فصل اول: مقدمه‌ای بر مواد مرکب

اهداف فصل	۳
۱–۱ مقدمه	۳
۱–۲ دسته‌بندی مواد مرکب	۱۸
۱–۲–۱ مواد مرکب با ماتریس پلیمری	۱۹
معرفی و بررسی خواص الیاف شیشه	۲۰
انواع الیاف شیشه	۲۰
تولید الیاف شیشه	۲۳
معرفی و بررسی خواص الیاف گرافیت	۲۳
تولید الیاف گرافیت	۲۳
آیا کربن و گرافیت، یکی هستند؟	۲۵
معرفی و بررسی خواص الیاف آرامید	۲۶
انواع الیاف آرامید	۲۶
تولید الیاف آرامید	۲۶
PREPREGها چه هستند؟	۳۰
مثال‌هایی از چگونگی تولید زمینه‌های پلیمری در مواد مرکب	۳۳
رشته‌پیچی	۳۳
شکل‌دهی اتوکلاو	۳۴

ریخته‌گری انتقالی رزین (قالب‌گیری مایع) ۳۴
۱-۲-۲ مواد مرکب با زمینه‌ی فلزی ۳۶
مواد مرکب با زمینه‌ی فلزی کدامند؟ ۳۶
مزایای ماتریس‌های فلزی چیست؟ ۳۶
۱-۲-۳ مواد مرکب با ماتریس سرامیکی ۳۷
۱-۲-۴ مواد مرکب کربن-کربن ۳۹
مزایای مواد مرکب کربن-کربن چیست؟ ۳۹
معرفی مختصر یکی از فرآیندهای تولید مواد مرکب کربن-کربن ۴۱
۱-۳ بازیافت مواد مرکب تقویت شده با الیاف ۴۲
کاربرد مواد مرکب تقویت شده با الیاف کوتاهِ بازیافت شده، چیست؟ ۴۲
۱-۴ آشنایی با اصطلاحات مکانیک مواد مرکب ۴۳
آنالیز یک سازه مرکب به چه طریقی انجام می‌شود؟ ۴۳
یک جسم ایزوتروپ یا همسان‌گرد چه جسمی است؟ ۴۳
جسم همگن، چه جسمی است؟ ۴۳
مواد مرکب همسان‌گرد هستند یا همگن؟ ۴۵
ماده ناهمسان‌گرد به چه موادی اطلاق می‌شود؟ ۴۵
تک‌لایه چیست؟ ۴۵
لمینیت یا چندلایه چیست؟ ۴۵
لمینیت هیبریدی چیست؟ ۴۵
۱-۵ مرور و خلاصه ۴۶
واژگان کلیدی ۴۷
تمرین‌های فصل ۴۸
فهرست منابع عمومی ۵۰
فهرست منابع فصل ۵۲

فصل دوم: تحلیل ماکرومکانیکی یک تک‌لایه

اهداف فصل ۵۵
۲-۱ مقدمه ۵۵
۲-۲ مروری بر تعاریف ۵۹
۲-۲-۱ تنش ۵۹

۲–۲–۲– کرنش	۶۲
۲–۲–۳ مدول الاستیک	۶۸
۲–۲–۴ انرژی کرنش	۷۰
۲–۳ قانون هوک برای انوع مختلف مواد	۷۲
۲–۳–۱ مواد ناهمسان‌گرد	۷۴
۲–۳–۲ مواد مونوکلینیک	۷۴
۲–۳–۳ مواد ارتوتروپیک و مواد ارتوتروپیک خاص	۷۶
۲–۳–۴ ماده‌ی همسان‌گرد عرضی	۷۹
۲–۳–۵ مواد همسان‌گرد	۸۱
۲– ۴ قانون هوک برای تک‌لایه تک‌جهته‌ی دوبعدی	۹۲
۲–۴–۱ فرض تنش صفحه‌ای	۹۲
۲–۴–۲ کاهش روابط قانون هوک از حالت سه‌بعدی به دوبعدی	۹۲
۲–۴–۳ رابطه بین ماتریس‌های سفتی و نرمی برحسب ...	۹۴
۲–۵ قانون هوک برای تک‌لایه‌ی زاویه‌دار دوبعدی	۱۰۱
۲–۶ ثابت‌های مهندسی برای تک‌لایه‌ی زاویه‌دار	۱۱۳
۲–۷ فرم نامتغیر ماتریس سفتی و ماتریس نرمی برای یک تک‌لایه‌ی زاویه‌ای	۱۲۴
۲–۸ تئوری‌های شکست برای یک تک‌لایه‌ی زاویه‌دار	۱۲۹
۲–۸–۱ تئوری شکست تنش بیشینه	۱۳۱
۲–۸–۲ ضریب استحکام	۱۳۵
۲–۸–۳ محدوده‌ی شکست	۱۳۷
۲–۸–۴ تئوری شکست کرنش بیشینه	۱۴۰
۲–۸–۵ تئوری شکست تی‌سای–هیل	۱۴۳
۲–۸–۶ تئوری شکست تی‌سای–وو	۱۴۶
۲–۸–۷ مقایسه نتایج آزمایشگاهی با مقادیر حاصل از تئوری‌های شکست	۱۵۲
۲–۹ تنش‌ها و کرنش‌های نم‌گرمایی در یک تک‌لایه	۱۵۶
۲–۹–۱ روابط تنش–کرنش نم‌گرمایی برای یک تک‌لایه‌ی تک‌جهته	۱۵۶
۲–۹–۲ روابط تنش–کرنش نم‌گرمایی برای یک تک‌لایه‌ی زاویه‌دار	۱۵۷
۲–۱۰ مرور و خلاصه	۱۶۰
واژگان کلیدی	۱۶۱
تمرین‌های فصل	۱۶۲
فهرست منابع فصل	۱۶۸

