Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 4) (2021) 625-628
DOI: 10.22060/mej.2020.18241.6778

Sensitivity analysis of fracture behavior in carbon-epoxy composite at different displacement rates under mode I tensile loading by regression analysis

M. Azadi[1,*], M. Saeedi[1], M. Mokhtarishirazabad[2], P. Lopez-Crespo[2]

[1] Faculty of Mechanical Engineering, Semnan University, Semnan, Iran
[2] Department of Civil and Materials Engineering, University of Malaga, Malaga, Spain

ABSTRACT: In this article, the sensitivity analysis of the displacement rate effect under tensile loading on the crack growth behavior in the carbon-epoxy composite has been investigated. For this objective, the tensile test was performed on double cantilever beam samples, according to the ASTM-D5528 standard under displacement-controlled loading and under displacement rates of 0.05, 0.5, 5 and 50 mm/min. Then, the regression analysis was done on outputs of experimental data by the Minitab software. For this objective, the sensitivity analysis was performed on three fracture characteristics of composite specimens. These fracture mechanics parameters were the critical energy release rate (with three different fracture energy methods), the maximum failure force and the initial crack tip opening displacement by the use of the digital image correlation technique. Results showed that the variation of the displacement rate affected the maximum failure force and the energy release rate and therefore, these values were sensitive to changes in the displacement rate. However, the maximum value of the initial crack tip opening displacement of the composite was dependent on the logarithmic displacement rate under tensile loading. Finally, the changing trend of fracture mechanics characteristics in the composite was increasing by increasing the displacement rate.

Review History:

Received: Apr, 09, 2020
Revised: Aug. 01, 2020
Accepted: Oct. 25, 2020
Available Online: Nov. 04, 2020

Keywords:

Sensitivity analysis
Fracture behavior
Carbon-epoxy composite
Displacement rate
Regression analysis

1- Introduction

Today, fiber-reinforced polymer composites are increasingly used in aircraft and spacecraft structures due to their high rigidity and strength and also due to their relatively low density [1]. Therefore, identifying the failure behavior of materials is one of the most important issues for designers and engineers. Since the structure may be under different loading rates, in such conditions, different damage mechanisms occur, especially in structures made of composites [2].

Rajan et al. [3] investigated the effect of the loading rate on the fracture behavior and the relationship of the tension-separation law using a double-edged head beam sample in the control mode and the first mode, under loading rates of 0.03, 0.3, 3 mm/min. Their results showed that values of tensile-separation parameters, such as the maximum viscous stress and the strain energy release rate were highly dependent on different loading rates and were known as a function of the loading rate. Thorson et al. [4] studied the fracture behavior in a composite sample of a double-edged beam under different quasi-static loading rates, using the modified wedge method. They performed this test under load rates of 0.01 to 3600 mm/s, using the ASTM-D5528 standard. They observed that the failure behavior at higher rates was different from that at lower rates.

2- Methodology

The studied material was a composite with a total thickness of about 5.3 mm. The dimension of the standard test sample was 125×25 mm. Such specimens were considered based on the ASTM-D5528 standard [5], entitled Double Cantilever Beam (DCB) samples. Fig. 1 shows the image of the DCB specimen, including the schematic image and the prepared geometry. Therefore, all fracture toughness experiments were performed under the cross-head displacement-control condition and the loading rate of 0.05, 0.5, 5 and 50 mm/min. Fig. 2 depicts the DCB sample under tensile loading for mode I.

As suggested in the ASTM-D5528 standard, three data reduction methods could be utilized to determine fracture properties, including the energy release rate and its critical value. These approaches are the Modified Beam Theory (MBT), the Compliance Calibration method (CC) and the Modified Compliance Calibration method (MCC). The modified fracture toughness was calculated in mode I, as follows [5], where P and δ are the load and the load line deflection.

$$G_{IC} = \frac{3p_c\delta_c}{2b\left(\left|a+\Delta\right|\right)} \tag{1}$$

Compliance specimen values in this CC method were written as follows, where n is the slope of the curve of log c versus log a [5]:

$$G_{IC} = \frac{n\,p_c\delta_c}{2b\,a} \tag{2}$$

*Corresponding author's email: m_azadi@semnan.ac.ir

Copyrights for this article are retained by the author(s) with publishing rights granted to Amirkabir University Press. The content of this article is subject to the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY-NC 4.0) License. For more information, please visit https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode.

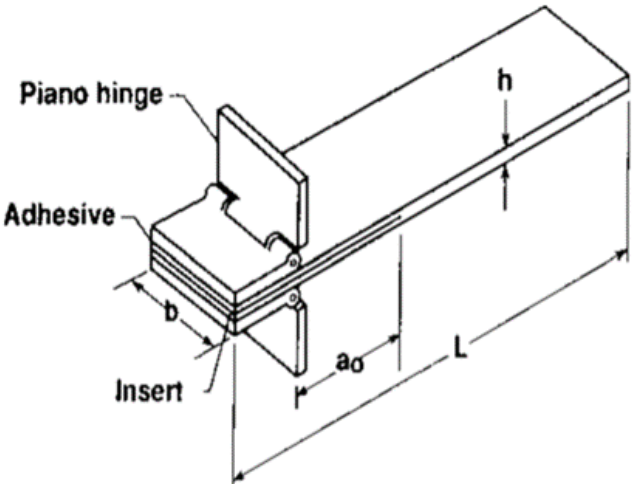


Fig. 1. Schematic of the geometry of double cantilever beam specimens [5]

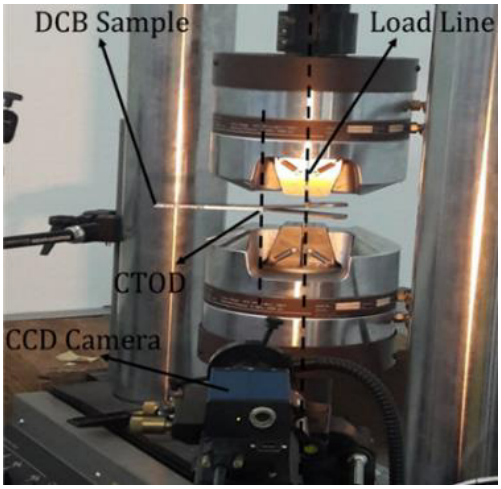


Fig. 2. The device for tensile testing on DCB samples

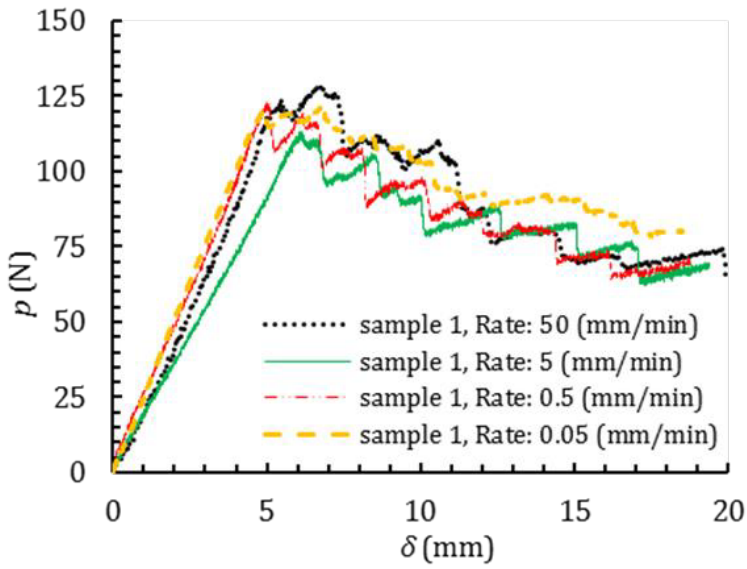


Fig. 3. The force-displacement curve under different displacement rates

Then, the fracture toughness for the MCC method was obtained, as follows [5]:

$$G_{IC} = \frac{3P_c^2 c^{2/3}}{2A_1 b H} \tag{3}$$

To determine the effect of the displacement rate change on each of data obtained from the tensile test (the maximum fracture force, the strain energy release rate and the maximum initial crack opening displacement), the sensitivity analysis could be used by the regression analysis. Test outputs were statistically analyzed in the Minitab software [6].

3- Results and Discussion

Obtained results including force-displacement curves are shown in Fig. 3. It should be noted that the displacement was measured through the load line. It was found that the increase in the loading rate had no significant effect on the maximum force. Of course, this result was a qualitative conclusion and to confirm this conclusion and more accurate analysis, the sensitivity analysis was performed using the regression analysis by the Minitab software. Fig. 3 also shows that curves were linear in the initial stage of the test and were then followed by a nonlinear behavior for the displacement, larger than 5 mm. All specimens exhibited a zigzag shape extension, beyond 5 mm. Due to the loading condition, which was the displacement-controlled state, loading caused the crack to grow in a constant displacement. In addition, the maximum amount of force under low loading rates was much lower than that under high loading rates, which was also shown in the literature [3]. The reason for this observation could be the very low speed of loading, which caused a change in the fracture behavior of the material. Loading at very low speeds also changed the effect of the joint length on the fracture toughness [4].

Table. 1. Results of the regression analysis for the objective function of the maximum force

Parameters	F-Value	P-Value
Regression analysis of the first model	99.04	0.000
First power of the displacement rate	10.97	0.030
Second power of the displacement rate	6.36	0.067
Third power of the displacement rate	5.81	0.074
Coefficient of determination	$R^2 = 98.67$ %	

Table 1 shows the results of the sensitivity analysis, obtained for the maximum force. According to the results of Table 1, the P-value for the displacement rate was less than 0.05 and also the value of R^2 was 98.67%, which indicated that the regression analysis was meaningful and correct. Moreover, according to the P-Value in Table 1, it could be said that the change in the displacement rate affected the maximum failure force. In other words, the maximum failure force was sensitive to changes in the displacement rate.

4- Conclusions

In this research, the sensitivity analysis of the fracture behavior in the carbon-epoxy composite was done under different displacement rates and mode I tensile loading by the regression analysis. Obtained results could be listed as follows,

· Based on the third-degree regression model of the displacement rate, the sensitivity analysis showed that displacement rate changes affected the maximum fracture force, due to the tensile test on composite specimens.

