

Amirkabir Journal of Mechanical Engineering

Amirkabir J. Mech. Eng., 56(11) (2025) 1575-1590 DOI: 10.22060/mej.2025.23731.7806

Load Acceleration and Crack Propagation Direction on Interlaminar Fracture Toughness In Polymer Matrix Composites: A Theoretical and Experimental Approaches

Alireza Sartipi Esfahani, Ahmad Reza Ghasemi * 回

Department of Mechanical Engineering, University of Kashan, Kashan, Iran.

ABSTRACT: In this research, the effects of crack propagation and load speed in the first failure mode on failure toughness have been studied analytically and experimentally. In the first mode, the opening of the crack opening of the fiber layout was examined in two different modes and the release of the crack was tested in a direction parallel to the fibers and perpendicular to the direction of the fibers. To perform three-point bending tests, test samples are designed and built according to the standard. The purpose of the rate of speed has been evaluated by changing the loading angle relative to the fixture line. The percentage changes in interlaminar fracture toughness in double cantilever beam and transverse threepoint bending and longitudinal three-point bending tests are 5/67%, 6/5%, and 3/93%, respectively. These changes indicate that the difference between fracture toughness in the crack growth region for double cantilever beam test specimens is smaller than that for three-point bending specimens due to the thickness of the specimens. The results show that interlayer failure toughness is much greater when the crack grows parallel to the fibers than when the crack grows perpendicular to the fibers. The physical reasons for these experimental results are discussed below.

Review History:

Received: Dec. 06, 2024 Revised: Feb. 13, 2025 Accepted: Feb. 28, 2025 Available Online: Mar. 13, 2025

Keywords:

Fracture Toughness Transverse Crack Interlaminar Fracture Three Point Bending (TPB) Polymer Matrix Composites (PMCs)

1-Introduction

The transverse cracks that propagate along directions different from those assumed in standard tests are common. For instance, some models proposed to predict the initiation of transverse cracks [1] or the evolution of transverse cracks [2], which require fracture toughness values that do not correspond to those obtained through standard testing procedures. Additionally, transverse fracture toughness values are required for some fracture models [3] and damage models [4-5]. In this study, the effects of loading rate, fiber orientation, and different three-point bending and cantilevered beam tests on fracture toughness were investigated.

2- Methodology

The study employs experimental tests including the Double Cantilever Beam (DCB) and Three-Point Bending (TPB) methods to measure fracture toughness in composite materials. The TPB test is utilized to assess both longitudinal and transverse interlaminar fracture toughness by analyzing crack growth and comparing it with DCB test results. Additionally, the effect of loading rate on interlaminar fracture toughness is evaluated. The preparation of test samples involves specific designs for DCB and TPB tests, ensuring precise dimensions and pre-crack lengths.

3- Results and Discussion

The results of the experiments demonstrate that the interlaminar fracture toughness is significantly influenced by the crack propagation direction. Specifically, the toughness is considerably higher when the crack grows parallel to the fibers compared to when it grows perpendicularly. This difference is attributed to the higher constraint on crack growth along the fiber direction and variations in the crack path at the micro-mechanical level. The results show that in the longitudinal interlaminar three-point bending test, samples (S3, S4, S7) were able to evaluate the value of interlaminar fracture toughness (Fig 1).

The value of the initial fracture toughness at this stage of the final load is significantly different from the secondary load. This is because the fracture toughness is strongly dependent on the crack length during growth. The TPB test samples, with their larger dimensions, exhibit higher toughness values compared to the DCB test samples, which have a smaller crack growth region.

4- Conclusions

In this research, the effects of loading in Mode I fracture on fracture toughness have been analytically studied and validated through various experiments conducted at different

*Corresponding author's email: Ghasemi@kashanu.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. Ultimate load for longitudinal interlaminar three-point bending specimens

loading rates. The results indicate that the fracture toughness measured using the DCB (Double Cantilever Beam) test for longitudinal interlaminar failure is lower than that obtained from other experimental methods. The primary influencing factors on the results include specimen geometry and physical factors such as directional instability, which causes crack deviation across the upper or lower interlaminar boundaries of the composite specimen.

References

- X.Y. Miao, X. Chen, Structural transverse cracking mechanisms of trailing edge regions in composite wind turbine blades, Composite Structures, 308 (2023) 116680.
- [2] X. Yan, X. Guo, Y. Gao, Y. Lin, N. Zhang, Q. Zhao, Mode-II fracture toughness and crack propagation of pultruded carbon Fiber-Epoxy composites, Engineering

Fracture Mechanics, 279 (2023) 109042.

- [3] P. Maimí, P.P. Camanho, J.A. Mayugo, C.G. Dávila, A continuum damage model for composite laminates: Part I–Constitutive model, Mechanics of Materials, 39(10) (2007) 897-908.
- [4] J. León-Becerra, M.Á. Hidalgo-Salazar, O.A. González-Estrada, Progressive damage analysis of carbon fiberreinforced additive manufacturing composites, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 126 (2023) 2617-2631.
- [5] E.J. Barbero, F.A. Cosso, X. Martinez, Identification of fracture toughness for discrete damage mechanics analysis of glass-epoxy laminates, Applied Composite Materials, 21 (2014) 633-650.

نشریه مهندسی مکانیک امیر کبیر



نشریه مهندسی مکانیک امیرکبیر، دوره ۵۶، شماره ۱۱، سال ۱۴۰۳، صفحات ۱۵۷۵ تا ۱۵۹۰ DOI: 10.22060/mej.2025.23731.7806

اثرات سرعت بارگذاری و جهت انتشار ترک بر چقرمگی شکست بین لایهای در کامپوزیتهای پایه پلیمری: یک مطالعه تحلیلی و تجربی

علیرضا سرتیپی اصفهانی، احمدرضا قاسمی

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه کاشان، کاشان، ایران.

