



Effect of the Hexagonal Architecture of 3D-Printed Interlayers on the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Layered Composites

Mazaher Salamat-Talab^{a,*}, Hossein Kazemi^{b,a}, Zahra Bahrami^a

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

^b School of Mechanical Engineering, Faculty of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Original Article

Use your device to scan and read the article online



Citation: Salamat-Talab M, Kazemi H, Bahrami Z. Effect of the Hexagonal Architecture of 3D-Printed Interlayers on the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Layered Composites. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2025;5(3):463-481.

 <https://10.66224/masm.5.3.463>

KEYWORDS

Delamination,
Glass/epoxy composites,
Interlayering method,
Mode II interlaminar fracture toughness,
3D printed interlayer.

ABSTRACT

Given the inherent susceptibility of laminated composites to delamination damage, numerous strategies have been introduced in recent years to enhance delamination resistance. One emerging approach is the use of 3D-printed interlayers; however, despite promising results in enhancing delamination resistance, the effect of interlayer cellular architecture on mode II interlaminar fracture toughness (ILFT) has not yet been investigated. Accordingly, this study designed an interlayer composed of PVA filament, with a thickness of 0.4 mm and a hexagonal cellular architecture. Also, to comparatively evaluate the effectiveness of the interlayer cellular architecture, the results were compared with those of the authors' previous study, and the effect of replacing the square geometry with the hexagonal geometry was assessed while maintaining the materials and design parameters constant. The results demonstrated that the hexagonal interlayer increased the maximum load-bearing capacity by 25% and 34% compared with the control specimen and the square structure, respectively. Moreover, based on the compliance calibration method, the initiation and propagation values of ILFT (G_{IIC}^{ini} and G_{IIC}^{prop}) increased by 164% and 88%, respectively. Meanwhile, the G_{IIC}^{ini} and G_{IIC}^{prop} improved by 160% and 17%, respectively, compared with those of the square structure, indicating the superiority of the hexagonal geometry in controlling the propagation of delamination damage. Fractographic analysis further revealed that crack deflection and pinning, together with the deformation and breakage of the PVA filaments, altered the failure pattern and enhanced delamination resistance. Overall, the findings underscore the decisive role of the cellular architecture of 3D-printed interlayers in the interlaminar performance of composites.

Extended Abstract

1. Introduction

Despite advantages such as a high strength-to-weight ratio, adequate corrosion resistance, and the possibility of tailoring their properties, laminated composites are subject to structural limitations arising from their anisotropic behavior, weakness in the through-thickness direction, and mechanical incompatibility between the matrix and reinforcing phases. In other words, these inherent characteristics reduce their resistance to interlaminar delamination. In this regard, it should be noted that delamination, as a hidden damage mechanism, can occur without visible signs and, by reducing the stiffness and strength of laminated composites, may lead to catastrophic structural failure [4-6]. Consequently, given this issue and the widespread use of these materials in critical industries such as aerospace, shipbuilding, and automotive manufacturing, evaluating the variables

* Corresponding author: Mojtaba Rahimi; Tel.: +988633400675

E-mail address: salamattalab@arakut.ac.ir

DOI: <https://10.66224/masm.5.3.325>

Received: July 29, 2025; Received in revised form: August 15, 2025; Accepted: August 18, 2025.

© Author



governing interlaminar delamination resistance and optimizing the manufacturing and design processes are essential for enhancing the safety and durability of these systems.

Accordingly, extensive research has been conducted in recent years to enhance the resistance of laminated composites to interlaminar crack propagation and delamination, leading to the development of various strategies. The most important of these strategies include through-thickness reinforcement of the structure [7, 8], modification of the fiber-textile architecture [9-11], and surface functionalization and thermal treatment [12-14] to strengthen interlaminar interactions. In addition, other investigations have demonstrated that interleaving, which involves introducing a secondary layer, commonly referred to as an interlayer, at the fiber-matrix interface, plays a significant role in inhibiting delamination growth [19-22].

In this context, it is worth noting that the use of interlayers, owing to their unique advantages in preserving in-plane mechanical properties while markedly improving out-of-plane properties, has attracted considerable attention as an effective approach to enhancing resistance to crack growth. Nevertheless, in recent years, the high costs associated with the synthesis and preparation of these interlayers, together with the adverse environmental impacts of some of them, have directed research toward the introduction and application of novel interlayer methods and structures, an approach primarily pursued to reduce the costs associated with producing conventional interlayers [4]. In this regard, Kazemi and Salamat-Talab [26] evaluated the effect of these novel 3D-printed polyvinyl alcohol (PVA) interlayers on mode II interlaminar fracture toughness (ILFT) in glass/epoxy composites. The geometry of these interlayers comprised square cellular networks designed to establish a balance between the filament and resin volume fractions at the delamination interfaces. Analysis of the crack-growth resistance curves of the reinforced specimens in that study showed that this structure increased ILFT by 73% and maintained the upward trend in crack-growth resistance.

Considering the aforementioned studies and based on the research background, it can be stated that although interleaving is an efficient strategy for improving the delamination resistance of laminated composites, conventional methods for synthesizing such interlayers are often restricted to costly and environmentally incompatible processes. Furthermore, although 3D-printed interlayer structures represent an emerging technology, the influence of their cellular geometry topology and architecture on mode II ILFT has not yet been investigated. Therefore, adopting a comparative approach with respect to the previously described reference study [26], the present research investigates the effects of variations in the architecture and topology of the cellular geometry of a 3D-printed PVA-filament interlayer to provide a more comprehensive perspective and a critical understanding of the corresponding influential parameters in these structures and their effects on interlaminar properties. It should be noted that, to ensure identical experimental conditions, all variables associated with the materials, manufacturing process, and other influential parameters were maintained exactly the same as those employed in the reference study, with only the cellular geometry being changed from square to hexagonal. Accordingly, to determine the mode II ILFT, end-notched flexure (ENF) test specimens comprising 28 glass-fiber plies were fabricated using the hand lay-up method, and the printed interlayer was embedded precisely at the specimen mid-plane, between plies 14 and 15. Finally, the experimental data obtained from the tests were analyzed using the compliance calibration method (CCM). Furthermore, to identify the active damage mechanisms during crack propagation, the fracture surfaces of the ENF specimens were examined using optical microscopy.

2. Materials and design

As previously noted, this study employed emerging and developing interlayers based on additive manufacturing technology to improve the interlaminar crack-growth resistance of glass/epoxy composites. The primary focus of this study was a comparative analysis with the previous study [26] and an evaluation of the effect of cellular geometry topology, in which the square structure used in the reference study was replaced with a new hexagonal geometric architecture to determine the influence of this structural modification. It should be noted that, to ensure the validity of the comparison and exclusively investigate the effect of cellular architecture, all confounding variables affecting the interlaminar properties were maintained completely identical and constant.

Accordingly, similar to the reference study, an organic PVA filament manufactured by eSUN was used for the three-dimensional (3D) printing of the interlayer. The 3D model of the interlayer with a hexagonal cellular geometry was initially designed in the ANSYS software and subsequently converted into G-code containing the toolpath and geometrical instructions using Cura software. The schematic design and cellular dimensions of the structure are presented in Figure 1.

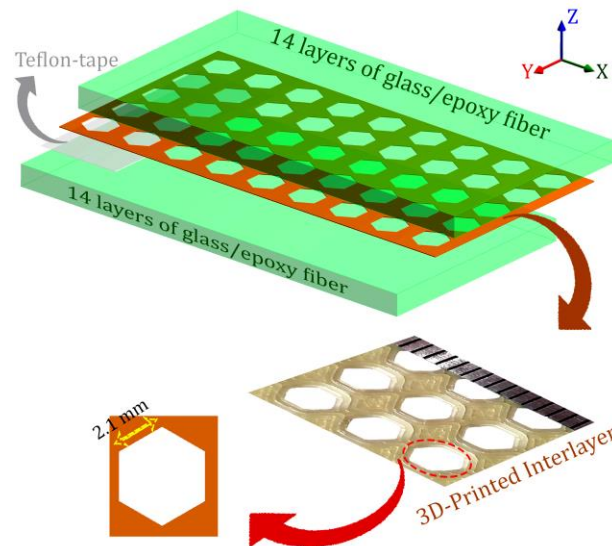


Figure 1 Schematic representation of the interlayer placement in the glass/epoxy laminated composite and the corresponding unit cell geometries

Furthermore, similar to the reference study, the thickness of the designed interlayer was set to 0.4 mm. The remaining parameters of the 3D printing process and the technical specifications of the printer were adjusted in complete accordance with, and identically to, the variables reported in the previous study (Table 1).

Table 1 3D printer parameters used during fabrication of the 3D-printed interlayers

Printing parameter	Specified value	Printing parameter	Specified value
Nozzle temperature (°C)	200	Printing speed (mm/s)	20
Bed temperature (°C)	60	Colling fan speed (%)	100
Nozzle diameter (mm)	0.4	Infill density (%)	100
Layer height (mm)	0.2		

Following the preparation of the PVA-3D-printed interlayer with a hexagonal cellular structure, the glass/epoxy laminated composite specimens were fabricated using the hand lay-up method under conditions completely identical to those employed in the reference study [26]. Moreover, as illustrated schematically in Figure 1, the interlayer was positioned at the mid-plane of each specimen, namely between plies 14 and 15, and a 0.02-mm-thick Teflon film was used to introduce the pre-crack. Upon completion of the hand lay-up process, the specimens were cured in accordance with the curing specifications provided in Table 2 and under conditions completely identical to those of the reference study.

It should be noted that to evaluate and ensure the repeatability of the results, three specimens were prepared for each investigated group, namely the specimens with and without an interlayer. Afterward, following completion of the curing process, the end-notched flexure specimens were finished using fine-grit sandpaper in accordance with ASTM D7905. The specimens were prepared with a dimensional accuracy of 0.02 mm and with a length, width, and thickness of 160, 25, and 6 mm, respectively.