· The amount of the strain energy release rate in the carbon-epoxy composite, with all three failure methods (including MBT, CC and MCC approaches), based on the third-degree regression model, was sensitive to the loading rate.

· The maximum amount of the initial crack opening displacement in the composite, based on the regression logarithmic model, was sensitive to the logarithmic displacement rate, under tensile loading.

References

[1] A. Brunner, Fracture mechanics characterization of polymer composites for aerospace applications, in: Polymer composites in the aerospace industry, Elsevier, 2015, pp. 191-230.

[2] M. Azadi, H. Sayar, A. Ghasemi-Ghalebahman, S.M. Jafari, Tensile loading rate effect on mechanical properties and failure mechanisms in open-hole carbon fiber reinforced polymer composites by acoustic emission approach, Composites Part B: Engineering, 158 (2019) 448-458.

[3] S. Rajan, M.A. Sutton, R. Fuerte, A. Kidane, Traction-separation relationship for polymer-modified bitumen under Mode I loading: Double cantilever beam experiment with stereo digital image correlation, Engineering Fracture Mechanics, 187 (2018) 404-421.

[4] S.I. Thorsson, A.M. Waas, J. Schaefer, B. Justusson, S. Liguore, Effects of elevated loading rates on mode I fracture of composite laminates using a modified wedge-insert fracture method, Composites Science and Technology, 156 (2018) 39-47.

[5] A. AC09036782, Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites, ASTM Internat., 2007.

[6] M. Azadi, M. Iziy, A. Marbout, M. Azadi, A. Hajiali Mohammadi, Optimization of solution temperature and time in nickel-based super-alloy of engine turbo-charger based on hardness by design of experiments, The Journal of Engine Research, 43(43) (2016) 63-70.

HOW TO CITE THIS ARTICLE

M. Azadi, M. Saeedi, M. Mokhtarishirazabad, P. Lopez-Crespo, Sensitivity analysis of fracture behavior in carbon-epoxy composite at different displacement rates under mode I tensile loading by regression analysis, Amirkabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 4) (2021) 625-628.

DOI: 10.22060/mej.2020.18241.6778

This page intentionally left blank

نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر

نشریه مهندسی مکانیک، دوره ۵۳، شماره ویژه ۴، سال ۱۴۰۰، صفحات ۲۶۷۱ تا ۲۶۸۶
DOI: 10.22060/mej.2020.18241.6778

تحلیل حساسیت رفتار شکست در کامپوزیت کربن- اپوکسی در نرخ‌های جابجایی مختلف تحت بارگذاری مود اول کششی با آنالیز رگرسیون

محمد آزادی[1*]، مصطفی سعیدی[1]، مهدی مختاری شیرازآباد[2]، پابلو لوپز-کرسپو[2]

۱- دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
۲- دانشکده مهندسی مواد و عمران، دانشگاه مالاگا، مالاگا، اسپانیا

خلاصه: در این مقاله، تحلیل حساسیت تاثیر نرخ جابجایی در بارگذاری مود اول کششی بر روی رفتار شکست، در کامپوزیت کربن- اپوکسی، مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور، آزمایش کشش براساس استاندارد ASTM-D5528 بر روی نمونه‌های تیر یکسر گیردار دو لبه و تحت بار اعمالی بصورت جابجایی- کنترل و با نرخ‌های جابجایی ۰/۰۵، ۰/۵، ۵ و ۵۰ میلیمتر بر دقیقه انجام شد. برای پارامترهای استخراج‌شده از داده‌های تجربی، آنالیز رگرسیون با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب، انجام گردید. تحلیل حساسیت نرخ جابجایی و لگاریتم مقدار آن در بارگذاری کششی، بر سه مشخصه شکست در نمونه‌های تیر یکسر گیردار دو لبه کامپوزیتی، بررسی شد. این پارامترهای مکانیک شکست شامل نرخ رهایی انرژی کرنشی (با سه روش انرژی شکست)، ماکزیمم نیروی شکست و ماکزیمم جابجایی دهانه ترک اولیه (با تکنیک پردازش تصویر دیجیتال) بود. نتایج نشان می‌دهد که تغییرات نرخ جابجایی، براساس تابع درجه سوم از نرخ جابجایی، بر ماکزیمم نیروی شکست و نرخ رهایی انرژی کرنشی، تاثیرگذار می‌باشد و این مقادیر به تغییرات نرخ جابجایی، حساس می‌باشند. اما مقدار جابجایی ماکزیمم دهانه ترک اولیه در کامپوزیت، به لگاریتم نرخ جابجایی در بارگذاری کششی، وابسته است. در نهایت، الگوی تغییراتی مشخصه‌های مکانیک شکست کامپوزیت، بصورت افزایشی با افزایش نرخ جابجایی بود.

تاریخچه داوری:
دریافت: ۱۳۹۹/۰۱/۲۱
بازنگری: ۱۳۹۹/۰۵/۱۱
پذیرش: ۱۳۹۹/۰۸/۰۴
ارائه آنلاین: ۱۳۹۹/۰۸/۱۴

کلمات کلیدی:
تحلیل حساسیت
رفتار شکست
کامپوزیت کربن- اپوکسی
نرخ جابجایی
آنالیز رگرسیون.

۱- مقدمه

عوامل اصلی شکست در اکثر سازه‌های مکانیکی را می‌توان به مواردی مانند میزان استحکام ماده در برابر شکست که به میزان توانایی ماده به منظور تحمل بارهای وارده در حضور یک ترک گفته می‌شود و همچنین به طول ترک موجود در قطعه که در اثر بی‌احتیاطی در ساخت قطعه به وجود آمده است، اشاره کرد. لذا شناسایی رفتار شکست مواد یکی از مهمترین مسائل برای طراحان و مهندسان می‌باشد. با توجه به اینکه ممکن است سازه تحت نرخ‌های مختلف بارگذاری باشد، در چنین شرایطی مکانیزم‌های آسیب مختلفی، بخصوص در سازه‌های ساخته‌شده از کامپوزیت، اتفاق می‌افتد [۱, ۲].

امروزه کامپوزیت‌های پلیمری تقویت‌شده با فیبر، بر اساس سفتی و استحکام بالای آنها و همچنین به دلیل چگالی نسبتا کم آنها، بطور فزاینده‌ای در هواپیما و ساختار فضاپیما استفاده می‌شوند[۳]. با توجه به اهمیت سازه‌های فوق، شناسایی ترک در حین کارکرد قطعه می‌تواند اهمیت داشته باشد. یکی از روش‌های تشخیص طول ترک در حین کارکرد، تکنیک پردازش تصویر دیجیتال[1] است که می‌توان مقادیر ماکزیمم جابجایی دهانه ترک اولیه[2] محاسبه نمود. در این زمینه، مطالعاتی انجام گرفته است که در ادامه، به برخی از آنها، با لحاظ‌نمودن بررسی اثر نرخ بارگذاری، پرداخته می‌شود.

راجان و همکاران[3] [۴] به بررسی اثر نرخ بارگذاری بر روی رفتار شکست و روابط قانون کشش- جدایش با استفاده از نمونه تیر یکسر گیردار دو لبه[4] و در حالت جابجایی کنترل و مود اول و در نرخ‌های بارگذاری ۰/۰۳، ۰/۳، ۳ mm/min پرداخته‌اند. آنها همچنین

1 Digital Image Correlation (DIC)
2 Initial Crack Tip Opening Displacement (ICTOD)
3 Rajan
4 Double Cantilever Beam (DCB)

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: m_azadi@semnan.ac.ir

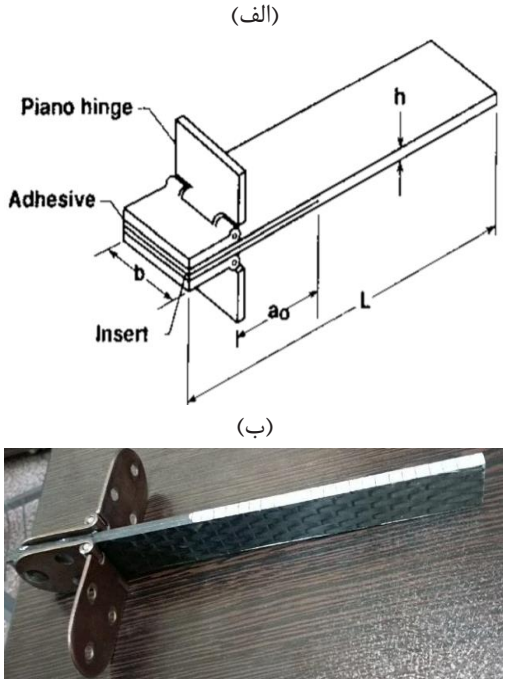
حقوق مؤلفین به نویسندگان و حقوق ناشر به انتشارات دانشگاه امیرکبیر داده شده است. این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس، از آدرس https://www.creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمائید.

میدان جابجایی در نوک ترک را با استفاده از تکنیک پردازش تصویر دیجیتال، بدست آورده‌اند. نتایج آنها نشان داد که مقادیر پارامترهای کشش- جدایش همانند (ماکزیمم تنش چسبناک[1]، نرخ رهایی انرژی کرنشی[2] و میزان جابجایی[3]) به نرخ بارگذاری مختلف بسیار وابسته می‌باشند و به عنوان تابعی از نرخ بارگذاری شناخته می‌شوند. برمبلی و همکاران[4] [۵] به بررسی رفتار شکست نمونه کامپوزیتی[5] تحت نرخ های بارگذاری مختلف پرداخته‌اند. آنها آزمون را در حالت شبه استاتیکی و بصورت بارگذاری خمشی (مود دوم) و در نرخ‌های ۱ الی ۶۰۰۰ mm/min انجام داده‌اند. آنها همچنین از تکنیک پردازش تصویر دیجیتال برای اندازه‌گیری انتشار طول ترک در حین آزمایش نیز استفاده کرده‌اند. آنها مشاهده کرده‌اند که با افزایش نرخ بارگذاری، نرخ رهایی انرژی کرنشی در حالت خمشی (مود دوم) نیز تمایل به افزایش یافتن دارد. متیو و همکاران[6] [۶] به بررسی پارامترهای حاکم بر رشد ترک با استفاده از تکنیک پردازش تصویر دیجیتال پرداخته‌اند. آنها نمونه تیتانیومی را تحت بار خستگی قرار داده و نتایج بدست‌آمده از روش تجربی را با نتایج حاصل از تکنیک پردازش تصویر دیجیتال مقایسه کرده‌اند. مختاری شیرازآباد و همکاران [۷] به مطالعه تاثیر شرایط آزمایشگاهی بر روی داده‌های استخراج‌شده با استفاده از تکنیک پردازش تصویر دیجیتال (فاکتور شدت تنش[7]، بازشدگی دهانه ترک و اطلاعات نوک ترک) پرداخته‌اند.

