دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی نساجی

پیش‌بینی سفتی کامپوزیت‌های الیاف کوتاه با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی نساجی- شیمی نساجی و علوم الیاف

فاطمه کوثر

استاد راهنما

دکتر علی زادهوش

۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحيم

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی نساجی

پیش‌بینی سفتی کامپوزیت‌های الیاف کوتاه با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد مهندسی نساجی-شیمی نساجی و علوم الیاف

فاطمه کوثر

استاد راهنما

دکتر علی زادهوش

۱۳۹۰

دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی نساجی

پایان‌نامه‌ی کارشناسی ارشد رشته‌ی مهندسی نساجی-شیمی نساجی و علوم الیاف خانم فاطمه کوثر تحت عنوان

پیش‌بینی سفتی کامپوزیت‌های الیاف کوتاه با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی

در تاریخ ۹۰/۳/۲۴ توسط کمیته‌ی تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

۱- استاد راهنمای پایان‌نامه	دکترعلی زادهوش
۲- استاد مشاور پایان‌نامه	دکتر داریوش سمنانی
۳- استاد داور	دکتر سعید نوری خراسانی
۴- استاد داور	دکتر مصطفی یوسفی
سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده	دکتر سعید آجلی

سپاس

پیش از بردن هر نامی، یگانه پروردگار مهربانم را سپاس می گویم که در تمامی لحظات زندگیم بهترین و تنهاترین یار و مونسم بوده است.او را به خاطر همه آنچه که بر سر راهم قرار داده تا مایه‌ی هدایت و تقربم شوند، می ستایم که حمد و ستایش تنها شایسته ذات اوست.

بر خود لازم میدانم، شکر خالق بی همتایم را بر دو نعمت بزرگ پدر و مادر بجا آورم.آنان که با صبوری، اسباب آسایش و پیشرفت مرا فراهم نمودند. از خداوند منان رستگاری آنان را خواستارم.

از خواهرها و برادرهای مهربان و همراهم صیمانه سپاسگزارم.

از استاد راهنمای خوبم جناب آقای دکتر علی زادهوش، بخاطر زحمات ایشان در طول دوران تحصیل و در طی انجام این پایان نامه و نیز برای همه آنچه که از ایشان آموختم، صمیمانه تشکر میکنم.

از جناب آقای دکتر داریوش سمنانی که با بزرگواری و راهنماییهای خویش مرا یاری نمودند، متشکرم.

از اساتید گرانقدر آقای دکتر نوری خراسانی و آقای دکتر یوسفی که زحمت داوری این تحقیق را به عهده گرفتند، کمال تشکر را دارم.

از استاد خوبم، جناب آقای حسین مطیع که در طول دوران تحصیل در مقطع کارشناسی ارشد، افتخار آشنایی با ایشان و استفاده از محضرشان را داشتم، قدردانی می کنم.

از تمامی اساتیدی که با راهنمایی های کریمانه خویش مرا یاری نمودند، متشکرم.آقایان: مهندس رضادوست (عضو هیات علمی پژوهشگاه پلیمر)، آقای مهندس فهیمی فرد (در بخش شبکه عصبی) ، دکتر بلا پوکانسزکی (عضو هیات علمی دانشگاه بوداپست مجارستان)،دکتر رنر(عضو هیات علمی دانشگاه بوداپست مجارستان)، پروفسور چارلز تاکر(عضو هیات علمی دانشگاه ایلینویز آمریکا)، دکتر پیتر هاین(عضو هیات علمی دانشگاه لیدز انگلیس)، پروفسور استوالد و...

از سرکار خانم مهندس صدیقی پور و آقای مهندس مویدی به خاطر زحمات دلسوزانه شان سپاسگزارم.

خدا را برای داشتن دوستان و همنشینان بسار خوبم سپاسگزارم. دوستان باصفایی که لطف و صداقت و محبتشان را همیشه بخاطر دارم. خانم ها : انسیه اشرفی، عصمت پاکیزه، زهره داورپناه، پروین رزاقی، اعظم عموزادی، سمیه مرادی، سیده معصومه معافی مدنی، کبری نیکنام و بسیاری دیگر که از ذکر نامشان خودداری می کنم.

خدایا چنان کن سرانجام کار تو خشنود باشی و ما رستگار

.

فاطمه کوثر

خرداد ۱۳۹۰

کلیه‌ی حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات، ابتکارات و نوآوری‌های ناشی از تحقیق موضوع این پایان‌نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

تقدیم به دستان گره گشا و پر مهر حضرت باب الحوائج،

ابا لفضل العباس (ع)

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست مطالب ..... هشت

چکیده ۱

فصل اول: کلیات .....

