



Environmental conditions effect on mechanical properties and mode II fracture toughness of composite multilayers with woven fibers glass /vinyl ester

Hamidreza Rezaei Ashtiani ^{a*}, Fatemeh Jamshidi ^a, Mazaher Salamattalab ^a

^a Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Rezaei Ashtiani H R, Jamshidi F, Salamattalab M. Environmental conditions effect on mechanical properties and mode II fracture toughness of composite multilayers with woven fibers glass /vinyl ester. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023;3(3):380-397.

 <https://10.61186/masm.3.3.380>

KEYWORDS

Composite multilayers,
Woven fibers,
Mode II fracture,
Acidic-temperature
environment,
Viscous zone model.

ABSTRACT

Due to the effect of environmental conditions on the behavior of materials, in this research, the effect of acidic environment on the flexural modulus and fracture toughness of glass fiber/vinyl ester composite multilayers at different temperatures under second mode loading has been investigated. The samples were placed at 25°C and 80 °C for different periods of time in acidic environmental conditions. The experimental results show that different environmental conditions, especially at a temperature of 80 °C, have a significant effect on the behavior of composite samples. The load-displacement diagrams and fracture toughness of the samples have been investigated in different time intervals. The experimental results show that at the temperature of 25°C, the maximum load as well as the interlayer fracture toughness increases at the beginning and then decreases. Also, at around 80 °C, after 250 days, more than 50% of the fracture toughness value was observed. The scanning electron images (SEM) of the mechanisms of damage and crack growth over time showed that fiber breakage and separation of fibers from the resin occur at the fracture surface of the samples.

Extended Abstract

1. Introduction

Aging plays a crucial role in reinforced polymer composite materials throughout their service life and conducting accelerated aging, today. The main problem in aging is to predict the manner, time, and speed of defects as well as the conditions that can lead to defects. In addition, determines the average useful life of composite insulation. Polymer-based composites with woven fibers show good properties when they are exposed to environmental conditions such as temperature, humidity, and other factors, but when they are exposed to these factors for a long time, aging occurs. It can be seen on their surface that this issue may cause a drop in their mechanical properties [1]. The delamination phenomenon is the most frequent and dangerous failure mode for composite laminate materials and is one of the main reasons for failure in composite structures. One of the reasons for the criticality of this damage mode is the hiding of the delamination phenomenon between the composite layers. In case of shrinkage phenomenon, the stiffness of the composite structure will decrease significantly and the load-bearing capacity of the structure will also decrease significantly. There is a possibility of this phenomenon occurring at any moment of the structure's life for various reasons such as impact and temperature changes. As a result, the study of the delamination phenomenon in composite laminate is very important and has been studied by many researchers [2-5]. Almansour et al [6] studied three types of low-weight

* Corresponding author. Tel.: +98-9183636009

E-mail address: s.mazdak@tafreshu.ac.ir

DOI: <https://10.61186/masm.3.3.380>

Received: October 15, 2023; Received in revised form: November 28, 2023; Accepted: December 20, 2023

© Author



biocomposites. Their results showed that the initiation and growth fracture toughness in some wet composites decreases compared to dry composites, while the growth fracture toughness in some aged samples increases, and for the initiation fracture toughness, its value has decreased, and the reason for the reduction in the starting toughness is the high moisture absorption of a group of fibers, which has weakened the interfacial area between the fibers and the substrate. They showed that using basalt fibers as an external layer on a composite reinforced with flax is an effective method to increase mechanical properties, hammerability, interlayer fracture toughness, and moisture resistance. Koutsoks et al. [13] investigated the effect of immersing composite samples made with carbon fibers and glass and vinyl ester and polyester substrates in seawater. Their experimental results showed that the mechanical properties of the samples were completely reduced after being saturated in seawater due to factors such as damage between the fibers and the substrate.

By reviewing the studies, it was found that the effect of environmental conditions on the mode II fracture toughness of laminated composites with woven fibers has not been investigated much. To investigate the fracture toughness of mode II and the mechanisms of damage and crack growth of composite samples with woven fibers and vinyl ester resin with a layer of [0]₁₂ and [0]₂₄ porcelain and in different time intervals and temperatures in a sulfuric acid environment and distilled water has been placed, it has been discussed. Also, using the viscous zone model, the numerical simulation of crack growth has been performed and compared with the experimental results. Examining the results indicates a significant effect of environmental factors on the mechanical properties and failure of the composite part.

2. Experimental procedure and samples

The composite samples have been made of 200 grams of woven glass fibers and Hetron 922 vinyl ester resin. For preparation, three other components must be added to it, which include DMA, peroxide, and cobalt. The weight of the resin is equal to the weight of the number of fibers considered by placing them on top of each other. After 24 hours, when the parts were dried, they were placed in the oven at 60 °C for a week at room temperature and then for 4 hours to complete their baking. Laminates that had cracks were cut into 4 smaller samples with a width of 25 mm according to ASTM D790-3 standard for mode II fracture test. Then, according to the timing and temperature specified in Table 1, they were placed in 98% sulfuric acid with a weight percentage of 30%, and after the mentioned times, the samples were taken out of the sulfuric acid and washed. Figure 1 shows ENF samples in sulfuric acid solution. Table 1 shows the temperature and storage time of each ENF sample in experimental conditions (a mixture of distilled water and acid).

Table 1. Different samples of ENF with sample numbers in different environmental conditions.

Duration of exposure to test conditions (day)	Test temperature (°C)	Sample number
7	25	ENF1-2-3
308	25	ENF4
21	25	ENF5-6-7
308	25	ENF8
112	25	ENF9
112	25	ENF10
308	25	ENF11
308	25	ENF12
10	80	ENF13
10	80	ENF14
32	80	ENF15-17-18
52	80	ENF20
52	80	ENF21
52	80	ENF22
151	80	ENF19
151	80	ENF23
151	80	ENF24
246	80	ENF16
246	80	ENF25
		Reference sample
		ENF26
		Reference sample
		ENF27
		Reference sample
		ENF28

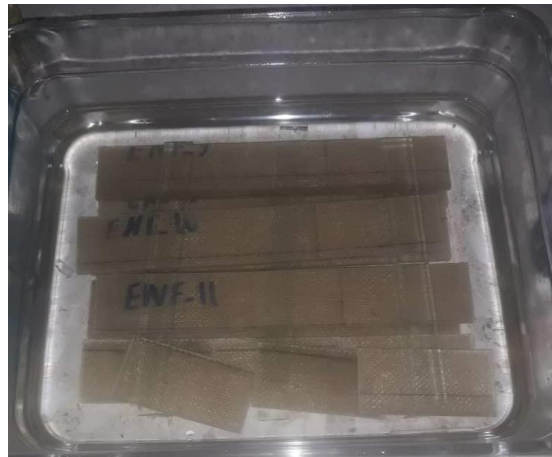


Figure 1. ENF samples in sulfuric acid solution.



Figure 2. Composite part during three-point bending test.

The interlayer fracture toughness (G_{II}) is obtained according to equation 1 based on the theory of fracture toughness, where m is the slope of the force-displacement diagram, P is the applied load, a_0 is the length of the crack, and b is the width of the piece [14]. Figure 2 shows the composite part during the three-point bending test.

3. Finite element modeling of delamination growth

In order to model the crack growth, the COH2D4 viscous zone element has been used, in which the elastic behavior is defined as contraction, and its nonlinear behavior is defined as the separation contraction law and stress damage method (Figure 3). delamination using two-dimensional adhesive elements COH2D has been used in the interface of delamination. Also, 10 elements are used in the thickness direction and 8 elements are used in the length direction for each millimeter. Boundary conditions according to the type of test are considered here as simple boundary conditions. For this purpose, the first and last nodes of the beam are given zero displacement in the vertical direction.

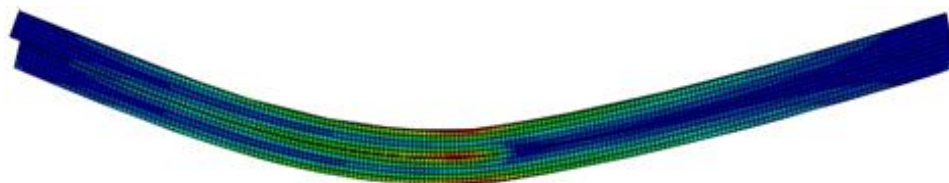


Figure 3. Crack growth modeling using the viscous zone element.

4. Results and discussion

The samples made in two periods of 7, 21, 110, and 308 days at a temperature of 25 degrees and 10, 32, 52, 151, and 246 days at a temperature of 80 degrees Celsius were subjected to acidic environmental conditions and after the failure of the mode II test, the load-displacement diagrams have been shown in Figure 4.