فصل سوم: تحلیل میکرومکانیکی یک تک‌لایه

اهداف فصل	۱۷۱
۳-۱ مقدمه	۱۷۱
۳-۲ کسر حجمی، کسر جرمی، چگالی و میزان حفره	۱۷۲
۳-۲-۱ کسر حجمی	۱۷۳
۳-۲-۲ کسر جرمی	۱۷۳
۳-۲-۳ چگالی	۱۷۴
۳-۲-۴ میزان حفره	۱۷۸
۳-۳ محاسبه چهار مدول الاستیک	۱۸۳
۳-۳-۱ رهیافت مقاومت مصالح	۱۸۳
۳-۳-۱-۱ مدول یانگ طولی (رهیافت مقاومت مصالح)	۱۸۵
۳-۳-۱-۲ مدول یانگ عرضی (رهیافت مقاومت مصالح)	۱۸۸
۳-۳-۱-۳ نسبت پواسون اصلی (رهیافت مقاومت مصالح)	۱۹۵
۳-۳-۱-۴ مدول برشی صفحه‌ای (رهیافت مقاومت مصالح)	۱۹۷
۳-۳-۲ مدل‌های نیمه‌تجربی	۲۰۰
۳-۳-۲-۱ مدول یانگ طولی (مدل‌های نیمه‌تجربی)	۲۰۰
۳-۳-۲-۲ مدول یانگ عرضی (مدل‌های نیمه‌تجربی)	۲۰۲
۳-۳-۲-۳ نسبت پواسون اصلی (مدل‌های نیمه‌تجربی)	۲۰۵
۳-۳-۲-۴ مدول برشی صفحه‌ای (مدل‌های نیمه‌تجربی)	۲۰۵
۳-۳-۳- رهیافت الاستیسیته	۲۰۷
۳-۳-۳-۱ مدول یانگ طولی (رهیافت الاستیسیته)	۲۰۹
۳-۳-۳-۲ نسبت پواسون اصلی (رهیافت الاستیسیته)	۲۱۸
۳-۳-۳-۳ مدول یانگ عرضی (رهیافت الاستیسیته)	۲۲۰
۳-۳-۳-۴ مدول برشی محوری (رهیافت الاستیسیته)	۲۲۵
۳-۳-۴ مدول‌های الاستیک یک تک‌لایه با الیاف همسان‌گرد عرضی	۲۳۹
۳-۴ استحکام نهایی یک تک‌لایه‌ی تک‌جهته	۲۴۰
۳-۴-۱ استحکام کششی طولی	۲۴۱
۳-۴-۲ استحکام فشاری طولی	۲۴۷
۳-۴-۳ استحکام کششی عرضی	۲۵۶
۳-۴-۴ استحکام فشاری عرضی	۲۶۰

۳-۴-۵ استحکام برشی صفحه‌ای ۲۶۱
برشی نهایی تک‌لایه‌ی تک‌جهته ۲۶۵
۳-۵ ضرایب انبساط حرارتی ۲۶۶
۳-۵-۱ ضریب انبساط حرارتی طولی ۲۶۷
۳-۵-۲ ضریب انبساط حرارتی عرضی ۲۶۸
۳-۶- ضرایب انبساط رطوبتی ۲۷۲
۳-۷ مرور و خلاصه ۲۷۸
واژگان کلیدی ۲۷۹
تمرین‌های فصل ۲۸۰
فهرست منابع فصل ۲۸۴