تاریخچه داوری: دریافت: ۱۴۰۳/۰۹/۱۶ بازنگری: ۱۴۰۳/۱۱/۲۵ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۲/۱۰ ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۱۲/۲۳

کلمات کلیدی: چقرمگی شکست ترک عرضی شکست بین لایهای خمش سه نقطهای کامپوزیت پایه پلیمری

خلاصه: در این تحقیق اثرات جهت انتشار ترک و سرعت بارگذاری در مود اول شکست بر روی چقرمگی شکست به شکل تحلیلی و تجربی مطالعه شده است. در مود اول بازشوندگی دهانه ترک چیدمان الیاف در دو حالت متفاوت بررسی شده و انتشار ترک در جهت موازی با الیاف و عمود بر جهت الیاف آزمایش شده است. برای انجام آزمونهای خمش سه نقطهای، نمونههای آزمایشی مطابق با استاندارد طراحی و ساخته شدند. هدف از انجام آزمایش بارگذاری و اندازه گیری چقرمگی شکست در جهات مختلف انتشار و رشد ترک نسبت به زاویه الیاف میباشد. علاوه بر این، مجموعهای از نمونههای تیر یک سر گیردار دو لبه با اعمال تغییر زاویه بارگذاری نسبت به راستای فیکسچر مورد بررسی قرار گرفتند. درصد تغییرات چقرمگی شکست بین لایهای در آزمایشهای یک سر گیردار دولبه و خمش سه نقطهای عرضی و خمش سه نقطهای طولی به ترتیب ۵/۵٪، ۶/۵ ٪ و ۳۹/۳٪ میباشد. این تغییرات نشان میدهد نقطهای به دلیل ضخامت نمونهها مقدار کمتری دارد. نتایج نشان میدهد چقرمگی شکست بین لایهای در آزمایشهای یک سر گیردار استاندارد مراحی و منهای عرضی و خمش سه نقطهای طولی به ترتیب ۵/۵٪، ۶/۵ ٪ و ۳۹/۳٪ میباشد. این تغییرات نشان میدهد اعتیان می حضی میباشد. این تعلیمان میده مولی به ترتیب ۵/۵٪، ۱۵ م ی و تمی این این میان میلی میست به نمونههای عرضی و خمش سه نقطهای عرض می میاند. این تغییرات نشان میدهد مولبه و خمش سه نقطهای عرضی و خمش سه نقطهای طولی به ترتیب ۵/۵٪، ۵/۵ ٪ و ۳۹/۳٪ میباشد. این تغییرات نشان میدهد مه تقطهای به دلیل ضخامت نمونهها مقدار کمتری دارد. نتایج نشان میدهد چقرمگی شکست بین لایه می هنگامی که ترک به موازات الیاف رشد می کند بسیار بیشتر از زمانی است که ترک در جهت عمود بر الیاف رشد مینماید. در ادامه دلایل فیزیکی این نتایج تجربی مورد بحث قرار گرفته است.

۱- مقدمه

مواد کامپوزیتی تقویتشده با الیاف بهطور فزایندهای در بخشهای ساختاری و کاربردهای با تکنولوژی بالا که که در آن ها کاهش وزن اهمیت زیادی دارد، استفاده میشوند. در برخی از صنایع مانند هوافضا و کشتیسازی، مواد کامپوزیتی بطور چشمگیری استفاده میشود. طراحی قطعات سازهای در این صنایع از رویکرد مقاوم در برابر آسیب و شکست پیروی میکند، که این رویکرد نیازمند دانش عمیق مکانیک شکست است. ویژگی اصلی ماده که حساسیت به وجود ترک را اندازهگیری میکند، چقرمگی شکست است که آزمایشهای استانداردشده و فرمول بندی آن در فازات وجود دارد. در کامپوزیتها، علم مکانیک شکست پیچیدهتر است، زیرا چقرمگی شکست بهشدت به جهت انتشار ترک در رابطه با ریزساختار اجزای تشکیل دهنده ماده این شکستها بهصورت ترک یا لایهلایه شدن بدون شکستن ایاف شروع

میشوند. بدین ترتیب، یکی از ویژگیهای اصلی شکست در کامپوزیتها، چقرمگی شکست عرضی است، یعنی چقرمگی شکست برای یک ترک که از طریق ماتریس یا رابط الیاف- ماتریس بدون شکستن الیاف منتشر می شود، معمولاً توسط بارهای عمود بر الیاف (یعنی عرضی) ایجاد می شوند.

برخی از آزمایش های استانداردشده، نتایج قابل اعتمادی را برای چقرمگی شکست در مود اول که به حالت I موسوم است، ارائه می دهند، [۲–۱] که به طور گسترده در صنایع مختلف استفاده می شوند. این آزمایش های استاندارد در واقع چقرمگی شکست را هنگامی که ترک به موازات جهت الیاف و بین دولایه منتشر می شود، با استفاده از یک نمونه تیر یک سر گیردار دولبه اندازه گیری می کنند. با این حال، این تنها چقرمگی شکست عرضی در مود اول شکست نیست [۳]، بلکه اصلاح شده است تا مطابق با استانداردهای ASTM ISO که با مقادیر انتشار ترک بدون شکست الیاف مطابقت دارد، دور از واقعیت است. در شکل ۱ چقرمگی های شکست بین لایه ای مختلف عرضی و طولی،

^{*} نویسنده عهدهدار مکاتبات: Ghasemi@kashanu.ac.ir



شکل ۱. نمایش چقرمگی شکست عرضی و طولی به صورت لایه لایه ای

Fig. 1. Showing transverse and longitudinal fracture toughness in a layered manner

در یک المان به صورت کلی نشان داده شده است.

ASTM استفاده از استاندارد ISO 15024 و استاندارد ASTM اندارد ISO 15024 اندازه گیری می شود [۲–۱]؛ در واقع چقرمگی شکست بین لایه ای طولی است. اگر ترک بین لایه ها عمود برجهت الیاف رشد کند، چقرمگی شکست بین لایه ای عرضی را خواهیم داشت. ترک همچنین می تواند با پیروی از جهت های موازی یا عمود بر الیاف در سراسر لایه ها رشد کند، که چقرمگی شکست مربوطه را به ترتیب به عنوان چقرمگی شکست طولی و عرضی در نظر گرفته می شود. از انواع چقرمگی شکست، تنها چقرمگی شکست طولی بین لایه ای معمولاً با استفاده از استانداردها اندازه گیری می شود، زیرا در بقیه حالات، در هنگام ساخت نمونه یا در هنگام آزمایش مشکلات زیادی ایجاد می گردد. به عنوان مثال، برای اندازه گیری میزان مقاومت سطح کامپوزیت و شکست بین لایه ای عرضی، نمونه های

طول انجام آزمایش، ترک تمایل به انحراف در ضخامت قطعه دارد و منجر به شکست زودرس نمونه می شود. وجود لایه نازک رزین و امکان ایجاد پدیده پل زنی هنگام اندازه گیری چقرمگی شکست بین لایه ای طولی، باعث می شود انحراف ترک در ضخامت قطعه مهار گردد.

ترکهای عرضی که در امتداد جهتهای متفاوت از آنچه در آزمایشهای استاندارد فرض می شود منتشر می شوند، بسیار رایج هستند. به عنوان مثال، مدلهایی برای پیش بینی شروع ترکهای عرضی [۹–۵] یا تکامل ترکهای عرضی [۱۳–۱۰] ارایه شدهاند که به مقادیر چقرمگیهای شکست نیاز دارند که از آنچه با استفاده از آزمایش های استاندارد شده به دست می آید، مطابقت ندارد. علاوه بر این، مقادیر چقرمگی شکست عرضی برای برخی از مدل های شکست [۱۴] و مدل های آسیب [۱۷–۱۵]، مورد نیاز هستند.