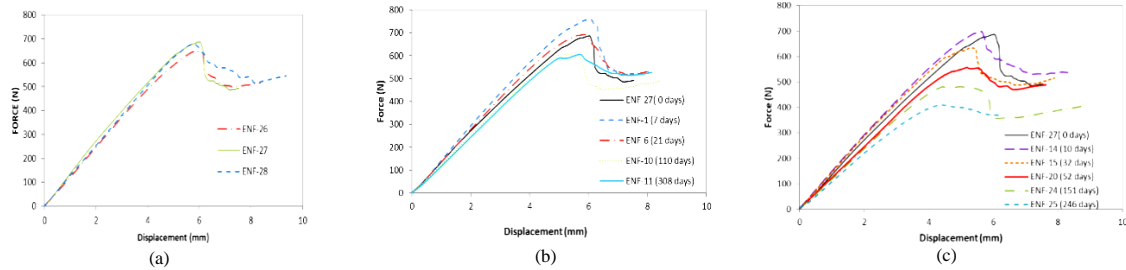


Figure 4. Load-displacement diagram for (a) reference parts and placed at (b) 25 and (c) 80°C temperatures.

In order to investigate the damage mechanisms, scanning electron microscope (SEM) images of the fracture surfaces of the samples were examined. Examining electron microscope images shows that fiber breakage and warping as well as resin loss occur over time, leading to increased wear and tear. Figure 5(a), photographed by electron microscopes for the reference sample, shows the resin showing the effects of the remaining fibers when the top of the crack is separated from the bottom of the crack. Figure 5(b) shows the microscopic image of a sample stored at 25°C for 21 days. This photo shows fibers that are not completely broken and the resin is separating.

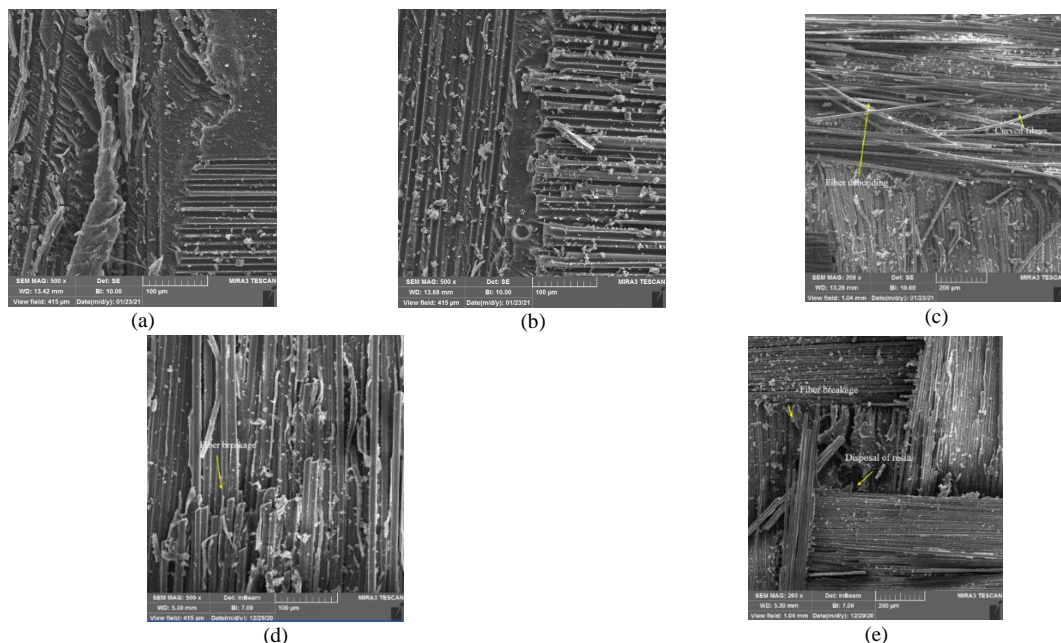


Figure 5. SEM images for samples; (a) reference, kept (b) 21 days at 25°C, (c) 308 days at 25°C, (d) and (e) 246 days at 80°C.

In Figure 6, the force-displacement diagrams for each group of similar composite specimens are presented. As can be seen, each of the experimental test samples in specific environmental conditions has been compared separately with numerical simulation. Here, the behavior of the simulated part is in good agreement with the experimental results of the parts, and the results show that the force graph is decreasing over time, and also the force tolerance decreases with increasing temperature.

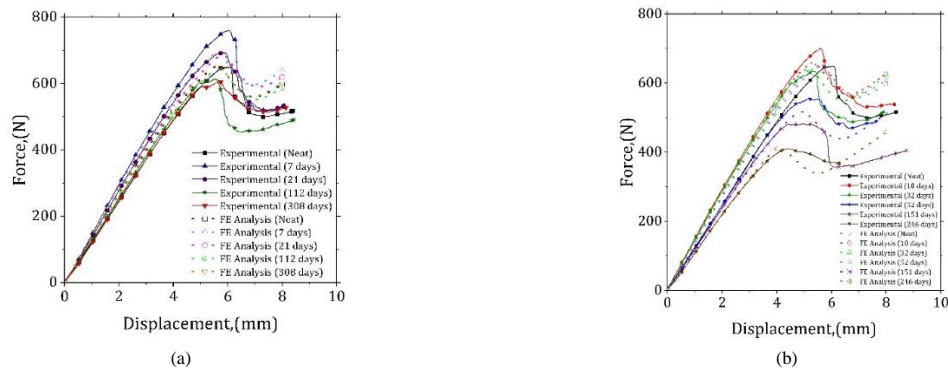


Figure 6. Comparison of experimental and numerical analysis results for aging temperature a) 25°C and b) 80 °C.

5. Conclusion

In this research, the effect of acidic environmental conditions with temperatures of 25 and 80 °C on the mode II fracture toughness of composite multilayers has been investigated. Some of the results of this research are as follows:

- At a temperature of 25 °C, the flexural modulus increases over time due to the penetration of water in the matrix and the increase in stiffness, but after 21 days, this trend becomes decreasing. At a temperature of 80 °C, the flexural modulus increases after 10 days, and after that, it drops sharply.
- The fracture toughness value of the sample at a temperature of 25 °C increases with time, but after 7 days, this trend becomes decreasing. At the temperature of 80 °C, with time, the fracture toughness decreased, and after 246 days, more than 50% drop in the toughness value was observed.
- The mechanisms of damage and crack growth, which were investigated by SEM, indicated the initiation and growth of cracks over time due to the failure of fibers and also the loss of connection between resin and fibers.



تأثیر شرایط محیطی بر خواص مکانیکی و چقرمگی شکست مود II چندلایه‌های کامپوزیتی با الیاف بافته‌شده شیشه/وینیل استر

حمیدرضا رضایی آشتیانی الف*، فاطمه جمشیدی ب، مظاهر سلامت طلب ج

الف دانشیار، گروه جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، hr_rezaei@arakut.ac.ir

ب کارشناس ارشد، گروه جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، ghazal7090@yahoo.com

ج استادیار، گروه جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، salamattalab@arakut.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

به دلیل اهمیت تأثیر شرایط محیطی بر رفتار مواد مهندسی، در این پژوهش به بررسی تأثیر محیط اسیدی در دماهای مختلف بر مدول خمشی و چقرمگی شکست چندلایه کامپوزیتی از جنس الیاف شیشه/وینیل استر تحت بارگذاری مود II پرداخته شده است. نمونه‌ها در دماهای ۲۵ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد برای بازه زمانی مختلف در شرایط محیطی اسیدی قرار گرفتند. نمودارهای بار-جابجایی و چقرمگی شکست نمونه‌ها در بازه‌های زمانی مختلف بررسی شد. نتایج آزمایشگاهی نشان از اثرات قابل توجه شرایط محیطی مختلف به‌ویژه در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد بر رفتار تورقی نمونه‌های کامپوزیتی دارد. نتایج آزمایشگاهی نشان داد که در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد بیشینه بار و همین‌طور چقرمگی شکست بین لایه‌های در ابتدا روندی افزایشی داشته و پس از آن روندی کاهش‌ی به خود می‌گیرد. همچنین در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد بعد از گذشت ۲۵۰ روز بیش از ۵۰ درصد در مقدار چقرمگی شکست مشاهده گردید. علاوه بر این به منظور شبیه‌سازی رشد تورق از مدل ناحیه چسبناک استفاده و با نتایج تجربی مقایسه گردید که از دقت قابل قبولی برخوردار بود. تصاویر الکترون روبشی مکانیزم‌های آسیب و رشد ترک را در خلال زمان، نشان داد که در سطح شکست نمونه‌ها شکست الیاف و جدایش الیاف از رزین رخ می‌دهد.

