اپوکسی/نانو الیاف کربن تهیه و آزمون‌های کشش و خمش بر روی آن‌ها انجام شد. در انتها سطوح شکست کششی کامپوزیت‌ها و نانو کامپوزیت‌ها توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج بدست آمده نشان داد که در اثر فرآیند پیوند زنی مونومر بر سطح الیاف، زبری سطح الیاف افزایش یافته و کاهش در میزان استحکام لیف مشاهده شد. در آزمون بیرون کشیدن لیف از قطره، بهبود در استحکام برشی بین سطحی ماتریس و لیف، در اثر اصلاح همزمان سطحی لیف با ۵ درصد وزنی مونومر گلیسیدیل متاکریلات و اصلاح ماتریس با ۰/۵ درصد وزنی نانو الیاف کربن به میزان ۳۱۹ درصد به عنوان حداکثر میزان در نظر گرفته شد. همچنین با مقایسه نتایج حاصل از این آزمون و آزمون زاویه تماس، اثر هم‌افزایی اصلاح الیاف و ماتریس بر بهبود چسبندگی اثبات شد و حداکثر میزان بهبود در استحکام برشی فصل مشترک و حداقل میزان در زاویه تماس برای نمونه‌هایی مشاهده شد که الیاف و ماتریس به صورت همزمان اصلاح شدند. نتایج آزمون مکانیکی نیز نشان داد که در نمونه‌هایی که اصلاح همزمان ماتریس و الیاف صورت گرفته، بهبود در خواص مکانیکی بیشترین مقدار بود. با مقایسه نتایج آزمون خواص مکانیکی، مشاهده شد که اصلاح لیف تاثیر بیشتری در خواص کششی و اصلاح ماتریس تاثیر بیشتری در خواص خمشی را از خود نشان دادند. با توجه به نتایج آزمون خواص مکانیکی، حداکثر بهبود مدول کششی و خمشی برای نانو کامپوزیت حاوی ۱/۵ درصد وزنی نانو الیاف کربن به ترتیب ۲۷/۹ و ۴۰/۶ درصد بود. از طرفی دیگر حداکثر بهبود به ترتیب ۵۲/۳ و ۶۹ برای استحکام کششی و خمشی نمونه حاوی ۱ درصد وزنی نانو الیاف کربن مشاهده شده است. ضمناً، با بررسی میکروسکوپی سطوح شکست نمونه‌ها در آزمون کشش، مشاهده شد که اصلاح همزمان ماتریس و الیاف باعث می‌شود که مکانیزم شکست نمونه سه جزئی به سمت شکست ترد و شکننده متمایل گردد.

واژه‌های کلیدی: الیاف پلی اتیلن با وزن مولکولی بسیار بالا، رزین اپوکسی، گلیسیدیل متاکریلات، نانو الیاف کربن، استحکام

برشی بین سطحی، خواص مکانیکی

فصل اول

مقدمه‌ای بر کامپوزیت‌ها

۱-۱ مقدمه

نیاز بی‌وقفه به موادی با خواسته‌هایی مانند وزن کمتر، استحکام^۱ بیشتر و قیمت پایین‌تر باعث شده است که مهندسين و دانشمندان در تلاش باشند که مواد کاملاً جدیدی را تولید کنند. مواد کامپوزیتی نمونه‌ای از این مواد کاملاً جدید می‌باشند. مواد کامپوزیتی به طور کامل جایگاه خود را به عنوان مواد مهندسی مشخص نموده و در حال حاضر به عنوان موادی رایج در سرتاسر دنیا مخصوصاً در زمینه‌های سازه‌ای مورد استفاده قرار گرفته‌اند. امروزه مواد کامپوزیتی در صنایع هواپیماسازی، هوافضا، خودروسازی، ساخت وسایل تفریحی و پزشکی کاربرد دارند [۱]. دنیای هوافضا یکی از قدیمی‌ترین و قویترین طرفداران مواد کامپوزیتی پیشرفته می‌باشد. نقطه‌ی اوج پیشرفت‌های اخیر در فناوری کامپوزیت در هواپیمای مدل بوئینگ ۷۸۷ می‌باشد که بیش از ۵۰ درصد وزنی این هواپیما از مواد کامپوزیتی ساخته شده است که این خود باعث جلب توجه استفاده‌کنندگان از مواد کامپوزیتی در عصر جدید شده است. بوئینگ ۷۸۷ عمدتاً ساخته شده از مواد کامپوزیتی، باعث پایان دادن به دوران هواپیماهای تمام فلزی شده و در عصر امروز معتبر شناخته شده است و این خود نشان دهنده‌ی اثر عمیق و روبه رشد مواد کامپوزیتی در تمام بخش‌های جامعه می‌باشد [۲].

