

# کاربردها و الزامات به‌کارگیری مواد مرکب در بهره‌برداری از انرژی باد و ساخت توربین بادی

حمیدرضا صالحی<sup>۱</sup> و<sup>\*</sup>، اسماعیل ابوکاظم‌پور<sup>۲</sup>، عباس اسدی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup>دکتری مهندسی مکانیک، مدیرعامل شرکت دانش‌بنیان آتی کامپوزیت ایرانیان

<sup>۲</sup>کارشناسی ارشد سیستم‌های انرژی، دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات، تهران

<sup>۳</sup>دکتری مهندسی مکانیک، عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

\*مسئول مکاتبات: h.r.salehi@gmail.com

## چکیده

## واژگان کلیدی

مواد مرکب  
کامپوزیت  
انرژی باد  
توربین بادی  
پوسته کامپوزیت مولد الکتریکی  
پره توربین بادی

## تاریخچه مقاله

تاریخ دریافت ۱۳۹۶/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش ۱۳۹۶/۱۱/۰۳

مواد مرکب به دلیل دارا بودن استحکام بالا و وزن کم در کنار قابلیت طراحی، در صنایع مختلفی در حال به‌کارگیری می‌باشند. استفاده از مواد مرکب در ساخت توربین بادی به دلیل مزیت‌های بی‌شمار این مواد، طی سال‌های اخیر به شدت افزایش یافته است و حجم عظیمی از هزینه ساخت یک توربین بادی، مربوط به مواد مرکب به‌کار رفته در آن است. این مواد در قسمت‌های مختلف پره توربین‌های بادی کوچک و بزرگ، دماغه، بدنه (پوسته کامپوزیت مولد الکتریکی) و پایه توربین بادی در حال استفاده‌اند. البته استفاده از این مواد نیازمند توجه به نکات بسیاری است که پیچیدگی‌هایی را به همراه دارد. در این مقاله سعی شده است تا انواع مواد کامپوزیتی که در ساخت توربین بادی استفاده می‌شوند، معرفی شده و کاربردهای این مواد در تجهیزات استحصال انرژی باد به‌ویژه توربین بادی و الزامات استفاده و نحوه به‌کارگیری مورد بررسی قرار گیرد. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از مواد مرکب در ساخت قسمت‌های متنوع و جدید توربین بادی در حال گسترش است و استانداردها و پیچیدگی‌های طراحی و به‌کارگیری این مواد در حال تدوین می‌باشد. همچنین توجه به شرایط محیطی و دوام سازه‌های کامپوزیتی، با توجه به هزینه‌های بسیار زیاد نصب و تعمیر توربین‌های بادی، بسیار ضروری می‌باشد.

## ۱ مقدمه

و ریپاور آلمان [۲-۵]، وستاس دانمارک [۶]، ژنرال الکتریک آمریکا [۷]، میتسوبیشی ژاپن [۸]، اسیونا و گمسا اسپانیا [۹، ۱۰]، شیرویند آمریکا [۱۱] و سوزلون هند [۱۲] اشاره کرد. همچنین تعداد زیادی شرکت چینی نیز به این حوزه وارد شده‌اند که با ظرفیت‌های مختلف در حال تولید توربین بادی می‌باشند. مزایای استفاده از توربین‌های بادی عبارت است از:

۱. استفاده از انرژی تجدیدپذیر موجود در طبیعت و صرفه‌جویی در هزینه‌های سوخت فسیلی
۲. کمک به کاهش آلودگی محیط زیست
۳. پایین بودن هزینه‌های جاری نیروگاه‌های بادی در مقایسه با نیروگاه‌های فسیلی
۴. امکان نصب سریع هر دستگاه توربین باد و بهره‌برداری در زمان بسیار کوتاه
۵. کمک به اشتغال بیشتر در داخل کشور و راه‌گشایی برای فرصت‌های مطالعاتی و پژوهشی
۶. قطع وابستگی تولید برق به مسائل سیاسی دنیا از بابت تغییر قیمت نفت
۷. امکان استفاده از مناطق اطراف توربین‌های بادی برای مصارف کشاورزی و دامداری
۸. ایجاد جاذبه‌های گردشگری در جوار مزرعه‌های بادی

انرژی باد یکی از انواع اصلی انرژی‌های تجدیدپذیر است که از دیرباز ذهن بشر را به خود معطوف کرده است. به طوری که بشر همواره به فکر کاربرد این انرژی در صنعت بوده است. انسان از انرژی باد برای به‌حرکت درآوردن قایق و کشتی‌های بادبانی و آسیاب‌های بادی استفاده می‌کرده است. در شرایط کنونی نیز با توجه به موارد ذکر شده و توجه‌پذیری اقتصادی بیشتر انرژی باد در مقایسه با سایر منابع انرژی‌های نو، پرداختن به انرژی باد امری ضروری به نظر می‌رسد. در ایران قابلیت‌ها و پتانسیل‌های مناسبی جهت نصب و راه‌اندازی توربین‌های برق بادی وجود دارد، که با توجه به توجه‌پذیری آن و تحقیقات، مطالعات و سرمایه‌گذاری، توسعه و کاربرد این فناوری چشم‌انداز روشنی را فراروی سیاست‌گذاران بخش انرژی در این زمینه قرار داده است. رشد بهره‌برداری از توربین‌های بادی، به‌ویژه در سال‌های اخیر، بسیار سریع بوده و با اینکه در حال حاضر آمریکا بزرگترین نیروگاه‌های بادی را در اختیار دارد، اما چین برنامه‌های گسترده‌ای برای کسب رتبه اول در این حوزه را پی‌ریزی کرده است. این دو کشور مجموعاً ۳۸/۴ درصد از تولید انرژی بادی جهان را در سال ۲۰۰۹ از آن خود نموده‌اند. آلمان نیز با تولید ۱۶/۲ درصد رتبه سوم را در آن سال در اختیار داشته است [۱].