چندلایه کامپوزیتی، الیاف بافته‌شده، مود II شکست، محیط اسیدی-دمایی، مدل ناحیه چسبناک.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۷/۲۳

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۰۹/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۹

۱- مقدمه

پیرشدگی (فرسودگی) امروزه از مسائل اساسی در مواد کامپوزیتی است. موضوع اصلی در پیرشدگی عبارت است از پیش‌بینی چگونگی، زمان و سرعت رخ دادن نقص و همچنین شرایطی است که می‌تواند منجر به ایجاد نقص شود و علاوه بر این، تعیین میانگین عمر مفید برای عایق کامپوزیتی است. کامپوزیت‌های پایه پلیمری با الیاف بافته شده زمانی که در معرض شرایط محیطی مانند دما، رطوبت و عوامل دیگر قرار می‌گیرند خواص خوبی از خود نشان می‌دهند اما زمانی که برای مدت طولانی در معرض این عوامل قرار می‌گیرند، پدیده پیرشدگی بر سطح آن‌ها مشاهده می‌شود که این مسئله ممکن است باعث افت خواص مکانیکی آنها شود [۱]. تورق از شایع‌ترین مدهای تخریب در مواد مرکب لایه‌ای بوده و از دلایل اصلی شکست در سازه‌های کامپوزیتی می‌باشد. پنهان بودن پدیده تورق در بین لایه‌های کامپوزیت، یکی از دلایل بحرانی بودن این مود آسیب می‌باشد. در صورت بروز

پدیده تورق، سفتی سازه کامپوزیتی کاهش شدیدی داشته و قابلیت تحمل بار سازه نیز افت محسوسی خواهد داشت. امکان بروز این پدیده در هر لحظه از عمر سازه به دلایل مختلفی همچون ضربه و تغییرات دمایی وجود دارد. در نتیجه مطالعه پدیده تورق در چندلایه‌های کامپوزیتی از اهمیت بسزایی برخوردار است که توسط محققانی زیادی مورد بررسی قرار گرفته است [۲-۵].

المنصور و همکاران [۶] سه نوع بیوکامپوزیت با وزن کم را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آن‌ها نشان داد که چقرمگی شکست شروع و رشد در بعضی از کامپوزیت‌های خیس در مقایسه با کامپوزیت‌های خشک کاهش می‌یابد، در صورتی که مقدار چقرمگی شکست رشد در بعضی از نمونه‌های پیر شده، افزایش و برای چقرمگی شکست شروع، مقدار آن کاهش یافته است که علت کاهش در چقرمگی شروع، جذب بالای رطوبت گروهی از الیاف بوده که باعث تضعیف ناحیه بین وجهی الیاف و زمینه شده است. آن‌ها نشان دادند که به کارگیری الیاف بازالت به صورت لایه خارجی بر روی کامپوزیت تقویت‌شده با کتان، یک روش مؤثر برای افزایش خواص مکانیکی، چکش‌خواری، چقرمگی شکست بین لایه‌ای و مقاومت به رطوبت محسوب می‌شود.

نش و همکاران [۷] برگشت‌پذیری چقرمگی شکست بین لایه‌ای بعد از پیرشدگی رطوبتی-حرارتی در آب یون زدوده و با دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد را مورد بررسی قرار دادند که در فصل مشترک تورق، یک لایه رزین گرمانرم به کار رفته است. نتایج بررسی آن‌ها حاکی از آن است که موم‌سان شدن زمینه، به‌عنوان یک پدیده بازگشت‌پذیر می‌باشد در صورتی که آسیب بازگشت‌ناپذیر در زمینه رخ داده است. به‌کارگیری یک ورق نازک بین لایه‌های گرمانرم باعث می‌شود تا بعضی از آثار مضر ناشی از محیط رطوبتی-حرارتی کاهش یابد. السی و همکاران [۸] به بررسی اثر پیرشدگی نمونه‌های کامپوزیتی با الیاف تک‌جهته کربن غوطه‌ور در آب مقطر و در دماهای ۳۰ و ۷۰ درجه سانتی‌گراد به مدت ۴ و ۸ هفته پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در طول زمان، مقدار چقرمگی شکست رشد تغییری نمی‌کند. همچنین از تصاویر به‌دست‌آمده به‌وسیله میکروسکوپ مشخص می‌گردد که در نمونه‌های که در معرض دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد بوده‌اند، به دلیل ترد شدن رزین در این دما، جدایش الیاف از رزین رخ داده است. سیدا و همکاران [۹] به بررسی اثر پیرشدگی تحت شرایط رطوبتی در نمونه‌های کامپوزیتی با الیاف بافته‌شده پرداختند. آن‌ها از الیاف با دو بافت متفاوت و دو رزین اپوکسی مختلف تحت مودهای بارگذاری متفاوت و در دمای ۷۰ درجه سانتی‌گراد استفاده کردند. نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن بود که نرخ رهایی انرژی کرنشی تا میزان یک‌سوم مقدار اولیه کاهش می‌یابد. همچنین بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان داد که بعضی از نمونه‌های کامپوزیتی به دلیل مناسب نبودن رزین به‌کاررفته در ساخت آن‌ها دچار تضعیف الیاف شده‌اند. سلزر و همکاران [۱۰] اثر جذب آب بر شکست بین لایه‌ای در نمونه‌های کامپوزیتی با الیاف تک‌جهته کربن و در دماهای ۲۳، ۷۰ و ۱۰۰ درجه سانتی‌گراد را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بررسی آن‌ها نشان داد که نرخ رهایی انرژی کرنشی در نمونه‌هایی که اشباع‌شده‌اند، نسبت به نمونه‌های خشک بیشتر است. همچنین با بررسی نمونه‌های نیمه اشباع مشخص شد با توجه به اینکه سطح نمونه دارای رطوبت است و مرکز آن خشک می‌باشد، رفتار رشد ترک در مرکز آن، مشابه خشک می‌باشد. امینی و همکاران [۱۱] خواص مکانیکی و الکتریکی کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با الیاف شیشه تک‌جهته غوطه‌ور در آب مقطر را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها گزارش کردند که تغییر در میزان رطوبت تأثیر ویژه‌ای بر خصوصیات مکانیکی و الکتریکی ماده کامپوزیتی دارد و سبب کاهش مدول کششی و استحکام کششی می‌شود. رشد ترک و رفتار مکانیکی نمونه‌های کامپوزیت/چسب تیر با شکاف انتهایی ENF و تیر دو لبه یکسر گیردار در محیط‌های شیمیایی مختلف توسط چنگ و همکاران بررسی شد. همچنین آن‌ها با استفاده از مدل ناحیه چسبناک، شروع و رشد ترک را شبیه‌سازی عددی کردند [۱۲]. کوتسوکس و همکاران [۱۳] اثر غوطه‌وری نمونه‌های کامپوزیتی ساخته‌شده با الیاف‌های کربن و شیشه و دو زمینه وینیل استر^۱ و پلی‌استر^۲ در آب دریا را مورد بررسی قرار دادند. نتایج آزمایشگاهی حاکی از آن است که خواص مکانیکی نمونه‌ها بعد از اشباع در آب دریا به صورت کامل به دلیل عواملی نظیر آسیب در بین الیاف و زمینه، کاهش می‌یابد.

