



ارائه روشی جدید برای محاسبه تجربی نرخ رهاسازی انرژی کرنشی مود اول شکست در تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس

ستار مالکی¹، عطیه اندخشیده^{1*}، مهدی ملائین²

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان

* قوچان، صندوق پستی 9477167335 a.andakhshideh@qiet.ac.ir

چکیده

در برخی خطوط حاوی سیالات خورنده دما بالا لوله‌های دو لایه شامل لایه ساختاری کامپوزیت پلیمری گرماسخت و لایه آستری گرمانرم تنها راه حل عملی هستند. بررسی مقاومت اتصال کامپوزیت گرماسخت به آستری گرمانرم در این خطوط اهمیت فراوانی دارد. محاسبه نرخ رهاسازی انرژی کرنشی مود اول شکست معیار مهمی در بررسی مقاومت اتصال و پیش‌بینی خرابی این نوع لوله‌هاست. استاندارد تست تجربی نرخ رهاسازی انرژی کرنشی برای نمونه‌های تیر یک سرگیردار متقارن، ASTM-D5528 است. در این پژوهش رابطه کلی محاسبه ضخامت لایه‌ها برای هر نوع تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس با استفاده از تئوری کلاسیک چندلایه‌ها برای اولین بار ارائه شده است. برای بررسی دقت این رابطه نمونه‌هایی از دو جنس و دارای ضخامت‌های متفاوت جهت تست تجربی ساخته شده‌اند. جنس نیمه بالایی کامپوزیت ساخته شده از الیاف شیشه تک‌جهته و رزین وینیل‌استر، نیمه پایینی، پلی وینیل کلراید سخت و فصل مشترک دو لایه، دو نوع پرایمر مختلف بر پایه رزین اپوکسی و وینیل‌استر است. جنس نمونه‌های ساخته شده در این پژوهش بر مبنای نمونه‌های عملی مورد استفاده در بسیاری از خطوط انتقال مواد شیمیایی در واحدهای کلرآلکالی در سطح کشور نظیر واحدهای پتروشیمی اروند است. این امر به این دلیل است که نتایج حاصل از پژوهش جاری بتواند راه‌گشای سازندگان تجهیزات این خطوط باشد. برای اعتبارسنجی رابطه ارائه شده، مدل‌سازی اجزای محدود با روش بسن مجازی ترک دو مرحله‌ای صورت گرفته است. همخوانی نتایج عددی و تجربی بیانگر کارایی و دقت رابطه پیشنهادی است.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 02 بهمن 1396

پذیرش: 29 اسفند 1396

ارائه در سایت: 07 اردیبهشت 1397

کلیدواژه‌ها:

نرخ رهاسازی انرژی کرنشی

مود اول شکست

تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس

لایه آستری گرمانرم

Investigation of inlet guide vanes and return channel angle effects on two-stage compressor performance with one-dimensional simulation

Sattar Maleki, Atieh Andakhshideh*, Mahdi Malaeen

Department of Mechanical Engineering, Quchan University of Technology, Quchan, Iran

* P.O.B. 9477167335 Quchan, Iran, a.andakhshideh@qiet.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 22 January 2018

Accepted 20 March 2018

Available Online 27 April 2018

Keywords:

Strain energy release rate

First mode of failure

Unlike double cantilever beam

Thermoplastic liner

ABSTRACT

Dual laminate pipes made of thermoset polymer composite structure and thermoplastic liner are the only alternative in pipelines conveying high temperature corrosive fluids. Investigating the bonding between thermoset composite and thermoplastic liner is very important in these pipelines. Calculating the strain energy release rate of first mode of failure is very important criteria in bonding strength and failure of double pipes. ASTM-D5528 is the standard for experimental test procedure of strain energy release rate of symmetric double cantilever beam. In this study, using the classical laminates theory, the general equation for determination the laminates thicknesses in unlike double cantilever beam is presented, for the first time. To study the validity of the equation, in unlike double cantilever beam samples consists of laminates with different thicknesses are manufactured for the experimental tests. Upper, lower and bonding regions consist of composite made of unidirectional fiberglass/Vinylester resin, PVCU and epoxy or Vinylester primers, respectively. The samples of this study are manufactured base on the practical case studies of chemical fluid pipelines with chlor-alkali process like Arvand Petrochemical units. The main aim of this work is to help manufacturers of these units equipment to have practical guideline. To qualify the efficiency of the proposed equation, finite element simulation base on the virtual crack closure technique is presented. Good agreement is achieved in comparing the numerical and experimental results that shows the efficiency and accuracy of the proposed equation.

1- مقدمه

کامپوزیت‌هاست. این مواد در صنایعی مانند هوافضا، کشتی‌سازی و خودرو کاربرد فراوانی دارند. علاوه بر این در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی نیز از کامپوزیت‌های زمینه پلیمری به صورت خطوط انتقال و ذخیره‌سازی سیالات

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری¹ یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین انواع

¹ Polymer

لوله‌های دولایه¹¹ جهت انتقال فراورده‌های خورنده¹² و دما بالا (ممکن است فشار بالا هم داشته باشند) در صنایع نفت و گاز استفاده می‌گردد. این لوله‌ها با توجه به شرایط شیمیایی و دمای سیالات داخل آن، دما و فشار کاری و سایر شرایط محیطی طراحی می‌شوند. در این طراحی جنس لایه‌های داخلی و خارجی و جزئیات هر لایه نظیر نوع رزین و الیاف لایه کامپوزیتی تعیین می‌گردد. لوله‌های گرمانرم از مقاومت چشمگیری در برابر انواع اسیدها، محلول‌های نمکی، مایعات و گازهای خورنده برخوردار هستند. درجه حرارت نیز عامل مهم و تعیین‌کننده‌ای برای مقاومت لوله‌های گرمانرم در برابر خوردگی است. آستری¹³ لوله‌های دولایه بسته به شرایط یکی از گرمانرم‌های پلی‌وینیل کلراید¹⁴، پلی‌پروپیلن¹⁵ و... است (شکل 2) [7]. لوله‌های دولایه متشکل از آستری گرمانرم و ساختار سازه‌ای حاوی کامپوزیت گرماسخت در برابر گروه‌هایی از مواد خورنده اسیدی و بازی مقاومت به خوردگی دارند. این در حالی است که لوله‌های ساخته شده از رزین‌های ترموست بدون لاینر مقاومت نداشته و همچنین از دیگر مزایای آن‌ها به مقاومت به سایش و محافظت از لایه ساختاری کامپوزیت می‌توان اشاره کرد که وظیفه حفظ خصوصیات مکانیکی لوله را دارد.

انجمن سازندگان لوله دولایه¹⁶ در سال 1990 میلادی تأسیس شده است. این انجمن سازمانی است برای مهندسانی که به طراحی و پژوهش بر لوله‌های دولایه‌ای متشکل از زیرلایه گرمانرم با روکش کامپوزیتی ساخته



Fig. 1 A Composite vessel for oil, gas and petrochemical industries
شکل 1 نمونه تجهیز کامپوزیتی برای استفاده در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی

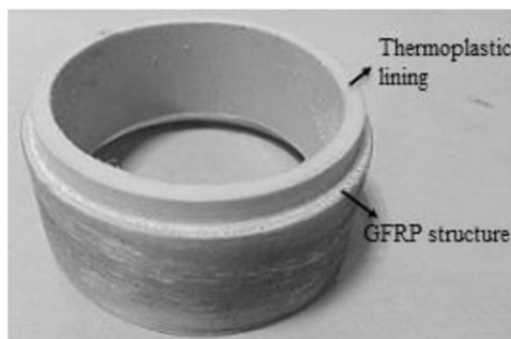


Fig. 2 A composite dual laminate pipe

شکل 2 لوله دولایه کامپوزیتی با آستری گرمانرم

¹¹ Dual laminates

¹² caustic

¹³ Liner

¹⁴ Polyvinylchloride (PVC)

¹⁵ Polypropylene (PP)

¹⁶ Dual Laminate Fabrication Association (DLFA)

خورنده به میزان قابل توجهی استفاده می‌شود. در کامپوزیت‌های زمینه پلیمری، زمینه یک ماده پلیمری است که به آن رزین¹ گفته می‌شود و شامل دو دسته کلی گرماسخت‌ها² و گرمانرم‌هاست³. الیاف تقویت‌کننده نیز شامل انواع شیشه⁴، آرامید⁵، کربن⁶ و بورون⁷ است. الیاف شیشه مشهورترین تقویت‌کننده مورد استفاده در صنعت کامپوزیت است و انواع مختلفی از آن به صورت تجاری وجود دارند. به طور تقریبی 90% الیاف مورد استفاده در کامپوزیت‌های مهندسی الیاف شیشه است. از ویژگی‌های مهم الیاف شیشه می‌توان به استحکام و سختی بالا، مقاومت حرارتی خوب، مقاومت به رطوبت و خوردگی مناسب و قیمت ارزان اشاره کرد. انواع مختلف کامپوزیت‌ها خواص مکانیکی متفاوتی را از خود نشان می‌دهند، به همین علت است که هر بخش از هواپیما با یک نوع کامپوزیت خاص تولید می‌گردد. 50% از سازه هواپیمای جدید بوبینگ 787 از کامپوزیت ساخته شده است [1-3].