شرکت‌های مطرح زیادی در دنیا در حال طراحی و ساخت توربین‌های بادی می‌باشند که از مهم‌ترین آنها می‌توان به شرکت نوردکس، فولندر، زیمنس

## ۲ اهمیت مواد مرکب و مزایای آنها

می‌کردند ابداع شده است [۱۹]. با توجه به اینکه در اغلب موارد سازه‌های توربین بادی در مناطق صعب‌العبور نصب می‌شوند، کاهش وزن سایر قطعات سبب کاهش چشمگیر هزینه نصب شده که خود بخش قابل توجهی از هزینه کلی راه‌اندازی توربین بادی را شامل می‌شود. همچنین به دلیل نیاز به طول عمر بالا و عدم امکان و پیچیدگی تعویض قطعات عظیم توربین بعد از نصب، استفاده از مواد کامپوزیت به دلیل طول عمر بالاتر در برابر خوردگی و شرایط محیطی در دماغه و پوسته مولد الکتریکی توربین بادی متداول شده است [۲۰-۲۲].

## ۴ کاربردهای مواد مرکب در تولید انرژی باد

مواد مرکب در تجهیزات مختلفی که برای بهره‌گیری از انرژی باد مورد استفاده قرار می‌گیرد، قابل استفاده‌اند [۲۳]. این تجهیزات عبارت‌اند از:

۱. توربین‌های بادی صنعتی با محور افقی
۲. توربین‌های بادی کوچک با محور عمودی
۳. توربین‌های بادی کوچک با محور افقی
۴. توربین بادی اینولکس

امروزه با گسترش کاربرد مواد مرکب در توربین‌های بادی علاوه بر پره آن در برج، محفظه ماشین‌خانه و توبی روتور نیز استفاده از مواد مرکب افزایش یافته است؛ به‌گونه‌ای که در بسیاری از توربین‌های بادی به‌ویژه توربین‌های کلاس متوسط و بزرگ از برج‌های استوانه‌ای مخروطی با پوشش مواد مرکب، توبی روتور (دماغه) کامپوزیتی و محفظه ماشین‌خانه تمام کامپوزیتی استفاده می‌شود. همچنین مواد مرکب با الیاف کربن در ترمزهای نوک پره به‌جای فولاد زنگ‌نزن کاربردهای روزافزونی یافته است [۲۴]. همچنین در فناوری متفاوت از توربین بادی به نام اینولکس که از بادگیرهای ایرانی الهام گرفته شده و در ساختار آن از یک پوسته شیبوری در ارتفاع بالا استفاده شده که با وزش باد درون آن و افزایش سرعت آن در نازل نزدیک به سطح زمین، انرژی باد حتی در سرعت‌های پایین قابل بهره‌برداری می‌باشد. به‌طور کلی موارد استفاده از مواد مرکب در قسمت‌های مختلف توربین بادی را می‌توان به قرار ذیل دسته‌بندی کرد:

۱. پره و دماغه توربین بادی
۲. پوسته کامپوزیت مولد الکتریکی توربین بادی
۳. پایه توربین
۴. توبی روتور
۵. بدنه توربین‌های اینولکس

## ۱.۴ پره‌های توربین بادی

پره‌های توربین بادی یکی از حساس‌ترین اجزای توربین بادی هستند که طراحی مناسب آن نقشی اساسی در استفاده از انرژی باد دارد. امروزه پره‌های بزرگی با ابعاد حداکثر ۸۰ متر و با وزن چندین تن طراحی و به‌کار گرفته می‌شوند. تقریباً تمامی پره‌ها به دلیل نیاز به کاهش وزن از مواد مرکب ساخته می‌شود. به‌علت ویژگی متغیر باد و بازه وسیع نیروهای وارد بر یک توربین بادی، این

مواد مرکب از آغاز طراحی توربین‌های نوین جایگاه ویژه‌ای داشته‌اند. نتایج یک پژوهش نشان می‌دهد که بیش از ۸۹ درصد توربین‌های ساخته‌شده در دهه ۸۰م، از ماده مرکب الیاف شیشه استفاده کرده‌اند [۱]. افزون بر مسئله خستگی، مسائلی چون شکل‌دهی، هزینه تولید و سرویس‌های پس از تولید و به‌کارگیری، از جمله مواردی هستند که صاحبان این صنعت را به‌سوی استفاده از کامپوزیت‌ها سوق داده است [۱۳]. هرچند هزینه اولیه تولید به‌وسیله کامپوزیت‌ها بیشتر از مواد موجود کنونی است، اما کاهش هزینه‌های بعدی ناشی از نگهداری، سرویس و مقاومت آن در برابر پدیده خوردگی و به‌ویژه هزینه پایین فرایند تولید و سادگی مراحل تولید پره‌های با شکل پیچیده حاکم بر آنها، همه مواردی هستند که سبب شده کامپوزیت‌ها از جایگاه ویژه‌ای در این صنعت برخوردار باشند [۱۴].