با بررسی مطالعات انجام‌شده مشخص شد که اثر شرایط محیطی بر چقرمگی شکست مود II چندلایه‌های کامپوزیتی با الیاف بافته‌شده چندان مورد بررسی قرار نگرفته است. لذا در این پژوهش به بررسی چقرمگی شکست مود II و مکانیزم‌های آسیب و رشد ترک نمونه‌های کامپوزیتی با الیاف بافته‌شده و رزین وینیل استر که با لایه چینی‌های [۰]۲۴ و [۰]۱۲ و در بازه‌های زمانی و دماهای مختلف در محیط اسیدسولفوریک و آب مقطر قرار گرفته‌اند، پرداخته شده است. همچنین با استفاده از مدل ناحیه

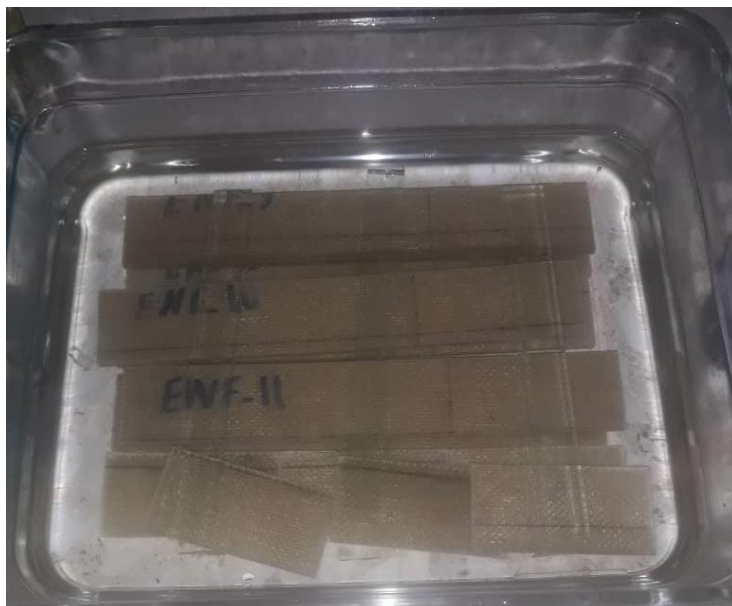
¹ Vinyl ester

² Polyester

چسبناک، شبیه‌سازی عددی رشد ترک صورت گرفته و با نتایج تجربی مقایسه شده است. بررسی نتایج حاکی از تأثیر قابل ملاحظه عوامل محیطی بر خواص مکانیکی و شکست قطعه کامپوزیتی می‌باشد.

۲- ساخت نمونه و آزمایش تجربی

نمونه‌های کامپوزیتی ساخته‌شده از الیاف شیشه بافته‌شده ۲۰۰ گرمی و رزین وینیل استر هترون ۹۲۲^۳ می‌باشند که برای آماده‌سازی، باید سه جز دیگر به آن اضافه کرد که شامل DMA^۴، پروکساید^۵ و کبالت^۶ می‌باشد، میزان وزن رزین برابر با وزن تعداد الیاف‌هایی روی هم قرار گرفته، در نظر گرفته شده است. کبالت به میزان ۱ درصد وزنی رزین وینیل استر، پروکساید به مقدار ۱/۲ درصد وزنی رزین و DMA نیز به مقدار ۰/۰۶ درصد وزنی استفاده شده است. در نهایت تعداد ۷ لمینت ۲۴ لایه با لایه چینی‌های ۲۴ [۰] و ۳ لمینت ۱۲ لایه با لایه چینی ۱۲ [۰] ساخته شد. نماد "۰" نشان داده‌شده در نمایش لایه‌ها به مفهوم استفاده از لایه بافته‌شده ۰/۹۰ می‌باشد. بعد از ۲۴ ساعت که قطعات ساخته‌شده خشک شدند، به مدت یک هفته در دمای محیط و بعد از آن به مدت ۴ ساعت داخل آون^۷ با دمای ۶۰ درجه سانتی‌گراد قرار گرفتند تا پخت آن‌ها کامل شود. لمینت‌هایی که دارای ترک بودند هر کدام به ۴ نمونه کوچک‌تر با عرض ۲۵ میلی‌متر با توجه به استاندارد ASTM D790-3 جهت تست شکست مود II برش داده شدند. سپس طبق زمان‌بندی و دمای مشخص‌شده در جدول ۱ در اسیدسولفوریک ۹۸٪ با درصد وزنی ۳۰ درصد قرار گرفتند و بعد از اتمام زمان‌های مذکور نمونه‌ها از اسیدسولفوریک بیرون آورده شدند و عمل شست‌وشو آن‌ها انجام گرفت و بعد از خشک شدن، تحت تست مود II شکست قرار گرفتند. در شکل ۱ نمونه‌های ENF در محلول اسیدسولفوریک نشان داده شده است.



شکل ۱ نمونه‌های ENF در محلول اسیدسولفوریک.

جدول ۱ مقدار دما و مدت‌زمان نگهداری هر کدام از نمونه‌های ENF در شرایط آزمایشگاهی (ترکیب آب مقطر و اسید) را نشان می‌دهد.

جدول ۱ نمونه‌های مختلف ENF با شماره نمونه در شرایط مختلف محیطی

^۳ Hetron 922 vinyl ester resin

^۴ Dimethylaniline

^۵ Peroxide

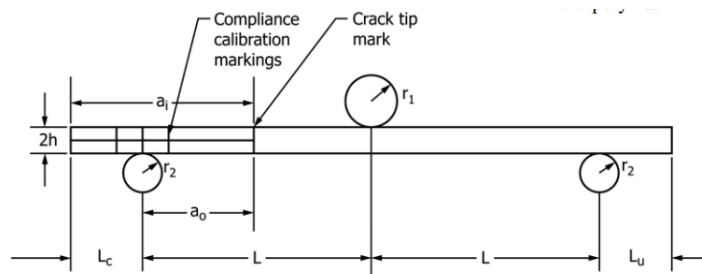
^۶ Cobalt

^۷ Oven

شماره نمونه	دمای آزمایش (درجه سانتی‌گراد)	مدت‌زمان قرارگیری در شرایط آزمایش (روز)
ENF1-2-3	۲۵	۷
ENF4	۲۵	۳۰.۸
ENF5-6-7	۲۵	۲۱
ENF8	۲۵	۳۰.۸
ENF9	۲۵	۱۱۲
ENF10	۲۵	۱۱۲
ENF11	۲۵	۳۰.۸
ENF12	۲۵	۳۰.۸
ENF13	۸۰	۱۰
ENF14	۸۰	۱۰
ENF15-17-18	۸۰	۳۲
ENF20	۸۰	۵۲
ENF21	۸۰	۵۲
ENF22	۸۰	۵۲
ENF19	۸۰	۱۵۱
ENF23	۸۰	۱۵۱
ENF24	۸۰	۱۵۱
ENF16	۸۰	۲۴۶
ENF25	۸۰	۲۴۶
ENF26	نمونه مرجع	
ENF27	نمونه مرجع	
ENF28	نمونه مرجع	

چقرمگی شکست بین لایه‌های (GII) طبق رابطه ۱ بر اساس تئوری چقرمگی شکست به دست می‌آید که در آن m شیب نمودار نیرو-جابجایی، P بار اعمال‌شده، a_0 طول ترک و b عرض قطعه می‌باشد [۱۴]. در شکل ۲ پارامترهای رابطه ۱ بر اساس استاندارد ASTM D790-5 که جهت انجام آزمایش خمش سه نقطه‌ای کامپوزیت‌ها دارای ترک می‌باشد، نشان داده شده است. مطابق با استاندارد ASTM D7905 تکیه گاه‌ها از جنس فولاد با سفتی بالا و بدون اصطکاک می‌باشد. از منظر شرایط مرزی، تکیه گاه با شرایط مرزی ساده^۸ می‌باشد. همچنین بار در وسط دهانه تیر و با استفاده از یک رولر فولادی به قطر ۵ میلی‌متر استفاده شده است. شکل ۳ قطعه کامپوزیتی در حین آزمایش خمش سه نقطه‌ای را نشان می‌دهد.

$$GII = \frac{3 \times m \times P^2 \times a_0^2}{2 \times b} \quad (1)$$



شکل ۲ شماتیک و پارامترهای هندسی نمونه کامپوزیتی ENF [۱۰].

آزمون خمش سه نقطه مطابق با استاندارد ASTM D790 صورت گرفته است. مطابق با این استاندارد به منظور محاسبه مدول خمشی E_f از رابطه‌ی زیر استفاده گردیده است.

⁸ Simply Supported Beam

$$E_f = \frac{L^3 k}{4bd^3} \quad (2)$$

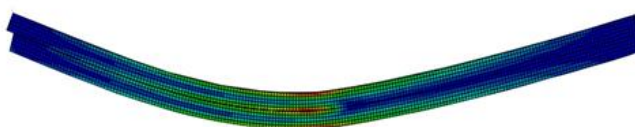
که در رابطه بالا d ضخامت تیر تحت خمش و k نیز بیانگر شیب بخش خطی در نمودار بار-جابجایی می‌باشد.



شکل ۳ قطعه کامپوزیتی در حین آزمایش خمش سه نقطه‌ای.