۱-۱ مقدمه ۲

۱-۱-۱ معرفی کامپوزیت‌ها ۲

۱-۱-۲ طراحی مواد کامپوزیتی ۴

۱-۱-۳ طبقه‌بندی کامپوزیت‌ها ۵

۱-۲ انتقال بار و پدیده‌اثر انتهای الیاف در کامپوزیت‌های الیاف کوتاه ۹

۱-۳ مفهوم طول بحرانی ۱۰

۱-۴ نمودارهای توزیع تنش کششی و برشی در کامپوزیت‌های لیفی ۱۱

۱-۵ تانسورها ۱۲

۱-۶ پیش‌بینی خواص مکانیکی (سفتی) کامپوزیت‌های الیاف کوتاه ۱۲

۱-۶-۱ توزیع طولی ۱۳

۱-۶-۲ آرایش یافتگی صفحه‌ای ۱۶

۱-۶-۳ مروری کوتاه بر روش‌های اندازه‌گیری آرایش یافتگی (توزیع آرایش یافتگی) الیاف به کمک آنالیز تصویر ۱۶

۱-۷ . مروری بر روش‌های پیش‌بینی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف کوتاه ۱۷

۱-۷-۱ انواع تئوری‌های موجود برای پیش‌بینی سفتی کامپوزیت‌های الیاف کوتاه تک جهته ۱۸

۱-۷-۲ تصحیح فرمول اختلاط ساده از طریق پیش‌بینی مقادیری برای فاکتورهای توزیع طولی و توزیع آرایش یافتگی ۳۰

۱-۷-۳ پیش‌بینی عددی خواص ۳۲

۱-۷-۴ سایر روش‌ها ۳۵

۱-۸ شبکه‌های عصبی مصنوعی(ANN) ۴۱

۱-۸-۱ ساختار و عملکرد یک نرون ۴۳

۱-۸-۲ ساختار شبکه عصبی مصنوعی ۴۴

۱-۸-۳ یادگیری در شبکه‌های عصبی ۴۷

انواع ی‌ادگی‌ری در شبکه‌های عصبی ۴۷

۱-۸-۴ انواع مدل‌های شبکه عصبی مصنوعی ۵۰

۱-۸-۵ الگوریتم های آموزش شبکه‌های عصبی مصنوعی ۵۱

۱-۹ هدف پروژه ۵۱

فصل دوم: روش جمع‌آوری داده جهت آموزش و تست شبکه عصبی ۵۲

۲-۱ مقدمه ۵۲

۲-۲ روش ساخت نمونه‌های کامپوزیتی ۵۲

۲-۲-۱ مشخصات مواد، دستگاه‌ها و نرم‌افزارهای مورد استفاده ۵۲

۲-۳ روش بدست آوردن داده‌های مورد نیاز به منظور آموزش و ارزیابی شبکه عصبی ۵۶
۲-۳-۱ شناسایی متغیرهای مستقل و وابسته ۵۶
فصل سوم: تحلیل و بررسی نتایج ٦٦
۳-۱ مقدمه ۶۶
۳-۲ تحلیل رفتار داده‌ها ۶۶
۳-۳ اعمال مدلهای میکرومکانیکی بر روی داده‌های اندازه‌گیری شده ۶۸
۳-۳-۱ ارزیابی مدلها و مقایسهی نتایج آنها با مدل پیشنهادی ۶۹
۳-۴ اعمال شبکه عصبی بر روی داده‌ها ۷۰
۳-۴-۱ مراحل طراحی و اجرای شبکه‌های عصبی ۷۱
۳-۴-۲ آموزش و تست شبکه عصبی ۷۱
۳-۶-یافتن تاثیرگذارترین پارامتر در میان متغیرهای ورودی ۷۷
فصل چهارم: نتیجه گیری و پیشنهادات ۷۸
۴-۱ نتیجه‌گیری ۷۸
۴-۲ پیشنهادات ۷۹
پیوست۱ ..... ۸۰
پیوست۲ ..... ۸۱
پیوست۳ ..... ۸۱
پیوست ۴ ..... ۸۸
پیوست ۵ ..... ۸۹
مراجع ۹۰

چکیده

کامپوزیت‌های الیاف کوتاه به دلیل آسانی پروسه تولید و پایین‌تر بودن هزینه‌ی ساخت، یکی از پرکاربردترین انواع کامپوزیت‌ها می‌باشند.از سویی دیگر ماهیت فرآیندهایی که برای تولید این نوع کامپوزیت‌ها به کار گرفته می‌شود،به عنوان مثال روش قالبگیری تزریقی، به گونه‌ای است که باعث ایجاد حالت راندم در مقادیر طول الیاف و آرایش‌یافتگی آن‌ها می شود. به این ترتیب بر خلاف کامپوزیت‌های الیاف بلند، در این نوع از کامپوزیت‌ها، طول و آرایش‌یافتگی الیاف حالت یکنواخت نداشته و لذا به منظور محاسبه‌ی خواص مکانیکی این مواد، لازم است توزیع مقادیر طول و زاویه الیاف با جهت بارگذاری در نظرگرفته شود. در کنار عوامل ذکر شده، وجود اثر انتها در کامپوزیت‌های الیاف کوتاه سبب ایجاد ضرورت برای یافتن مدلی متفاوت با تئوری‌های کامپوزیت‌های الیاف بلند، جهت محاسبه‌ی خواص مکانیکی این مواد می‌شود.