یکی دیگر از مزایای منحصراً به‌فرد استفاده از این فناوری در طراحی و ساخت پره‌ها، کاهش وزن سازه به‌میزان بسیار قابل توجه است که خود سبب کاهش بارهای گریز از مرکز و بارهای خستگی می‌شود. این کاهش از آنجا ناشی می‌شود که طبیعت این مواد به‌گونه‌ای است که می‌توان آنها را در جهت مورد نظر تقویت کرد و بدین‌ترتیب از تقویت در جهاتی که نیاز به مقاوم‌سازی ندارند و بالطبع از افزایش وزن سازه جلوگیری کرد. معماری قابل تغییر شیوه ساخت کامپوزیت‌ها باعث شده است که در موارد مشابه وزن سازه از نمونه‌های موجود بسیار کمتر باشد [۱۵، ۱۶]. با یک شبیه‌سازی ساده می‌توان مشاهده کرد که سازه پره کامپوزیتی وزن بسیار کمتری نسبت به نمونه همتای فلزی خود دارد (۲۹ درصد وزن سازه فلزی) و این در حالی است که سازه در برابر بارهای خمشی و پیچشی نسبت به نمونه فلزی، سفتی و مقاومت بیشتری داشته و همچنین جابه‌جایی نوک آن نیز کمتر است [۱۷]. بسامد طبیعی ارتعاشات آزاد پره کامپوزیتی کمتر از پره فلزی است؛ یعنی برای رساندن پره کامپوزیتی به حالت ارتعاشات رزونانس به انرژی بیشتری نسبت به نمونه فلزی نیاز است.

## ۳ جایگزینی سازه‌های کامپوزیت در توربین‌های

### بادی

اولین قطعه کامپوزیتی که در ساخت توربین بادی‌های تجاری مورد استفاده قرار گرفت، پره توربین بوده است. نتایج تحلیل‌های مهندسی نشان می‌دهد که با کاهش وزن پره‌ها، میزان انرژی تولید شده به‌شدت افزایش یافته و کاهش وزن سبب نصب راحت‌تر، ژنراتور ارزان و کوچک‌تر و سازه و پی بهینه‌تر می‌گردد.

معضل اساسی در به‌کارگیری مواد کامپوزیت در سازه پره توربین بادی، ضعف آنها در برابر خستگی بوده که یکی از مهم‌ترین بارگذاری‌های وارد بر توربین بادی می‌باشد. از اینرو تحقیقات گسترده‌ای در زمینه بهبود مقاومت در برابر خوردگی سازه‌های کامپوزیت انجام شده و به‌موازات آن، روش‌های نوین ساخت که کیفیت، استحکام و مقاومت در برابر خستگی بالاتری را ایجاد

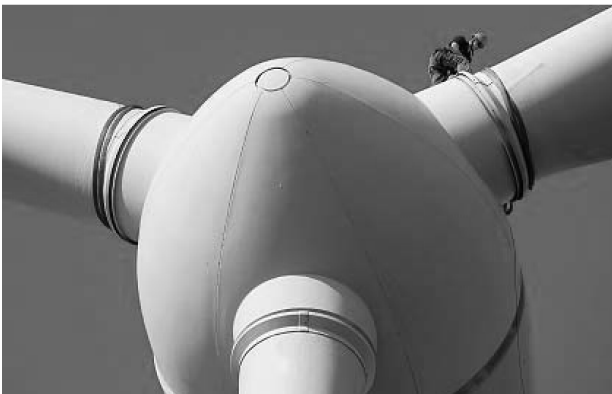
**جدول ۱: مقایسه پره فلزی و کامپوزیت در توربین بادی ۳۰۰ کیلوواتی [۱۸]**

پره مدلسازی شده	وزن پره (کیلوگرم)	بسامد طبیعی (هرتز)	جابه‌جایی در نوک (میلی‌متر)	ضریب اطمینان تنش	زاویه پیش‌پیشینه (درجه)
پره فلزی	۲۷۶۸	۲۶۸/۱	۸۸۵	۵/۴	۷/۴
پره کامپوزیتی	۸۰۶	۷۱۶/۱	۶۸۹	۷/۴	۴/۲



**شکل ۳: نمایی از یک توربین اینولکس [۱۱]**

ماشین‌ها و به‌ویژه پره‌های آنها همواره در معرض بارهای مداوم و تغییرپذیر قرار دارند. یکی از مهم‌ترین بارهای وارده به اجزای توربین به‌ویژه پره، بارهای تناوبی است که سبب تخریب از نوع خستگی می‌شود. این نوع تخریب بسیار خطرناک‌تر از تخریب استاتیکی است؛ زیرا رشد ترک در آنها قابل مشاهده نیست و تخریب در یک لحظه رخ می‌دهد. بنابراین در طراحی و ساخت این پره‌ها باید تمهیدات لازم برای از بین بردن این مشکل در نظر گرفته شود. هزینه بسیار بالای تعویض و تعمیر پره‌های خسته شده و همچنین بالابودن هزینه استخراج انرژی الکتریکی از انرژی باد سبب می‌شود تا به این امر دقت بیشتری معطوف شود. استفاده از فناوری پیشرفته مواد مرکب در عرصه ساخت توربین‌های بادی گام مهمی در جهت چیره‌شدن بر مشکل خستگی در سازه پره بوده است؛ زیرا این مواد عمر خستگی طولانی‌تری نسبت به فلزات دارند [۲۵].



