

ارائه روشی جدید برای محاسبه تجربی نرخ رها سازی انرژی کرنشی مود اول شکست در تیر یک سر گیر دار دولبه ناهمجنس

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

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

2- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی 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 رها سازی انرژی کرنشی مود اول شکست معیار مهمی در بررسی مقاومت اتصال و پیش‌بینی خرابی این نوع لوله‌هاست. استاندارد تست تجربی نرخ رها سازی انرژی کرنشی برای نمونه‌های تیر یک سر گیر دار متقارن، ASTM-D5528 است. در این پژوهش رابطه کلی محاسبه ضخامت لایه‌ها برای هر نوع تیر یک سر گیر دار 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، مدل سازی 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
کلید واژگان:
نرخ رها سازی انرژی کرنشی
مود اول شکست
تیر یک سر گیر دار 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.

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

1- مقدمه

کامپوزیت‌های زمینه پلیمری یکی از مهم‌ترین و پرکاربردترین انواع

¹ Polymer

لوله‌های دولایه¹¹ جهت انتقال فرآورده‌های 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 دمایی 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

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 بورن⁷ 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 خورنده 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 بریابند. 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 دمایی 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].



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

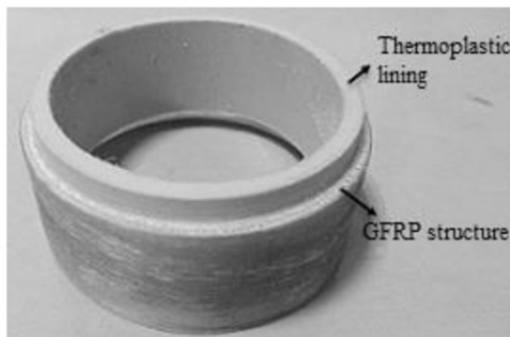


Fig. 2 A composite dual laminate pipe
شکل 2 لوله دولایه کامپوزیتی با آستری گرمانرم

¹¹ Dual laminates
¹² caustic
¹³ Liner
¹⁴ Polyvinylchloride (PVC)
¹⁵ Polypropylene (PP)
¹⁶ Dual Laminate Fabrication Association (DLFA)

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 نمونه‌های ناهمجنس دلخواه در تست استاندارد تیر یک سرگیردار دولبه ارائه می‌شود.

2- روش تحقیق

2-1- مواد و آماده سازی نمونه‌ها

برای ساخت و آماده سازی نمونه‌های آزمایش تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس از استاندارد ASTM-D5528 استفاده شده است. نمونه‌های تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس استاندارد مجزایی ندارند، اما از استاندارد مربوط به نمونه‌های تیر یک سرگیردار دولبه متقارن برای نمونه‌های تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس استفاده شده است [17]. جنس نیمه بالایی از کامپوزیت ساخته شده از الیاف شیشه تک‌جهته و رزین وینیل‌استر و جنس نیمه پایینی از پلی‌وینیل‌کلراید سخت¹¹ است. پرایمر در اتصال GFRP/PVCU نیز بر دو پایه اپوکسی¹² و وینیل‌استر¹³ است.

برش کاری نمونه‌های آزمایشگاهی پلی‌وینیل‌کلراید 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 پیش‌ترک، فیلم پلی‌استر 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 میلی‌متر استفاده شده است (شکل 4). در ادامه برای هر نمونه تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس، سه لایه الیاف تک‌جهته¹⁵ (زاویه الیاف صفر درجه) بر هر نمونه پلی‌وینیل‌کلراید سخت به صورت دستی لایه‌چینی می‌گردد.

