



گروه مهندسی مواد و متالورژی
گرایش شناسایی و انتخاب مواد

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی رفتار خزشی کامپوزیت اپوکسی / الیاف شیشه به کار رفته در ساخت پره توربین بادی

اساتید راهنما:
دکتر احد ضابط
دکتر سمانه صاحبیان سقی

نگارنده:
نادیا نصرتی

بهمن ۱۳۹۶

چکیده

در صنعت مدرن، انرژی بادی یکی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر با سودآوری‌های بالا و زنجیره اقتصادی ارزشمند می‌باشد. بخش روتور و پره، جزء آسیب‌پذیر توربین بادی هستند. تحقیقات نشان داده‌است که خرابی روتور توربین بادی به سبب لایه لایه شدگی پره کامپوزیتی در نتیجه خستگی و خزش می‌باشد. علاوه بر این شکست خزشی در ناحیه ریشه پره، یکی از مکانیزم‌های مهم شکست پره شناخته شده‌است. هدف از تحقیق پیش‌رو بررسی رفتار خزشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه به کار رفته در ساخت پره توربین بادی می‌باشد. با توجه به اهمیت خزش در ناحیه ریشه پره، کامپوزیت با نحوه لایه‌چینی مشابه ریشه پره و با روش ساخت مکش رزین به کمک خلا تهیه شد. خواص مکانیکی به کمک آزمون کشش و دمای شیشه‌ای شدن به روش آنالیز مکانیکی دینامیکی برای اپوکسی خالص و کامپوزیت تعیین شدند. تاثیر دما و تنش به عنوان عوامل موثر بر رفتار خزشی در محدوده دمایی 20°C تا 100°C و سطوح تنشی ۴۰، ۱۰۰ و 300MPa بررسی شدند. اصل برهم‌نهی تنش-دما-زمان، با قابلیت تخمین عمر خزشی کامپوزیت‌های با رفتار ویسکوالاستیک خطی در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفت. منحنی‌های Master نشان دادند در تنش 300MPa و با گذشت ۳ سال و دو ماه، نرمی خزشی برابر $1\text{Pa}^{-1}(10^{-12}) \times 18$ است که با کاهش تنش به 100MPa ، نرمی خزشی به $1\text{Pa}^{-1}(10^{-12}) \times 12$ تقلیل یافت. طبق اصل برهم‌نهی تنش-زمان، شکست نمونه C-RJR در شرایط کاری پره توربین بادی، تنش 40MPa و دمای 26°C ، در مدت زمان ۲۵۰ سال پیش‌بینی شد. در بررسی تاثیر مقادیر بالاتر تنشی بر رفتار خزشی نمونه C-RJR، در سطح تنشی 216MPa عمر خزشی حدود ۱۸ روز تخمین زده شد. به کمک تصویربرداری الکترونی روبشی، سطح شکست و مکانیزم‌های شکست خزشی مورد ارزیابی قرار گرفتند. در شکست نگاری سطح نمونه C-RJR تشکیل کاسپ‌ها، اسکارپ‌ها و جدایش الیاف از زمینه اپوکسی به سبب چسبندگی نامطلوب در فصل مشترک، مشاهده گردیدند.

کلمات کلیدی: کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه، خزش، اصل برهم‌نهی تنش-دما-زمان، پره توربین بادی

فهرست مطالب

فصل اول. مقدمه	۱
فصل دوم. مروری بر منابع	۴
۱-۲. مقدمه	۴
۲-۲. دسته‌بندی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف	۷
۳-۲. روش‌های ساخت کامپوزیت‌های زمینه پلیمر ترموست تقویت شده با الیاف	۱۳
۲-۳-۱. لایه گذاری دستی	۱۴
۲-۳-۲. فرآیند کیسه خلا	۱۶
۲-۳-۳. قالب‌گیری انتقال رزین	۱۷
۲-۴. ویسکوالاستیسیته مواد پلیمری	۱۷
۲-۴-۱. اصل برهم‌نهی بولتزمن	۱۸
۲-۴-۲. اصل برهم‌نهی تنش-دما-زمان	۲۰
۲-۵. تاثیر خزش بر استحکام کامپوزیت پره توربین بادی	۲۲
۲-۶. بررسی رفتار خزشی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف پیوسته	۲۳
۲-۶-۱. اثر دما و تنش	۲۴
۲-۶-۲. تاثیر نوع زمینه و تقویت آن توسط الیاف	۳۰
۲-۶-۳. تاثیر نحوه جهت‌گیری الیاف	۳۱
۲-۷. روش مدل‌سازی اصل برهم‌نهی تنش-دما-زمان	۳۴
فصل سوم. مواد و روش تحقیق	۴۵
۳-۱. مقدمه	۴۵
۳-۳. روش ساخت نمونه	۴۶
۳-۳-۱. ساخت نمونه اپوکسی خالص	۴۶