از دهه ۱۹۸۰ به بعد، برخی آزمایش ها برای مقایسه (معمولا دو نمونه) چقرمگی شکست متفاوت از آنچه در شکل ۱نشان داده شده است، انجام

شده است. چقرمگی شکست بین لایهای طولی، بهصورت آزمایشی توسط لی [۱۸] با استفاده از نمونههای تیر دو سرگیردار و تیر شیبدار دوگانه مطالعه شد که مقدار بسیار مشابهی را برای دو چقرمگی شکست طولی برای شروع گزارش شده است. گارگ [۱۹] مقایسه مشابهی را با استفاده از نمونههای کشش فشرده و تیر دو سر گیردار انجام داد و مقدار بالاتری از چقرمگی شکست بین لایهای را برای شروع ترک تعیین کرده است. علاوه بر این، او تأثیر بالایی از دما و رطوبت را بر مقادیر اندازه گیری شده چقرمگی شکست یافت. همچنین، این اثر برای مقادیر بین لایهای و شکست بین لايهاى كامپوزيت به دليل ارتباط متفاوت الياف- ماتريس و استحكام و چقرمگی رزین در شکست ماتریس، همراه با حساسیتهای متفاوت آنها به دما و رطوبت، مطالعه شده و نتایج ارایه شده است. کولی [۲۰] و بیمونت [۲۱] برای شروع و انتشار ترک، نشان دادند این اثر حتی با تمایلات متضاد به چندین پارامتر آزمایشی پیچیدهتر است. هاین و همکاران [۲۴–۲۲] دو چقرمگی شکست طولی را با استفاده از نمونههای تیر یک سر گیردار دو لبه³ و خمش سهنقطهای ^۴ مقایسه کردند. در دیگر مراجع [۳۲–۲۵] تفاوت بین دو چقرمگی شکست طولی مورد مطالعه قرار گرفته و چندین روش ساخت را برای رشد ترک، آزمایش شده و به این نتیجه رسیدند که دو چقرمگی شکست طولی کاملاً مشابه هستند. مقایسه بین چقرمگی شکست برای شروع توسط پینهو و همکاران انجام شد [۳]. آنها مقدار چقرمگی شکست بین لایهای عرضی را با استفاده از نمونههای یک سر گیردار دولبه و خمش چهار نقطه⁵ مقایسه کردند، و مقادیر بسیار مشابهی را برای هر دو چقرمگی شكست یافتند و به ارتباط روش مورد استفاده اشاره كردند.

عدم اجماع در مورد شباهت بین دو چقرمگی شکست طولی برای انتشار ترک میتواند تا حدی به دلیل تأثیر پدیده پل زدن الیاف باشد. هنگامی که یک ترک بین الیاف منتشر میشود، بسیار معمول است که برخی از الیاف را یافت که به صورتهای ترک میپیوندند. از این نظر، محققان [۲۶] یک مدل میکرومکانیکی را برای در نظر گرفتن اثر پل زدن الیاف در اندازه گیری چقرمگی شکست پیشنهاد کردند. همان طور که توسط ایواموتو و همکاران [۲۷] اشاره شده است، این تأثیر میتواند بسیار با شکست بین لایهای و لایه لایه شدن کامپوزیتها مرتبط باشد. دی مورا و همکاران [۲۸] برای انتشار ترک، انرژی ذخیره شده در الیاف را با بریدن الیاف در طول آزمایش

- 2 WT: Double Width Tapered
- 3 DCB: Double Cantilever Beam
- 4 TPB: Three Point Bending
- 5 Four Point Bending

اندازهگیری نمودند.

مقایسه بین چقرمگیهای شکست بین لایهای کامپوزیتها، توسط پاپاس و بوتسیس مشاهده شد [۲۹]؛ و فروسارد و همکاران [۳۰] دریافتند که مقایسه بین دو چقرمگی شکست طولی میتواند برای مراحل شروع و انتشار ترک متفاوت باشد. صفی پور و حشمتی [۳۳] جدایش بین لایهای ورقهای کامپوزیتی موجدار ساخته شده از الیاف شیشه تک جهته و رزین پلیاستر مورد بررسی قرار دادند، که نشان میدهد ورقهای موجدار در مقایسه با ورقهای تخت، از مقاومت به رشد ترک بالاتر، نرخ انرژی کرنشی آزاد شده و چقرمگی شکست بین لایهای بیشتری برخوردارند.

در پدیده ترک عرضی (ترکهای عرضی که در لایههای خارج از محور ظاهر می شوند و معمولا در لایههای چندجهته نیز ظاهر می شوند) رشد ترک مطابق با موقعیتهایی است که در شکل ۱ به عنوان چقرمگی شکست بین لایه ای طولی و شکست بین لایه ای عرضی نشان داده شده است. در مرخی از مدلها، به عنوان مثال، مدل دووارک و لاوز [۵]، عدم شباهت بین مقادیر چقرمگی شکست در جهات مختلف انتشار ترک که می تواند پیامدهای مرتبطی را بر پیش بینی ها متضمن باشد، نشان می دهد. برای جلوگیری از هرگونه تأثیر آزمایش، دو مقدار چقرمگی شکست با استفاده از یک آزمایش ارزیابی می شوند. آزمون خمش سه نقطه ای برای مقایسه با آزمون های تیر یک سر گیردار دولبه با استفاده از استاندارد [1] ISO 15024 انجام می شود؛ و در آخر هم اثر سرعت در حالته ای مختلف چقرمگی شکست بین

در این تحقیق، اثرات سرعت بارگذاری، جهت الیاف و آزمایشهای متفاوت خمش سه نقطهای و تیر یک سرگیردار دو لبه بر روی چقرمگی شکست مطالعه شده است. برای این منظور ابتدا، نمونههای متفاوت و متعدد مطابق استاندارد برای انجام آزمایشهای مختلف به روش چیدمان دستی ساخته شده است. سپس آزمایشهای متفاوت تیر یک سر گیردار دولبه، خمش سه نقطهای عرضی و خمش سه نقطهای طولی با سرعتهای مختلف انجام گرفته و نتایج تحلیل شده است. در پایان با مقایسه نتایج با نتایج منتشر شده توسط دیگران به ارزیابی و مقایسه نتایج پرداخته شده است.

۲- ساخت نمونه

در این بخش طراحی و ساخت نمونههای به کار رفته در این تحقیق تشریح می گردد. همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است از دو نوع نمونه استفاده شده است. نمونه های تیر یک سر گیردار دو لبه، نمونه ای است

¹ DT: Double Torsion



(الف)



شکل ۲. طرح اَزمایش های انجام شده. (الف) اَزمون کشش تیر یک سر گیردار دولبه برای چقرمگی شکست بین لایهای طولی. (ب) خمش سهنقطهای برای چقرمگی شکست بین لایهای طولی. (ج) خمش سهنقطهای برای چقرمگی شکست بین لایهای عرضی.