۲-۱ تعاریف

کلمه‌ی کامپوزیت به معنای ماده‌ای است که از دو و یا چند قسمت متفاوت تشکیل شده باشد. هدف از ساخت کامپوزیت رسیدن به خصوصیات برتری نسبت به هر یک از اجزای تشکیل دهنده‌ی آن می‌باشد [۳]. کامپوزیت‌ها در اصل از زمان‌های قدیم مورد توجه بشر بوده‌اند. از نمونه‌های قدیمی کاربرد این نوع مواد می‌توان به

^۱ Strength

خشت‌های گلی تقویت شده با کاه و یا مومیایی اشاره نمود. تاریخچه‌ی کامپوزیت‌ها را می‌توان به صورت ذیل خلاصه کرد:

سازه‌های کاه‌گلی ۱۵۰۰ سال قبل از میلاد.

کمان چند لایه‌ای، ساخته شده از تاندون حیوانات، چوب و ابریشم ۱۰۰۰ سال قبل از میلاد.

آغشته کردن سطوح پارچه‌ای هواپیماها با لاک محلول رزینی، ۱۹۱۰ میلادی.

فنولی تقویت شده با پارچه، ۱۹۳۰ میلادی.

ثبت اختراع پلی استر، ۱۹۳۶ میلادی.

فروش الیاف شیشه توسط شرکت Owens Corning، ۱۹۳۸ میلادی.

ساخت پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف شیشه در پایگاه هوایی Wright، ۱۹۴۲ میلادی.

ساخت الیاف کربن توسط شرکت Union Carbide، ۱۹۵۹ میلادی.

ثبت اختراع الیاف کربن بر پایه پلی اکریلونیتریل توسط Shido ژاپن، ۱۹۶۱ میلادی.

ساخت الیاف پیوسته سرامیک و بور، ۱۹۶۵ میلادی.

ساخت الیاف کولار، ۱۹۷۱ میلادی.

ساخت الیاف پلی اتیلن با جرم مولکولی بسیار بالا، ۱۹۸۵ میلادی.

تولید مجدد الیاف طبیعی، ۱۹۹۰ میلادی [۴].

کامپوزیت‌ها در زمینه‌های مختلف صنعتی کاربرد دارند و نمونه‌ی از این کاربردها در جدول ۱-۱ آورده شده است.

جدول ۱-۱: مثالهایی از ماده کامپوزیت [۳].

