



روش تقریبی جدید برای تعیین قانون پل زنی مود ترکیبی I/II کامپوزیت‌های لایه‌ای

زهرا دانشجو^{1*}

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهید بهشتی، تهران
 * تهران، صندوق پستی 16765-1719، z_daneshjoo@sbu.ac.ir

اطلاعات مقاله:

چکیده

در این مقاله با توجه به اهمیت پدیده پل زنی ترک حین رشد تورق در کامپوزیت‌های لایه‌ای تحت مود ترکیبی I/II و به منظور فهم فیزیک مسئله پل زنی ترک، ابتدا با انجام آزمایش‌های شکست بین لایه‌ای بر روی نمونه‌های کامپوزیتی و مشاهده سطوح شکست و ناحیه آسیب جلوی نوک تورق بر روی لبه نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، به شناسایی و معرفی مهم‌ترین مایکرومکانیزم‌های درگیر حین پدیده پل زنی الیاف پرداخته می‌شود. در ادامه، با توجه به پیچیدگی مدل‌های موجود برای پیش‌بینی قوانین پل زنی در تورق کامپوزیت‌های لایه‌ای و دشواری تعیین پارامترهای متعدد موجود در آن‌ها، یک روش تقریبی جدید برای تعیین قانون پل زنی بر اساس یک مدل پیچیده‌تر مبتنی بر فیزیک ارائه شده است. در این روش، با حفظ مبنای فیزیکی مسئله و از طریق جایگذاری تقریب‌های ساده در توصیف پل زنی، به استخراج قوانین پل زنی پرداخته شده است. مزیت اصلی روش ارائه شده، دستیابی به قوانین پل زنی با استفاده از روابط ساده‌تر و با تعداد پارامترهای مورد نیاز کمتر است. در نهایت به منظور ارزیابی صحت و دقت روش، رفتار کشش-جدایش ناحیه پل زنی پیش‌بینی شده توسط قانون پل زنی تقریبی ارائه شده با منحنی‌های کشش-جدایش تجربی در نسبت ترکیب مودهای مختلف مقایسه خواهد شد.

دریافت: 1401/03/30

پذیرش: 1401/05/09

کلیدواژگان

قانون پل زنی، کامپوزیت لایه‌ای، ناحیه فرآیند شکست، تورق، بارگذاری مود ترکیبی I/II

A novel approximate method for determining mixed mode I/II bridging law of laminated composites

Zahra Daneshjoo^{1*}

1- Faculty of Mechanical Engineering and Energy, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran
 * P.O.B. 16765-1719, Tehran, Iran, z_daneshjoo@sbu.ac.ir

Keywords

Bridging law, Laminated composite, Fracture process zone, Delamination, Mixed mode I/II loading

Abstract

This paper has been presented according to the importance of crack bridging in mixed mode I/II delamination of laminated composites and it is aimed to understand the physics of crack bridging. Firstly, the most important micro-mechanisms involved during fiber bridging are introduced. To do this, interlaminar fracture tests have been performed on composite specimens. Also, the fracture surfaces and the damage zone on the edge of the specimens have been observed using a scanning electron microscope (SEM). In the following, due to the complexity of the existing bridging models and the difficulty of determining their various parameters, a novel approximate method has been presented. In this method, which is based on a more complex physics-based model, the bridging laws are extracted by preserving the physics of the problem and considering simple approximations. The main advantage of the proposed method is the achievement of bridging laws using simpler relationships with fewer required parameters. Finally, the validity of the method has been evaluated through a comparison of the traction-separation behavior predicted by the proposed approximate bridging laws with the experimental traction-separation curves in different mode mixities.

1- مقدمه

در طی عمر کاری قطعات کامپوزیتی اغلب تحت ترکیبی از مدهای شکست I و II اتفاق می‌افتد. پدیده پیدایش و رشد تورق در کامپوزیت‌های لایه‌ای با وجود آمدن یک ناحیه آسیب‌دیده در اطراف نوک ترک تحت عنوان ناحیه فرآیند شکست³ همراه است. این ناحیه با جذب انرژی موجب به تأخیر انداختن شکست قطعه می‌شود، بنابراین تأثیر بسزایی در شکست قطعات کامپوزیتی دارد. در تورق کامپوزیت‌های لایه‌ای تک‌جهته به دلیل درهم‌تنیده

کاربرد وسیع و گسترده کامپوزیت‌های لایه‌ای در صنایع مختلف، لزوم مطالعه و درک صحیح مدهای تخریب¹ احتمالی در این نوع مواد را به منظور طراحی بهینه و بهبود مستمر عملکرد آن‌ها آشکار می‌سازد. تورق² یا جدایش بین لایه‌ای به عنوان یکی از مهم‌ترین مدهای تخریب در کامپوزیت‌های لایه‌ای

¹ Failure modes

² Delamination

³ Fracture Process Zone (FPZ)

Please cite this article using:

برای ارجاع به مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:

Daneshjoo, Z., "A novel approximate method for determining mixed mode I/II bridging law of laminated composites." In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 8, No. 4, pp. 1836-1848, 2022. <https://doi.org/10.22068/JSTC.2022.555832.1791>

شدن الیاف، پل زنی ناحیه بین وجهی تورق بر اثر الیاف به عنوان یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های جذب انرژی در ناحیه فرآیند شکست شناخته شده است [3-1]. پدیده پل زنی الیاف در ناحیه پشت پیشانی ترک است که پس از عبور ترک بین لایه‌ای از بین دو لایه، تعدادی از الیاف شکسته نشده، دو بازوی نمونه را به یکدیگر متصل کرده (یا در اصطلاح پل می‌زند) و یک مقاومت در برابر رشد ترک ایجاد می‌کنند. در بررسی پل زنی ترک در کامپوزیت‌ها، انرژی جذب شده توسط مکانیزم چقرمگی پل زنی الیاف موجود در ناحیه فرآیند شکست اغلب با استفاده از قوانین پل زنی محاسبه می‌شود [4-7]. یک قانون پل زنی¹ به عنوان رابطه‌ای بین تنش‌های پل زنی محلی و جابجایی محلی بازشدگی دهانه ترک تعریف می‌شود. قوانین پل زنی می‌توانند به طور تجربی از طریق آزمایش و یا با استفاده از مدل‌های میکرومکانیکی استخراج شوند.

تعدادی مدل‌های میکرومکانیکی به منظور استخراج قوانین پل زنی در مود I تورق کامپوزیت‌های لایه‌ای با در نظر گرفتن اثرات پل زنی الیاف توسعه یافته است [8-10]. اشیپیرینگ و ایوانز² [8] با مدل‌سازی الیاف پل زده به صورت تیرهای کوتاه با سطح مقطع مستطیلی شکل که بر مقاومت شکست از طریق کنده شدن الیاف³ از سطوح ترک غلبه می‌کنند، رابطه‌ای بین تنش نرمال و بازشدگی نرمال پیش‌بینی کردند. مدل آن‌ها بر مبنای تئوری تیر کلاسیک⁴ بود که در آن از لغزش الیاف به همراه اصطکاک که به طور تجربی مشاهده شده است [11]، صرف‌نظر شده بود. کوت و همکاران⁵ [9] بر مبنای مشاهدات در محل⁶ خود از بیرون کشیده شدن الیاف⁷ از درون ماتریس حین آزمایش کامپوزیت‌های پایه سرامیکی مدلی را ارائه کردند. مدل آن‌ها رابطه‌ای را برای نیروی بسته نگه داشتن ترک به صورت تابعی از بازشدگی ترک ارائه و کاهش تنش پل زنی ناشی از واماندگی الیاف را با استفاده از روش آماری ویبول⁸ پیش‌بینی کرد. ایونس و همکاران⁹ [10] مدل دیگری را بر مبنای مدل ولز¹⁰ [12] جهت بررسی اثر استحکام بین لایه‌ای بر پل زنی الیاف توسعه دادند. در مدل آن‌ها، یک نمونه تیر یک سر گیردار دو لبه¹¹ به همراه یک تک رشته که ترک را پل می‌زند، بر مبنای ملاحظات انرژی تحلیل شد. آن‌ها فرض کردند که الیاف از یک عمق رو به افزایش بیرون کشیده نمی‌شود و بنابراین انرژی الاستیک ذخیره شده در تک رشته پل زده تنها شامل انرژی لازم برای بلند شدن الیاف می‌شود.

در زمینه اثرات پل زنی الیاف بر پدیده واماندگی تورق کامپوزیت‌های لایه‌ای تحت مود ترکیبی I/II، محققان بسیاری به طور کیفی و از طریق مشاهدات تجربی به بررسی این موضوع پرداخته‌اند [13-15]. اما به دلیل پیچیدگی ناشی از وجود هر دو مود بارگذاری I و II، به بررسی این اثرات به طور کمی کمتر پرداخته شده است. در سال 2008 سورنسن و همکاران¹² [16] یک مدل میکرومکانیکی برای پیش‌بینی قوانین پل زنی مود ترکیبی I/II بر مبنای مشاهدات در محل رشد ترک مود ترکیبی I/II در یک

کامپوزیت کربن/اپوکسی تک‌جهته ارائه کردند. مدل آن‌ها در واقع نسخه تعمیم‌یافته مدل مود I تورق اشیپیرینگ و ایوانز [8] به مود ترکیبی I/II با در نظر گرفتن یک بازشدگی ترک در جهت مماسی بود. در مدل آن‌ها، تنها واماندگی جدا شدن الیاف در سرتاسر صفحه ترک (شامل ناحیه بین وجهی الیاف-ماتریس و ترک‌خوردگی ماتریس) در نظر گرفته شده بود و از شکست الیاف صرف‌نظر شده بود. آن‌ها همچنین فرض کردند که تعداد الیاف پل زده بر واحد سطح ترک ثابت بوده و مستقل از مسیر بازشدگی واقعی است. این فرض در تناقض با این واقعیت است که تعداد الیاف پل زده بر اثر شکست الیاف ناشی از بازشدگی رو به افزایش دهانه ترک، کاهش می‌یابد [9]. در حین پدیده پل زنی ترک توسط الیاف، میکرومکانیزم‌های مختلفی وجود دارند که در جذب انرژی در سرتاسر ترک‌های تورق پل زده مؤثر هستند. از این میکرومکانیزم‌ها می‌توان به بلند شدن الیاف از سطح ترک، لغزیدن و بیرون کشیده شدن الیاف، جدایش الیاف از ماتریس و شکست الیاف اشاره کرد [9,16]. در بیشتر مدل‌های میکرومکانیکی پل زنی ارائه شده به دلیل پیچیدگی، تنها اثرات تعداد کمی از این میکرومکانیزم‌ها در نظر گرفته شده است. در سال‌های اخیر دانشجو و همکاران [17] با در نظر گرفتن تک رشته پل زده به صورت یک تیر و اعمال شرایط بارگذاری مختلف بر آن، یک مدل پل زنی میکرومکانیکی در حالت بارگذاری مود ترکیبی I/II بر مبنای محاسبه انتقال بار در سرتاسر ناحیه پل زنی ترک ارائه کردند. آن‌ها در مدل پیشنهادی خود با در نظر گرفتن بیشترین اثرات میکرومکانیزم‌های درگیر حین پل زنی، به محاسبه دقیق‌تر سهم انرژی ناحیه پل زنی الیاف پرداختند.