تورسون و همکاران[8] [۸] با استفاده از روش گوه اصلاح‌شده، رفتار شکست را در نمونه کامپوزیتی تیر یکسر گیردار دو لبه در حالت نرخ بارگذاری مختلف و شبه استاتیکی بررسی کرده‌اند. آنها این آزمون را در نرخ‌های بارگذاری ۰/۰۱ الی ۳۶۰۰ mm/s و با استفاده از استاندارد ASTM-D5528 انجام داده‌اند. آنها مشاهده کرده‌اند که رفتار شکست در نرخ‌های بالاتر در مقایسه بار نرخ‌های پایین‌تر، متفاوت بوده است. همچنین با افزایش نرخ بارگذاری، اثر طول پل‌زدن[9] بر روی چقرمگی شکست کاهش قابل ملاحظه‌ای پیدا می‌کند. لیو و همکاران[10] [۹] به بررسی اثر نرخ بارگذاری مختلف بر روی رفتار شکست نمونه کامپوزیتی یکسر گیردار دو لبه پرداخته‌اند. برای انجام آزمایش، نمونه را در دو حالت بارگذاری شبه استاتیکی و دینامیکی در نرخ بارگذاری ۱۰ الی ۳۰ m/s و با استفاده از دستگاه الکترومغناطیس هاپکینسون مورد بررسی قرار داده‌اند. آنها مشاهده کرده‌اند که چقرمگی شکست در ابتدا ثابت باقی می‌ماند و هنگامی که نرخ بارگذاری از مقدار نهایی خود افزایش پیدا می‌کند، چقرمگی شکست نیز افزایش پیدا می‌کند. روژک و همکارانش[11] [۱۰] به بررسی اثر فرکانس بارگذاری مختلف بر روی رفتار خستگی و تغییرات دما با استفاده از نمونه کامپوزیتی پلی فنیلن سولفید تقویت‌شده با فیبر کربن پرداخته‌اند. آنها این ازمایش را تحت فرکانس بارگذاری ۰/۵ الی ۱۵ Hz انجام داده‌اند. آنها به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش فرکانس بارگذاری، درجه حرارت نیز افزایش چشمگیری پیدا می‌کند و با افزایش حرارت تا دمای ۷۵ درجه سانتیگراد و بیشتر، عمر خستگی کاهش قابل توجهی پیدا می‌کند. نظری و همکاران[12] [۱۱] تاثیر سرعت بارگذاری بر روی استحکام نمونه کامپوزیتی، تحت بارگذاری دینامیکی بررسی کرده‌اند. سرعت بارگذاری ۲، ۸، ۱۶ و ۳۲ mm/min بوده است. نتایج آنها نشان داد که با افزایش سرعت بارگذاری، قدرت تحمل نمونه افزایش می‌یابد و همچنین احتمال خرابی نمونه‌ها کاهش می‌یابد.

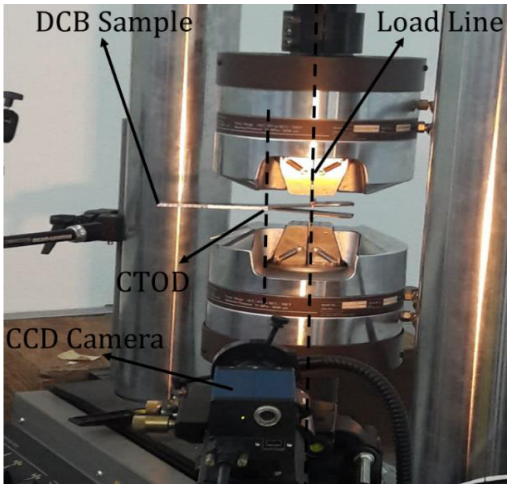
ژانگ و همکاران[13] [۱۲] به بررسی وابستگی رفتار مکانیکی (کششی) به نرخ بارگذاری مختلف با استفاده از نمونه کامپوزیتی نانولوله کربنی[14]پرداخته‌اند. آنها این آزمون را در نرخ بارگذاری ۰/۰۵ الی ۴۰ mm/min و در حالتی بارگذاری دینامیکی انجام داده‌اند. آنها به این نتیجه رسیده‌اند که با افزایش نرخ بارگذاری، استحکام کششی نمونه نیز افزایش قابل توجهی می‌یابد. قاسمی و همکاران [۱۳] به بررسی و دسته‌بندی خرابی‌های سازه‌های کامپوزیتی با استفاده از نمونه کامپوزیتی چند لایه سوراخدار و با روش انتشار صوت و تحت بار کششی پرداخته‌اند. آنها به این نتیجه رسیده‌اند که حدود ۵۰ درصد از خرابی‌ها مربوط به جدایش الیاف از ماتریس بوده، حدود ۳۰ درصد از ترک ماتریسی ناشی شده و حدود ۲۰ درصد در ارتباط با شکست الیاف می‌باشد. علی‌زاده و همکاران [۱۴] به بررسی و شناسایی انواع سازوکارهای خرابی در نمونه‌های کامپوزیتی چند لایه سوراخ دار با

1 Pick Cohesive Stress
2 Energy Release Rate
3 Opening Displacement
4 Brambleby
5 End Notched Flexure
6 Mathieu
7 Stress Intensity Factor (SIF)
8 Thorsson
9 Bridging Length
10 Liu
11 Ruzek
12 Nazari
13 Zhang
14 Carbon Nanotube



شکل ۱. (الف) شماتیکی از هندسه نمونه‌های تیر یکسر گیردار دو لبه [۱۷] و (ب) نمونه واقعی استاندارد آزمون

Fig. 1. (a) Schematic of the geometry of double contilever beam specimens [17] and (b) the actual atandard test speci men



شکل ۲. دستگاه آزمون کشش برای نمونه‌های تیر یکسر گیردار دو لبه

Fig. 2. The device for tensile testing on double contilever beam samples

چیدمان مختلف، تحت بارگذاری خستگی کمچرخه در دامنه‌های جابجایی مختلف با استفده از روش انتشار صوت پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که روش انتشار صوت در تعیین نوع خرابی‌ها بازدهی مطلوبی دارد. کریمان مقدم و همکاران [۱۵] به محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی در اتصال چسبی دو صفحه کامپوزیتی با الیاف شیشه تک جهته و با استفاده از نمونه تیر یکسر گیردار دو لبه و در حالت مود اول پرداخته‌اند.

در این مقاله سعی شده است تا رفتار رشد ترک در نمونه‌های کامپوزیتی تحت نرخ‌های بارگذاری مختلف و در حالت جابجایی-کنترل و براساس استاندارد ASTM-D5528، در حالت مود اول

بررسی شود. با توجه به پیشینه تحقیقات گفته‌شده، می‌توان نتیجه گرفت که نوآوری این تحقیق بررسی اثر نرخ‌های جابجایی مختلف بر روی رفتار رشد ترک در نمونه کامپوزیتی پایه پلیمری تقویت‌شده با الیاف کربن[1] (کامپوزیت کربن- اپوکسی) می‌باشد که بصورت تحلیل‌های آماری کمی (در مقابل تحلیل‌های کیفی پیشینه تحقیق)، مطالعه شده‌اند. این در حالی است که در سایر تحقیقات، بررسی اثر نرخ بارگذاری بر رفتار کامپوزیت‌ها، بیشتر بصورت کیفی (بدون تحلیل حساسیت) صورت گرفته است. لذا این پژوهش در راستای تکمیل کار قبلی [۱۶] ارائه شده است. همچنین با استفاده از تکنیک پردازش تصویر دیجیتال، میزان جابجایی ماکزیمم دهانه ترک اولیه نیز بدست آمده است و در ادامه، داده‌های تجربی با استفاده از نرم‌افزار مینی‌تب[2]، تحلیل حساسیت شده‌اند.

۲- روش تحقیق

۲-۱- مواد مورد مطالعه

برای تولید نمونه‌های استاندارد کامپوزیتی از الیاف کربن تک جهته[3] استفاده شده است. نمونه‌های آزمون کامپوزیتی کربن-اپوکسی، از ۲۴ لایه با زاویه صفر درجه ساخته شده‌اند. برای لایه‌چینی از رزین اپوکسی به نام CR-80 همراه با سخت‌کننده[4] به نام CH-80-2 استفاده شده است. همچنین، ضخامت هر لایه از پارچه‌های الیاف کربن تک جهته ۰/۱۳ میلیمتر است و پس از ساخت نمونه‌ها و ترکیب با رزین ضخامت هر لایه برابر با ۰/۲۲ میلیمتر می‌شود. همچنین، برای ترک اولیه از تفلون به ضخامت ۰/۰۱۲۵ میلیمتر استفاده شده است. پس از لایه‌گذاری به منظور کیفیت قطعات تولیدی و کنترل درصد حجمی رزین و الیاف و همچنین کنترل ضخامت نهایی لایه‌ها، توسط دو صفحه فولادی صیقل‌داده‌شده، بصورت دقیق پرس و در دمای اتاق، نگهداری شده‌اند. صفحات کامپوزیتی تولیدشده پس از ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و به مدت یک هفته در هوای آزاد قرار گرفتند. سپس توسط دستگاه واترجت به نمونه‌هایی به طول حدودا ۱۲۳ میلیمتر و عرض حدودا ۲۵ میلیمتر برش داده شده‌اند. ضخامت هر یک از نمونه‌های استاندارد، حدود ۵/۲۸ میلیمتر می‌باشد. برای قرارگیری نمونه‌ها در داخل فک‌های دستگاه آزمایش کشش، لولاهایی از جنس فولاد در لبه‌های نمونه چسبانده شده است. در شکل ۱ ابعاد نشان داده شده است که a طول ترک اولیه، L طول نمونه، b عرض نمونه و h ضخامت نمونه، طبق استاندارد ASTM-D5528 [۱۷]، می‌باشد. ضمنا نمونه واقعی استاندارد آزمون نیز در شکل ۱ نمایش داده شده است.