امروزه کاربرد کامپوزیت‌های زمینه پلیمری (مخازن، خطوط لوله و...) در مقابله با خوردگی در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی مورد توجه صنعتگران قرار گرفته است. محققان کشورمان موفق به تولید مخازن، اتصالات و تجهیزات پیشرفته کامپوزیتی برای صنایع نفت، گاز و پتروشیمی شدند که این محصولات در فرآیندهای تولید و تکمیل طرح‌های صنعتی مورد استفاده و بهره‌برداری قرار می‌گیرند [4]. شکل 1 تصویر نمونه تجهیز کامپوزیتی برای به کارگیری در صنایع نفت، گاز و پتروشیمی را نشان می‌دهد.

مهم‌ترین ویژگی و خصوصیت لوله‌های کامپوزیتی که باعث برتری آن‌ها در خطوط انتقال سیالات مختلف شده است، مقاومت به خوردگی ناشی از سیالات خورنده در هر دو جداره داخلی و خارجی است. لوله‌های کامپوزیتی به دلیل ساختار پلیمری خود نسبت به این پدیده ایمن هستند و قابلیت کارکرد بدون تعمیر را در محیط‌های فعال شیمیایی و الکتروشیمیایی به مدت 25-50 سال دارا هستند. به همین دلیل صنایع نفت، گاز، آب و فاضلاب عمده‌ترین حوزه مصرف این محصولات بوده است. حذف هزینه‌های سنگین تعمیر و نگهداری لوله‌های خورده شده انتقال‌دهنده نفت یا گاز و خسارات ایجاد شده از قطع سرویس به مراکز صنعتی مهم‌ترین عواملی است که باعث شده تا لوله‌های کامپوزیتی گوی سبقت را از سایر رقبای سنتی خود بربایند. لوله‌های کامپوزیتی ساخته شده از الیاف شیشه و رزین‌های گرماسخت نمونه پرکاربردی از این محصولات است که ساختاری محکم، مقاوم به خوردگی و سبک دارند و جایگزین مناسبی برای لوله‌های فلزی و بتونی است [5].

عبارات GRP، GRV و GRE که در صنعت کامپوزیت به کار برده می‌شوند، معرف نوع فاز زمینه در ساختارهای مختلف لوله‌های کامپوزیتی تقویت شده با الیاف شیشه هستند و به ترتیب بیانگر رزین پلی‌استر⁸، وینیل استر⁹ و اپوکسی¹⁰ هستند. پلی‌استرها اغلب برای تولید لوله جهت مصارف مختلفی از جمله آب شرب، گردآوری فاضلاب، پساب‌های صنعتی، آبیاری و... استفاده می‌شوند. وینیل‌استرها مقاومت بیشتری در برابر خوردگی ناشی از مایعات خورنده قوی مانند اسیدها و سفیدکننده‌ها و دمای کاری بالاتری دارند. رزین اپوکسی بیشتر برای لوله‌هایی با قطر کمتر از 750 میلی‌متر و به طور عمده برای خطوط نفت، گاز و فشارهای بسیار بالا استفاده می‌شوند [6].

¹ Resin

² Thermosets

³ Thermoplastics

⁴ Glass

⁵ Aramid

⁶ Carbon

⁷ Boron

⁸ Polyester

⁹ Vinylester

¹⁰ Epoxy

گرماترم و یا به طور کلی نمونه های ناهمجنس دلخواه در تست استاندارد تیر یک سر گیردار دولبه ارائه می شود.

2- روش تحقیق

2-1- مواد و آماده سازی نمونه ها

برای ساخت و آماده سازی نمونه های آزمایش تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس از استاندارد ASTM-D5528 استفاده شده است. نمونه های تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس استاندارد مجزایی ندارند، اما از استاندارد مربوط به نمونه های تیر یک سر گیردار دولبه متقارن برای نمونه های تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس استفاده شده است [17]. جنس نیمه بالایی از کامپوزیت ساخته شده از الیاف شیشه تک جهته و رزین وینیل استر و جنس نیمه پایینی از پلی وینیل کلراید سخت [11] است. پرایمر در اتصال GFRP/PVCU نیز بر دو پایه اپوکسی¹² و وینیل استر¹³ است.

برش کاری نمونه های آزمایشگاهی پلی وینیل کلراید سخت با استفاده از دستگاه برش و حکاکی پرفکت لیزر¹⁴ انجام شده است. برای داشتن یک اتصال خوب ابتدا سطوح تماس با استفاده از سنباده شماره 60 به صورت پیوسته پرداخت شده است (شکل 3).

برای ایجاد پیش ترک، فیلم پلی استر نجسب با ضخامت تقریبی 10 میکرومتر بین دو سطح اتصال قرار داده شده است. برای کنترل ضخامت پرایمر از فیلم نجسب در اطراف صفحات با ضخامت 0.1 میلی متر استفاده شده است (شکل 4). در ادامه برای هر نمونه تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس، سه لایه الیاف تک جهته¹⁵ (زاویه الیاف صفر درجه) بر هر نمونه پلی وینیل کلراید سخت به صورت دستی لایه چینی می گردد.

با توجه به روابط حاکم بر مسأله تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس برای محاسبه نرخ رها سازی انرژی کرنشی مود خالص اول با استفاده از تئوری کلاسیک چند لایه ها برای کامپوزیت ها، نسبت ضخامت تیر بالا و پایین با دو جنس مختلف قابل تخمین است [18]. رابطه (1) از معادل قرار دادن شعاع انحنا¹⁶ تیر بالا و پایین برای تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس استخراج

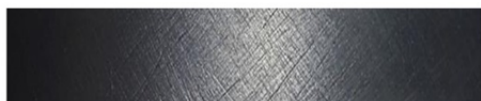


Fig. 3 The PVCU sample surface after sanding with grit size 60
شکل 3 سطح نمونه پلی وینیل کلراید سخت پس از پرداخت با سنباده شماره 60

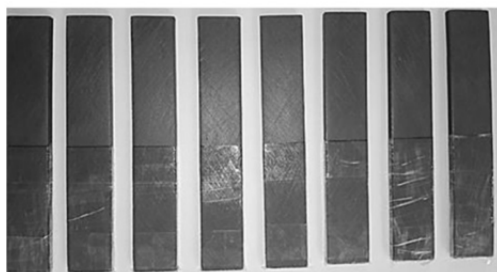


Fig. 4 Polyester release film on the pre-crack area of the PVCU samples

شکل 4 فیلم نجسب پلی استر در ناحیه پیش ترک نمونه های پلی وینیل کلراید سخت

¹¹ Polyvinylchloride – Unplasticised (PVCU)

¹² کد پرایمر اپوکسی مورد استفاده در این پژوهش، NCEP25 متعلق به شرکت مهندسی نوین کامپوزیت صدراست.

¹³ کد پرایمر وینیل استر مورد استفاده در این پژوهش NCVP209 متعلق به شرکت مهندسی نوین کامپوزیت صدراست.

¹⁴ PEDK-160100A RF

¹⁵ Unidirectional

¹⁶ Radius of Curvature

شده از زمینه گرماسخت و الیاف شیشه برای مقاومت در برابر عوامل خورنده می پردازند [8].

روش های عددی متعددی در تحلیل مسائل شکست مورد استفاده قرار می گیرد که مهم ترین و پرکاربردترین آن ها روش اجزای محدود است. روش های مورد استفاده در روش اجزای محدود در کلیات مشابه یکدیگرند، ولی در جزئیات متفاوت هستند. با استفاده از روش بستن ترک مجازی¹ دو مرحله ای می توان به پاسخ و تحلیل عددی مناسب و دقیق برای محاسبه نرخ رها سازی انرژی کرنشی² دسترسی پیدا کرد [9].

مولون و همکاران از روش تجربی تیر اصلاح شده³ و مدل سازی اجزای محدود با استفاده از روش بستن ترک مجازی دو مرحله ای نمونه تیر یک سر گیردار دولبه نامتقارن⁴ برای محاسبه نرخ رها سازی انرژی کرنشی در حالت های مختلف مود ترکیبی⁵ استفاده کرده اند [10]. ساندرا ارامان و دیویدسون چقرمگی شکست⁶ بین لایه ای را به روش اجزای محدود برای تیر یک سر گیردار دولبه نامتقارن محاسبه کردند [11]. گائو و ویسمن مدل سازی اجزای محدود تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس⁷ را برای محاسبه چقرمگی شکست مود ترکیبی با استفاده از توابع گرین⁸ برای تیرهای یک سر گیردار دولبه پیشنهاد دادند [12]. براون و تانگ یک روش تجربی- عددی برای محاسبه نرخ رها سازی انرژی کرنشی مود ترکیبی شکست با استفاده از روش اجزای محدود بستن ترک مجازی دو مرحله ای برای تیر یک سر گیردار دولبه نامتقارن پیشنهاد دادند [13]. حیدری رارانی و شکریه تأثیر انحنای پیشانی ترک بر نرخ رها سازی انرژی کرنشی در تیر یک سر گیردار دولبه متقارن⁹ تک جهته کامپوزیتی را بررسی کردند [14]. شکریه و زین الدینی روش چیدمان معادل برای تخمین شروع جدایش در تیر یک سر گیردار دولبه نامتقارن کامپوزیت لایه ای را ارائه کردند [15]. کریمان مقدم و همکاران بررسی تجربی و عددی رشد ترک در اتصال چسبی دو صفحه کامپوزیتی متقارن با الیاف شیشه تک جهته در حالت مود اول شکست را ارائه کردند [16].