پل زنی ترک با فشار بسته شدن ترک ($P(\delta)$) که به بازشدگی محلی ترک (δ) بستگی دارد، توصیف می‌شود و مدل‌های موجود برای پیش‌بینی قوانین پل زنی در تورق کامپوزیت‌های لایه‌ای، منجر به عباراتی برای $P(\delta)$ (یعنی فشار اعمالی توسط الیاف پل زده برای بسته نگه‌داشتن ترک) می‌شوند. مزیت و توانمندی این عبارات در این واقعیت نهفته است که آن‌ها مبتنی بر فیزیک هستند، یعنی پارامترهای موجود در آن‌ها، مستقیماً با خواص فیزیکی و هندسه ماتریس و الیاف ارتباط دارند. ضعف این عبارات معمولاً در پیچیدگی آن‌ها و دشواری در تعیین پارامترهای متعددی است که شامل می‌شوند. این پیچیدگی را می‌توان با حفظ مبنای فیزیکی مدل، از طریق جایگذاری تقریب‌های ساده برای فشار بسته شدن ترک ($P(\delta)$) تا حدودی حذف و یا تعدیل کرد. بنابراین، هدف اصلی این مقاله اعمال این تقریب در توصیف $P(\delta)$ برای پل زنی حین تورق در کامپوزیت‌های لایه‌ای تحت بارگذاری مود ترکیبی I/II است. ویژگی خاص این رویکرد، ارائه یک روش تقریبی جدید برای تعیین قانون پل زنی بر اساس یک مدل پیچیده‌تر مبتنی بر فیزیک است. در این روش برخلاف مدل‌های پل زنی موجود، با جایگذاری تقریب‌های ساده در توصیف پل زنی و ساده‌سازی روابط، تعداد پارامترهای لازم جهت پیاده‌سازی مدل کاهش یافته و برخی پارامترها که تعیین دقیق آن‌ها دشوار یا نیازمند انجام آزمایش است از روابط حذف شده‌اند. برای فهم فیزیک مسئله پل زنی ترک حین رشد پدیده واماندگی تورق در کامپوزیت‌های لایه‌ای، اولین قدم، شناسایی و معرفی میکرومکانیزم‌های درگیر حین پدیده پل زنی الیاف است. از این رو، در این مقاله ابتدا با مرور مشاهدات تجربی حاصل از انجام آزمایش‌های شکست بین لایه‌ای بر روی نمونه‌های کامپوزیتی و مشاهده سطوح شکست و ناحیه آسیب جلوی نوک تورق بر روی لبه نمونه‌ها با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی¹³ و بررسی نتایج، به

¹ Bridging law² Spearing and Evans³ Peeling away⁴ Classical beam theory⁵ Kaute et al.⁶ In situ observation⁷ Fiber pull-out⁸ Weibull⁹ Ivans et al.¹⁰ Wells¹¹ Double Cantilever Beam (DCB)¹² Sørensen et al.¹³ Scanning Electron Microscopy (SEM)

جدول 1 خواص مکانیکی تک‌جهته کامپوزیتی M30SC-150/DT120-34F [18]

Table 1 Elastic properties of unidirectional M30SC-150/DT 120-34F composite [18]

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}
155	7.80	5.50	0.29

جدول 2 خواص مکانیکی تک‌جهته کامپوزیتی E-glass/Epon-826 [19]

Table 2 Elastic properties of unidirectional E-glass/Epon-826 composite [19]

E_1 (GPa)	E_2 (GPa)	G_{12} (GPa)	ν_{12}
35.25	10.82	4.28	0.27

فرآیند پخت چندلایه در یک اتوکلاو³ به مدت 90 دقیقه در فشار bars 6 و دمای پخت °C 120 به انجام رسیده است. این چرخه پخت⁴ توسط شرکت سازنده توصیه شده است. پانل چندلایه شیشه/اپوکسی نیز از قرار دادن 18 لایه تک‌جهته الیاف شیشه به همراه رزین اپوکسی به روش لایه‌چینی دستی ساخته شده است. برای ایجاد ترک اولیه در نمونه‌ها از یک لایه تفلون با ضخامت حدود 20 μm در قسمت انتهایی چندلایه و در میان لایه‌های نهم و دهم استفاده شده است. فرآیند پخت چندلایه در دمای اتاق به مدت 7 روز به انجام رسیده و سپس به مدت 2 ساعت در دمای °C 150 تحت فراپخت قرار گرفته است. پس از پخت هر دو پانل به منظور شناسایی عیوب و حفره‌های ایجاد شده حین ساخت اسکن اولتراسونیک C شدند. در این پژوهش، سه نوع نمونه جهت انجام آزمایش‌های شکست ساخته شده است: نمونه تیر یک سر گیردار دو لبه برای تورق مود I خالص، نمونه خمش مود ترکیبی⁵ برای تورق مود ترکیبی I/II و نمونه با شکاف انتهایی⁶ برای تورق مود II خالص. نمونه‌ها با عرض 25 mm و مطابق ابعاد نشان داده شده در شکل 1 برای هر سه نوع نمونه از بخش‌های بدون عیب پانل‌ها با یک دستگاه برش جت آب⁷ برش داده شدند. تمامی نمونه‌های کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی به ترتیب دارای ضخامت کل 5 mm و 4.1 mm بودند. پس از برش، سطوح جانبی نمونه‌ها با سمباده نرم به آرامی سمباده زده می‌شوند تا سطحی صاف و عاری از خطوط موازی با جهت الیاف داشته باشند. از بلوک‌های مکعبی آلومینیومی که عرض آن‌ها دقیقاً برابر با عرض قطعات است، جهت تسهیل اتصال نمونه تیر یک سر گیردار دو لبه و نمونه خمش مود ترکیبی به دستگاه آزمایش، استفاده شده است. این بلوک‌ها توسط چسب اپوکسی به صورتی که محورشان کاملاً موازی لبه قطعه و ترک باشند (مطابق دستورالعمل استانداردهای ASTM [20,21]) به سطح انتهایی نمونه‌ها چسبانده می‌شوند. پیش از اتصال، سطوح انتهایی نمونه‌ها و بلوک‌ها (سطوح اتصال) با ورق سمباده 600 سمباده زده شده و با متانول شست‌وشو داده می‌شوند. شکل 2 نمای کلی نمونه بر یک سر گیردار دو لبه، نمونه خمش مود ترکیبی و نمونه با شکاف انتهایی به همراه بلوک چسبانده شده روی آن‌ها را نشان می‌دهد.

معرفی مهم‌ترین مایکرومکانیزم‌های درگیر حین پدیده پل زنی الیاف نیز پرداخته می‌شود.

2- کار آزمایشگاهی

مشاهده سطوح شکست و ناحیه فرآیند شکست فهم ارزشمندی از ماهیت و رفتار مکانیزم‌های چقرمگی موجود در آن از جمله پل زنی الیاف ایجاد کرده و می‌تواند برای مدل‌سازی اثرات پدیده پل زنی الیاف و مکانیزم‌های درگیر در آن در مقاومت در برابر تورق مؤثر باشد. در این راستا ابتدا بایستی به این سؤالات پاسخ داد:

1- در شکل‌گیری و توسعه ناحیه فرآیند شکست چه مکانیزم‌هایی فعال هستند؟

2- چه اتفاقاتی در این ناحیه رخ می‌دهد؟

تفاسیر و مفاهیم موجود در پاسخ به سؤالات فوق با ارزش هستند اما نتوانستند به طور کامل ناحیه فرآیند شکست را تعریف کنند. بنابراین، دستیابی به یک سری "شواهد و مشاهدات تجربی معتبر" ضروری و لازم به نظر می‌رسد. به همین دلیل، در بررسی و شناخت رفتار و ماهیت ناحیه فرآیند شکست و مکانیزم‌های چقرمگی موجود در آن در طول این پژوهش، اولین فاز مشاهده این ناحیه از طریق آزمایش تعریف می‌شود. بدین منظور، در این بخش به مطالعه آزمایشگاهی پدیده پل زنی ترک حین واماندگی تورق در نمونه‌های کامپوزیتی تک‌جهته تحت مدهای I و II خالص و مود ترکیبی I/II پرداخته می‌شود. ابتدا، مشخصات، جزئیات مواد استفاده شده و نحوه ساخت نمونه‌های کامپوزیتی شرح داده می‌شود. سپس جزئیات آزمایش‌های شکست بین لایه‌ای، نحوه انجام آن‌ها به همراه تجهیزات و دستگاه‌های بکار رفته توضیح داده می‌شود. در نهایت، نحوه استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی به منظور مشاهده سطوح شکست و بررسی ناحیه پل زنی ایجاد شده حین آزمایش تورق در نمونه‌های کامپوزیتی نیز تشریح می‌گردد.

2-1- مشخصه‌سازی مواد و ساخت نمونه‌ها

در ساخت نمونه‌های کامپوزیتی از دو نوع کامپوزیت یعنی کامپوزیت کربن/اپوکسی و کامپوزیت شیشه/اپوکسی استفاده شده است. در نمونه‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی از پیش آغشته¹ کربن/اپوکسی M30SC-150/DT120-34F تولید شده توسط شرکت Delta-Tech S.p.A ایتالیا استفاده شده است. در نمونه‌های کامپوزیتی شیشه/اپوکسی الیاف تک‌جهته شیشه سری E ساخت شرکت سونمز کشور ترکیه و رزین اپوکسی Epon-826 از نوع بیسفنول A با نسبت رزین به سخت‌کننده 100 به 13 به عنوان زمینه مورد استفاده قرار گرفته است. خواص مکانیکی کامپوزیت کربن/اپوکسی M30SC-150/DT120-34F و کامپوزیت شیشه/اپوکسی E-glass/Epon-826 به ترتیب در جدول 1 و جدول 2 آمده است.

در این پژوهش، نمونه‌ها به روش لایه‌چینی دستی ساخته شده‌اند. برای ساخت نمونه‌های کربن/اپوکسی، یک پانل² چندلایه از قرار دادن 32 لایه از پیش آغشته کربن/اپوکسی در چیدمان تک‌جهته ساخته شده است. در حین فرآیند لایه‌چینی، به منظور ایجاد ترک اولیه از یک فیلم نازک FEP با ضخامت حدود 15 μm در لبه انتهایی چندلایه بین لایه شانزدهم و هفدهم (صفحه میانی چندلایه) استفاده شده است.

³ Autoclave

⁴ Cure cycle

⁵ Mixed-Mode Bending (MMB)

⁶ End Notch Flexure (ENF)

⁷ Water jet cutting machine

¹ Prepreg

² Panel

می‌شود. این آزمایش‌ها تحت شرایط جابجایی کنترل¹ با نرخ جابجایی 1 میلی‌متر بر دقیقه انجام می‌گیرد. در این آزمایش، بلوک انتهایی نمونه‌ها از طریق بلوک‌های رابط به دستگاه متصل شده و سپس دستگاه تحت بارگذاری کششی قرار می‌گیرد.

آزمایش خمش مود ترکیبی با استفاده از یک ماشین MTS مجهز به یک لودسل با ظرفیت 10 kN انجام می‌شود. دستگاه آزمایش مطابق با استاندارد ASTM D6671 [20] طراحی شده است. این آزمایش‌ها تحت شرایط جابجایی کنترل با نرخ جابجایی 0.5 میلی‌متر بر دقیقه صورت می‌گیرد. فیکسچر بارگذاری آزمایش خمش مود ترکیبی از یک اهرم برای اعمال بار ترکیبی استفاده می‌کند. در این شرایط جهت تغییر مقدار مود ترکیبی اعمالی، باید میزان طول اهرم (C) تغییر کند. به منظور انجام آزمایش، ابتدا طول اهرم (C) برای هر نمونه در هر نسبت مود ترکیبی موردنظر تنظیم می‌شود. سپس نمونه‌ها از طریق بلوک‌های انتهایی به اهرم فوقانی و پایه زیرین متصل می‌شوند. انتهای نمونه نیز روی تکیه‌گاه قرار می‌گیرد. همچنین، تکیه‌گاه و اهرم بارگذاری بر مبنای نیم طول² (L) ثابت و برابر 50 mm تنظیم می‌شوند.

برای انجام آزمایش نمونه با شکاف انتهایی، از یک ماشین کشش-فشار Zwick با ظرفیت 20 kN، تحت شرایط جابجایی کنترل مطابق با استاندارد ASTM D7905 [22] استفاده شده است. جهت کاهش سرعت رشد تورق و افزایش تعداد داده‌های آزمایش، آزمایش تحت یک نرخ جابجایی پایین 0.1 میلی‌متر بر دقیقه انجام می‌شود. در این آزمایش، از فیکسچر خمشی سه نقطه³ استفاده شده و نمونه به نحوی روی تکیه‌گاه‌ها قرار می‌گیرد که طول تیر میان دو تکیه‌گاه 100 mm باشد و به طور فشاری بارگذاری گردد. در شکل 3 شمای کلی تجهیزات آزمایش‌های تیر یک سر گیردار دو لبه، خمش مود ترکیبی و نمونه با شکاف انتهایی به همراه نمونه‌ها حین انجام آزمایش نمایش داده شده است.