۲-۲- آزمون کشش

آزمایش کشش بر اساس استاندارد ASTM-D5528 انجام شده است. بار اعمالی به نمونه‌ها بصورت جابجایی- کنترل و به نیمه پایینی نمونه آزمایش وارد شده است. شکل ۲ دستگاه آزمون کشش نمونه را نشان می‌دهد. میزان جابجایی و بار اعمالی، بطور پیوسته، توسط دستگاه آزمون کشش ثبت شده است. برای بارگذاری نمونه‌ها از دستگاه آزمایش کشش مدل MTS809 با ظرفیت ۱۲۰ کیلونیوتن، برای حالت بارگذاری استاتیکی استفاده شده است.

در این تحقیق، نرخ‌های بارگذاری ۰/۰۵، ۰/۵، ۵ و ۵۰ mm/min انتخاب شده‌اند که یک سطح بیشتر و یک سطح کمتر از مقادیر ذکرشده در استاندارد ASTM-D5528 [۱۷]، می‌باشند. ضمنا در هر نرخ بارگذاری، هر آزمون، ۲ بار تکرار شده است. در ادامه، براساس استاندارد، مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی با سه روش مختلف بدست‌آمده و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. این آزمایش توسط نمونه‌های تیر یکسر گیردار دو لبه مختلف و در حالت بارگذاری کششی و تحت مود اول انجام شده است.

۲-۳- تکنیک پردازش تصویر دیجیتال

برای اندازه‌گیری میزان بازشدگی دهانه ترک اولیه[5]، از تکنیک پردازش تصویر دیجیتال استفاده شده است. برای تصویربرداری از نمونه‌ها از یک دوربین AVT Pike F-505 CCD با عمق ۸ بیت و رزولیشن ۲۴۵۲×۲۰۵۲ پیکسل استفاده شده است. حداکثر نرخ فریم دوربین در رزولیشن کامل، ۱۲ عکس می‌باشد که برای انجام آزمایش، فرکانس تصویربرداری برای گرفتن عکس از نمونه، به ۱۰ عکس در هر دقیقه تنظیم شده بود. برای نرخ جابجایی ۰/۰۵ mm/min، تعداد تصویربرداری از نمونه، ۵۰ تصویر در دقیقه تنظیم شده است. از لنز دوربین ۵۰ میلیمتری زنون[6]، برای گرفتن تصاویر با میدان

1 Carbon Fiber Reinforce Polymer (CFRP)
2 Minitab Software
3 Unidirectional
4 Hardener

5 Initial Crack Tip Opening Displacement (ICTOD)
6 Schindler-Kreuznach Xenon

نمایی ۵۰×۱۱۵ میلیمتر استفاده شده است. بر روی نمونه، سطح رشد ترک به منظور نمایش بهتر در تصاویر گرفته شده، تمیز شده و با یک لایه درخشان از ماژیک، مشخص شده است، همچنین برای نشان‌دادن جابجایی محل اعمال بار توسط تکنیک پردازش تصویر دیجیتال، از الگوی علامت بر قسمت‌های بالا و پایینی نمونه، استفاده شده است. بعد از تصویربرداری، تصاویر با استفاده از نرم‌افزار Vic-2D پردازش می‌شوند. لازم به ذکر است که به منظور بدست‌آوردن میدان جابجایی، هر تصویر با تصویر اولیه (زمانی که نیروی کششی صفر می‌باشد.) مقایسه می‌شود. جزئیات بیشتر در مورد تکنیک پردازش تصویر دیجیتال در مراجع [۴-۷] ذکر شده است. ضمنا استفاده از این تجهیزات و همچنین، اجرای آزمون‌های کشش در دانشگاه مالاگا اسپانیا صورت گرفته است.

۲-۴- روش محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی

در این تحقیق، نرخ رهایی انرژی کرنشی در حین بارگذاری کششی (مود اول)، با سه روش، شامل تیر اصلاح‌شده[1]، کالیبره‌کردن نرمی[2] و اصلاح‌شده کالیبره‌کردن نرمی[3]، محاسبه شده است [۱۷] و در ادامه، حساسیت آنها نسبت به نرخ جابجایی، سنجیده شده است.

معادله نرخ رهایی انرژی کرنشی در روش تیر اصلاح شده برای تیر یکسرگیردار ساده بصورت زیر است [۱۷]:

$$G_{IC} = \frac{3p_c\delta_c}{2b\,a} \qquad (۱)$$

که p بار اعمالی، δ جابجایی نقطه اعمال بار، b عرض نمونه، a طول ترک اولیه می‌باشد. در عمل این عبارت بدلیل اینکه تیر به طور کامل گیردار نیست و امکان چرخش در حین بارگذاری وجود دارد مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی را بیشتر محاسبه می‌کند. بنابراین برای ازبین‌بردن اثرات چرخش و اصلاح رفتار تیر یکسر گیردار، یک مقدار اصلاحی Δ به طول ترک a اضافه می‌شود.

مقدار Δ بصورت عملی و از نمودار ریشه سوم نرمی و بر حسب طول ترک a بدست می‌آید که C بصورت کسر δ/p است. در نتیجه نرخ رهایی انرژی کرنشی در روش تیر اصلاح‌شده از رابطه (۲) بدست می‌آید [۱۷].

$$G_{IC} = \frac{3p_c\delta_c}{2b\left(\left|a+\Delta\right|\right)} \qquad (۲)$$

در روش کالیبره‌کردن نرمی، ابتدا مقادیر بار بحرانی شروع رشد ترک و جابجایی متناظر با آن را از نمودار نیرو- جابجایی استخراج می‌گردد. سپس، نمودار لگاریتمی نرمی بر حسب لگاریتم طول ترک رسم می‌شود. در نتیجه، نرخ رهایی انرژی کرنشی در روش کالیبره کردن نرمی با استفاده از رابطه (۳) بدست می‌آید [۱۷].

$$G_{IC} = \frac{n\,p_c\delta_c}{2b\,a} \qquad (۳)$$

که در آن، n شیب نمودار لگاریتم نرمی- لگاریتم طول ترک است.

در روش اصلاح‌شده کالیبره‌کردن نرمی که مشابه روش قبل است با استفاده از شیب نمودار بی‌بعدشده، مقادیر طول ترک به ضخامت نمونه بر ریشه سوم مقادیر نرمی، می‌توان نرخ رهایی انرژی کرنشی[4] را بدست آورد. نرخ رهایی انرژی کرنشی با استفاده از روش اصلاح‌شده کالیبره‌کردن نرمی از طریق رابطه (۴) بدست می‌آید [۱۷].

$$G_{IC} = \frac{3P_c^2 c^{2/3}}{2A_1 b\,H} \qquad (۴)$$

در این رابطه، H ضخامت نمونه و A_1 شیب نمودار بی‌بعدشده، مقادیر طول ترک به ضخامت نمونه بر حسب ریشه سوم مقادیر نرمی می‌باشد.

۲-۵- تحلیل حساسیت

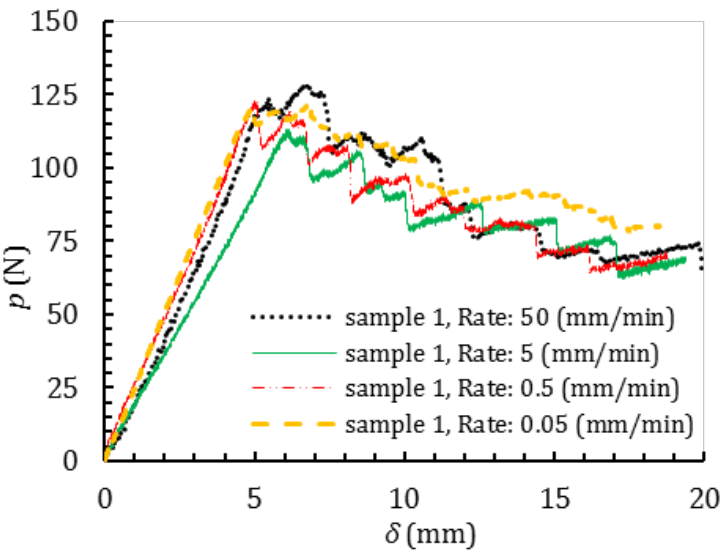
در دنیای مهندسی، طرح آزمایش ابزاری فوق‌العاده مهم برای اصلاح عملکرد فرآیندهای تولید است. همچنین کاربردی وسیع در بسط فرآیندهای جدید دارد. هر مسئله آزمایشی دارای دو وجه است، یکی طرح آزمایش و دیگری تحلیل آماری داده‌ها. اصل پایه‌ای طرح آزمایش، تکرار است. منظور از تکرار، تکرار آزمایش اصلی است. تکرار، دو خاصیت مهم دارد. اولا آزمایشگر را قادر می‌سازد که برآوردی برای خطای آزمایشی بدست آورد. دوما اگر از میانگین نمونه برای

1 Modified Beam Theory (MBT)
2 Compliance Calibration Method (CC)
3 Modified Compliance Calibration Method (MCC)
4 Strain energy release rate

جدول ۱. مقادیر داده‌های مورد تحلیل در نرم‌افزار مینی‌تب

Table. 1. The value of data analyzed in the Minitab software

نرخ جابجایی $\left(\frac{mm}{min}\right)$	لگاریتم نرخ جابجایی	ماکزیمم نیرو (N)	نرخ رهایی انرژی کرنشی $\left(\frac{J}{m^2}\right)$		
			روش اصلاح‌شده کالیبره‌کردن نرمی	روش کالیبره‌کردن نرمی	روش تیر اصلاح‌شده
۵۰	۱/۶۹۸۹۷	۱۲۸/۲۵	۱۰۰۹	۹۷۳	۹۸۱
۵۰	۱/۶۹۸۹۷	۱۲۶/۱۱	۹۹۳	۹۳۱	۹۲۷
۵	۰/۶۹۸۹۷	۱۱۳/۱۷	۹۳۵	۸۰۷	۸۳۹
۵	۰/۶۹۸۹۷	۱۱۳/۶۲	۹۱۴	۷۵۰	۸۲۵
۰/۵	-۰/۳۰۱۰۳	۱۱۹/۵۲	۸۳۷	۸۰۵	۸۰۱
۰/۵	-۰/۳۰۱۰۳	۱۱۹/۸۴	۸۲۴	۸۰۱	۷۸۲
۰/۰۵	-۱/۳۰۱۰۳	۱۲۲/۱۳	۹۵۵	۹۴۳	۹۶۶
۰/۰۵	-۱/۳۰۱۰۳	۱۲۲/۸۲	۸۹۵	۸۹۰	۸۹۴