۳- مدل سازی المان محدود رشد تورق

به منظور مدل سازی رشد ترک از المان ناحیه چسبناک COH2D4 استفاده شده است که در آن رفتار الاستیک به صورت انقباضی و رفتار غیرخطی آن به صورت قانون انقباض جداسازی و به روش آسیب تنشی تعریف می‌شود (شکل ۴). تورق با استفاده از المان‌های چسبنده دوبعدی COH2D در فصل مشترک تورق استفاده شده است. همچنین در راستای ضخامت از ۱۰ المان استفاده شده و در راستای طولی به ازای هر میلیمتر از ۸ المان استفاده گردیده است. شرایط مرزی با توجه به نوع تست، در اینجا نیز به صورت شرط مرزی ساده در نظر گرفته شده است. بدین منظور دو نود ابتدا و انتهای تیر، جابه جایی صفر در راستای قائم داده شده است. همچنین به منظور جلوگیری حرکت نمونه در راستای افقی، جابجایی یکی از دو نود گفته شده در راستای افقی صفر می‌گردد. به نود فوقانی تیر در وسط دهانه تیر جابه‌جایی اعمال می‌گردد. رابطه ساختاری برای المان‌های چسبنده مورد استفاده، به صورت دوخطی می‌باشد. مقدار ماکزیم تنش برشی بیشینه ۲۵ مگاپاسکال و شیب ناحیه الاستیک در مدل دوخطی ۱۰۱۳ نیوتن بر متر مکعب در نظر گرفته شده است.

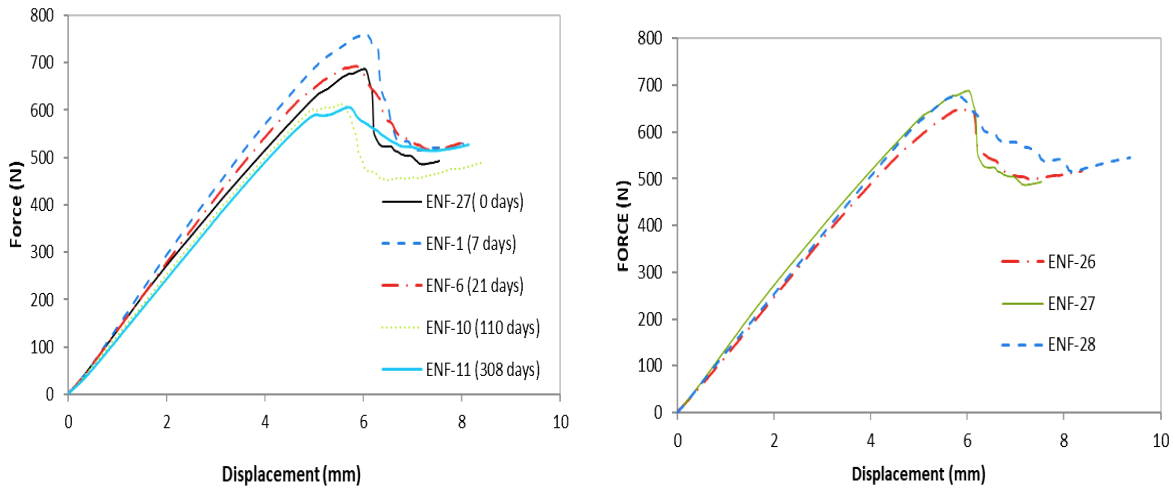


شکل ۴ مدل سازی رشد ترک با استفاده از المان ناحیه چسبناک.

۴- نتایج و بحث

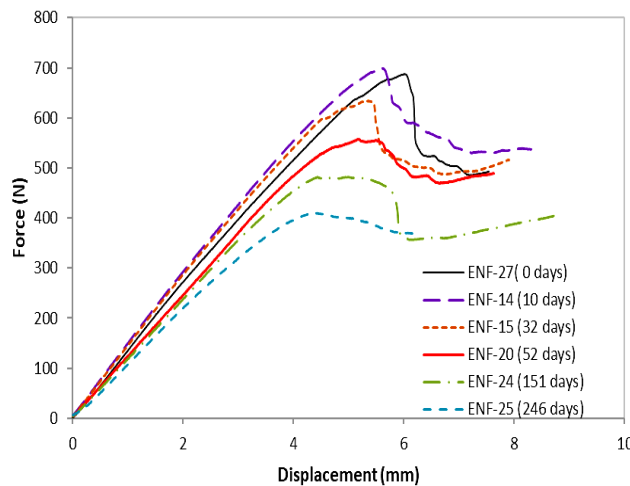
نمونه‌های ساخته‌شده در دو بازه زمانی ۷، ۲۱، ۱۱۰ و ۳۰۸ روز در دمای ۲۵ درجه و ۱۰، ۳۲، ۵۲، ۱۵۱ و ۲۴۶ روز در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد تحت شرایط محیطی اسیدی قرار گرفتند و پس از انجام آزمون مود II شکست، نمودارهای بار-جابجایی آن‌ها مطابق شکل ۵ نشان داده شده است. در حالت کلی منحنی بار-جابجایی برای تمامی نمونه‌ها روند مشابهی طی کرده است. در ابتدا منحنی به صورت خطی است و در این بخش هنوز ترک شروع به رشد نکرده است. بعد از ناحیه اولیه، تورق شروع شده و منحنی روند غیرخطی خواهد یافت که این روند با رشد ترک تا رسیدن به مقدار بیشینه بار ادامه پیدا می‌کند. در ادامه به دلیل رشد ترک، کاهش سفتی نمونه و افزایش نیافتن طول ناحیه فرایند شکست، روندی نزولی در منحنی مشاهده می‌شود. شکل ۵ (الف) نمودار بار-جابجایی برای نمونه‌های مرجع را نشان می‌دهد. با توجه به شکل ۵ (ب) با قرار گرفتن نمونه‌ها در دمای ۲۵

درجه سانتی‌گراد در ابتدای آزمون شیب نمودار مقداری مشخصی دارد که با گذشت زمان شیب نمودار روند کاهشی را به خود می‌گیرد. در شکل ۵ (ج) نمودار بار-جابجایی در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد مشاهده می‌شود. با توجه به نمودارها با گذشت زمان افت شدید شیب نمودار بار-جابجایی نمونه‌ها به وجود می‌آید که نسبت به دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد این میزان افت کاملاً واضح و شدید می‌باشد. همچنین مقدار مدول خمشی با گذشت زمان روند کاهشی به خود می‌گیرد که حاکی از اهمیت بالای مقدار دما آزمایش در این آزمون می‌باشد.



(ب)

(الف)



(ج)

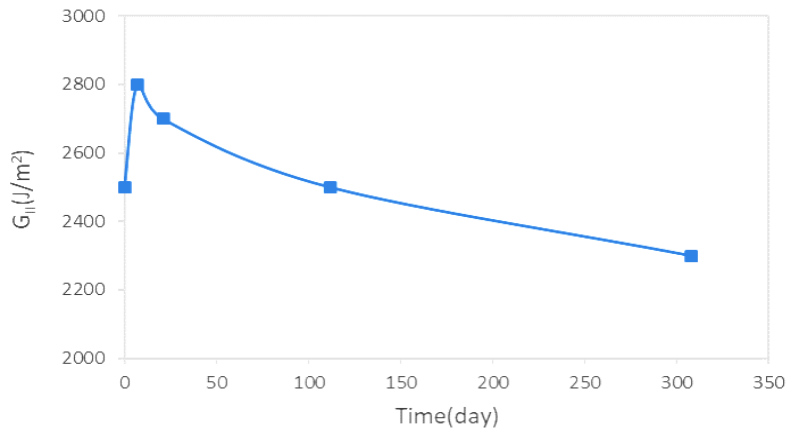
شکل ۵ نمودار بار-جابجایی برای قطعات (الف) مرجع و در قرار گرفته در دماهای (ب) ۲۵ و (ج) ۸۰ درجه سانتی‌گراد.

شکل ۶ (الف) و جدول ۲ مقدار چقرمگی شکست مود (GII) را برای نمونه‌های قرار گرفته در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد در بازه‌های زمانی ذکر شده نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهند که مقدار چقرمگی شکست تا روز ۲۱ ابتدا مقداری افزایش و سپس روندی کاهشی را طی کرده است. بهبود چقرمگی شکست در ابتدای اعمال شرایط محیطی، را می‌توان ناشی از پر شدن حفره‌ها با مولکول‌های محلول آزمون دانست که باعث یکپارچگی بهتر و کم‌عیبی بیشتر ماده شوند یا این تغییرات می‌تواند ناشی از جذب آب توسط حفره‌ها باشد که در ادامه آب می‌تواند به‌عنوان یک موم‌سان کننده عمل کند یا گروه هیدروکسیل^۹ در مولکول آب می‌تواند با الیاف و رزین پیوند برقرار کرده و در برابر جدایی لایه‌ها مقاومت کند و مقدار بار مورد نیاز شکست را افزایش دهد و در ادامه به دلیل تخریب بین وجهی، افت چقرمگی شکست مشاهده می‌شود.