Table 2 Curing and processing parameters of the investigated laminated composites

parameter	Specified value	parameter	Specified value
Initial curing temperature (°C)	Room temperature	Initial curing time (h)	24
First-stage post-curing temperature (°C)	80	First-stage post-curing time (h)	2
Second-stage post-curing temperature (°C)	100	Second-stage post-curing time (h)	2
Curing pressure (Pa)	10000		

To perform the mode II ILFT tests, a 25-ton SANTAM universal testing machine (STM-250) equipped with a precision BONGSHIN DBBP load cell [28] with a capacity of 2000 kgf (19.61 kN) was used. The resolution of the load cell used was approximately 0.2 N. Also, the roller diameter, support span, and loading rate were set at 10 mm, 100 mm, and 0.25 mm/min, respectively, in accordance with the baseline study. It should be noted that during specimen preparation, a 60-mm-long Teflon film was used to define the initial crack region. This length

was selected such that, while providing an initial crack length of 30 mm, different crack lengths could subsequently be obtained to determine the parameters required for the mode II interlaminar fracture toughness test (see Figure 2).

Also, as previously stated, the mode II ILFT (G_{IIc}) was analyzed in accordance with ASTM D7905 [27] and calculated using the compliance calibration method according to Equation 1.

$$G_{IIc} = \frac{3mP^2a^2}{2B} \quad (1)$$

In this equation, P , a , and B denote the critical load corresponding to the crack length at each stage of crack growth, the crack length, and the width of the ENF specimen, respectively. Furthermore, the parameter m is determined from the slope of the line fitted to the five-point compliance curve plotted against a^3 at crack lengths of 20, 25, 30, 35, and 40 mm. The details of this procedure and the tests conducted at the aforementioned crack lengths are presented in Figure 2.

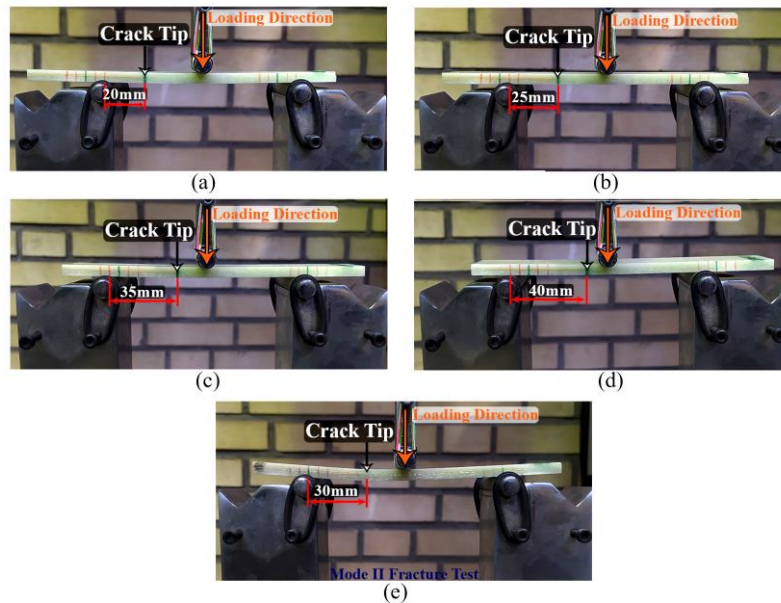


Figure 2 Tests corresponding to the determination of the parameter m at various crack lengths: (a) 20 mm, (b) 25 mm, (c) 35 mm, (d) 40 mm, and (e) 30 mm (fracture test).

3. Result and discussion

The mode II ILFT tests yielded the load-displacement data for the two groups investigated in this study, as presented in Figure 3a. Comparison of the results indicates that incorporating the 3D-printed interlayer markedly increased the maximum load-bearing capacity (P^{ini}) of the specimens by approximately 25% (Figures 3a). Another noteworthy aspect of this research is the comparison between the results of the present study and the findings of the reference study. Accordingly, the results of this comparison indicate that employing the hexagonal cellular structure, compared with the square structure used in the reference study, increased the P^{ini} by approximately 34%.

Subsequently, the crack growth resistance curve (R-Curve) results demonstrate that incorporating the interlayer investigated in the present study not only produced a more gradual variation in crack growth resistance than that observed for the specimen without an interlayer (control specimen), but also increased initiation and propagation value of ILFT (i.e., G_{IIc}^{ini} and G_{IIc}^{prop}) by 164% and 88%, respectively, compared with the reference specimens (Figure 3b). This finding indicates that the interlayer provided favorable interlaminar adhesion and resistance to crack growth initiation, a phenomenon that may be attributed to the formation of resin-rich regions within the hexagonal cells [24, 25, 28].

Another important aspect is the adoption of a comparative approach with respect to the reference study. In this regard, the results of this comparison demonstrate that the hexagonal interlayers exerted a more favorable and pronounced influence on both ILFT parameters than the 3D-printed square interlayers. Specifically, G_{IIc}^{ini} and G_{IIc}^{prop} increased by 160% and 17%, respectively, relative to the specimens incorporating 3D-printed interlayers with a square cellular geometry in the reference study (Figure 3b).

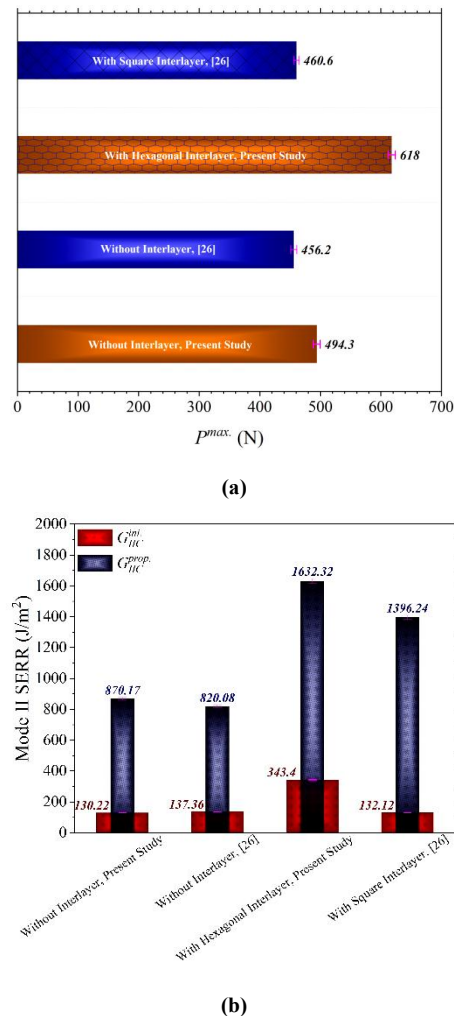


Figure 3 Comparative analysis of (a) peak load and (b) interlaminar fracture toughness at initiation and propagation state of crack growth: A comparison between reference specimens and those reinforced with 3D-printed interlayers featuring square [26] and hexagonal (present study) unit cells

It is noteworthy that, according to the results presented in Table 3, evaluation of the fracture process zone length (L_{FPZ}), which is recognized as another parameter governing resistance to delamination, revealed a 146% increase in this parameter for the specimen containing the interlayer compared with the specimen without an interlayer.

Table 3 Comparison of the FPZ length for reference specimens and those reinforced with 3D-printed interlayers featuring square [26] and hexagonal (present study) unit cells

	L_{FPZ} , (mm)		L_{FPZ} , (mm)
Reference specimen (present study)	5.68	Specimens with 3D-printed interlayer (hexagonal geometry, present study)	13.96
Reference specimen [26]	5.55	Specimens with 3D-printed interlayer (square geometry, [26])	20

Also, to obtain a more detailed understanding of the effectiveness of the 3D-printed interlayer with a hexagonal cellular geometry, the fracture surfaces and the manner of crack growth and propagation between the composite plies in specimens with and without an interlayer were examined using optical microscopy. The corresponding fracture surfaces are presented in Figure 4. As observed in Figure 4a, crack propagation along the interface of the control (without an interlayer) specimens produced a smooth fracture surface devoid of any distinct resistance mechanism. In other words, fracture in these specimens occurred through adhesive failure and separation at the interface between the fiber ply and the interlaminar resin.

In contrast, the fracture surface presented in Figure 4b clearly demonstrates that incorporating the hexagonal interlayer resulted in the development of effective resistance mechanisms capable of controlling crack growth. More specifically, examination of the fracture surface indicates that this structure generally produced a mixed failure pattern comprising interfacial failure at the fiber-ply/resin interface and cohesive failure within the resin

and filament. This behavior was accompanied by the activation of crack growth resistance mechanisms, including the deformation, stretching, and breakage of the reinforcing PVA filaments (red circles in the Figure 4b). Furthermore, the presence of resin-rich and resin-free regions, indicated by blue and green rectangles, respectively, clearly confirms the formation of this fracture pattern and the deflection of the crack path along the delamination interface (Figure 4b).

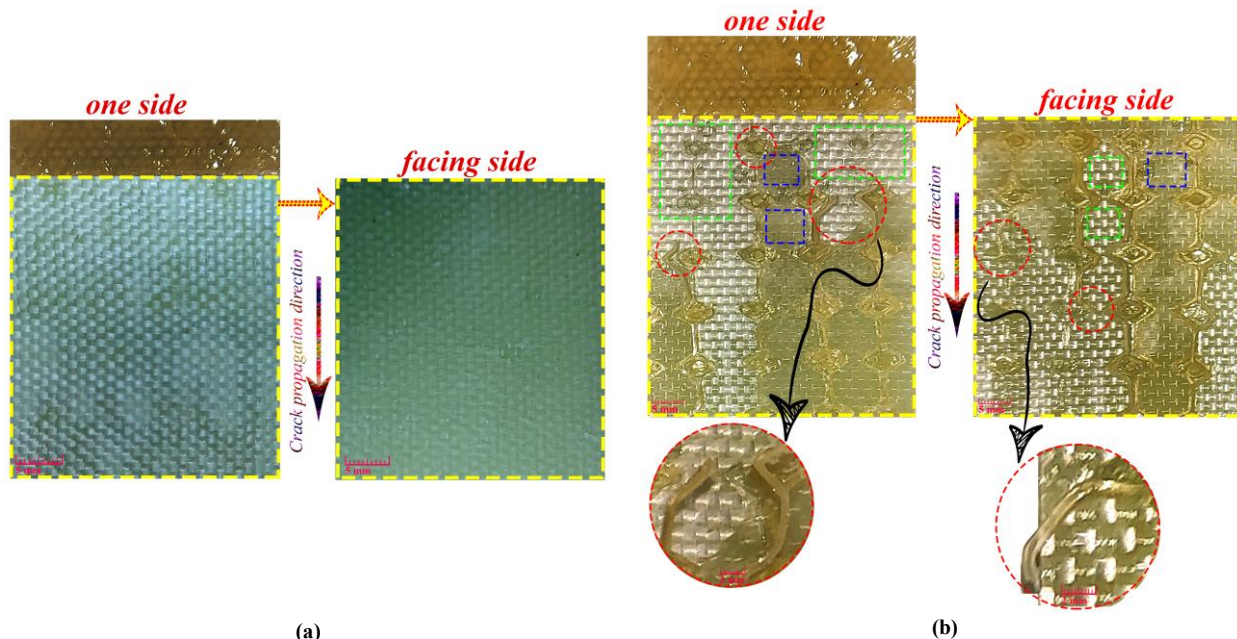


Figure 4 Optical microscopy images of the fracture surfaces for: (a) reference specimens, and (b) specimens reinforced with 3D-printed interlayers

Finally, it should be noted that, in general, the investigation of fracture behavior indicates that the improvement in resistance to crack propagation at the interface between the PVA filament and epoxy resin may be influenced by factors such as physical adhesion, local interlocking, and the potential formation of hydrogen bonds [32, 33]. However, the experimental results obtained in the present study indicate that mechanical interlocking and filament bridging within the interlayer play a dominant role compared with the other mechanisms and make the primary contribution to the enhanced resistance to crack propagation.