شکل ۳. منحنی نیرو- جابجایی تحت نرخ‌های جابجایی مختلف

Fig. 3. The force-displacement curve under different displacement rates

برآورد اثر عاملی در آزمایش استفاده شده باشد، آنگاه تکرار، آزمایشگر را قادر می‌سازد که برآوردی دقیقتر از این اثر را بدست آورد [۱۸]. برای مشخص‌کردن میزان تاثیرگذاری تغییر نرخ جابجایی، بر روی هر یک از داده‌های بدست‌آمده از آزمون کشش (ماکزیمم نیروی شکست، نرخ رهایی انرژی کرنشی و ماکزیمم جابجایی دهانه ترک اولیه)، از روش تحلیل حساسیت با آنالیز رگرسیون می‌توان بهره برد. داده‌های خروجی آزمون، در نرم‌افزار مینی‌تب، مورد تحلیل آماری قرار می‌گیرند. با محاسبه میانگین مربعات اثر ($MS_{treatment}$) و میانگین مربعات خطا (MS_{error}) و مقایسه آن با مقدار مرجع ($F_{a,a-1,N-a}$) حساسیت بدست می آید [۱۸].

$$F_0 = \frac{MS_{treatment}}{MS_{error}} \quad (۵)$$

$$F_0 > F_{a.a-1.N-a} \quad (۶)$$

در روابط ذکرشده، $N-a$ معرف درجه آزادی خطا و $a-1$ معرف

جدول ۲. نتایج آنالیز رگرسیون برای تابع هدف ماکزیمم نیرو برحسب (الف) تابع درجه سوم از نرخ جابجایی و (ب) تابع درجه اول از لگاریتم نرخ جابجایی

Table. 2. Results of the regression analysis for the objective function of the maximum force in terms of (a) the third-degree function of the displacement rate and (b) the first-degree function of the logarithmic displacement rate

(الف)

پارامترها	F-Value	P-Value
آنالیز رگرسیون مدل اول	۹۹/۰۴	۰/۰۰۰
توان اول نرخ جابجایی	۱۰/۹۷	۰/۰۳۰
توان دوم نرخ جابجایی	۶/۲۶	۰/۰۶۷
توان سوم نرخ جابجایی	۵/۸۱	۰/۰۷۴
ضریب تعیین	$R^2 =$ ۹۸/۶۷ %	

(ب)

پارامترها	F-Value	P-Value
آنالیز رگرسیون مدل دوم	۰/۱۹	۰/۶۸۰
توان اول لگاریتم نرخ جابجایی	۰/۱۹	۰/۶۸۰
ضریب تعیین	$R^2 =$ ۳/۰۴ %	

درجه آزادی اثر، تحلیل حساسیت می‌باشند، همچنین مقدار مرجع ($F_{a,a-۱,N-a}$) از آمار اعداد خروجی محاسبه می‌شود [۱۹]. هر چه مقدار F-Value بیشتر باشد، تاثیر پارامتر ورودی بر خروجی مسئله بیشتر است. در این روش از مقدار دیگری همچون P-Value نیز، برای مشخص‌کردن تاثیرگذاری عامل استفاده شده است. با توجه به اینکه، ضریب اطمینان ۹۵ درصد در نظر گرفته شده است، مقدار خطا و ریسک (α) برابر با ۰/۰۵ خواهد بود. در نتیجه عاملی که اثرگذار است، می‌بایست P-Value آن کمتر از ۰/۰۵ باشد. علاوه بر دو مقدار P-Value و F-Value، مقدار $R^۲$ بیانگر این است که منحنی حاصل از معادله رگرسیونی تا چه اندازه با نقاط روی نمودار انطباق دارد. لذا هر چه مقدار $R^۲$ نزدیک به عدد یک باشد، مدل رگرسیونی بر نقاط نمودار منطبق‌تر خواهد بود. ضمنا، هر چه مقدار F-Value نیز بیشتر باشد، تغییرات آن پارامتر، بر خواص ماده موثرتر خواهد بود [۲۰]. جزئیات بیشتر در مورد طراحی آزمایش و تحلیل حساسیت با استفاده از در مراجع [۱۸-۲۰] ذکر شده است.

شایان ذکر است که در این تحقیق، خروجی‌ها یا توابع هدف شامل ماکزیمم نیروی شکست، نرخ رهایی انرژی کرنشی (به سه روش) و ماکزیمم جابجایی دهانه ترک اولیه بوده که تحلیل حساسیت آنها به نرخ جابجایی در بارگذاری کششی، با دو مدل رگرسیونی، مطالعه شده است. برای آنالیز رگرسیون نیز، دو مدل رگرسیون شامل تابعی درجه سوم از نرخ جابجایی و تابعی درجه اول از لگاریتم نرخ جابجایی، لحاظ شده است تا مدل مناسب نیز، علاوه بر مشخص‌نمودن تاثیر نرخ جابجایی بر رفتار شکست کامپوزیت، انتخاب گردد.

۳- نتایج و بحث

در این قسمت، در ابتدا، نتایج آزمون کشش بر روی نمونه‌های تیر یکسر گیردار دو لبه، شامل ماکزیمم نیروی شکست، نرخ رهایی انرژی کرنشی و ماکزیمم جابجایی دهانه ترک اولیه، پرداخته شده است. شایان ذکر است که این نمونه‌های تیر یکسر گیردار دو لبه در نرخ‌های جابجایی ۰/۰۵، ۰/۵، ۵ و ۵۰ mm/min تحت آزمون کشش خالص قرار گرفته‌اند. در جدول ۱ مقادیر استخراج‌شده از نتایج آزمون‌های کشش که برای تحلیل در نرم‌افزار مینی‌تب استفاده شده است، آمده است.

۳-۱- نتایج نیرو- جابجایی

نتایج حاصل از نمودارهای نیرو- جابجایی مطابق شکل ۳،

جدول ۳. مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی در نرخ‌های جابجایی مختلف

Table. 3. Strain energy release rate values under different displacement rates

نمونه شماره	نرخ جابجایی $\left(\frac{mm}{min}\right)$	۰/۰۵	۰/۵	۵	۵۰
۱	اصلاح شده کالیبره کردن نرمی $\left(\frac{J}{m^2}\right)$	۹۵۵	۸۳۷	۹۳۵	۱۰۰۹
۲		۸۹۵	۸۲۴	۹۱۴	۹۹۳
۱	کالیبره کردن نرمی $\left(\frac{J}{m^2}\right)$	۹۴۳	۸۰۵	۸۰۷	۹۷۳
۲		۸۹۰	۸۰۱	۷۵۰	۹۳۱
۱	تیر اصلاح شده $\left(\frac{J}{m^2}\right)$	۹۶۶	۸۰۱	۸۳۹	۹۸۱
۲		۸۹۴	۷۸۲	۸۲۵	۹۲۷

جدول ۴. نتایج آنالیز رگرسیون برای تابع هدف نرخ رهایی انرژی کرنشی به روش اصلاح‌شده کالیبره‌کردن نرمی، برحسب (الف) تابع درجه سوم از نرخ جابجایی و (ب) تابع درجه اول از لگاریتم نرخ جابجایی

Table. 4. Results of the regression analysis for the objective function of the strain energy release rate by the MCC method, in terms of (a) the third-degree function of the displacement rate and (b) the first-degree function of the logarithmic displacement rate

(الف)

پارامترها	F-Value	P-Value
آنالیز رگرسیون مدل اول	۱۶/۹۶	۰/۰۱۰
توان اول نرخ جابجایی	۱۵/۶۰	۰/۰۱۷
توان دوم نرخ جابجایی	۱۶/۸۲	۰/۰۱۵
توان سوم نرخ جابجایی	۱۶/۹۱	۰/۰۱۵
ضریب تعیین	R^2= ۹۲/۷۱ %	

(ب)

پارامترها	F-Value	P-Value
آنالیز رگرسیون مدل دوم	۲/۹۷	۰/۱۳۶
توان اول لگاریتم نرخ جابجایی	۲/۹۷	۰/۱۳۶
ضریب تعیین	R^2= ۳۳/۰۸ %	

نشان‌دهنده این است که افزایش نرخ جابجایی، در مقدار نیروی ماکزیمم و همچنین در مقدار جابجایی متناظر با نیرو تاثیر چندانی ندارد. البته این نتیجه بصورت یک نتیجه‌گیری کیفی است و برای تثبیت این نتیجه‌گیری و تحلیل دقیق‌تر، از تحلیل حساسیت استفاده شده است که با استفاده از روش آنالیز رگرسیون (با لحاظ‌نمودن دو تابع درجه سوم از نرخ جابجایی و تابع درجه اول از لگاریتم نرخ جابجایی) و توسط نرم‌افزار مینی‌تب انجام گردیده است. همچنین، مقدار ماکزیمم نیرو در بارگذاری در نرخ‌های بارگذاری خیلی کمتر نسبت به بارگذاری در نرخ‌های بارگذاری بیشتر، متفاوت است که این حالت در مرجع [۴] نیز، نشان داده شده است. علت این مشاهده می‌تواند، سرعت خیلی کم در بارگذاری باشد که باعث تغییر در رفتار شکست ماده، نسبت به سرعت بارگذاری بیشتر می‌شود. همچنین بارگذاری با سرعت خیلی کم، باعث تغییر اثر طول اتصال بر روی چقرمگی شکست نیز می‌گردد [۸]. تقریبا در همه نمونه‌ها، نمودار بصورت خطی تا شکست اولیه پیش رفته است و بعد از شکست با افزایش جابجایی، نیرو بصورت غیرخطی کاهش و افزایش یافته است که باعث ایجاد حالت زیگزاگی گردیده است. این پدیده به دلیل اعمال بارگذاری بصورت جابجایی- کنترل است و باعث رشد ترک در جابجایی ثابت می‌شود. نتایج این حالت نیز با سایر نتایج همخوانی مناسبی دارد [۲۱, ۲۲]. با توجه به شکل شماره ۳، می‌توان مشاهده