Fig. 2. Design of the experiments performed. (a) Double-sided single-ended beam tensile test for longitudinal interlaminar fracture toughness. (b) Three-point bending for longitudinal interlaminar fracture toughness. (c) Three-point bending for transverse interlaminar fracture toughness.

گرفته و تحت یک جابجایی عمودی اجباری در مرکز مانند شکل ۲– ب و ۲– ج قرار می گیرد. در بخش مرکزی نیز، یک ترک ایجاد می شود، که تحت شرایط بارگذاری مود اول شکست دهانه ترک باز می شود. ساخت این نمونه به مواد بیشتری نسبت به نمونه قبلی نیاز دارد، زیرا هیچ یک از ابعاد نمی تواند بهاندازه ضخامت در نمونههای تیر یک سرگیردار دو لبه باشد. علاوه بر این، طول مواد جلوتر از نوک ترک بسیار کوتاهتر از نمونههای تیر یک سرگیردار دو لبه است، که اندازه گیری پیشروی ترک را در طول آزمایش دشوارتر می کند. این موضوع برای تخمین دقیق چقرمگی شکست کلیدی است. درواقع مزیت این نمونه همین است. در شکل ۲ انواع ترکها بر روی نمونههای اصلی نشان داده شده است که قرار است با کمک تست تیر یک سرگیردار دو لبه و خمش سهنقطهای، اطلاعات کامل در مورد ترک آشکار شود. که در اکثر استانداردها برای اندازه گیری چقرمگی شکست کامپوزیتها استفاده می شود. نمونه توسط یک چندلایه نسبتاً نازک و یک طرفه با شکاف عمود (ترک) برجهت ضخامت تشکیل شده است، در شکل ۲– الف، این ترک معمولا با قرار دادن یک لایه بسیار نازک نچسب در داخل چندلایه و در وسط ضخامت، قبل از فرآیند پخت ایجاد می شود. نمونه در انتهای خود و در جایی که ترک ایجادشده، بارگذاری می شود و دهانه ترک ایجاد می شود. رشد ترک پایدار است که اجازه می دهد چندین اندازه گیری چقرمگی شکست برای هر نمونه به دست آید.

نمونههای خمش سهنقطهای، بهطور گستردهای در مواد شکننده و شبه شکننده، مانند بتن یا پلیمرها استفاده می شود. نمونه مورد نظر اساساً یک تیر مستطیلی شکل است که به سادگی در دو قسمت انتهایی برروی تکیه گاه قرار



شکل ۳. ساخت و آماده سازی نمونههای آزمایشی از ورقهای چندلایه کامپوزیتی. (الف) چندلایه برای یک ترک بین لایهای که بهموازات جهت الیاف رشد می کند. (ب) چندلایه برای یک ترک بین لایهای که عمود برجهت الیاف رشد می کند.

Fig. 3. Construction and preparation of test specimens of laminated composite multilayer plates. (a) Multilayer for an interlayer crack growing parallel to the fiber direction. (b) Multilayer for an interlayer crack growing perpendicular to the fiber direction.

در شکل ۳ چگونگی ساخت و آماده سازی نمونههای آزمایشی از ورقههای چندلایه کامپوزیتی نشان داده شده است. چند لایهها، به گونهای طراحی شدهاند که نمونههای آزمایشی دارای ابعاد ۱۵۰*۱۰*۱۹ میلی متر و پیش ترک به طول ۱۰ میلی متر می باشند.

نمونههای کامپوزیتی از چندلایه کربن/ اپوکسی با پیش ترک موازی با جهت الیاف ساخته شده است که در شکل ۳–الف نشان داده شده است. فرآیند چیدمان لایهها به دنبال روشی که در نمونههای تیر یک سرگیردار دو لبه استفاده می شود، یعنی به صورت چیدمان دستی و سپس اینفیوژن و ایجاد خلاء اجرا می شود. پس از اتمام فرآیند، نمونه چندلایه با استفاده از تیخ، برش داده می شود تا از شکستن الیاف جلوگیری شود. در حین چیدمان لایهها، یکلایه فلزی با انتهای تیز که با یکلایه نازک نچسب (قابلیت چسبیده نشدن) به ضخامت ۱۲ میکرومتر پیچیده شده است، را برای جلوگیری از چسبندگی در بین لایههای کامپوزیتی قرار داده می شود. این لایه نازک نچسب به عنوان پیش ترک نمونه خواهد بود.

برای جلوگیری از انحنای نمونه در حین پخت و ایجاد ترکهای ریز در ماتریس، یک تکیهگاه همانند آنچه در شکل ۳-الف نشان داده شده است، برای لایه فلزی طراحی شد، که در نتیجه نمونههایی با ترکهای خوب

فراهم گردید. نتایج ارائهشده در اینجا با آخرین مجموعه نمونه مطابقت دارد، که دارای ترکهای کاملاً مستقیم و عمود بر هم هستند.

نمونههای کامپوزیتی برای استخراج نتایج پیش ترک در جهت عمود برجهت الیاف در شکل ۳–ب نشان دادهشده است. فرآیند ساخت نمونهها مطابق روش مورد استفاده در نمونههای قبلی انجام شده است. یک تکیهگاه برای جلوگیری از هرگونه حرکت لایه فلزی ساخته شد، که در شکل ۳–ب آمده است.

هنگامی که نمونههای چندلایه کامپوزیتی در آون خلاء پخت شدند، با یک اره دیسکی الماسی با ابعاد مخصوص و مطابق استاندارد به دقت برش داده میشوند. در شکل ۳ میتوان مشاهده کرد که جوهر سفید در ناحیهای که پیش بینی می شود ترک رشد کند، رنگ آمیزی شد.

۳- روش انجام أزمايش

روش آزمایش مورد استفاده در این تحقیق برای هر دو سری از نمونهها توضیح داده شده است. برای نمونههای آزمایش تیر یک سرگیردار دو لبه و نمونههای آزمایش خمش سه نقطهای، روش ارائهشده در استاندارد -ISO 15024 [۱] مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۴. منحنیهای نیرو (نیوتن)- جابجایی (میلیمتر) بهدست آمده از چرخه بار گذاری برای نمونه های آزمون DCB



۳- ۱- آزمایش نمونههای تیر یک سرگیردار دو لبه

نمونههای تیر یک سرگیردار دو لبه مطابق با استاندارد مورد آزمایش قرار گرفتند. در این آزمایش از دستگاه تست الکترومکانیکی با یک لودسل ۵ کیلو نیوتن استفاده شده است. نمونهها با استفاده از سیستم لولای تیر بستهشده جانبی که در استاندارد آمده است، به دستگاه آزمایش متصل شدند [۳۱]. این آزمون شامل ۸ نمونه آزمایش (S1,.....,S8) میباشد، که با میزان نرخ بارگذاری یکسان آزمایش گردیدهاند. در طول فرآیند آزمایش، نمونههای بارگذاری یکسان آزمایش گردیدهاند. در طول فرآیند آزمایش، نمونههای فرآیند تحلیل حذف شدند.