هدف اصلی این پژوهش مشخصه سازی یا استخراج مشخصات اتصال در مود اول شکست کامپوزیت پلیمری با زیر لایه گرماترم است به نحوی که در مدل سازی و طراحی سازه های بدین شکل قابل استفاده باشد. آزمایش هایی که در این پژوهش انجام شده برای محاسبه انرژی شکست مود خالص اول بین دو ماده از جنس های متفاوت است که در یک گروه خاص از اتصال کامپوزیت گرماسخت با آستری گرماترم است. بدین ترتیب نرخ رها سازی انرژی کرنشی مود خالص اول با دو روش تیر اصلاح شده و کالیبره کردن نرمی برای دو نوع پرایمر بر پایه اپوکسی و وینیل استر با استفاده از نتایج تجربی محاسبه شده است. در پایان با استفاده از روش اجزای محدود بستن ترک مجازی دو مرحله ای و به کمک نرم افزار آباکوس¹⁰ مدل سازی نمونه تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس در اتصال چسبی صورت گرفته است [9]. خروجی های نرم افزار اجزای محدود که شامل نسبت نرخ رها سازی انرژی کرنشی در مدهای اول و دوم است، صحت روابط و تست تجربی این پژوهش را بررسی می نماید. به این ترتیب در این پژوهش برای اولین بار روش محاسبه ضخامت لایه های کامپوزیت های پلیمری گرماسخت با آستری

¹ Virtual Crack Closure Technique (VCCT)

² Strain Energy Release Rate (SERR)

³ Modified Beam Theory (MBT)

⁴ Asymmetric Double Cantilever Beam (ADCBB)

⁵ Mixed Mode

⁶ Fracture Toughness

⁷ Unlike Double Cantilever Beam (UDCB)

⁸ Green Functions

⁹ Double Cantilever Beam (DCB)

¹⁰ ABAQUS



Fig. 6 Tensile test of UDCB sample

شکل 6 تست کشش نمونه تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس

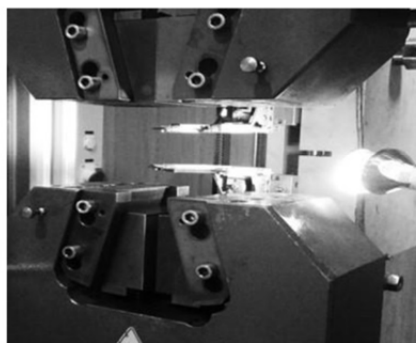


Fig. 7 Tensile testing machine of model ZWICK/Z250 and the extensometer

شکل 7 دستگاه تست کشش زونیک-250 و ازدیاد طول سنج

شکل های 9 و 10 نتایج تست کشش را در نمودارهای تنش-کرنش به ترتیب در جهت الیاف و عمود بر آن نشان می دهند. نتایج حاصل از تست کشش برای تعیین خواص مکانیکی ماده کامپوزیتی با الیاف تک جهته شیشه و رزین وینیل استر در جدول 1 نشان داده شده است.

خواص مکانیکی پلی وینیل کلراید سخت با استفاده از نمونه سازی تست کشش طبق استاندارد ASTM-D638 تعیین می گردد که برای مواد پلاستیکی به کار می رود [20]. یک ازدیاد طول سنج به همراه دستگاه کشش زونیک-250 برای تست کشش و تعیین خواص پلی وینیل کلراید سخت

جدول 1 خواص مکانیکی کامپوزیت (الیاف تک جهته شیشه/ رزین وینیل استر)

G_{23}	G_{13}	G_{12}	ν_{23}	ν_{13}	ν_{12}	E_{33}	E_{22}	E_{11}
(GPa)	(GPa)	(GPa)				(GPa)	(GPa)	(GPa)
4	4	4	0.3	0.3	0.3	2	3.5	30

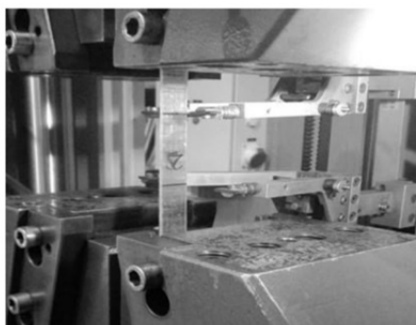


Fig. 8 Tensile test of GFRP samples in the fiber direction

شکل 8 تست کشش نمونه کامپوزیتی در جهت الیاف تک جهته

شده است.

$$h_{GFRP} = h_{PVCU} \left(\sqrt[3]{\frac{E_{PVCU}}{\bar{Q}_{11GFRP}}} \right) \quad (1)$$

در رابطه (1) $\bar{Q}_{11}$ درایه ماتریس سفتی کاهش یافته تبدیل شده تیر کامپوزیتی، E_{PVCU} مدول الاستیسیته تیر پلیمری، h_{PVCU} و h_{GFRP} به ترتیب ضخامت تیر پلیمری و کامپوزیتی است. این رابطه نشان می دهد که نسبت ضخامت تیر بالا و پایین به مدول الاستیسیته دو تیر وابسته است. رابطه (1) فقط برای تیر کامپوزیتی ساخته شده از الیاف تک جهته و در شرایط بارگذاری غیرترکیبی (عدم وجود کوپل تنش و گشتاور) صادق است. با استفاده از رابطه (1) می توان ضخامت کامپوزیت تک جهته را برای محاسبه مود خالص اول نمونه تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس تخمین زد. ضخامت تمام نمونه های پلی وینیل کلراید سخت برای ساخت نمونه تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس برابر 4.85 میلی متر است؛ بنابراین با توجه به معادلات تئوری کلاسیک چندلایه ها، ضخامت کامپوزیت با استفاده از این رابطه برابر معادل 2.1 میلی متر محاسبه می گردد. این ضخامت معادل 3 لایه کامپوزیت با الیاف تک جهته شیشه است. روش تعیین خواص مکانیکی لایه ها در ادامه بیان شده است.

تعداد کل نمونه های تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس هشت عدد است که با طول ترک اولیه 63 میلی متر (50 میلی متر پیش ترک و 13 میلی متر برای طول لولا) برش کاری شده اند. در این بین 4 نمونه با پرایمر اپوکسی و 4 نمونه با پرایمر وینیل استر ساخته شده اند (شکل 5).

برای قرار گرفتن نمونه ها داخل فک دستگاه آزمایش کشش از لولاهای فولادی که توسط چسب سیانواکریلات¹ در دو طرف نمونه چسبیده شده اند، استفاده شده است (شکل 6). در نمونه تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس طول نمونه 130 میلی متر، ضخامت تیر بالا (کامپوزیت با الیاف شیشه) 2.1 میلی متر، ضخامت تیر پایین (پلی وینیل کلراید سخت) 4.85 میلی متر، عرض نمونه 20 میلی متر و ضخامت مایلر 0.1 میلی متر است.

خواص مکانیکی الیاف تک جهته شیشه با رزین وینیل استر با استفاده از نمونه سازی تست کشش طبق استاندارد ASTM-D3039 محاسبه شده است [19]. یک ازدیاد طول سنج² به همراه دستگاه کشش زونیک-250 برای آزمایش کشش و تعیین خواص کامپوزیت با الیاف شیشه استفاده شده است (شکل 7). آزمون کشش الیاف به صورت جابه جایی کنترل با نرخ جابه جایی عمودی ثابت 2 میلی متر بر دقیقه انجام می شود.

برای تعیین خواص کامپوزیت ساخته شده از الیاف شیشه تک جهته و رزین وینیل استر، 6 نمونه کامپوزیتی طبق استاندارد ASTM-D3039 ساخته شده است. در این میان نیمی از نمونه ها در جهت الیاف تک جهته و نیمی در جهت عمود بر آن تست شده است. برای نمونه تست کشش یک نمونه کامپوزیتی در جهت الیاف تک جهته در شکل 8 نمایش داده شده است.

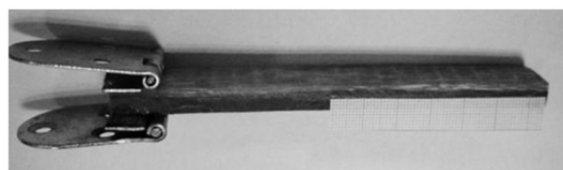


Fig. 5 UDCB sample of GFRP/PVCU

شکل 5 نمونه تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس GFRP/PVCU

¹ Cyanoacrylate Adhesive

² Extensometer



Fig. 11 Precise cutting of PVCU samples using laser cutting machine

شکل 11 برش کاری دقیق نمونه های پلی وینیل کلراید سخت با استفاده از دستگاه برش لیزر

