

## بررسی رفتار خستگی کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP) در سطوح تنش بالا و پایین

سید علیرضا مقدس موسوی زاده<sup>۱</sup>، احد ضابط<sup>۲</sup>، سمانه صاحبیان سقی<sup>۳</sup>

Alirezamsv74@gmail.com

### چکیده

توربین‌های بادی ابزاری برای تبدیل انرژی باد به الکتریسیته هستند که از اجزای مختلفی تشکیل شده‌اند و یکی از مهم‌ترین اجزای آن، پره است. پره توربین بادی از ماده کامپوزیتی زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه یا GFRP ساخته شده و همواره در معرض بارهای مختلفی از جمله بارگذاری دینامیکی و خستگی قرار دارد. هدف این پژوهش، بررسی رفتار خستگی کامپوزیت GFRP با لایه‌چینی دو جهته ۹۰ و ۰ در ۲ سطح تنشی مختلف است. بدین منظور بعد از ساخت ورقه کامپوزیت GFRP به روش تزریق از طریق خلأ (VIP)، ابتدا به منظور تعیین خواص مکانیکی آزمون کشش انجام پذیرفت. مقدار استحکام نهایی میانگین کامپوزیت برابر با ۴۲۰/۱ MPa به دست آمد. آزمون خستگی در ۲ سطح تنش ۷۰، ۳۵ درصد صورت گرفت. نتایج نشان داد که با افزایش سطح تنش اعمالی، تعداد سیکل شکست کاهش یافته است. آنالیز SEM شکست نمونه‌ها نیز وجود اعوجاج در ساختار شکست با سطح بار ۳۵ درصد را نشان داد زیرا در این حالت نمونه تعداد سیکل بسیار زیاد بیشتر از ۱/۵ میلیون سیکل را تحمل نموده تا شکست برای قطعه اتفاق افتد و تغییر فرم پلاستیک قابل توجهی در ساختار رخ داده است.

کلمات کلیدی: پره توربین بادی، کامپوزیت GFRP، خستگی کامپوزیت، لایه چینی دو جهته ۹۰ و ۰، خواص مکانیکی.

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی مواد، گرایش شناسایی و انتخاب مواد، دانشگاه فردوسی مشهد  
<sup>۲</sup> دانشیار، عضو هیئت علمی گروه مهندسی مواد دانشگاه فردوسی مشهد  
<sup>۳</sup> استادیار، عضو هیئت علمی گروه مهندسی مواد دانشگاه فردوسی مشهد

## ۱- مقدمه

منابع انرژی به سه دسته سوخت‌های فسیلی، منابع تجدیدپذیر و منابع هسته‌ای تقسیم‌بندی می‌شوند. منابع تجدیدپذیر، منابعی هستند که می‌توانند به صورت متوالی برای تولید انرژی به کار گرفته شوند و از این میان آن‌ها می‌توان انرژی خورشید، انرژی باد، انرژی زیست‌توده‌ای، انرژی ژئوترمال (زمین گرمایی) و... را نام برد [۱]. از آنجایی که سوخت‌های فسیلی مانند نفت و زغال‌سنگ رو به اتمام هستند، نیاز به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به طور قابل توجهی افزایش یافته است [۲]. تحقیقات بر استراتژی‌های انرژی جایگزین اخیراً اهمیت پیدا کرده و یکی از دلایل این موضوع، ثبات و پایداری جهان در آینده می‌باشد. مهم‌ترین ویژگی منابع انرژی جایگزین، سازگاری آن با محیط‌زیست است. مطابق با این ویژگی، منابع انرژی تجدیدپذیر به زودی به یکی از مناسب‌ترین منابع انرژی جایگزین تبدیل خواهد شد [۳].