۴۷.....	۳-۳-۲. ساخت نمونه کامپوزیتی به روش مکش رزین تحت خلا
۵۱.....	۳-۴. آزمون‌های انجام شده
۵۲.....	۳-۴-۱. آزمون کشش
۵۲.....	۳-۴-۲. آنالیز حرارتی مکانیکی دینامیکی
۵۲.....	۳-۴-۳. آزمون خزش
۵۳.....	۳-۴-۴. میکروسکوپ الکترونی روبشی
۵۴.....	۳-۴-۵. آنالیز وزن سنجی حرارتی
۵۵.....	فصل چهارم. نتایج و بحث
۵۵.....	۴-۱. مقدمه
۵۶.....	۴-۲. آزمون کشش
۵۸.....	۴-۳. آنالیز حرارتی مکانیکی دینامیکی
۶۰.....	۴-۴. آنالیز وزن سنجی حرارتی
۶۱.....	۴-۵. تأثیر دما و تنش بر رفتار خزشی اپوکسی خالص و کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه
۶۲.....	۴-۵-۱. رفتار خزشی اپوکسی خالص
۶۶.....	۴-۵-۲. رفتار خزشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه
۶-۴.....	پیش‌بینی عملکرد بلند مدت خزشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه با روش برهم‌نهی تنش-دما-زمان (TTSP)
۷۰.....	۴-۶-۱. مدل برهم‌نهی دما-زمان (TTSP)
۷۸.....	۴-۶-۲. مدل برهم‌نهی تنش-زمان (TSSP)
۸۵.....	۴-۷. تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی
۹۶.....	فصل پنجم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها
۹۶.....	۵-۱. نتیجه‌گیری

۵-۲. پیشنهادها..... ۹۸

فصل ششم. منابع..... ۹۹

- شکل (۱-۲): ظرفیت تولیدی توان بادی ده کشور برتر دنیا در سال ۲۰۱۲ [۱]..... ۵
- شکل (۲-۲): افزایش ظرفیت تولیدی توربین‌های بادی با افزایش قطر روتور در طی سال‌های ۱۹۸۰-۲۰۲۰ [۱]..... ۶
- شکل (۳-۲): تصویر کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الف) الیاف پیوسته- ب) الیاف بافته شده- ج) الیاف رشته‌ای- د) الیاف هیبریدی [۸]..... ۹
- شکل (۴-۲): الف- ساختار شیمیایی رزین اپوکسی (DGEBA) و ب- هاردنر مونومر آمین، دی‌آمینودی‌فنیل سولفون [۱۲]..... ۱۲
- شکل (۵-۲): ایجاد اتصالات عرضی از طریق واکنش گروه‌های اپوکسی با گروه‌های آمینی [۱۲]..... ۱۳
- شکل (۶-۲): ترتیب لایه‌گذاری در فرآیند کیسه خلا برای تولید کامپوزیت [۱۳]..... ۱۶
- شکل (۷-۲): بررسی اثر تنش اعمالی بر تغییرات کرنش ایجاد شده در نمونه ویسکوالاستیک خطی [۱۶]..... ۱۸
- شکل (۸-۲): جمع‌پذیری کرنش‌های ایجاد شده در اثر تنش اعمالی در زمان‌های مختلف بر اساس اصل برهم‌نهی بولتزمن [۱۶]..... ۲۰
- شکل (۹-۲): فاکتور تصحیح GL برای پره‌های روتور [۲۰]..... ۲۳
- شکل (۱۰-۲): منحنی خزشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن در سطوح تنشی ۶۵ و ۷۷٪ استحکام کششی نهایی و دمای محیط [۲۲]..... ۲۵
- شکل (۱۱-۲): منحنی خزشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن در آزمون خزش خمشی [۲۲]..... ۲۶
- شکل (۱۲-۲): منحنی خزشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن در تنش ۱۵ MPa در دماهای مختلف [۲۳]..... ۲۶
- شکل (۱۳-۲): بررسی کرنش خزشی کامپوزیت پلی‌استر/الیاف شیشه در تنش ۱۸۸ MPa و دماهای ۲۵ و ۵۰°C [۲۴]..... ۲۷
- شکل (۱۴-۲): بررسی تاثیر تنش بر کرنش خزشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن در دمای ۸۰°C [۲۵]..... ۲۸
- شکل (۱۵-۲): بررسی اثر دما و تنش بر رفتار خزشی وینیل‌استر [۲۶]..... ۲۹
- شکل (۱۶-۲): منحنی خزش کامپوزیت‌های زمینه اپوکسی و پلی‌اورتان تقویت شده با الیاف شیشه در دمای محیط [۲۷]..... ۳۱