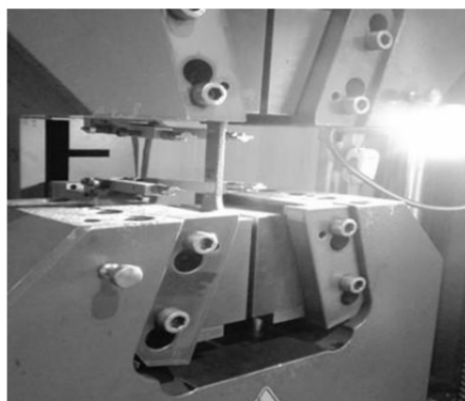


Fig. 12 Tensile test of PVCU Sample

شکل 12 تست کشش نمونه پلی وینیل کلراید سخت

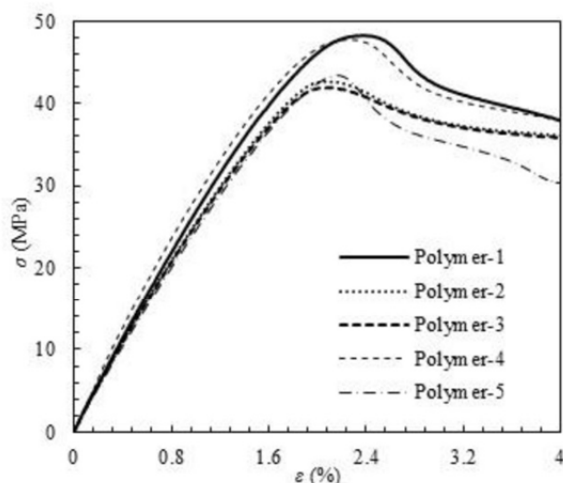


Fig. 13 The stress-strain diagram of the PVCU samples

شکل 13 نمودار تنش-کرنش نمونه های پلی وینیل کلراید سخت

عرض 2.5 سانتی متر و با یک ضخامت ثابت از لایه کامپوزیت با الیاف شیشه تک جهته و رزین وینیل استر برش داده می شود. نسبت وزنی الیاف از رابطه (2) قابل محاسبه است [21].

$$\text{نسبت وزنی الیاف} = \left[\frac{(W_1 - W_2)}{W_1} \right] \times 100 \quad (2)$$

در رابطه (2) W_1 و W_2 به ترتیب وزن هر نمونه پیش و پس از سوزاندن الیاف است.

در این پژوهش نسبت وزنی میانگین الیاف تک جهته در لایه کامپوزیتی طبق استاندارد ASTM-D2584، برابر با 54% است.

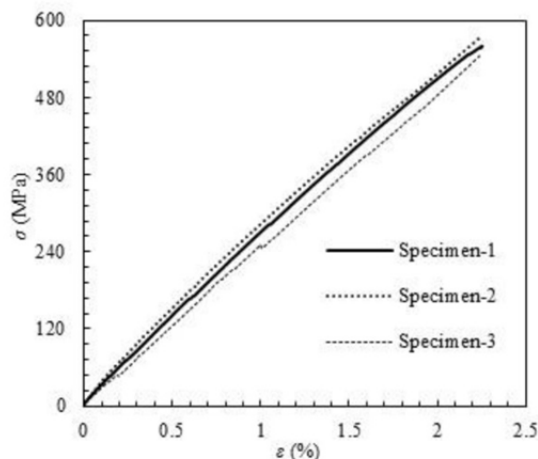


Fig. 9 The stress-strain diagram of GFRP samples in the unidirectional fiber direction

شکل 9 نمودار تنش-کرنش نمونه های کامپوزیتی در جهت الیاف تک جهته

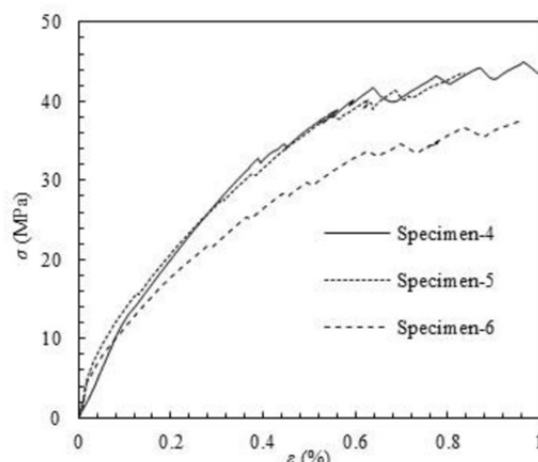


Fig. 10 The stress-strain diagram of GFRP samples in the transverse direction of unidirectional fiber

شکل 10 نمودار تنش-کرنش نمونه کامپوزیت با الیاف شیشه در جهت عمود بر الیاف تک جهته

استفاده شده است. آزمون کشش پلی وینیل کلراید سخت به صورت جابه جایی کنترل با نرخ جابه جایی عمودی ثابت 5 میلی متر بر دقیقه انجام می شود. تعداد 5 نمونه پلی وینیل کلراید سخت با استفاده از دستگاه برش و حکاکی پرفکت لیزر برش کاری شده و طبق استاندارد ASTM-D638 ساخته شده است (شکل 11).

پس از تمیزکاری نمونه های فوق با آستون، خواص مکانیکی آن ها از تست کشش محاسبه شده اند (شکل 12). نمودار تنش-کرنش برای 5 نمونه پلی وینیل کلراید سخت در شکل 13 و نتایج حاصل از تست کشش برای تعیین خواص مکانیکی پلی وینیل کلراید سخت در جدول 2 نشان داده شده است.

برای اندازه گیری درصد الیاف لایه کامپوزیت، طبق استاندارد ASTM-D2584، نمونه هایی با وزن با تقریب 5 گرم، طول 2.5 سانتی متر،

جدول 2 خواص مکانیکی پلی وینیل کلراید سخت

Table 2 Mechanical properties of PVCU

ν	E (GPa)
0.4	2.456

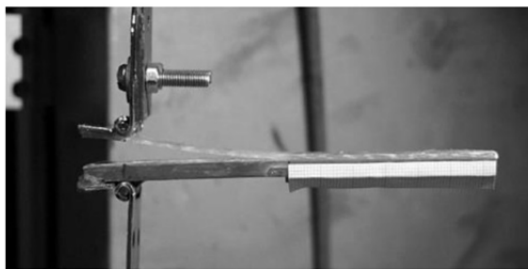


Fig. 15 UDCB sample

شکل 15 نمونه تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس

1-3- روش تیر اصلاح شده

این روش برای محاسبه انرژی شکست مورد استفاده قرار گرفته است و مطمئن ترین مقدار انرژی شکست را در بیش از 80% نمونه ها محاسبه می کند [17]. در مکانیک شکست این روش برای محاسبه نرخ رها سازی انرژی کرنشی اولیه بحرانی (G_{IC}) و منحنی مقاومت جسم در برابر رشد ترک² پیشنهاد شده است [17].

رابطه (3) نرخ رها سازی انرژی کرنشی در روش تیر اصلاح شده برای تیر یک سر گیردار متقارن را نشان می دهد [17].

$$G = \frac{3P\delta}{2ba} \quad (3)$$

در رابطه (3) P بار اعمالی، δ باز شدگی دهانه ترک، b عرض نمونه و a طول ترک است.

در این روش به دلیل این که امکان چرخش تیر در حین بارگذاری وجود دارد، نرخ رها سازی انرژی کرنشی مقدار بیشتری است. در نتیجه رابطه (4) را به صورت زیر داریم [17].

$$G_{IC} = \frac{3P_C\delta_C}{2b(a + |\Delta|)} \quad (4)$$

در رابطه (4) Δ افزایش طول مؤثر جدایش است.

تیرهای بالا و پایین مانند دو فنر موازی تحت جابه جایی کنترل و شعاع انحنای مساوی است؛ بنابراین باید ضریبی پیدا کرد که رابطه بین ممان خمشی و انحناهای تیرهای ناهمجنس را مشخص کند. رابطه (5) نرخ رها سازی انرژی کرنشی در روش تیر اصلاح شده را برای تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس نشان می دهد.

$$G_I = \frac{P^2(a + |\Delta|)^2}{b(EI)_{eq}} \quad (5)$$

در آن $(EI)_{eq}$ سفتی خمشی معادل است.

برای حالت تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس، پارامتر S و $(EI)_{eq}$ با رابطه (6) به هم مرتبط می شوند.

$$S = \frac{2}{3} \frac{1}{(EI)_{eq}} \quad (6)$$

نرخ رها سازی انرژی کرنشی در روش تیر اصلاح شده برای تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس عبارت از رابطه (7) است.

$$G_I = \frac{3P^2(a + |\Delta|)^2}{2bS} \quad (7)$$

2-3- روش کالیبره کردن نرمی

نرخ رها سازی انرژی کرنشی برای تیر یک سر گیردار متقارن در روش کالیبره کردن نرمی عبارت از رابطه (8) است [17].

$$G_{IC} = \frac{nP_C\delta_C}{2ba} \quad (8)$$

² Resistance-Curve (R-Curve)

2-2- روش آزمایش

این آزمایش طبق استاندارد ASTM-D5528 در دمای 23 درجه سانتی گراد و رطوبت نسبی 50% انجام شده است [17]. بار اعمال شده به تمام نمونه ها به صورت جابه جایی کنترل با نرخ جابه جایی عمودی ثابت 2 میلی متر بر دقیقه به تیر پایینی وارد می شود که از جنس ترموپلاستیک است. میزان جابه جایی و بار اعمال شده بر هر نمونه توسط دوربین و دستگاه کشش به صورت پیوسته ثبت می شود. از دوربین فیلم برداری دیجیتال SONY مدل NEX-5T با کیفیت فیلم برداری 60 فریم بر ثانیه برای ثبت لحظه باز شدگی و مسیر رشد ترک استفاده شده است.

3-2- دستگاه آزمون کشش

برای انجام آزمایش ها از دستگاه آزمایش کشش زوئیک-250 ساخت کشور آلمان در آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشگاه فردوسی مشهد استفاده شده است (شکل 14).