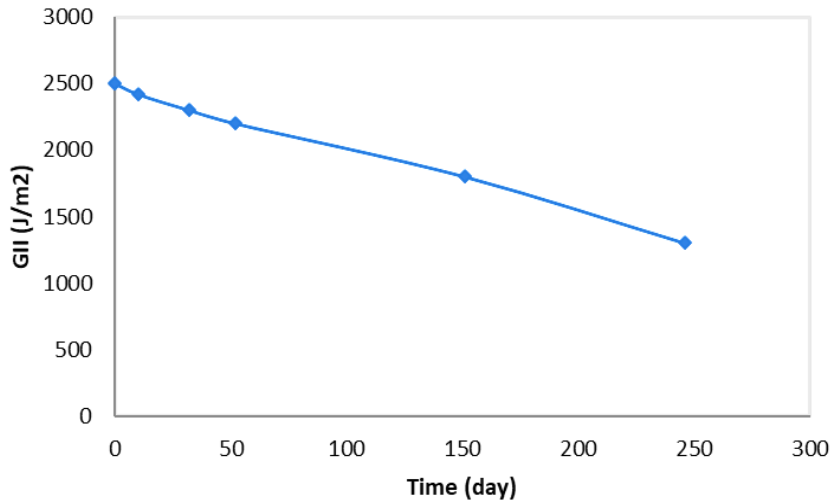
شکل ۶- (ب) و جدول ۳ مقدار چقرمگی شکست مود (GII) نمونه‌ها قرار گرفته در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در بازه‌های

^۹ Hydroxyl

زمانی ذکر شده را نشان می‌دهند. نتایج نشان می‌دهند که چقرمگی شکست با گذشت زمان نگهداری نمونه در این دما و محیط اسیدی روندی کاهشی را طی کرده است. در واقع به دلیل تخریب بین وجهی و بالا بودن دمای کاری، افت چقرمگی شکست مود II در مقایسه با نمونه‌های قرار گرفته در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد به صورت کاملاً محسوسی زیادتر می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۶ چقرمگی شکست GII نمونه‌ها در محیط اسیدی و دماهای (الف) ۲۵ و (ب) ۸۰ درجه سانتی‌گراد.

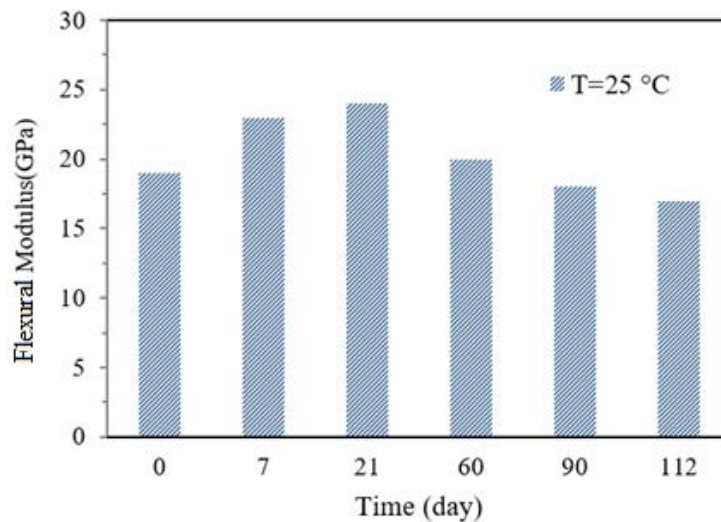
جدول ۲ مقادیر بار در نقطه غیرخطی شدن و تغییرات چقرمگی شکست نمونه ENF در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.

تغییرات چقرمگی شکست نسبت به حالت اولیه (%)	چقرمگی شکست (J/m ²)	بار بحرانی در ناحیه غیرخطی شدن (N)	زمان اعمال شرایط محیطی (روز)
۰	۲۵۰۰	۶۰۰	۰
۱۸	۲۹۵۰	۵۶۰	۷
۸	۲۷۰۰	۵۳۰	۲۱
۰	۲۵۰۰	۴۸۰	۱۱۲
-۶	۲۳۵۰	۴۵۰	۳۰۸

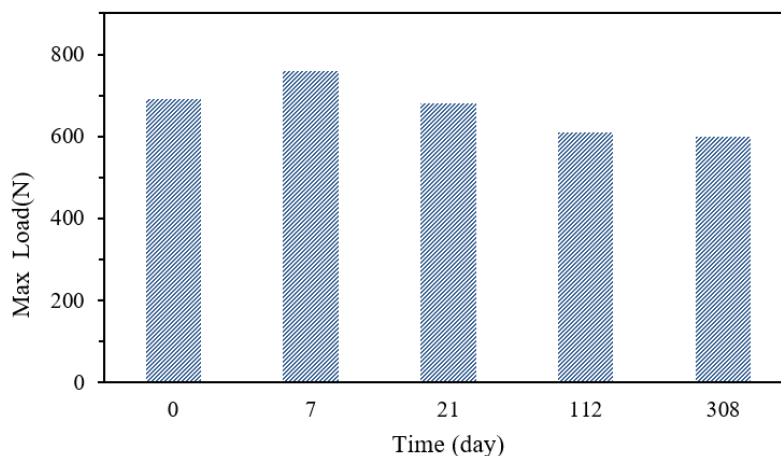
جدول ۳ مقادیر بار در نقطه غیرخطی شدن و تغییرات چقرمگی شکست نمونه ENF در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد

تغییرات چقرمگی شکست نسبت به حالت اولیه (%)	چقرمگی شکست رشد (J/m^2)	بار بحرانی در ناحیه غیرخطی شدن (N)	زمان اعمال شرایط محیطی (روز)
۰	۲۵۰۰	۶۰۰	۰
-۳/۲	۲۴۲۰	۵۵۰	۱۰
-۸	۲۳۰۰	۵۰۰	۳۲
-۱۲	۲۲۰۰	۴۱۰	۵۲
-۲۸	۱۸۰۰	۳۸۰	۱۵۱
-۴۸	۱۳۰۰	۲۷۰	۲۴۶

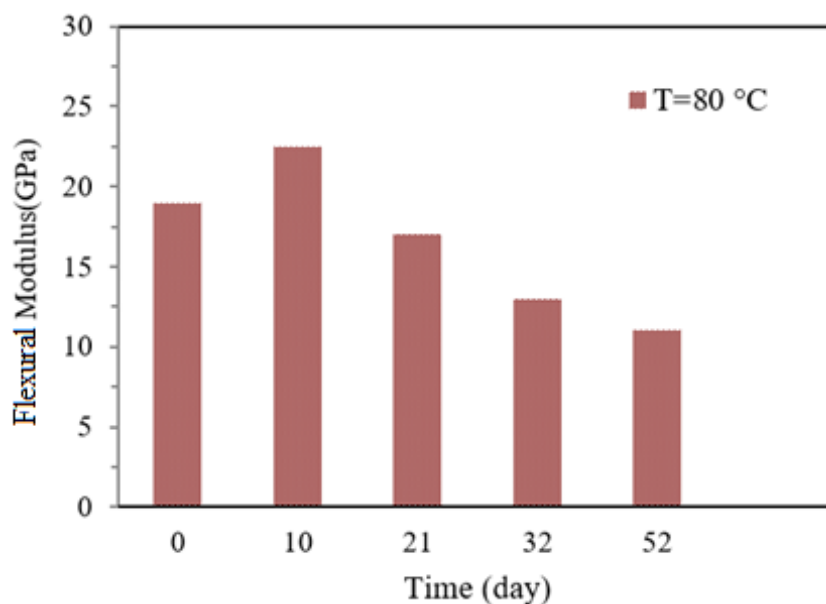
با توجه به شکل‌های ۷ تا ۱۰ که نمودارهای مدول خمشی و نیروی بیشینه مورد نیاز برای شکست نمونه‌ها را نشان می‌دهند، مشخص می‌باشد که مدول خمشی در ابتدا مقداری افزایش یافته و این افزایش اندک در ادامه نیز مشاهده می‌شود و بعد از آن در هفته سوم مقداری کاهش یافته که از مقدار قبل از اعمال شرایط محیط اسیدی، کمتر می‌باشد و در روزهای پایانی نیز این کاهش مدول خمشی ادامه می‌یابد. در واقع بهبود مدول خمشی در ابتدای اعمال شرایط محیطی، همان‌طور که در مورد چقرمگی شکست بیان شد، می‌تواند ناشی از پر شدن حفره‌های نمونه و یکپارچه شدن آن‌ها و افزایش مقاومت و خواص مکانیکی لایه‌ها شود.