فصل چهارم: تحلیل ماکرومکانیکی لمینیت‌ها

اهداف فصل ۲۸۹
۴-۱ مقدمه ۲۸۹
۴-۲ کد لمینیت ۲۹۰
۴-۳- روابط تنش-کرنش برای یک لمینیت ۲۹۲
۴-۳-۱ رابطه تنش-کرنش برای یک تیر همسان گرد یک بعدی ۲۹۲
۴-۳-۲ معادلات کرنش-جابجایی ۲۹۵
۴-۳- تنش و کرنش در یک لمینیت ۳۰۰
۴-۳-۴ منتجه‌های تنش و ممان مرتبط با کرنش‌ها وانحناهای صفحه میانی ۳۰۱
۴-۴ مدول‌های درون‌صفحه‌ای و خمشی یک لمینیت ۳۱۶
۴-۴-۱ ثابت‌های مهندسی درون‌صفحه‌ای یک لمینیت ۳۱۷
مدول موثر درون‌صفحه‌ای طولی، E_x ۳۱۷
مدول موثر درون‌صفحه‌ای عرضی، E_y ۳۱۷
مدول موثر درون‌صفحه‌ای برشی، G_{xy} ۳۱۸
نسبت پواسون موثر درون‌صفحه‌ای v_{xy} ۳۱۹
نسبت پواسون موثر درون‌صفحه‌ای v_{yx} ۳۱۹
۴-۴-۲ ثابت‌های مهندسی خمشی یک لمینیت ۳۲۰
۴-۵ اثرات نم‌گرمایی در یک لمینیت ۳۲۶
۴-۵-۱ تنش‌ها و کرنش‌های نم‌گرمایی ۳۲۶

۴-۵-۲ ضرایب انبساط حرارتی و رطوبتی یک لمینیت ۳۳۵
۴-۵-۴ واپیچش یک لمینیت ۳۳۸
۴-۶ مرور و خلاصه ۳۴۰
واژگان کلیدی ۳۴۱
تمرین‌های فصل ۳۴۲
فهرست منابع فصل ۳۴۶

فصل پنجم: شکست، تحلیل و طراحی لمینیت‌ها

اهداف فصل ۳۴۹
۵-۱ مقدمه ۳۴۹
۵-۲ نمونه‌های خاص لمینیت‌ها ۳۵۰
۵-۲-۱ لمینیت‌های متقارن ۳۵۰
۵-۲-۲ لمینیت‌های متقاطع ۳۵۱
۵-۲-۳ لمینیت‌های زاویه‌ای ۳۵۲
۵-۲-۴ لمینیت‌های ضدمتقارن ۳۵۲
۵-۲-۵ لمینیت‌های متوازن ۳۵۳
۵-۲-۵ لمینیت‌های شبه همسان‌گرد ۳۵۴
۵-۳ معیار شکست برای یک لمینیت ۳۶۱
۵-۴ طراحی لمینیت‌ها ۳۷۵
۵-۵ مباحث دیگر در طراحی مکانیکی ۴۰۲
۵-۵-۱ مواد مرکب ساندویچی ۴۰۲
۵-۵-۲ تأثیرات بلندمدت محیطی ۴۰۴
۵-۵-۳ تنش‌های میان‌لایه‌ای ۴۰۴
۵-۵-۴ مقاومت در برابر ضربه ۴۰۷
۵-۵-۵ مقاومت شکست ۴۰۷
۵-۵-۶ استحکام خستگی ۴۰۸
۵-۶ مرور و خلاصه ۴۰۹
واژگان کلیدی ۴۱۰
تمرین‌های فصل ۴۱۱
فهرست منابع فصل ۴۱۵

فصل ششم: خمش تیرها

اهداف فصل	۴۱۹
۶–۱ مقدمه	۴۱۹
۶–۲ تیرهای متقارن	۴۲۰
۶–۳ تیرهای نامتقارن	۴۳۲
۶–۴ مرور و خلاصه	۴۴۴
واژگان کلیدی	۴۴۵
تمرین‌های فصل	۴۴۶
فهرست منابع فصل	۴۴۷

فصل

1

مقدمه‌ای بر مواد مرکب

Introduction to Composite Materials

اهداف فصل

- **تعریف یک ماده‌ی مرکب، برشمردن مزایا و معایب مواد مرکب نسبت به مواد یکپارچه مرسوم و بررسی عوامل موثر در خواص مکانیکی مواد مرکب.**
- **دسته‌بندی مواد مرکب، معرفی انواع مهم الیاف و زمینه (ماتریس)، روش‌های تولید، خواص مکانیکی و کاربردهای مواد مرکب.**
- **بحث در مورد نحوه‌ی بازیافت مواد مرکب.**
- **معرفی اصطلاحات کاربردی در مطالعه‌ی مکانیک مواد مرکب.**

۱.۱ مقدمه

در گذشته، در بسیاری از موارد، از خشت‌های کاه‌گلی برای خانه‌سازی استفاده می‌شد. هرکدام از این اجزا (کاه و گل) به تنهایی، نمی‌توانستند کارایی مناسبی داشته باشند؛ برخی بر این باورند که علت استفاده از کاه، جلوگیری از ترک خوردن گِل بوده است؛ ولی برخی دیگر معتقد هستند که کاه، لبه‌های تیزِ ترک‌های موجود در گِل خشک را کند کرده و مانع گسترش ترک‌ها می‌شود.