ظرفیت این دستگاه 25 تن و قابلیت تنظیم سرعت بارگذاری آن بین 0.1 تا 500 میلی متر بر دقیقه است. این دستگاه مجهز به دو نیروسنج 2 و 250 کیلو نیوتنی است. برای انجام آزمایش کشش به دلیل کم بودن نیروی اعمالی از نیروسنج 2 کیلو نیوتنی استفاده شده است. نمونه ها با سرعت 2 میلی متر بر دقیقه تحت بارگذاری به صورت جابه جایی کنترل قرار گرفته اند. شکل 15 نمونه تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس تحت بارگذاری باز شدگی به وسیله این دستگاه را نشان می دهد.

3- روش های محاسبه نرخ رها سازی انرژی کرنشی

در این بخش دو روش محاسبه نرخ رها سازی انرژی کرنشی در مود اول شکست براساس استاندارد ASTM-D5528 ارائه شده است. این دو روش به ترتیب با نام های تیر اصلاح شده و کالیبره کردن نرمی¹ معرفی می شوند [17].

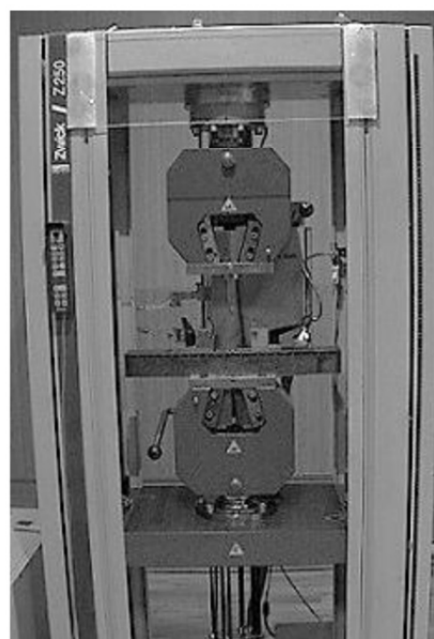


Fig. 14 Tensile test machine ZWICK/Z250

شکل 14 دستگاه تست کشش زوئیک-250

¹ Compliance Calibration Method (CCM)

مدل سازی است. در این مسأله با توجه به بزرگی قابل توجه عرض نمونه نسبت به ضخامت پرایمر که ترک در آن رشد می کند، از مدل کرنش صفحه ای برای کاهش زمان محاسبات استفاده شده است. نوع المان استفاده شده، CPE4 است که بیانگر المان های کرنش صفحه ای چهار گره ای است. نکته مهم در شبکه بندی المان محدود برای بررسی رشد ترک با استفاده از روش بستن مجازی ترک، تعیین نمو طول ترک حول نوک ترک Δa است و این پارامتر براساس نتایج مدل سازی تعیین می گردد (در قسمت نتایج مدل سازی روش تعیین Δa مناسب شرح داده شده است).

مقدار Δa مناسب برای اتصال GFRP/PVCU برابر 2 میلی متر است؛ بنابراین برای نمونه تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس با اتصال GFRP/PVCU در این پژوهش به صورت رابطه (11) داریم.

$$\frac{\Delta a}{a} = \frac{2}{50} = 0.04 \quad (11)$$

پارامتر $\Delta a/a$ نسبت نمو طول ترک به طول پیش ترک است که پارامتر بسیار مهمی در مسائل مکانیک شکست است. این پارامتر بستگی به نوع اتصال دارد. در این پژوهش به ازای $(\Delta a/a)_{UDCB} < 0.04$ نتایج قابل قبول نیست؛ بنابراین برای اتصال GFRP/PVCU مقدار Δa مناسب در بازه $2 \ll \Delta a$ میلی متر است (شکل 17). شکل 17 نمای شبکه بندی شده مدل تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس در آباکوس را نشان می دهد.

در شرایطی روش بسته شدن ترک مجازی برای بررسی رشد ترک اعتبار دارد که تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی صادق باشد [9]. با توجه به این که در این پژوهش فرضیات تئوری فوق اعمال شده است، می توان برای مدل سازی پدیده رشد ترک و تعیین رفتار مود اول و دوم شکست از این روش استفاده نمود. در این راستا از روش بستن مجازی ترک دو بعدی با تحلیل دو مرحله ای استفاده شده است [9].

مؤلفه های مود I و II نرخ رها سازی انرژی کرنشی، G_I و G_{II} برای اجزای چهار گره ای عبارت از روابط (12) است [9].

$$G_I = -\frac{1}{2\Delta a} Z_i (w_L - w_{L^*}) \quad (12-a)$$

$$G_{II} = -\frac{1}{2\Delta a} X_i (u_L - u_{L^*}) \quad (12-b)$$

در رابطه (9) شیب نمودار $\text{Log}(C)$ برحسب $\text{Log}(a)$ و C نرمی است.

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (9)$$

نرخ رها سازی انرژی کرنشی برای تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس در روش کالیبره کردن نرمی با توجه به رابطه پیشنهادی برای ضخامت تیرها (رابطه (1))، عبارت از رابطه (10) است.

$$G_I = \frac{nP^2a^2}{2bS} = \frac{nP^2a^2}{3b(EI)_{eq}} \quad (10)$$

4- مدل سازی اجزای محدود

4-1- مدل سازی هندسی

تمام ابعاد هندسی مدل تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس براساس ابعاد نمونه های آزمون عملی و استانداردهای یاد شده در آباکوس ترسیم شده است. خواص مکانیکی مواد مطابق جدول های 1 و 2 در نظر گرفته شده است.

4-2- شرایط مرزی

شرایط مرزی به کار رفته در این مسأله مطابق با شرایط مرزی آزمایش های عملی و روش بستن مجازی ترک است [9]. شکل 16 شرایط مرزی مدل تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس را نشان می دهد. در نمونه تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس بار اعمالی به صورت جابه جایی رو به پایین به لبه پایینی نمونه وارد شده و تغییر مکان افقی ثابت فرض شده است. لبه بالایی نمونه ها نیز در جهت های افقی و عمودی ثابت است.

4-3- المان بندی

انتخاب نوع المان با توجه به شرایط حل مسأله یکی از نکات مهم در انجام

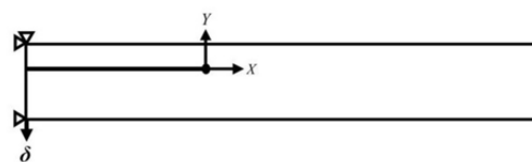


Fig. 16 Boundary conditions of UDCB model in ABAQUS

شکل 16 شرایط مرزی مدل تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس در آباکوس

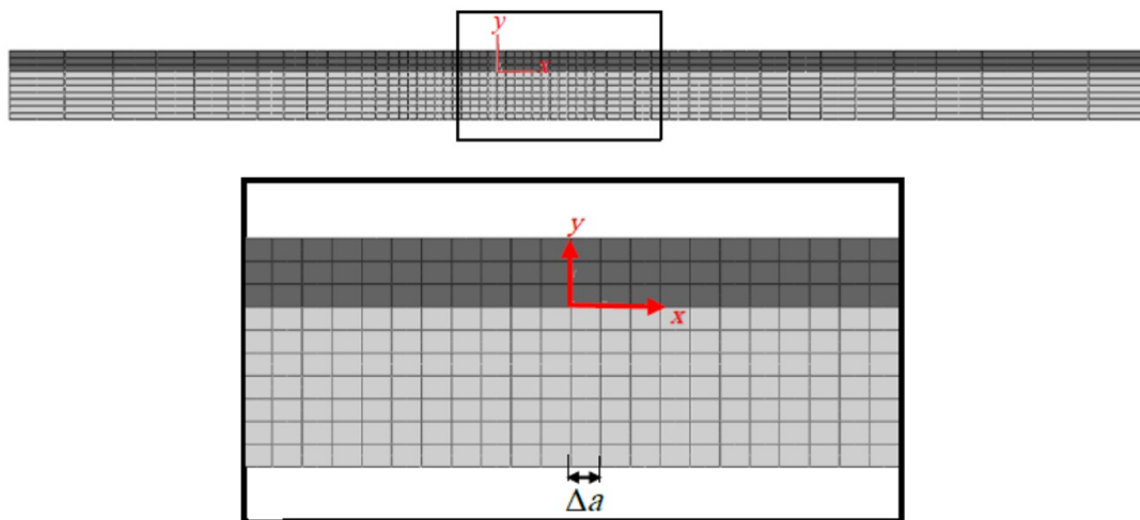


Fig. 17 Mesh size index of UDCB model in ABAQUS

شکل 17 نمای شبکه بندی شده مدل تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس در آباکوس

جدول 3 مقدار طول اصلاح شده ترک مود اول برای روش تیر اصلاح شده

Table 3 The value of Δ for MBT

نوع پرایمر اتصال	اندازه مقدار طول اصلاح شده (mm)
اپوکسی	3.33
وینیل استر	3.40

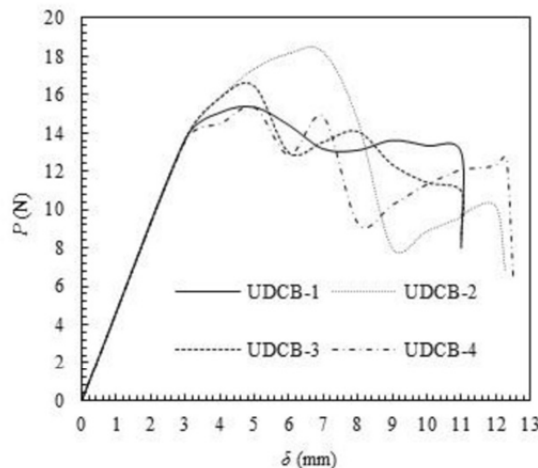


Fig. 18 Experimental load-displacement curves of the UDCB specimens with NCEP25

شکل 18 نمودار نیرو- جابه جایی براساس نتایج تجربی نمونه های تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس با پرایمر اپوکسی