**شکل ۴: نمایی از یک دماغه کامپوزیتی توربین بادی [۳]**

## ۲.۴ پوسته کامپوزیتی مولد الکتریکی و دماغه

پوسته کامپوزیتی مولد الکتریکی قسمتی از توربین بادی است که تجهیزات



**شکل ۱: پره‌ها و پوسته کامپوزیتی مولد الکتریکی در یک توربین بادی [۲]**



**شکل ۵: نمایی از یک لوله کامپوزیتی مورد استفاده در ساخت پایه توربین بادی [۴]**

داخلی مانند ژنراتور، جعبه‌دنده، سیستم‌های الکترونیکی و کنترلی را در برابر عوامل محیطی مانند باران، برف، نور خورشید، خوردگی و جز این‌ها محافظت



**شکل ۲: پره‌های کامپوزیتی توربین بادی با محور عمودی [۲]**

۴. تعیین رفتار خستگی در مواد کامپوزیت

## ۷ واکاوی موردی

به منظور درک مشخصات یک سازه کامپوزیتی توربین-بادی، نمونه V90-3Mw ساخت شرکت وستاس دانمارک بررسی می‌شود. از این محصول تاکنون تعداد ۵۰۰ دستگاه تولید شده که به صورت نصب در خشکی و دریا قابل به‌کارگیری است. طول پره‌ها در این توربین ۴۴ متر بوده و وزن هر یک از آنها ۶۷۰۰ کیلوگرم از جنس مواد پیش‌آغشته شیشه می‌باشد. وزن پوسته مولد الکتریکی توربین بادی نیز با متعلقات فلزی، ۷۴ تن بوده و جنس آن از الیاف شیشه و رزین پلی‌استر است. وزن کل مجموعه توربین به ۴۰۰ تن می‌رسد که این اعداد خود نشان‌دهنده حجم مواد و اهمیت وزن و لزوم سبک‌سازی با استفاده از مواد کامپوزیت در قطعات توربین بادی می‌باشد [۶].

## ۸ تعیین اثر شرایط محیطی بر قطعات

با وجود مزایای بسیاری چون استحکام ویژه بالا، مدول الاستیسیته بالا و غیرهمسانگردی قابل کنترل مواد مرکب شرایط محیطی می‌تواند آثار مخربی روی این قطعات داشته باشد. از اینرو در هنگام طراحی قطعات، باید آثار شرایط محیطی روی قطعات بررسی و راهکارهای مناسب اتخاذ شود [۱۴]. شرایط محیطی مختلفی می‌توانند در نمونه تأثیر داشته باشند که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از:

۱. دما
۲. رطوبت
۳. تابش اشعه فرابنفش
۴. خوردگی
۵. سایش
۶. خستگی حرارتی
۷. خزش

هر کدام از این موارد باعث ایجاد تغییراتی مانند افت استحکام و خواص مکانیکی، تغییر ابعاد قطعه، تغییر ساختار شیمیایی و جز این‌ها در قطعه می‌شود. معمولاً درجه حساسیت کامپوزیت‌ها نسبت به هر یک از فاکتورهای محیطی متفاوت است. در قطعات کامپوزیت توربین بادی، دما و رطوبت دو فاکتور اساسی در افت خواص کامپوزیت است. البته در بررسی شرایط محیطی باید به این نکته توجه شود که آثار ترکیبی اصولاً بیشتر و مخرب‌تر از جمع آثار هر یک از شرایط محیطی است. در شکل ۶ شرایط محیطی مختلفی که ممکن است طول عمر یک ماده مرکب را تحت تأثیر قرار دهد، نشان داده شده است.

### ۱.۸ دما

قطعات کامپوزیتی توربین‌های باد ممکن است در معرض دمای پایین‌تر از ۲۰ درجه یا بالاتر از ۵۰ درجه سانتی‌گراد قرار گیرند. تحقیقات نشان می‌دهد که قرارگرفتن بعضی از پلیمرها در معرض دمای پایین باعث شکنندگی

می‌کند. دماغه نیز روی هاب قرار می‌گیرد و از آن در برابر شرایط محیطی محافظت می‌کند. در توربین‌های بزرگ مگاواتی به منظور کاهش وزن مجموعه و سهولت ساخت از پوسته کامپوزیت مولد الکتریکی و دماغه کامپوزیتی استفاده می‌شود، اما در توربین‌های کوچک ممکن است این دماغه از جنس پلاستیک غیر تقویت شده یا حتی فلز انتخاب گردد.