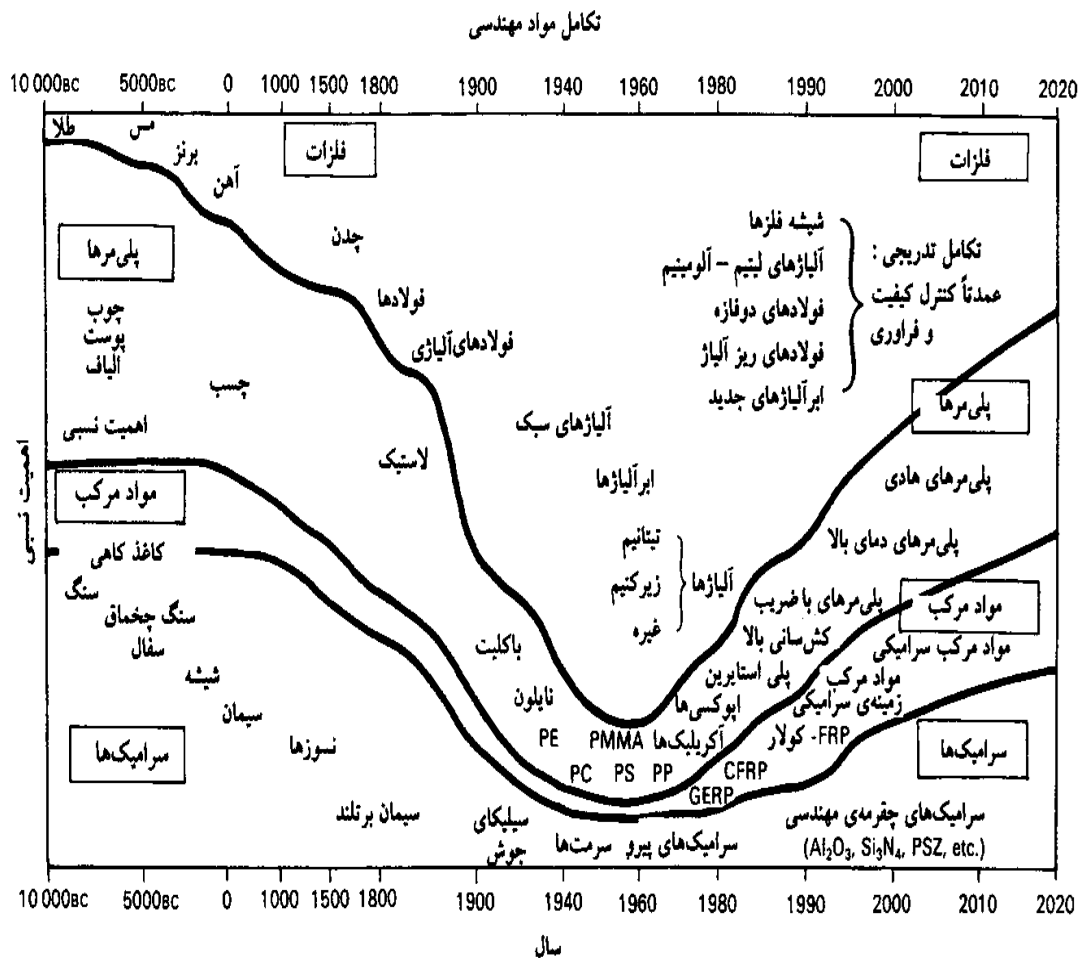
نوع	جزء تشکیل دهنده	زمینه کاربردی
۱. کامپوزیت با زمینه آلی: کاغذ، مقوا تایرها لمینت	رزین/پرکننده/الیاف سلولز رزین/تراشه‌های چوب رابر/برزنت/فولاد رزین/پرکننده/الیاف شیشه، الیاف کربن و غیره	چاپ، بسته بندی چوب الات نجاری اتومبیل کاربردهای چندگانه؛ قسمت جلوی پیشخوان وسایل نقلیه
۲. کامپوزیت با زمینه معدنی: بتون کامپوزیتهای کربن-کربن کامپوزیتهای سرامیکی	سیمان/شن/سنگ ریزه کربن/الیاف کربن سرامیک/الیاف سرامیک	مهندسی عمران هوانوردی، فضا، ورزش، پزشکی ماده ترمومکانیکی
۳. کامپوزیت با زمینه فلزی:	آلومینیوم/الیاف بور آلومینیوم/الیاف کربن	هوا فضا
۴. ساندویچ: پوسته‌ها هسته‌ها	فلزات، لمینت‌ها فوم، لانه زنبوری، پلاستیک‌های تقویت شده با بالسا	کاربردهای چندگانه

در طول چهل سال گذشته، رشد قابل ملاحظه‌ای در ساخت و تولید مواد کامپوزیتی سنتزی صورت گرفته است و این گونه مواد کامپوزیتی شامل پلیمرهای تقویت شده با الیاف می‌باشند. علت چنین رشد سریعی در طول دهه‌های اخیر، توسعه و ساخت الیاف کربن در انگلستان و الیاف بور در آمریکا در اوایل دهه‌ی ۱۹۶۰ بوده است. این الیاف که ثابت‌های الاستیک بالایی دارند باعث افزایش چشمگیر سفتی مواد کامپوزیتی در مقایسه با مواد کامپوزیتی حاوی الیاف شیشه گردیده‌اند و از این رو دامنه‌ی استفاده از مواد کامپوزیتی را گسترش می‌دهند. یکی از عوامل کلیدی در گسترده شدن دامنه‌ی استفاده از مواد کامپوزیت نسبت استحکام به وزن^۱ و نسبت سفتی به وزن^۲ خیلی

^۱ Strength-to-Weight Ratio

^۲ Stiffness-to-Weight Ratio

بالایی است که این گونه مواد دارا می‌باشد [۱]. شکل ۱-۱ اهمیت نسبی چهار گروه از مواد (سرامیک‌ها، مواد مرکب، پلیمرها و فلزات) در علم مهندسی به عنوان تابعی از زمان، نشان داده شده است.