جدول ۵. نتایج آنالیز رگرسیون برای تابع هدف بر نرخ رهایی انرژی کرنشی به روش کالیبره‌کردن نرمی، برحسب (الف) تابع درجه سوم از نرخ جابجایی و (ب) تابع درجه اول از لگاریتم نرخ جابجایی

Table. 5. Results of the regression analysis for the objective function of the strain energy release rate by the CC method, in terms of (a) the third-degree function of the displacement rate and (b) the first-degree function of the logarithmic displacement rate

(الف)

پارامترها	F-Value	P-Value
آنالیز رگرسیون مدل اول	۱۴/۳۹	۰/۰۱۳
توان اول نرخ جابجایی	۱۲/۷۱	۰/۰۲۳
توان دوم نرخ جابجایی	۱۱/۱۲	۰/۰۲۹
توان سوم نرخ جابجایی	۱۰/۹۳	۰/۰۳۰
ضریب تعیین	$R^2 =$ ۹۱/۵۲ %	

(ب)

پارامترها	F-Value	P-Value
آنالیز رگرسیون مدل دوم	۰/۰۹	۰/۷۷۶
توان اول لگاریتم نرخ جابجایی	۰/۰۹	۰/۷۷۶
ضریب تعیین	$R^2 =$ ۱/۴۵ %	

جدول ۶. نتایج آنالیز رگرسیون برای تابع هدف نرخ رهایی انرژی کرنشی به روش تیر اصلاح‌شده، برحسب (الف) تابع درجه سوم از نرخ جابجایی و (ب) تابع درجه اول از لگاریتم نرخ جابجایی

Table. 6. Results of the regression analysis for the objective function of the strain energy release rate by the MBT method, in terms of (a) the third-degree function of the displacement rate and (b) the first-degree function of the logarithmic displacement rate

(الف)

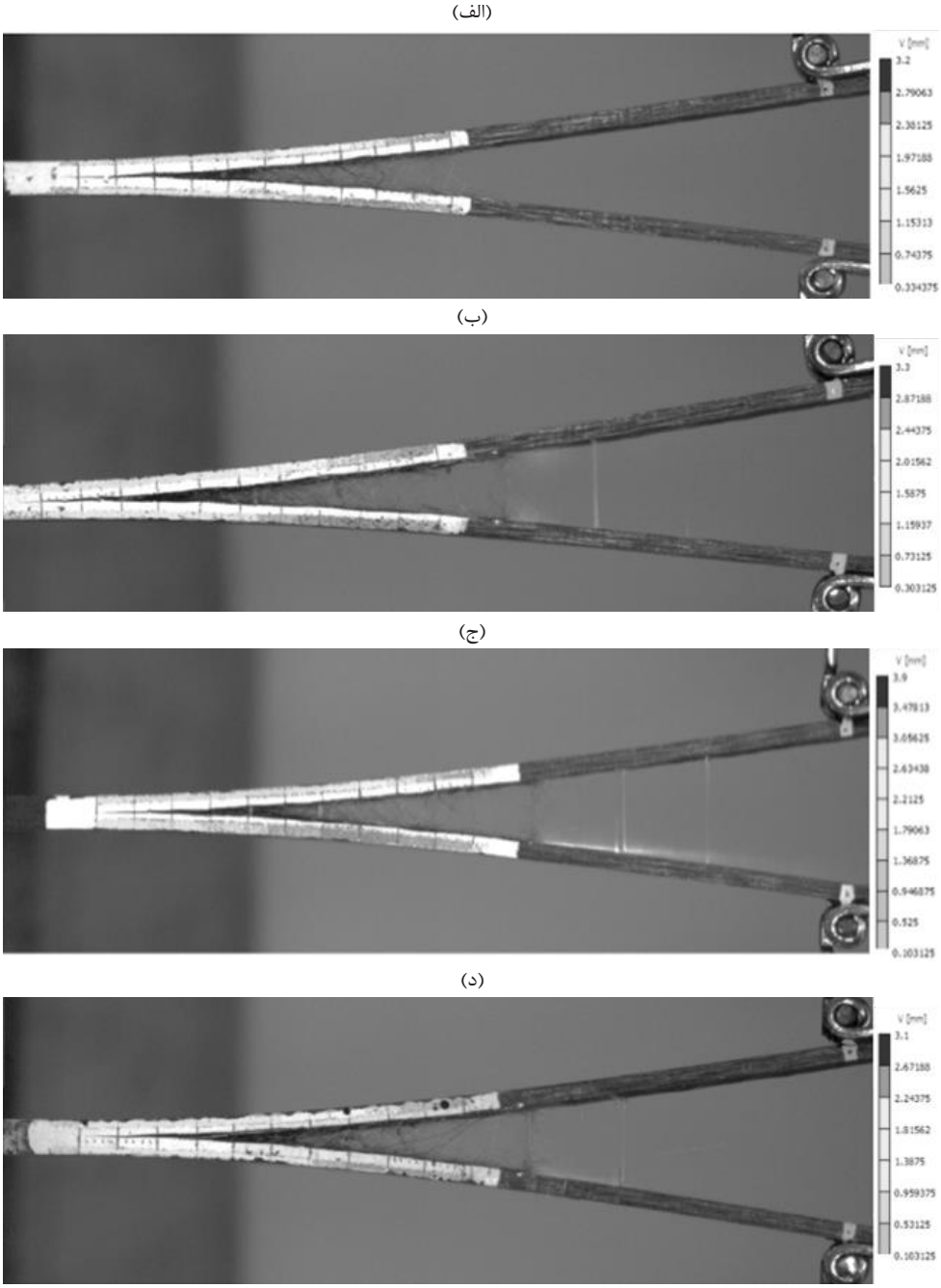
پارامترها	F-Value	P-Value
آنالیز رگرسیون مدل اول	۱۰/۹۵	۰/۰۲۱
توان اول نرخ جابجایی	۱۷/۴۷	۰/۰۱۴
توان دوم نرخ جابجایی	۱۶/۷۴	۰/۰۱۵
توان سوم نرخ جابجایی	۱۶/۶۳	۰/۰۱۵
ضریب تعیین	$R^2 =$ ۸۹/۱۵ %	

(ب)

پارامترها	F-Value	P-Value
آنالیز رگرسیون مدل دوم	۰/۱۹	۰/۶۸۱
توان اول لگاریتم نرخ جابجایی	۰/۱۹	۰/۶۸۱
ضریب تعیین	$R^2 =$ ۳/۰۱ %	

کرد که هر چه نرخ بارگذاری افزایش می‌یابد، رشد ترک بصورت مداوم صورت می‌پذیرد و همچنین به دنبال رشد مداوم ترک، شکستگی سریع و ناگهانی رخ می‌دهد. بدان معنی که در نرخ‌های بارگذاری بیشتر، کاهش بار سریعتر اتفاق می‌افتد و در نرخ‌های بارگذاری کمتر، کاهش بار بصورت تدریجی است. در شکل ۳، بعضی از مناطق، دارای رشد ترک پیوسته و بعضی از مناطق، دارای رشد ترک ناپیوسته می‌باشند که نشان‌دهنده رفتار شکست ترد ماده است [۲۳, ۲۴].

در جدول ۲ نتایج تحلیل حساسیت بدست‌آمده برای پارامتر نیروی



شکل ۴. کانتور جابجایی دهانه ترک اولیه در نرخ‌های بارگذاری (الف) ۵۰، (ب) ۵، (ج) ۰/۵ و (د) ۰/۰۵ (mm/min)

Fig. 4. Initial crack opening displacement contours under loading rates of (a) 50, (b) 5, (c) 0.5 and (d) 0.05 (mm/min)

ماکزیمم را برای دو تابع رگرسیون تعریف‌شده (تابع درجه سوم از نرخ جابجایی و تابع درجه اول از لگاریتم نرخ جابجایی)، نشان داده شده است. با توجه به نتایج جدول ۲، مقدار P-Value برای تابع درجه اول از نرخ جابجایی، کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد و همچنین مقدار R^2 نیز ۹۸/۶۷ درصد می‌باشد که نشان‌دهنده این است که آنالیز رگرسیون برای مدل اول (تابع درجه سوم) معنادار و صحیح می‌باشد. اما نتایج برای آنالیز رگرسیون با مدل دوم (تابع درجه یک از لگاریتم نرخ جابجایی) با توجه به مقادیر P-Value و R^2 مربوط به آن، مناسب نیست. همچنین، مطابق مقادیر P-Value در جدول ۲، می‌توان گفت که تغییر نرخ جابجایی بر پارامتر ماکزیمم نیروی شکست تاثیرگذار می‌باشد. به عبارت دیگر، پارامتر ماکزیمم نیروی شکست به تغییر نرخ جابجایی حساس می‌باشد. براساس مقدار F-Value می‌توان نتیجه

جدول ۷. مقادیر ماکزیمم برای جابجایی دهانه ترک اولیه تحت نرخ‌های جابجایی مختلف با تکنیک پردازش تصویر دیجیتال

Table. 7. Maximum values for the initial crack opening displacement under different displacement rates with digital image correlation technique

شماره نمونه	نرخ جابجایی $\left(\frac{mm}{min}\right)$			
	۰/۰۵	۰/۵	۵	۵۰
۱	۷/۰	۶/۶	۶/۹	۷/۳
۲	۵/۹	۶/۵	۶/۹	۷/۲
متوسط ± تغییرات	۶/۵ ± ۰/۶	۶/۶ ± ۰/۱	۶/۹ ± ۰/۰	۷/۳ ± ۰/۱

جدول ۸. نتایج آنالیز رگرسیون برای تابع هدف مقدار ماکزیمم جابجایی دهانه ترک اولیه برحسب (الف) تابع درجه سوم از نرخ جابجایی و (ب) تابع درجه اول از لگاریتم نرخ جابجایی

Table. 8. Results of the regression analysis for the objective function of the maximum displacement value of the initial crack opening in terms of (a) the quadratic function of the displacement rate and (b) the first-degree function of the logarithmic displacement rate

(الف)

پارامترها	F-Value	P-Value
آنالیز رگرسیون مدل اول	۱/۷۲	۰/۳۰۰
توان اول نرخ جابجایی	۰/۰۶	۰/۸۱۹
توان دوم نرخ جابجایی	۰/۰۲	۰/۸۸۳
توان سوم نرخ جابجایی	۰/۰۲	۰/۸۸۹
ضریب تعیین	$R^2 = ۵۶/۳۴\ \%$	

(ب)

پارامترها	F-Value	P-Value
آنالیز رگرسیون مدل دوم	۶/۹۵	۰/۰۳۹
توان اول لگاریتم نرخ جابجایی	۶/۹۵	۰/۰۳۹
ضریب تعیین	$R^2 = ۵۳/۶۸\ \%$	

گرفت که توان اول نرخ جابجایی، تاثیر بیشتری بر ماکزیمم نیرو، نسبت به توان دوم و سوم نرخ جابجایی دارد. الگوی رفتاری نشان می‌دهد که با افزایش نرخ جابجایی، ماکزیمم نیرو نیز، افزایش می‌یابد. چنین نتایجی با نتایج ارائه‌شده توسط نظری و همکاران [۱۱]، در مقایسه با استحکام دینامیکی کامپوزیت، مطابقت دارد.