4. Conclusion

In the present study, the effect of the topology and cellular architecture of 3D-printed interlayers fabricated from PVA filament on the mode II ILFT of glass/epoxy laminated composites was investigated. To this end, following a comparative approach with respect to the previous study, a 0.4 mm-thick PVA interlayer with hexagonal cells was incorporated into the mid-plane of the 28-ply glass/epoxy composite. It should also be noted that, to ensure a valid comparison, all design, material, and fabrication parameters were kept constant, and only the cell topology was changed from square to hexagonal. The mode II ILFT of the specimens was determined using the CCM, and finally, the fracture surfaces of the specimens were examined using optical microscopy to identify the active failure mechanisms during crack propagation. The main findings of the present study are as follows:

- The experimental results of the control specimens in the present study and those of the reference study showed good agreement, indicating appropriate control of experimental noise and other influential variables.
- The 3D-printed interlayer with a hexagonal cellular structure increased the maximum load-bearing capacity by 25% compared with the control specimen. Furthermore, replacing the square geometry with the hexagonal geometry increased this parameter by approximately 34% in the present study, indicating the more favorable performance of the hexagonal structure in load distribution and load bearing.
- With the use of the hexagonal interlayer, the values of G_{IIC}^{ini} , G_{IIC}^{prop} , and L_{FPZ} increased by 164%, 88%, and 146%, respectively, compared with the specimen without an interlayer. This improvement in interlaminar performance is attributed to favorable interlaminar adhesion, the formation of resin-rich regions within the hexagonal cells, and the activation of crack-controlling and crack-locking mechanisms.

- Compared with the square interlayer in the previous study, the $G_{IIC}^{ini.}$ and $G_{IIC}^{prop.}$ values of the specimen with the hexagonal interlayer increased by 160% and 17%, respectively, which may be associated with more favorable stress distribution and more effective crack-path deviation in the hexagonal geometry.
- The fracture surface of the control specimen predominantly indicated separation at the fiber/resin interface, whereas the specimen with the hexagonal interlayer exhibited a mixed fracture pattern involving both interfacial and intralaminar fracture within the resin and filament.

It should be noted that, despite the favorable results obtained from the use of 3D-printed interlayers under the present fabrication conditions, investigating the effects of printing process parameters, including nozzle temperature and printing speed, on interlaminar fracture behavior may be considered in future studies and could contribute to the development of practical applications of this approach.



تأثیر معماری شش ضلعی میان لایه‌های چاپ سه‌بعدی بر چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود II کامپوزیت‌های لایه‌ای

مظاهر سلامت طلب^{الف*}، حسین کاظمی^{ب و ج}، زهرا بهرامی^د

^{الف} دانشجوی ارشد، گروه طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، salamattalab@arakut.ac.ir
^ب دانشجوی دکتری، گروه طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، hosseinkazemi1.abru@gmail.com
^ج کارشناس ارشد، گروه طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، hosseinkazemi1.abru@gmail.com
^د دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه طراحی جامدات، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اراک، اراک، ایران، nafas12bahramee@gmail.com

واژگان کلیدی	چکیده
تورق، کامپوزیت شیشه/اپوکسی، میان لایه گذاری، چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود II، لایه‌ای میانی چاپ سه‌بعدی شده.	باتوجه به ضعف ذاتی کامپوزیت‌های لایه‌ای در برابر آسیب تورق، در سال‌های اخیر راهکارهای متعددی برای افزایش مقاومت در برابر این آسیب معرفی شده‌اند. یکی از رویکردهای نوظهور، استفاده از میان لایه‌های چاپ سه‌بعدی شده است که باوجود نتایج مطلوب این روش در افزایش مقاومت در برابر تورق، تأثیر معماری سلولی میان لایه‌ها بر چقرمگی شکست مود II تاکنون بررسی نشده است. از این رو، در پژوهش حاضر، میان لایه‌ای از فیلامنت پلی‌وینیل الکل با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر و معماری سلولی شش ضلعی، طراحی شد. همچنین، برای ارزیابی مقایسه‌ای اثربخشی معماری سلولی میان لایه، نتایج با مطالعه پیشین نویسندگان مقایسه شد و با ثابت نگه داشتن مواد و پارامترهای طراحی، تأثیر جایگزینی هندسه مربعی با شش ضلعی مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان دادند که میان لایه با ساختار شش ضلعی، بیشینه ظرفیت تحمل بار را در مقایسه با نمونه شاهد و ساختار مربعی، به ترتیب ۲۵ و ۳۴ درصد افزایش داد. همچنین، چقرمگی شکست بین لایه‌ای، بر مبنای روش نرمی کالیبره شده، در مراحل شروع ($G_{IIC}^{ini.}$) و انتشار رشد ترک ($G_{IIC}^{prop.}$) به ترتیب ۱۶۴ و ۸۸ درصد افزایش یافتند. این در حالی است که مقادیر $G_{IIC}^{ini.}$ و $G_{IIC}^{prop.}$ در مقایسه با ساختار مربعی، به ترتیب ۱۶۰ و ۱۷ درصد بهبود یافتند که بیانگر برتری هندسه شش ضلعی در کنترل گسترش آسیب تورق است. همچنین تحلیل سطوح شکست نشان داد که انحراف و قفل شدگی ترک و نیز تغییر شکل و برش فیلامنت‌های PVA، موجب تغییر الگوی شکست و افزایش مقاومت در برابر تورق شدند. در مجموع، می‌توان بیان نمود که یافته‌ها بر نقش تعیین کننده معماری سلولی میان لایه‌های چاپ سه‌بعدی شده در عملکرد بین لایه‌ای کامپوزیت‌ها تأکید دارند.

۱- مقدمه

کامپوزیت‌های لایه‌ای با وجود مزایایی چون نسبت استحکام به وزن بالا، مقاومت به خوردگی مناسب و امکان مهندسی خواص، به دلیل رفتارهای ناهمسانگرد، ضعف در امتداد ضخامت و ناسازگاری مکانیکی فازهای زمینه و تقویت کننده دچار

محدودیت‌های ساختاری هستند. به عبارتی دیگر می‌توان بیان نمود که این ویژگی‌های ذاتی پایداری آن‌ها را در برابر جدایش بین‌لایه‌ای (تورق)^۱ کاهش می‌دهند [۳-۱]. در این خصوص لازم به توضیح است که تورق به عنوان مکانیزم خرابی پنهان، بدون علائم ظاهری رخ داده و با کاهش سفتی و استحکام کامپوزیت‌های لایه‌ای، می‌تواند زمینه‌ساز شکستی فاجعه‌بار در سازه شود [۶-۴]. در نتیجه، در نظرگیری این موضوع در کنار توجه به کاربردهای گسترده‌ی این مواد در صنایع حساسی همچون هوافضا، کشتی‌سازی و خودروسازی، ارزیابی متغیرهای کنترل‌کننده مقاومت در برابر تورق بین‌لایه‌ای و بهینه‌سازی فرآیند ساخت و طراحی، برای افزایش ایمنی و پایداری این سیستم‌ها ضروری است.

در این راستا، طی سال‌های اخیر پژوهش‌های گسترده‌ای با هدف افزایش مقاومت کامپوزیت‌های لایه‌ای در برابر انتشار ترک‌های بین‌لایه‌ای و وقوع تورق انجام شده است که به توسعه راهکارهای متنوعی انجامیده‌اند. از مهم‌ترین این راهکارها می‌توان به تقویت سازه در راستای ضخامت [۸، ۷]، اصلاح ساختار بافت الیاف [۱۱-۹] و عامل‌دار کردن و اصلاح حرارتی سطوح [۱۲-۱۴] با هدف تقویت برهم‌کنش‌های بین‌لایه‌ای اشاره کرد. اوگاساوا و همکاران [۱۵] با بررسی تأثیر نوع بافت الیاف در کامپوزیت‌های کربن/اپوکسی نشان دادند که اصلاح الگوی بافت می‌تواند نقش مؤثری در ارتقای چقرمگی شکست و محدود کردن روند رشد ترک داشته باشد. با این حال، افزایش تمرکز تنش در نواحی تورق و احتمال آسیب‌دیدگی الیاف طی فرایند عامل‌دارسازی، از جمله چالش‌هایی به شمار می‌روند که می‌توانند کاربرد گسترده این رویکردها را برای بهبود مقاومت در برابر تورق محدود سازند [۱۸-۱۶، ۱۳].

علاوه بر این موارد، بررسی‌های دیگری نشان می‌دهند که استفاده از رویکرد میان‌لایه‌گذاری و استفاده از یک لایه ثانویه (که اصطلاحاً میان‌لایه معرفی می‌شود) در فصل مشترک الیاف و ماتریس، نقش بسزایی در بازدارندگی از رشد تورق دارند [۲۲-۱۹]. به عنوان مثال، کاظمی و همکاران [۲۳] با سنتز نانوذرات کامپوزیتی سبز شامل هسته سیلیکا و پوسته هیدروکسید منیزیم، این ذرات را با درصد وزنی ۰/۷۵ درصدی، به درون نانوالیاف الکتروریسی شده پلی‌وینیل الکل^۲ (PVA) وارد کردند. نتایج کار آن‌ها نشان‌دهنده افزایش ۱۲۲ درصدی چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در مود II^۳ (Mode II ILFT) و صعودی شدن کامل منحنی مقاومت در برابر رشد ترک^۴ (R-Curve) در کامپوزیت‌های لایه‌ای شیشه/اپوکسی بود.