در میان تکنولوژی‌های انرژی تجدیدپذیر در دسترس برای تولید برق، انرژی باد بعد از برق آبی از نظر ظرفیت نصب رتبه دوم را دارد و رشد سریعی را هم تجربه می‌کند [۱ و ۴]. امروزه بهره‌گیری از انرژی باد برای تولید برق، یک فناوری کامل، رقابتی و تقریباً بدون آلودگی است که به طور گسترده در بسیاری از مناطق جهان مورد استفاده قرار می‌گیرد [۵]. فناوری باد با استفاده از توربین‌های بادی، انرژی موجود در باد را به برق یا نیروی مکانیکی تبدیل می‌کند [۶]. وظیفه توربین بادی، تبدیل حرکت باد به انرژی چرخشی است که می‌تواند برای راه‌اندازی یک ژنراتور به کار گرفته شود [۷]. یک توربین بادی در دو جهت رویه و لبه تحت بارگذاری قرار می‌گیرد. بارهای اعمالی بر لبه<sup>۴</sup> توسط دکل اصلی<sup>۵</sup> و بارهای اعمالی بر رویه<sup>۶</sup> هم توسط اسپار و تقویت‌کننده تحمل می‌شوند که ممکن است در لبه‌های پیشرو و عقبی پره وجود داشته باشند.

بارهای اعمالی بر رویه عمدتاً از نیروی باد نشأت می‌گیرند و عمود بر صفحه روتور عمل می‌کنند. این بارها از نظر میانگین و دامنه به شدت متفاوت هستند. بارهای اعمالی بر لبه هم غالباً به دلیل نیروی وزن پره به وجود می‌آیند. این بارها همچنین به دلیل بارهای پیچشی که توربین را به حرکت در می‌آورند نیز می‌توانند ایجاد شوند. جهت بارهای اعمالی بر لبه در هر چرخش کامل دو بار تغییر می‌کند. به طور کلی بارها در ساختار پره تحت سیطره‌ی بارهای به شدت متغیر رویه و بارهای قطعی‌تر گرانشی لبه، قرار دارند [۹].

<sup>4</sup> Edgewise

<sup>5</sup> Main Spar

<sup>6</sup> Flap wise

با توجه به اینکه از پره‌های توربین بادی به عنوان بحرانی‌ترین جز توربین بادی یاد می‌شود، لازم است تا طراحان فاکتورهای مختلف را در زمان طراحی پره توربین بادی در نظر بگیرند که خستگی یکی از آنها است [۱۰ و ۱۱].

در حقیقت الزام خستگی در طراحی اجزای سازنده توربین بادی، اهمیت بالایی دارد زیرا توجیه اقتصادی توربین بادی، منوط به عمر ۲۰ تا ۳۰ ساله آن است [۱۱]. پره توربین بادی را از جنس کامپوزیت GFRP یا کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه می‌سازند [۱۲]. کامپوزیت‌های GFRP در حوزه‌های بسیاری کاربردشان افزایش یافته است. آن‌ها در زمینه‌های صنعتی نظیر فضاپیما، هواپیما، اتومبیل و کالاهای ورزشی به کار گرفته می‌شوند. دلیل این موضوع، خواص آن‌ها نظیر استحکام ویژه زیاد، مدول الاستیک ویژه زیاد، وزن کم، مقاومت به خوردگی و... است [۱۳]. رفتار فوق‌العاده‌ی کامپوزیت‌ها که منجر به کارکرد بالای آن‌ها می‌شود، به معنای محفوظ ماندن کاملشان در مقابل خستگی نیست. به دلیل ساختار پیچیده‌ی کامپوزیت‌ها، فرآیندهای آسیب مختلفی ممکن است در آن‌ها رخ دهد نظیر ترک خوردن زمینه<sup>۷</sup>، گسیختگی<sup>۸</sup>، لایه‌لایه شدن<sup>۹</sup> و شکستن فیبر<sup>۱۰</sup>. علاوه بر این شکست در کامپوزیت‌ها می‌تواند به صورت غیر قابل پیش‌بینی رخ دهد و فاجعه به بار آورد [۱۴]. در مورد کامپوزیت‌های زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف بلند، اذعان می‌شود که اولین آسیبی که تحت بارگذاری ظاهر می‌گردد، ترک‌های زمینه است پیش از اینکه شکست الیاف رخ دهد. این ترک‌ها، ترک‌های میکرو می‌باشند که اندازه‌ی اولیه‌ی آن‌ها، اندازه یک لایه است و حضورشان نشان‌دهنده آغاز آسیب می‌باشد [۱۵ و ۱۶].