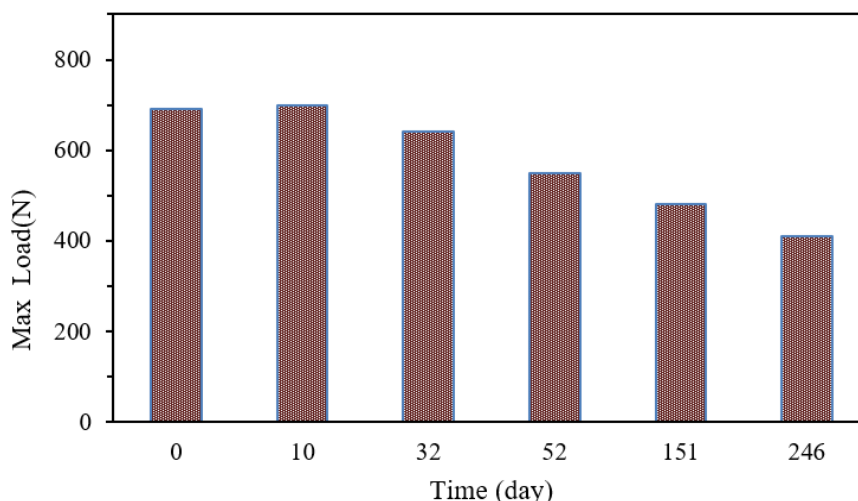
شکل ۷ بررسی اثر گذشت زمان بر مدول یانگ در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.



شکل ۸ بررسی اثر گذشت زمان بر بیشینه نیرو در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد.



شکل ۹ بررسی اثر گذشت زمان بر مدول یانگ در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد.

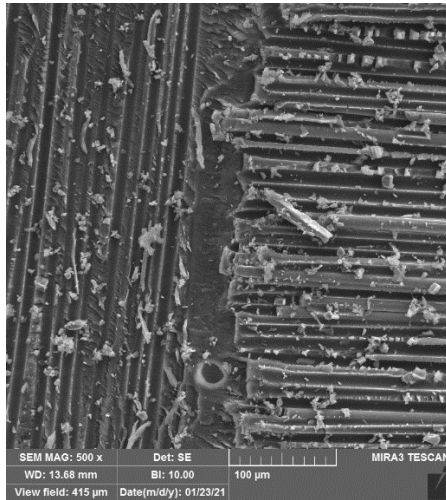


شکل ۱۰ بررسی اثر گذشت زمان بر بیشینه نیرو در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد.

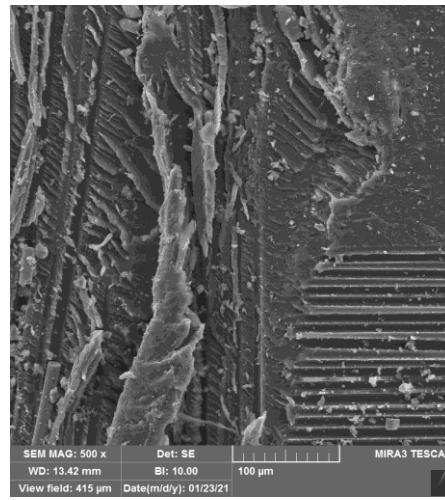
به منظور بررسی مکانیزم‌های آسیب، تصاویر میکروسکوپ‌های الکترون روبشی (SEM) از سطوح شکست نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بررسی تصاویر میکروسکوپ الکترونی نشان می‌دهند که شکست الیاف و تابیدگی آن‌ها و همین‌طور از بین رفتن رزین با گذشت زمان رخ می‌دهد و این امر افزایش فرسودگی را به همراه دارد. شکل ۱۱- (الف)، که برای نمونه مرجع توسط میکروسکوپ‌های الکترونی عکس‌برداری شده است نشان‌دهنده رزین می‌باشد که با جدا شدن قسمت بالای ترک از پایین ترک، اثرات الیاف در آن باقیمانده است.

شکل ۱۱- (ب) تصویر میکروسکوپی نمونه‌ای که به مدت ۲۱ روز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته را نشان می‌دهد. این عکس الیافی را نشان می‌دهد که به‌طور کامل شکسته نشده‌اند و رزین در حال جدایش است.

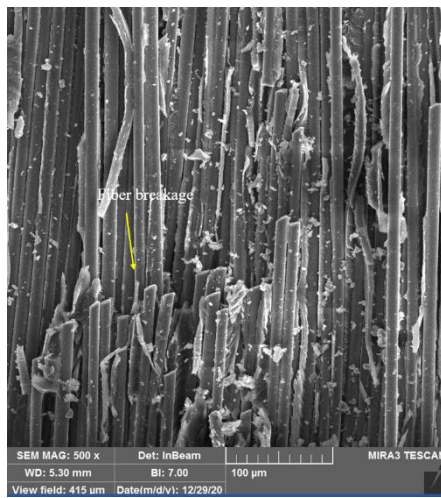
شکل ۱۱- (ج) نشان می‌دهد که در مورد نمونه‌ای که به مدت ۳۰۸ روز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد قرار گرفته است میزان شکستگی رزین بسیار بیشتر بوده و تا حدودی از بین رفته است و الیاف‌ها دچار آسیب‌دیدگی شدید و تابیدگی هستند. با توجه به تصاویر شکل‌های ۱۰- (د) و (ه) برای نمونه با زمان ۲۴۶ روز در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد مشخص است که الیاف دچار شکستگی، آسیب و جابجایی شده است و رزین هم خرد شده و از بین رفته است.



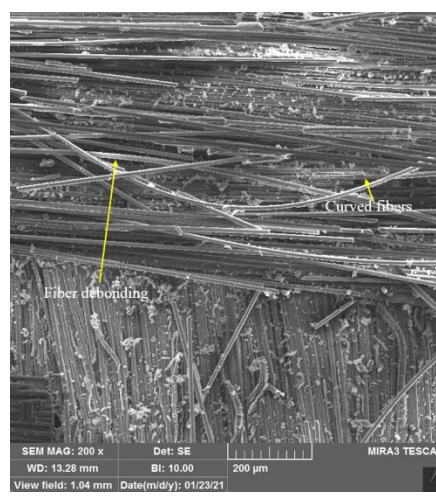
(ب)



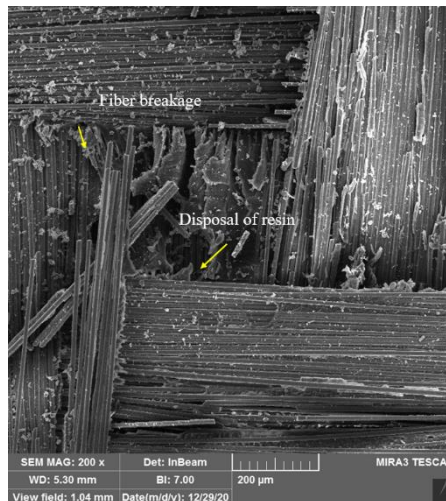
(الف)



(د)



(ج)

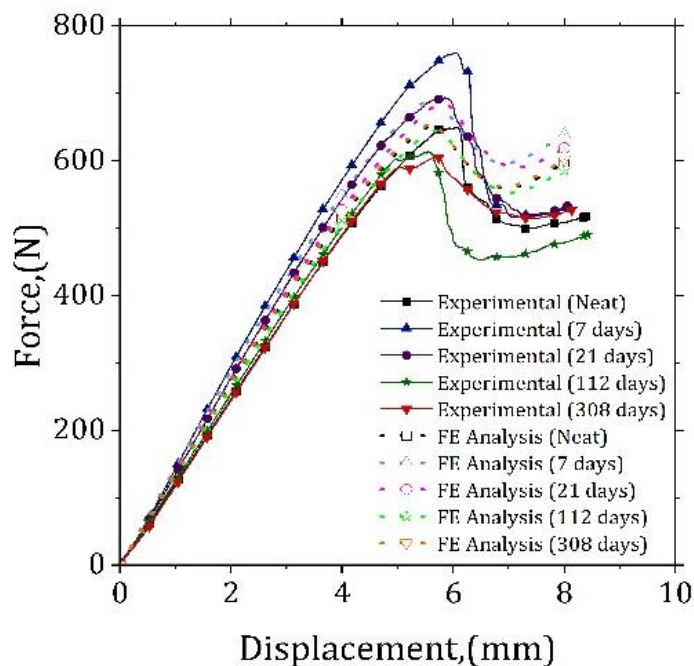


(ه)