در همین راستا، شایان ذکر است که بهره‌گیری از میان‌لایه‌ها، به دلیل مزایای منحصر به فرد آن‌ها در حفظ خواص مکانیکی درون صفحه‌ای و بهبود چشمگیر خواص خارج از صفحه، به عنوان رویکردی مؤثر برای افزایش مقاومت در برابر رشد ترک، توجه گسترده‌ای را به خود معطوف کرده است. با این حال، طی سال‌های اخیر، هزینه‌های بالای سنتز و آماده‌سازی این میان‌لایه‌ها، همراه با پیامدهای نامطلوب زیست‌محیطی برخی از آن‌ها، پژوهش‌ها را به سوی معرفی و به کارگیری روش‌ها و ساختارهای نوین میان‌لایه‌ای سوق داده است؛ رویکردی که عمدتاً با هدف کاهش هزینه‌های مرتبط با تولید میان‌لایه‌های متداول دنبال می‌شود [۴]. در همین راستا، بیلرگیل و دومن [۲۴] تأثیر به کارگیری لایه میانی حاصل از چاپ سه‌بعدی فیلامنت پلی‌امید را بر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای در کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی ارزیابی کردند. یافته‌های تجربی آنان نشان داد که این ساختار میان‌لایه‌ای، بهبود مناسبی از خواص مذکور را نسبت به نمونه‌های بدون میان‌لایه در پی دارد. در پژوهشی مشابه، سلامت‌طلب و کاظمی [۲۵] نقش میان‌لایه‌های چاپ سه‌بعدی شده از جنس فیلامنت کامپوزیتی پلی‌لاکتیک اسید/چوب را بر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود II در کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی بررسی نمودند که نتایج حاکی از بهبود چشمگیر خواص مکانیکی مود دوم شکست بود. همچنین در ادامه این مطالعات، کاظمی و سلامت‌طلب [۲۶] اثر این میان‌لایه‌های نوین چاپ سه‌بعدی شده از جنس PVA را بر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود II در کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی ارزیابی کردند. هندسه این میان‌لایه‌ها از شبکه‌های سلولی مربعی تشکیل شده بود؛ به گونه‌ای که تعادل کسر حجمی فیلامنت به رزین در ناحیه میانی برقرار شود. تحلیل نمودار مقاومت در برابر رشد ترک نمونه‌های تقویت شده در این مطالعه نشان داد که این ساختار موجب ارتقای ۷۳ درصدی چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود II شده و روند صعودی مقاومت در برابر رشد ترک را حفظ می‌کند. همچنین تحلیل میکروسکوپی

^۱ Delamination^۲ Polyvinyl alcohol (PVA)^۳ Mode II interlaminar fracture toughness, Mode II ILFT^۴ Crack growth resistance curve, R-Curve

سطوح شکست در نمونه‌های تقویت‌شده، نقش مؤثر سلول‌های مربعی را در ایجاد قله‌های برشی، افزایش اصطکاک سطحی در فصل مشترک لایه‌ها، پدیده قفل‌شدگی پیشانی ترک و انحراف مسیر رشد آن تایید کرد که همگی از عوامل اصلی بهبود مقاومت به شکست به‌شمار می‌روند.

باتوجه به مطالعات بیان شده و بر مبنای پیشینه پژوهش، می‌توان بیان نمود که اگرچه بهره‌گیری از میان‌لایه‌ها راهکاری کارآمد جهت بهبود مقاومت کامپوزیت‌های لایه‌ای در برابر تورق است، اما روش‌های متداول سنتز این لایه‌ها اغلب به فرآیندهای پرهزینه و ناسازگار با محیط زیست محدود می‌شود. از سوی دیگر، هرچند ساختارهای میان‌لایه‌ای تولیدشده به روش چاپ سه‌بعدی فناوری نوظهوری به‌شمار می‌روند، اما اثر توپولوژی و معماری هندسه سلولی آن‌ها بر چقرمگی شکست مود II تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است. از این رو، در تحقیق حاضر با رویکردی مقایسه‌ای نسبت به مطالعه مرجع و بیان شده در پیش [۲۶]، اثر تغییرات معماری و توپولوژی هندسه سلولی در ساختار میان‌لایه چاپ سه‌بعدی شده از فیلامنت PVA بررسی می‌شود تا بتوان دیدی جامع‌تر و درکی انتقادی نسبت به پارامترهای اثرگذار متناظر در این ساختارها بر روی خواص بین‌لایه‌ای، پیدا نمود. شایان ذکر است که به منظور یکسان‌سازی شرایط آزمایش، تمامی متغیرهای مربوط به مواد، فرآیند ساخت و سایر پارامترهای مؤثر، نسبت به پژوهش مبنای، کاملاً ثابت نگه داشته شده و تنها هندسه سلولی از مربعی به شش‌ضلعی تغییر یافته است. در این راستا، جهت تعیین چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود II، نمونه‌های آزمون تیر خمشی با شیار انتهایی^۱ (ENF) متشکل از ۲۸ لایه الیاف شیشه به روش لایه‌چینی دستی ساخته شدند و میان‌لایه چاپ‌شده دقیقاً در صفحه میانی نمونه (بین لایه‌های ۱۴ و ۱۵) تعبیه گردید. در نهایت، داده‌های تجربی حاصل از آزمون بر اساس روش نرمی کالیبره‌شده^۲ (CCM) تحلیل شد و به منظور شناسایی مکانیسم‌های خرابی فعال در حین پیشروی ترک نیز، سطوح شکست نمونه‌های ENF با استفاده از میکروسکوپ نوری مورد ارزیابی قرار گرفت.

۲- مواد و روش

۲-۱- آماده‌سازی لایه میانی

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، در این پژوهش با هدف بهبود خواص مقاومت در برابر رشد ترک بین‌لایه‌ای کامپوزیت‌های شیشه/پوکسی، از میان‌لایه‌های نوظهور و درحال توسعه‌ی مبتنی بر فناوری ساخت افزایشی استفاده شده است. تمرکز اصلی این مطالعه بر تحلیل مقایسه‌ای با مطالعه‌ی انجام شده‌ی پیشین [۲۶] و ارزیابی اثر توپولوژی هندسه سلولی است؛ جایی که ساختار مربعی مطالعه مرجع با معماری هندسی جدید شش‌ضلعی جایگزین شده تا تأثیر این تغییر ساختاری مشخص گردد. بدین منظور، لازم به اشاره است که جهت اطمینان از صحت مقایسه و بررسی انحصاری اثر معماری سلولی، تمامی متغیرهای مداخله‌گر و مؤثر بر خواص بین‌لایه‌ای کاملاً یکسان و ثابت نگه‌داشته شدند.

در همین راستا، مشابه با پژوهش مبنای، جهت چاپ سه‌بعدی میان‌لایه از فیلامنت آلی PVA تولید شرکت ایسان (eSUN) استفاده شد. مدل سه‌بعدی میان‌لایه با هندسه سلولی شش‌ضلعی ابتدا در در محیط DesignModeler نرم‌افزار انسیس^۳ طراحی گردید و سپس توسط نرم‌افزار کیورا^۴ به کدهای ابزار و هندسی G-code تبدیل شد. همچنین لازم به توضیح است که در طراحی میان‌لایه شش‌ضلعی، ابعاد و هندسه سلول به‌گونه‌ای انتخاب شد که سهم نسبی فیلامنت و رزین در فصل مشترک تورق تا حد امکان متوازن و قابل‌مقایسه باشد. این ملاحظه با هدف کاهش اثر تفاوت میزان ماده در فصل مشترک و فراهم کردن شرایط مناسب‌تر برای بررسی اثر هندسه میان‌لایه بر رفتار تورق در نظر گرفته شد. همچنین، ابعاد و هندسه سلول شش‌ضلعی با نمونه‌های دارای سلول مربعی در پژوهش پیشین قابل‌مقایسه و معادل، در نظر گرفته شده است که طرح شماتیک متناظر با آن در شکل ۱ ارائه شده است.

علاوه بر این، ضخامت میان‌لایه طراحی‌شده مشابه با مطالعه مرجع، ۰/۴ میلی‌متر در نظر گرفته شد. شایان ذکر است سایر پارامترهای فرآیند چاپ سه‌بعدی و مشخصات فنی دستگاه پرینتر مورد استفاده، کاملاً منطبق و همسان با متغیرهای گزارش‌شده

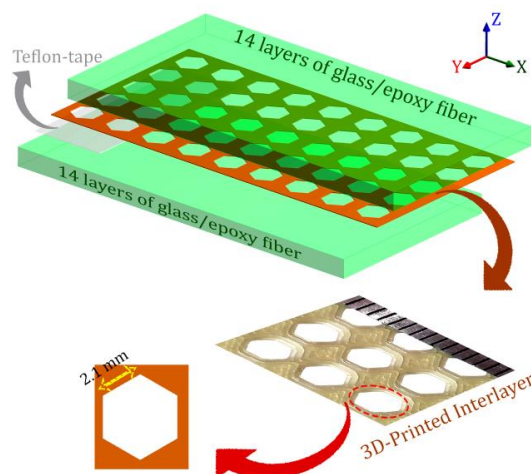
^۱ End notched flexure, ENF

^۲ Compliance calibration method, CCM

^۳ ANSYS workbench

^۴ Ultimaker Cura software

در پژوهش قبلی تنظیم گردید (جدول ۱).