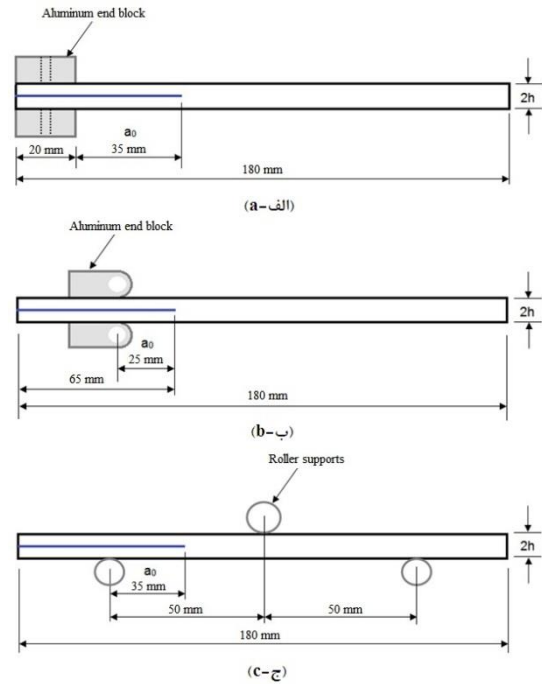


Fig. 1 Dimensions of a) DCB, b) MMB and c) ENF specimens

شکل 1 ابعاد الف) نمونه تیر یک سر گیردار دو لبه، ب) نمونه خمش مود ترکیبی و ج) نمونه با شکاف انتهایی ساخته شده

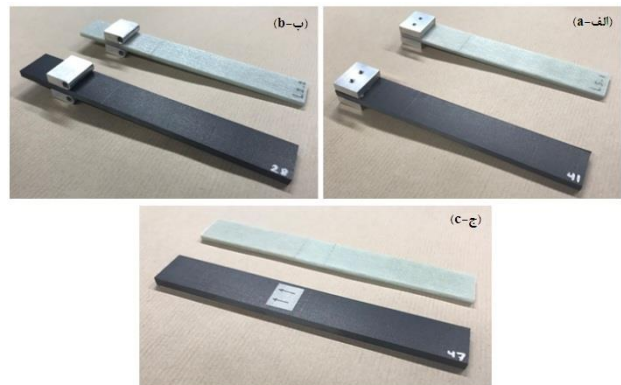


Fig. 2 a) DCB, b) MMB and c) ENF specimens

شکل 2 شمای کلی الف) نمونه تیر یک سر گیردار دو لبه، ب) نمونه خمش مود ترکیبی و ج) نمونه با شکاف انتهایی ساخته شده

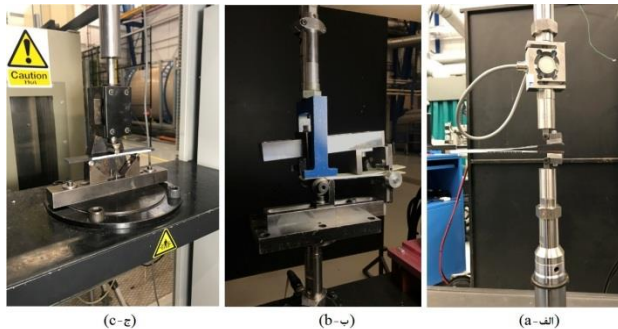


Fig. 3 Experimental setups for a) DCB, b) MMB and c) ENF tests

شکل 3 تجهیزات آزمایش الف) تیر یک سر گیردار دو لبه، ب) خمش مود ترکیبی و ج) نمونه با شکاف انتهایی صورت گرفته به همراه نمونه‌ها حین انجام آزمایش

پس از انجام آزمایش‌های تورق بر روی نمونه‌های کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی تحت مود I خالص، مود ترکیبی I/II و مود II خالص، به منظور مشاهده سطوح شکست و ناحیه فرآیند شکست این نمونه‌ها دو نوع بررسی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی صورت می‌گیرد:

2-2- نحوه انجام آزمایش‌های شکست بین لایه‌ای (تورق)

به منظور بررسی واماندگی تورق در کامپوزیت‌های لایه‌ای تحت مود I خالص، مود ترکیبی I/II و مود II خالص به ترتیب آزمایش‌های تیر یک سر گیردار دو لبه، خمش مود ترکیبی و نمونه با شکاف انتهایی صورت می‌گیرد. در این پژوهش، پنج نسبت مود ترکیبی (تعریف شده به صورت نسبت نرخ انرژی کرنشی آزاد شده مود II به نرخ انرژی کرنشی آزاد شده کل، G_{II}/G) در نظر گرفته شده است که عبارتند از: 0، 0.25، 0.5، 0.75 و 1 که $G_{II}/G = 0$ حالت مود I خالص و $G_{II}/G = 1$ حالت مود II خالص است. حداقل سه نمونه از هر دو نوع نمونه‌های کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی برای هر پیکربندی مورد آزمایش قرار می‌گیرد.

برای انجام آزمایش تیر یک سر گیردار دو لبه، از یک ماشین هیدرولیک MTS با ظرفیت 15 kN مطابق با استاندارد ASTM D5528 [21] استفاده

¹ Displacement control
² Half-span length
³ Point bend fixture

تصاویری از آن‌ها جهت بررسی در میکروسکوپ الکترونی روبشی در شکل 5 نشان داده شده است. نمونه‌های برش داده شده در همان میکروسکوپ الکترونی روبشی JOEL تحت ولتاژ تحریک 5 kV بررسی می‌شوند.

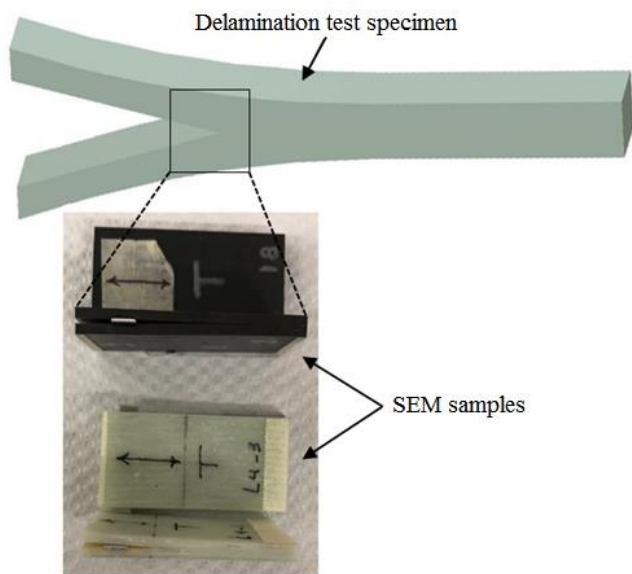


Fig. 5 SEM damage zone samples

شکل 5 نمونه جهت بررسی ناحیه آسیب جلوی نوک تورق توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی

3-2- مشاهدات آزمایشگاهی و نتایج

بررسی مشاهدات بدست آمده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از ناحیه فرآیند شکست جلوی نوک تورق بر روی لبه نمونه‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی در شرایط بارگذاری مود ترکیبی I/II نشان می‌دهد:

- با باز شدن دهانه ترک تعدادی از الیاف از بستر ماتریس بلند شده (شکل 6الف) و در یک زاویه سطحی دهانه ترک تورق را پل می‌زنند (شکل 6ب).
- پل زنی الیاف به طور مستقل در هر دو جهت مشاهده می‌شود (شکل 7).

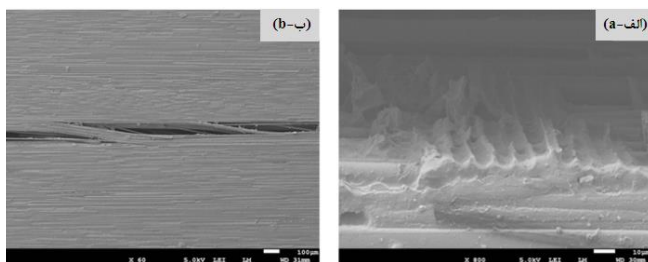


Fig. 6 SEM micrographs of the edge of a) a glass/epoxy laminated composite under mixed mode I/II (50% mode II) loading (Magnification x800); b) a carbon/epoxy laminated composite under mixed mode I/II (25% mode II) loading (Magnification x60)

شکل 6 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از لبه نمونه کامپوزیتی الف) شیشه/اپوکسی تحت مود ترکیبی I/II با نسبت ترکیب مود II:50 اثر به جامانده از بلند شدن الیاف از بستر ماتریس جهت پل زنی (بزرگنمایی 800 بار) و ب) کربن/اپوکسی تحت مود ترکیبی I/II با نسبت ترکیب مود II:25% شروع پل زنی ترک توسط الیاف در یک زاویه سطحی (بزرگنمایی 60 بار)

• بررسی سطوح شکست نمونه‌ها پس از آزمایش‌های تورق تحت مقادیر مختلف نسبت ترکیب مود:

سطوح شکست نمونه‌های تیر یک سر گیردار دو لبه، خمش مود ترکیبی و نمونه با شکاف انتهایی جهت بررسی اثر نسبت مود ترکیبی با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده و بررسی می‌شود. به این صورت که دو لبه تیر مانند نمونه‌ها پس از آزمایش‌های تورق به طور کامل از هم جدا می‌شوند. تکه‌هایی به طول 10-15 mm از جلوی نوک ترک اولیه برای مشاهده و بررسی در میکروسکوپ الکترونی روبشی برش داده می‌شوند. شکل 4 به طور شماتیک تکه‌های برش داده شده از سطح شکست نمونه‌ها به همراه تصاویری از آن‌ها جهت بررسی در میکروسکوپ الکترونی روبشی را نشان می‌دهد. یک نمونه کربن/اپوکسی و یک نمونه شیشه/اپوکسی در هر پنج نسبت ترکیب مود تعریف شده (0، 0.25، 0.5، 0.75 و 1) در میکروسکوپ الکترونی روبشی قرار داده می‌شوند. نمونه‌ها به مدت 130 ثانیه اسپری طلا شدند تا از شارژ استاتیک در میکروسکوپ الکترونی روبشی به دلیل ماهیت غیر رسانایی مواد جلوگیری شود. نمونه‌ها در یک میکروسکوپ الکترونی روبشی JOEL موجود در آزمایشگاه سازه‌های هوافضا و مواد دانشگاه دلفت هلند بررسی می‌شوند. ولتاژ تحریک در طول استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی، 5 kV است.

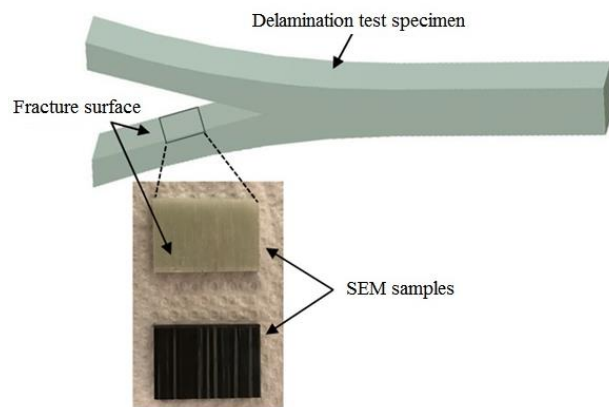


Fig. 4 SEM fracture surface samples

شکل 4 نمونه جهت بررسی سطح شکست توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی

• بررسی ناحیه آسیب جلوی نوک تورق بر روی لبه نمونه‌ها پس از آزمایش‌های تورق:

هدف از بررسی ناحیه آسیب جلوی نوک تورق توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی، بررسی مایکرومکانیزم‌های درگیر حین پدیده پل زنی الیاف است. به این صورت که یک نمونه کربن/اپوکسی و یک نمونه شیشه/اپوکسی در هر پنج نسبت ترکیب مود در نظر گرفته شده (0، 0.25، 0.5، 0.75 و 1)، تحت آزمایش‌های تیر یک سر گیردار دو لبه، خمش مود ترکیبی و نمونه با شکاف انتهایی قرار می‌گیرند. آزمایش‌های تورق پس از رشد تورق به اندازه 5-10 mm متوقف می‌شوند. پس از آزمایش، نمونه تحت همان بار و جابجایی باز نگه داشته می‌شود. یک تیغه فولادی نازک به منظور باز نگه داشتن نمونه پس از آزمایش در دهانه باز نمونه و نزدیک نوک ترک قرار داده می‌شود. تکه‌هایی از نمونه‌ها به طول 15-18 mm از پشت تیغه فولادی برای بررسی در میکروسکوپ الکترونی روبشی برش داده می‌شوند. لبه‌های نمونه‌ها جهت جلوگیری از شارژ استاتیک در میکروسکوپ الکترونی روبشی اسپری طلا می‌شوند. تکه‌های برش داده شده از لبه نمونه‌ها به طور شماتیک به همراه

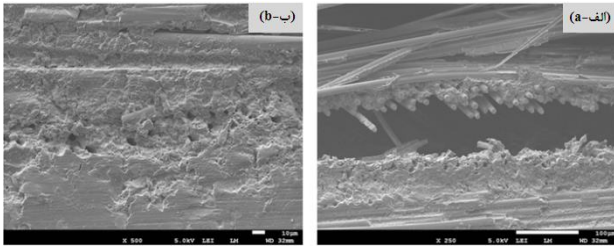


Fig. 10 SEM micrographs of the edge of a glass/epoxy laminated composite under mixed mode I/II (25% mode II) loading (Magnification a) x250; b) x500)

شکل 10 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از لبه نمونه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت مود ترکیبی I/II با نسبت ترکیب مود 25٪ مود II؛ حفره‌های سیاه به جامانده از لغزش الیاف و بیرون کشیده شدن الیاف از ماتریس (بزرگ‌نمایی الف) 250 بار و ب) 500 بار)

- با افزایش بازشدگی دهانه ترک، شکست الیاف اتفاق می‌افتد و تعداد الیاف پل زده کاهش می‌یابد (شکل 11).