زمانی که نمونهها بهدرستی و مطابق با استاندارد در دستگاه آزمایش متصل شدند، آزمایش با جابجایی فک به شکل استاتیکی انجام گرفت. بار یکنواخت اولیه، با تنظیم نرخ جداسازی فیکسچر، به میزان ۰/۵ میلیمتر در دقیقه اعمال شد. در طول اولین مرحله بارگذاری، پیشروی ترک بهصورت چشمی ردیابی شد. پس از آن، جداسازی بار برای هر نمونه بهطور کامل با سرعت ۰/۲۵ میلیمتر در دقیقه انجام شد. سپس در چرخه بارگذاری دوم، نمونهها مجدداً با سرعت ۰/۵ میلیمتر در دقیقه بارگذاری شدند و مقدار نیرو،

جابهجایی و میزان پیشروی ترک ثبت شد. لازم به ذکر است که آزمون تیر یک سرگیردار دو لبه برای ۸ عدد نمونه انجام شد که تاثیرات نرخ بارگذاری بر روی چقرمگی شکست بین لایهای طولی را نشان میدهد.

شکل ۴ منحنیهای نیرو-جابجایی مربوط به چرخه بارگذاری برای نمونهها را نشان میدهد. همچنین اطلاعات دقیق میزان چقرمگی شکست نمونهها در آزمایشهای تیر یک سر گیردار دو لبه و میانگین کلی میزان چقرمگی شکست بین لایهای در جدول ۱ آورده شده است.

۳- ۲- آزمایش نمونههای خمش سه نقطهای

نمونههای خمش سه نقطهای توسط دستگاه آزمایشی الکترومکانیکی با لودسل ۵ کیلو نیوتن که در شکل ۵–الف و ۵– ب نشان داده شده است، آزمایش شدهاند. یک فیکسچر استاندارد برای آزمایش خمش سهنقطهای در دستگاه آزمایش نصب شده است.

برای آزمایش نمونههای خمش سه نقطهای، میزان بارگذاری با الهام از آزمایش نمونههای تیر یک سر گیردار دو لبه اعمال شده است. بهمنظور





(الف)



(ج)

شکل ۵. نمونههایی از تنظیمات آزمایشی. (الف) آزمون TPB برای ترک بین لایهای طولی. (ب) آزمون DCB برای ترک بین لایهای عرضی، (ج) نمونه های آزمایشی آزمون های DCB و TPB



دوم، رشد ترک پایدار مشاهده می شود. رشد پایدار، اجازه می دهد تا پیشروی و انتشار ترک ردیابی شود. هم چنین غیرخطی بودن نتایج را می توان برای سطوح با میزان بار پایین مشاهده کرد. غیرخطی بودن نتایج با هیچ رویداد آسیبی مرتبط نیست، بلکه با تماس اولیه بین نمونه ها و غلتک ها مرتبط است. شکل ۶-ب و ۶-ج منحنی های جابجایی-نیرو را نشان می دهد که مربوط به مرحله بار نهایی برای نمونه هایی است که آزمایش آن ها ارزیابی شده است. در آزمایش های خمش سه نقطه ای، برای آزمون خمش سه نقطه ای بین لایه ای طولی نمونه های (S3, S4, S7) قادر به ارزیابی مقدار چقرمگی شروع رشد ترک، از پیش ترک اولیه با نرخ جداسازی ثابت بارگذاری به میزان ۲/۰ میلیمتر در دقیقه اعمال شده است. سپس، زمانی که یک ترک واقعی در نمونه ایجاد میشود، بارگذاری با سرعت ۵/۰ میلیمتر در دقیقه تخلیه میشود. پس از آن، نمونه، مجددا با سرعت ۲/۰ میلیمتر در دقیقه تحت بارگذاری قرار داده میشود. لازم به ذکر است که برای آزمون خمش سه نقطهای بین لایهای طولی، تعداد ۸ نمونه (S1,....,S2)، مورد آزمون قرار گرفته شده است، که شکل ۶-الف منحنیهای نیرو-جابجایی را برای نمونه با ترک بین لایهای طولی و عرضی نشان میدهد. در طول چرخه بارگذاری



1		<i>د</i> .
	A1	11
16	~	.,,



(ب)

شکل ۶. منحنیهای نیرو (نیوتن) - جابجایی (میلیمتر) بهدستآمده در طول آزمایشها. (الف) چرخه بار گذاری (بار گذاری اولیه و بار گذاری ثانویه) برای نمونه با ترک بین لایهای طولی و عرضی (ب) بار نهایی برای نمونههای خمش سه نقطه ای بین لایهای طولی. (ج) بار نهایی برای نمونههای خمش سه نقطه ای بین لایهای هارد)

Fig. 6. Force (N) – displacement (mm) curves obtained during the tests. (a) Loading cycle (primary loading and secondary loading) for the specimen with longitudinal and transverse interlaminar cracks (b) Ultimate load for longitudinal interlaminar three-point bending specimens. (c) Ultimate load for transverse interlaminar three-point bending specimens(Continued)



شکل ۶. منحنیهای نیرو (نیوتن) – جابجایی (میلیمتر) بهدست آمده در طول آزمایشها. (الف) چرخه بارگذاری (بارگذاری اولیه و بارگذاری ثانویه) برای نمونه با ترک بین لایهای طولی و عرضی (ب) بار نهایی برای نمونههای خمش سه نقطه ای بین لایهای طولی. (ج) بار نهایی برای نمونههای خمش سه نقطه ای بین لایهای عرضی

Fig. 6. Force (N) – displacement (mm) curves obtained during the tests. (a) Loading cycle (primary loading and secondary loading) for the specimen with longitudinal and transverse interlaminar cracks (b) Ultimate load for longitudinal interlaminar three-point bending specimens. (c) Ultimate load for transverse interlaminar three-point bending specimens

در برخی نمونههای دیگر، هنگام پیشروی و ردیابی رشد ترک، وجود پل زدن الیاف بزرگ، شناسایی نوک ترک آنی را غیرممکن کرد و درنتیجه، محاسبه طول ترک آنی را غیرممکن ساخت. باید خاطر نشان کرد که در آزمایش با نمونههای خمش سه نقطهای، اغلب اوقات میتوان نوک ترک را باوجود جدایش الیاف، ردیابی کرد. البته جداسازی بین وجههای ترک در آزمایش نمونههای خمش سه نقطهای، بسیار کوچکتر از نمونههای آزمایش تیر یک سر گیردار دو لبه است.