شکل ۱ شماتیک از جای گیری لایه میانی در کامپوزیت لایه‌ای شیشه/اپوکسی و شکل‌های سلولی موجود در آن

جدول ۱ پارامترهای چاپگر سه بعدی در طول چاپ لایه میانی مورد بحث

پارامتر چاپ	مقدار تعیین شده	پارامتر چاپ	مقدار تعیین شده
دمای نازل ($^{\circ}\text{C}$)	۲۰۰	سرعت پرینت (mm/s)	۲۰
دمای تخت ($^{\circ}\text{C}$)	۶۰	سرعت فن خنک‌کننده (%)	۱۰۰
قطر نازل (mm)	۰/۴	تراکم چاپ (%)	۱۰۰
ضخامت لایه گذاری (mm)	۰/۲		

۲-۲- ساخت نمونه‌ها

پس از آماده‌سازی میان‌لایه چاپ‌شده از فیلامنت PVA با ساختار سلولی شش‌ضلعی، نمونه‌های کامپوزیتی به روش لایه‌چینی دستی و تحت شرایطی کاملاً مشابه با مطالعه مبنای [۲۶] ساخته شدند. در این راستا، لازم به شفاف‌سازی است که در این مطالعه نیز از رزین اپوکسی LR620 (تهیه‌شده از شرکت ایران کامپوزیت کاویان، ایران) و ۲۸ لایه الیاف شیشه‌ای بافته‌شده با بافت ریز استفاده شد. ضخامت و چگالی سطحی الیاف به ترتیب ۰/۲ میلی‌متر و ۲۰۰ گرم بر مترمربع و نسبت رزین به تقویت‌کننده نیز ۵ به ۱ در نظر گرفته شد. همچنین، مطابق با شماتیک ارائه شده در شکل ۱، میان‌لایه در صفحه میانی هر نمونه، یعنی میان لایه‌های ۱۴ و ۱۵، قرار گرفت و برای ایجاد پیش‌ترک نیز از نوار تفلونی با ضخامت ۰/۰۲ میلی‌متری استفاده شد. پس از تکمیل لایه‌چینی دستی، نمونه‌ها مطابق مشخصات پخت ارائه‌شده در جدول ۲ و کاملاً مشابه با مطالعه مینا پخت شدند. لازم به اشاره است که به‌منظور رعایت و بررسی تکرارپذیری نتایج، از هر گروه نمونه‌ی مورد بررسی (یعنی نمونه‌های با/بدون میان‌لایه)، سه نمونه آماده‌سازی شده است.

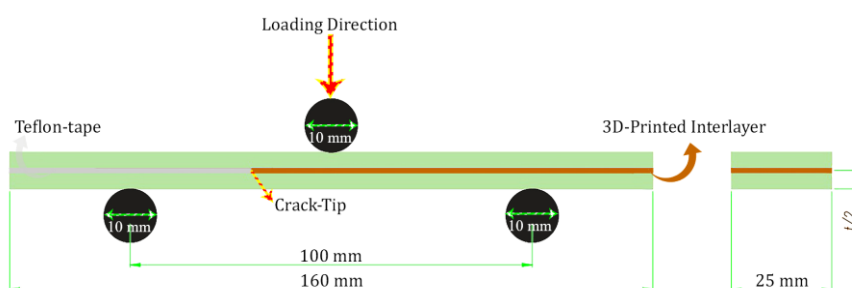
جدول ۲ پارامترهای متناظر با پخت و آماده‌سازی کامپوزیت‌های لایه‌ای مورد بحث

پارامتر	مقدار تعیین شده	پارامتر	مقدار تعیین شده
دمای پخت اولیه ($^{\circ}\text{C}$)	دمای محیط	زمان پخت اولیه (h)	۲۴
دمای مرحله اول فرایخت ($^{\circ}\text{C}$)	۸۰	زمان مرحله اول فرایخت (h)	۲
دمای مرحله دوم فرایخت ($^{\circ}\text{C}$)	۱۰۰	زمان مرحله دوم فرایخت (h)	۲
فشار پخت (Pa)	۱۰۰۰۰		

لازم به اشاره است که پس از تکمیل فرایند پخت، نمونه‌های خمشی با شیار انتهایی با استفاده از سنباده نرم و مطابق با استاندارد ASTM D7905 [۲۷] پرداخت شدند. نمونه‌ها با دقت ابعادی 0.2% میلی‌متر و به ترتیب با طول، پهنا و ضخامت ۱۶۰، ۲۵ و ۶ میلی‌متر آماده شدند.

۲-۳- چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود II

برای اجرای آزمون چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود II، از دستگاه آزمون یونیورسال ۲۵ تن سنتم (STM-250)، مجهز به لودسل دقیق، از مدل BONGSHIN DBBP [۲۸] با ظرفیت ۲۰۰۰ kgf (۱۹/۶۱ کیلو نیوتن)، استفاده شد. شایان ذکر است رزولوشن لودسل مورد استفاده (حدوداً) معادل با 0.2 نیوتن، معرفی می‌شود. همچنین، همان گونه که در شکل ۲، نمایی شماتیک از شرایط بارگذاری نمونه‌های خمشی با شیار انتهایی ارائه شده است، قطر رولر، طول دهانه تکیه‌گاهی و نرخ بارگذاری به ترتیب معادل با ۱۰ میلی‌متر، ۱۰۰ میلی‌متر و 0.25 میلی‌متر بر دقیقه، مطابق با مطالعه‌ی مبنا، تعیین شدند. لازم به توضیح است در مرحله آماده‌سازی نمونه‌ها، نوار تفلون با طول ۶۰ میلی‌متر به عنوان ناحیه ایجاد ترک اولیه در نظر گرفته شد. این طول به گونه‌ای انتخاب شد که ضمن ایجاد ترک اولیه (۳۰ میلی‌متر)، امکان دستیابی به طول ترک‌های مختلف را، جهت دستیابی پارامترهای مورد نیاز در آزمون چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود II، فراهم باشد (به شکل ۴ مراجعه شود).

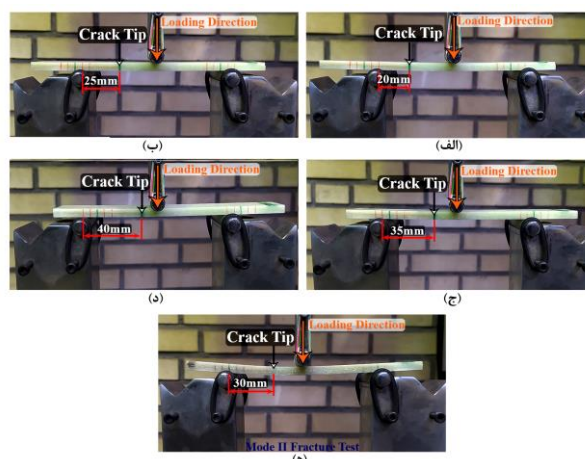


شکل ۲ شماتیک از آزمون چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود II

همانطور که پیش تر نیز بیان شد، تحلیل چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود II (Mode II ILFT, G_{IIc})، مطابق با استاندارد ASTM D7905 [۲۷] و بر پایه روش نرمی کالیبره شده، مطابق با رابطه‌ی (۱) محاسبه شد.

$$G_{IIc} = \frac{3mP^2a^2}{2B} \quad (1)$$

که در این رابطه، پارامترهای a ، P و B به ترتیب بیانگر نیروی بحرانی متناظر با طول ترک در هر مرحله از رشد، طول ترک و پهناي نمونه خمشی با شیار انتهایی است. همچنین، پارامتر m از شیب خط برازش شده بر منحنی نرمی پنج نقطه‌ای برحسب a^3 در طول ترک‌های ۲۰، ۲۵، ۳۰، ۳۵ و ۴۰ میلی‌متر، محاسبه می‌شود. شایان ذکر است که جزئیات این فرایند و آزمون‌های انجام شده در طول ترک‌های یاد شده در شکل ۳ ارائه شده‌اند.

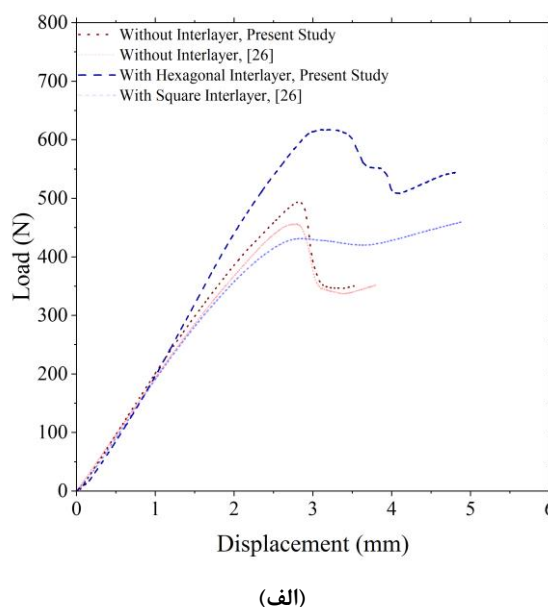
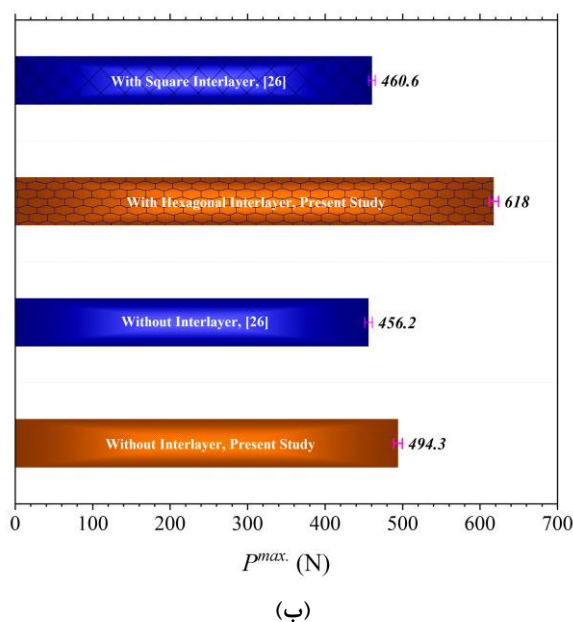


شکل ۳ آزمون‌های متناظر با تعیین پارامتر m در طول ترک‌های مختلف: (الف) ۲۰ میلی‌متر، (ب) ۲۵ میلی‌متر، (ج) ۳۵ میلی‌متر، (د) ۴۰ میلی‌متر و (ه) ۳۰ میلی‌متر (آزمون شکست)

۳- نتایج و بحث

با انجام آزمون شکست مود II، داده‌های نیرو - جابه‌جایی مربوط به هریک از دو گروه بررسی‌شده در این پژوهش، شامل نمونه‌های دارای میان‌لایه چاپ سه‌بعدی شده با هندسه سلولی شش‌ضلعی و نمونه‌های فاقد میان‌لایه، استخراج و در شکل ۴-الف ارائه شدند. مقایسه نتایج نشان می‌دهد که به‌کارگیری میان‌لایه چاپ سه‌بعدی شده، بیشینه ظرفیت تحمل بار نمونه‌ها را به طور محسوسی و در حدود ۲۵ درصد افزایش داده است (شکل ۴-الف و ۴-ب). این نتیجه بیانگر ارتباط مطلوب میان استفاده از این نوع میان‌لایه و ظرفیت تحمل بار است؛ به‌گونه‌ای که حضور آن موجب می‌شود وقوع شکست و واماندگی و نیز رشد ترک، مستلزم اعمال نیروی بیشتری باشد.