با توجه به اهمیت موضوع خستگی در کامپوزیت‌ها و اهمیت ویژه آن در کامپوزیت GFRP که ماده اصلی سازنده پره توربین بادی محسوب می‌شود، تحقیقات گسترده‌ای بر روی خستگی کامپوزیت‌های GFRP صورت پذیرفته است.

یکی از عواملی که می‌تواند بر رفتار خستگی کامپوزیت GFRP اثرگذار باشد، نوع لایه‌چینی و جهت‌گیری الیاف است. فریرا و همکاران [۱۷] به بررسی تأثیر جهت‌گیری الیاف بر خستگی کامپوزیت زمینه پروپیلن تقویت

<sup>7</sup> matrix cracking

<sup>8</sup> debonding

<sup>9</sup> delamination

<sup>10</sup> Fiber fracture

شده با الیاف شیشه پرداختند. ورقه‌های کامپوزیتی ساخته شده توسط فریرا و همکاران شامل سه نوع لایه‌چینی  $0^\circ$  و  $45^\circ / 0^\circ / -45^\circ$  و  $30^\circ / -30^\circ / 0^\circ$  بود. نتایج آزمون خستگی برای لایه‌چینی‌های مختلف نشان داد که استحکام خستگی لایه‌های  $0^\circ$ ،  $1/8$  تا  $2$  برابر بیشتر از دو نوع لایه‌چینی دیگر است و این به دلیل تشابه جهت الیاف با جهت بارگذاری می‌باشد. در لایه‌چینی‌های  $45^\circ / 0^\circ / -45^\circ$  و  $30^\circ / -30^\circ / 0^\circ$  مکانیزم آسیب خستگی گسیختگی، مکانیزم آسیب غالب محسوب می‌گردد که در اثر تنش‌های محوری رخ می‌دهد. به واسطه‌ی وجود مولفه تنش نرمال بیشتر در الیاف با زاویه شیب  $30^\circ$ ، استحکام خستگی در لایه‌چینی  $30^\circ / -30^\circ / 0^\circ$  بین  $10$  تا  $15$  درصد کمتر از استحکام خستگی لایه‌چینی  $45^\circ / 0^\circ / -45^\circ$  است. در لایه‌چینی  $0^\circ$  شکست در صفحات عرضی اتفاق می‌افتد درحالی که در لایه‌چینی‌های دیگر، شکست در امتداد جهت الیاف مشاهده گردید.

فردوس و همکاران [۱۸] به بررسی رفتار خستگی کامپوزیت GFRP و اثر تمرکز تنش، سطوح تنش و فرکانس بر روی آن پرداختند. کامپوزیت GFRP مورد استفاده دارای زمینه وینیل استر بوده که با الیاف شیشه E glass تقویت شده است. آزمون خستگی با مد کشش کشش، در نسبت  $R=0/1$  و سطوح تنشی  $50$ ،  $60$ ،  $70$ ،  $80$ ،  $40$  و  $25$  درصد از استحکام نهایی ماده انجام شد. نتایج نشان داد که نمونه‌ها در سطح تنش بالا در کشش خالص می‌شکنند در حالی که در سطوح تنشی پایین، تمرکز تنش بر شکست ماده بسیار موثر است. همچنین تمرکز تنش، عمر خستگی کامپوزیت‌های لمینتی را کاهش می‌دهد. با توجه به اینکه در سطوح بار مختلف، نمونه کامپوزیتی در آزمون خستگی تعداد سیکل متفاوتی را تا زمان شکست تحمل می‌کند، لذا تفاوت قابل توجهی نیز می‌تواند در مکانیزم شکست و تصویر شکست آن‌ها وجود داشته باشد. به عبارتی قرارگیری نمونه کامپوزیت GFRP تحت سطوح زیاد و کم بار خستگی، موضوعی است که در این تحقیق به آن پرداخته خواهد شد.

## ۲- مواد و روش تحقیق

روش مورد استفاده برای ساخت ورقه کامپوزیتی GFRP، روش VIP<sup>11</sup> یا تزریق به واسطه‌ی خلأ است. الیاف شیشه مورد استفاده در این تحقیق، الیاف E glass ساخت شرکت STA ترکیه با جهت‌گیری دوجته<sup>12</sup>  $0^\circ$  و  $90^\circ$  می‌باشد. به عبارتی دیگر پارچه این STA مصرفی، دارای درصدی الیاف  $0^\circ$  و  $90^\circ$  می‌باشند که با نخ

<sup>11</sup> Vacuum infusion process

<sup>12</sup> Biaxial

دوخته شده‌اند<sup>۱۳</sup>. رزین مورد استفاده هم رزین اپوکسی ۲۰۴۰ است. به منظور ساخت کامپوزیت، ابتدا تعداد ۷ لایه از الیاف بر روی هم چیده شده و به طور کامل با پارچه محافظ پوشانده می‌شوند. الیاف برای انجام فرایند آن تزریق به میز شیشه‌ای انتقال یافته که از قبل به منظور جلوگیری از چسبیدن رزین به آن واکس مخصوص زده شده است. در هر نوبت با استفاده از پمپ خلأ و فشار ۰/۸۵ atm - هوای مجموعه به طور کامل تخلیه می‌شود و عدم وجود نشتی نیز با استفاده از دستگاه اولتراسونیک تشخیص دهنده نشتی، کنترل می‌گردد. ورود هوا به مجموعه موجب افت ورقه کامپوزیتی می‌شود. برای تزریق رزین، ابتدا لازم است تا با نسبت ۱۰۰ به ۳۲ رزین اپوکسی ۲۰۴۰ با هاردنر ۲۰۴۷ ترکیب شود و بعد با قرارگیری در دستگاه مکش، گاززدایی گردد تا هیچ حبابی بر روی سطح آن وجود نداشته باشد. تزریق رزین از طریق لوله‌های مخصوص جای گذاری شده صورت می‌گیرد.

#### ۲-۱- آزمون کشش

آزمون کشش براساس استاندارد ASTM D3039 [۱۹] با هدف تعیین مقدار استحکام نهایی یا UTS صورت می‌گیرد که براساس آن سطوح تنشی مشخص شود. ابعاد نمونه‌ها در این آزمون ۲۵×۲۵×۲/۵ mm است و نمونه‌ها دارای وصله هستند. آماده سازی نمونه‌های کششی با استفاده از سنباده‌زنی صورت می‌گیرد و آزمون با نرخ ۲ mm/min با استفاده از دستگاه آلمانی Universal zwick مدل ۲۵۰ انجام شد.

#### ۲-۲- آزمون خستگی

آزمون خستگی طبق استاندارد ASTM D3479 [۲۰] با مد کشش-کشش انجام گرفت. برای آماده‌سازی، نمونه‌ها با استفاده از سنباده‌های ۴۰۰ و ۸۰۰ به خوبی سنباده‌زنی شدند به گونه‌ای که هیچ‌گونه ناهمواری نداشته باشند و از طرفی حالت انحنای نمونه‌ها نیز در قسمت سنج<sup>۱۴</sup> از بین نرود. ابعاد در نظر گرفته شده برای نمونه‌های آزمون خستگی در این تحقیق، ابعاد نمونه‌های خستگی پژوهش وال و همکاران [۲۱] است. در این حالت ابعاد نمونه‌ها شامل ۷۵ mm (طول)، ۱۲/۷ mm (عرض) و ۲/۷۰ mm (ضخامت) می‌باشد. نمونه‌های خستگی نیز دارای وصله<sup>۱۵</sup> هستند تا نیرو به طور مستقیم به نمونه‌ها وارد نشود. وصله‌ها دارای طول ۱۹ mm

<sup>13</sup> Stich bonded

<sup>14</sup> Gage

<sup>15</sup> Tab

و ضخامتی برابر با ضخامت نمونه‌ها هستند. آزمون خستگی با استفاده از دستگاه خستگی موجود در پژوهشگاه هوا خورشید و در فرکانس ۸ هرتز و نسبت بار ۰/۱ انجام شد.

### ۲-۳- بررسی ریزساختاری

به منظور مقایسه ریزساختار شکست خستگی کامپوزیت‌های GFRP در دو سطح بار ۷۰ و ۳۵ درصد استحکام نهایی (UTS)، آنالیز SEM نیز مورد استفاده قرار گرفت. بدین منظور ابتدا با استفاده از دستگاه آره نواری قسمت مورد نیاز برای آنالیز را با دقت بسیار بالایی برش زده شد. با توجه به اینکه ماده زمینه کامپوزیت GFRP نارسانا است، پیش از انجام آزمون با استفاده از فرایند اسپاترینگ یا کند و پاش، پوششی از Au - Pd بر روی نمونه‌ها قرار گرفت. آنالیز SEM با استفاده از دستگاه LEO VP1450 ساخت آلمان انجام پذیرفت.

### ۳- نتایج و بحث

در جدول ۱، نتایج حاصل از آزمون کشش به نمایش درآمده است.

جدول ۱- نتایج آزمون کشش کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه

مشخصات مکانیکی	استحکام نهایی (MPa)	الانگیشین (%)	مدول یانگ (GPa)
میانگین	۴۲۰/۱	۲/۴	۱۹

در جدول ۲ هم مقادیر خواص مکانیکی ترکیب رزین اپوکسی ۲۰۴۰ و هاردنر ۲۰۴۷ طبق اعلام شرکت سازنده یعنی اکسون فرانسه آورده شده است.

جدول ۲- خواص مکانیکی ترکیب رزین اپوکسی ۲۰۴۰ و هاردنر ۲۰۴۷

الانگیشین	استحکام نهایی
٪ ۸	۷۱ MPa

با مقایسه جدول ۱ و ۲ می‌توان دریافت که اضافه کردن الیاف تقویت کننده E glass با جهت گیری دو جهته (۹۰ و ۰) تا چه حد در بهبود استحکام نهایی تأثیر گذاشته است. همچنین الانگیشن شکست نیز با اضافه کردن الیاف شیشه تا حد قابل توجهی کاهش پیدا کرده است. بنابراین مطابق انتظار، کامپوزیت زمینه اپوکسی

تقویت شده با الیاف شیشه از لحاظ خواص مکانیکی در وضعیت بهتری نسبت به رزین اپوکسی خالص قرار دارد.

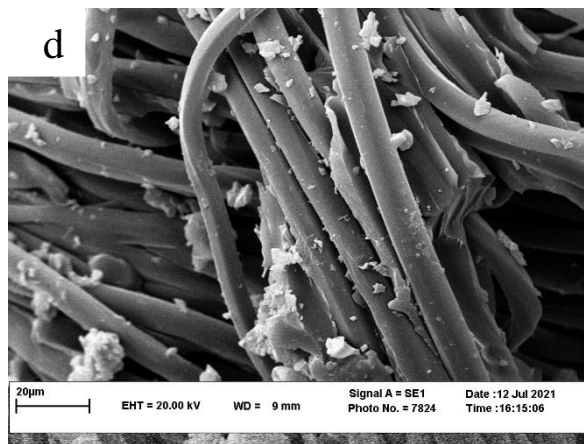
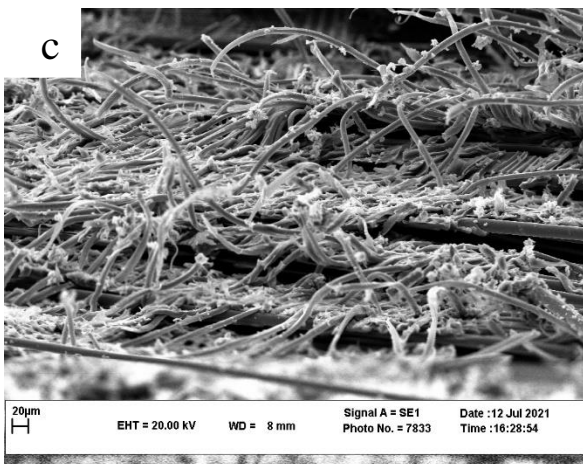
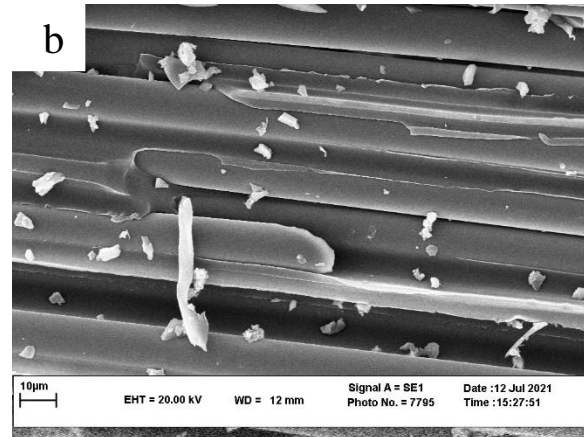
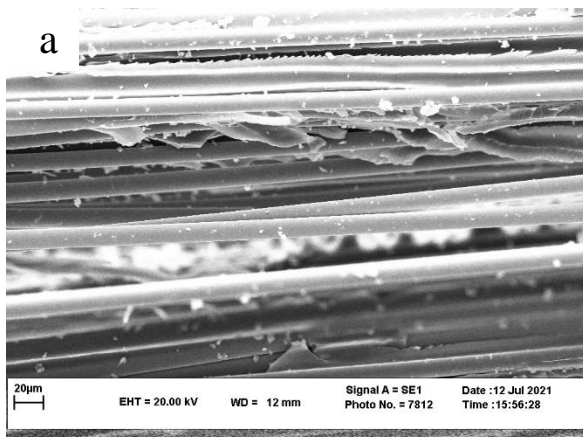
با توجه به نتایج حاصل از آزمون کشش، مقدار استحکام نهایی میانگین برابر با  $420/1 \text{ MPa}$  به دست آمد و به عنوان معیار برای تعیین سطوح تنشی در آزمون خستگی مورد استفاده قرار گرفت.

در جدول ۳، نتایج آزمون خستگی کشش نمونه کامپوزیتی در دو سطح تنشی آورده شده است.

جدول ۳- نتایج آزمون خستگی کامپوزیت زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه

شماره نمونه	سطح بار	تعداد سیکل شکست
۱	٪ ۷۰	۱۶۰۶
۲	٪ ۷۰	۳۰۵۶
۳	٪ ۷۰	۴۴۷۲
۴	٪ ۳۵	۱۵۲۰۱۱۲
۵	٪ ۳۵	۱۹۰۷۰۸۸
۶	٪ ۳۵	۲۵۲۲۲۸۰

همانطور که در جدول ۳ مشاهده می‌شود، با کاهش سطح تنش اعمالی، تعداد سیکل شکست افزایش می‌دهد. همچنین در نتایج تعداد سیکل شکست، پراکندگی قابل مشاهده است که می‌تواند در اثر عواملی همچون آماده‌سازی بد نمونه، هم‌تراز نبودن فک‌های دستگاه خستگی و اعمال نیروی خمشی به نمونه‌ها، خطا در بستن نمونه‌ها، مشکلات ساختاری مربوط به نمونه‌ها و... باشد. در شکل ۱، تصاویر SEM سطح شکست نمونه کامپوزیتی زمینه اپوکسی تقویت شده با الیاف شیشه در دو سطح تنشی ۷۰ و ۳۵ درصد استحکام نهایی (UTS) آورده شده است.



شکل ۱- تصاویر SEM نمونه‌های کامپوزیت GFRP (a) بار ۷۰ درصد، بزرگنمایی ۱۰۰۰ (b) بار ۷۰ درصد، بزرگنمایی ۲۵۰۰ (c) بار ۳۵ درصد، بزرگنمایی ۱۰۰۰ (d) بار ۳۵ درصد، بزرگنمایی ۲۵۰۰

در ۴ تصویر شکل ۱، به وضوح می‌توان پیرینت الیاف بر روی زمینه و همچنین آثار زمینه بر روی الیاف را مشاهده کرد و این موضوع از عدم چسبندگی مناسب میان رزین و الیاف حکایت دارد. یک نکته بسیار مهم و قابل توجه در مقایسه تصاویر SEM دو سطح بار ۷۰ و ۳۵ درصد، وجود اعوجاج زیاد در ساختار شکست نمونه کامپوزیت GFRP تحت سطح بار ۳۵ درصد در تصاویر c و d است. در حقیقت در این حالت، نمونه در تعداد بالای ۱/۵ میلیون سیکل شکسته شده و به عبارتی تعداد بسیار زیادی سیکل را تحمل نموده است. در حالی که در تصاویر a و b که مربوط به سطح بار ۷۰ درصد هستند، اعوجاجی در ساختار مشاهده نمی‌گردد زیرا نمونه در تعداد سیکل بسیار کم می‌شکند. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در سطح تنش بالای خستگی، نمونه کامپوزیت GFRP به سبب شکست زودهنگام، اعوجاجی در ساختارش وجود ندارد. در نقطه مقابل در



سطح تنش پایین، نمونه کامپوزیت GFRP تعداد سیکل بسیار زیادی را تا زمان شکست تحمل می‌کند و مکانیزم‌های آسیب مختلفی در ساختار آن فعال می‌شود و همین موضوع موجب ایجاد اعوجاج، افزایش نرمی زمینه و تغییر شکل پلاستیک قابل توجه در ساختار می‌گردد. وجود تعداد سیکل بالا موجب نرم‌تر شدن زمینه نیز می‌شود [۲۲].

#### ۴- نتیجه گیری

- ۱- آزمون کشش برای نمونه‌های کامپوزیت GFRP طبق استاندارد ASTM D3039 انجام پذیرفت و مقدار استحکام نهایی میانگین برابر با  $420/1$  MPa به دست آمد که به عنوان معیار تعیین سطوح تنشی در آزمون خستگی مورد استفاده قرار گرفت.
- ۲- آزمون خستگی براساس استاندارد ASTM D3479 در دو سطح تنشی ۷۰ و ۳۵ درصد استحکام نهایی کششی (UTS) انجام شد. تعداد سیکل شکست برای خستگی سیکل کم در حدود ۱۰۰۰ تا ۴۰۰۰ سیکل و برای خستگی سیکل زیاد در حدود  $1/5$  تا  $2/5$  میلیون سیکل قرار داشت و نتایج نشان داد که هرچقدر سطح تنش اعمالی کمتر شود، طول عمر خستگی افزایش می‌یابد.
- ۳- آنالیز SEM تصاویر شکست نمونه‌های خستگی کامپوزیت GFRP در دو سطح ۷۰ و ۳۵ درصد نشان داد و اعوجاج قابل توجهی در ساختار شکست ۳۵ درصد دیده شد که در سطح بار ۷۰ درصد وجود ندارد. این اعوجاج می‌تواند ناشی از تعداد سیکل بار زیاد در سطح بار ۳۵ درصد باشد. همچنین در هر دو حالت پرینت الیاف بر روی زمینه مشاهده گردید و مد قالب شکست، جدایش الیاف از زمینه است.

#### ۵- مراجع

- [۱]: N.L. Panwara, S.C. Kaushik, Surendra Kotharia, Role of renewable energy sources in environmental protection: A review, Department of Renewable Energy Sources, College of Technology and Engineering, Maharana Pratap University of Agriculture and Technology, Udaipur 313 001, India, Renewable and Sustainable Energy Reviews 15 (2011).
- [۲]: Christopher Koroneos, Thomas Spachos, Nikolaos Moussiopoulou, Exergy analysis of renewable energy sources, Laboratory of Heat Transfer and Environmental Engineering, Aristotle University Thessaloniki, 54006 Thessaloniki, Greece Received 13 March 2001; accepted 22 May 2001.
- [۳]: Richa Kothari, V.V. Tyagi, Ashish Pathak, Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development, Babasaheb BhimRao Ambedkar University, Lucknow, U.P., India, Renewable and Sustainable Energy Reviews 14 (2010).

- [۴]:Thapar V, Agnihotri G, Sharma A. Wind farm development – Government incentives. In: Proceedings of the National Conference on Wind Energy Commercialization, Maulana Azad College of Technology, Bhopal, India, March 5–6; 1999. p. 152–5.
- [۵]:Balat M. Review of modern wind turbine technology. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects 2009;31(17):1561–72.
- [۶]:Balat M. Usage of energy sources and environmental problems. Energy Exploration and Exploitation 2005;23:141–68.
- [۷]: Blaabjerg F, Teodorescu R, Chen Z, Liserre M. Power converters and control of renewable energy systems. In: Proceedings of 6th International Conference on Power Electronics (ICPE'04), Busan, Korea, October 18–22; 2004.
- [۸]: Thomas BG, Urquhart J. Wind energy for the 1990s and beyond. Journal of Energy Conversion and Management 1996;37:1741–52.
- [۹]:R.P.L. Nijssen, Fatigue Life Prediction and Strength Degradation Of Wind Turbine Rotor Blade Composites, ISBN-10: 90-9021221-3.
- [۱۰]: Mayer RM. Design of composite structures against fatigue applications to wind turbine blades. Chippenham: Antony Rowe Ltd; 1996 pp. 195–208.
- [۱۱]: Kong C, Kim H, Kim J. A study on structural and aerodynamic design of composite blade for large scale HAWT system. Final report, Hankuk Fiber Ltd; 2000.
- [۱۲]: B.Yang , D. Sun , “Testing inspecting and monitoring technologies for wind turbine blades: A survey”, Renewable and Sustainable Energy Reviews,
- [۱۳]: K. Palanikumar, Experimental investigation and optimisation in drilling of GFRP composites, Department of Mechanical Engineering, Sri Sairam Institute of Technology, Chennai 600 044, India, Measurement 44 (2011).
- [۱۴]: K. P. Dyer and D. H. Isaac, Fatigue behaviour of continuous glass fibre reinforced composites, Department of Materials Engineering, University of Wales, Swansea SA2 8PP, UK (Received 28 April 1998; accepted 28 May 1998).
- [۱۵]: Reifsnider KL. Life prediction analysis. ICCM 1987;6:410–31. Damage tolerance and durability of material systems. Wiley.
- [۱۶]: Ogihara S, Takeda N, Kobagashi S, Kobagashi A. Damage mechanics characterization of transverse cracking behaviour in quasi-isotropic CFRP laminates.

[۱۷]: J.A.M. Ferreira, J.D.M. Costa, P.N.B. Reis, M.O.W. Richardson, Analysis of fatigue and damage in glass-fibre-reinforced polypropylene composite materials, accepted 5 November 1998 Abstract.

[۱۸]: Wahid Ferdous, Allan Manalo, Joshua Peauril, Choman Salih, Kakarla Raghava Reddy, Peng Yu, Peter Schubel, Tom Heyer, Testing and modelling the fatigue behaviour of GFRP composites – Effect of stress level, stress concentration and frequency, University of Southern Queensland, Centre for Future Materials (CFM), Toowoomba, QLD 4350, Australia, Revised 22 December 2019, Accepted 7 January 2020

[۱۹] : ASTM D3039, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.

[۲۰] : ASTM D3479, Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials.

[۲۱] : Neil Kelly Wahl, Spectrum fatigue lifetime and residual strength for fiberglass laminates, Montana university, Bozeman, Montana , July 2001.

[۲۲]: Wahid Ferdous, Allan Manalo, Joshua Peauril, Choman Salih, Kakarla Raghava Reddy, Peng Yu, Peter Schubel, Tom Heyer, Testing and modelling the fatigue behaviour of GFRP composites – Effect of stress level, stress concentration and frequency, University of Southern Queensland, Centre for Future Materials (CFM), Toowoomba, QLD 4350, Australia, Revised 22 December 2019, Accepted 7 January 2020.