۳-۲- نتایج نرخ رهایی انرژی کرنشی

مقدار بحرانی در نرخ رهایی انرژی کرنشی (G_{IC} G_{IC})، یکی از مهم‌ترین پارامترهای پیش‌بینی مقاومت در کامپوزیت‌ها بخصوص بصورت اتصالات چسبی است. یکی از متداول‌ترین آزمایش‌ها برای تخمین و اندازه‌گیری این انرژی، آزمون کشش تیر یکسر گیردار دو لبه می‌باشد [۲۳-۲۵]. لذا در این مقاله نیز، این پارامتر مورد بررسی واقع شده است.

جدول ۳، مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی در کامپوزیت مورد مطالعه از سه روش مختلف (اصلاح‌شده کالیبره‌کردن نرمی، کالیبره‌کردن نرمی و تیر اصلاح‌شده)، طی بارگذاری کششی بدست‌آمده از آزمون‌های تجربی را نشان می‌دهد و با توجه به رابطه (۴) که روش مربوط به روش اصلاح‌شده کالیبره‌کردن نرمی است.

این روش به اندازه طول ترک اولیه برای محاسبه نرخ انرژی آزاد شده نیازی ندارد. در نتیجه، این رابطه نسبت به دو رابطه دیگر (۲) و (۳)، از خطای کمتری برخوردار است [۲۳, ۲۶, ۲۷]. با توجه به نتایج بدست‌آمده از تحلیل حساسیت، که مقادیر P-Value، F-Value و R^2 برای هر سه روش محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی (شامل سه روش مختلف ذکرشده) که به ترتیب در جدول ۴، ۵ و ۶، گزارش شده است. با توجه به این جداول و مقادیر P-Value و R^2 برای هر سه روش، می‌توان این نتیجه بیان نمود که روش اصلاح‌شده کالیبره‌کردن نرمی، نسبت به دو روش دیگر از دقت بالاتری برخوردار است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود مقدار P-Value در آنالیز رگرسیون مدل اول (تابع درجه سوم از نرخ جابجایی)، برای هر سه روش کمتر از ۰/۰۵ می‌باشد و مقدار R^2 برای هر سه روش اصلاح‌شده کالیبره‌کردن نرمی، کالیبره‌کردن نرمی و تیر اصلاح‌شده به ترتیب برابر با ۹۲/۷۱، ۹۱/۵۲ و ۸۹/۱۵ است. این مقادیر نشان می‌دهند که آنالیز رگرسیون با مدل اول (تابع درجه سوم)، معنادار و صحیح است اما مدل دوم، مناسب نمی‌باشد، چراکه مقدار P-Value آن بیشتر از ۰/۰۵ و R^2 آنها کم است. در مدل اول، مقدار P-Value پارامترهای نرخ جابجایی درجه یک، دو و سه، پایین‌تر از ۰/۰۵ می‌باشند. لذا این نتایج به این مفهوم است که پارامتر مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی به تغییر نرخ جابجایی در بارگذاری کششی، حساس می‌باشد. همچنین، با توجه به مقادیر F-Value بدست‌آمده برای هر سه روش اصلاح‌شده کالیبره‌کردن نرمی، کالیبره‌کردن نرمی و تیر اصلاح‌شده می‌توان نتیجه گرفت که به ترتیب، توان‌های سوم، اول و اول نرخ جابجایی، تاثیرگذاری بیشتری بر نرخ رهایی انرژی کرنشی دارند. در هر سه روش، الگوی رفتاری مقدار نرخ رهایی انرژی با نرخ جابجایی، ابتدا افزایشی و سپس، کاهشی است. این نتایج با نتایج راجان و همکاران [۴] که بصورت کیفی ارائه شده بود، مطابقت دارد.

۳-۳- نتایج جابجایی دهانه ترک اولیه

در شکل ۴ تصاویری از کانتور جابجایی دهانه ترک اولیه (بر حسب میلیمتر) که از تکنیک پردازش تصویر دیجیتال بدست آمده است، مشاهده می‌شود که نوک ترک اولیه با توجه به رنگ کانتور (از سفید تا مشکی)، بر روی تصاویر مشخص است.

همچنین ناحیه پل‌زدن فیبرها[1] بر روی تصاویر نمونه آزمون گرفته‌شده، قابل مشاهده است. می‌توان نتیجه گرفت که ناحیه پل‌زدن، در حالت پایدار با افزایش نرخ جابجایی افزایش یافته است که این مشاهدات نیز در سایر مقالات گزارش شده است [۲۸-۳۰]. شکریه و همکاران [۳۰] نشان داد که پدیده پل‌زدن فیبرها، به طور قابل توجهی به روش ساخت و نوع تقویت مانند الیاف یک طرفه و بافته بستگی دارد. همچنین نمونه‌هایی که با دست لایه‌گذاری می‌شوند، به دلیل نفوذ بهتر فیبرها در یکدیگر در طی فرآیند ساخت، این پدیده بیشتر رخ می‌دهد. به نظر می‌رسد که با افزایش نرخ جابجایی، میزان پل‌زدن فیبرها، کمتر شده است چراکه فرصت کمتری به ماده در تغییر شکل، داده می‌شود. البته این مورد، نتیجه یک تحلیل کیفی است.

در جدول ۷، مقادیر ماکزیمم جابجایی طول ترک اولیه، برای نرخ جابجایی مختلف نشان داده شده است و با نمونه در حالت تکرارپذیری، مقایسه شده است. با توجه به جدول ۷ می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش نرخ جابجایی، مقدار ماکزیمم جابجایی دهانه ترک اولیه، به طور متوسط افزایش یافته است. این نتیجه بصورت کیفی است و مشخص نمی‌کند که آیا تغییرات نرخ جابجایی در بارگذاری کششی، بر مقدار ماکزیمم جابجایی دهانه ترک اولیه در کامپوزیت، تاثیرگذار است یا خیر. لذا تحلیل حساسیت باید صورت بپذیرد. بر این اساس، در جدول ۸، نتایج آنالیز رگرسیون برای تابع هدف مقدار ماکزیمم جابجایی دهانه ترک اولیه برای دو مدل مختلف آمده است.

با توجه به نتایج بدست‌آمده از جدول ۸ مقدار P-Value برای مدل اول رگرسیونی (تابع درجه سوم نرخ جابجایی) بیشتر از ۰/۰۵ می‌باشد و مقدار R^2 نیز ۵۶/۳۴ درصد می‌باشد که با توجه به مطالب ذکرشده در قسمت طراحی آزمایش‌ها، این مقادیر بدست‌آمده نشان‌دهنده این است که آنالیز رگرسیون برای مدل اول، معنادار نیست و صحیح نمی‌باشد. لذا براساس مدل اول، تغییرات نرخ جابجایی بر پارامتر ماکزیمم جابجایی دهانه ترک اولیه، تاثیرگذار نمی‌باشد. اما براساس نتایج آنالیز رگرسیون مدل دوم، مقدار P-Value برای تحلیل حساسیت کمتر از ۰/۰۵ بوده و لذا آنالیز رگرسیون معنادار می‌باشد. مقدار R^2 نیز برای مدل دوم، ۵۳/۶۸ درصد است که البته مقدار مناسبی نیست. لذا در مجموع می‌توان گفت که هرچند تحلیل

1 Fiber Bridging

حساسیت مدل دوم صحیح بوده اما دقت کافی ندارد. با این وجود، لگاریتم نرخ جابجایی بر ماکزیمم جابجایی دهانه ترک اولیه، تاثیرگذار است چراکه مقدار P-Value آن کمتر از ۰/۰۵ محاسبه گردیده است. لذا برخلاف دو پارامتر قبلی (ماکزیمم نیروی شکست و نرخ رهایی انرژی کرنشی به سه روش) که به تابع درجه سوم از نرخ جابجایی وابستگی داشت، ماکزیمم جابجایی دهانه ترک اولیه، به تابع درجه اول از لگاریتم نرخ جابجایی، وابسته می‌باشد، هر چند که دقت مدل دوم لگاریتمی رگرسیون (در حدود ۵۴ درصد)، از دقت مدل اول رگرسیون (حداقل در حدود ۹۰ درصد)، کمتر محاسبه گردید. الگوی رفتاری مقدار ماکزیمم برای جابجایی دهانه ترک اولیه نشان می‌دهد که با افزایش لگاریتم نرخ جابجایی، افزایش می‌یابد. چنین نتایجی بصورت یک گزارش کیفی (و نه کمی)، توسط راجان و همکاران [۴] نیز، ارائه شده بود که تطابق مناسبی با نتایج این مقاله دارد. بطور کلی می‌توان گفت که نتایج بدست‌آمده این مقاله با نتایج سایر مقالات [۳۱, ۳۲]، حتی با کاربرد مواد در زمینه مهندسی عمران که معمولا رفتار شکست ترد یا شبه تردی دارند نیز، همخوانی دارد.