با توجه به روابط حاکم بر مسأله تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس برای محاسبه نرخ رها سازی انرژی کرنشی مود خالص اول با استفاده از تئوری کلاسیک چندلایه‌ها برای کامپوزیت‌ها، 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 سرگیردار دولبه ناهمجنس استخراج



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

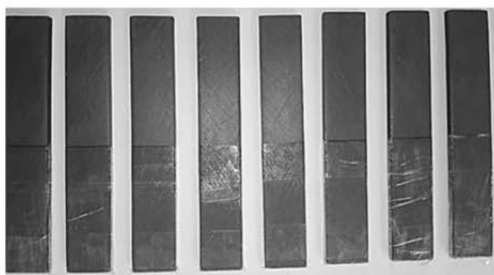


Fig. 4 Polyester release film on the pre-crack area of the PVCU samples

شکل 4 فیلم نجسب پلی‌استر در ناحیه پیش‌ترک نمونه‌های پلی‌وینیل‌کلراید سخت

¹¹ Polyvinylchloride – Unplasticised (PVCU)

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

¹³ کد پرایمر وینیل‌استر مورد استفاده در این پژوهش NCVP209 متعلق به شرکت مهندسی نوین کامپوزیت صداست.

¹⁴ PEDK-160100A RF

¹⁵ Unidirectional

¹⁶ Radius of Curvature

شده از زمینه گرماسخت و الیاف شیشه برای مقاومت در برابر عوامل خوردنده می‌پردازند [8].

روش‌های عددی متعددی در تحلیل مسائل شکست مورد استفاده قرار می‌گیرد که مهم‌ترین و پرکاربردترین آن‌ها روش اجزای محدود است. روش‌های مورد استفاده در روش اجزای محدود در کلیات مشابه یکدیگرند، ولی در جزئیات متفاوت هستند. با استفاده از روش بستن ترک مجازی¹ دو مرحله‌ای می‌توان 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 مرحله‌ای نمونه تیر یک سرگیردار دولبه نامتقارن⁴ برای محاسبه نرخ رها سازی انرژی کرنشی در حالت‌های مختلف مود ترکیبی⁵ استفاده کرده‌اند [10]. ساندارامان و دیویدسون چقرمگی شکست⁶ بین لایه‌های را به روش اجزای محدود برای تیر یک سرگیردار دولبه نامتقارن محاسبه کردند [11]. گائو و ویتمن مدل سازی اجزای محدود تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس⁷ را برای محاسبه چقرمگی شکست مود ترکیبی با استفاده از توابع گرین⁸ برای تیرهای یک سرگیردار 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 مرحله‌ای برای تیر یک سرگیردار دولبه نامتقارن پیشنهاد دادند [13]. حیدری رازانی و شکرپه تأثیر انحنای پیشانی ترک بر نرخ رها سازی انرژی کرنشی در تیر یک سرگیردار دولبه متقارن⁹ تک‌جهته کامپوزیتی را بررسی کردند [14]. شکرپه و زین‌الدینی روش چیدمان معادل برای تخمین شروع جدایش در تیر یک سرگیردار دولبه نامتقارن کامپوزیت لایه‌ای را ارائه کردند [15]. کریمان‌مقدم و همکاران بررسی تجربی و عددی رشد ترک در اتصال چسبی دو صفحه کامپوزیتی متقارن با الیاف شیشه تک‌جهته 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 سازه‌های بدین شکل قابل استفاده باشد. آزمایش‌هایی که در این پژوهش انجام شده برای محاسبه انرژی کرنشی مود خالص اول بین دو ماده از جنس‌های 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 وینیل‌استر با استفاده از نتایج تجربی محاسبه شده است. در پایان با استفاده از روش اجزای محدود بستن ترک مجازی دو مرحله‌ای و به کمک نرم‌افزار آباکوس¹⁰ مدل سازی نمونه تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس در اتصال چسبی صورت گرفته است [9]. خروجی‌های نرم‌افزار 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 می‌نماید. به این ترتیب در این پژوهش برای اولین بار روش محاسبه ضخامت لایه‌های کامپوزیت‌های 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 (ADCDB)

⁵ Mixed Mode

⁶ Fracture Toughness

⁷ Unlike Double Cantilever Beam (UDCB)

⁸ Green Functions

⁹ Double Cantilever Beam (DCB)