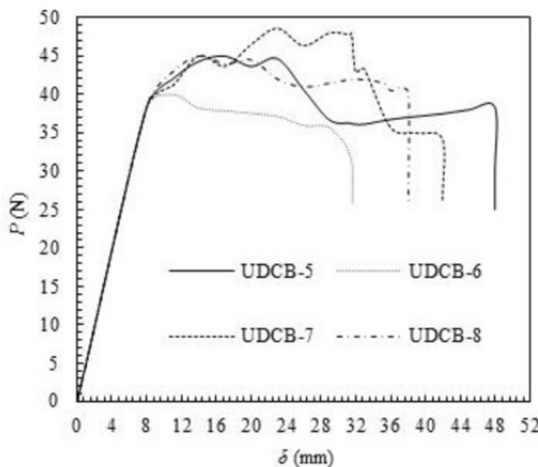


Fig. 19 Experimental load-displacement curves of the UDCB specimens with NCVP209

شکل 19 نمودار نیرو- جابه جایی براساس نتایج تجربی نمونه های تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس با پرایمر وینیل استر

جدول 4 مقادیر تجربی نرخ رها سازی انرژی کرنشی در لحظه باز شدن نوک ترک به دست آمده از دو روش تیر اصلاح شده و کالیبره کردن نرمی برای مود خالص اول شکست اتصال GFRP/PVCU با طول ترک اولیه 50 میلی متر را نشان می دهد.

جدول 5 نیز مقادیر عددی نرخ رها سازی انرژی کرنشی در لحظه باز شدن نوک ترک به دست آمده برای مودهای اول و دوم شکست این اتصال با طول ترک اولیه 50 میلی متر به کمک مدل سازی المان محدود را نشان می دهد.

نتایج حاصل در جدول 5 نشان می دهد با توجه به این که نسبت نرخ

4- روش بستن ترک با تحلیل دو مرحله ای

ترک در دو تحلیل مجزا به صورت فیزیکی باز و بسته می شود. اساس روش بستن مجازی ترک اصل اروین است [9]. در نهایت نرخ رها سازی انرژی کرنشی لحظه شروع رشد ترک بر مبنای نتایج تجربی و مدل سازی اجزای محدود با یکدیگر مقایسه شده اند.

5- نتایج

لوله های دولایه کامپوزیتی با استری ترموپلاست معمولاً برای سیالات خورنده و در بازه دمایی استفاده می شوند که رزین ترموست به تنهایی پاسخ گو نیست. اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین لایه ترموپلاست و کامپوزیت ترموست باعث می شود که در بارگذاری های حرارتی و حتی در زمان تولید به دلیل دمای بالای ناشی از فرایند پلیمر شدن در لایه ترموست و سخت شدن کامپوزیت در این دما و سپس انتقال به دمای محیط، پدیده تورق در سطح مشترک لایه ترموپلاست و ترموست صورت گیرد. مود یک شکست در پدیده تورق نقش قابل توجهی را ایفا می کند؛ بنابراین در اختیار داشتن این پارامتر برای مود یک هم به لحاظ مشخصه سازی و مقایسه کیفیت اتصال و هم برای استفاده در تحلیل این سازه ها با استفاده از المان های چسبنده حائز اهمیت است.

در این بخش به نتایج حاصل از مدل سازی و آزمون تجربی مود خالص اول شکست بین کامپوزیت ترموست و ماده ترموپلاستیک (GFRP/PVCU) و همچنین تأثیر نوع چسبندگی در اتصال بین این دو ماده پرداخته شده است.

8 نمودار بار- جابه جایی از نتایج تجربی به دست آمده که نیمه مربوط به پرایمر اپوکسی (شکل 18) و نیم دیگر آن مربوط به پرایمر وینیل استر (شکل 19). استخراج بار و جابه جایی بحرانی در تست های پژوهش با استفاده از ثبت زمان فیلم برداری دوربین دیجیتال و آزمون توسط اپراتور می شود.

شکل های 20 و 21 نمودار ریشه سوم نرمی برحسب طول ترک را به ترتیب برای اتصال پرایمر اپوکسی و وینیل استر نشان می دهند. با عبور یک منحنی خطی درجه یک از نقاط حاصل شده می توان مقدار طول اصلاح شده ترک مود اول شکست را در روش تیر اصلاح شده محاسبه کرد (جدول 3). شکل های 22 و 23 نمودار لگاریتم نرمی برحسب لگاریتم طول ترک را به ترتیب برای اتصال پرایمر اپوکسی و وینیل استر نشان می دهند. از نمودارهای به دست آمده برای محاسبه مقدار n در روش کالیبره کردن نرمی استفاده شده است (رابطه 8).

شکل های 24 و 25 نمودار نرخ رها سازی انرژی کرنشی برحسب طول ترک را نشان می دهد که با استفاده از روش تیر اصلاح شده و روش کالیبره کردن نرمی و به ترتیب برای اتصال پرایمر اپوکسی و وینیل استر به دست آمده است. نتایج تجربی حاصل از روش های مختلف برای نرخ رها سازی انرژی کرنشی در هر نوع پرایمر به هم نزدیک است.

شکل های 26 و 27 به ترتیب سطوح شکست و مسیر رشد ترک در نمونه تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس با اتصال پرایمر اپوکسی را نشان می دهند. با توجه به این شکل ها مسیر رشد ترک در این نمونه ها بین سطح لایه کامپوزیت و پرایمر اپوکسی رشد می کند. سطوح شکست و مسیر رشد ترک برای پرایمر وینیل استر نیز به ترتیب در شکل های 28 و 29 نشان داده شده که در آن مسیر رشد ترک بین سطح پلی وینیل کلراید سخت و پرایمر وینیل استر است.

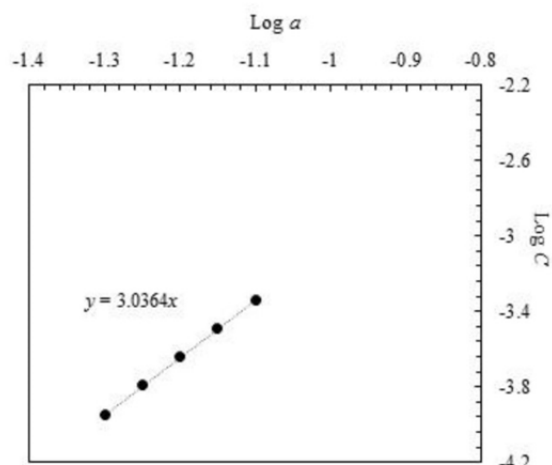


Fig. 23 Experimental Log(C)-Log(a) curve of the UDCB specimen with NCVP209

شکل 23 نمودار لگاریتم نرمی-لگاریتم طول ترک براساس نتایج تجربی نمونه های تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس با پرایمر وینیل استر

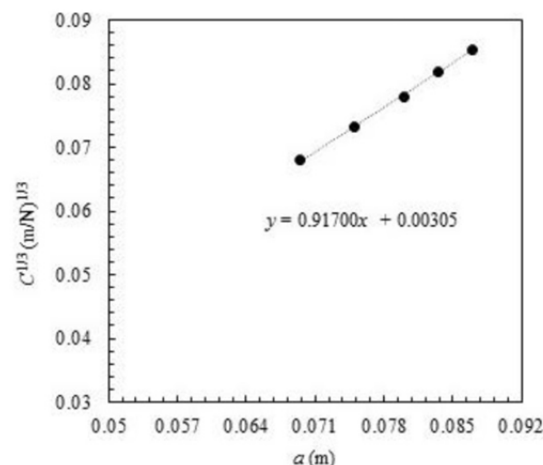


Fig. 20 Experimental cubed root of compliance versus crack length of UDCB specimens with NCEP25

شکل 20 نمودار ریشه سوم نرمی برحسب طول ترک براساس نتایج تجربی نمونه های تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس با پرایمر اپوکسی

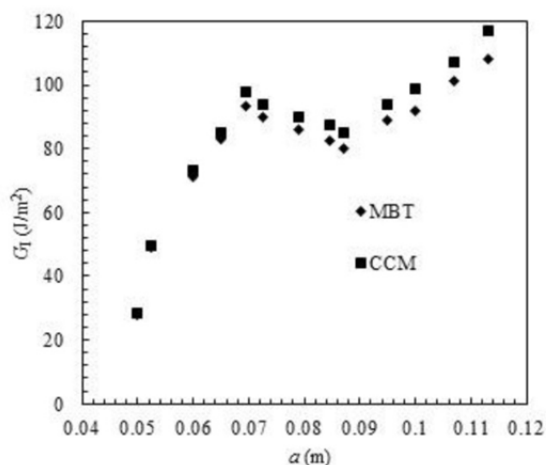


Fig. 24 Experimental R-Curve of the UDCB specimen with NCEP25

شکل 24 منحنی مقاومت ماده براساس نتایج تجربی نمونه های تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس با پرایمر اپوکسی