## ۵ مواد مرکب مورد استفاده در ساخت توربین بادی

پلاستیک‌های تقویت‌شده با الیاف، که در این تحقیق به آنها کامپوزیت می‌گوییم، مواد غیرهمسانگردی هستند که از یک رزین پخته‌شده به‌عنوان زمینه استفاده شده و الیاف تقویت‌کننده درون آن قرار می‌گیرند. ترکیب زمینه چندگانه بوده که شامل رزین واکنشی، هاردنر و سایر افزودنی‌ها مورد نیاز است [۲۲]. مواد تقویت‌کننده الیافی از جنس‌های مختلفی هستند که برای ساخت انواع محصولات تقویت‌شده فرآوری می‌شوند. این الیاف تقویت‌کننده می‌توانند از یک یا از دو یا چند جنس مختلف باشند. ورق‌های کامپوزیتی از یک ترتیب چند لایه از الیاف و رزین ساخته می‌شوند، در حالی‌که ورق‌های ساندویچی از یک هسته با چگالی پایین و دو لایه کامپوزیتی در بالا و پایین تشکیل شده‌اند. در بعضی از کاربردها نیاز است تا از مواد پیش‌آغشته استفاده شود که شامل لایه‌های الیاف بوده که رزین آغشته شده و برای ساخت نیازی به افزودن رزین اضافه به آن نیست. با توجه به محدودیت‌های وزنی در کامپوزیتی موتور و دماغه، جنس این دو قطعه از مواد کامپوزیتی که ویژگی مهم آنها وزن پایین و استحکام بالاست استفاده می‌شود. مواد مختلفی که در ساخت قطعات کامپوزیتی توربین بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد، شامل موارد ذیل می‌باشند:

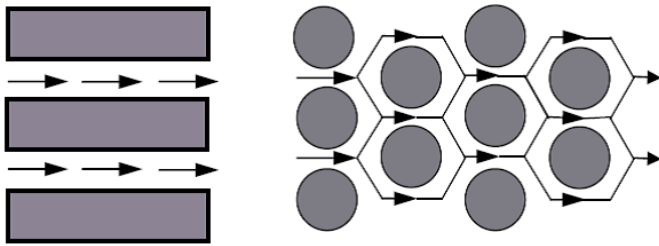
۱. انواع رزین‌های ترموست
۲. انواع تقویت‌کننده‌های الیافی
۳. انواع سازه‌های ساندویچی
۴. انواع مواد پیش‌آغشته
۵. انواع افزودنی‌ها و پرکننده‌ها
۶. چسب‌های پلیمری و شیمیایی برای اتصال قطعات
۷. انواع اتصالات فلزی برای چسباندن قطعات به هم

## ۶ معضلات استفاده از مواد مرکب در توربین‌های بادی

با وجود مزیت‌های گسترده مواد مرکب در کاربردهای توربین بادی، نکات ذیل باید مورد توجه قرار بگیرد.

۱. تعیین اثر شرایط محیطی بر مواد کامپوزیت
۲. طراحی صحیح مواد کامپوزیت با توجه به جهت‌دار بودن خواص این مواد
۳. طراحی مناسب در برابر صاعقه و آتش‌سوزی

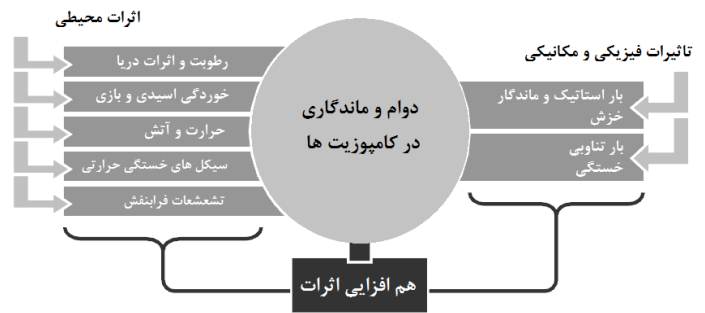
زمان متناسب با مشتق دوم رطوبت برحسب مکانی می-باشد. طبق این قانون، مقدار رطوبت بعد از گذشت زمان مشخص به حالت اشباع می-رسد. در شکل ۷ اثر شرایط محیطی بر ساختار کامپوزیت نمایش داده شده است.