¹⁰ ABAQUS

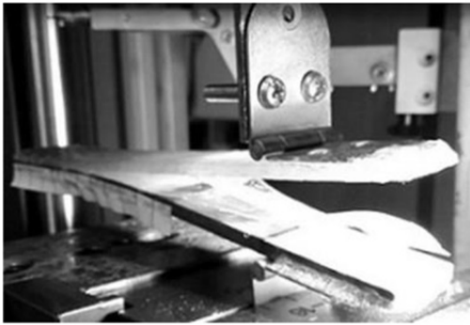


Fig. 6 Tensile test of UDCB sample

شکل 6 تست کشش نمونه تیر یک سرگردار دولبه ناهمجنس

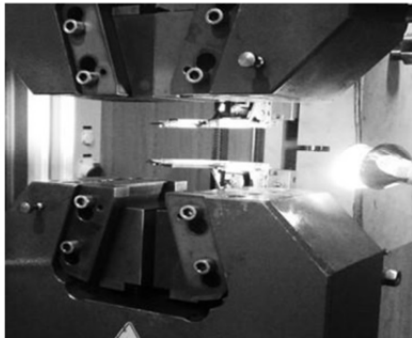


Fig. 7 Tensile testing machine of model ZWICK/Z250 and the extensometer

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)

Table 1 Mechanical properties of composite (unidirectional glass fiber /Vinylester resin)

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

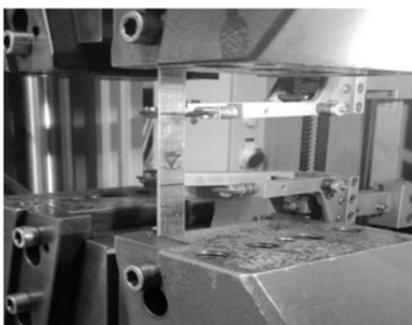


Fig. 8 Tensile test of GFRP samples in the fiber direction

شکل 8 تست کشش نمونه کامپوزیتی در جهت الیاف تک جهته

شده است.

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

در رابطه (1) 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 سرگردار دولبه ناهمجنس تخمین زد. ضخامت تمام نمونه های پلی وینیل کلراید سخت برای ساخت نمونه تیر یک سرگردار 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 سرگردار 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 سیانو اکریلات¹ در دو طرف نمونه چسبیده شده اند، استفاده شده است (شکل 6). در نمونه تیر یک سرگردار 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.

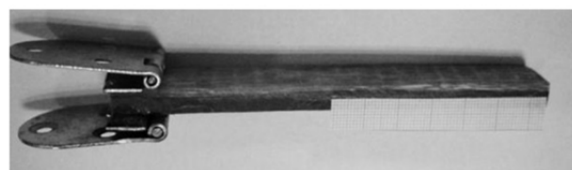


Fig. 5 UDCB sample of GFRP/PVCU

شکل 5 نمونه تیر یک سرگردار 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 نمونه‌های پلی‌وینیل کلراید سخت با استفاده از دستگاه برش لیزر