شکل ۱-۱: اهمیت نسبی چهار گروه از مواد [۵].

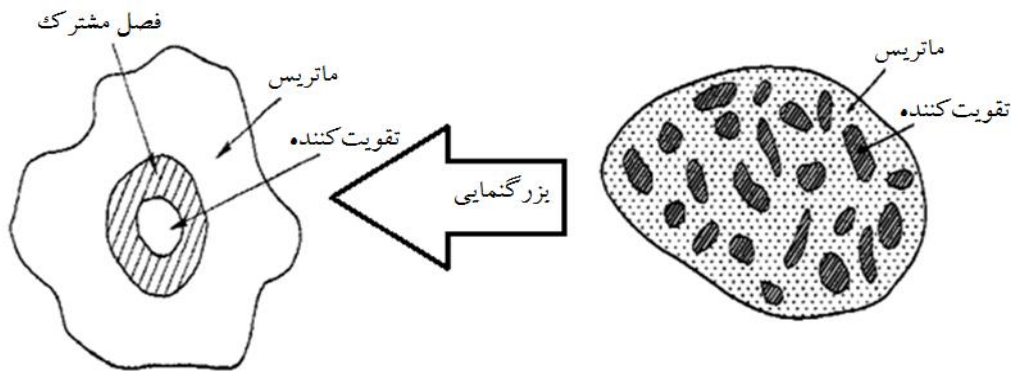
معیارهایی را باید در تعریف مواد کامپوزیتی در نظر گرفت از جمله اینکه نخست هر دو جزء تشکیل دهنده کامپوزیت باید با یک نسبت قابل قبولی وجود داشته باشد و دوم این که فازهای تشکیل دهنده خواص متفاوتی از یکدیگر داشته باشند. از این جهت ممکن است خواص ماده‌ی کامپوزیت به طور قابل ملاحظه‌ای با خواص اجزای تشکیل دهنده آن متفاوت باشد و به بیانی دیگر کامپوزیت تولیدی خواص برتر از خواص هر یک از اجزاء تشکیل دهنده به تنهایی دارد؛ به عنوان مثال دو ماده‌ی الیاف شیشه و رزین پلی استر غیر اشباع، هر دو شکننده^۱ هستند اما از ترکیب این دو، یک ماده کامپوزیت با استحکام ضربه‌ای^۲ بسیار بالا نسبت به هر یک اجزا حاصل می‌شود که کاربرد فراوانی دارد. نکته‌ی حائز اهمیت که وجود دارد این است که ماده حاصل از افزودن روان‌کننده‌ها و مواد

^۱ Brittle

^۲ Impact Strength

جذب کننده‌ی پرتوهای ماوراء بنفش به پلاستیک‌ها، کامپوزیت نیستند. نهایتاً یک ماده‌ی کامپوزیتی سنتزی و مصنوعی معمولاً توسط اختلاط و ترکیب کردن مناسب اجزای تشکیل دهنده توسط وسایل مکانیکی مختلف تولید می‌شود [۱].

در مهندسی مدرن واژه‌ی کامپوزیت، که گاهی اوقات با نام کامپوزیت پیشرفته شناخته می‌شود، به ماده‌ای اشاره دارد که از الیاف تقویت کننده در زمینه‌ای جامد تشکیل شده باشد. این فازها توسط فصل مشترک مشخصی از هم جدا می‌شود. در حالتی که فازهای ناپیوسته دارای ذات‌های متفاوتی باشند، کامپوزیت حاصله هیبریدی می‌باشد. فاز ناپیوسته معمولاً سخت تر و خواص مکانیکی بالاتری نسبت به فاز پیوسته دارد. فاز پیوسته، زمینه نامیده می‌شود و نظریه‌ی کلی حاکی از این است که در تولید ماده کامپوزیت، این خاصیت زمینه است که با افزودن اجزای دیگر بهبود می‌یابد (شکل ۱-۲). فاز تقویت کننده دارای حداقل یک بعد کوچک (مثلاً کمتر از ۵۰۰ میکرون و در برخی موارد فقط چند میکرون) می‌باشد [۱، ۶].