شکل ۸: نفوذ عرضی و طولی رطوبت در کامپوزیت‌های الیافی

### ۳.۸ محافظت از پوسته کامپوزیتی مولد الکتریکی در برابر تابش خورشید و اشعه فرابنفش

پلیمرها اغلب در برابر تابش اشعه خورشید حساس بوده و در بلندمدت، تابش خورشید و اشعه فرابنفش سبب تخریب ساختار پلیمر و در نتیجه تخریب کامپوزیت و افت استحکام سازه می‌شود و ممکن است آثار نامطلوبی را در کارکرد توربین بادی ایجاد کند. آثار تابش خورشید ممکن است به صورت ایجاد ترک در کامپوزیت، افت استحکام کامپوزیت، تغییر سایر پارامترهای فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی کامپوزیت باشد. از اینرو پیش‌بینی این آثار و تلاش در جهت جلوگیری از آنها بسیار مهم و ضروری است. در کنار تخریب پلیمر، اشعه فرابنفش سبب تخریب الیاف کولار شده، اما الیاف کربن و شیشه به این اشعه غیرحساس‌اند. از اینرو بررسی آثار تابش زمانی که قطعه کامپوزیتی در معرض اشعه مستقیم خورشید قرار دارد، بسیار ضروری است. تابش اشعه فرابنفش در یک محدوده طول موج خاص، سبب شکست پیوند زنجیره‌های پلیمری شده و در نتیجه تغییر رنگ، اکسید شدن سطحی، شکننده شدن کامپوزیت و میکروترک‌ها را در زمینه کامپوزیت به وجود می‌آورد. بعضی از این پدیده‌ها سبب افت چشمگیر خواص مکانیکی و استحکام کامپوزیت می‌گردد. گفتنی است اشعه فرابنفش اغلب درون لایه نازکی از سطح کامپوزیت نفوذ کرده، اما همین آثار سطحی سبب تمرکز تنش در سطح کامپوزیت و واماندگی غیر قابل پیش‌بینی قطعات می‌شود. از طرفی، این عیوب سطحی از آن جهت مهم‌اند که باعث تأثیرپذیری بیشتر کامپوزیت در برابر سایر شرایط محیطی مانند خوردگی و رطوبت می‌شود. اثر تخریب اشعه فرابنفش در اثر سایر عوامل محیطی مانند دمای بالا، رطوبت، سایش، خستگی حرارتی بیشتر شده و این پدیده‌ها آثار متقابل بر هم می‌گذارند. برای مثال، تأثیر همزمان رطوبت و تابش باعث کاهش ۲۰ درصدی استحکام کامپوزیت با الیاف کربن، ۳۰ درصدی با الیاف کولار و ۴۰ درصدی در کامپوزیت با الیاف شیشه می‌شود. روش‌های مرسوم برای جلوگیری از آثار مخرب اشعه فرابنفش شامل انواع رنگ‌های مقاوم در برابر اشعه فرابنفش، پوشش‌ها یا افزودنی‌های مناسب می‌باشد. استفاده از این مواد در ژل‌کوت‌های کامپوزیت، یکی از بهترین راه‌کارهای جلوگیری از این پدیده است. ژل‌کوت پوشش بیرونی قطعات از جنس زمینه کامپوزیت است و مقاوم در برابر شرایط محیطی، سایش و رطوبت



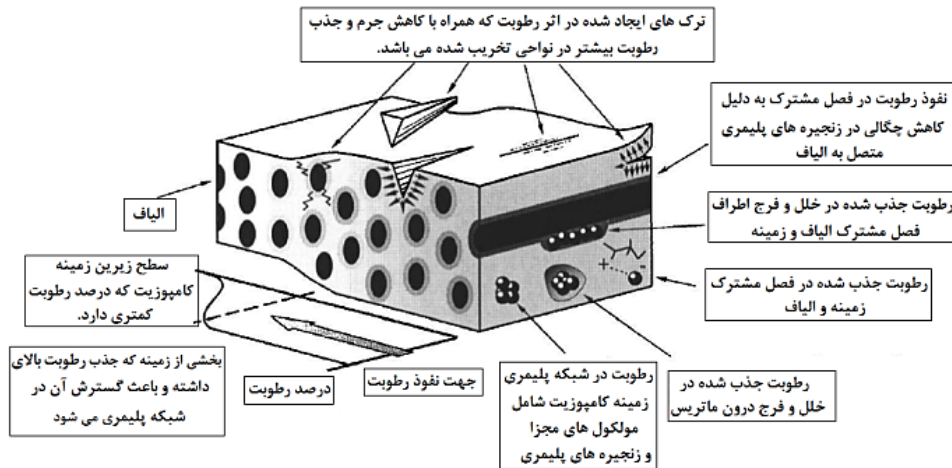
شکل ۶: شرایط محیطی مختلف اثرگذار در مواد مرکب [۱۵]

و افزایش سفتی در کامپوزیت می‌شود [۱۶]. دمای بالا نیز آثار زیادی بر خواص کامپوزیت دارد، به طوری که افزایش دما سبب کاهش ۲۵ تا ۳۰ درصدی انرژی شکست بین‌لایه‌ای می‌شود. اثر دما در کامپوزیت‌ها به دلیل تنش‌های داخلی القاشده در اثر ضریب انبساط حرارتی اجزای کامپوزیتی می‌باشد. مقدار این تنش‌های داخلی با تغییر دما تغییر کرده و در دمای پایین سبب ترک برداشتن ماتریس می‌شود. در عمل هر کدام از پلیمرها، محدوده دمایی مختص به خودش را دارد، اما به طور کلی هر پلیمر دمای کاری پایین‌تر از دمای شیشه‌ای شدن Tg دارد (Tg دمایی است که پلیمر از حالت صلب به حالت لاستیکی تبدیل شده و افت خواص مکانیکی در آن مشاهده می‌شود). اعمال رطوبت به همراه دما سبب تشدید این مشکل و کاهش بیشتر Tg می‌گردد.