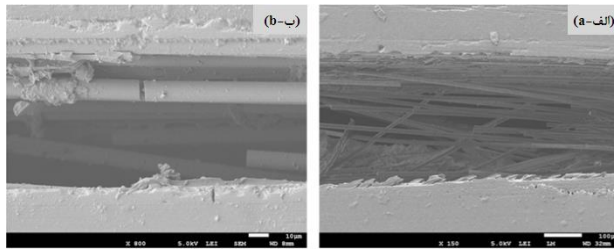


Fig. 11 SEM micrographs of the edge of a glass/epoxy laminated composite under mixed mode I/II (75% mode II) loading (Magnification a) x150; b) x800)

شکل 11 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از لبه نمونه کامپوزیتی شیشه/اپوکسی تحت مود ترکیبی I/II با نسبت ترکیب مود 75٪ مود II؛ شکست الیاف بر اثر تحمل بارهای مختلف (بزرگ‌نمایی الف) 150 بار و ب) 800 بار)

بر مبنای مشاهدات تجربی فوق، در تورق مود ترکیبی I/II کامپوزیت‌های لایه‌ای می‌توان مهم‌ترین میکرومکانیزم‌های درگیر حین پدیده پل زنی الیاف را شامل بلند شدن الیاف از بستر ماتریس و به دنبال آن بلند (ورقه ورقه) شدن ماتریس، جدایش الیاف- ماتریس و به دنبال آن بیرون کشیده شدن الیاف و شکست الیاف معرفی کرد.

3- مدل سازی تحلیلی پل زنی الیاف

یکی از مؤثرترین راه‌ها برای افزایش چقرمگی در کامپوزیت‌های لایه‌ای، پل زنی دهانه ترک توسط الیاف است به این صورت که هر ترکی که در آن وجود دارد در صورت رشد و گسترش توسط الیاف پل زده می‌شود. الیاف پل زده با شروع رشد ترک، برای یک بازشدگی ترک معین δ ، یک فشار $P(\delta)$ برای بسته نگه داشتن ترک اعمال می‌کنند. آن‌ها با افزودن یک سهم به چقرمگی شکست حالت پایدار (G_{ss}) کمک می‌کنند:

$$G_{ss} = \int_0^{\delta_{max}} p(\delta) d\delta \quad (1)$$

که در آن δ_{max} بازشدگی دهانه ترک در انتهای ناحیه پل زنی کاملاً توسعه یافته و به دور از نوک ترک است [11]. فشار بسته شدن ترک برای مودهای مختلف بارگذاری و انواع کامپوزیت‌ها تخمین زده شده است [23-25]. با داشتن $P(\delta)$ امکان محاسبه چقرمگی ماده و نحوه توسعه آن که همان شکل

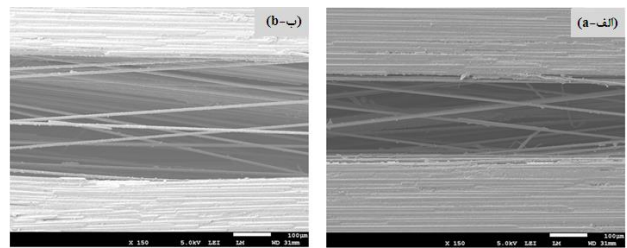


Fig. 7 SEM micrographs of the edge of a) a carbon/epoxy; b) a glass/epoxy laminated composite under mixed mode I/II (25% mode II) loading (Magnification x150)

شکل 7 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از لبه نمونه کامپوزیتی الف) کربن/اپوکسی و ب) شیشه/اپوکسی تحت مود ترکیبی I/II با نسبت ترکیب مود 25٪ مود II؛ پل زنی ترک توسط الیاف در هر دو جهت (بزرگ‌نمایی 150 بار)

- با باز شدن بیشتر دهانه ترک، زاویه پل زنی افزایش یافته و ترک‌های کوچکی در ماتریس بالای ریشه الیاف ایجاد می‌شود که در نهایت منجر به بلند شدن (ورقه شدن) ماده ماتریس در ریشه الیاف می‌گردد. مثال‌هایی از بلند شدن ماتریس در ریشه الیاف حین تورق مود ترکیبی I/II نمونه‌های کامپوزیتی کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی در شکل 8 نشان داده شده است.

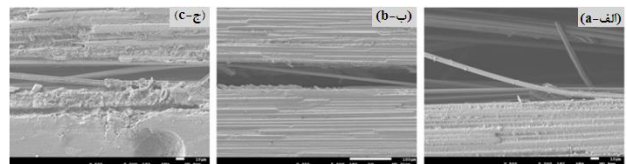


Fig. 8 SEM micrographs of the edge of a) a carbon/epoxy laminated composite under mixed mode I/II (75% mode II) loading (Magnification x500); b) a carbon/epoxy laminated composite under mixed mode I/II (50% mode II) loading (Magnification x250); c- a glass/epoxy laminated composite under mixed mode I/II (25% mode II) loading (Magnification x150)

شکل 8 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از لبه نمونه کامپوزیتی الف)- کربن/اپوکسی تحت مود ترکیبی I/II با نسبت ترکیب مود 75٪ مود II، ب)- کربن/اپوکسی تحت مود ترکیبی I/II با نسبت ترکیب مود 50٪ مود II و ج)- شیشه/اپوکسی تحت مود ترکیبی I/II با نسبت ترکیب مود 25٪ مود II؛ بلند شدن ماتریس در ریشه الیاف (بزرگ‌نمایی الف، ج- 500 بار و ب- 250 بار)

- ریشه برخی از الیاف پل زده بر اثر تحمل بار از ماتریس جدا شده (شکل 9) و با لغزش بیرون کشیده شده‌اند (شکل 10).

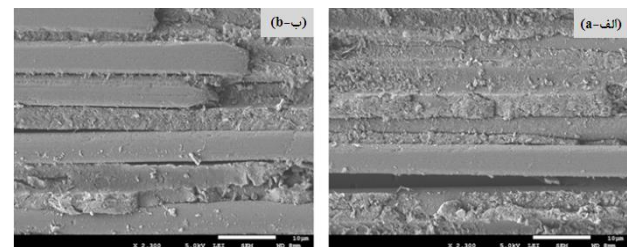


Fig. 9 SEM micrographs of the edge of a carbon/epoxy laminated composite under mixed mode I/II (50% mode II) loading (Magnification x2300)

شکل 9 تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از لبه نمونه کامپوزیتی کربن/اپوکسی تحت مود ترکیبی I/II با نسبت ترکیب مود 50٪ مود II؛ جدایش الیاف- ماتریس (بزرگ‌نمایی 2300 بار)

که d قطر الیاف، E_f مدول الاستیسیته الیاف، l_0 طول اولیه الیاف آزاد (طول پل زنی اولیه)، τ_i مقاومت برشی اصطکاک ناحیه بین وجهی، δ_n و δ_t به ترتیب جابجایی نرمال و مماسی الیاف پل زده است.

تعداد الیاف پل زده در واحد سطح ترک از یک تعداد اولیه n_0 شروع می‌شود و بر اثر شکست الیاف ناشی از بازشدگی بیشتر ترک کاهش می‌یابد. به طور تجربی تعداد اولیه الیاف پل زده از سطوح شکست برآورد می‌شود. تا زمانی که تنش خمشی در ریشه الیاف کمتر از مقدار متوسط استحکام الیاف باشد، تعداد الیاف وامانده شده ناچیز بوده و بنابراین تعداد الیاف پل زده ثابت فرض می‌شود (در بازشدگی‌های کوچک- کمتر از δ_{n0} و δ_{t0})، با افزایش تنش خمشی در ریشه الیاف، واماندگی الیاف اتفاق می‌افتد. تعداد الیاف پل زده باقیمانده به احتمال بقاء یک تک رشته مرتبط بوده و توسط رویکرد آماری ویبول⁵ توصیف می‌شود [28,29]. پیش از آنکه الیاف دچار واماندگی و شکست شوند، یعنی $\delta_n < \delta_{n0}$ و $\delta_t < \delta_{t0}$ ، تعداد الیاف پل زده برابر همان تعداد اولیه n_0 خواهد بود و پس از آن انتظار می‌رود تعداد الیاف پل زده، $n(\delta_n, \delta_t)$ بر طبق قانون نمایی زیر کاهش یابد [9]:

$$n(\delta_n, \delta_t) = \begin{cases} n_0 & (\delta_t < \delta_{t0}, \delta_n < \delta_{n0}) \\ n_0 \exp \left[-C_b \frac{l(\delta_n, \delta_t)}{l_{ref}} \left(\frac{\bar{\sigma}(\delta_n, \delta_t)}{\sigma_{ref}} \right)^m \right] & (\delta_t > \delta_{t0}, \delta_n > \delta_{n0}) \end{cases} \quad (4)$$

که $\bar{\sigma}(\delta_n, \delta_t)$ حداکثر تنش مؤثر که تنش ترکیبی ناشی از کشش در الیاف حین بیرون کشیدگی و خمش در الیاف پل زده است و در مرجع [17] به تفصیل تعریف شده است. همچنین، l_{ref} و σ_{ref} به ترتیب طول و استحکام مرجع ویبول و m مدول ویبول است. $l(\delta_n, \delta_t)$ طول الیاف پل زده (طول پل زنی فعلی (واقعی)) و C_b ضریب تصحیح بدون بعد، ($C_b < 1$)، برای امکان مقایسه بین تنش‌های خمشی و کششی است. فشار اعمالی توسط الیاف پل زده برای بسته نگه‌داشتن ترک یا به عبارت بهتر کشش‌های نرمال و مماسی ناحیه پل زنی، $T_n(\delta_n, \delta_t)$ و $T_t(\delta_n, \delta_t)$ ، عبارت است از حاصلضرب نیرو در هر رشته در جهت نرمال و مماسی، $f_n(\delta_n, \delta_t)$ و $f_t(\delta_n, \delta_t)$ ، در تعداد الیاف در واحد سطح ترک، $n(\delta_n, \delta_t)$ ، است و مشخص است که رابطه پیچیده‌ای خواهد بود.