شکل ۱-۲: فازهای تشکیل دهنده‌ی کامپوزیت [۴].

استثنایی که در مورد توضیح بالا وجود دارد مربوط به پلیمرهای اصلاح شده با الاستومر می‌باشد که در آنها زمینه پلیمری صلب با ذرات الاستومری پر می‌شود. برای اینگونه مواد ویژگی ایستا پلیمر (مدول یانگ و استحکام) توسط اضافه کردن ذرات الاستومری اصلاح نمی‌شود؛ اما عملکرد ضربه‌ای بهبود می‌یابد. رزین‌هایی مانند پلی استر، اپوکسی و پلی آمید به شدت شبکه‌ای شده و این موضوع باعث ترد و شکننده شدن رفتار رزین می‌شود و با توزیع ذرات رابری و الاستومری در زمینه اپوکسی، میزان چقرمگی^۱ این نوع زمینه بهبود می‌یابد [۷].

یک ماده کامپوزیت ممکن است دارای زمینه سرامیکی، فلزی و یا پلیمری باشد. خواص مکانیکی این سه گروه از مواد به طور قابل ملاحظه‌ای با یکدیگر متفاوت است و در جدول ۱-۲ تفاوت‌های بین این سه دسته از زمینه‌ها مشخص شده است. به طور کلی می‌توان گفت پلیمرها استحکام و مدول یانگ پایینی دارند، سرامیک‌ها ترد، سفت

^۱ Toughness

وسخت می باشند و فلزات دارای استحکام و مدول متوسطی هستند و ضمن اینکه از شکل پذیری خوبی نیز برخوردار هستند و همچنین ترد و شکننده نمی باشند [۴،۱].

جدول ۱-۲: دسته بندی کامپوزیت از نظر نوع زمینه [۴].

کامپوزیت فلزی	کامپوزیت سرامیکی	کامپوزیت پلیمری
مزایا در مقایسه با زمینه پلیمری: استحکام عرضی بیشتر استحکام برشی و فشاری بیشتر دمای کارکرد بالاتر عدم جذب آب و آتشگیری معایب: کار زیادی در این مورد انجام نشده مثال: آلومینیوم/ذرات سیلیکون کارباید	مزایا: دمای کارکرد بسیار بالا معایب: شکننده بودن مثال: سرامیک/الیاف سیلیکون کارباید بتون (کامپوزیت معمولی) آلومینا (کامپوزیت پیشرفته)	مزایا: قیمت پایین فراورش ساده مقاومت شیمیایی خوب وزن مخصوص پایین معایب: استحکام و مدول نسبتاً پایین دمای کارکرد پایین مقاومت محیطی ضعیف (قابل تخریب بوسیله ی اشعه ماورا بنفش و حلالها) مثال: پلی استر/الیاف شیشه

۳-۱ زمینه های پلیمری

زمینه ی پلیمری به طور رایج به دو دسته ی گرمانرم^۱ و گرماسخت^۲ها تقسیم بندی می شوند و رفتار آنها وقتی تحت حرارت دهی قرار می گیرند، متفاوت است.

رزین های گرمانرم در دماهای بالا فرآیند می شوند و در اثر عمل سرد کردن به حالت جامد در می آیند و در این حالت شبکه ای شدن اتفاق نمی افتد و شکل دهی و حرارت دهی مجدد بارها می تواند اتفاق بیفتد. رزین های گرمانرم جامد شده استحکام کششی بالا در حدود ۵۰ تا ۱۰۰ مگا پاسکال، سفتی بالایی در حدود ۴/۱-۴/۲ گیگا پاسکال و چگالی بالایی در حدود ۱۱۰۰-۱۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب دارند. پلی اتیلن، پلی پروپیلن، اکریلونیتریل-بوتادین استایرن، استات، پلی کربنات، پلی وینیل کلراید، پلی سولفون، پلی فنیل سولفید و نایلون نمونه هایی از رزین گرمانرم می باشند.

^۱ Thermoplastic

^۲ Thermoset