### ۲.۸ رطوبت

مولکول‌های آب درون شبکه کامپوزیت نفوذ کرده و خواص مکانیکی، حرارتی و ترکیب شیمیایی رزین را تحت تأثیر قرار می‌دهند. در واقع با اعمال همزمان بارهای حرارتی - رطوبتی و مکانیکی، تخریب‌های غیر قابل برگشتی در سازه اتفاق می‌افتد. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که رطوبت در کوتاه‌مدت باعث افزایش چقرمگی شکست مود اول شده، اما در بلندمدت آن را کاهش می‌دهد [۱۷، ۱۸]. همچنین با افزایش رطوبت در ۹۰ درصد حالات، سفتی و استحکام کامپوزیت کاهش یافته، که این کاهش در بعضی از موارد به ۵۰ تا ۹۰ درصد هم می‌رسد. زمانی که رطوبت درون کامپوزیت نفوذ می‌کند، باعث تخریب اتصال فصل مشترک الیاف با ماتریس شده و دمای شیشه‌ای شدن را کاهش می‌دهد. مقدار رطوبت جذب‌شده توسط ماتریس بسیار بیشتر از مقدار جذب‌شده توسط الیاف می‌باشد. جذب رطوبت متفاوت توسط رزین و الیاف و همین‌طور انبساط متعاقب آن، باعث ایجاد میدان‌های تنش و کرنش موضعی می‌شود. از اینرو، توانایی پیش‌بینی نفوذ آب و آثار آن در خواص رزین برای پیش‌بینی رفتار بلندمدت سازه ضروری است. در بعضی از الیاف برای بهبود خواص فصل مشترک و افزایش مقاومت در برابر رطوبت از پوشش‌های مانند سیلان<sup>۱</sup> برای الیاف شیشه E-glass استفاده می‌شود. شکل ۸ نحوه نفوذ رطوبت درون کامپوزیت الیافی را نشان می‌دهد. اندازه‌گیری نفوذ رطوبت معمولاً با تغییر وزن نمونه در معرض رطوبت انجام شده و سازوکار آن توسط قانون فیک<sup>۲</sup> توضیح داده شده است. این قانون در مورد جذب رطوبت در کامپوزیت‌ها ارائه شده که در آن تغییرات مقدار رطوبت برحسب

<sup>1</sup>Silane <sup>2</sup>Fick's Law



شکل ۷: آثار رطوبت بر ساختار کامپوزیت [۱۵]

- ۳. آتش سوزی در اثر خرابی تجهیزات الکترونیک
- ۴. آتش سوزی در اثر اتصالات مدارهای برقی



شکل ۹: شعله‌ور شدن قطعات کامپوزیتی توربین بادی در اثر صاعقه

برای جلوگیری از آتش سوزی در توربین‌های بادی، باید کامپوزیت‌هایی انتخاب شود که باعث گسترش آتش درون مجموعه نگردد و در صورت آتش سوزی ناحیه محدود باشد. از اینرو استفاده از مواد تأخیرانداز آتش در ساخت کامپوزیت‌ها ضروری می‌باشد [۲۱، ۲۲].

## ۹ نتیجه‌گیری

امروزه استفاده از مواد مرکب در بهره‌برداری از انرژی باد و ساخت توربین بادی در حال افزایش است، این در حالی است که باید در استفاده از این مواد به پارامترهای طراحی توجه نمود. استحکام جهت‌دار، حساسیت به شرایط محیطی و آتش سوزی، خستگی و طول عمر این سازه‌ها، از جمله نکاتی است که در استفاده از این مواد باید مورد توجه قرار گیرد. با وجود این حساسیت‌ها و پیچیدگی‌ها، رشد دانش طراحی در این مواد، تولید و ارائه محصولات جدید برای ساخت مواد مرکب با عملکرد بهتر و قابلیت اطمینان بالا و همین‌طور اصلاح معضلات و مشکلات این مواد در طی چند سال اخیر، سبب جایگزینی گسترده این مواد به جای محصولات سنتی رایج شده است. در چند سال

می‌باشد که در ساخت آن از انواع افزودنی‌های میکرونی و نانومواد، برای تقویت سازه در برابر انواع بارگذاری‌های محیطی، سایشی و مکانیکی استفاده می‌شود. از اینرو استفاده از انواع افزودنی‌های بازتاب-دهنده تابش در ساخت ژلکوت، در کاهش آثار مخرب اشعه فرابنفش بسیار تأثیرگذار می‌باشد. انواع رزین‌های مقاوم در برابر اشعه فرابنفش نیز در حال توسعه می‌باشد که با استفاده از افزودنی‌های مانند خاک رس باعث کاهش قابل توجه نفوذ اشعه فرابنفش در لایه‌های زیرین کامپوزیت می‌گردد [۱۸].

## ۴.۸ طراحی پوسته کامپوزیتی مولد الکتریکی مقاوم در برابر صاعقه

سیستم محافظ در برابر صاعقه باید براساس استاندارد بین‌المللی IEC 61400-24 طراحی شود. توربین بادی و زیرمجموعه‌های آن، باید براساس سیستم صاعقه سطح ۲ طراحی شوند. پوسته کامپوزیتی مولد الکتریکی باید بخشی از سیستم محافظت در برابر صاعقه باشد و باید برخورد صاعقه را تحمل کند. از اینرو قطعات فلزی پوسته کامپوزیتی مولد الکتریکی و تقویت‌کننده‌های فلزی باید به سیستم تخلیه صاعقه متصل باشند [۱۹]. در مورد دماغه توربین بادی، چنانچه تجهیزات الکتریکی و عملگرهایی در قسمت بیرونی هاب و درون دماغه متصل باشند، محافظت از آنها در برابر صاعقه ضروری است. در شکل ۹ تخریب پوسته کامپوزیتی مولد الکتریکی و آتش سوزی در آن، به دلیل برخورد صاعقه نمایش داده شده است.

## ۵.۸ طراحی پوسته کامپوزیت مولد الکتریکی با توجه به محافظت سازه در برابر آتش سوزی

آتش سوزی در توربین بادی یکی از بدترین اتفاقات ممکن است. اساساً آتش سوزی در توربین بادی در چند حالت مختلف رخ می‌دهد [۲۰]:

۱. آتش سوزی در اثر صاعقه
۲. آتش سوزی در اثر خرابی ماشین‌آلات

<sup>1</sup>Brushless DC Generator

- [17] G. Marom, Environmental Effects on Fracture Mechanical Properties of Polymer Composites, *Application of Fracture Mechanics to Composite Materials*, edited by Friedrich, K., 1989, pp. 397-423.
- [18] A. Loos, G. Springer, Moisture Absorbs ion of polyester-E glass Composite, *J. Composite Materials*, 14, 1980, pp. 142.
- [19] S. Kaiser, M. Frohlingsdorf, Wüthering Height. The Dangers of Wind Power, *Der Spiegel*, 34, 2007, pp. 21-32.
- [20] T. R. Hull, B. K. Kandola, *Fire Retardancy of Polymers New Strategies and Mechanisms*, RSC Publishing, 2009.
- [21] M. Avila, N. Dembsey, M. Kim, *Fire Characteristics of Polyester FRP Composites with Different Glass Contents*, Composites & Polycon 2007.
- [22] International Energy Agency, Implementing Agreement for Co-operation in the Research and Development of Wind Turbine Systems, Annual Report 2000, May 2001.
- [23] P. Brøndsted, H. Lilholt, A. Lystrup, Composite materials for wind power turbine blades, *Annu. Rev. Mater. Res.*, 35, 2005, pp. 505-538.
- [24] R. J. Bussolari, Fibreglass composite blades for the 4MW-WTS-4 wind turbine, *NASA. Lewis Research Center Large Horizontal-Axis*, Wind Turbines, 1983, pp. 259-266.
- [25] W. Goeij, M. V. Tooren, A. Beukers, Implementation of bending-torsion coupling in the design of a wind-turbine rotor-blade, *Applied Energy*, 63, 1999, pp. 191-207.
- [26] J. A. Grande, Wind power blades energize composites manufacturing, *Plastics Technology* www.ptonline.com (accessed 20 Jan 2018).

اخیر، با تولید نسل جدید از توربین-های بادی بدون جعبه‌دنده که از یک ژنراتور جریان‌مستقیم بدون جاروبک<sup>۱</sup>، که بازدهی بالاتر، نصب راحت‌تر و هزینه‌های تعمیر و نگهداری کمتری دارد، تمرکز سازندگان توربین‌های بادی به بهبود وزن در پره‌ها و بهینه‌سازی طراحی قطعات دیگر معطوف شده است. از اینرو تحقیقات گسترده‌ای در زمینه به‌کارگیری الیاف‌کربن و روش‌های پیشرفته ساخت قطعات کامپوزیت در حال انجام است. هرچند چالش‌هایی چون تخریب سازه‌های کامپوزیتی در طول زمان به‌خصوص در مورد توربین‌های بادی نصب‌شده در دریا، که بازدهی تولید انرژی بالاتری نسبت به نمونه‌های موجود در خشکی دارند، همچنین نظارت بر سلامتی و دوام سازه‌ها در بلندمدت، از چالش‌های این حوزه است [۲۶].

## مراجع

- [1] Guideline for the Certification of Wind Turbines, 2010, www.gl-group.com/GLRenewables (accessed 20 January 2018).
- [2] Nordex Officail Website, <http://www.nordex-online.com/en/> (accessed 20 Jan 2018).
- [3] Furlander Officail Website, [www.friendly-energy.de](http://www.friendly-energy.de) (accessed 20 Jan 2018).
- [4] Siemens Officail Website, <http://www.energy.siemens.com> (accessed 20 Jan 2018).
- [5] Repower Systems AG Officail Website, <http://www.repower.de> (accessed 20 Jan 2018).
- [6] Vestas Officail Website, <http://www.vestas.com> (accessed 20 Jan 2018).
- [7] GE Officail Website, <http://www.ge-energy.com> (accessed 20 Jan 2018).
- [8] Mitsubishi Officail Website, <http://www.mpshq.com> (accessed 20 Jan 2018).
- [9] Acciona Windpower Officail Website, <http://www.acciona.com> (accessed 20 Jan 2018).
- [10] Gamesa Officail Website, <http://www.gamesacorp.com> (accessed 20 Jan 2018).
- [11] INVELOX System Funnels Wind, Sheerwind, <http://www.sheerwind.com> (accessed 20 Jan 2018).
- [12] Suzlon Officail Website, <http://www.suzlon.com> (accessed 20 Jan 2018).
- [13] ASTM Standards, ASTM International, West Conshohocken, PA, www.astm.org (accessed 20 Jan 2018).
- [14] R. Chhibber, Environmental degradation of glass fibre reinforced polymer composite, Project Upwind.
- [15] D. A. Bond, P. A. Smith, Modelling the transport of low-molecule-weight penetrates within the polymer matrix composite, www.asme.org (accessed 20 Jan 2018).
- [16] M. M. Schwartz, The influence of Environmental Effects, *Composite Materials, Properties*, Nodestructive, Testing and Repair, 1996, pp. 117-119.