- شکل (۲-۱۷): تغییرات استحکام خزشی کامپوزیت با جهت‌گیری‌های مختلف الیاف در دمای 80°C [۲۹]. ۳۲.....
- شکل (۲-۱۸): تاثیر نحوه جهت‌گیری الیاف بر نرخ خزش کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن در دمای 55°C و 30 MPa [۲۵]. ۳۲.....
- شکل (۲-۱۹): تاثیر زاویه جهت‌گیری الیاف بر رفتار خزشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه [۳۲]. ۳۳.....
- شکل (۲-۲۰): منحنی خزشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن در واحد لگاریتم زمان [۲۲]. ۳۶.....
- شکل (۲-۲۱): منحنی تغییرات تانژانت دلتا کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن با دما در فرکانس‌های مختلف [۲۲]. ۳۷.....
- شکل (۲-۲۲): منحنی تغییرات $\text{Ln}(f)$ با دمای شیشه‌ای شدن [۲۲]. ۳۷.....
- شکل (۲-۲۳): منحنی نرمی خزشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن در حال انتقال منحنی‌ها به اندازه فاکتور انتقال [۲۲]. ۳۸.....
- شکل (۲-۲۴): منحنی خزشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف کربن در دمای مرجع 30°C [۲۲]. ۳۹.....
- شکل (۲-۲۵): منحنی Master نرمی خزشی کامپوزیت دندان [۴۲]. ۴۰.....
- شکل (۲-۲۶): الف- منحنی خزش فوم پلی‌اورتان و ب- منحنی Master خزش در دمای مرجع 45°C [۳۹]. ۴۱.....
- شکل (۲-۲۷): مراحل رسم منحنی Master خزشی کامپوزیت تقویت شده با الیاف بامبو ۴۲.....
- شکل (۲-۲۸): منحنی Master متیل متاکریلات رسم شده با روش TSSP [۴۶]. ۴۳.....
- شکل (۳-۱): فلوچارت مراحل ساخت اپوکسی خالص ۴۷.....
- شکل (۳-۲): تصویر نمونه کشش و خزش اپوکسی خالص (ابعاد به میلی‌متر). ۴۹.....
- شکل (۳-۳): تصویر شماتیکی از روش ساخت کامپوزیت به روش مکش رزین تحت خلا. ۴۹.....
- شکل (۳-۴): فلوچارت مراحل ساخت کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه. ۵۰.....
- شکل (۳-۵): تصویر نمونه‌ی خزش کامپوزیت طبق ابعاد استاندارد ASTM D-۶۳۸ [۴۷]. ۵۱.....
- شکل (۳-۶): تصویر نمونه‌ی کشش کامپوزیت طبق ابعاد استاندارد ASTM D-۳۰۳۹ [۴۸]. ۵۱.....
- شکل (۳-۷): فلوچارت آزمون‌های انجام شده برای اپوکسی خالص و کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه. ۵۱.....
- شکل (۴-۱): منحنی تنش - کرنش نمونه‌های EP. ۵۶.....

- شکل (۲-۴): منحنی تنش - کرنش نمونه‌های C-RJR ۵۷
- شکل (۳-۴): منحنی تغییرات مدول ذخیره‌ای، اتلافی و تانژانت دلتا بر حسب دما برای نمونه EP ۵۹
- شکل (۴-۴): منحنی تغییرات مدول ذخیره‌ای، اتلافی و تانژانت دلتا بر حسب دما برای نمونه C-RJR ۶۰
- شکل (۵-۴): منحنی تغییرات وزن نمونه C-RJR بر حسب دما ۶۱
- شکل (۶-۴): منحنی خزشی نمونه EP در تنش ۵۳ MPa و دمای ۲۰°C ۶۳
- شکل (۷-۴): نحوه کشیدگی زنجیره‌های اپوکسی دارای اتصالات عرضی [۵۰] ۶۳
- شکل (۸-۴): تغییرات شبکه‌ای با ایجاد بریدگی اتصالات عرضی در باندهای زنجیره‌ای در طی رشد حفره تحت تنش کششی [۵۳] ۶۴
- شکل (۹-۴): منحنی خزشی نمونه EP در تنش ۴۰ MPa (۵۶٪ UTS) ۶۵
- شکل (۱۰-۴): منحنی خزشی نمونه C-RJR در تنش ۴۰ MPa (۱۰٪ UTS) و دمای ۲۰°C ۶۷
- شکل (۱۱-۴): منحنی‌های خزش نمونه C-RJR در سطوح تنشی ۴۰ و ۱۰۰ MPa و دماهای ۱۰۰-۲۰°C ۶۸
- شکل (۱۲-۴): نرخ خزش در ۴۰ دقیقه آزمون خزش نمونه C-RJR در سطوح تنشی ۴۰، ۱۰۰ و ۳۰۰ MPa ۶۸
- شکل (۱۳-۴): منحنی ایزوکروئال نمونه C-RJR در دمای ۵۰°C ۷۱
- شکل (۱۴-۴): تغییرات تانژانت دلتا نمونه C-RJR بر حسب دما در فرکانس‌های ۱، ۵ و ۱۰ هرتز ۷۲
- شکل (۱۵-۴): منحنی تغییرات $\ln(f)$ بر حسب $1/Tg$ نمونه C-RJR ۷۴
- شکل (۱۶-۴): رسم منحنی Master نمونه C-RJR در دمای مرجع ۲۰°C و تنش ۱۰۰ MPa ۷۵
- شکل (۱۷-۴): منحنی برهم‌نهی دما- زمان نمونه C-RJR برای سطوح تنشی ۱۰۰ و ۳۰۰ MPa در دمای مرجع ۲۰°C ۷۶
- شکل (۱۸-۴): منحنی Master نمونه C-RJR رسم شده با روش برهم‌نهی دما- زمان ۷۷
- شکل (۱۹-۴): منحنی‌های Master نمونه‌های C-RJR برای سطوح تنشی ۱۰۰ و ۳۰۰ MPa در دمای ۲۰°C و تنش ۴۰ MPa در دمای ۵۰°C ۷۸
- شکل (۲۰-۴): منحنی ایزوکروئال نمونه C-RJR در دمای ۲۶°C ۷۹