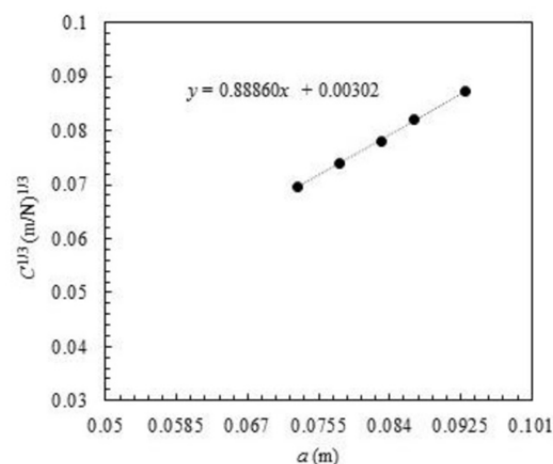


Fig. 21 Experimental cubed root of compliance versus crack length of UDCB specimens with NCVP209

شکل 21 نمودار ریشه سوم نرمی برحسب طول ترک براساس نتایج تجربی نمونه های تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس با پرایمر وینیل استر

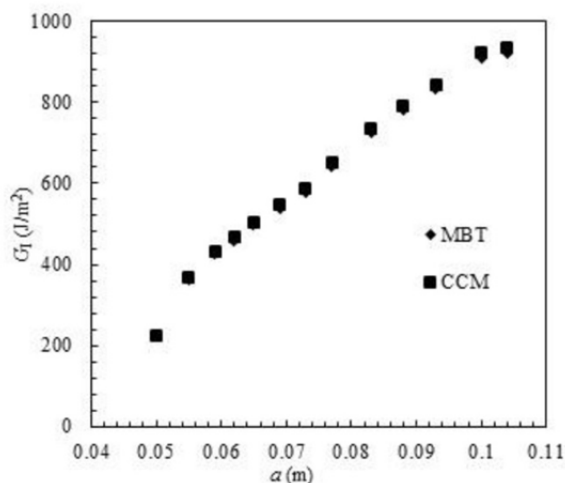


Fig. 25 Experimental R-Curve of the UDCB specimen with NCVP209

شکل 25 منحنی مقاومت ماده براساس نتایج تجربی نمونه های تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس با پرایمر وینیل استر

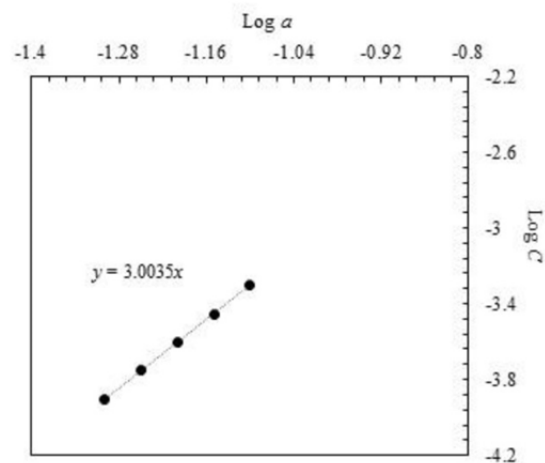


Fig. 22 Experimental Log(C)-Log(a) curve of UDCB specimen with NCEP25

شکل 22 نمودار لگاریتم نرمی-لگاریتم طول ترک براساس نتایج تجربی نمونه های تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس با پرایمر اپوکسی

جابه جایی برای باز شدگی ترک که از نمودار نیرو- جابه جایی به دست می آید را به عنوان ورودی نرم افزار در نظر گرفته ایم. خواص مواد مطابق جدول های 1 و 2 است. نرخ رها سازی انرژی کرنشی لحظه باز شدن نوک ترک از روابط (11) به دست می آید. شکل های 30 و 31 به ترتیب مراحل بستن و باز شدن نوک ترک نمونه تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس را در نرم افزار آباکوس نشان می دهند.

6- نتیجه گیری

در این پژوهش محاسبه نرخ رها سازی انرژی کرنشی در لحظه باز شدن نوک

جدول 4 مقادیر تجربی نرخ رها سازی انرژی کرنشی مود اول شکست در لحظه باز

شدن نوک ترک برای اتصال GFRP/PVCU

Table 4 The Experimental values of SERR in first failure mode at the crack tip opening of GFRP/PVCU interface

نرخ رها سازی انرژی کرنشی (J/m^2)		
نوع پرایمر اتصال	روش تیر اصلاح شده	روش کالیبره کردن نرمی
اپوکسی	28.16	28.39
وینیل استر	222.42	225.73

جدول 5 مقادیر عددی نرخ رها سازی انرژی کرنشی برای مودهای اول و دوم شکست

در لحظه باز شدن نوک ترک اتصال GFRP/PVCU

Table 5 The Numerical values of SERR in modes I & II of failure at the crack tip opening of GFRP/PVCU interface

نرخ رها سازی انرژی کرنشی (J/m^2)		
نوع پرایمر اتصال	مود اول شکست	مود دوم شکست
اپوکسی	29.97	1.03
وینیل استر	215.58	17.23

جدول 6 مقادیر نرخ رها سازی انرژی کرنشی مود خالص اول شکست

Table 6 Values of SERR in first failure pure mode

نرخ رها سازی انرژی کرنشی (J/m^2)				
پرایمر	تیر اصلاح شده	کالیبره کردن نرمی	مدل سازی	درصد خطا (%)
اپوکسی	28.16	28.39	29.97	5.6
وینیل استر	222.42	225.73	215.58	3.9

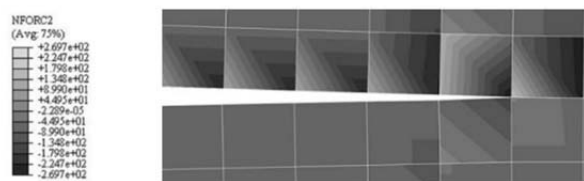


Fig. 30 Crack tip closure for UDCB sample in ABAQUS software

شکل 30 بستن نوک ترک نمونه تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس در نرم افزار

آباکوس

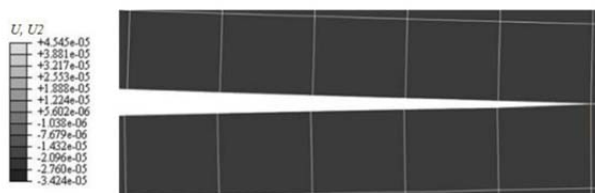


Fig. 31 Crack tip opening for UDCB sample in ABAQUS software

شکل 31 باز شدن نوک ترک نمونه تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس در نرم افزار

آباکوس

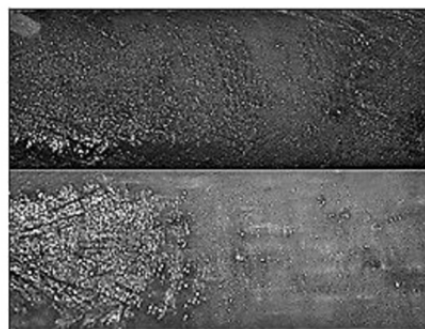


Fig. 26 Failure surfaces of UDCB sample with NCEP25

شکل 26 شکست سطوح برای نمونه تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس با پرایمر اپوکسی



Fig. 27 Crack growth path in the UDCB sample with NCEP25

شکل 27 مسیر رشد ترک در نمونه تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس با پرایمر اپوکسی



Fig. 28 Failure surfaces of UDCB sample with NCVP209

شکل 28 شکست سطوح برای نمونه تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس با پرایمر وینیل استر



Fig. 29 Crack growth path in the UDCB sample with NCVP209

شکل 29 مسیر رشد ترک در نمونه تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس با پرایمر وینیل استر

رها سازی انرژی کرنشی مود اول به نرخ رها سازی انرژی کرنشی کل تقریب 99% است؛ بنابراین ضخامت های در نظر گرفته شده برای تیر بالا و پایین و همچنین روش تست پیشنهاد شده برای محاسبه انرژی خالص مود یک معتبر است؛ بنابراین می توان آن را مود خالص اول شکست محسوب کرد. مقایسه نتایج نرخ رها سازی انرژی کرنشی مود اول با دو روش تیر اصلاح شده، کالیبره کردن نرمی و همچنین مدل سازی عددی در جدول 6 نشان داده شده است. با توجه به جدول 6 بین مقادیر تجربی و عددی خطای کمتر از 6% به دست آمده که قابل قبول است.

برای مدل سازی دو مرحله ای با روش بستن مجازی ترک، مقدار

ترک تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس از جنس GFRP/PVCU در مود خالص اول شکست به روش تجربی انجام گرفت. با توجه به این که استاندارد تست تجربی نرخ رها سازی انرژی کرنشی ASTM-D5528 برای نمونه های تیر یک سرگیردار متقارن ارائه شده است، رابطه کلی محاسبه ضخامت لایه ها برای هر نوع اتصال تیر ناهمجنس با استفاده از تئوری کلاسیک چندلایه ها ارائه شد. این روابط در تست تجربی نمونه های تیر ناهمجنس برای دو نوع اتصال چسبی واسط شامل دو پرایمر اپوکسی و وینیل استر به کار گرفته شد، سپس محاسبه عددی نرخ رها سازی انرژی کرنشی در لحظه باز شدن ترک با استفاده از مدل سازی اجزای محدود آباکوس به روش بستن مجازی ترک صورت گرفت. نتایج این پژوهش به شرح زیر است.	A	سطح مقطع ناحیه دارای ترک (m^2)
با توجه به نتایج تجربی جدایش نمونه تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس از جنس GFRP/PVCU با دو نوع پرایمر اپوکسی و وینیل استر متفاوت است. در نمونه با پرایمر اپوکسی جدایش بین لایه سطح کامپوزیت و پرایمر اپوکسی اتفاق می افتد، ولی برای نمونه با پرایمر وینیل استر این پدیده بین سطح پلی وینیل کلراید سخت و پرایمر اتفاق می افتد. تفاوت جدایش ها در دو حالت یاد شده باعث اختلاف نرخ رها سازی انرژی کرنشی می شود. هر دو پرایمر اپوکسی و وینیل استر اتصال مکانیکی و شیمیایی خوبی با سطح پلی وینیل کلراید سخت برقرار می کنند، اما اتصال پرایمر اپوکسی به کامپوزیت با زمینه وینیل استر ضعیف است؛ بنابراین مسیر رشد ترک به سطح مشترک پرایمر اپوکسی و ساختار کامپوزیتی منتقل شده است. به دلیل نوع اتصال و جدایش نمونه تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس از جنس GFRP/PVCU مقادیر نرخ رها سازی انرژی کرنشی متفاوت خواهد بود. نرخ رها سازی انرژی کرنشی نمونه با پرایمر وینیل استر بیشتر از اپوکسی است. نرخ رها سازی انرژی کرنشی نمونه با پرایمر وینیل استر به طور تقریبی 7.5 برابر نمونه با پرایمر اپوکسی است.	b	عرض نمونه تیر یک سرگیردار ناهمجنس (mm)
در نتایج مدل سازی با روش اجزای محدود به کمک روش بستن مجازی ترک دو مرحله ای ثابت شد که مقدار نرخ رها سازی انرژی کرنشی مود اول به طور تقریب 99% مقدار نرخ رها سازی انرژی کرنشی کل به دست آمده است، بنابراین می توان بیان کرد که این مقدار همان مقدار نرخ رها سازی انرژی کرنشی مود خالص اول است که نتیجه معتبر بودن استفاده از تئوری کلاسیک چندلایه ها و رابطه (1) را در حل مسأله به ما نشان می دهد.	C	نرمی (mm/N)
با توجه به نتایج تجربی مقادیر نرخ رها سازی انرژی کرنشی بحرانی مود خالص اول برای پرایمر اپوکسی و وینیل استر به ترتیب برابر با 98 و 920 ژول بر متر مربع محاسبه شده است. نتایج تجربی و مدل سازی اختلاف کمی با هم دارند. نتایج مدل سازی کمتر از 6% خطا دارند و این موضوع نشان دهنده هم پوشانی خوب نتایج تجربی و مدل سازی نرم افزاری و صحت روابط ارائه شده جهت تست تجربی نمونه های تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس است.	E	مدول یانگ (GPa)
با استفاده از رابطه ارائه شده در این پژوهش (رابطه 1)) می توان نرخ رها سازی انرژی کرنشی مود خالص اول را محاسبه کرد و نتایج نشان می دهد که ضخامت های محاسبه شده با استفاده از این رابطه که وابسته به خواص تیر بالا و پایین هستند، به نتایج درستی در محاسبه انرژی منتهی می گردند با روش ارائه شده نرخ رها سازی انرژی کرنشی در مود خالص اول جدایش اندازه گردید که می تواند مورد استفاده طراحان و سازندگان سازه های کامپوزیتی دولایه مشابه قرار گیرد.	G	نرخ رها سازی انرژی کرنشی (J/m^2)
	H	ضخامت کل نمونه (mm)
	h	ضخامت هر کدام از تیرهای بالا یا پایین (mm)
	I	ممان دوم سطح (m^4)
	n	شیب نمودار لگاریتم نرمی برحسب لگاریتم طول ترک
	P	بار اعمالی (N)
	Q	سختی معادل تیر کامپوزیتی (MPa)
	S	نرمی خمشی معادل (nPa/m^4)
	U	جابه جایی افقی (mm)
	W	جابه جایی عمودی (mm)
	W	وزن هر نمونه جهت محاسبه درصد وزنی الیاف (gr)
	X	نیروی افقی در گره نوک ترک (N)
	Z	نیروی عمودی در گره نوک ترک (N)
	Δa	نمو طول ترک (mm)

علائم یونانی

δ	جابه جایی نقطه اعمال بار (mm)
Δ	طول اصلاح شده ترک مود اول شکست (mm)
ν	ضریب پواسون
ϵ	کرنش
σ	تنش (MPa)

زیر نویس ها

C	بحرانی
eq	معادل
GFRP	کامپوزیت با الیاف شیشه
PVCU	پلی وینیل کلراید سخت
I	مود اول شکست
II	مود دوم شکست

8- تقدیر و تشکر

در این جا ضروری است تا از شرکت دانش بنیان مهندسی نوین کامپوزیت صدا که در ساخت نمونه ها و تست آن همکاری ویژه ای داشته اند، قدردانی گردد. این شرکت از شرکت های دانش بنیان دانشگاه صنعتی قوچان است که با انتقال تجربه سازنده خود در خصوص لوله های دولایه فرآیند ساخت نمونه ها و تست آن را در اختیار نویسندگان قرار داد.

9- مراجع

- [1] M. M. Ansari, A. Chakrabarti, M. Iqbal, An experimental and finite element investigation of the ballistic performance of laminated GFRP composite target, *Composites Part B*, Vol. 125, pp. 211-226, 2017.
- [2] S. Job, Recycling glass fibre reinforced composites – history and progress, *Reinforced Plastics*, Vol. 57, Issue 5, pp. 19-23, 2013.
- [3] T. Song, Y. Li, J. Song, Z. Zhang, Airworthiness considerations of supply chain management from Boeing 787 Dreamliner battery issue, *Procedia Engineering*, Vol. 80, pp. 628-637, 2014.
- [4] M. Roseman, R. Martin, G. Morgan, Marine Applications of Advanced Fibre-Reinforced Composites, *Hitchin: Woodhead Publishing*, pp. 233-257, 2016.
- [5] Y. Fouad, M. El-Meniawi, A. Afifi, Erosion behaviour of epoxy based unidirectional (GFRP) composite materials, *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 50, pp. 29-34, 2011.

7- فهرست علائم

a طول ترک اولیه (mm)

- Engineering*, Vol. 29, pp. 81-86, 2012. (in Persian فارسی)
- [15] M.M. Shokrieh, A. Zeinedini, Prediction of strain energy release rate of asymmetric double cantilever composite beam using equivalent luy-up for mixed-mode I/II delamination, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, pp. 214-225, 2013. (in Persian فارسی)
- [16] Kariman Moghadam, S. Rahnama, S. Maleki, Experimental and numerical investigation of crack growth in adhesive bonding of two composite plates under mode I, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, pp. 271-280, 2016. (in Persian فارسی)
- [17] ASTM, D5528: Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites, *American Standard of Testing Methods*, Vol. 03, pp. 1-12, 2014.
- [18] M. Hyer, *Stress Analysis of Fiber-Reinforced Composite Materials*, Virginia: McGRAW-HILL, 1998.
- [19] ASTM, D3039/D3039M: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, *ASTM International*, Vol. 07, pp. 1-13, 2007.
- [20] ASTM, D 638: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, *ASTM International*, Vol. 14, pp. 1-17, 2014.
- [21] ASTM, D 2584: Standard Test Method for Ignition Loss of Cured Reinforced Resins, *ASTM International*, Vol. 08, pp. 1-3, 2008.
- [6] R. Rafiee, On the mechanical performance of glass-fibre reinforced thermosetting-resin pipes: A review, *Composite Structures*, Vol. 143, pp. 151-164, 2016.
- [7] ZCL, ZCL Dualam Inc, 2017; <https://www.zcl.com/en/>.
- [8] S. Rush, *Dual Laminate Fabrication Association*, DLFA, 2017; <http://www.compositesworld.com/articles/inside-manufacturing-dual-laminate-pipe-comes-of-age>.
- [9] R. Krueger, Virtual crack closure technique: History, approach, and applications, *National Institute of Aerospace*, Vol. 57, NO. 2, pp. 35, 2004.
- [10] V. Mollon, J. Bonhomme, J. Vina, A. Arguelles, Mixed mode fracture toughness: An empirical formulation for G_I/G_{II} determination in asymmetric DCB specimens, *Engineering Structures*, Vol. 32, pp. 3699-3703, 2010.
- [11] V. Sundararaman, B. Davidson, An Unsymmetric Double Cantilever Beam test for Interfacial Fracture Toughness Determination, *Int. J. Solid Structures*, Vol. 34, pp. 799-817, 1997.
- [12] Y.J. Guo, Y. Weitsman, A modified DCB specimen to determine mixed mode fracture toughness of adhesives, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 68, pp. 1647-1668, 2001.
- [13] S.A. Brown, L. Tong, A localised experimental-numerical technique for determining mixed mode strain energy release rates, *Composire Structures*, Vol. 94, pp. 132-142, 2011.
- [14] M. Heydai-Rarani, M.M. Shokrieh, Effect of curved crack front on strain energy release rate of unidirectional DCB specimens, *Sharif Mechanical*