2-3- قانون پل زنی تقریبی

اهمیت روابط بدست آمده در بخش قبل در این است که فشار بسته نگه‌داشتن ترک یا همان کشش‌های نرمال و مماسی ناحیه پل زنی، $T_n(\delta_n, \delta_t)$ و $T_t(\delta_n, \delta_t)$ ، را به خواص اجزای تشکیل‌دهنده مرتبط می‌کند (جدول 1 در مرجع [17]). اگر این خواص در دسترس باشند، می‌توان قانون پل زنی را در قالب منحنی‌های کشش- جدایش $T_n(\delta_n, \delta_t)$ و $T_t(\delta_n, \delta_t)$ پیش‌بینی نمود. اما در بکارگیری از این روابط دو مشکل پیش روی ما است: اول، روابط آنقدر پیچیده است که مشخص نیست کدام یک از پارامترهای متعددی که در آن‌ها وجود دارد برای پاسخ میکروسکوپی ضروری است؛ دوم، تعیین دقیق بسیاری از این خواص اجزای تشکیل‌دهنده دشوار است. بسیاری از این پیچیدگی‌ها را می‌توان با جستجوی تقریب‌های ساده برای نیروی الیاف $f_n(\delta_n, \delta_t)$ و $f_t(\delta_n, \delta_t)$ ، تعداد الیاف $n(\delta_n, \delta_t)$ و کشش‌های نرمال و مماسی پل زنی $T_n(\delta_n, \delta_t)$ و $T_t(\delta_n, \delta_t)$ حذف کرد به گونه‌ای که فیزیک مسئله حفظ شود.

منحنی مقاومت در برابر رشد ترک (R منحنی) است، فراهم می‌شود [26,27].

فشار اعمالی توسط الیاف پل زده برای بسته نگه‌داشتن ترک، $P(\delta)$ ، عبارت است از حاصلضرب نیروی هر رشته پل زده، $f(\delta)$ ، در تعداد الیاف پل زده در واحد سطح ترک، $n(\delta)$:

$$p(\delta) = n(\delta) \cdot f(\delta) \quad (2)$$

1-3- نتایج استخراج قانون پل زنی الیاف

در پژوهش قبلی صورت گرفته توسط نگارنده حاضر و همکاران [17] به بررسی پدیده پل زنی ترک توسط الیاف در تورق کامپوزیت‌های لایه‌ای تک‌جهته تحت بارگذاری مود ترکیبی I/II پرداخته شده است. پس از شروع تورق، تعداد قابل توجهی از الیاف در یک زاویه سطحی دهانه ترک را پل می‌زنند (شکل 1). فشار کلی بسته نگه‌داشتن ترک، $P(\delta)$ ، با تعداد الیاف پل زده، $n(\delta)$ و نیروی اعمالی توسط هر یک برای بسته نگه‌داشتن ترک، $f(\delta)$ ، تعیین می‌شود. با باز شدن دهانه ترک، الیاف پل زده ابتدا خم شده و سپس شروع به تحمل نیروهای کششی فزاینده می‌کنند. همین نیروهای کششی بیشترین سهم را در نیروی بسته نگه‌داشتن ترک دارند. پس از پل زنی الیاف و تحمل بارهای مختلف توسط الیاف پل زده حین پدیده پل زنی، هم‌چنان ریشه الیاف در دو انتها داخل بستر ماتریس باقی‌مانده است که بر اثر تحمل بارهای مختلف می‌خواهد از درون بستر ماتریس بلند شود اما ماتریس در برابر نیروی کنده شدن الیاف مقاومت از نوع کنده شدن² می‌کند و در نتیجه ترک‌هایی در ماتریس رشد می‌کند³. زمانی که این ترک‌ها بین دو رشته مجاور الیاف پل زده گسترش یابند، الیاف از درون ماتریس بلند می‌شوند. فشار بسته نگه‌داشتن ترک $P(\delta)$ ، ابتدا با بلند شدن الیاف از بستر ماتریس محدود شده و این امر منجر به یک زاویه پل زنی تقریباً ثابت و تنش در الیاف می‌شود. سپس فشار $P(\delta)$ به دلیل شکست الیاف محدود می‌شود. بنابراین نیروی هر رشته الیاف به یک مقدار ثابت می‌رسد، در حالی که با افزایش بازشدگی دهانه ترک، تعداد الیاف پل زده در واحد سطح ترک به دلیل شکست الیاف کاهش می‌یابد.

در مرجع [17] یک مدل پل زنی ترک در حالت بارگذاری مود ترکیبی I/II توسعه داده شد که ویژگی‌های اساسی پدیده پل زنی را شامل می‌شود و وابستگی فشار بسته نگه‌داشتن ترک به خواص اصلی الیاف، ماتریس و محل اتصال⁴ آن‌ها را نشان می‌دهد. در اینجا به نتایج اصلی این مدل اشاره می‌شود. مؤلفه‌های نیروی تحمل شده در هر تک رشته پل زده در جهت نرمال و مماسی، $f_n(\delta_n, \delta_t)$ و $f_t(\delta_n, \delta_t)$ ، برابر است با [17]:

$$f_n(\delta_n, \delta_t) = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\tau_i E_f l_0}{d}} \left(\frac{2\delta_t}{l_0} + \frac{\delta_n^2}{l_0^2} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{\delta_n}{l_0 + \delta_t} \right)$$

$$f_t(\delta_n, \delta_t) = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\tau_i E_f l_0}{d}} \left(\frac{2\delta_t}{l_0} + \frac{\delta_n^2}{l_0^2} \right)^{1/2} \quad (3)$$

¹ Resistance curve (R-curve)

² Peel Resistance

³ Matrix Spalling

⁴ interface

⁵ Weibull statistics approach

$$f_n(\delta_n) = \begin{cases} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\tau_i E_f l_0}{d}} \left(\frac{\delta_n}{l_0}\right)^2 & \varphi = 0^\circ \\ \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\tau_i E_f l_0}{d}} \left(\frac{\delta_n}{l_0}\right)^{\frac{3}{2}} \left(2 \tan \varphi + \frac{\delta_n}{l_0}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 - \tan \varphi \frac{\delta_n}{l_0}\right)^{\frac{1}{2}} & \varphi \neq 0^\circ \end{cases} \quad (9)$$

بر طبق منحنی‌های تجربی نیرو-جابجایی موجود در راستای نرمال $(f_n - \delta_n)$ ، منحنی از مبدأ شروع شده، در بازشدگی‌های کوچک دهانه ترک، به صورت یک تابع نمایی تقریبی بوده و با افزایش بازشدگی به یک مقدار ثابت \bar{f}_{max} می‌رسد. بنابراین، می‌توان $f_n(\delta_n)$ را با استفاده از تابع زیر تقریب زد:

$$f_n(\delta_n) = \begin{cases} \bar{f}_{max} \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{\delta_n}{\delta_{n0}}\right)^2\right) \right] & \varphi = 0 \\ \bar{f}_{max} \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{\delta_n}{\delta_{n0}}\right)^{\frac{3}{2}} \left(a_{n0} + \frac{\delta_n}{\delta_{n0}}\right)^{\frac{1}{2}} \left(b_{n0} + \frac{\delta_n}{\delta_{n0}}\right)\right) \right] & \varphi \neq 0 \end{cases} \quad (10)$$

که δ_{n0} جابجایی نرمال (بازشدگی) مشخصه بخش صعودی منحنی کشش-جدایش $T_n - \delta_n$ و a_{n0} و b_{n0} ثابت هستند. با معادل قرار دادن حد رابطه (10) (δ_n) کوچک با سمت راست رابطه (9)، جابجایی نرمال (بازشدگی) مشخصه δ_{n0} می‌تواند برحسب تنها خواص اجزای تشکیل‌دهنده بدست آید:

$$\delta_{n0} = \begin{cases} \frac{\bar{f}_{max}}{\pi} \left(\frac{2l_0}{d}\right)^{\frac{3}{2}} (\tau_i E_f)^{-\frac{1}{2}} & \varphi = 0^\circ \\ 2 \left(\frac{\bar{f}_{max}}{\pi}\right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{1}{d}\right)^{\frac{3}{2}} l_0^{\frac{3}{2}} (\tau_i E_f)^{-\frac{1}{3}} \left(\frac{1}{\tan \varphi}\right)^{\frac{2}{3}} & \varphi \neq 0^\circ \end{cases} \quad (11)$$

در ارتباط با تعداد الیاف پل زده بر واحد سطح ترک، همانطور که در بخش 3-1 اشاره شد، تعداد الیاف پل زده از یک تعداد اولیه n_0 ثابت شروع شده و با افزایش بازشدگی دهانه ترک، کاهش می‌یابد. با تعریف θ به عنوان زاویه بین رشته پل زده و سطح ترک (زاویه پل زنی)، طول پل زنی بر حسب جابجایی نرمال دهانه ترک به صورت زیر بیان می‌شود:

$$l = \frac{\delta_n}{\sin \theta} \quad (12)$$

هنگامیکه ماتریس بالای ریشه الیاف شروع به بلند شدن (ورقه ورقه شدن) می‌کند، حداکثر مقدار θ از رابطه زیر بدست می‌آید [9]:

$$\theta_{max} = \tan^{-1} \left[\frac{4\bar{f}_{max}}{\sigma_p(\delta_n, \delta_t) \pi d^2} \right] \quad (13)$$

که در آن $\sigma_p(\delta_n, \delta_t)$ کشش در الیاف حین بیرون کشیدگی بوده و از رابطه زیر بدست می‌آید [17]:

$$\sigma_p(\delta_n, \delta_t) \cong \sqrt{\frac{2\tau_i E_f l_0}{d} \left(\frac{2\delta_t}{l_0} + \frac{\delta_n^2}{l_0^2}\right)^{\frac{1}{2}}} \quad (14)$$

در بازشدگی‌های کوچک دهانه ترک $\sin \theta \approx \tan \theta$ با جایگذاری روابط (12) تا (14) در رابطه (4) خواهیم داشت:

در این بخش به ارائه روابط ساده‌تری برای نتایج مدل پل زنی ارائه شده در مرجع [17] (روابط 3 و 4) با بکارگیری تقریب‌های ساده برای آن‌ها پرداخته می‌شود.

از آنجا که هدف استخراج پاسخ کشش-جدایش در راستای نرمال $(T_n - \delta_n)$ و در راستای مماسی $(T_t - \delta_t)$ است، بنابراین بهتر است با استفاده از زاویه ترکیب مود φ که به صورت $\varphi = \tan^{-1}(\delta_t/\delta_n)$ تعریف می‌شود و به ترتیب با جایگذاری δ_t به صورت $\delta_t = \delta_n \tan \varphi$ در $f_n(\delta_n, \delta_t)$ موجود در رابطه (3) و جایگذاری δ_n به صورت $\delta_n = \delta_t / \tan \varphi$ در $f_t(\delta_n, \delta_t)$ موجود در رابطه (3)، رابطه (3) را به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$f_n(\delta_n) = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\tau_i E_f l_0}{d}} \left(2 \tan \varphi \frac{\delta_n}{l_0} + \frac{\delta_n}{l_0}\right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{\delta_n}{l_0 + \tan \varphi \delta_n}\right)$$

$$f_t(\delta_t) = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\tau_i E_f l_0}{d}} \left(\frac{2\delta_t}{l_0} + \frac{1}{\tan^2 \varphi} \frac{\delta_t^2}{l_0^2}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

از روابط (3) و (5) برای $f_t(\delta_t)$ داریم:

$$f_t(\delta_t) = \begin{cases} \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\tau_i E_f l_0}{d}} \left(\frac{2\delta_t}{l_0}\right)^{\frac{1}{2}} & \varphi = 90^\circ \\ \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2\tau_i E_f l_0}{d}} \left(\frac{2\delta_t}{l_0}\right)^{\frac{1}{2}} \left(1 + \frac{1}{2 \tan^2 \varphi} \frac{\delta_t}{l_0}\right)^{\frac{1}{2}} & \varphi \neq 90^\circ \end{cases} \quad (6)$$

بر طبق منحنی‌های تجربی نیرو-جابجایی موجود در راستای مماسی $(f_t - \delta_t)$ منحنی از مبدأ شروع شده، در جابجایی‌های مماسی کوچک دهانه ترک، به صورت یک تابع نمایی تقریبی بوده و با افزایش جابجایی به یک مقدار ثابت \bar{f}_{max} می‌رسد. بنابراین، می‌توان $f_t(\delta_t)$ را با استفاده از تابع زیر تقریب زد:

$$f_t(\delta_t) = \begin{cases} \bar{f}_{max} \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{\delta_t}{\delta_{t0}}\right)^{\frac{1}{2}}\right) \right] & \varphi = 90^\circ \\ \bar{f}_{max} \left[1 - \exp\left(-\left(\left(\frac{\delta_t}{\delta_{t0}}\right)^{\frac{1}{2}} \left(a_{t0} + \frac{\delta_t}{\delta_{t0}}\right)^{\frac{1}{2}}\right)\right) \right] & \varphi \neq 90^\circ \end{cases} \quad (7)$$

که δ_{t0} جابجایی مماسی مشخصه بخش صعودی منحنی کشش-جدایش $(T_t - \delta_t)$ و a_{t0} یک ثابت است.