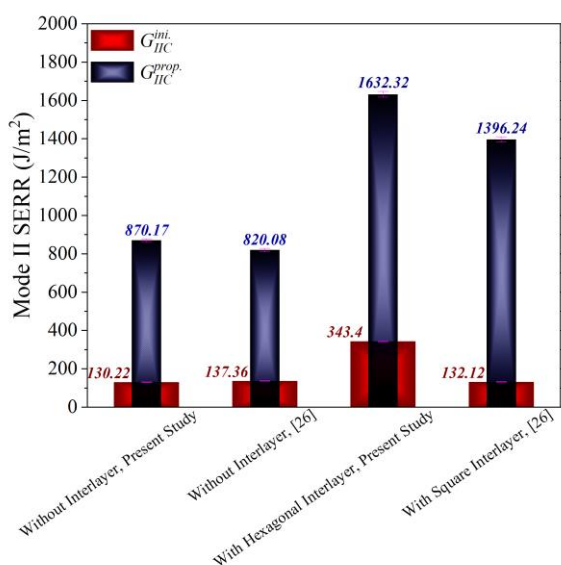
از دیگر جنبه‌های قابل‌توجه این پژوهش، مقایسه نتایج حاصل از مطالعه حاضر با یافته‌های مطالعه مبنا است. در این راستا و همان‌گونه که در شکل‌های ۴-الف و ۴-ب نیز مشاهده می‌شود، نمونه‌های فاقد میان‌لایه در هر دو مطالعه (نمونه‌های شاهد)، نتایجی تقریباً مشابه ارائه کرده‌اند. این هم‌خوانی مؤید کنترل مناسب نویزهای آزمایشگاهی و سایر پارامترهای مؤثر بر نتایج در پژوهش حاضر است و نشان می‌دهد که شرایط آزمایش به‌نحو مناسبی کنترل شده‌اند. در نتیجه، بر این اساس، می‌توان عملکرد دو نوع میان‌لایه را بر مبنای سنج‌های قابل‌اعتماد و مناسب با یکدیگر مقایسه کرد. نتایج این مقایسه نشان می‌دهد که بیشینه ظرفیت تحمل بار در نمونه دارای میان‌لایه چاپ سه‌بعدی شده با هندسه سلولی شش‌ضلعی برابر با ۶۱۸ نیوتون است؛ درحالی‌که در مطالعه پیشین، مقدار متناظر برای میان‌لایه چاپ سه‌بعدی شده با هندسه سلولی مربعی ۴۶۰/۶ نیوتون گزارش شده بود (به شکل ۴-ب مراجعه شود). بنابراین، می‌توان بیان نمود که به‌کارگیری ساختار سلولی شش‌ضلعی در مقایسه با ساختار مربعی استفاده‌شده در مطالعه مبنا، افزایش حدود ۳۴ درصدی بیشینه ظرفیت تحمل بار را به همراه داشته است. به بیان دیگر، میان‌لایه چاپ سه‌بعدی شده با هندسه سلولی شش‌ضلعی، میزان بهبود بیشینه ظرفیت تحمل بار را به‌طور محسوسی افزایش داده است؛ نتیجه‌ای که عملکرد مطلوب‌تر این هندسه سلولی را در توزیع و تحمل بار نشان می‌دهد.



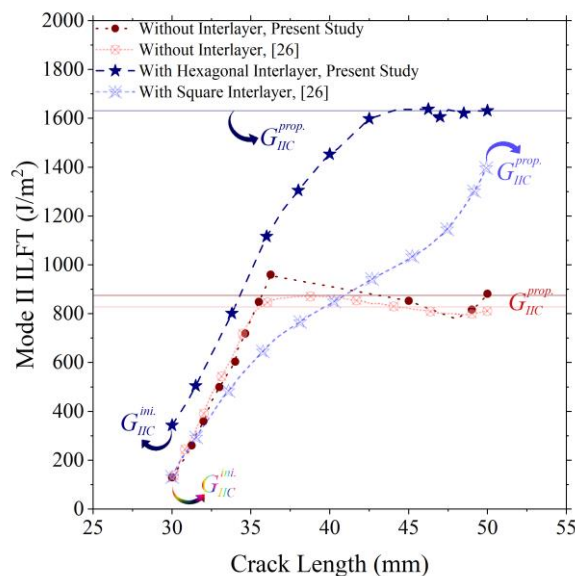
شکل ۴ تحلیل تطبیقی رفتار تحملی بار با مقایسه (الف) نمودار نیرو - جابه‌جایی و (ب) بیشینه‌ی حد تحملی نیرو: مقایسه نمونه‌های شاهد با نمونه‌های تقویت‌شده با میان‌لایه‌ی چاپ سه‌بعدی شده با سلول‌های مربعی [۲۶] و شش‌ضلعی (مطالعه حاضر)

در ادامه، منحنی مقاومت در برابر رشد ترک (R-Curve) برای هریک از نمونه‌ها، بر مبنای داده‌های نیرو - جابه‌جایی ارائه‌شده در شکل ۴-الف و با استفاده از رابطه (۱)، محاسبه و در شکل ۵-الف ارائه شد. نتایج نشان می‌دهند که به‌کارگیری میان‌لایه مورد بررسی در پژوهش حاضر، علاوه بر ایجاد روندی تدریجی‌تر در تغییرات مقاومت در برابر رشد ترک نسبت به نمونه فاقد میان‌لایه (نمونه شاهد)، موجب افزایش چشمگیر مقادیر چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای متناظر با شروع رشد ترک (G_{IIC}^{ini}) و انتشار ترک

($G_{IIC}^{prop.}$) در کامپوزیت‌های لایه‌ای شیشه/اپوکسی شده است. در این زمینه، شایان ذکر است که مقادیر $G_{IIC}^{ini.}$ و $G_{IIC}^{prop.}$ برای نمونه‌های دارای میان لایه شش ضلعی، در مقایسه با نمونه مرجع، به ترتیب ۱۶۴ و ۸۸ درصد افزایش یافته‌اند. این یافته نشان می‌دهد که میان لایه مذکور در برابر آغاز رشد ترک، چسبندگی بین لایه‌ای و مقاومت مطلوبی ایجاد کرده است؛ پدیده‌ای که می‌تواند به تشکیل نواحی غنی از رزین درون سلول‌های شش ضلعی نسبت داده شود [۲۹، ۲۵، ۲۴]. افزون بر این، در مرحله انتشار ترک نیز عملکرد هم‌زمان دو عامل چسبندگی بین لایه‌ای و شکل‌گیری سازوکارهای کنترل و قفل‌کنندگی ترک [۲۵، ۲۴، ۳۰]، که به ترتیب به واسطه نواحی غنی از رزین و فیلامنت PVA موجود در لایه‌ی میانی مورد بحث تأمین می‌شوند، موجب دستیابی به بهبود بیان شده در مقدار چقرمگی شکست بین لایه‌ای متناظر با انتشار ترک شده است.



(ب)



(الف)

شکل ۵ تحلیل تطبیقی رفتار شکست مود II با مقایسه (الف) منحنی‌های مقاومت در برابر رشد ترک و (ب) چقرمگی شکست بین لایه‌ای حالت شروع و انتشار: مقایسه نمونه‌های شاهد با نمونه‌های تقویت‌شده با میان لایه‌ی چاپ سه بعدی شده با سلول‌های مربعی [۲۶] و شش ضلعی (مطالعه حاضر)

یکی دیگر از نکات حائز اهمیت، اتخاذ رویکردی مقایسه‌ای نسبت به مطالعه مینا است. در این زمینه، مشابه نمودارهای نیرو - جابه‌جایی، منحنی‌های مقاومت در برابر رشد ترک نیز نشان می‌دهند که نمونه‌های شاهد در هر دو مطالعه، مطابق شکل‌های ۵ الف و ۵ ب، نتایج مشابهی داشته‌اند. این هم‌خوانی، امکان مقایسه‌ای مناسب و به‌دور از سوگیری را برای ارزیابی اثربخشی سلول‌های شش ضلعی در میان لایه چاپ سه بعدی شده، نسبت به سلول‌های مربعی به کاررفته در مطالعه مینا، فراهم می‌سازد. نتایج این مقایسه نشان می‌دهند که میان لایه‌های شش ضلعی، در مقایسه با میان لایه‌های مربعی چاپ سه بعدی شده، تأثیر مطلوب‌تر و چشمگیری بر هر دو پارامتر چقرمگی شکست بین لایه‌ای داشته‌اند؛ به گونه‌ای که مقادیر $G_{IIC}^{ini.}$ و $G_{IIC}^{prop.}$ نسبت به نمونه‌های دارای میان لایه چاپ سه بعدی شده با هندسه سلولی مربعی در مطالعه‌ی پیشین، به ترتیب ۱۶۰ و ۱۷ درصد افزایش یافته‌اند. این بهبود می‌تواند با توزیع مناسب‌تر تنش در مقیاس میکرو و در فصل مشترک تورق نمونه‌های دارای میان لایه شش ضلعی مرتبط باشد؛ به گونه‌ای که هندسه سلولی شش ضلعی، با توجه به ویژگی‌های هندسی خود، می‌تواند به تعدیل و توزیع مجدد تمرکزهای تنش در مقیاس میکرو کمک کند [۳۱]. افزون بر این، ساختارهای شش ضلعی در مقایسه با ساختارهای مربعی، به دلیل برخورداری از وجوه هندسی بیشتر، امکان انحراف بیشتر مسیر ترک و ایجاد سازوکار مؤثرتری برای قفل‌شدگی آن را فراهم می‌کنند [۳۱].

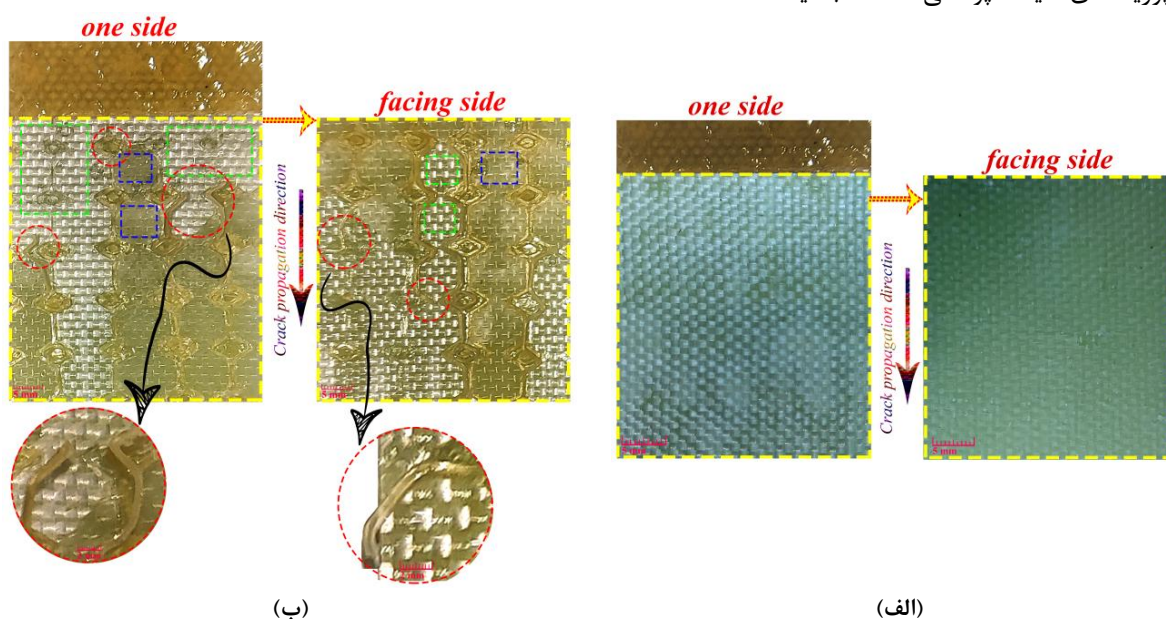
شایان ذکر است که مطابق با نتایج ارائه شده در جدول ۳؛ بررسی طول ناحیه فرایند شکست که به عنوان یکی دیگر از پارامترهای مؤثر در رفتار مقاومت در برابر تورق شناخته می‌شود، نشان‌دهنده افزایش ۱۴۶ درصدی این پارامتر در نمونه دارای میان لایه نسبت به نمونه فاقد میان لایه است. ناحیه فرایند شکست، موسوم به L_{FPZ} ، به محدوده‌ای در پیشانی نوک ترک اطلاق

می‌شود که در آن، اندرکنش‌ها و تعاملات بین‌لایه‌ای در فصل مشترک تورق همچنان تداوم دارند. مقدار این پارامتر بر اساس فاصله میان نوک ترک، که در مطالعه حاضر برابر با ۳۰ میلی‌متر است، تا نقطه‌ای تعیین می‌شود که نرخ رهایی انرژی کرنشی به مقدار پایدار خود می‌رسد. بر این اساس، می‌توان بیان کرد که نمونه‌های دارای میان‌لایه چاپ سه‌بعدی شده، در مقایسه با نمونه‌های فاقد میان‌لایه، مقاومت به‌مراتب مطلوب‌تری در برابر رشد ترک از خود نشان داده‌اند. همچنین، در مقایسه با مطالعه پیشین انجام شده، الگوی گسترش ترک از شکست همراه با طول بزرگ‌مقیاس ناحیه فرایند شکست در میان‌لایه‌های دارای سلول‌های مربعی تغییر یافته و مقدار پارامتر L_{FPZ} به ۱۳/۹۶ میلی‌متر رسیده است.

جدول ۳ مقایسه طول ناحیه‌ی فرایند شکست برای نمونه‌های شاهد و نمونه‌های تقویت‌شده با میان‌لایه‌ی چاپ سه‌بعدی شده با سلول‌های مربعی [۲۶] و شش ضلعی (مطالعه حاضر)

طول ناحیه‌ی فرایند شکست، (mm)	طول ناحیه‌ی فرایند شکست، (mm)	نمونه‌ی شاهد، (مطالعه‌ی حاضر)	نمونه‌ی شاهد، [۲۶]
۱۳/۹۶	۵/۶۸	نمونه‌ی با میان‌لایه چاپ سه‌بعدی شده (هندسه شش ضلعی، مطالعه‌ی حاضر)	۵/۵۵
۲۰	۵/۵۵	نمونه‌ی با میان‌لایه چاپ سه‌بعدی شده (هندسه مربعی، [۲۶])	

در ادامه، به‌منظور شناخت دقیق‌تر اثربخشی میان‌لایه چاپ سه‌بعدی شده با هندسه سلولی شش ضلعی، سطوح شکست و نحوه رشد و انتشار ترک میان لایه‌های کامپوزیتی در نمونه‌های دارای میان‌لایه و فاقد آن، با استفاده از میکروسکوپ نوری بررسی و سطوح شکست متناظر با آن‌ها در شکل ۶ ارائه شدند. در این راستا و همان‌گونه که در شکل ۶الف مشاهده می‌شود، رشد ترک در فصل مشترک نمونه‌های شاهد فاقد میان‌لایه، سطح شکستی صاف و عاری از سازوکار مقاومتی مشخص ایجاد کرده است. به‌عبارت‌دیگر، شکست در این نمونه‌ها از نوع گسیختگی و جدایش در فصل مشترک لایه‌ی الیاف و رزین بین‌لایه‌ای^۱ بوده است. به‌عبارتی دیگر می‌توان بیان نمود که این موارد از جمله دلایلی هستند که به کاهش چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مود II در کامپوزیت‌های شیشه/اپوکسی شاهد انجامیده است.



شکل ۶ تصاویر میکروسکوپ نوری از سطوح شکست نمونه‌های: (الف) شاهد، و (ب) تقویت شده با لایه‌ی میانی چاپ سه‌بعدی شده

در مقابل و باتوجه به سطح شکست ارائه شده در شکل ۶-ب مشخص است که به‌کارگیری میان‌لایه شش ضلعی به‌وضوح موجب شکل‌گیری سازوکارهای مقاوم و مؤثر در کنترل رشد ترک شده است. به‌عبارتی دیگر، بررسی سطح شکست نشان می‌دهد که این ساختار در مجموع به ایجاد الگویی آمیخته از گسیختگی در فصل مشترک لایه‌ی الیاف/رزین و گسیختگی درونی در رزین

^۱ Adhesive failure

و فیلامنت^۱ منجر شده است. این رفتار با فعال شدن سازوکارهای مقابله کننده با رشد ترک، از جمله تغییر شکل، کشیدگی و برش فیلامنت تقویت کننده PVA، همراه بوده است؛ نواحی متناظر با این سازوکارها در تصاویر ارائه شده در شکل ۶-ب با دایره قرمز مشخص شده‌اند. افزون بر این، مشاهده نواحی غنی از رزین و عاری از رزین، که به ترتیب با مستطیل‌های آبی و سبز نشان داده شده‌اند، شکل‌گیری این الگوی شکست و انحراف مسیر ترک در فصل مشترک تورق را به روشنی تأیید می‌کند (شکل ۶-ب). در پایان، ذکر این نکته ضروری است که به صورت کلی، بررسی رفتار شکست نشان می‌دهد که بهبود مقاومت در برابر رشد ترک در فصل مشترک فیلامنت PVA رزین اپوکسی، می‌تواند تحت تأثیر عواملی نظیر چسبندگی فیزیکی، درهم تنیدگی موضعی و احتمال برقراری پیوندهای هیدروژنی قرار گیرد [۳۲، ۳۳]. با این حال، نتایج تجربی حاصل از پژوهش حاضر حاکی از آن است که نقش قفل‌شوندگی مکانیکی و پل زنی فیلامنت‌ها در لایه میانی، در مقایسه با سایر سازوکارها، غالب بوده و سهم اصلی را در افزایش مقاومت در برابر رشد ترک ایفا می‌کند.

۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر، تأثیر توپولوژی و معماری سلولی میان لایه‌های چاپ سه بعدی شده از فیلامنت پلی وینیل الکل بر چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود II کامپوزیت‌های لایه‌ای شیشه/اپوکسی بررسی شد. بدین منظور و با اتخاذ رویکردی مقایسه‌ای نسبت به مطالعه‌ی انجام شده در گذشته، میان لایه‌ای PVA با ضخامت ۰/۴ میلی‌متر و دارای سلول‌های شش ضلعی در صفحه میانی کامپوزیت ۲۸ لایه قرار گرفت. همچنین لازم به توضیح است که به منظور مقایسه‌ای معتبر، تمامی پارامترهای طراحی، مواد و ساخت ثابت نگه داشته شد و تنها توپولوژی سلولی از مربعی به شش ضلعی تغییر یافت. چقرمگی شکست بین لایه‌ای مود II نمونه‌ها مطابق روش نرمی کالیبره شده تعیین و در نهایت، برای شناسایی سازوکارهای خرابی فعال در حین پیشروی ترک نیز، سطوح شکست نمونه‌ها با میکروسکوپ نوری بررسی شدند. مهم‌ترین نتایج حاصل از پژوهش حاضر به شرح زیر است:

- نتایج تجربی نمونه‌های شاهد در پژوهش حاضر و مطالعه مبنا، تطابق مناسبی را نشان داد که بیانگر کنترل مناسب نويزهای آزمایشگاهی و سایر متغیرهای مؤثر بود.
 - میان لایه چاپ سه بعدی شده با ساختار سلولی شش ضلعی، بیشینه حد تحملی بار را نسبت به نمونه شاهد ۲۵ درصد افزایش داد. همچنین، جایگزینی هندسه مربعی با هندسه شش ضلعی، در مطالعه‌ی حاضر، این پارامتر را حدود ۳۴ درصد افزایش داد که نشان از عملکرد مطلوب‌تر ساختار شش ضلعی در توزیع و تحمل بار داشت.
 - با استفاده از لایه‌ی میانی شش ضلعی، مقادیر G_{IIC}^{ini} ، G_{IIC}^{prop} و L_{FPZ} نسبت به نمونه فاقد میان لایه، به ترتیب ۱۶۴، ۸۸ و ۱۴۶ درصد افزایش یافتند. این بهبود در عملکرد بین لایه‌ای به چسبندگی بین لایه‌ای مطلوب، تشکیل نواحی غنی از رزین درون سلول‌های شش ضلعی و فعال شدن سازوکارهای کنترل و قفل‌کنندگی ترک، نسبت داده می‌شود.
 - در مقایسه با میان لایه مربعی در مطالعه پیشین، مقادیر G_{IIC}^{ini} و G_{IIC}^{prop} در نمونه دارای میان لایه شش ضلعی به ترتیب ۱۶۰ و ۱۷ درصد افزایش یافتند که می‌تواند با توزیع مناسب‌تر تنش و انحراف مؤثرتر مسیر ترک در هندسه شش ضلعی مرتبط باشد.
 - سطح شکست نمونه شاهد عمدتاً بیانگر جدایش در فصل مشترک الیاف و رزین بود، در حالی که نمونه دارای میان لایه شش ضلعی، الگوی شکست ترکیبی در فصل مشترک و درون رزین و فیلامنت نشان داد.
- لازم به اشاره است که با وجود نتایج مطلوب حاصل از به کارگیری میان لایه‌های چاپ سه بعدی شده در شرایط ساخت حاضر، بررسی اثر پارامترهای فرایند چاپ، از جمله دمای نازل و سرعت چاپ، بر رفتار شکست بین لایه‌ای، می‌تواند در مطالعات آتی مورد توجه قرار گیرد و به توسعه کاربردهای عملی این رویکرد کمک کند.

¹ Cohesive frailer

Authorship Contribution Statement

Dr. Mazaher Salamat-Talab



Biography: Associate professor of Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

Contribution Statement: Conceptualization, Methodology, Visualization, Writing – review & editing, Supervision, Project administration.

Hossein Kazemi



Biography: PhD Student in Mechanical Engineering, School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.

Contribution Statement: Conceptualization, Formal analysis, Investigation, Methodology, Visualization, Writing – original draft.

Zahra Bahrami



Biography: MSc Student in Mechanical Engineering, Department of Mechanical Engineering, Arak University of Technology, Arak, Iran.

Contribution Statement: Data Curation, Formal analysis, Investigation, Writing – review & editing.

۵- مراجع

- [1] Carlsson LA, Gillespie JW. Chapter 4 - Mode-II Interlaminar Fracture of Composites. In: Friedrich K, editor. Composite Materials Series: Elsevier; 1989:113-57.
- [2] Boon YD, Joshi SC. A review of methods for improving interlaminar interfaces and fracture toughness of laminated composites. Materials Today Communications. 2020;22:100830.
- [3] Lu T, Xue L, Ning H, Wu X, Ding Z, Hu N, et al. Optimizing Thickness and Interlayer Placement of Electrospun TPU Nanofibrous Membranes for Enhanced Interlaminar Performance and Impact Resistance in CFRP Laminates. Polymer Composites. 2025;n/a.
- [4] Salamat-Talab M, Kazemi H, Safari M. Influence of Key Parameters on the Crack Growth Resistance Curve (R-Curve) Behavior of End-Notched Flexure (ENF) Specimens of Laminated Composites: A Review. Journal of Polymer Materials. 2026;43.
- [5] Huang T, Bobyr M. A Review of Delamination Damage of Composite Materials. Journal of Composites Science. 2023.
- [6] Lai J, Yu Y, Zhang X, Qiang W, Zhang X. Interlaminar fracture toughness and impact resistance of carbon fiber reinforced composite with magnetic aligned CNTs. Composites Part B: Engineering. 2025;291:112008.
- [7] Jain LK, Dransfield KA, Mai Y-W. On the effects of stitching in CFRPs, Mode II delamination toughness. Composites Science and Technology. 1998;58.
- [8] Che Z, Li M, Wang S, Wang S, Gu Y, Zhang W. Mode II interlaminar fracture toughness enhancement of fine z-pin reinforced carbon fiber composite with low fraction of pins. Polymer Composites. 2022;43:2992-3002.
- [9] Gong Y, Tao J, Chen X, Zhao J, Hu N. A semi-analytical method for determining mode-II fracture toughness and bridging law of composite laminates. Engineering Fracture Mechanics. 2022;265:108371.
- [10] Ozdil F, Carlsson L, Li X. Characterization of mode II delamination growth in glass/epoxy composite cylinders. Journal of Composite Materials. 2000;34:274-98.

- [11] Salamat-Talab M, Kazemi H, Mahdavi M. Influence of yarn bundle orientation and areal density on the interlaminar fracture toughness of ENF composites. *Engineering Fracture Mechanics*. 2025;315:110806.
- [12] Zhao Y, Fang C, Jia L, Shi B, Chen Z, Zhang X, et al. Influence of Oxygen/Argon/Nitrogen multi-component plasma modification on interlayer toughening of UHMWPE fiber reinforced composites. *Composite Structures*. 2024;339:118142.
- [13] Ahangar M, Saeedifar M. The effect of plasma treatment on the mode II interlaminar fracture toughness of Glass/Epoxy laminates. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2023;127:104093.
- [14] Zhao H, Gao Z, Zhai D, Zhao G. Enhanced mechanical property of continuous carbon fiber/polyamide thermoplastic composites by combinational treatments of carbon fiber fabric. *Composites Communications*. 2023;38:101508.
- [15] Ogasawara T, Yoshimura A, Ishikawa T, Takahashi R, Sasakib N, Ogawa T. Interlaminar Fracture Toughness of 5 Harness Satin Woven Fabric Carbon Fiber/Epoxy Composites. *Advanced Composite Materials*. 2012;21:45-56.
- [16] Mozafari H, Yeganehfar H. Experimental investigation of mechanical properties of modified tourmaline on epoxy/silica nanocomposite. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2024;3:560-75. (in Persian)
- [17] Qian X, Kravchenko OG, Pedrazzoli D, Manas-Zloczower I. Effect of polycarbonate film surface morphology and oxygen plasma treatment on mode I and II fracture toughness of interleaved composite laminates. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2018;105:138-49.
- [18] Karami Khorramabadi M, Hadipour F, Dousti B. Investigating the effect of nanocellulose and nanoparticles of rosemary extract on elastic and antibacterial properties of epoxy-based biocomposite. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2024;3:491-515. (in Persian)
- [19] Bahmani M, Nosraty H, Mirdehghan SA, Varkiani SMH. Investigating the Interlaminar Fracture Toughness of Glass Fiber/Epoxy Composites Modified by Polypropylene Spunbond Nonwoven Fabric Interlayers. *Fibers and Polymers*. 2024;25:1061-73.
- [20] Zhao G, Zhang X, Qiang W, Zhang X. Enhancing the interlaminar toughness and impact resistance of CFRP using MWCNTs and core-shell rubber synergistic strategy. *Thin-Walled Structures*. 2025;212:113146.
- [21] Yu M, Wu L, Xie W, Zhang O, Liu X, Ren M, et al. Improving interlaminar fracture toughness and compression after impact strength of carbon fiber reinforced epoxy composites by interleaving electrospinning polyethersulfone nanofiber. *Polymer Composites*. 2025;46:5805-14.
- [22] Shao K, Zhang X, Lin L, Shen S, Zheng T, Wang X, et al. Investigation of interlaminar toughening properties in carbon fiber composites using wet veil formation of short-cut aramid fibers. *Polymer Composites*. 2025;46:8015-24.
- [23] Kazemi H, Salamat-Talab M, Ghanbari D. On the Interlaminar Properties of ENF Specimens of Glass/Epoxy Composites Incorporated Novel Hybrid Electrospun Interlayers. *Polymer Composites*. 2025.
- [24] Beylergil B, Duman V. Enhancing Mode-I and Mode-II fracture toughness of carbon fiber/epoxy laminated composites using 3D-printed polyamide interlayers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*. 2023;238:578-91.
- [25] Salamat-Talab M, Kazemi H. On the improving interlaminar fracture toughness of ENF composites based on additively manufactured interlayer: New approach. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2025;138:104952.
- [26] Kazemi H, Salamat-Talab M. Enhancing Mode II Interlaminar Fracture Toughness in Glass/Epoxy Composites Using 3D-Printed Polyvinyl Alcohol Interlayer. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2024;4:256-71. (in Persian)
- [27] ASTM. ASTM D7905/D7905M-19e1, Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites. 2019:18.
- [28] BONGSHIN LOADCELL CO. L. DBBP Series. In: BONGSHIN LOADCELL CO. L, editor. Osan-si, Korea 2018.
- [29] Zhang Y, Zhao H, Ou Y, Zhang H, Yao X, Mao D. Polyamide mesh as an effective toughening interlayer for GFRP composites: insights into fracture behavior and mechanisms. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. 2025;8:283.

- [30] Salamat-Talab M, Kazemi H, Safari M, Joudaki J. Aluminum-Based Fiber Metal Laminates in the Aircraft Industry. In: Gürgen S, editor. Aluminum Technologies in Aerospace Applications. Cham: Springer Nature Switzerland; 2025:93-125.
- [31] Kazemi H, Kashfi M, Soleymani L, Nourbakhsh SH. Effect of Internal Cellular Geometry on the Impact Performance of 3D-Printed Structures. *Mechanic of Advanced and Smart Materials*. 2025;4:623-44. (in Persian)
- [32] Zhang Y, Fang K, Wang W, Niu H. A Water-Soluble Epoxy-Based Green Crosslinking System for Stabilizing PVA Nanofibers. *Molecules* 2022.
- [33] Liang X, Zhong H-J, Ding H, Yu B, Ma X, Liu X, et al. Polyvinyl Alcohol (PVA)-Based Hydrogels: Recent Progress in Fabrication, Properties, and Multifunctional Applications. *Polymers* 2024.