نمونه‌های تاریخی از کاربرد مواد مرکب در زمان های قدیم، فراوان است. از مهمترین آن‌ها می‌توان به دیوارهای گلی تقویت شده با ساقه‌های نی، لایه‌های به هم چسبیده چوبی مصری‌ها (در ۱۵۰۰ سال قبل از میلاد) و یا آهنگری لایه‌های فلزی برای ساخت شمشیر (۱۸۰۰بعد از میلاد) اشاره کرد. در دهه‌ی سی‌ام قرن بیستم، از الیاف شیشه برای تقویت رزین‌ها استفاده می‌شد. قایق‌ها و هواپیماهای ساخته شده از این مواد، به فایبرگلاس شهرت یافتند. از دهه ۷۰ قرن بیستم، با ظهور الیاف جدیدی همچون الیاف کربن، بُرُن[1] و آرامید[2] و به‌کارگیری زمینه‌های فلزی و سرامیکی، کاربرد مواد مرکب پیشرفت قابل ملاحظه‌ای یافت.

این بخش از کتاب، شامل مروری بر عناوین اصلی در حوزه‌ی مواد مرکب خواهد بود. پرسش‌ها و پاسخ‌های مطرح شده در متن درس، راه‌کار مناسبی جهت یادگیری مطالب اساسی در این حوزه می‌باشد. در هر بخش، به موازات پیشرفت مطالب، رفته‌رفته پرسش‌های مطرح‌شده تخصصی‌تر و حرفه‌ای‌تر خواهد شد.

1- Boron

۲- آرامیدها (Aramids) ترکیبات آروماتیکی از کربن، هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن هستند.

ماده‌ی‌مرکب چیست؟

یک ماده‌ی مرکب، متشکل از دو یا چند جزء است که در ابعاد ماکرو (مقیاس درشت) در کنار هم قرار گرفته‌اند؛ ولی در عین حال قابل‌حل در یک‌دیگر نیستند. معمولا یک جزء، به‌عنوان فاز تقویت کننده است و جزء دیگر که فاز تقویت کننده را در بر می‌گیرد، نقش زمینه یا همان ماتریس را خواهد داشت. فاز تقویت کننده ممکن است به‌صورت الیاف، ذرات (حبه‌ای) و یا پولک باشد. معمولاً فاز ماتریس، از یک ماده‌ی پیوسته تشکیل شده است. بتون تقویت‌شده با فولاد و یا اپوکسی تقویت‌شده با الیاف گرافیتی و ... از جمله مواد مرکب مرسوم و پرکاربرد به شمار می‌آیند.

مواد مرکبی که به‌طور طبیعی یافت می‌شوند، کدام‌اند؟

در دسترس‌ترین نمونه در طبیعت، چوب درختان و گیاهان است. در ساقه و تنه درختان، لیگنین (ماده‌ی چوب) نقش ماتریسی را ایفا می‌کند که توسط الیاف سلولز تقویت شده‌است. مثال دیگر، استخوان است که در آن ورق‌های متشکل از یون‌های کلسیم و فسفات، به‌عنوان فاز تقویت‌کننده کلاژن (نوعی پروتئین غیرقابل حل) محسوب می‌شوند.

مواد مرکب پیشرفته کدام‌اند؟

مواد مرکبی که معمولاً از آن‌ها در صنایع هوا–فضا استفاده می‌شود، با عنوان مواد مرکب پیشرفته شناخته می‌شوند. این نوع مواد دارای تقویت‌کنندهای با قطر کم و کارایی بالا در زمینه‌هایی همچون اپوکسی یا آلومینیم هستند. ترکیباتی چون گرافیت/اپوکسی، کولار[۱]/اپوکسی و بُرُن/آلومینیم از جمله این مواد مرکب به شمار می‌آیند که امروزه در انواع صنایع تجاری و نظامی کاربردهای فراوانی یافته اند.

بدیهی است ترکیب دو یا چند ماده برای ساخت یک ماده مرکب، نسبت به استفاده از مواد فلزی و آلیاژی مرسوم همچون آلومینیم و فولاد به مراتب کار بیشتری می‌طلبد. بنابراین، مزیت ترجیح مواد مرکب به فلزات چیست؟

مواد فلزی و آلیاژهای آن‌ها به‌طور کامل پاسخگوی نیازهای فناوری پیشرفته امروز نمی‌باشند. در بسیاری از موارد، تنها راه به‌دست آوردن محصولی با خواص مکانیکی و شیمیایی مطلوب، ترکیب چندین ماده متفاوت با یک‌دیگر است. به‌عنوان مثال، اجزاء و سازه‌های موجود در یک ماهواره یا سفینه فضایی، بایستی تحت تغییرات دمایی در محدوده ۱۶۰- تا ۹۳ درجه سانتی‌گراد پایداری ابعادی خود را حفظ کنند. لازمه‌ی این پایداری، استفاده از موادی با ضریب انبساط حرارتی بسیار پایین (در حدود $\pm 1.8\times10^{-7}\ m/m/^{\circ}C$) است که تنها، مواد مرکبی همچون گرافیت/اپوکسی می‌توانند چنین شرایطی را احراز نمایند[۲]. علاوه بر این، در بسیاری از موارد، کارایی و بازدهی مواد مرکب نسبت به سایر مواد بسیار بالاتر است. مثلا در صنعت هواپیماسازی، بهتر است که وزن کل سازه، در عین

۱- کِولار (Kevlar)، نام تجاری الیاف آرامید مقاوم در برابر حرارت است که توسط شرکت E.I. Dupont سنتز شده است.

۲- به عنوان مثال، ضریب انبساط حرارتی فولاد، حدود 1.17×10-5 M/M/0c می باشد.

داشتن سختی و استحکام لازم، کاهش یابد. این امر تنها درصورت جای‌گزینی قطعات فلزی و آلیاژی با مـواد مرکـب امکان‌پذیر خواهد بود. شاید این تصور را داشته باشید که هزینه ساخت قطعـات از چنـین مـوادی بـالا بـوده و توجیـه اقتصادی ندارد. اما باید این نکته را درنظر داشته باشید که کم‌شدن تعداد قطعات لازم برای مونتاژ شدن و کاهش وزن و درنتیجه کاهش هزینه مصرف سوخت هواپیما در اثر استفاده از مواد مرکب، هزینه‌های صرف‌شده در فراینـد سـاخت را به راحتی در مدت زمان کوتاهی جبران مـی‌کنـد. بـرای مثـال، کـاهش یـک پونـدی (۰.۴۵۳ کیلـوگرم) وزن یـک هواپیمای مسافرتی، موجب صرفه‌جویی چیزی حدود ۳۶۰ گالن (۱۳۶۰ لیتر) سوخت در سال خواهد شد[۱]. بد نیسـت بدانید هزینه سوخت، حدود ۲۵ درصد کلِ بهای خدمات خطوط هواپیمایی را تشکیل می‌دهد[۲]. علاوه بر همه‌ی ایـن موارد، استحکام، سختی، مقاومت خستگی، مقاومت در برابر ضربه، هدایت گرمایی و مقاومت در برابر خـوردگیِ بـالاتر مواد مرکب نسبت به مواد رایج و مرسوم، از دیگر مزیت‌های عمده‌ی این مواد به شمار می‌آید.

مزایای مکانیکی مواد مرکب چگونه اندازه‌گیری و سنجیده می‌شوند؟

میله‌ای را تحت بار محوری P در نظر بگیرید. در این صورت جابجایی محوری میله، u، بدین صورت خواهد بود:

$$u = \frac{PL}{AE} \qquad (۱-۱)$$

که در آن L = طول میله و E = مدول یانگ ماده‌ی تشکیل‌دهنده‌ی میله می‌باشد.

چون جرم (M) میله برابر است با:

$$M = \rho AL \qquad (۱-۲)$$

که ρ چگالی میله است، بنابراین:

$$M = \frac{P^2L^2}{u^2}\frac{1}{E/\rho^2} \qquad (۱-۳)$$

رابطه (۱-۳) نشان خواهد داد که برای یک تغییر مکان مشخص و یک بار مشخص، سبک‌ترین تیر، تیـری اسـت که مقدار E/ρ آن بزرگتر باشد. بنابراین برای اندازه‌گیری مزیت مکانیکی، نسبت E/ρ (نسـبت مـدول یانـگ مـاده بـه چگالی آن) به‌عنوان *مدول ویژه*[1] محاسبه خواهد شد. پارامتر دیگر، *استحکام ویژه*[2] نام دارد که در واقع نسبت استحکام ماده، σ_{ult} به چگالی آن، ρ، می‌باشد:

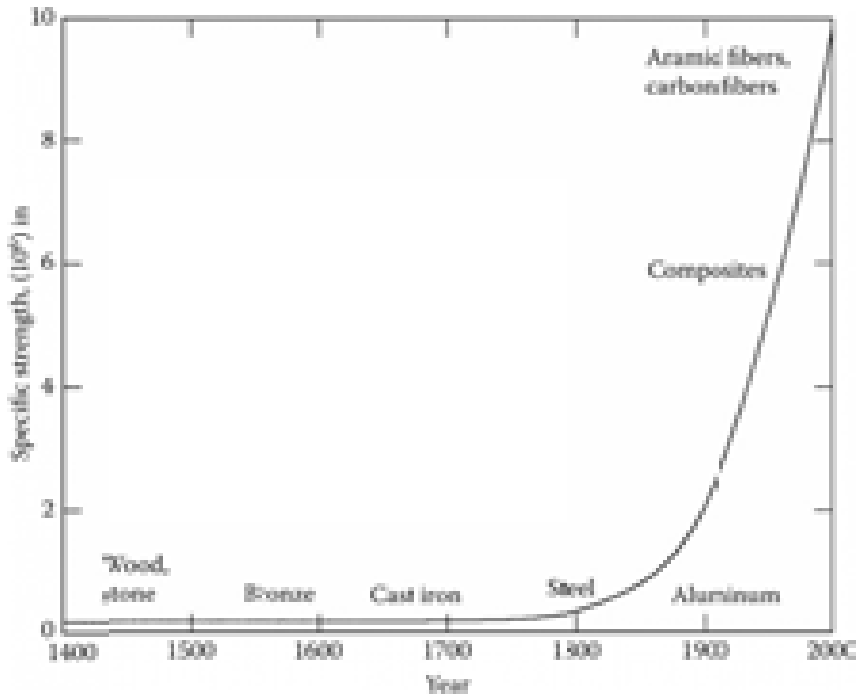
$$\text{استحکام ویژه} = \frac{\sigma_{ult}}{\rho}$$

1- Specific Modulus
2- Specific Strength

این دو نسبت برای مواد مرکب، مقادیر نسبتا بزرگی هستند. به‌عنوان مثال، استحکام گرافیت/اپوکسی یک‌جهته، با استحکام فولاد برابر است. ولی استحکام ویژه آن سه برابر استحکام ویژه فولاد است. این موضوع چه مفهومی برای طراح به‌دنبال دارد؟ طراحی یک میله، برای تحمل یک بار محوری را به‌عنوان یک مسأله‌ی ساده در نظر بگیرید. سطح مقطع میله با جنس گرافیت/ اپوکسی، با سطح مقطع میله‌ی فولادی برابر است، در حالی‌که جرم میله‌ی گرافیت/ اپوکسی، یک‌سوم جرم میله فولادی است. در واقع این کاهش وزن به معنی کاهش مواد مصرفی و در نتیجه صرفه‌جویی در مصرف انرژی است. شکل (۱–۱)، استحکام ویژه مواد مرکب و الیاف مختلف را با مواد مرسوم مقایسه می‌کند[۳]. توجه داشته باشید که واحد استحکام ویژه در شکل (۱–۱)، برحسب اینچ بیان شده است. به‌کارگیری این واحد به این دلیل است که در بعضی از متون، مدول ویژه و استحکام ویژه به‌صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\text{مدول ویژه} = \frac{E}{\rho g}، \quad \text{استحکام ویژه} = \frac{\sigma_{ult}}{\rho g}.$$

که g در این‌جا، شتاب گرانشی زمین است ($۳۲.۲ \text{ ft/s}^۲$ یا $۹.۸۱ \text{ m/s}^۲$).



شکل (۱–۱). استحکام ویژه مواد برحسب زمانی که مورد استفاده قرار گرفته‌اند. منبع:
Eager, T.W., Whither advanced materials? *Adv. Mater. Processes*, ASM International, June 1991, 25-29

در جدول (۱–۱)، مقادیر مدول و استحکام ویژه برای چند نمونه از مواد مرکب تک‌جهته[۱]، متقاطع[۲] و لمنیت‌های شبهِ‌همسان‌گرد[۳] و برخی از فلزات پرکاربرد آورده شده است.

جدول ۱–۱– مدول و استحکام ویژه چند نمونه از الیاف مرکب و فلزات.

Material Units	Specific gravity[a]	Young's modulus (Msi)	Ultimate strength (ksi)	Specific modulus (Msi-in.³/lb)	Specific strength (ksi-in.³/lb)
System of Units: USCS					
Graphite fiber	1.8	33.35	299.8	512.9	4610
Aramid fiber	1.4	17.98	200.0	355.5	3959
Glass fiber	2.5	12.33	224.8	136.5	2489
Unidirectional graphite/epoxy	1.6	26.25	217.6	454.1	3764
Unidirectional glass/epoxy	1.8	5.598	154.0	86.39	2368
Cross-ply graphite/epoxy	1.6	13.92	54.10	240.8	935.9
Cross-ply glass/epoxy	1.8	3.420	12.80	52.59	196.8
Quasi-isotropic graphite/epoxy	1.6	10.10	40.10	174.7	693.7
Quasi-isotropic glass/epoxy	1.8	2.750	10.60	42.29	163.3
Steel	7.8	30.00	94.00	106.5	333.5
Aluminum	2.6	10.00	40.00	106.5	425.5
Material Units	**Specific gravity**	**Young's modulus (GPa)**	**Ultimate strength MPa)**	**Specific modulus (GPa-m³/kg)**	**Specific strength (MPa-m³/kg)**
System of Units: SI					
Graphite fiber	1.8	230.00	2067	0.1278	1.149
Aramid fiber	1.4	124.00	1379	0.08857	0.8850
Glass fiber	2.5	85.00	1550	0.3340	0.5200
Unidirectional graphite/epoxy	1.6	181.00	1500	0.1131	0.9377
Unidirectional glass/epoxy	1.8	38.60	1062	0.02144	0.5900
Cross-ply graphite/epoxy	1.6	95.98	373.0	0.06000	0.2331
Cross-ply glass/epoxy	1.8	23.58	88.25	0.01310	0.3490
Quasi-isotropic graphite/epoxy	1.6	69.64	276.48	0.04353	0.1728
Quasi-isotropic glass/epoxy	1.8	18.96	73.08	0.01053	0.3406
Steel	7.8	206.84	648.1	0.02652	0.08309
Aluminum	2.6	68.95	275.8	0.02652	0.1061

a: چگالی ویژه مواد، همان نسبت چگالی ماده به چگالی آب است.

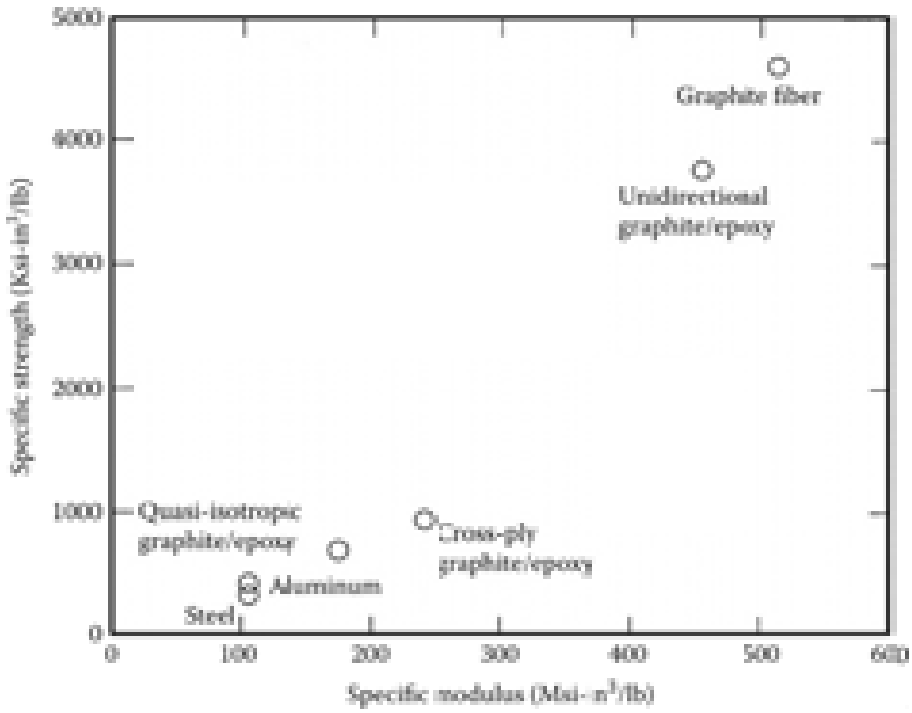
۱– لمینت تک‌جهته به لمینتی اطلاق می‌شود که تمام الیاف آن در یک جهت قرار گرفته باشند.

۲– لمینت متقاطع به لمینتی اطلاق می‌شود که الیاف به‌صورت عمود بر هم، یعنی به‌صورت تار و پود قرار گرفته باشند.

۳– لمینت شبه همسان‌گرد به لمینتی اطلاق می‌شود که رفتاری شبیه به رفتار مواد همسان‌گرد دارند، یعنی در یک نقطه‌ی خاص، خواص الاستیک آن‌ها در تمام جهات یکسان است.

در نگاه اول می‌بینیم که، مدول ویژه الیافی همچون گرافیت، آرامید و شیشه، چندین برابر مدول ویژه فلزاتی همچون فولاد و آلومینیم است. این موضوع ممکن است یک تصور غلط در مورد مزایای مکانیکی مواد مرکب ایجاد کند. زیرا ماده‌ی مرکب تنها از الیاف تشکیل نشده است؛ بلکه ترکیبی از الیاف و ماتریس است. در حالت کلی، عموما ماتریس‌ها دارای مدول و استحکام کمتری نسبت به الیاف هستند. حال آیا مقایسه‌ی مدول و استحکام ویژه مواد مرکب تک‌جهته و فلزات منصفانه و صحیح است؟ به دو دلیل پاسخ منفی است؛ اول این‌که از مواد تک‌جهته، تنها جهت تحمل کردن بارهای ساده، همچون کشش و یا خمش ساده و تک‌محوره استفاده می‌شود. در صورتی که در سازه‌هایی که تحت بارگذاری پیچیده قرار گرفته‌اند، اغلب از ورق‌های زاویه‌ای استفاده می‌شود. دلیل دوم این است که استحکام و مدول الاستیک آورده شده در جدول (۱–۱) در جهت الیاف محاسبه شده‌اند؛ در حالی که مقدار این فاکتورها در جهت عمود بر الیاف، بسیار کمتر است.

حال مقایسه‌ای بین انواع معروف لمینیت‌ها، هم‌چون لمینیت‌های متقاطع و شبه همسان‌گرد خواهیم کرد (در فصل دوم با انواع لمینیت‌ها به‌طور کامل آشنا خواهید شد). در شکل (۱–۲)، استحکام ویژه الیاف، فلزات و مواد مرکبِ مختلف بر حسب تابعی از مدول ویژه نشان داده شده است.



شکل (۱–۲). استحکام ویژه به‌عنوان تابعی از مدول ویژه فلزات، الیاف و مواد مرکب.

آیا تنها ملاک برای ارزیابی مزایای نسبی مواد مرکب و فلزات، پارامترهای مدول و استحکام ویژه هستند؟

خیر، در واقع بستگی به‌نوع کاربرد سازه دارد [۴]. یک ستون تحت کمانش را در نظر بگیرید. فرمول اویلر، میزان بار بحرانی که در آن، ستون به کمانش می‌رسد را بدین صورت بیان می‌کند [۵]:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \qquad (۴-۱)$$

که در آن

P_{cr} = بار بحرانی کمانش (N یا Ib)، E = مدول یانگ ستون (N/m^2 یا Ib/in^2)، I = ممان دوم سطح (m^4 یا in^4) و L = طول تیر (m یا in) می‌باشد.

اگر مقطع ستون دایره‌ای باشد، ممان دوم سطح برابر است با:

$$I = \pi \frac{d^4}{64} \qquad (۵-۱)$$

جرم میله به‌صورت

$$M = \rho \frac{\pi d^2 L}{4} \qquad (۶-۱)$$

که در آن

M = جرم تیر (Ib یا kg)، ρ = چگالی تیر (Ib/in^3 یا kg/m^3) و d = قطر تیر (in یا m) است.

چون طول تیر (L) و بار (P) ثابت فرض شده‌اند، با جای‌گذاری روابط (۱-۵) و (۱-۶) در رابطه (۱-۴) خواهیم داشت:

$$M = \frac{2L^2\sqrt{P_{cr}}}{\sqrt{\pi}} \frac{1}{E^{1/2}/\rho} \qquad (۷-۱)$$

این عبارت به این معنی است که برای یک سختی مشخص، سبک‌ترین تیر، تیری است با بیشترین مقدار $E^{\frac{1}{2}}/\rho$.

به‌طور مشابه می‌توان نشان‌داد، جهت دست‌یابی به کمترین تغییر مکان، برای تیری که تحت بار طولی قرار گرفته است، سبک‌ترین تیر، تیری است که بیشینه مقدار $E^{\frac{1}{3}}/\rho$ را دارا است. مقادیر نمونه‌ای از این دو پارامتر یعنی $E^{\frac{1}{2}}/\rho$ و $E^{\frac{1}{3}}/\rho$ برای چند نمونه از الیاف، مواد مرکب تک‌جهته، لمینیت‌های متقاطع و شبه‌همسان‌گرد، فولاد و آلومینیم در

جدول (۱–۲) آمده است. با مقایسه این اعداد می‌توان دریافت که از منظر این دو پارامتر، مواد مرکب مزیت‌های بیشتری نسبت به فلزات دارا هستند. پارامترهای دیگری که از آن‌ها برای مقایسه‌ی مواد مرکب و فلزات استفاده می‌شود، مقاوت در برابر شکست، خستگی، ضربه و خزش می‌باشد.

جدول (۱–۲). مقادیر نمونه پارامتر ویژه ($E^{\frac{1}{2}}/\rho$ و $E^{\frac{1}{3}}/\rho$) چند ماده مرکب و فلز رایج.

Material Units	Specific gravity	Young's modulus (Msi)	E/ρ (Msi-in.³/lb)	$E^{1/2}/\rho$ (psi$^{1/2}$-in.³/lb)	$E^{1/3}/\rho$ (psi$^{1/3}$-in.³/lb)
System of Units: USCS					
Graphite fiber	1.8	33.35	512.8	88,806	4,990
Kevlar fiber	1.4	17.98	355.5	83,836	5,180
Glass fiber	2.5	12.33	136.5	38,878	2,598
Unidirectional graphite/epoxy	1.6	26.25	454.1	88,636	5,141
Unidirectional glass/epoxy	1.8	5.60	86.39	36,584	2,730
Cross-ply graphite/epoxy	1.6	13.92	240.5	64,545	4,162
Cross-ply glass/epoxy	1.8	3.42	52.59	28,438	2,387
Quasi-isotropic graphite/epoxy	1.6	10.10	174.7	54,980	3,740
Quasi-isotropic glass/epoxy	1.8	2.75	42.29	25,501	2,154
Steel	7.8	30.00	106.5	19,437	1,103
Aluminum	2.6	10.00	106.5	33,666	2,294

Material Units	Specific gravity	Young's modulus (GPa)	E/ρ (GPa-m³/kg)	$E^{1/2}/\rho$ (Pa$^{1/2}$-m³/kg)	$E^{1/3}/\rho$ (Pa$^{1/3}$-m³/kg)
System of Units: SI					
Graphite fiber	1.8	230.00	0.1278	266.4	3.404
Kevlar fiber	1.4	124.00	0.08857	251.5	3.562
Glass fiber	2.5	85.00	0.034	116.6	1.759
Unidirectional graphite/epoxy	1.6	181.00	0.1131	265.9	3.535
Unidirectional glass/epoxy	1.8	38.60	0.02144	109.1	1.878
Cross-ply graphite/epoxy	1.6	95.98	0.060	193.6	2.862
Cross-ply glass/epoxy	1.8	23.58	0.0131	85.31	1.593
Quasi-isotropic graphite/epoxy	1.6	69.64	0.04353	164.9	2.571
Quasi-isotropic glass/epoxy	1.8	18.96	0.01053	76.50	1.481
Steel	7.8	206.84	0.02652	58.3	0.7582
Aluminum	2.6	68.95	0.02662	101.0	1.577