با معادل قرار دادن حد مجذور رابطه (7) (δ_t) کوچک با سمت راست رابطه (6)، جابجایی مماسی مشخصه δ_{t0} می‌تواند برحسب تنها خواص اجزای تشکیل‌دهنده بدست آید:

$$\delta_{t0} = \begin{cases} \frac{4\bar{f}_{max}^2}{\pi^2} \left(\frac{1}{d}\right)^3 (\tau_i E_f)^{-1} & \varphi = 90^\circ \\ \frac{4\bar{f}_{max}}{\pi} \left(\frac{l_0}{2}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{1}{d}\right)^{\frac{3}{2}} (\tau_i E_f)^{-\frac{1}{2}} \cdot \tan \varphi & \varphi \neq 90^\circ \end{cases} \quad (8)$$

به طور مشابه از روابط (3) و (5) برای $f_n(\delta_n)$ داریم:

$$T_n(\delta_n) = \begin{cases} n_0 \bar{f}_{\max} \left[1 - \exp\left(-\frac{\delta_n}{\delta_{n0}}\right)^2 \right] \\ \exp\left(-\frac{\delta_n}{\delta_{nf}}\right)^{3/2} \left(a_{nf} + \frac{\delta_n}{\delta_{nf}} \right)^{1/2} & \varphi=0^\circ \\ n_0 \bar{f}_{\max} \left[1 - \exp\left(-\frac{\delta_n}{\delta_{n0}}\right)^{3/2} \left(a_{n0} + \frac{\delta_n}{\delta_{n0}} \right)^{1/2} \left(b_{n0} + \frac{\delta_n}{\delta_{n0}} \right) \right] \\ \exp\left(-\frac{\delta_n}{\delta_{nf}}\right)^{3/2} \left(a_{nf} + \frac{\delta_n}{\delta_{nf}} \right)^{1/2} & \varphi \neq 0^\circ \end{cases} \quad (18)$$

$$T_t(\delta_t) = \begin{cases} n_0 \bar{f}_{\max} \left[1 - \exp\left(-\frac{\delta_t}{\delta_{t0}}\right)^{1/2} \right] \\ \exp\left(-\frac{\delta_t}{\delta_{tf}}\right)^{3/2} \left(a_{tf} + \frac{\delta_t}{\delta_{tf}} \right)^{1/2} & \varphi=90^\circ \\ n_0 \bar{f}_{\max} \left[1 - \exp\left(-\left(\frac{\delta_t}{\delta_{t0}}\right)^{1/2} \left(a_{t0} + \frac{\delta_t}{\delta_{t0}} \right)^{1/2} \right) \right] \\ \exp\left(-\frac{\delta_t}{\delta_{tf}}\right)^{3/2} \left(a_{tf} + \frac{\delta_t}{\delta_{tf}} \right)^{1/2} & \varphi \neq 90^\circ \end{cases} \quad (19)$$

با استفاده از روابط فوق می‌توان منحنی‌های کشش-جدایش $T_n - \delta_n$ و $T_t - \delta_t$ را ترسیم و با منحنی‌های کشش-جدایش تجربی موجود مقایسه کرد.

4- نتایج و تفسیر آن

قانون پل زنی در یک نمونه کامپوزیتی با همان رفتار کشش-جدایش نمونه به صورت تجربی از روی منحنی R و با اندازه‌گیری بازشدگی انتهای ناحیه پل زنی به طور هم‌زمان قابل استخراج است [30,31]. بنابراین، به منظور ارزیابی قانون پل زنی تقریبی ارائه شده (روابط (18) و (19)) از نتایج تجربی حاصل از آزمایش‌های شکست بین لایه‌ای بر روی نمونه کامپوزیت شیشه/اپوکسی E-glass/Epon-826 تک‌جهته در پنج نسبت مود ترکیبی (G_{II}/G) 0، 0.25، 0.5، 0.75 و 1 (که در بخش 2-1 به تفصیل تشریح شد) استفاده می‌شود. بدین صورت که پس از ثبت مقادیر بار، جابجایی و طول ترک حین آزمایش، مقادیر چقرمگی شکست تجربی از روش تئوری تیر اصلاح شده¹ محاسبه و منحنی R متناظر با نمونه کامپوزیتی در هر پنج نسبت مود ترکیبی آزمایش شده و در ادامه منحنی $G - \delta$ قابل حصول

$$n(\delta_n, \delta_t) = n_0 \exp \left[\frac{-C_b}{l_{ref}} \frac{\pi d^2}{4 f_{\max}} \sqrt{\frac{2\tau_i E_f l_0}{d}} \cdot \left(\frac{2\delta_t}{l_0} + \frac{\delta_n^2}{l_0^2} \right)^{1/2} \cdot \delta_n \cdot \left(\frac{\bar{\sigma}_{\max}}{\sigma_{ref}} \right)^m \right] \quad (15)$$

یک بار با جابجاری δ_t به صورت $\delta_t = \delta_n \tan \varphi$ در رابطه (15) و بار دیگر جابجاری δ_n به صورت $\delta_n = \delta_t / \tan \varphi$ در رابطه (15) و ساده‌سازی روابط، می‌توان توابع تقریبی زیر را برای $n(\delta_n)$ و $n(\delta_t)$ ارائه کرد:

$$n(\delta_n) = n_0 \exp \left[- \left(\frac{\delta_n}{\delta_{nf}} \right)^{3/2} \left(a_{nf} + \frac{\delta_n}{\delta_{nf}} \right)^{1/2} \right]$$

$$n(\delta_t) = n_0 \exp \left[- \left(\frac{\delta_t}{\delta_{tf}} \right)^{3/2} \left(a_{tf} + \frac{\delta_t}{\delta_{tf}} \right)^{1/2} \right] \quad (16)$$

که δ_{nf} جابجایی نرمال (بازشدگی) مشخصه بخش نزولی منحنی کشش-جدایش نرمال، δ_{tf} جابجایی مماسی مشخصه بخش نزولی منحنی کشش-جدایش مماسی و a_{nf} و a_{tf} ثابت‌های مادی هستند. از ترکیب روابط (15) و (16)، δ_{nf} و δ_{tf} می‌توانند تنها بر حسب خواص اجزای تشکیل‌دهنده بدست آیند:

$$\delta_{nf}^4 = \frac{l_{ref}^2}{C_b^2 \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^3 \left(\frac{\pi}{f_{\max}}\right)^2 \tau_i E_f \frac{l_0}{l_0}} \left(\frac{\sigma_{ref}}{\bar{\sigma}_{\max}} \right)^{2m}$$

$$\delta_{tf}^4 = \frac{l_{ref}^2}{C_b^2 \cdot \left(\frac{d}{2}\right)^3 \left(\frac{\pi}{f_{\max}}\right)^2 \tau_i E_f \frac{l_0}{l_0}} \tan^4 \theta \left(\frac{\sigma_{ref}}{\bar{\sigma}_{\max}} \right)^{2m} \quad (17)$$

با قرار دادن مقادیر پارامترهای مادی (خواص اجزای تشکیل‌دهنده) برای یک ماده کامپوزیتی خاص (به عنوان مثال مقادیر جدول 1 در مرجع [17]) در روابط (8)، (11) و (17)، مقادیر δ_{n0} ، δ_{t0} ، δ_{nf} و δ_{tf} محاسبه شده و می‌توان بررسی کرد که آیا این مقادیر به طور تجربی تطبیق داده شده، در محدوده پیش‌بینی شده توسط روش قرا گرفته‌اند یا خیر. از طرف دیگر، تعیین پارامتری چون l_0 مشکل است مگر اینکه در محل مشاهده شود. بنابراین تعیین تجربی پارامتر δ_{n0} یا δ_{t0} می‌تواند به همراه مقدار متوسط \bar{f}_{\max} و τ_i برای تعیین یک طول مؤثر l_0 استفاده شود. هم‌چنین طول δ_{nf} یا δ_{tf} به طور تجربی تعیین شده می‌توانند برای تخمین حداکثر نیروی مسطح الیاف بکار رود.

حال ترکیب روابط (7) و (16) منجر به استخراج قانون پل زنی تقریبی در جهت مماسی در قالب یک رابطه تحلیلی برای $T_t(\delta_t)$ و ترکیب روابط (10) و (16) منجر به استخراج قانون پل زنی تقریبی در جهت نرمال در قالب یک رابطه تحلیلی برای $T_n(\delta_n)$ به صورت زیر خواهد شد:

¹ Modified beam theory (MBT)

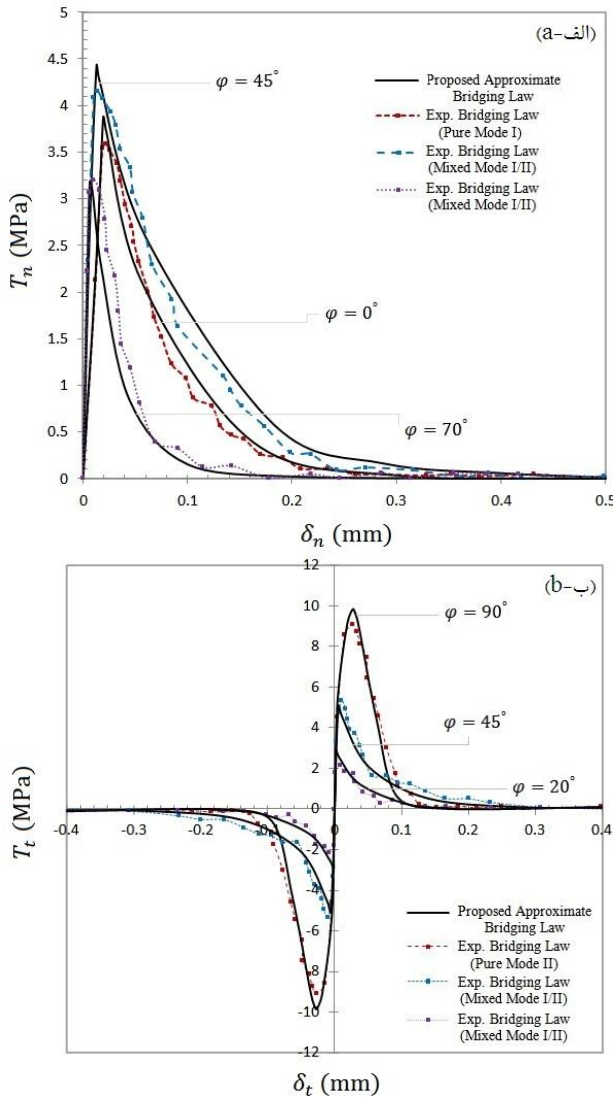


Fig. 12 Traction–separation responses predicted by proposed approximate bridging law in comparison with experimental traction–separation curves for unidirectional E-glass/Epon-826 composite in different mode mixity angles: a) Normal and b) Tangential direction.

شکل 12 مقایسه پاسخ کشش-جدایش پیش‌بینی شده توسط قانون پل زنی تقریبی ارائه شده و منحنی کشش-جدایش تجربی برای نمونه کامپوزیت لایه‌ای E-glass/Epon 826 تک‌جهته در زوایای ترکیب مود مختلف در راستای الف- نرمال و ب- مماسی

برآورد دقیق‌تر تعداد اولیه الیاف پل زده در واحد سطح می‌تواند از طریق میکروسکوپ الکترونی روبشی صورت گیرد. هم‌چنین طول پل زنی اولیه الیاف، l_0 ، با استفاده از تصاویر میکروسکوپی ثبت شده از لبه نمونه‌های شیشه/اپوکسی ساخته شده در این پژوهش در لحظه شروع تورق بدست آمده است. مقدار گزارش شده در جدول 3 برای l_0 متوسط مقادیر بدست آمده از تصاویر در نسبت‌های ترکیب مود مختلف است. یک نمونه از این تصاویر در شکل 14 نشان داده شده است.

شایان ذکر است مقایسه جدول شماره 3 کار حاضر با جدول شماره 1 مرجع [17] که هر دو پارامترهای لازم جهت پیاده‌سازی مدل پل زنی ترک می‌باشند، نشان می‌دهد در قانون پل زنی تقریبی ارائه شده با ساده‌سازی روابط از طریق جایگذاری تقریب‌های ساده در توصیف پل زنی، تعداد پارامترها

است. بر طبق رویکرد انتگرال \int برای تعیین توزیع تنش پل زنی از رابطه زیر می‌توان استفاده کرد [32]:

$$\frac{dG}{d\delta} = T(\delta) \quad (20)$$

بنابراین منحنی‌های کشش-جدایش تجربی با مشتق‌گیری از منحنی‌های تجربی $G - \delta$ مطابق شکل 12 ترسیم می‌شود.

به منظور پیاده‌سازی قانون پل زنی تقریبی پیشنهادی، روابط تحلیلی ارائه شده در بخش 3-2 به صورت یک کد کامپیوتری در نرم‌افزار متلب¹ وارد شده است. خروجی کد به صورت منحنی‌های کشش-جدایش در جهت نرمال و مماسی برای محدوده وسیعی از زوایای ترکیب مود (φ) است. بنابراین با استفاده از این کد به راحتی می‌توان منحنی‌های کشش-جدایش در جهت نرمال و مماسی پیش‌بینی شده توسط قانون پل زنی تقریبی پیشنهادی را برای هر تعداد نمونه ماده خاص که پارامترهای موردنیاز آن‌ها در منابع موجود باشد، در هر زاویه ترکیب مود دلخواه رسم نمود. پنج نسبت مود ترکیبی (G_{II}/G) 0، 0.25، 0.5، 0.75 و 1 به ترتیب معادل تقریبی زوایای ترکیب مود (φ) 0°، 20°، 45°، 70° و 90° در قانون پل زنی تقریبی ارائه شده هستند.

شکل 12 رفتار کشش-جدایش ناحیه پل زنی پیش‌بینی شده توسط قانون پل زنی تقریبی ارائه شده (رابطه (18) و (19)) را برای نمونه کامپوزیت لایه‌ای E-glass/Epon 826 تک‌جهته در هر دو جهت نرمال و مماسی به صورت تابعی از بازشدگی‌های نرمال و مماسی برای محدوده وسیعی از زوایای ترکیب مود در مقایسه با منحنی‌های کشش-جدایش تجربی نشان می‌دهد. همانطور که در شکل 12 مشاهده می‌شود، پاسخ کشش-جدایش پیش‌بینی شده توسط قانون پل زنی تقریبی ارائه شده در هر دو راستای نرمال و مماسی با رفتار کشش-جدایش تجربی نمونه کامپوزیت لایه‌ای E-glass/Epon 826 تک‌جهته از هم‌خوانی بسیار خوبی برخوردار بوده و با رفتار کلی کشش-جدایش نمونه‌های کامپوزیتی بدست آمده از سایر مدل‌های موجود [34-38] نیز هم‌خوانی دارد. تمامی این منحنی‌های کشش-جدایش ابتدا شامل یک رفتار صعودی تنش پل زنی تا یک مقدار حداکثر می‌شوند و سپس تنش‌های پل زنی کاهش یافته و به طور کامل از بین می‌روند.

برخی پارامترهای فیزیکی و مکانیکی لازم برای پیاده‌سازی قانون پل زنی تقریبی ارائه شده، مانند خواص الیاف، ماتریس و ناحیه بین وجهی در نمونه‌های الیاف شیشه/اپوکسی از منابع موجود در پیشینه [35-37] استخراج و در جدول 3 خلاصه شده است. جهت برآورد تعداد اولیه الیاف پل زده در نمونه‌ها (m_0)، از تصاویری که از جبهه ترک همین نمونه‌های الیاف شیشه/اپوکسی حین شروع و گسترش تورق در مرجع [38] با استفاده از یک دوربین حرفه‌ای کانن مدل EOS 550D و یک لنز ماکرو سیگما 150 mm 1:2.8 گرفته شده بود، استفاده شده است. یک نمونه از این تصاویر در شکل 13 نمایش داده شده است. سپس، تعداد اولیه الیاف پل زده در واحد سطح با شمارش تعداد الیاف عبوری از دهانه ترک در لحظه شروع تورق از روی تصاویر ثبت شده تعیین شده است. لازم به ذکر است که در حالی که مقدار کمیت m_0 از طریق تجزیه و تحلیل بصری نمای کلی جبهه ترک نمونه‌ها تخمین زده شده است، اما عدم اطمینان در مقادیر متوسط حاصله قابل توجه است.

¹ Matlab

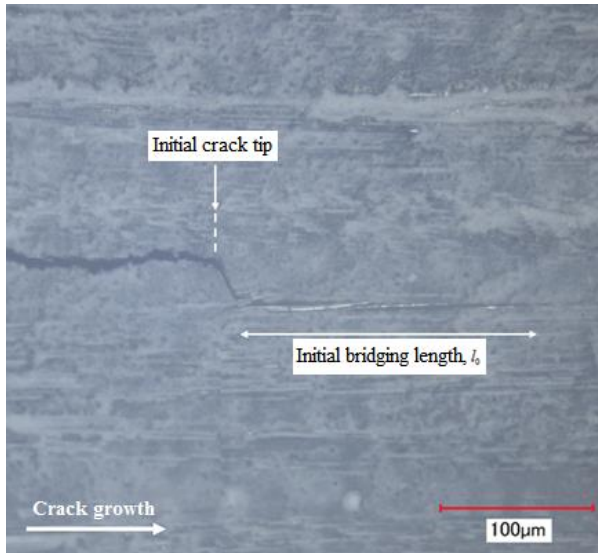


Fig. 14 A micrograph of initial fiber bridging in delamination of unidirectional E-glass/Epon-826 composite (Magnification x700)

شکل 14 تصویر میکروسکوپی پل زنی اولیه الیاف در تورق کامپوزیت لایه‌ای E-glass/EPON 826 تک‌جهته (با بزرگ‌نمایی 700 بار)

از آنجا که الیاف در هر دو جهت و به صورت متقاطع می‌توانند دهانه ترک را پل بزنند، کشش‌های مماسی مثبت و منفی در منحنی‌های کشش-جدایش مماسی ظاهر شده است. پاسخ‌های کشش-جدایش پیش‌بینی شده در راستای مماسی، $T_{\xi} - \delta_{\xi}$ ، همان ویژگی‌ها و مشخصه‌های اساسی پاسخ‌های کشش-جدایش در راستای نرمال، $T_n - \delta_n$ ، را نشان می‌دهند. از مقایسه شکل 12 الف-a و شکل 12 ب-b مشخص می‌شود که محدوده مقادیر پیش‌بینی شده برای طول ناحیه چسبنده در راستای مماسی کوچک‌تر از مقادیر آن در راستای نرمال است. در حالی که، مقادیر استحکام چسبنده در راستای مماسی به طور قابل توجهی بزرگ‌تر از مقادیر آن در راستای نرمال است. با افزایش نسبت ترکیب مود (یا به عبارت دیگر افزایش بارگذاری مود II)، مقدار حداکثر استحکام چسبنده مماسی به طور یکنواخت افزایش می‌یابد. اما مقادیر طول ناحیه چسبنده در راستای مماسی به طور غیر یکنواخت نسبت به مقدار ترکیب مود تغییر می‌کنند. به طوری که از 0.2 mm در زوایای ترکیب مود پایین تا 0.4 mm در $\varphi = 45^\circ$ افزایش و سپس به 0.1 mm در $\varphi = 90^\circ$ کاهش می‌یابد. با کاهش زاویه ترکیب مود یا به عبارتی افزایش مود I بارگذاری، مقدار بار در بخش نزولی منحنی با یک شیب ملایمی کاهش می‌یابد. در واقع، بارگذاری مود I به نوعی با فعال‌سازی مکانیزم پل زنی الیاف در نقش کمک‌کننده به بارگذاری مود II به نظر می‌رسد. تغییرات رفتار کشش-جدایش با افزایش نسبت ترکیب مود می‌تواند ناشی از وجود مکانیزم‌های چقرمگی مختلف در ترکیب مودهای مختلف باشد. در مقادیر نسبت ترکیب مود پایین، کشش ناحیه پل زنی بر اثر مایکرومکانیزم بلند (ورقه ورقه) شدن ماتریس ناشی از تغییر شکل خمشی قابل توجه الیاف محدود می‌شود. با افزایش نسبت ترکیب مود، الیاف پل زده تحت بار محوری قرار خواهند گرفت و مایکرومکانیزم جدایش الیاف-ماتریس به جای پوسته پوسته شدن ماتریس کشش‌های ناحیه چسبنده را محدود می‌کند. در نتیجه، مقدار طول ناحیه چسبنده به احتمال باقی ماندن الیاف پل زده (رابطه 2) مرتبط شده و وابستگی آن به نسبت ترکیب مود از مشارکت مایکرومکانیزم‌های مختلف (مانند بلند شدن ماتریس و بیرون کشیده شدن

کاهش یافته و برخی خواص اجزای تشکیل‌دهنده که تعیین دقیق آن‌ها دشوار یا نیازمند انجام آزمایش است از جمله مدول برشی الیاف و ماتریس، استحکام کششی الیاف، چقرمگی شکست ماتریس و توان ویبول از روابط حذف شده است.

جدول 3 پارامترهای فیزیکی و مکانیکی لازم جهت پیاده‌سازی قانون پل زنی تقریبی در تورق نمونه کامپوزیتی E-glass/EPON 826 تک‌جهته

Table 3 Physical and mechanical parameters used for implementation of approximate bridging law in delamination of unidirectional E-glass/EPON 826 composite

مقدار	پارامتر
15 ^a	قطر الیاف، d (μm)
200	طول پل زنی اولیه، l_0 (μm)
72-85 ^b	مدول الاستیسیته الیاف، E_f (GPa)
17.6 ^b	مقاومت برشی اصطکاک ناحیه بین وجهی، τ_i (MPa)
14±10	تعداد اولیه الیاف پل زده در واحد سطح ترک، n_0 (mm^{-2})
25 ^c	طول مرجع ویبول، l_{ref} (mm)
1.63 ^c	استحکام مرجع ویبول، σ_{ref} (GPa)

^a [35]; ^b [36]; ^c [37]

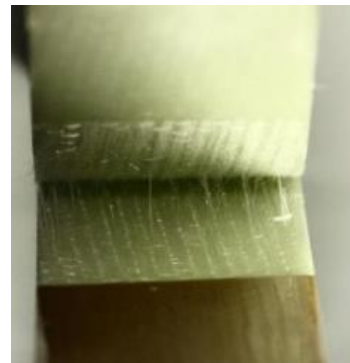


Fig. 13 A photograph of the crack front view of unidirectional E-glass/Epon-826 composite during delamination growth [38]

شکل 13 تصویر نمای جبهه ترک کامپوزیت لایه‌ای E-glass/EPON 826 تک‌جهته حین رشد تورق [38]

مطابق شکل 12، حداکثر بازشدگی نرمال (طول ناحیه چسبنده در جهت نرمال) پیش‌بینی شده برای نمونه بین 0.1 mm تا 0.5 mm تغییر می‌کند و با نزدیک شدن به مود II خالص ($\varphi = 90^\circ$) کاهش می‌یابد. همان طور که در شکل 12 الف-a مشاهده می‌شود، با افزایش اندکی مود II بارگذاری، مقدار تنش پل زنی نرمال پیش‌بینی شده توسط مدل از حالت مود I خالص ($\varphi = 0^\circ$) بیشتر می‌شود. این رفتار در برخی از کامپوزیت‌های پایه اپوکسی قابل مشاهده بوده و ناشی از برهم‌کنش مودهای بارگذاری است [39,40]. در برخی از منابع این رفتار را ناشی از افزایش سطح شکست در شرایطی که ترک به صورت شبه مود I (به عنوان مثال در مقادیر زوایای ترکیب مود پایین که بارگذاری مود II می‌تواند صرف‌نظر شود) رشد می‌کند می‌دانند [39]. پس از آن، افزایش بیشتر مؤلفه مود II بارگذاری (مانند $\varphi = 70^\circ$) مقدار تنش پل زنی نرمال را به تدریج کاهش می‌دهد تا جایی که مقدار آن با نزدیک شدن به زاویه ترکیب مود 90° ناچیز می‌شود.