پس از مشاهده نمونهها، مشخص گردید که تغییرات جزئی در تراز بین ترک و بار منجر به جدایش الیاف شده است. این ناپیوستگی باعث می شود که ترک اگر صرفاً زیر بار هم نباشد، تحت تأثیر تنش برشی قرار گیرد. علاوه بر این، اگر ناحیه رشد ترک به طور مساوی تحت تأثیر تنش برشی قرار نگیرد، شکست بین لایهای شدند، در حالیکه برای آزمون خمش سه نقطهای بین لایهای عرضی نمونههای (S1, S4, S5, S6, S7) قابل ارزیابی و محاسبه چقرمگی شکست گردیدند. هم چنین میتوان مشاهده کرد که میزان چقرمگی شکست اولیه در این مرحله از بار نهایی نسبت به بار ثانویه، بهطور قابل توجهی متفاوت است. دلیل این است که چقرمگی شکست بهشدت به طول ترک در زمان رشد، بستگی دارد. با این حال، این موضوع بر تخمین میزان چقرمگی شکست تأثیر نمیگذارد، زیرا این میزان بر اساس مساحت بدست آمده ناحیه زیر نمودار خواهد بود.

در برخی از نمونهها، اولین رشد ترک از زمان پیش ترک، بسیار ناپایدار بوده است و طول ترک تقریباً به ضخامت کل تیر رسید. بنابراین، این نمونهها غیر قابل قبول بودند، زیرا هیچ رشد ترک ناپایداری را نمی توان ردیابی کرد.

پیشروی و رشد ترک میتواند بهطور قابل توجهی باعث از هم گسیختگی نمونهها و شکست نمونهها گردد.

میان رشد ترک و نرخ بارگذاری، در روش آزمایش خمش سه نقطهای، نتایج رضایت بخشی اعم از روند رشد ترک و میزان چقرمگی شکست بین لایهای در اکثر نمونهها به دست آمد. در این تحقیق، چقرمگی شکست به روشی مشابه آنچه برای نمونههای آزمایش تیر یک سر گیردار دو لبه تشریح گردید، به دست آمده و در ادامه به تفصیل شرح داده شده است.

۳– ۳– محاسبه چقرمگی شکست

در این تحقیق از روش محاسبه مساحت سطح زیر نمودار برای تخمین میزان چقرمگی شکست با استناد بر نتایج آزمایشی استفاده می شود. این روش به جهت اینکه نیازی به فرض رفتار مکانیکی نمونه ها ندارد، انتخاب شده است. این روش بر اساس کار نیروهای خارجی یعنی نیروها و جابه جایی هایی که مستقیماً توسط دستگاه آزمایش اندازه گیری می شوند و بر اساس مقدار لحظه ای طول ترک بنانهاده شده است.

روش محاسبه مقدار چقرمگی شکست بر اساس محاسبه انرژی تلفشده در طول چرخه مجازی میباشد که شامل: ۱) بار مجازی، ۲) رشد ترک و ۳) تخلیه بار مجازی است. فرض بر این است که بارهای مجازی و تخلیه بارها به دنبال یک رفتار جابهجایی خطی رخ میدهند. باید خاطرنشان کرد که انرژی تلف شده با ناحیه مورد شکست مطابقت دارد.

در یک چرخه مجازی نسبت انرژی تلفشده به سطح ترک بوجود آمده، چقرمگی شکست را نتیجه میدهد. جدول ۱ میزان انرژی تلف شده برای هر نمونه را نشان میدهد. محاسبه دقیق سطح زیر منحنی برای تعیین ضریب چقرمگی، تا حدودی پیچیده است. اگرچه، با تقسیم سطح زیر منحنی به اشکال هندسی کوچکتر، میتوان یک تخمین مناسب از مقدار این ضریب را به دست آورد. به منظور محاسبه چقرمگی شکست، فرض شده است که مقدار انرژی کرنشی ماده کامپوزیت در آستانه شروع رشد ترک در بارگذاریهای مختلف برابر با انرژی کرنشی مورد نیاز برای وقوع منحنی بار– جابهجایی آزمون شکست قطعات تحت بارگذاری تا نقطه بیشینه توسط نرم افزار محاسبه شده و برابر با مساحت زیر نمودار بار– جابهجایی ماده تا لحظه شکست میباشد. بدین ترتیب، مقدار بار بیشینه در منحنی بار– جابهجایی ماده کامپوزیت را میتوان محاسبه کرد که مقادیر آن برای

نمونههای ازمایش شده در جدول آمده است. با توجه به ویژگی پایداری رشد ترک، این روش را میتوان چندین بار برای هر نمونه تکرار کرد. مقایسه بین مقادیر مختلف انرژی تلف شده برای یک نمونه، نشانه دقت اندازه گیری است. درنهایت، مقدار میانگین تصحیح شده تمام چرخههای مجازی برای هر نمونه بهعنوان چقرمگی شکست نمونه نتیجه میدهد. نتایج برای نمونههای تیر یک سر گیردار دو لبه (مطابق با رشد ترک بین لایهای بهموازات جهت الیاف)، ضریب تغییرات پایینی را نشان میدهد. این نتایج بر اساس استاندارد [۱] است و بهعنوان مرجع در نظر گرفته خواهد شد. مقدار متوسط چقرمگی شکست مطابق با مقادیر گزارششده توسط سایر نویسندگان برای این ماده است، به عنوان مثال رنارت و همکاران [۳۱]، مقدار چقرمگی انتشار ترک را بین ۲۷۰ تا ۲۹۰ ژول بر مترمربع گزارش دادهاند. نتایج برای نمونههای خمش سەنقطەاى، علىرغم اين واقعيت كە دقت مشاھدە پيشروى رشد ترک به دلیل کوتاه بودن مسیر ترک، چندان بالا نیست، ولی در کل ضریب تغییرات پایینی را نشان میدهد. علاوه بر این، ضریب تغییرات برای آزمایش خمش سه نقطهای عرضی کمتر از آزمایش های تیر یک سر گیردار دو لبه است و برای آزمایش خمش سه نقطهای طولی تقریبا مشابه آزمایشهای تیر یک سر گیردار دو لبه است. از آنجایی که ضریب تغییرات برای نمونه آزمایش های تیر یک سر گیردار دو لبه را می توان یک مرجع در نظر گرفت، نتایج برای آزمایش خمش سه نقطهای طولی و عرضی را میتوان رضایت بخش توصیف نمود.

نتایج اعم از (میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات انرژی تلف شده) بهدستآمده برای انواع آزمایش چقرمگی شکست، در جدول ۱ ارائه شده است. این جدول فقط نتایج را برای نمونه هایی که آزمایش آن ها معتبر نمونه شده است و نمونه هایی که اطمینان کمی در مورد پیشروی رشد ترک داشتند، از چرخه محاسبات حذف شده اند. مقدار میانگین چقرمگی شکست بین لایه ای در آزمایش های تیر یک سرگیردار دو لبه و خمش سه نقطه ای عرضی و خمش سه نقطه ای طولی به ترتیب ۲۸۲/۲۹، ۲۸٪ ۸/۸۶ و ۹۹/۱۶ آزمایش های تیر یک سرگیردار تو لبه و خمش سه نقطه ای می باشد، که درصد تغییرات چقرمگی شکست بین لایه ای در آزمایش های تیر یک سرگیردار دو لبه و خمش سه نقطه ای در منتی از مین می می باشد، که درصد تغییرات می می شکست بین لایه ای در منهان می دهد که تفاوت بین چقرمگی شکست در منطقه ای عرضی و خمش نشان می دهد که تفاوت بین چقرمگی شکست در منطقه رشد ترک برای نمونه های آزمایش تیر یک سرگیردار دو لبه نسبت به نمونه های خمش سه نقطه ای به دلیل ضخامت نمونه ها مقدار کمتری دارد.

۴- نتیجه گیری

در این تحقیق اثرات بارگذاری در مود اول شکست بر روی چقرمگی شکست با روش تحلیلی مطالعه شده و با انجام آزمایشهای مختلف در سرعت بارگذاری مختلف، صحه گذاری گردیده است. نتایج نشان می دهد که مقدار به دست آمده توسط آزمونهای تیر یک سرگیردار دو لبه بین لایه ای طولی برای اندازه گیری چقرمگی شکست کمتر از سایر آزمایشهای دیگر است. عامل اصلی تاثیر بر نتایج، هندسه نمونه و عوامل فیزیکی همچون ناپایداری جهتی است، که باعث انحراف ترک در سراسر مرزهای لایه ای بالایی یا پایینی نمونه کامپوزیتی می شود. بنابراین، اگرچه ترک در نمونه آزمایش تیر یک سرگیردار دو لبه به دلیل وجود الیاف به طور قابل توجهی منحرف نمی شود، ولی ناپایداری جهتی باعث می شود که ترک کمی به مسیرهای مطلوب تر (ازنظر انرژی تلف شده) حرکت کند تا زمانی که هیچ الیاف شکسته نشده وجود نداشته باشد.

در نمونههای آزمایش خمش سه نقطهای وضعیت کاملاً متفاوت است، زیرا تمایل به دنبال کردن مسیر رشد ترک به دلیل گرادیان تنش بیشتر است. از نظریه اویلر-برنولی بهخوبی شناختهشده است که بیشترین بار در نمونههای خمش سه نقطهای بخش زیر رول مرکزی است. بنابراین، ترک تمایل به انتشار در سراسر مسیر مرکزی نمونه و درنتیجه انحرافات کوچک به دنبال مسیرهای مطلوبتر ازنظر اتلاف انرژی، دارد.

از دیگر عوامل تفاوت بین چقرمگی شکست بهدست آمده برای نمونههای آزمایش تیر یک سرگیردار دو لبه و خمش سه نقطهای، منطقه رشد ترک کوچکتر برای نمونههای تیر یک سرگیردار دو لبه به دلیل ضخامت نمونهها است. در مقابل، نمونههای خمش سه نقطهای، ابعاد بزرگی دارند، تا یک منطقه کاملاً توسعهیافته انتشار ترک را بوجود آورند. در این منطقه، اتلاف انرژی، تاثیر مستقیم بر اندازه گیری و میزان چقرمگی شکست می گذارد. این واقعیت سبب می شود که میزان چقرمگی شکست نمونههای آزمایش خمش سه نقطهای نسبت به نمونههای آزمایش تیر یک سرگیردار دو لبه بیشتر محاسبه شود. درصد تغییرات چقرمگی شکست بین لایهای در آزمایش های محاسبه شود. درصد تغییرات چقرمگی شکست بین لایهای در آزمایشهای می محاسبه شود. درصد تغییرات چقرمگی شکست بین لایه مای در آزمایشهای ازمایش تیر یک سرگیردار دو لبه و خمش سه نقطهای عرضی و خمش سه نقطه ای می دهد که تفاوت بین چقرمگی شکست به دست آمده برای نمونههای آزمایش تیر یک سرگیردار دو لبه و خمش سه نقطه ای، در منطقه رشد ترک کمتری دارد.

تفاوتهای یافت شده در مقادیر چقرمگی شکست از دیدگاه میکرو و مزو مکانیک نیز قابل توجه است. در سطح مزومکانیک، ترک منتشرشده در امتداد جهت الیاف نسبت به ترکی که عمود برجهت الیاف منتشر میشود، مهار بیشتری دارد. علاوه بر این، در سطح میکرومکانیک، مسیر ترک زمانی که ترک صرفا بین الیاف رشد میکند، متفاوت از آن که ترک به دنبال رابط الیاف– ماتریس منتشر میشود. همین عوامل موجب میشود که سرعت شکست در مودهای ترکیبی چقرمگی شکست بین لایهای در کامپوزیتها کاهش پیدا کرده و بهبود قابل توجهی پیدا کند.

تأییدیههای اخلاقی: این مقاله تاکنون در نشریه دیگری به چاپ نرسیده و همچنین برای بررسی یا چاپ به نشریه دیگری فرستاده نشده است.

تعارض منافع: مقاله حاضر هیچگونه تعارض منافعی با سازمان ها و اشخاص دیگر ندارد.

منابع

- ISO, Standard 15024, Fibre-reinforced Plastic Composites

 Determination of Mode I Interlaminar Fracture Toughness, G1C, for Unidirectionally Reinforced Materials, ISO, Geneva, Switzerland, (2001).
- [2] ASTM, D5528-13, Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, (2013).
- [3] S.T. Pinho, P. Robinson, L. Iannucci, Developing a fourpoint bend specimen to measure the mode I intralaminar fracture toughness of unidirectional laminated composites, Composites Science and Technology, 69(7-8) (2009) 1303-1309.
- [4] ASTM, E1922-04(15), Standard Test Method for Translaminar Fracture Toughness of Laminated and Pultruded Polymer Matrix Composite Materials, ASTM International, West Conshohocken, PA, USA, (2015).
- [5] A. Pupurs, M.S. Loukil, E. Marklund, J. Varna, D. Mattsson, Transverse crack initiation in thin-ply laminates subjected to tensile loading at low and cryogenic temperatures, Mechanics of Composite Materials, 59 (2024) 1049-1064.

(2007) 897-908.

- [15] E.J. Barbero, F.A. Cosso, X. Martinez, Identification of fracture toughness for discrete damage mechanics analysis of glass-epoxy laminates, Applied Composite Materials, 21 (2014) 633-650.
- [16] J. León-Becerra, M.Á. Hidalgo-Salazar, O.A. González-Estrada, Progressive damage analysis of carbon fiberreinforced additive manufacturing composites, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 126 (2023) 2617-2631.
- [17] J.C. Sosa, S. Phaneendra, J.J. Munoz, Modelling of mixed damage on fibre reinforced composite laminates subjected to low velocity impact, International Journal of Damage Mechanics, 22(3) (2013) 356-374.
- [18] S.M. Lee, A comparison of fracture toughness of matrix controlled failure modes: delamination and transverse cracking, Journal of Composite Materials, 20(2) (1986) 185-196.
- [19] A.C. Garg, Intralaminar and interlaminar fracture in graphite/epoxy laminates, Engineering Fracture Mechanics, 23(4) (1986) 719-733.
- [20] X. Huang, J.W. Gillespie Jr, R.F. Eduljee, Effect of temperature on the transverse cracking behavior of cross-ply composite laminates, Composites Part B: Engineering, 28(4) (1997) 419-424.
- [21] K.D. Cowley, P.W. Beaumont, The interlaminar and intralaminar fracture toughness of carbon-fibre/polymer composites: The effect of temperature, Composites Science and Technology, 57(11) (1997) 1433-1444.
- [22] P.J. Hine, B. Brew, R.A. Duckett, I.M. Ward, The fracture behaviour of carbon fibre reinforced poly (ether etherketone), Composites Science and Technology, 33(1) (1988) 35-71.
- [23] P.J. Hine, B. Brew, R.A. Duckett, I.M. Ward, Failure mechanisms in continuous carbon-fibre reinforced PEEK composites, Composites Science and Technology, 35(1) (1989) 31-51.
- [24] P.J. Hine, B. Brew, R.A. Duckett, I.M. Ward, Failure mechanisms in carbon-fibre-reinforced poly (ether

- [6] I.G. García, J. Justo, A. Simon, V. Mantič, Experimental study of the size effect on transverse cracking in crossply laminates and comparison with the main theoretical models, Mechanics of Materials, 128 (2019) 24-37.
- [7] X.Y. Miao, X. Chen, Structural transverse cracking mechanisms of trailing edge regions in composite wind turbine blades, Composite Structures, 308 (2023) 116680.
- [8] T. Miyakoshi, T. Atsumi, K. Kosugi, A. Hosoi, T. Tsuda, H. Kawada, Evaluation of very high cycle fatigue properties for transverse crack initiation in cross-ply carbon fiber-reinforced plastic laminates, Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 45 (2022) 2403-2414.
- [9] T. Xiang, W. Chen, Impact analysis of transverse isotropic freezing expansion in surrounding rock and variation of freezing front on cracks initiation, Computers and Geotechnics, 174 (2024) 106623.
- [10] T. Guo, K. Liu, R. Song, Crack propagation characteristics and fracture toughness analysis of rockbased layered material with pre-existing crack under semi-circular bending, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 119 (2022) 103295.
- [11] M. Kashtalyan, I.G. García, V. Mantič, Coupled stress and energy criterion for multiple matrix cracking in cross-ply composite laminates, International Journal of Solids and Structures, 139 (2018) 189-99.
- [12] J.W. Kim, J.M. Gardner, G. Sauti, R.A. Wincheski, B.D. Jensen, K.E. Wise, E.J. Siochi, Multi-scale hierarchical carbon nanotube fiber reinforced composites towards enhancement of axial/transverse strength and fracture toughness, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 167 (2023) 107449.
- [13] X. Yan, X. Guo, Y. Gao, Y. Lin, N. Zhang, Q. Zhao, Mode-II fracture toughness and crack propagation of pultruded carbon Fiber-Epoxy composites, Engineering Fracture Mechanics, 279 (2023) 109042.
- [14] P. Maimí, P.P. Camanho, J.A. Mayugo, C.G. Dávila, A continuum damage model for composite laminates: Part I–Constitutive model, Mechanics of Materials, 39(10)

composites, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 176 (2024) 107868.

- [30] F. Ramezani, R.J. Carbas, E.A. Marques, A.M. Ferreira, L.F. da Silva, A study of the fracture mechanisms of hybrid carbon fiber reinforced polymer laminates reinforced by thin-ply, Polymer Composites, 44(3) (2023) 1672-1683.
- [31] R. Rutar, J. Serra, Q. Bausiere, C. Bouvet, Experimental characterization of tensile and compressive translaminar fracture toughness coupling multi-physics measurements, Engineering Fracture Mechanics, 291 (2023) 109568.
- [32] M. Saeedifar, H. Hosseini Toudeshky, The effect of interlaminar and intralaminar damage mechanisms on the quasi-static indentation strength of composite laminates, Applied Composite Materials, 30(3) (2023) 871-886.
- [33] S.A. Safipour, M. Heshmati, Investigation of Interlaminar Mode-I Fracture Toughness of Corrugated Composite Plates, Amirkabir J. Mech Eng, 54(2) (2022) 415-432. (In Persian).

sulphone), Composites Science and Technology, 43(1) (1992) 37-47.

- [25] M.W. Czabaj, J.G. Ratcliffe, Comparison of intralaminar and interlaminar mode I fracture toughnesses of a unidirectional IM7/8552 carbon/epoxy composite, Composites Science and Technology, 89 (2013) 15-23.
- [26] A. Blázquez, M.L. Velasco, P. Caballos, F. París, Characterization by fracture mechanics of intra and interlaminar damage in composite laminates, Engineering Fracture Mechanics, 315 (2025) 110812.
- [27] J. Wang, Z. Liu, J. Li, X. Liu, Y. Shen, Z. Zhang, X. Wang, X. Chen, Exploring the influence of specimen types on the intralaminar fracture behavior of fiberreinforced polymer matrix composites, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 134 (2024) 104684.
- [28] J. Xiang, P. Cheng, K. Wang, Y. Wu, Y. Rao, Y. Peng, Interlaminar and translaminar fracture toughness of 3D-printed continuous fiber reinforced composites: A review and prospect, Polymer Composites, 45(5) (2024) 3883-3900.
- [29] J. Fisher, M.W. Czabaj, A new test for characterization of interlaminar tensile strength of tape-laminate

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

A. R. Sartipi Esfahani, A. R. Ghasemi, Load Acceleration and Crack Propagation Direction on Interlaminar Fracture Toughness In Polymer Matrix Composites: A Theoretical and Experimental Approaches, Amirkabir J. Mech Eng., 56(11) (2025) 1575-1590.



DOI: 10.22060/mej.2025.23731.7806

بی موجعه محمد ا