- شکل (۴-۲۱): مراحل رسم منحنی Master نمونه C-RJR در دمای 26°C و 40MPa ۸۰
- شکل (۴-۲۲): منحنی‌های Master نمونه C-RJR در تنشهای $129, 40$ و 216MPa در دمای 26°C ۸۱
- شکل (۴-۲۳): منحنی‌های Master کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه در تنش‌های 129 و 216MPa در دمای 26°C ۸۲
- شکل (۴-۲۴): منحنی ایزوکروئال نمونه C-RJR در دمای 50°C ۸۳
- شکل (۴-۲۵): منحنی Master نمونه C-RJR در تنش 40MPa و دمای 50°C ۸۴
- شکل (۴-۲۶): منحنی‌های Master نمونه C-RJR در سطح تنشی 40MPa و دماهای 26 و 50°C ۸۴
- شکل (۴-۲۷): تصویر سطح شکست خزشی نمونه EP در شرایط آزمون خزش دمای 20°C و 53MPa ۸۵
- شکل (۴-۲۸): مراحل شکل‌گیری کاسپ‌ها در تغییرشکل کامپوزیت زمینه ترموست [۵۹] ۸۷
- شکل (۴-۲۹): تصویر سطح شکست خزشی نمونه EP در شرایط آزمون خزش دمای 20°C و 53MPa در بزرگ-نمایی 500 برابر ۸۷
- شکل (۴-۳۰): نحوه تشکیل خطوط رودخانه‌ای [۵۹] ۸۸
- شکل (۴-۳۱): تصویر سطح شکست خزشی نمونه EP در شرایط آزمون خزش دمای 20°C و 53MPa در بزرگ-نمایی 2500 برابر ۸۸
- شکل (۴-۳۲): شکل‌گیری اسکارپ در سیستم اپوکسی چقرمه [۵۹] ۸۹
- شکل (۴-۳۳): تصویر سطح شکست خزشی نمونه EP در شرایط آزمون خزش دمای 50°C و 32MPa در بزرگ-نمایی 100 برابر ۹۰
- شکل (۴-۳۴): تصویر سطح شکست خزشی نمونه EP در شرایط آزمون خزش دمای 50°C و 32MPa در بزرگ-نمایی 2500 برابر ۹۱
- شکل (۴-۳۵): تصویر سطح شکست خزشی نمونه C-RJR در بزرگ‌نمایی 500 برابر ۹۱
- شکل (۴-۳۶): تصویر سطح شکست خزشی نمونه C-RJR در بزرگ‌نمایی 5000 برابر ۹۲
- شکل (۴-۳۷): تصویر سطح شکست خزشی نمونه C-RJR در بزرگ‌نمایی 5000 برابر ۹۳
- شکل (۴-۳۸): تصویر سطح شکست خزشی نمونه C-RJR در بزرگ‌نمایی 2500 برابر ۹۳

شکل (۴-۳۹): تصویر سطح شکست خزشی نمونه C-RJR در بزرگ‌نمایی ۵۰۰۰ برابر..... ۹۴

شکل (۴-۴۰): تصویر سطح شکست خزشی نمونه C-RJR در بزرگ‌نمایی ۱۰۰۰۰ برابر..... ۹۵

فهرست جداول

جدول (۱-۲): خواص مکانیکی و فیزیکی انواع الیاف [۲].....	۹
جدول (۲-۲): ترکیب شیمیایی الیاف شیشه [۱۱].....	۱۰
جدول (۱-۳): اطلاعات مربوط به خواص رزین و هاردنر.....	۴۶
جدول (۲-۳): ابعاد نمونه‌های آزمون کشش و خزش اپوکسی خالص طبق استاندارد ASTM D-۶۳۸ [۴۷].....	۴۸
جدول (۱-۴) اطلاعات مربوط به آزمون کشش نمونه‌های EP.....	۵۷
جدول (۲-۴) اطلاعات مربوط به آزمون کشش نمونه‌های C-RJR.....	۵۸
جدول (۳-۴): دمای شیشه‌ای شدن نمونه‌های EP و C-RJR در فرکانس ۱ هرتز.....	۶۰
جدول (۴-۴): میزان تغییر طول و استحکام قابل تحمل ماده با تغییر دما.....	۶۶
جدول (۵-۴): کرنش خزشی نمونه‌های C-RJR بر حسب صدم درصد در مدت ۵۰ دقیقه آزمون.....	۶۹
جدول (۶-۴): خواص خزشی نمونه‌های EP و C-RJR در دمای ۵۰°C.....	۷۰
جدول (۷-۴): نتایج آزمون DMTA نمونه C-RJR.....	۷۲
جدول (۸-۴): فاکتورهای انتقال منحنی‌های خزشی در دمای (T) برای رسم منحنی‌های Master در دمای مرجع (T _{ref}).....	۷۳
جدول (۹-۴): نرخ خزش نمونه C-RJR در دمای آزمون ۲۶°C و سطوح تنشی مختلف.....	۸۱

فصل اول. مقدمه

در سه دهه اخیر، انرژی تجدیدپذیر باد به‌طور فزاینده منبع جالب توجهی در تولید الکتریسیته شناخته شده‌است. در دوره‌های اولیه صنعت توربین بادی، پره‌ها از جنس فولاد، آلومینیوم و مواد کامپوزیتی دارای بخش چوبی ساخته می‌شدند. با توجه به این‌که قطعاتی از جنس فولاد و آلومینیوم دارای وزن بالا و عمر خستگی کمی هستند، به‌همین منظور طی چهار دهه اخیر گرایش زیادی به انتخاب مواد کامپوزیتی زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف به‌ویژه الیاف شیشه برای استفاده در پره توربین‌های بادی صورت گرفته‌است. پره بایستی تا حد امکان وزن کمی داشته باشد تا بارهای مکانیکی و اینرسی که منجر به خستگی می‌گردد، کاهش یابد.

کامپوزیت‌های با نوع زمینه پلیمر از نوع ترموست، حدود ۸۰٪ بازار کامپوزیت‌های زمینه پلیمری را تشکیل می‌دهند. مزایای این دسته از مواد، دمای پخت کم و ویسکوزیته پایین است که سبب بهبود ترشوندگی و چسبندگی

آن به فاز ثانویه می‌گردد. در ابتدا، کامپوزیت‌های زمینه پلی‌استر در ساخت پره‌های توربین بادی مورد استفاده قرار می‌گرفت که با توسعه ابعادی توربین‌های بادی، رزین اپوکسی جایگزین آن‌ها شد.

محدودیت عمده اپوکسی در کاربردهای سازه‌ای در بلند مدت، خزش مکانیکی هست. با تغییر دما، رطوبت و چگالی اتصالات عرضی، رفتار ویسکوالاستیک این دسته از مواد تحت تاثیر قرار می‌گیرد. بر اساس استاندارد DNV-DS-J102، پدیده خزش در اتصالات T-bolt در ریشه پره¹ دارای اهمیت فراوانی است و یکی از مکانیزم‌های اصلی شکست پره توربین بادی محسوب می‌گردد. لازم به ذکر است که شکست خزشی پره توربین بادی به‌عنوان موضوعی قابل بحث در صنعت توربین‌های بادی شناخته شده‌است.

روتورهای توربین بادی که تحت تاثیر فرکانس بارگذاری هستند، به‌شدت وابسته به مکانیزم‌های خرابی مربوط به خزش می‌باشند. در صورت عدم شکست، تغییر شکل آهسته مواد کامپوزیتی، سبب افت عملکرد سازه می‌شود. بر این اساس تشخیص عملکرد طولانی مدت خزشی به علت رفتار ویسکوالاستیک زمینه پلیمری، از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

با توجه به مطالعات محدودی که در رابطه با ارزیابی رفتار خزشی کامپوزیت پره توربین بادی صورت گرفته‌است، در تحقیق حاضر به بررسی عملکرد بلند مدت خزشی کامپوزیت با نحوه لایه‌چینی مشابه ریشه پره پرداخته شد. از آنجایی که پیش‌بینی عمر خزشی مواد کامپوزیتی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و انجام آزمون‌های طولانی مدت در تمام مدت عمر طراحی مواد غیرعملی است، می‌بایست از روش‌های مدل‌سازی به‌منظور پیش‌بینی رفتار خزشی استفاده گردد.

به‌همین منظور در تحقیق حاضر ابتدا به بررسی تحقیقات صورت گرفته در رابطه با رفتار خزشی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف پرداخته شد. علاوه بر این روش مدل‌سازی برهم‌نهی تنش-دما-زمان به‌منظور

¹ Root joint.

تعیین عملکرد بلند مدت خزشی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری مورد مطالعه قرار گرفت. در فصل سوم، به معرفی مواد مورد استفاده و روش ساخت اپوکسی خالص و کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه و جزئیات آزمون‌های مورد استفاده پرداخته شده است. در فصل چهارم نیز داده‌های به دست آمده از آزمون‌های کشش، آنالیز مکانیکی دینامیکی، خزش و تصویربرداری الکترونی روبشی به همراه تحلیل نتایج ارائه شده است. در پایان، نتیجه‌گیری به همراه پیشنهادها برای ادامه پژوهش آمده است.

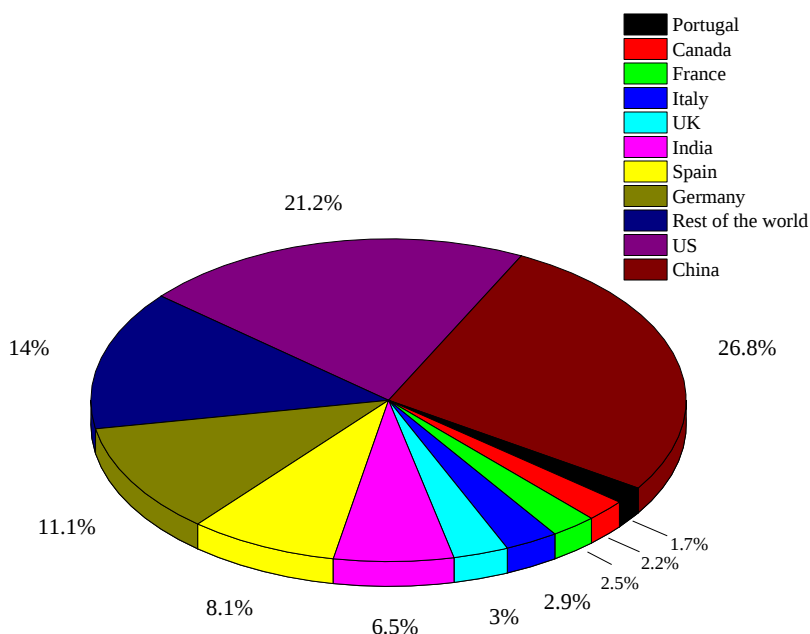
فصل دوم. مروری بر منابع

۱-۲. مقدمه

انرژی بادی به عنوان جایگزینی مناسب برای سوخت های فسیلی به دلیل مشخصه های تجدیدپذیری، تمیزی و عدم تولید گازهای گلخانه ای در طی تولید و عملکرد آن در نظر گرفته شده است. در سال ۲۰۱۲ ظرفیت انرژی بادی جهانی به ۲۸۲ گیگاوات رسید، که نسبت به سال قبل ۴۴ گیگاوات رشد داشته است. پیش بینی ها حاکی از آن است که تولید الکتریسیته به کمک نیروی بادی تا سال ۲۰۲۹ با رشد زیادی روبه رو شود و دو کشور چین و هند بیش ترین میزان تولید انرژی را از این منبع تجدید پذیر داشته باشند. ده کشور اول دنیا در صنعت بادی در شکل (۱-۲) آورده شده است [۱].

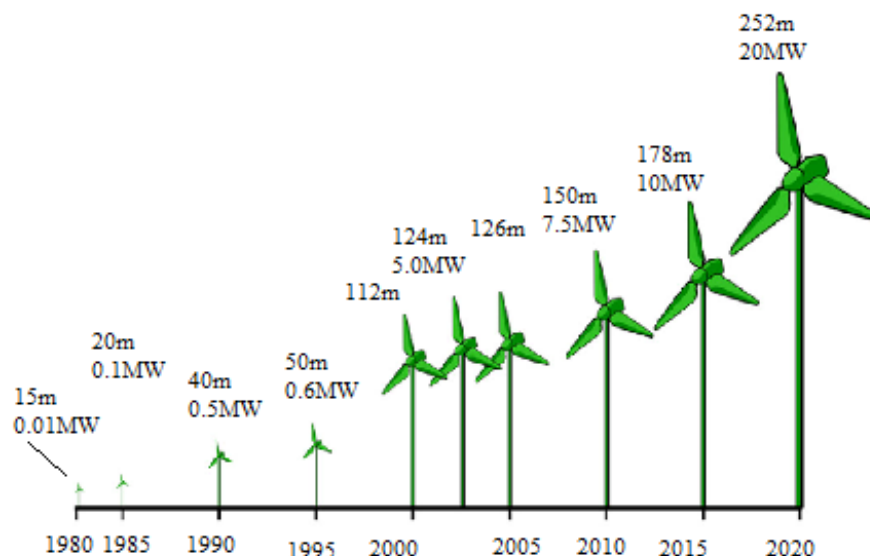
برای نیل به پیشرفت پیش بینی شده، نیاز به تولید کامپوزیت هایی مستحکم تر و سبک تر به منظور ساخت پره هایی با روتورهای بزرگ تر می باشد. پیشرفت ظرفیت صنعت توربین بادی و روند افزایش قطر روتور از سال ۱۹۹۸ در

شکل (۲-۲) آورده شده است [۱]. پره توربین بادی بایستی تا حد امکان وزن کمی داشته باشد تا بارهای مکانیکی و اینرسی که منجر به خستگی می‌گردد، کاهش یابد [۲]. بر اساس گزارش‌های ارائه شده در طی سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۳، نرخ خرابی پره‌ها حدود ۲۰٪ تخمین زده شده است [۳]. در حقیقت بخش روتور پرهزینه‌ترین بخش سازه است [۳] و ۲۰٪ از هزینه ساخت توربین بادی را به خود اختصاص می‌دهد [۱].



شکل (۲-۱): ظرفیت تولیدی توان بادی ده کشور برتر دنیا در سال ۲۰۱۲ [۱].

اطمینان از تولید پره‌ای بدون عیب و پیش‌بینی طول عمر پره، معضل مهم توسعه دهندگان توربین‌های بادی می‌باشد. به‌منظور بهبود پایداری ابعادی، استحکام و مقاومت به خرابی روتور، پره‌ها از کامپوزیت‌های پلیمری تقویت شده با الیاف پیوسته ساخته می‌شوند. الیاف صلبیت طولی و استحکام را در کامپوزیت فراهم می‌آورد، در حالی که زمینه رزین مسئولیت چقرمگی شکست، استحکام لایه لایه شدگی و سخت‌پایی کامپوزیت را برعهده دارد. به‌دلیل نیاز به سبکی در ساخت پره‌ها، پلیمرها انتخاب مناسبی به‌عنوان ماده زمینه در مواد کامپوزیتی می‌باشند [۳].



شکل (۲-۲): افزایش ظرفیت تولیدی توربین‌های بادی با افزایش قطر روتور در طی سال‌های ۱۹۸۰-۲۰۲۰ [۱].

با توسعه ابعادی توربین‌های بادی، رزین اپوکسی عملکرد بهتری را در مقایسه با پلی‌استر از خود نشان دادند. در حالی که پلی‌استر دارای قیمت ارزان‌تر و راحتی در فرآوری می‌باشد (عدم نیاز به عملیات پخت بعدی). سیستم‌های حاوی اپوکسی از استحکام (کششی و خمشی)، دوام بالاتر و ترشوندگی مطلوب‌تری برخوردار هستند [۳]. اپوکسی در مقایسه با پلی‌استر در حین پخت دچار انقباض بسیار اندکی می‌شود. علت این امر به مولکول‌های اپوکسی برمی‌گردد که در حین فرآیند پخت، دچار جهت‌گیری دوباره^۱ کم‌تری در مقایسه با پلی‌استر و متیل-متاکریلات^۲ می‌شوند [۴]. خواص مکانیکی چسب‌های اپوکسی به‌ویژه زمانی که تحت بارگذاری‌های طولانی مدت می‌باشد، با گذشت زمان تغییر می‌کنند. اهمیت این موضوع اغلب در مرحله طراحی نادیده گرفته می‌شود [۵]. محدودیت عمده اپوکسی در کاربردهای سازه‌ای در بلند مدت، خزش مکانیکی هست [۶]. تخریب سقف تونل دیگ بیگ در بوستون در سال ۲۰۰۶ به سبب خزش اپوکسی روی داد. بنابراین بررسی و بهبود پاسخ خزشی این مواد از اهمیت کاربردی قابل توجهی برخوردار است [۷].

¹ Reorientation.

² Poly Methyl Methacrylate (PMMA).

با توجه به اهمیت استفاده از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف پیوسته در ساخت پره توربین بادی، در این فصل ابتدا به دسته‌بندی انواع کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف پرداخته شد. آشنایی مختصری با انواع الیاف به‌خصوص الیاف شیشه و زمینه‌های پلیمری مورد استفاده در ساخت پره‌های توربین بادی به‌ویژه اپوکسی آورده شد. روش‌های ساخت کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف پیوسته در ادامه مطرح شدند. در نهایت مقالات مربوط به بررسی رفتار خزشی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف و گزیده نتایج مرتبط با تحقیق پیش‌رو ارائه گردیده‌است.

۲-۲. دسته‌بندی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف

پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف شیشه، اولین نمونه‌های کامپوزیتی زمینه پلیمری می‌باشند. کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف شیشه و یا الیاف با مدول کشسان نسبتاً کم (کم‌تر از حدود $10^6 \times 12$ psi) به‌علت قیمت ارزان در بسیاری از کاربردهای با تولید انبوه هم‌چون ساخت اتومبیل‌ها مورد استفاده قرار گرفته‌اند که به کامپوزیت‌های پایه^۱ مشهور هستند [۸].

دسته‌ای دیگر، کامپوزیت‌های پیشرفته‌اند که تقویت‌کننده‌های آن، الیاف با مدول کشسان بالا و چگالی کم می‌باشند. تقویت‌کننده مورد استفاده در این دسته از کامپوزیت‌ها شامل گرافیت، کاربید سیلیکون، آرامید و بور می‌باشند. این دسته از کامپوزیت‌ها به‌طور گسترده در سازه‌های هوافضا کاربرد دارند [۸]. خواص کامپوزیت‌ها تابعی از خواص فازهای تشکیل‌دهنده آن (خواص الیاف و زمینه)، نحوه توزیع فازها، اثر متقابل فازها بر یکدیگر و ویژگی‌های ماده‌ی تقویت‌کننده شامل شکل، اندازه و توزیع فاز ثانویه می‌باشند [۶].

به‌طور کلی کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف را از نقطه نظر نحوه چیدمان الیاف درون زمینه می‌توان به ۴ دسته تقسیم‌بندی نمود. این دسته بندی شامل کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف پیوسته، الیاف بافته شده، الیاف رشته‌ای و الیاف هیبریدی هستند. دسته اول کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف

¹ Basic composite.

پیوسته می‌باشند که تصویر نحوه جهت‌گیری الیاف داخل زمینه در شکل (۲-۳-الف) آورده شده‌است. این نوع جهت‌گیری به‌صورت گسترده در ساخت قطعات کامپوزیتی مورد استفاده قرار می‌گیرند، با این حال مستعد به لایه لایه شدن و جدایش لایه‌ای می‌باشند [۸].

کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف بافته شده در شکل (۲-۳-ب) آورده شده‌اند. این دسته از مواد کامپوزیتی مستعد به لایه لایه شدن^۱ نبوده و نسبت به الیاف پیوسته دارای استحکام کم‌تری هستند [۸]. کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف ناپیوسته به‌علت ارزانی روش تولید، به‌طور گسترده در تولیدات انبوه مورد استفاده قرار می‌گیرند و نسبت به نوع تقویت شده با الیاف پیوسته خواص مکانیکی ضعیف‌تری دارند (شکل (۲-۳-ج)) [۸].

کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف هیبریدی نیز (شکل (۲-۳-د))، شامل دو یا چند نوع الیاف پیوسته، بافته شده و رشته‌ای از جنس‌هایی مانند شیشه، گرافیت و غیره می‌باشند [۸]. با توجه به اهمیت بررسی خواص اجزاء کامپوزیت پره توربین بادی، در ادامه به معرفی الیاف شیشه و رزین اپوکسی پرداخته می‌شود.

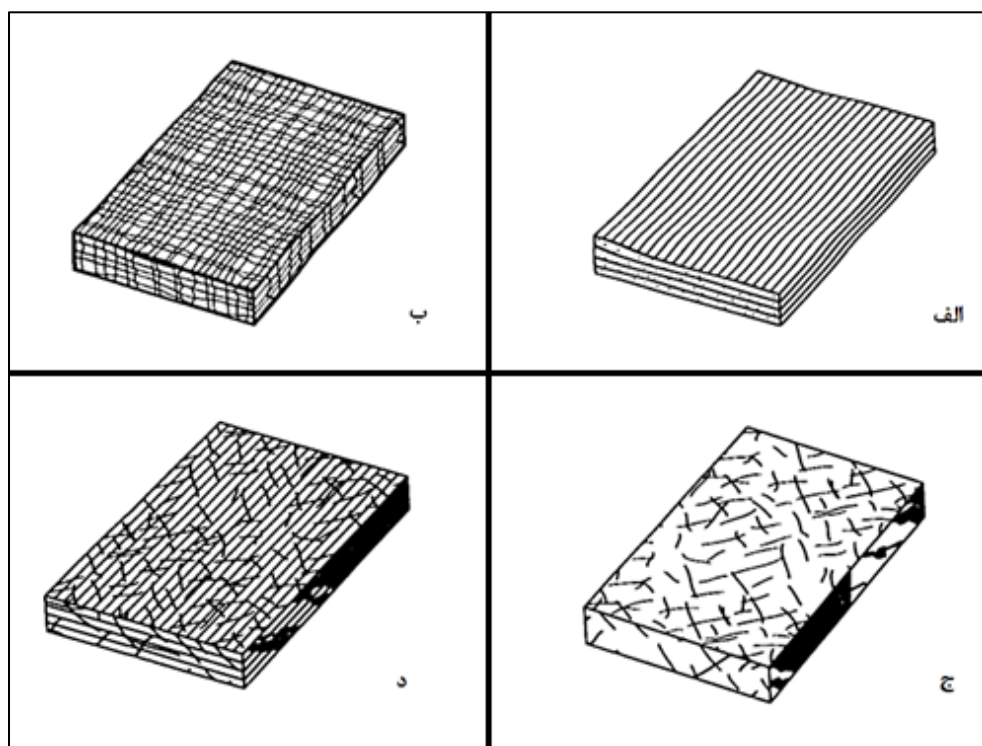
۲-۲-۱. الیاف

از مهم‌ترین اجزاء مواد کامپوزیتی، بخش تقویت کننده می‌باشد که سخت‌پایی و استحکام مورد نیاز کامپوزیت را فراهم می‌آورد [۹ و ۱۰]. الیاف به‌سبب وزن کم، سخت‌پایی و استحکام قابل توجه، جهت‌گیری ترجیحی مولکول‌ها در راستای الیاف و کاهش عیوب نسبت به ماده حجیم، به‌عنوان تقویت کننده در کامپوزیت‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند [۷].

از مهم‌ترین انواع الیاف می‌توان به الیاف شیشه، کربن، آرامید و بور اشاره داشت. الیاف ساختارهای باریک میله‌ای شکلی هستند، که به‌علت قطر کم دارای خاصیت ارتجاعی بالایی می‌باشند. قطر الیاف شیشه‌ای معمولاً بین ۵-۲۵ μm ، الیاف کربن ۸-۵ μm ، آرامید ۵/۱۲ μm و بور ۱۰۰ μm می‌باشد [۹]. به‌منظور مقایسه در جدول (۲-۱)

¹ Delamination.

خواص مکانیکی و چگالی الیاف ذکر شده آورده شده است. الیاف بور، کربن و آرامید مدول کشسان قابل توجهی دارند [۶]. از آنجایی که در این تحقیق تمرکز بر ساخت کامپوزیت اپوکسی / الیاف شیشه است، در ادامه به شرح مفصل ویژگی‌های الیاف شیشه پرداخته می‌شود.



شکل (۲-۳): تصویر کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با (الف) الیاف پیوسته - (ب) الیاف بافته شده - (ج) الیاف رشته‌ای - (د) الیاف هیبریدی [۸].

جدول (۲-۱): خواص مکانیکی و فیزیکی انواع الیاف [۲].

نوع الیاف	استحکام کششی نهایی (MPa)	مدول کشسان (GPa)	چگالی (g/cm)
E- glass	۳۴۴۸	۷۲	۲/۵۴
S- glass	۴۴۸۲	۸۶	۲/۴۹
Carbon fibre	۴۰۰۰	۲۲۸	۱/۸
Aramid(Kevlar49)	۳۷۹۲	۱۳۱	۱/۴۷
Boron	۳۵۱۶	۴۰۰	۲/۵۷