- [5] Sørensen, B. F. and Kirkegaard, P., "Determination of Mixed Mode Cohesive Laws," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 73, pp. 2642-2661, 2006.
- [6] Shokrieh, M. M., Damirchiloo, S., Salamat-talab, M., "Determination of cohesive zone parameters in mode I delamination growth of a double cantilever beam specimen using the inverse method," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 4, No.1, pp. 83-90, 2017 (In Persian).
- [7] Esmaili, A., Taheri-Behrooz, F., "Comparison of numerical and analytical cohesive zone length models in the delamination of composite laminates," *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 7, No.4, pp. 1235-1242, 2021 (In Persian).
- [8] Spearing, S. M. and Evans, A. G., "The Role of Fiber Bridging in The Delamination Resistance of Fiber-reinforced Composites," *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 40, No. 9, pp. 2191-2199, 1992.
- [9] Kaute, D. A. W., Shercliff, H. R., Ashby, M. F., "Delamination, Fibre Bridging and Toughness of Ceramic Matrix Composites," *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 41, pp. 1959-1970, 1993.
- [10] Ivens, J., Albertsen, H., Weavers, M., Verpost, I., Peters, P., "Interlaminar Fracture Toughness of CFRP Influenced by Fibre Surface Treatment: Part 2. Modelling of The Interface Effect," *Composites Science and Technology*, Vol. 54, pp. 147-159, 1995.
- [11] Evans, A. and Marshall, D., "The Mechanical Behavior of Ceramic Matrix Composites," *Overview No. 85, Acta Metallurgica*, Vol. 37, No.10, pp. 2567-2583, 1989.
- [12] Wells, G. M., "A Preliminary Investigation into Transverse Fracture of Unidirectional Fibre Composites," Harwell report AERE-R11494, 1985.
- [13] Greenhalgh, E. S., Rogers, C., Robinson, P., "Fractographic Observations on Delamination Growth and The Subsequent Migration Through The Laminate," *Composites Science and Technology*, Vol. 69, pp. 2345-2351, 2009.
- [14] Riddell, W. T., Ingraffea, A. R., Wawrzynek, P. A., "Experimental Observations and Numerical Predictions of Three-dimensional Fatigue Crack Propagation," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 58, No. 4, pp. 293-310, 1997.
- [15] Hashemi, S., Kinloch, A. J., Williams, J. G., "Mechanics and Mechanisms of Delamination in a Polyether Sulfone-fibre Composite," *Composites Science and Technology*, Vol. 37, No. 4, pp. 429-462, 1990.
- [16] Sørensen, B. F., Gamstedt, E. K., Østergaard, R. C., Goutianos, S., "Micromechanical Model of Cross-over Fibre Bridging - Prediction of Mixed Mode Bridging Laws," *Mechanics of Materials*, Vol. 40, No. 4-5, pp. 220-234, 2008.
- [17] Daneshjoo, Z., Shokrieh, M. M., Fakoor, M., "A Micromechanical Model for Prediction of Mixed Mode I/II Delamination of Laminated Composites Considering Fiber Bridging Effects," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 94, pp. 46-56, 2018.
- [18] Khan, R., "Delamination Growth in Composites under Fatigue Loading," Ph.D. Thesis, Aerospace Faculty TU Delft Nederland, 2013.
- [19] Shokrieh, M. M., Salamat-talab, M., Heidari-Rarani, M., "Effect of interface fiber angle on the R-curve behavior of E-glass/epoxy DCB Specimens," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 86, pp. 153-160, 2016.
- [20] Standard Test Method for Mixed Mode I-Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber Reinforced Polymer Matrix Composites, ASTM International, ASTM D6671-01, West Conshohocken, PA, USA; 2001.
- [21] Standard Test Method for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, US: ASTM International, ASTM Standard D5528-13, 2013.
- [22] Standard Test Method for Determination of the Mode II Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites, US: ASTM International, ASTM Standard D7905/D7905M-14, 2014.

الیاف) حین پدیده پل زنی الیاف حاصل می‌شود. این تغییرات غیریکنواخت رفتار کشش-جدایش در نتایج بررسی‌های تجربی بسیاری از مواد با میکروساختارهای مشابه مطابقت دارد.

5- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در تورق کامپوزیت‌های لایه‌ای تک‌جهته، پل زنی ناحیه بین وجهی تورق بر اثر الیاف به عنوان یکی از مهم‌ترین مکانیزم‌های جذب انرژی در ناحیه فرآیند شکست بسیار حائز اهمیت است. در این مقاله، برای فهم فیزیکی مسئله پل زنی ترک حین رشد پدیده و ماندگی تورق در کامپوزیت‌های لایه‌ای تحت مود ترکیبی I/II، ابتدا به شناسایی و معرفی مهم‌ترین میکرومکانیزم‌های درگیر حین پدیده پل زنی الیاف پرداخته شد. بدین منظور آزمایش‌های شکست بین لایه‌ای بر روی دو نوع نمونه کامپوزیتی کربن/اپوکسی و شیشه/اپوکسی تحت مود I خالص، مود ترکیبی I/II و مود II خالص صورت گرفت. سپس سطوح شکست نمونه‌ها و ناحیه آسیب جلوی نوک تورق بر روی لبه نمونه‌ها پس از آزمایش‌های تورق با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی مشاهده و ناحیه پل زنی ایجاد شده حین آزمایش تورق در نمونه‌های کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفت. با مرور مشاهدات تجربی حاصل، مهم‌ترین میکرومکانیزم‌های درگیر حین پدیده پل زنی الیاف شامل بلند شدن الیاف از بستر ماتریس و به دنبال آن بلند (ورقه ورقه) شدن ماتریس، جدایش الیاف-ماتریس و به دنبال آن بیرون کشیده شدن الیاف و شکست الیاف معرفی شدند. در بررسی پل زنی ترک در کامپوزیت‌ها، انرژی جذب شده توسط مکانیزم چقرمگی پل زنی الیاف اغلب با استفاده از قوانین پل زنی محاسبه می‌شود. مدل‌های موجود برای پیش‌بینی قوانین پل زنی در تورق کامپوزیت‌های لایه‌ای مبتنی بر فیزیک هستند اما ضعف اساسی آن‌ها معمولاً در پیچیدگی آن‌ها و دشواری در تعیین پارامترهای متعددی است که شامل می‌شوند. از این رو در ادامه، به ارائه یک روش تقریبی جدید برای تعیین قانون پل زنی بر اساس یک مدل پیچیده‌تر مبتنی بر فیزیک پرداخته شد. در این رویکرد جدید، با حفظ مبنای فیزیکی مسئله و از طریق جایگذاری تقریب‌های ساده در توصیف پل زنی، قوانین پل زنی استخراج شد. در روش ارائه شده، قوانین پل زنی با استفاده از روابط ساده‌تر و با تعداد پارامترهای موردنیاز کمتر قابل دستیابی است. مطابقت بسیار خوب پاسخ کشش-جدایش ناحیه پل زنی پیش‌بینی شده توسط قانون پل زنی تقریبی ارائه شده با منحنی‌های کشش-جدایش تجربی در هر دو جهت نرمال و مماسی برای محدوده وسیعی از زوایای ترکیب مود بیانگر صحت و دقت روش است.

6- مراجع

- [1] Qiao, P. and Chen, Y., "Cohesive Fracture Simulation and Failure Modes of FRP- Concrete Bonded Interfaces," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 49, No. 2, pp. 213-225, 2008.
- [2] Shokrieh, M. M., Salamat-talab, M., Heidari-Rarani, M., "Numerical analysis of mode I delamination growth in laminated DCB specimens using cohesive zone models," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No.1, pp. 38-48, 2013 (In Persian).
- [3] Shokrieh, M. M., Zeinedini, A., "Prediction of strain energy release rate of asymmetric double cantilever composite beam using equivalent lay-up for mixed-mode I/II delamination," *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No.13, pp. 214-225, 2013 (In Persian).
- [4] Hillerborg, A., "Analysis of Fracture by Means of The Fictitious Crack Model, Particularly for Fiber Reinforcement Concrete," *International journal of cement composites*, Vol. 2, pp. 177-184, 1980.

- [23]Sutcu, M., "Weibull Statistics Applied to Fiber Failure in Ceramic Composites and Work of Fracture," *Acta Metallurgica*, Vol. 37, No. 2, pp. 651-661, 1989.
- [24]Thouless, M. D. and Evans, A. G., "Effects of Pull-out on The Mechanical Properties of Ceramic-matrix Composites," *Acta Metallurgica*, Vol. 36, No. 3, pp. 517-522, 1988.
- [25]Ashby, M. F., Blunt, F. J., Bannister, M., "Flow Characteristics of Highly Constrained Metal Wires," *Acta Metallurgica*, Vol. 37, No. 7, pp. 1847-1857, 1989.
- [26]Cox B. N. and Marshall, D. B., "Stable and Unstable Solutions for Bridged Cracks in Various Specimens," *Acta Metallurgica et Materialia*, Vol. 39, pp. 579-89, 1991.
- [27]Bao, G., Suo, Z., "Remarks on Crack Bridging Concepts," *Applied Mechanics Review*, Vol. 45, pp. 355-366, 1992.
- [28]Weibull, W., "A Statistical Theory of The Strength of Materials," *Proceedings, The Royal Swedish Institute for Engineering Research*, Vol. 151, pp. 1-45, 1939.
- [29]Weibull, W., "The phenomenon of rupture in solids," *Proceedings, The Royal Swedish Institute for Engineering Research*, Vol. 153, pp. 1-55, 1939.
- [30]Suo, Z., Bao, G., Fan, B., "Delamination R-curve Phenomena Due to Damage," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 40, No. 1, pp. 1-16, 1992.
- [31]Mai, Y. W., "Cohesive Zone and Crack-resistance R-curve of Cementitious Materials and Their Fiber-reinforced Composites," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 69, pp. 219-234, 2002.
- [32]Sorensen, L., Botsis, J., Gmür, Th., Humbert, L., "Bridging Tractions in Mode I Delamination: Measurements and Simulations," *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 12, pp. 2350-2358, 2008.
- [33]Dávila, C. G., Rose, C. A., Camanho, P. P., "A Procedure for Superposing Linear Cohesive Laws to Represent Multiple Damage Mechanisms in The Fracture of Composites," *International Journal of Fracture*, Vol. 158, No. 2, pp. 211-223, 2009.
- [34]Shokrieh, M. M., Daneshjoo, Z., Fakoor, M., "A Modified Model for Simulation of Mode I Delamination Growth in Laminated Composite Materials," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 82, pp. 107-116, 2016.
- [35]Shokrieh, M. M., Ghoreishi, S. M., Esmkhani, M., Zhao, Z., "Effects of Graphene Nanoplatelets and Graphene Nanosheets on Fracture Toughness of Epoxy Nanocomposites," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 37, No. 10, pp. 1116-1123, 2014.
- [36]Ogihara, S. and Koyanagi, J., "Investigation of Combined Stress State Failure Criterion for Glass Fiber/epoxy Interface by The Cruciform Specimen Method," *Composites Science and Technology*, Vol. 70, pp. 143-150, 2010.
- [37]Godara, A., Gorbatikh, L., Kalink, G., Warriar, A., Rochez, O., Mezzo, L., Luizi, F., van Vuure, A. W., Lomov, S. V., Verpoest, I., "Interfacial Shear Strength of a Glass Fiber/epoxy Bonding in Composites Modified with Carbon Nanotubes," *Composites Science and Technology*, Vol. 70, pp. 1346-1352, 2010.
- [38]Shokrieh, M. M., Salamat-talab, M., Heidari-Rarani, M., "Effect of Interface Fiber Angle on The R-curve Behavior of E-glass/epoxy DCB Specimens," *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol. 86, pp. 153-160, 2016.
- [39]Reeder, R., "An Evaluation of Mixed-mode Delamination Failure Criteria," *Technical Report: NASA/TM-1992-104210*, NASA Langley Technical Report Server, 1992.
- [40]Greenhalgh, E. S., "Characterisation of Mixed-mode Delamination Growth in Carbon-fiber Composites," *Ph.D. Thesis, Imperial College of Science, Technology and Medicine, London UK*, 1998.