۴- نتیجه‌گیری

در این مطالعه، اثر تغییرات نرخ جابجایی در بارگذاری کششی بر روی رفتار رشد ترک در نمونه تیر یکسر گیردار دو لبه از کامپوزیت پایه پلیمری تقویت‌شده با فیبر کربن، بصورت تحلیل‌های کمی، مورد بررسی قرار گرفته است. در ابتدا، منحنی نیرو- جابجایی و مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی از آزمون کشش روی نمونه‌های کامپوزیتی، بدست آمد. سپس، با استفاده از روش پردازش تصویر دیجیتال، ماکزیمم جابجایی دهانه ترک اولیه، اندازه‌گیری شد.

در ادامه، آنالیز رگرسیون با لحاظ‌نمودن دو نوع تابع شامل یک تابع درجه سوم از نرخ جابجایی و یک تابع درجه اول از لگاریتم نرخ جابجایی، انجام شد که نتایج آن، به شرح زیر است:

- براساس مدل رگرسیونی درجه سوم از نرخ جابجایی، تحلیل حساسیت نشان داد که تغییرات نرخ جابجایی بر روی ماکزیمم نیروی شکست ناشی از آزمون کشش روی نمونه‌های کامپوزیتی، تاثیرگذار می‌باشد.
- مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی در کامپوزیت کربن- اپوکسی، با هر سه روش شکست (شامل روش‌های تیر اصلاح‌شده، کالیبره‌کردن نرمی و اصلاح‌شده کالیبره‌کردن نرمی)، براساس مدل رگرسیونی درجه سوم از نرخ جابجایی در بارگذاری کششی، به تغییرات نرخ جابجایی حساس می‌باشد.
- مقدار ماکزیمم جابجایی دهانه ترک اولیه در کامپوزیت، براساس مدل لگاریتمی رگرسیونی، به لگاریتم مقادیر نرخ جابجایی در بارگذاری کششی، حساس است.
- دو مشخصه رفتار شکست در کامپوزیت کربن- اپوکسی مورد مطالعه، یعنی ماکزیمم نیروی شکست و ماکزیمم جابجایی دهانه ترک اولیه با افزایش مقدار نرخ جابجایی و یا مقدار لگاریتمی نرخ جابجایی در بارگذاری کششی، الگویی افزایشی داشته‌اند.

برای ادامه این پژوهش، پیشنهاد می‌گردد که برخی دیگر از پارامترها شامل زاویه الیاف کامپوزیت و یا ضخامت نمونه استاندارد نیز، بررسی شده و تاثیرگذاری معنادار آنها با تحلیل‌های آماری، بر رفتار شکست ماده مشخص گردد.

منابع

[1] H. Sayar, M. Azadi, A. Ghasemi-Ghalebahman, S.M. Jafari, Clustering effect on damage mechanisms in open-hole laminated carbon/epoxy composite under constant tensile loading rate, using acoustic emission, Composite Structures, 11-1 (2018) 204.

[2] M. Azadi, H. Sayar, A. Ghasemi-Ghalebahman, S.M. Jafari, Tensile loading rate effect on mechanical properties and failure mechanisms in open-hole carbon fiber reinforced polymer composites by acoustic emission approach, Composites Part B: Engineering, 458-448 (2019) 158.

[3] A. Brunner, Fracture mechanics characterization of polymer composites for aerospace applications, in: Polymer composites in the aerospace industry, Elsevier, 2015, pp. 230-191.

[4] S. Rajan, M.A. Sutton, R. Fuerte, A. Kidane, Traction-separation relationship for polymer-modified bitumen under Mode I loading: Double cantilever beam experiment with stereo digital image correlation, Engineering Fracture Mechanics, 421-404 (2018) 187.

[5] R. Brambleby, L. Louca, S. Mouring, Influence of loading rate on the mode II fracture toughness of vinyl ester GRP, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing,

162-153 (2017) 93.

[6] F. Mathieu, F. Hild, S. Roux, Identification of a crack propagation law by digital image correlation, International Journal of Fatigue, 154-146 (2012) (1)36.

[7] M. Mokhtari, P. Lopez-Crespo, B. Moreno, M. Zanganeh, Some experimental observations of crack-tip mechanics with displacement data, Frattura ed Integrita Strutturale, 150-143 (2015) (33)9.

[8] S.I. Thorsson, A.M. Waas, J. Schaefer, B. Justusson, S. Liguore, Effects of elevated loading rates on mode I fracture of composite laminates using a modified wedge-insert fracture method, Composites Science and Technology, 47-39 (2018) 156.

[9] H. Liu, H. Nie, C. Zhang, Y. Li, Loading rate dependency of Mode I interlaminar fracture toughness for unidirectional composite laminates, Composites Science and Technology, 223-215 (2018) 167.

[10] R. Růžek, M. Kadlec, L. Petrusova, Effect of fatigue loading rate on lifespan and temperature of tailored blank C/PPS thermoplastic composite, International Journal of Fatigue, 263-253 (2018) 113.

[11] F. Nazari, M. Safarabadi, Experimental and numerical investigation of loading speed effect on the bearing strength of glass/epoxy composite joints, Composite Structures, 218-211 (2018) 195.

[12] M. Zhang, M. Li, S. Wang, Y. Wang, Y. Zhang, Y. Gu, Q. Li, Z. Zhang, The loading-rate dependent tensile behavior of CNT film and its bismaleimide composite film, Materials & Design, 46-37 (2017) 117.

[13] A. Ghasemi-Ghalebahman, H. Sayar, M. Azadi, S.M. Jafari, Failure mechanisms in open-hole laminated composites under tensile loading using acoustic emission, Journal of Science and Technology of Composites, (1)5 152-143 (2018).

[14] M. Alizadeh, M. Azadi, S.M. Jafari, Investigation of displacement amplitude effect on failure mechanisms in open-hole laminated composites under low-cycle fatigue loading using acoustic emission, Modares Mechanical Engineering, 445-435 (2018) (12)17.

[15] A. Kariman Moghadam, S. Rahnama, S. Maleki, Experimental and numerical investigation of crack growth in adhesive bonding of two composites plates under mode I, Modares Mechanical Engineering, -271 (2016) (5)16 280.

[16] M. Azadi, M. Saeedi, M. Mokhtarishirazabad, P. Lopez-Crespo, Effects of loading rate on crack growth behavior in carbon fiber reinforced polymer composites using digital image correlation technique, Composites Part B: Engineering, 107161 (2019) 175.

[17] A. AC09036782, Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites, ASTM Internat., 2007.

[18] M. Azadi, M. Iziy, A. Marbout, M. Azadi, A. Hajiali Mohammadi, Optimization of solution temperature and time in nickel-based super-alloy of engine turbo-charger based on hardness by design of experiments, The Journal of Engine Research, 70-63 (2016) (43)43.

[19] D. Principale Montgomery, Design and Analysis of Experiments, in, John Wiley & Sons, 2012.

[20] M. Azadi, Analysis and improvement of a passenger car NVH behavior using DOE method, MSc Thesis, KN Toosi University of Technology, Tehran, Iran, 2008.

[21] M. Azadi, M. Alizadeh, H. Sayar, Sensitivity analysis for effects of displacement amplitude and loading frequency on low-cycle fatigue lifetime in carbon/epoxy laminated composites, in: MATEC Web of Conferences, EDP Sciences, 2018, pp. 22021.

[22] B.D. Manshadi, A.P. Vassilopoulos, J. Botsis, A combined experimental/numerical study of the scaling effects on mode I delamination of GFRP, Composites Science and Technology, 39-32 (2013) 83.

[23] R. Lopes, R. Campilho, F. Da Silva, T. Faneco, Comparative evaluation of the Double-Cantilever Beam and Tapered Double-Cantilever Beam tests for estimation of the tensile fracture toughness of adhesive joints, International Journal of Adhesion and Adhesives, 111-103 (2016) 67.

[24] M. Saeedi, M. Azadi, M. Mokhtarishirazabad, P. Lopez-Crespo, Numerical simulations of carbon/epoxy laminated composites under various loading

rates, comparing extended finite element method and cohesive zone modeling, Material Design & Processing Communications, (2020) e198.

[25] R. Campilho, D.C. Moura, M.D. Banea, L.F. da Silva, Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method, International Journal of Adhesion and Adhesives, 22-15 (2014) 53.

[26] M. Banea, L. Da Silva, R. Campilho, Mode I fracture toughness of adhesively bonded joints as a function of temperature: experimental and numerical study, International Journal of Adhesion and Adhesives, (5)31 279-273 (2011).

[27] M. De Moura, R. Campilho, J. Gonçalves, Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading, Composites Science and Technology, 2230-2224 (2008) (11-10)68.

[28] M. Shokrieh, M. Salamat-talab, M. Heidari-Rarani, Effect of initial crack length on the measured bridging law of unidirectional E-glass/epoxy double cantilever beam specimens, Materials & Design, 611-605 (2014) 55.

[29] M. Shokrieh, M. Heidari-Rarani, M. Ayatollahi, Delamination R-curve as a material property of unidirectional glass/epoxy composites, Materials & Design, 218-211 (2012) 34.

[30] M. Shokrieh, M. Salamat-Talab, M. Heidari-Rarani, Effect of interface fiber angle on the R-curve behavior of E-glass/epoxy DCB specimens, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 160-153 (2016) 86.

[31] S.H. Song, G.H. Paulino, W.G. Buttlar, Influence of the cohesive zone model shape parameter on asphalt concrete fracture behavior, in: AIP Conference Proceedings, American Institute of Physics, 2008, pp. 735-730.

[32] O. Portillo, D. Cebon, Modeling mode I fracture of bitumen films, Journal of materials in civil engineering, 1414-1403 (2013) (10)25.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. Azadi, M. Saeedi, M. Mokhtarishirazabad, P. Lopez-Crespo, Sensitivity analysis of fracture behavior in carbon-epoxy composite at different displacement rates under mode I tensile loading by regression analysis, AmirKabir J. Mech. Eng., 53(Special Issue 4) (2021) 2671-2686.

DOI: 10.22060/mej.2020.18241.6778

این صفحه عمداً خالی است