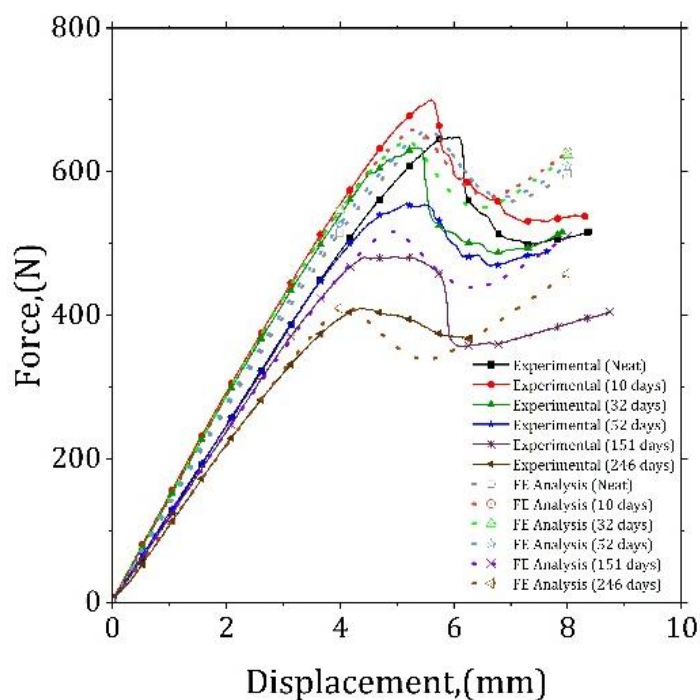
شکل ۱۱ تصاویر SEM برای نمونه‌های: (الف) مرجع، نگه‌داشته شده (ب) ۲۱ روز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، (ج) ۳۰۸ روز در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، (د) و (ه) ۲۴۶ روز در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد.

در شکل ۱۲ نمودارهای نیرو-جابجایی برای هر دسته از نمونه‌های کامپوزیتی مشابه ارائه شده است همان‌طور که ملاحظه می‌شود، هر کدام از نمونه‌های آزمایش تجربی در شرایط محیطی مشخص به‌صورت جداگانه با شبیه‌سازی عددی مقایسه شده‌اند. در اینجا رفتار قطعه شبیه‌سازی شده تطابق خوبی با نتایج تجربی قطعات داشته و نتایج حاصل بیانگر نزولی بودن نمودار نیرو در

طی گذشت زمان می‌باشد و همچنین با افزایش دما، میزان کاهش تحمل نیروها تشدید می‌شود.



(الف)



(ب)

شکل ۱۲ مقایسه‌ی نتایج تحلیل تجربی و عددی برای دماهای پیرشدگی الف) ۲۵ و ب) ۸۰ درجه‌ی سانتی‌گراد

با توجه به نتایج مقایسه نمودارهای بار-جابجایی عددی و تجربی، مشخص است که نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی با تخمین دقیقی نتایج کاملاً نزدیک با آزمون‌های تجربی را ارائه می‌کند که حاکی از مدل‌سازی مناسب و تحلیل عددی دقیق فرایند می‌باشد. این روند برای تمامی نمونه‌هایی که مورد آزمایش قرار گرفته است قابل مشاهده است. همان‌طور که در نمودارهای

فوق مشاهده می‌شود شیب منحنی‌های نیرو-جابجایی با گذشت زمان و اعمال شرایط محیطی در حال تغییر است.

۵- نتیجه‌گیری

در این پژوهش تأثیر شرایط محیطی اسیدی با دماهای ۲۵ و ۸۰ درجه سانتی‌گراد بر چقرمگی شکست مود II چندلایه‌های کامپوزیتی بررسی شده است. برای ساخت نمونه‌های آزمایشگاهی از الیاف شیشه بافته‌شده ۲۰۰ گرمی و رزین وینل استر هترون ۹۲۲ استفاده شد. نتایج بررسی نشان داد:

- در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد، مدول خمشی با گذشت زمان به دلیل نفوذ آب در ماتریس و افزایش سفتی، افزایش می‌یابد اما بعد از گذشت ۲۱ روز این روند به صورت کاهشی در می‌آید. در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد بعد از ۱۰ روز افزایش مدول خمشی و پس از آن افت شدیدی پیدا می‌کند.

- مقدار چقرمگی شکست نمونه در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گراد با گذشت زمان، به دلیل نفوذ مولکول‌های محلول به داخل زمینه که منجر به پر شدن حفره‌های آن می‌شود، افزایش می‌یابد اما بعد از گذشت ۷ روز این روند به صورت کاهشی در می‌آید و در دمای ۸۰ درجه با گذشت زمان چقرمگی شکست روند کاهشی داشته و بعد از ۲۴۶ روز بیش از ۵۰ درصد افت در مقدار چقرمگی مشاهده گردید.

- مکانیزم‌های آسیب و رشد ترک که توسط تصاویر الکترون روبشی مورد بررسی قرار گرفت، حاکی از شروع و رشد ترک در طی زمان به دلیل شکست الیاف و همین‌طور از بین رفتن اتصال بین رزین و الیاف بود.

Authorship Contribution Statement

Dr. Hamidreza Rezaei
Ashtiani



Biography: Associate Professor of Mechanical Engineering at Arak University of Technology.

Contribution Statement: Conceptualization, Supervision, Project administration, Investigation, Writing – original draft, Writing – review & editing.

Fatemeh Jamshidi

Biography: MSc in mechanical engineering, Arak University of Technology.

Contribution Statement: Methodology, Investigation, Resources, Writing – original draft.

(Dr. Mazaher
Salamattalab)



Biography: Assistant Professor of Mechanical Engineering at Arak University of Technology.

Contribution Statement: Methodology, Validation, Formal analysis
Writing – review & editing.

۶- مراجع

- [1] Tian W, Hodgkin J. Long-term aging in a commercial aerospace composite sample: Chemical and physical changes. *Journal of Applied Polymer Science*. 2010; 115(5):2981-5.
- [2] Akhavan-Safar A, Salamat-Talab M, Delzendehrooy F, Zeinolabedin-Beygi A, da Silva LF. Effects of natural date palm tree fibres on mode II fracture energy of E-glass/epoxy plain-woven laminated composites. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2022; 44(10):457.
- [3] Sabaghi M, Taheri-Behrooz F, Salamat-Talab M. Critical strain energy release rate of woven carbon/epoxy composites subjected to thermal cyclic loading. *Polymer Composites*. 2022; 43(9):6135-49.
- [4] Zeinolabedin Beygi A, Salamat-talab M, Farrokhhabadi A, Moslemi Naeini H. Experimental investigation of the effect of natural microfibers on the mode I fracture toughness of plain-woven laminated composites. *Modares Mechanical Engineering*. 2022; 10;22(2):71-9.
- [5] Salamat-talab M, Zeinolabedin Beygi A, Seyyednejad M. Experimental investigation of the effect of interface fiber angle on the fracture toughness of woven laminated composites under mode II loading. *Modares Mechanical Engineering*. 2021:225-33.
- [6] Almansour F, Dhakal H, Zhang ZY. Effect of water absorption on Mode I interlaminar fracture toughness of flax/basalt reinforced vinyl ester hybrid composites, *Composite structures*. 2017;168, 813-825.
- [7] Nash N, Young T, Stanley W. The reversibility of Mode-I and-II interlaminar fracture toughness after hydrothermal aging of Carbon/Benzoxazine composites with a thermoplastic toughening interlayer, *Composite Structures*. 2016;152 :558-567.
- [8] Alessi S, Pitarresi G, Spadaro G. Effect of hydrothermal ageing on the thermal and delamination fracture behaviour of CFRP composites, *Composites Part B: Engineering*. 2014; 67:145-153.
- [9] Scida D, Aboura Z, Benzeggagh M. The effect of ageing on the damage events in woven-fibre composite materials under different loading conditions, *Composites Science and Technology*. 2002; 62:551-557.
- [10] Selzer R, Friedrich K. Influence of water up-take on interlaminar fracture properties of carbon fibre-reinforced polymer composites, *Journal of materials science*. 1995; 30:334-338.
- [11] Amini M, Khavandi A. Evaluation of the water absorption content effect on the dielectric properties and tensile strength of polymer composites, *Journal of Science and Technology of Composites*. 2019; 6:300-309.
- [12] Cheng X., Q. Zhang, J. Zhang, X. Guo, Z. Niu, Parameters prediction of cohesive zone model for simulating composite/adhesive delamination in hygrothermal environments, *Composites Part B: Engineering*. 2019; 166: 710-721.
- [13] Kootsookos A, Mouritz A. Seawater durability of glass-and carbon-polymer composites, *Composites Science and Technology*. 2004; 64:1503-1511.
- [14] ASTM D7905, Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites.