

# The Study of Fatigue Behavior of Glass Fiber Reinforced Polymer (GFRP) Composite Under Different Stress Levels\*

Research Article

S. Alireza Moghadas Mousavizade<sup>1</sup> Ahad Zabett<sup>2</sup>  
Samane Sahebian<sup>3</sup>

## 1- Introduction

One of the most important components of wind turbines is the blades. Wind turbine blades are subjected to fatigue load during operation. For this reason, the issue of fatigue should be considered at the time of design. Glass fiber reinforced polymer composites or GFRP are used in wind turbine blades. Dyer and Isaac investigated the effect of laying-up on the fatigue behavior of GFRP composite and showed that the fatigue strength in laminate composite [ $\pm 45$ ] is very low compared to laminate composite [0/90] as decreasing the number of fibers along the load direction. Kumar and Swami also investigated the fatigue behavior under combined rotating bending loads mode of GFRP composite at different stress levels. They observed three modes of fatigue damages include matrix cracking, interface debonding, and fiber failure in different cycles. The aim of this study was to investigate the fatigue life and compare fatigue damages at different stress levels for GFRP composite with biaxial fiber laminate [0,90].

## 2-Materials and experimental

### 2-1 Materials

GFRP composite was made of epoxy resin 2040 Axon France and E glass fiber reinforcement with biaxial fiber orientation [0,90] and with dimensions of  $65 \times 125$  cm.

### 2-2 Manufacturing method

In order to manufacture the GFRP composite, vacuum infusion process or VIP was used. In this method, first the layers of fibers were placed on top of each other and a layer of mesh between layers. Then, two layers of plastic bags were considered on the fibers, a vacuum pressure of -0.85 bar was applied to evacuate the air. After mixing the resin and hardener and degassing of mixture, the resin infusion process was performed by vacuum device. The composite sheet is first placed for 24 hours at room temperature and then for 16 hours in an oven at  $80^\circ\text{C}$  to complete curing process of epoxy.

### 2-3 Tensile test

Tensile test according to ASTM D3039 standard was

performed for 5 samples of GFRP composite using Universal Zwick 250 device and strain rate of 2 mm / min. The dimensions of the samples include 250 mm length and 25 mm width. Also, for all samples, tabs with a length of 56 mm were considered for all samples.

### 2-4 Fatigue test

Fatigue test was performed at 4 stress levels of 70, 50, 42 and 35% of the UTS according to ASTM D2479 standard, using the fatigue device of the Sun Air Research Institute, frequency Hz 8 and load level ratio of 0.1. The dimensions of the fatigue specimens are 75 mm length, 12 mm width and 19 mm patch length. The specimens are curved.

### 2-5 SEM Analysis

SEM analysis was performed using VP1450 LEO device to investigate the fracture microstructure of GFRP composite samples at two load levels of 70 and 35% UTS.

## 3-Results

Figure 1 shows the stress-strain curve of GFRP composite with biaxial fibers [0,90] compared to epoxy 2040. Tensile strength increased from about 71 MPa to 420 MPa by adding glass fibers as a reinforcing phase to the epoxy matrix.

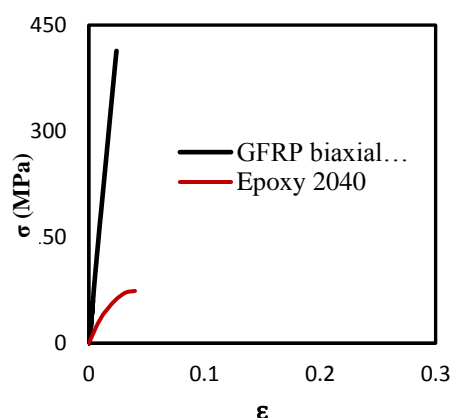


Fig1. Stress– strain curve of GFRP composite with biaxial fibers [0,90] compared to epoxy 2040.

According to Figure 2, in the S-N curve of GFRP composite with biaxial fibers [0,90], it is observed that the number of failure cycles increases with decreasing the applied load level. The fitting curve on the data points is shown in the diagram of fig 2 and its coefficient of determination ( $R^2$ ) is equal to 0.9339.

\* Manuscript received: 9 October 2021, Revised, 16 February 2022, Accepted, 15 March 2022.

<sup>1</sup> M.sc student department of material science and engineering, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran.

<sup>2</sup> Associate Professor, Department of Material Science and Engineering, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran.

<sup>3</sup> Corresponding Author. Assistant professor, department of material science and engineering, Ferdowsi university of Mashhad, Mashhad, Iran. **Email:** S.Sahebian@um.ac.ir

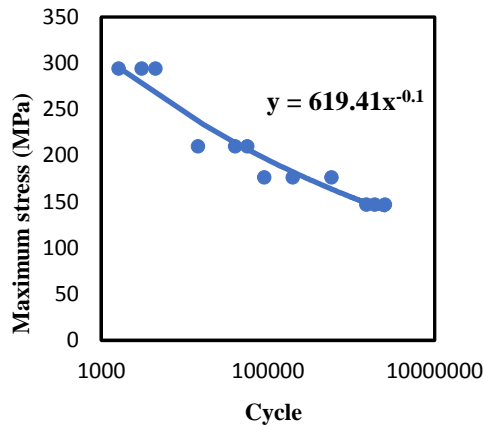


Fig 2. S-N curve for GFRP composite with biaxial fibers [0,90].

Figure 3 shows the SEM images of the GFRP composite fatigue failure at two load levels of 35% and 70% UTS.

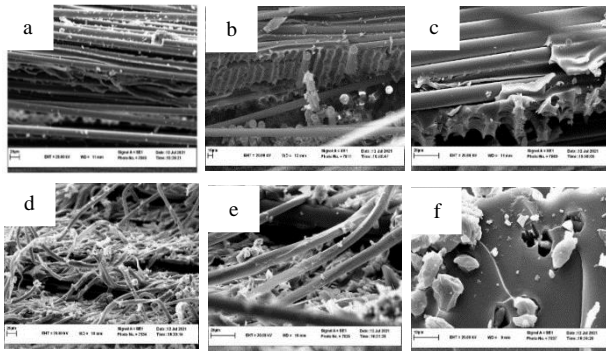


Fig 3. SEM images of GFRP composite fatigue failure a, b and c) 70% load level c, d and f) 35% load level.

In Figure 3, we can see the print of fibers on the matrix and the print of the matrix on the fibers, which shows the debonding between fibers and matrix during cyclic loading. The cycle numbers of applied load affect on adhesion of interface between fibers and matrix. As the number of cyclic loads increases, the bond between the resin and the fibers becomes weaker. For this reason, the mechanism of debonding of fibers and matrix ground for the 35% load level is the dominant mechanism. According to SEM images at 35% load level, fiber pull out is another dominant mechanism that has caused void in the fracture surface of the sample. Matrix cracking is more severe in 70% load level images. By applying more cyclic load, it increases the softness of the matrix. At the failure surface of 35% of the sample, there is a lot of distortion that can be caused by the activation of various mechanisms of fatigue damage.

#### 4- Conclusion

- The final strength of GFRP composite with biaxial fibers [0,90] was obtained using the tensile test which was equal to 420 MPa and in the fatigue test its S-N curve had a good fit with the results.
- SEM analysis for the fracture surface of fatigue specimens at two load levels of 70 and 35% UTS showed that the debonding between the fibers and the matrix, which is the dominant mechanism at the load level of 35%. At 35% load level, the mechanism of fibers pull-out, void and distortion was observed. At the load level of 70%, matrix cracking and fibers pull-out was observed, and matrix cracking was the dominant mechanism.

**مطالعه رفتار خستگی در کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه (GFRP) در سطوح تنشی مختلف\***

مقاله پژوهشی

سمانه صاحبان سقی<sup>(۳)</sup>احمد ضابط<sup>(۲)</sup>سید علیرضا مقدس موسوی زاده<sup>(۱)</sup>

**چکیده** در این پژوهش هدف بررسی رفتار خستگی کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری الیاف دو جهت [0,90] تحت سطوح تنشی مختلف است. بدین منظور ابتدا آزمون کشش انجام گرفت و مقدار استحکام نهایی برابر با ۴۲۰ MPa به دست آمد. سپس آزمون خستگی در ۴ سطح تنش ۷۰، ۵۰، ۴۲ و ۳۵ درصد استحکام نهایی انجام شد. نتایج خستگی حاصل دارای پراکندگی مطلوبی بود و منحنی برازش شده بر روی داده‌ها نیز تطابق مناسبی داشت. در نهایت با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، چسبندگی میان الیاف و زمینه و ساختار شکست خستگی نمونه‌های ۷۰ و ۳۵ درصد استحکام نهایی مورد ارزیابی قرار گرفت. طبق نتایج در هر دو نمونه ۷۰ و ۳۵ درصد، چسبندگی میان الیاف و زمینه مطلوب نبود و جدایش الیاف از زمینه مشاهده گردید. در سطح بار ۳۵ درصد UTS، به دلیل تضعیف پیوند میان رزین و الیاف، جدایش بین آن‌ها شدیدتر بود. همچنین در هر دو نمونه ۷۰ و ۳۵ درصد UTS مکانیزم بیرون‌زدگی الیاف دیده شد اما شدت آن در نمونه ۳۵ درصد بیشتر بود. در نمونه ۳۵ درصد، اعوجاج قابل توجهی مشاهده گردید که در نمونه ۷۰ درصد، دیده نشده بود. از طرفی، شکست ترد زمینه در نمونه ۷۰ درصد نسبت به ۳۵ درصد، وضوح بیشتری داشت. این موضوع را می‌توان به افزایش نرمی زمینه در اثر اعمال بار سیکلی ربط داد. **واژه‌های کلیدی** کامپوزیت GFRP، خستگی کامپوزیت، آنالیز SEM، چسبندگی الیاف و زمینه.

**مقدمه**

پره‌های توربین بادی، باید فاکتورهای مختلفی را مدنظر قرار داد که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، خستگی است. توربین‌های بادی به واسطه‌ی ساختار بلند و کشیده‌شان و همچنین ارتعاش و تصادفی بودن بار اعمالی از سوی باد، در معرض خطر خستگی قرار دارند [6-8].

جنس ماده مورد استفاده در پره توربین بادی، کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه (Glass fiber reinforced polymer) یا GFRP است [8]. استفاده از پلیمرهای تقویت شده با الیاف از سال ۱۹۴۰، آغاز شده و در سالیان اخیر حتی در ساخت سازه‌های مختلف نیز به کار گرفته می‌شوند [9]. کامپوزیت‌های تقویت شده با الیاف مثل GFRP، CFRP (Carbon fiber reinforced polymer) و AFRP (Aramid fiber reinforced polymer) دارای نقش مهمی در بازار مواد هستند [10]. کامپوزیت‌های GFRP به عنوان یک ساختار عالی جهت رسیدن به قطعاتی با وزن کم، سفتی خمشی بالا و مقاومت کمانشی زیاد شناخته می‌شوند [11]. علی‌رغم اینکه کامپوزیت‌ها به واسطه‌ی رفتار خوبشان، کاربردهای گسترده‌ای

منابع فسیلی خواه یا ناخواه روزی به اتمام خواهند رسید و مشکلات و معضلات زیست محیطی خاصی که برای این منابع وجود دارد، ما را به سمت استفاده‌ی هرچه بیشتر از منابع تجدیدپذیر به خصوص انرژی خورشیدی و انرژی باد سوق می‌دهد [1]. منابع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی باد و انرژی خورشید را می‌توان بدون وقفه برای تولید انرژی استفاده نمود [2]. این منابع، سازگاری مناسبی با محیط‌زیست دارند و این ویژگی، یکی از مهم‌ترین دلایل محبوبیت آن‌ها برای تحقیق، توسعه و جایگزینی‌شان با منابع انرژی دیگر است [3]. انرژی باد به عنوان یکی از انواع انرژی‌های تجدیدپذیر، کاربرد مفیدی در تولید برق دارد و به دلیل مزایایی همچون عدم ایجاد آلودگی محیطی، در بسیاری از کشورهای جهان استفاده می‌شود [4]. ابزار مورد استفاده برای تبدیل انرژی باد به برق، توربین‌های بادی هستند [5]. توربین‌های بادی از اجزای مختلفی تشکیل شده‌اند که پره، مهم‌ترین جز آن‌ها است. به همین دلیل در زمان طراحی

\* تاریخ دریافت مقاله ۱۴۰۰/۷/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۱۴۰۰/۱۲/۲۲ می‌باشد.

(۱) کارشناس ارشد مهندسی مواد، گرایش شناسایی و انتخاب مواد، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

(۲) دانشیار، گروه مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

(۳) نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی متالورژی و مواد دانشگاه فردوسی مشهد، ایران.

## مواد و روش آزمایش

در این تحقیق برای ساخت ورقه کامپوزیت GFRP از رزین اپوکسی تجاری ۲۰۴۰ ساخت شرکت اکسون فرانسه و الیاف شیشه نوع E با جهت گیری دو جهته [0,90] ساخت شرکت STA ترکیه استفاده شد. بدین منظور ابتدا تعداد ۷ لایه از پارچه الیاف شیشه E با جهت گیری دو جهته [0,90] بر روی هم قرار گرفتند. سپس به منظور در امان ماندن الیاف از آلودگی های محیطی، یک لایه پارچه محافظ دور تا دور آن پوشانده شد. در جدول (۱)، مشخصات پارچه الیاف شیشه E برش خورده به نمایش درآمده است. در شکل (۱) هم، تصویر الیاف شیشه با جهت گیری دو جهته متعامد [0,90] نشان داده شده است.

به منظور آماده سازی الیاف برای تزریق رزین، بایستی ابتدا بر روی میز شیشه ای کار، واکس مخصوصی زده شود تا در حین تزریق، رزین به میز نچسبد. این کار در فواصل زمانی ۱۵ دقیقه ای و در سه نوبت انجام گرفت. سپس الیاف آماده شده بر روی میز کار قرار گرفتند. روش مورد استفاده برای ساخت ورقه کامپوزیت GFRP در این پژوهش، روش تزریق به کمک خلأ (Vacuum infusion process) است که به آن VIP نیز می گویند. بدین منظور ابتدا یک لایه مش (Mesh) بر روی الیاف قرار می گیرد تا سیلان رزین در زمان تزریق بهتر باشد. سپس اولین لایه بگ یا کیسه پلاستیکی بر روی مجموعه قرار می گیرد و خلأ با فشار ۰/۸۵- بار اعمال می گردد تا هوای مجموعه به طور کامل خالی شود. وجود هوا در فرایند ساخت کامپوزیت، موجب افت کیفیت ورقه کامپوزیتی می شود. در ادامه لایه دوم کیسه پلاستیکی نیز مطابق حالت قبل بر روی مجموعه قرار گرفت. بعد از گذشت ۲۴ ساعت، رزین اپوکسی ۲۰۴۰ با هاردنر آن ۲۰۴۷ EPOLAM به نسبت ۱۰۰:۳۲ مخلوط شد و به منظور گاززدایی به مدت ۲۵ دقیقه در دستگاه مکش قرار گرفت. سپس با استفاده از شلنگ های تعبیه شده بر مجموعه الیاف، رزین از طریق پمپ خلأ به صورت مکشی، به مجموعه تزریق گردید. زمان ژل شدن مخلوط رزین اپوکسی ۲۰۴۰ و هاردنر ۲۰۴۷ EPOLAM، ۵ ساعت می- باشد. بعد از گذشت این زمان، ورقه کامپوزیت GFRP به مدت ۲۴ ساعت در دمای محیط قرار گرفت و سپس برای تکمیل فرایند پخت به آن با دمای ۸۰ °C به مدت ۱۶ ساعت منتقل شد. شکل (۲)، آماده شدن ورقه کامپوزیت GFRP طی روش VIP را نشان می دهد.

دارند، اما این موضوع نمی تواند خطر شکست خستگی را برای آن ها از بین ببرد. با توجه به پیچیدگی زیاد ساختار کامپوزیت ها، مکانیزم های آسیب مختلفی ممکن است در آن ها رخ دهد که از میان این مکانیزم ها می توان به ترک زمینه (Matrix cracking)، مویه دار شدن زمینه (Matrix crazing)، شکست فصل مشترک الیاف و زمینه، شکست الیاف و... اشاره کرد [12,13].

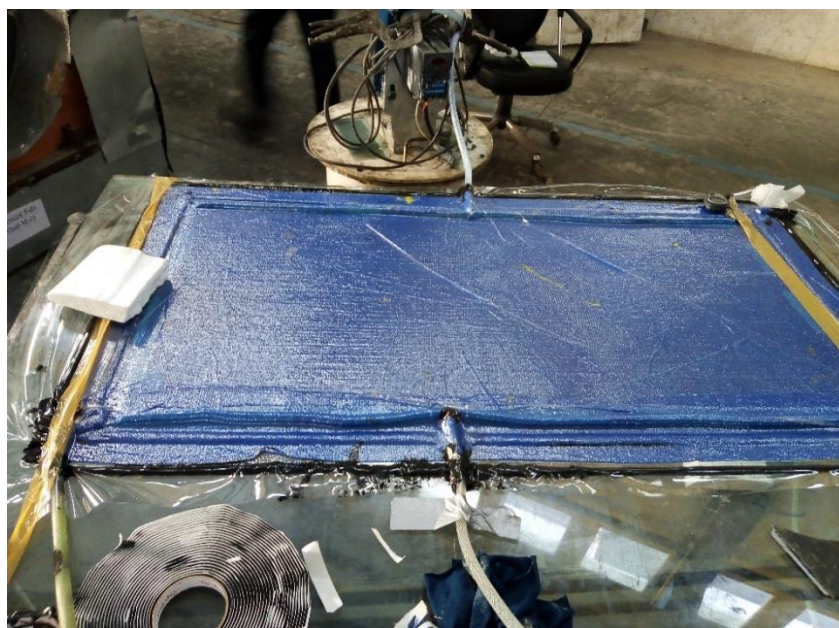
تاکنون تحقیقات متعددی در رابطه با رفتار خستگی کامپوزیت های GFRP که به عنوان ماده اصلی پره توربین بادی شناخته می شوند، صورت گرفته است. دایر و آیزاک [12] در تحقیق خود اثر لایه چینی الیاف شیشه بر آسیب خستگی کامپوزیت زمینه پلی استر تقویت شده با الیاف شیشه را بررسی کردند. نتایج تحقیق آن ها نشان داد که کامپوزیت GFRP با لایه چینی [±45] نسبت به لایه چینی [0/90] دارای استحکام خستگی کمتری است، زیرا تعداد الیافی که در امتداد جهت بار قرار دارند، بسیار اندک است. تصاویر میکروسکوپی از سطح شکست نمونه های کامپوزیت GFRP با لایه چینی [±45] و [0/90] نشان داد که در نمونه [0/90] ترک های سطحی از لبه ها آغاز می شوند و رشد ابتدایی شان در زاویه ۴۵° محور کششی است که در ادامه رشد ترک در جهت عمود بر محور کششی می شود و در تمام نمونه منتشر می گردد. اما در نمونه [±45] ترک فقط در سطح زمینه به وجود می آید و به لایه بالایی الیاف نفوذ نمی کند. در تحقیق دیگری کومار و سوآمی [14]، رفتار خستگی کامپوزیت GFRP را تحت مد بار ترکیبی خمشی و پیچشی بررسی کردند. آن ها آزمون خستگی را در ۱۱ سطح تنش براساس درصد استحکام نهایی (۴۰ تا ۹۰ درصد) انجام دادند. منحنی S-N حاصل از تحقیق آن ها دارای تطابق نسبتاً مناسبی با نتایج بود. آن ها همچنین سه مد آسیب ترک خوردگی زمینه (در تعداد سیکل شکست بیش از ۱۰ هزار) گسیختگی فصل مشترک و زمینه (در تعداد سیکل شکست بین ۱۰۰۰ و ۱۰ هزار) و شکاف فصل مشترک الیاف و زمینه (در تعداد سیکل شکست کمتر از ۱۰۰) را مشاهده کردند. با این حال آن ها اطلاعات بیشتری را در خصوص سایر مکانیزم های آسیب و احتمال ایجاد اعوجاج زیاد و تغییر فرم پلاستیک در تعداد سیکل بالا را در اختیار قرار ندادند. هدف این پژوهش، مقایسه آسیب های خستگی و تفاوت های مقدار آن ها در سطح بار کم و زیاد خستگی برای کامپوزیت GFRP و همچنین بررسی چسبندگی میان الیاف و زمینه با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی است.

جدول ۱ مشخصات پارچه شیشه E مورد استفاده در پژوهش

نوع پارچه	جهت گیری الیاف	شرکت سازنده	ابعاد (cm)	تعداد لایه‌ها
E glass	دو جهته [0,90]	STA ترکیه	۱۲۵×۶۵	۷



شکل ۱ تصویر الیاف شیشه E با جهت گیری دو جهته متعامد [0,90]



شکل ۲ آماده شدن ورقه کامپوزیت GFRP طی روش VIP.

### آزمون کشش

تعداد ۵ نمونه برای انجام آزمون کشش نیاز است و نمونه‌ها باید دارای وصله باشند تا بار به طور مستقیم به ماده اصلی وارد نشود. در شکل (۳)، تصویر شماتیک و ابعاد نمونه‌های کامپوزیت GFRP با جهت گیری دو جهته الیاف [0,90] طبق استاندارد D3039 آورده شده است. آزمون کشش برای نمونه‌های

به منظور بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت GFRP ساخته شده با جهت گیری الیاف دو جهته [0,90] آزمون کشش طبق استاندارد ASTM D3039 [15] صورت پذیرفت. طبق استاندارد

شکل ۴ ابعاد نمونه کامپوزیت GFRP با جهت گیری دو جهته [0,90] برای آزمون خستگی [17]

نمونه‌های آزمون خستگی مانند نمونه‌های آزمون کشش، دارای وصله هستند که بایستی در نمونه‌سازی به این موضوع توجه شود. با توجه به پراکندگی زیاد رایج در نتایج خستگی، در استاندارد D3039 به این موضوع اشاره شده که رعایت نکاتی از جمله آماده‌سازی مناسب نمونه‌ها و کنترل هم‌ترازی فک‌های دستگاه خستگی، می‌تواند به کاهش پراکندگی نتایج خستگی کمک کند. بدین منظور نمونه‌ها با استفاده از سنباده‌های ۶۰۰، ۸۰۰ و ۱۲۰۰ به خوبی سنباده‌زنی شدند. همچنین پیش از انجام هر آزمون، تراز بودن فک‌های دستگاه خستگی کنترل گردید تا احتمال پراکندگی در نتایج کمتر شود. در استاندارد D3479 اشاره شده که فرکانس اعمال بار باید ۱۰ هرتز یا کمتر از آن باشد. برای انجام آزمون خستگی نمونه‌های کامپوزیت GFRP دو جهته [0,90]، فرکانس ۸ هرتز انتخاب گردید و نسبت تنش یا R نیز برابر با ۰/۱ در نظر گرفته شد.

### آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی یا SEM

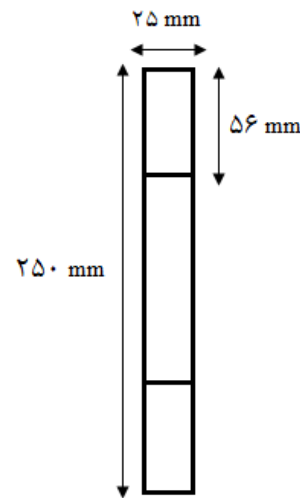
آنالیز میکروسکوپ الکترونی روبشی یا (Scanning SEM) electron microscopy با هدف بررسی ریزساختاری شکست خستگی نمونه‌های کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری دو جهته متعامد [0,90] در دو سطح بار زیاد و کم (۷۰ و ۳۵ درصد استحکام نهایی) و همچنین چسبندگی الیاف و زمینه انجام شد. با توجه به نارسا بودن پلیمر و الزام رسانا بودن نمونه‌ها در آنالیز SEM، پوششی از طلا-پالادیوم بر روی نمونه‌ها اعمال گردید. آنالیز SEM با استفاده از دستگاه LEO VP1450 انجام شد.

### نتایج و بحث

در شکل (۵)، منحنی تنش و کرنش میانگین حاصل از آزمون کشش‌های نمونه‌های کامپوزیت GFRP در مقایسه با منحنی تنش کرنش اپوکسی تجاری ۲۰۴۰ براساس کار نصرتی [18]، آورده شده است.

با توجه به شکل (۴) مقدار استحکام نهایی در کامپوزیت GFRP به طور قابل توجهی نسبت به رزین اپوکسی ۲۰۴۰ افزایش یافته است و این موضوع اهمیت بسیار بالای

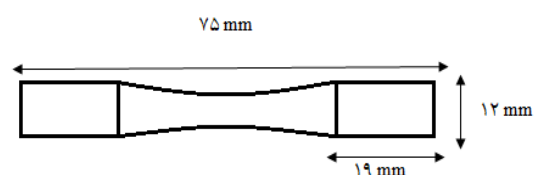
کامپوزیت GFRP با نرخ کرنش ۲ mm/min و با استفاده از دستگاه Universal zwick 250 انجام شد.



شکل ۳ نمونه کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری دو جهته [0,90] برای آزمون کشش [15]

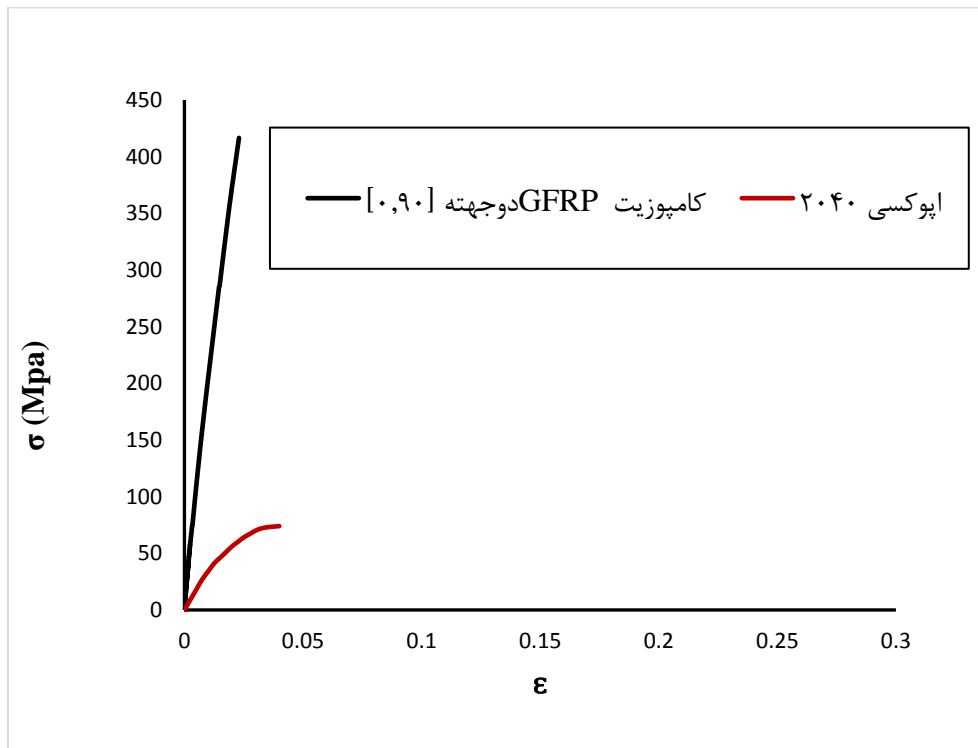
### آزمون خستگی کشش - کشش

به منظور بررسی رفتار خستگی و ترسیم منحنی S-N کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری الیاف دو جهته [0,90]، آزمون خستگی طبق استاندارد ASTM D3479 [16] و در ۴ سطح تنش ۷۰، ۵۰، ۴۲ و ۳۵ درصد استحکام نهایی، با استفاده از دستگاه خستگی پژوهشکده هوا خورشید در دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. در این استاندارد برای ابعاد نمونه، پیشنهاد شده که از ابعاد نمونه آزمون کشش استاندارد D3039 استفاده گردد. با توجه به اینکه دستگاه خستگی موجود توانایی اعمال نیرو به نمونه‌ای با این ابعاد را ندارد و احتمال آسیب رسانی به دستگاه و نمونه بسیار بالا می‌باشد، لذا از ابعاد دیگری برای آزمون خستگی استفاده شد. ابعاد مدنظر طبق پژوهش وال و همکاران [17] در دانشگاه مانتانا انتخاب گردید. در شکل ۴، تصویر شماتیک و ابعاد مورد استفاده برای نمونه‌های آزمون خستگی کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری دو جهته [0,90] آورده شده است.



حدود ۶ برابر بیشتر می‌باشد. مقدار استحکام نهایی میانگین به دست آمده در نتیجه آزمون کشش نمونه کامپوزیت GFRP با جهت گیری الیاف دو جهته [0,90] برابر ۴۲۰ MPa بوده که به عنوان معیار در تعیین سطوح تنش آزمون خستگی نمونه‌های کامپوزیت GFRP در نظر گرفته شد. در شکل (۶)، منحنی S-N حاصل از نتایج خستگی آزمون نمونه‌های کامپوزیت GFRP با جهت گیری دو جهته الیاف [0,90] به نمایش درآمده است.

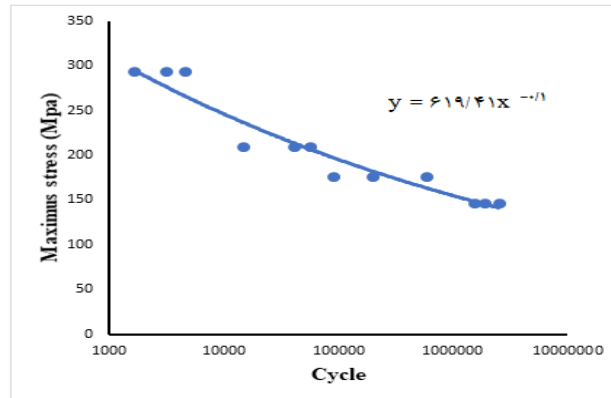
کامپوزیت‌سازی را نشان می‌دهد. در حقیقت افزودن الیاف تقویت کننده موجب افزایش استحکام برای رزین اپوکسی ۲۰۴۰ می‌شود زیرا عمده‌ی بار توسط الیاف تقویت کننده تحمل می‌گردد. در جدول (۲)، مقادیر خواص مکانیکی حاصل از کامپوزیت GFRP و رزین اپوکسی ۲۰۴۰ آورده شده است. مطابق جدول (۲)، مشاهده می‌شود که استحکام نهایی در کامپوزیت زمینه اپوکسی ۲۰۴۰ تقویت شده با الیاف شیشه E با جهت گیری دو جهته [0,90] نسبت به رزین اپوکسی ۲۰۴۰ مجزا،



شکل ۵ منحنی تنش کرنش کامپوزیت GFRP دو جهته [0,90] و اپوکسی تجاری ۲۰۴۰.

جدول ۲ خواص مکانیکی حاصل از منحنی تنش کرنش کامپوزیت GFRP با جهت گیری الیاف دو جهته [0,90] براساس پژوهش فعلی و رزین اپوکسی ۲۰۴۰ طبق پژوهش نصرتی [18].

خواص مکانیکی			نوع ماده
مدول یانگ (GPa)	کرنش شکست (%)	استحکام نهایی (MPa)	
۳/۰۲	۴/۵	۷۱/۴	رزین اپوکسی ۲۰۴۰
۱۹/۲	۲/۴	۴۲۰	کامپوزیت GFRP با جهت گیری دو جهته [0,90]



شکل ۶ منحنی S-N خستگی نمونه‌های کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری الیاف دو جهته [0,90]

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) از سطح شکست نمونه‌های کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری دو جهته الیاف [0,90] در دو سطح بار ۷۰ و ۳۵ درصد استحکام نهایی به نمایش درآمده است.

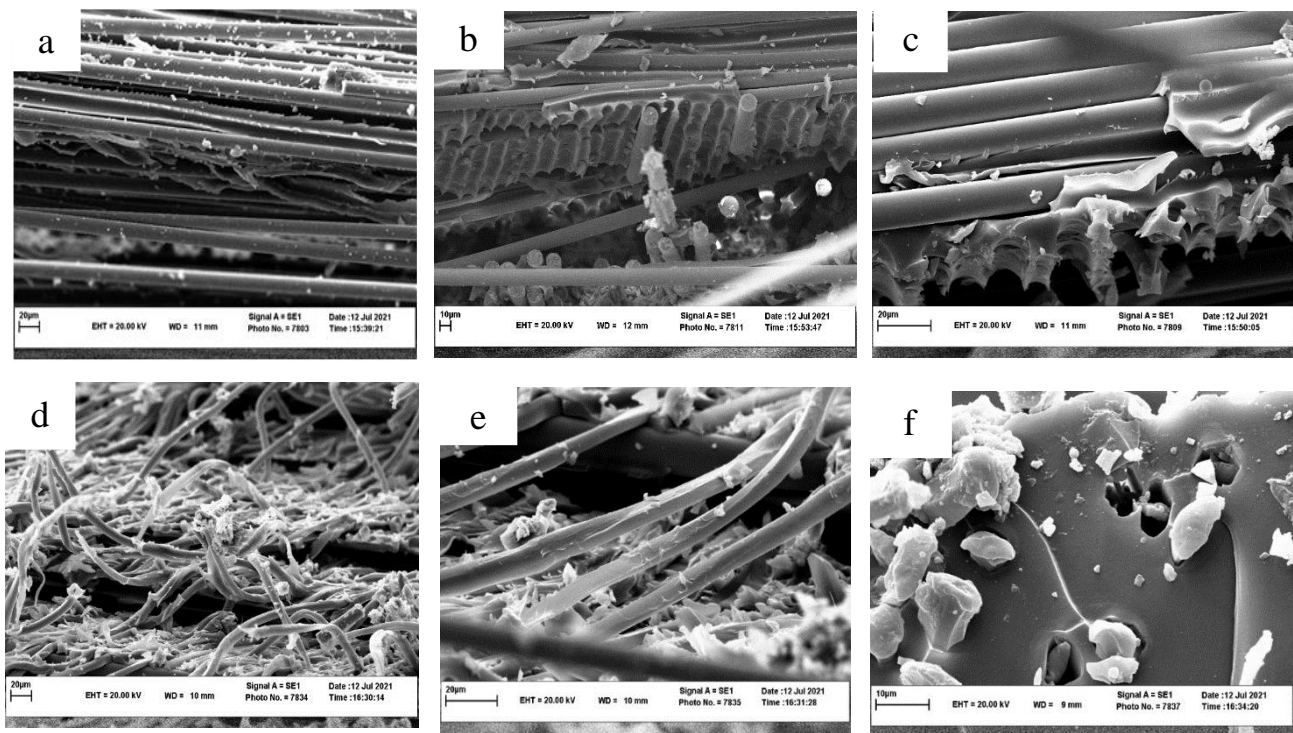
در تمامی تصاویر SEM شکل (۷)، می‌توان اثر الیاف بر زمینه و اثر زمینه بر روی الیاف را مشاهده نمود. چنین اتفاقی، نمایانگر چسبندگی نه چندان مطلوب میان رزین و الیاف و جدایش الیاف از زمینه است. چسبندگی میان الیاف و زمینه به عوامل مختلفی بستگی دارد که یکی از آنها روش ساخت است. در روش VIP در مقایسه با روشی مثل لایه‌چینی دستی (Hand day-up)، چسبندگی بهتری بین رزین و الیاف وجود دارد [20]. تعداد سیکل بار اعمالی نیز می‌تواند بر چسبندگی الیاف و زمینه اثر بگذارد. هرچقدر اعمال بار سیکلی شدیدتر باشد یا به عبارتی تعداد سیکل اعمالی به نمونه کامپوزیتی بیشتر شود، پیوند میان رزین و الیاف ضعیف‌تر می‌گردد [21]. در نتیجه چسبندگی بین آن‌ها هم کاهش می‌یابد که این موضوع در تصاویر مربوط نمونه سطح بار ۳۵ درصد استحکام نهایی در شکل (۷)، مشخص است. در تصویر (b-۷) از سطح بار ۷۰ درصد استحکام نهایی و تصویر (e-۷) از سطح بار ۳۵ درصد استحکام نهایی، مکانیزم آسیب خستگی بیرون‌زدگی الیاف (Pull out) قابل مشاهده می‌باشد. این مکانیزم در سطح بار ۳۵ درصد، یک مکانیزم غالب محسوب می‌شود. مطابق تصویر (f-۷)، بیرون‌زدگی الیاف در نمونه سطح بار ۳۵ درصد استحکام نهایی به حدی می‌باشد که موجب برجای ماندن حفره در ساختار شده است. این موضوع نیز به تضعیف شدید پیوند الیاف و زمینه در اثر اعمال تعداد سیکل بار زیاد برمی‌گردد.

مطابق شکل (۶)، مشاهده می‌شود که با کاهش سطح بار اعمالی تعداد سیکل شکست افزایش می‌یابد. منحنی برازش شده بر نقاط داده‌ها از تطابق مناسبی با داده‌ها برخوردار است زیرا مقدار ضریب تعیین یا  $R^2$  آن نزدیک به ۱ می‌باشد و این موضوع نشان‌دهنده‌ی پراکندگی قابل قبول نتایج است. با این حال باز هم در نتایج خستگی، قاعدتاً پراکندگی وجود دارد که این موضوع را می‌توان به عواملی همچون کنترل نکردن تراز بودن فک‌ها، سناده‌زنی نامناسب نمونه‌ها، اعمال بار اضافی و عدم بستن مناسب نمونه‌ها در فک‌های دستگاه خستگی ربط داد. منحنی برازش شده بر نتایج خستگی در شکل بالا از نوع توانی (Power law) می‌باشد و رابطه‌ی میان عمر خستگی و استحکام خستگی با توجه به رابطه (۱) حاصل می‌شود.

$$\sigma_f = \alpha N_f \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $\sigma_f$  استحکام خستگی،  $N_f$  عمر خستگی است. همچنین  $\alpha$  و  $\beta$  مقادیر ثابتی می‌باشند. این مقادیر به صورت تجربی به دست می‌آیند [19] که در این پژوهش مقدار  $\alpha$  برابر با  $619/41$  و مقدار  $\beta$  برابر با  $-0/1$  است. در سطح تنش ۷۰ درصد استحکام نهایی تعداد سیکل شکست در حدود ۳۰۰۰ سیکل است، در حالی که در سطح بار ۳۵ درصد استحکام نهایی، این مقدار حتی به حدود  $2/5$  میلیون سیکل نیز می‌رسد. لذا در ریزساختار شکست نمونه کامپوزیت GFRP در دو سطح بار ۷۰ و ۳۵ درصد استحکام نهایی، می‌تواند تفاوت وجود داشته باشد. پیش‌تر به این موضوع اشاره شده که افزایش بار سیکلی موجب نرم‌شدن زمینه می‌گردد [20]. در شکل (۷)، تصاویر





شکل ۷ تصاویر SEM سطح شکست خستگی نمونه‌های کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری الیاف دو جهته [0,90] (a و b) و (c) سطح بار ۷۰ درصد استحکام نهایی. (d، e و f) سطح بار ۳۵ درصد استحکام نهایی.

### نتیجه‌گیری

۱. استحکام نهایی حاصل از آزمون کشش نمونه‌های کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری الیاف دو جهته [0,90] برابر با ۴۲۰ MPa به دست آمد که در مقایسه با استحکام نهایی رزین اپوکسی ۲۰۴۰، حدود ۶ برابر افزایش یافته است.
۲. آزمون خستگی در مد کشش-کشش برای نمونه‌های کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری الیاف دو جهته [0,90] در ۴ سطح تنش ۷۰، ۵۰، ۴۲ و ۳۵ درصد استحکام نهایی انجام شد و منحنی S-N برازش شده دارای تطابق مطلوبی با نتایج بود.
۳. آنالیز SEM برای سطح شکست نمونه‌های کامپوزیت GFRP با جهت‌گیری الیاف دو جهته [0,90] در دو سطح بار ۷۰ و ۳۵ درصد استحکام نهایی انجام شد. در تصاویر هر دو سطح بار اثر زمینه بر الیاف و اثر الیاف بر زمینه مشاهده گردید که حاکی از چسبندگی نه چندان مطلوب رزین و زمینه و جدایش بین آن‌ها بود. این چسبندگی در سطح بار ۳۵ درصد UTS شدت بیشتری داشت زیرا پیوند میان رزین و الیاف ضعیف‌تر شده بود. در سطح بار ۳۵ درصد، مکانیزم

در تصویر (c-۷) از سطح بار ۷۰ درصد استحکام نهایی، شکست ترد زمینه به عنوان یکی از مکانیزم‌های آسیب خستگی به وضوح مشاهده می‌شود. اما در تصاویر سطح بار ۳۵ درصد استحکام نهایی به ویژه تصویر (e-۷) و (f-۷)، شکست ترد زمینه کمتر دیده می‌شود. در حقیقت اعمال تعداد سیکل زیاد مطابق انتظار، موجب نرم‌تر شدن زمینه می‌گردد و در نتیجه تغییر فرم پلاستیک نیز افزایش می‌یابد. نکته مهم در تصاویر SEM مربوط به نمونه سطح بار ۳۵ درصد استحکام نهایی، وجود اعوجاج زیاد در ساختار است. چنین اعوجاجی در ساختار نمونه سطح بار ۷۰ درصد استحکام نهایی مشاهده نشده است. در نتیجه می‌توان ادعا داشت که در سطح بار ۳۵ درصد که تعداد سیکل بار زیادی به نمونه اعمال می‌شود، اعوجاج قابل توجهی در ساختار به وجود می‌آید. این موضوع را می‌توان به فعال شدن مکانیزم‌های مختلف آسیب خستگی در سطح بار ۳۵ درصد استحکام نهایی ربط داد که موجب افزایش اعوجاج و تغییر شکل پلاستیک در ساختار می‌شود.

استحکام نهایی، خردایش ترد زمینه نمود کمتری داشت و این نشان‌دهنده نرم‌تر شدن زمینه به دلیل اعمال تعداد بار سیکلی زیاد و وقوع تغییر فرم پلاستیک است. همچنین در ساختار شکست نمونه ۳۵ درصد استحکام نهایی، اعوجاج زیادی نیز مشاهده شد که این موضوع هم بر وقوع بیشتر تغییر فرم پلاستیک در شکست این نمونه، صحنه می‌گذارد.

بیرون‌زدگی الیاف، یکی از مکانیزم‌های آسیب غالب بود و شدت بالای آن موجب ایجاد حفره در ساختار گردید. اما در سطح بار ۷۰ درصد استحکام نهایی، مکانیزم بیرون‌زدگی الیاف به طور نسبی دیده شد. همچنین شکست ترد زمینه در ساختار شکست خستگی نمونه ۷۰ درصد استحکام نهایی به خوبی مشاهده گردید، در حالی که در نمونه ۳۵ درصد

## مراجع

۱. یوسف محمدی نژاد، "انرژی پاک نیاز و ضرورت هزاره سوم"، انتشارات نگارنده دانش تهران، (۱۳۹۲).
2. N.L. Panwara, S.C. Kaushik, Surendra Kotharia., "Role of renewable energy sources in environmental protection: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15, India (2011).
3. Richa Kothari, V.V. Tyagi, Ashish Pathak., "Waste-to-energy: A way from renewable energy sources to sustainable development", *Sustainable Energy Reviews* 14, India (2010).
4. Balat M., "Review of modern wind turbine technology", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 31, No. 17, (2009).
5. Balat M., "Usage of energy sources and environmental problems", *Energy Exploration and Exploitation*, Vol. 23, No. 2, (2005).
6. Mayer RM., "Design of composite structures against fatigue applications to wind turbine blades", Chippenham, Antony Rowe Ltd, pp. 195-208, (1996).
7. 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).
8. B. Yang, D. Sun., "Testing inspecting and monitoring technologies for wind turbine blades: A survey", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, pp 515-526. Vol. 22, (2013).
9. C. Bakis, L.C. Bank, V. Brown, E. Cosenza, J. Davalos, J. Lesko, et al., "Fiber reinforced polymer composites for construction-state-of-the-art review", *Journal of Composites*, Vol. 6, No. 2, (2002).
10. G. D. Sims, W. R. Broughton., "Glass Fiber Reinforced Plastics- Properties", National Physical Laboratory. Tiddington, UK.
11. Douglas S. Cairns, John D Shramstad., "Evaluation of Hand Lay-up And Resin Transfer Molding in Composite Wind Turbine Blade Structures", Sandia Online laboratories, (2012).
12. K. P. Dyer and D. H. Isaac., "Fatigue behavior of continuous glass fiber reinforced composites", *Composites Part B: Engineering*, Vol. 29, No. 6, pp.725-733, (1998)
13. Joris Degrieck and Wim Van Paepegem., "Fatigue damage modeling of fibre-reinforced composite materials: Review", *Mechanical Review*, Vol. 54, No. 4, (2001).
14. Hemanth Kumar C, R.P. Swamy., "Fatigue life prediction of glass fiber reinforced epoxy composites using artificial neural networks", *Composites Communications*, Vol. 26, (2021).
15. ASTM D3039, Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials.

16. ASTM D3479, Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials.
17. Neil Kelly Wahl., "Spectrum fatigue lifetime and residual strength for fiberglass laminates", A dissertation submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Mechanical Engineering, Montana, (2001).
۱۸. نادیا نصرتی، "بررسی رفتار خزشی کامپوزیت اپوکسی/الیاف شیشه به کار رفته در ساخت پره توربین بادی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، (۱۳۹۶).
19. Kalyan Kumar Singh, Md. Touhid Alam Ansari, Md. Sikandar Azam., "Fatigue life and damage evolution in woven GFRP angle ply laminates", *International Journal of Fatigue*, Vol 142, (2021).
۲۰. مهران طغرای، "بررسی رفتار خستگی کامپوزیت زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف شیشه ساخته شده به دو روش لایه گذاری دستی و تزریق رزین به کمک خلاء (VIP)"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد (۱۳۹۳).
21. Wahid Ferdous, Allan Manalo, Joshua Peauril, Choman Salih, Kakarla Raghava Reddy, Peng Yu, Peter Schubel, Tom Heyer, "Testing and modelling the fatigue behavior of GFRP composites, Effect of stress level, stress concentration and frequency", *Engineering Science and Technology, an International Journal*, Vol. 23, No. 5, pp. 1223-1232, (2020).