به این منظور تا کنون تحقیقات زیادی صورت گرفته است که از آن جمله می‌توان به بکارگیری روش المان محدود و یا تصحیح معادله‌ی اختلاط از طریق ضرب فاکتورهای‌اعمال کننده‌ی تاثیر توزیع طولی و توزیع آرایش‌یافتگی، اشاره نمود. با توجه به فرضیات محدود کننده‌ی روش‌های موجود و نیز به منظور افزایش دقت پیش‌بینی در برخی از آن‌ها، در این تحقیق هدف بررسی قابلیت روش شبکه عصبی به منظور پیش‌بینی سفتی کامپوزیت‌های الیاف کوتاه می‌باشد . مزیت اصلی این روش نسبت به سایر روش‌ها عدم وجود هر نوع پیش فرض محدود کننده و نیز قابلیت این روش جهت تعیین موثرترین پارامتر بر روی میزان سفتی می‌باشد. لذا به منظور جمع‌آوری داده جهت آموزش و تست شبکه عصبی، در این تحقیق ابتدا نمونه‌های کامپوزیت الیاف کوتاه پلی‌پروپیلن و شیشه ساخته شد، سپس توزیع طولی وتوزیع آرایش‌یافتگی الیاف در این کامپوزیت‌ها به کمک آنالیز تصویر اندازه‌گیری شد، بعد از آن اندازه‌گیری مدول الاستیسیته‌ی طولی کامپوزیت‌ها انجام شد و در مرحله‌ی بعد ساختارهای مختلف شبکه عصبی توسط داده‌های جمع‌آوری شده آموزش و تست شد و بهترین ساختار شبکه عصبی تعیین گردید. به منظور ارزیابی قابلیت پیش‌بینی مدول الاستیک طولی کامپوزیت‌های الیاف کوتاه توسط مدل‌های مختلف و مدل بدست‌آمده از شبکه عصبی، چهار مدل میکرومکانیکی به داده‌های جمع‌آوری شده اعمال شد و از طریق مقایسه‌ی مقادیر محاسبه شده‌ی مدول توسط این مدل‌ها و نتایج تجربی، تمامی این مدل‌ها مورد ارزیابی قرار گرفتند.

پس از طی مراحل گفته شده، نتایج بدست‌آمده توسط خطای *RMSE* مورد سنجش قرار گرفت و مشخص شدکه بر اساس نتایج بدست‌آمده در این تحقیق، مدل PPA (paper physics approach) با مقدار خطای ۰/۷۲۰۶ بالاترین دقت را در پیش‌بینی نشان می‌دهد و پس از آن به ترتیب مدل LAA (laminate analogy approach) با مقدار خطای ۱/۰۶۷۳ و با اختلاف کمی مدل بدست‌آمده به روش شبکه عصبی با مقدار خطای ۱/۱۳۳۱ قرار دارد. قاعده‌ی سرانگشتی و مدل کاکس-کرنچل به ترتیب با مقدار خطای ۱/۲۶۴۳ و ۱/۴۲۳۰ در اولویت‌های بعدی قرار دارند. به این ترتیب بر اساس نتایج بدست‌آمده در این تحقیق، بهترین مدل به منظور محاسبه‌ی مدول الاستیک طولی کامپوزیت‌های الیااف کوتاه، مدل PPA است که بر اساس مقدار خطای آن بهتر از سایر مدل‌ها عمل می‌کند. هم‌چنین نتایج نشان می‌دهدکه قاعده‌ی سرانگشتی به ازای مقادیر پایین درصد تقویت‌کننده (کسر وزنی ۱۰٪ و ۲۰٪) یک روش آسان به منظور محاسبه‌ی مدول طولی کامپوزیت‌های الیاف کوتاه می‌باشد. علاوه بر این مدل بدست‌آمده به روش شبکه عصبی، قابلیت این روش جهت پیش‌بینی مدول الاستیک طولی کامپوزیت‌های الیاف کوتاه را به اثبات می‌رساند.

کلمات کلیدی: کامپوزیت‌های الیاف کوتاه، توزیع طولی الیاف، توزیع آرایش‌یافتگی الیاف، شبکه عصبی

فصل اول
کلیات

۱-۱ مقدمه

کامپوزیت‌ها گروه مهم و وسیعی از مواد مهندسی را تشکیل می‌دهند. به طوری که تولید سالانه‌ی آن‌ها بالغ بر ۱۰ میلیون تن می‌باشد.کامپوزیت‌ها کاربردهای زیادی دارند. علاوه بر این، امکان تنظیم ساختار آن‌ها با توجه به شرایط مورد استفاده‌شان نیز وجود دارد. خیلی از مواد طبیعی از جمله چوب، استخوان، دندان و دیگر مواد کامپوزیت محسوب می‌شوند. این‌ها همه کامپوزیت‌هایی هستند که به منظور تولید خواص مکانیکی مطلوب، دارای ساختار داخلی پیچیده‌ای می‌باشند[۱].

۱-۱-۱ معرفی کامپوزیت‌ها

بسیاری از مواد طبیعی که حداقل از دو جزء تشکیل شده‌اند، کامپوزیت به حساب می‌آیند. در بیشتر موارد، یک جزء سفت و مستحکم در جزء با سفتی و استحکام کمتر که ماتریس[1] نامیده می‌شود قرار می‌گیرد. به عنوان مثال چوب متشکل از زنجیرهای سلولزی است که در بستر لیگنین[2] قرار گرفته‌اند، یا مثلاً استخوان و دندان شامل کریستال‌های غیرآلی سخت هیدروکسی آپاتیت یا استئون در یک ماتریس ضربه‌پذیر به نام کلاژن هستند.

حال به عنوان تعریف دقیق و کاملی از کامپوزیت‌ها می‌توان گفت کامپوزیت‌ها متشکل از دو یا چند جزء مختلف هستند که به طور ماکروسکوپی با هم مخلوط شده‌اند. بایستی به این نکته توجه نمود که‌این مواد در مقیاس ماکروسکوپی با یکدیگر مخلوط شده‌اند نه به صورت میکروسکوپی. بدین ترتیب موادی مثل آلیاژها، در این

[1] Matrix
[2] Lignin

تعریف نمی‌گنجند، زیرا اگرچه از ترکیب چند جزء تشکیل شده‌اند ولی به صورت میکروسکوپی با هم مخلوط شده‌اند. منظور از آنچه تحت عنوان کامپوزیت مطرح می‌گردد، موادی هستند متشکل از دو جزء ماتریس و تقویت کننده[1] که به صورت ماکروسکوپی با هم مخلوط شده‌اند. به گونه‌ای که هر کدام از دو جزء خواص خود را در مخلوط حفظ کرده ولی در ترکیب با یکدیگر خواص مکانیکی منحصر به فردی را تولید می‌کنند.قابل ذکر است که این دو جزء قابل جدا شدن هستند.

در میان انواع کامپوزیت‌ها، مواد کامپوزیتی لیفی از جمله مواردی هستند که[2] خاصیت انیزوتروپی[3] واضحی از خود نشان می‌دهند . بر این اساس خواص این مواد وابستگی زیادی به جهت دارد. این خاصیت ناشی از آرایش فاز تقویت‌کننده‌ای مثل لیف، در جهت مشخصی که محور لیف می‌باشد، است تا در جهت آرایش خواص برتری نتیجه شود. به علاوه یک یا دو تا از اجزاء ممکن است به دلیل ساختار کریستالی‌شان دارای خواص انیزوتروپی ذاتی باشند. در مواد طبیعی، چنین انیزوتروپی در خواص مکانیکی، به خاطر ساختارشان بوجود می‌آید. به عنوان مثال، چوب در جهت محور لیف که موازی با محور شاخه قرار می‌گیرد، بسیار قویتر از جهت عرضی‌اش می‌باشد. و اتفاقا به دلیل جهت وزش باد، استحکام بالا در جهت طولی شاخه مطلوب می‌باشد. قابلیت انیزوتروپی قابل کنترل در کامپوزیت‌ها (وابستگی خواص به جهت)، باعث می‌شود که امکان طراحی کامپوزیت با به دست آوردن خواص مطلوب در جهت مورد نظر، بوجود آید. و این ویژگی مهم کامپوزیت‌هاست که وجه تمایز آن‌ها از سایر مواد مهندسی را تشکیل می‌دهد. بر خلاف بسیاری از طراحی های مهندسی، در ساخت کامپوزیت‌ها باید انیزوتروپی اجزاء در نظر گرفته شود و طراحی به نحوی صورت گیرد که خواص مطلوب در جهت مورد نظر به دست آید.

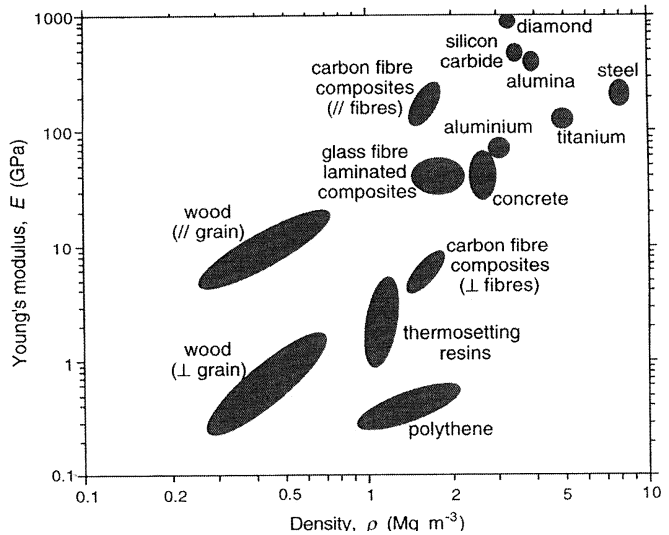
بسته به نوع ماده‌ای که به عنوان ماتریس(فاز پیوسته) به کارگرفته می‌شود، انواع مختلفی از کامپوزیت‌ها وجود دارد. کامپوزیت با ماتریس پلیمری، سرامیکی و فلزی. بیشتر کامپوزیت‌های صنعتی بر اساس ماتریس‌های پلیمری هستند که می‌تواند ترموست یا ترموپلاست باشد. این پلیمرها معمولا با الیاف سرامیکی آرایش یافته مثل شیشه یا کربن تقویت می‌شوند. و از آنجایی که سفتی ماتریس به مراتب کمتر از الیاف است، انیزوتروپی واضحی ایجاد می‌شود. مهم‌ترین خواصی که بهبود آن‌ها در ساخت کامپوزیت‌ها مورد هدف می‌باشند، عبارتند از سفتی، استحکام و ضربه‌پذیری. دانسیته نیزدر بیشتر موارد از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. خواص حرارتی از قبیل انبساط و رسانایی نیز باید در نظر گرفته شوند. چرا که کامپوزیت‌ها در حین فرآیند تولید با تغییرات حرارتی روبه رو شده

[1] Reinforcement
[2] Fibrous composite
[3] Anisotropy

که در صورت عدم تطابق بین ضرایب انبساط حرارتی دو جزء، تنش‌های باقیمانده ی داخلی ایجاد می‌شود. و این تنش‌ها تاثیر شدیدی روی خواص مکانیکی می گذارند[۱].

۱-۱-۲ طراحی مواد کامپوزیتی

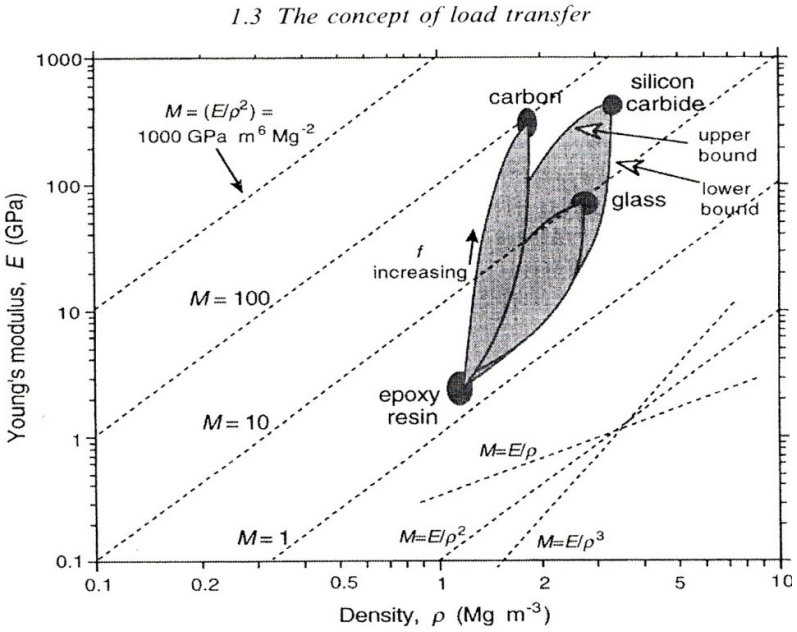
انتخاب ترکیب و ساختار یک ماده ی کامپوزیتی به منظور یک کاربرد خاص، موضوع ساده‌ای نیست. ورود تقویت کننده به ماتریس همه ی خواص آن را تغییر می‌دهد.هم چنین لازم است تغییرات احتمالی در ریز ساختار ماتریس که در نتیجه‌ی حضور تقویت کننده می‌باشد، در نظر گرفته شود.تولید تنش‌های باقیمانده که به سبب اختلاف میزان انبساط حرارتی بین دو جزء در حین پروسه ی تولید، اتفاق می‌افتد نیز تاثیر بسزایی دارد. قبل از در نظر گرفتن چنین تاثیرات ثانویه‌ای، بهتر است خواص متفاوتی که از سیستم‌های مختلف کامپوزیتی قابل حصول است، مرورشود. مثال آن درشکل ۲-۱ نشان داده شده است. این شکل، نمودار مدول در مقابل دانسیته را نشان می‌دهد و هر منطقه مربوط به یک ماده است. در این نمودار، به راحتی می‌توان خواص به دست آمده از کامپوزیت ماتریس و تقویت کننده را با مواد معمول مقایسه کرد. همانطور که مشاهده می‌شود مدول ویژه E/ρ کامپوزیت‌ها از سایر مواد مهندسی، بالاتر است و این یکی از مطلوبترین ویژگیهای کامپوزیت‌هاست که خواص مکانیکی بالا را به‌ازای وزن سبک‌تر دارا هستند.



شکل ۲-۱- داده‌های مربوط به برخی مواد مهندسی که به صورت مناطقی در مختصات مدول بر حسب دانسیته نشان داده شده‌اند[۱]

شکل ۲-۲ نمودار E در مقابل ρ را برای سه لیف شیشه، کربن و سیلیکون کربید در ماتریس اپوکسی نشان می‌دهد. طول نواحی سایه زده شده حاصل اتصال نقاط مربوط به مدول لیف و ماتریس است و عرض آن‌ها در واقع

ناحیه‌ی محصور بین حد بالا (مدول طولی) و حد پایین (مدول عرضی) کامپوزیت حاصل از ترکیب دو جزء را نشان می‌دهند.خطوط نقطه چین بها زای مقادیر مختلف از نسبت ثابت E/ρ^2 رسم شده‌اند که به واسطه‌ی آن‌ها می‌توان E/ρ^2 یا E/ρ را برای هر کدام از این سه کامپوزیت سنجید و با هم مقایسه کرد[۱].

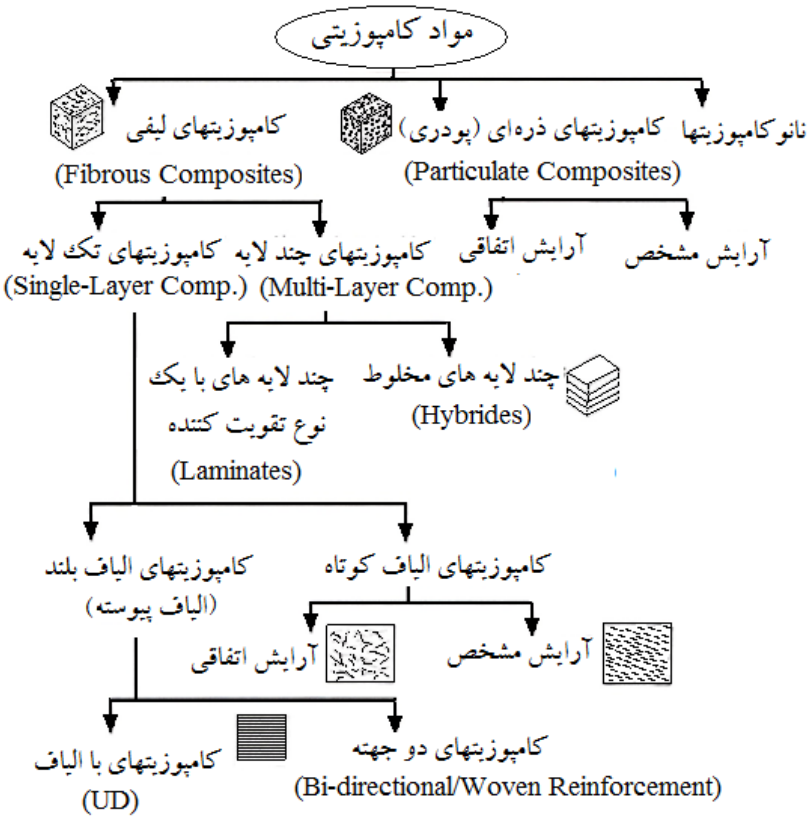


شکل ۲-۲- مختصات پیش‌بینی شده مدول بر حسب دانسیته برای رزین اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه، کربن و سیلیکون کربید.منطقه سایه زده شده با مقادیر مدول طولی و عرضی کامپوزیت‌ها محدود شده است[۱].

۱-۱-۳ طبقه‌بندی کامپوزیت‌ها

کامپوزیت‌ها را از جهات مختلف می‌توان طبقه بندی نمود.هدف از تهیه بسیاری از کامپوزیت‌ها بهبود خواص مکانیکی نظیر استحکام، سفتی[1]، چقرمگی[2] و کارایی در دمای بالا می‌باشد. لذا طبیعی است که مطالعهآ نها بر اساس مکانیسم تقویت‌کنندگی صورت پذیرد.مکانیسم تقویت‌کنندگی بستگی به شکل هندسی[3] تقویت‌کننده دارد، بنابراین بهتر است که طبقه بندی آن‌ها بر این اساس صورت پذیرد. این طبقه‌بندی در شکل ۲-۳ نشان داده شده است.

[1] Stiffness
[2] Toughness
[3] Geometry



شکل ۲-۳- طبقه‌بندی انواع مختلف کامپوزیت‌ها[۲]

در برخی موارد، کامپوزیت‌ها را از نظر نوع زمینه آن‌ها نیز طبقه‌بندی می‌نمایند. از این دیدگاه، کامپوزیت‌ها به سه دسته کامپوزیت‌های پایه پلیمری[1]، کامپوزیت‌های پایه فلزی[2] و کامپوزیت‌های پایه سرامیکی تقسیم می‌شوند. در این میان کامپوزیت‌های پایه پلیمری، بیشترین حجم استفاده را دا رند.در این دسته از کامپوزیت‌ها هدف اصلی از کامپوزیت کردن، بهبود خواص مکانیکی است. در کامپوزیت‌های فلزی، بهبود قابلیت فراورش نظیر ماشینکاری و در کامپوزیت‌های سرامیکی عمدتا افزایش چقرمگی هدف اصلی است. ساخت دسته اخیر از کامپوزیت‌ها نسبتا مشکل است[۲].

کامپوزیت‌های لیفی

کامپوزیت‌های لیفی مهم‌ترین دسته‌از کامپوزیت‌ها می‌باشند که در آن‌ها فاز تقویت کننده به شکل لیف می‌باشد. در این سیستم‌ها، الیاف بخش عمده بار (نیرو) اعمال شده را تحمل می‌کنند و وظیفهٔا صلی ماتریس، توزیع

[1] Polymer matrix composite
[2] Metal matrix composite

این بار و انتقال آن به‌ا لیاف می‌باشد. هدف از طراحی این کامپوزیت‌ها عبارتست از بدست آوردن سفتی و استحکام ویژه بالا. منظور از خواص مکانیکی ویژه نسبت مدول(استحکام) به دانسیته می‌باشد. تقویت لیفی با استفاده از الیاف پیوسته (بلند) و غیر پیوسته (کوتاه) انجام می‌شود.

الف-محاسبه ثابت‌های الاستیک در کامپوزیت‌های الیاف بلند:

یکی از آسانترین نقاط شروع برای محاسبه رفتار مکانیکی کامپوزیت‌ها، در نظر گرفتن رفتار الاستیک کامپوزیت‌های الیاف بلند است که تماما در یک جهت آرایش یافته‌اند. بدین منظور تئوری‌های مختلفی وجود دارد که‌از آن جمله می‌توان به روش مقاومت مصالح و روش‌های نیمه تجربی[1] اشاره نمود. در روش مقاومت مصالح ثابت‌های الاستیک E_1 (مدول طولی) به صورت نشان داده شده در معادله ۱-۱ محاسبه می‌شود:

$$\mathrm{E_l} = v_m \mathrm{E_m} + v_f \mathrm{E_f} \qquad ۱-۲$$

که در آن v_m و v_fکسر حجمی ماتریس و لیف و $\mathrm{E_m}$ ، $\mathrm{E_f}$ مدول الاستیک ماتریس و لیف می‌باشد..

این معادله که به قانون اختلاط مشهور است، به سادگی نشان می‌دهد که سفتی کامپوزیت حاصل متوسط وزن داده شده میان دو جزءتقویت کننده و ماتریس است که تنها به کسر حجمی الیاف بستگی دارد. مدول یانگ کامپوزیت در روش نیمه تجربی نیز به طریق مشابه محاسبه می‌شود. واقعیت این است که قانون اختلاط تا حد بالایی از قطعیت، صحیح می‌باشد به شرط آنکه طول الیاف به‌اندازه کافی بلند باشد تا کرنش اعمال شده به ماتریس و الیاف یکسان باشد چرا که این معادله بر اساس چنین فرضی بدست آمده است. E_2 (مدول عرضی) در روش مقاومت مصالح به صورت رابطه ۱-۲ ارائه می‌شود:

$$E_2 = \frac{v_f}{\mathrm{E_f}} + \frac{v_m}{\mathrm{E_m}} \qquad ۲-۲$$

در مورد E_2 باید گفت که اگرچه این روش ساده و آسان است اما تقریب ضعیفی از E_2 ارائه می‌دهد. بر اساس نتایج بررسی‌های انجام شده، توزیع نایکنواخت تنش و کرنش در ضمن یک بارگذاری عرضی به‌ا ین معنی است که فرمول نشان داده شده در بالا که با فرض تنش مساوی در لیف و ماتریس می‌باشد، به‌ا ندازه کافی دقیق نمی‌باشد.

[1] Halphin-Tsai

درواقع فرمول بالا یک حد پاین برای مدول کامپوزیت می‌باشد. موفق ترین مدل نیمه تجربی که به منظور رفع این مشکل ارائه شده است، مدل‌هالپین-تسای است که برای مدول عرضی به صورت معادله‌های۲-۳ و ۲-٤ ارائه گردیده است[۱]:

$$E_2 = \frac{(1+\xi\eta v_f)}{(1-\eta v_f)} E_m \qquad ۲-۳$$

$$\eta = \frac{(E_f - E_m)/E_m}{(E_f + \xi E_m)/E_m} \qquad ۲-۴$$

هالپین و تسای با استفاده از راه حل‌های الاستیسیته مقدار ξ را تعیین کردند برای مثال برای الیاف دایره‌ای در آرایش مربعی ۲=ξ و برای الیاف با سطح مقطع مستطیلی در آرایش شش ضلعی $\xi = 2a/b$ می‌باشد که a طول و b عرض مستطیل می‌باشد.

ب-کامپوزیت‌های الیاف کوتاه:

پلیمرهای تقویت شده با الیاف کوتاه به منظور پر کردن فاصله بین کامپوزیت‌های الیاف بلند و پلیمرهای غیر تقویت شده استفاده می‌شوند، که کامپوزیت‌های الیاف بلند به عنوان سازه‌های اولیه در صنعت هوا و فضا بکار می‌روند و پلیمرهای غیر تقویت شده در کاربردهایی که نیاز به تحمل بار ندارد، استفاده می‌شوند. در واقع می‌توان گفت که سیستم‌های الیاف کوتاه، به گونه‌ای خواص هر دو سیستم (کامپوزیت الیاف بلند و پلیمرهای تقویت نشده) را در خود جمع کرده‌ا ند. بدین صورت که‌اگر الیاف به‌ا ندازه کافی بلند باشند، همان میزان سفتی که برای الیاف بلند تحت شرایط بارگذاری یکسان حاصل می‌شود، به دست می‌آید. این در حالی است که توانایی قالبگیری پلیمر تقویت نشده به اشکال پیچیده مختلف، هم چنان تا حد زیادی در این کامپوزیتها باقی مانده است[۳].

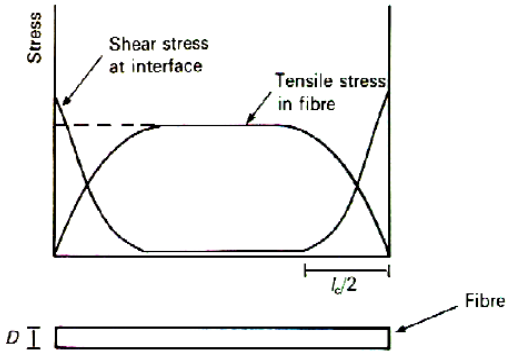
کامپوزیت‌های الیاف کوتاه به مراتب بیشتر از کامپوزیت‌های الیاف بلند مورد استفاده قرار می‌گیرند که‌از جمله دلایل این امر، صرفه‌ی اقتصادی این کامپوزیت‌ها به خصوص از لحاظ هزینه ی الیاف تقویت کننده و پروسه ساخت آسانتر وانعطاف پذیرتر آن‌ها می‌باشد. اگر چه در کنار این مزایا، معایبی نیز برای این کامپوزیت‌ها وجود دارد که‌از آن جمله کسر حجمی کمتر الیاف در این مواد و خواص مکانیکی پایین‌تر این کامپوزیت‌ها نسبت به کامپوزیت‌های الیاف بلند می‌باشد. خواص مکانیکی پایین‌تر این مواد به علت پدیده‌ی اثر انتها در الیاف کوتاه می‌باشد که در ادامه در بخش مفاهیم، به تفصیل بحث خواهد شد. کسر حجمی کمتر الیاف در این کامپوزیت‌ها نیز، به دلیل آرایش یافتگی تصادفی الیاف در آن‌هاست که‌ا مکان فشرده شدن الیاف در کنار یکدیگر و ایجاد کسر

حجمی بالای الیاف، بر خلاف کامپوزیت‌های الیاف بلند، در آن‌ها وجود ندارد. به طور کلی، امکان کنترل آرایش یافتگی در کامپوزیت‌های الیاف کوتاه امری دشوار می‌باشد.این عامل در کنار عواملی چون کسر حجمی پایین تر الیاف واثر انتها در الیاف کوتاه باعث می‌شود که قدرت تقویت کنندگی این کامپوزیت‌ها، به اندازه کامپوزیت‌های الیاف بلند نباشد و از این رو به منظور محاسبه‌ی خواص مکانیکی این کامپوزیت‌ها به روش‌هایی متفاوت با تئوری‌های موجود برای کامپوزیت‌های الیاف بلند نیاز است.

پیش از آنکه به روشهای پیش‌بینی خواص مکانیکی کامپوزیت‌های الیاف کوتاه بپردازیم، جا دارد به‌ارائه توضیحی از مفاهیم مرتبط با این سیستم‌ها(کامپوزیت الیاف کوتاه) پرداخته شود. در ذیل علاوه بر مفهوم طول بحرانی و مکانیزم انتقال بار که توضیح پدیده اثر انتها درکامپوزیت‌های الیاف کوتاه را در بردارد، به توضیح مفهوم مهم و کاربردی تانسور به دلیل قابلیت آن در توصیف آرایش یافتگی، پرداخته خواهدشد.

۲-۱ انتقال بار و پدیده‌اثر انتهای الیاف در کامپوزیت‌های الیاف کوتاه

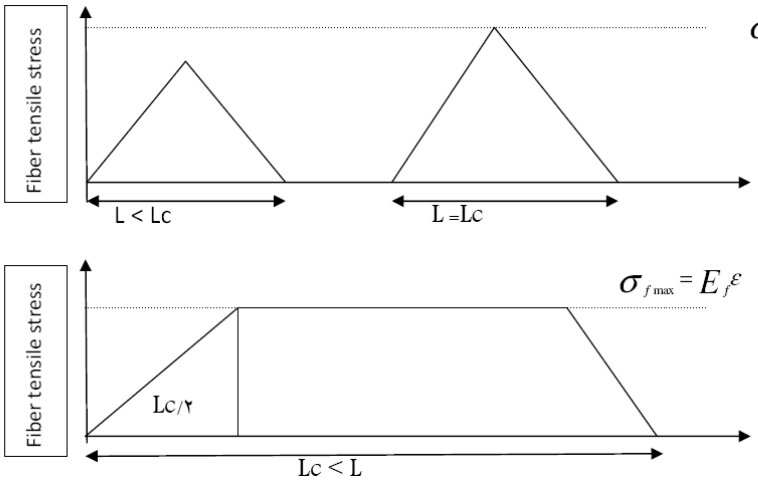
وقتی کامپوزیت تحت تاثیر کشش قرار می‌گیرد، بار (نیروی اعمال شده) از طریق تنش برشی که در سطح مشترک لیف و ماتریس وجود دارد، از ماتریس به لیف منتقل می‌شود. اگر کامپوزیت تحت تاثیر کرنش کششی ε واقع شده باشد، در صورتی لیف خاصیت تقویت کنندگی دارد که این میزان کرنش را تحمل کند به عبارتی دیگر، لیف قادر به تحمل $\sigma_{f\,\max} = E_f \varepsilon$ باشد. همان‌طور که در شکل ۲-۴ توزیع تنش کششی و برشی در الیاف کوتاه مشاهده می‌شود، انتهای الیاف تنش کششی کمتری را نسبت به مرکز لیف متحمل می‌شوند که همین پدیده، اثر انتهای الیاف در کامپوزیت‌های الیاف کوتاه نامیده می‌شود. حال هر چه طول لیف کوتاه تر باشد، طول کمتری از لیف قادر به تحمل کرنشی که به کامپوزیت وارد شده است، می‌باشد و یا به عبارتی دیگر خاصیت تقویت کنندگی ندارد.



شکل ۲-۴- نمودار توزیع تنش برشی و کششی در کامپوزیت‌های الیاف کوتاه ، ℓ_c طول بحرانی لیف[۱۸]

۱-۳ مفهوم طول بحرانی[1]

با روشن شدن مکانیزم انتقال بار و بحث اثر انتهای الیاف، می‌توان طول بحرانی را به شکل زیر تعریف نمود: طول بحرانی (ℓ_c)، حداقل طول لازم برای این است که تنش تحمل شده توسط لیف به تنش کششی حداکثر ($\sigma_{f\ \max} = E_f\ \varepsilon$) باشد. آنچه گفته شد در شکل ۲-۵ آورده شده است.



شکل ۲-۵- معرفی طول بحرانی

مطابق شکل ۲-۵، در حالت $\ell = \ell_c$ تنها مرکز لیف $\sigma_{f\max}$ را تحمل می‌کند. حال اگر دقیقا مرکز لیف (نصف طول لیف) را در نظر بگیریم، با توجه به تعادل نیروها، نیروی کششی حاصل از $\sigma_{f\max}$ در مرکز و نیروی برشی که در سطح مشترک لیف و ماتریس وجود دارد با هم برابرند وداریم:

$$\sigma_{f\ \max}\frac{\pi D^2}{4} = \frac{\tau \pi D \ell_c}{2} \qquad ۵\text{-}۲$$

$$\ell_c = \frac{\sigma_{f\max} D}{2\tau} \qquad ۶\text{-}۲$$

τ تنش برشی در سطح مشترک و D قطر لیف می‌باشد.

[1] Critical length