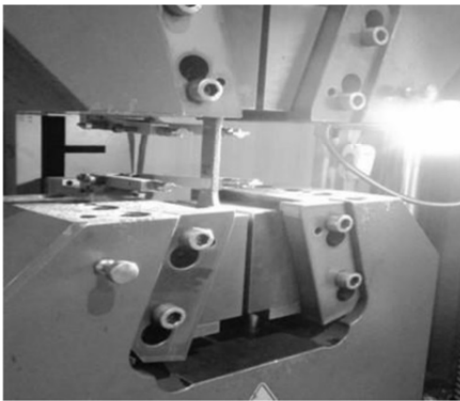


Fig. 12 Tensile test of PVCU Sample

شکل 12 تست کشش نمونه پلی‌وینیل کلراید سخت

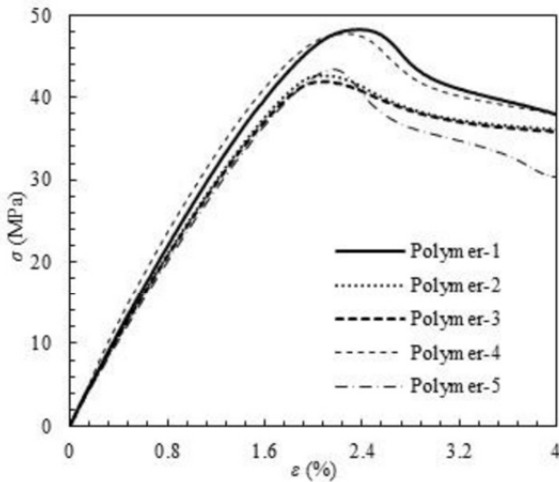


Fig. 13 The stress-strain diagram of the PVCU samples

شکل 13 نمودار تنش-کرنش نمونه‌های پلی‌وینیل کلراید سخت

عرض 2.5 سانتی‌متر و با یک ضخامت ثابت از لایه کامپوزیت با الیاف شیشه تک‌جهته و رزین وینیل استر برش داده می‌شود. 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 تک‌جهته در لایه کامپوزیتی طبق استاندارد ASTM-D2584، برابر با 54% است.

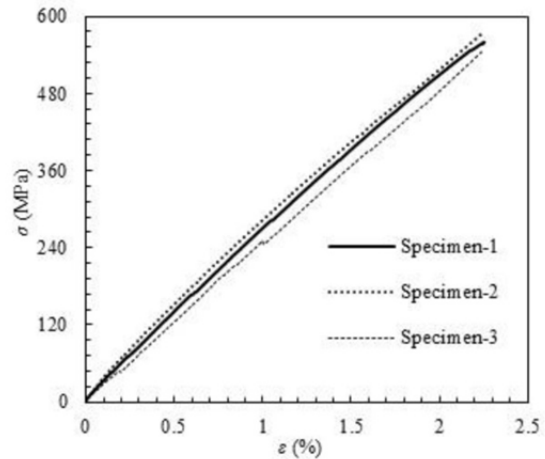


Fig. 9 The stress-strain diagram of GFRP samples in the unidirectional fiber direction

شکل 9 نمودار تنش-کرنش نمونه‌های کامپوزیتی در جهت الیاف تک‌جهته

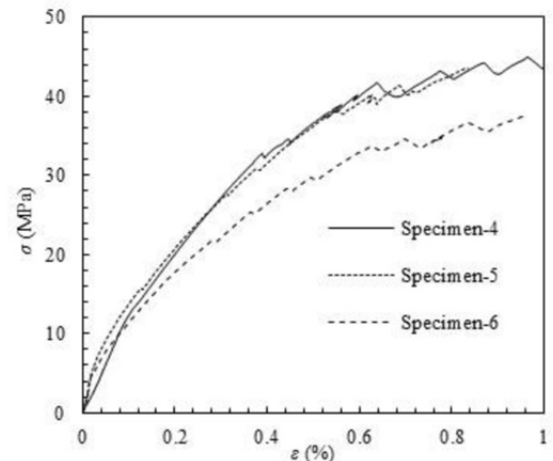


Fig. 10 The stress-strain diagram of GFRP samples in the transverse direction of unidirectional fiber

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

استفاده شده است. آزمون کشش پلی‌وینیل کلراید سخت به صورت جابه‌جایی کنترل با نرخ جابه‌جایی عمودی ثابت 5 میلی‌متر بر دقیقه انجام می‌شود. تعداد 5 نمونه پلی‌وینیل 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 نمونه‌های فوق با آستون، خواص مکانیکی آن‌ها از تست کشش محاسبه شده‌اند (شکل 12). نمودار تنش-کرنش برای 5 نمونه پلی‌وینیل کلراید سخت در شکل 13 و نتایج حاصل از تست کشش برای تعیین خواص مکانیکی پلی‌وینیل کلراید سخت در جدول 2 نشان داده شده است.

برای اندازه‌گیری درصد الیاف لایه کامپوزیت، طبق استاندارد ASTM-D2584، نمونه‌هایی با وزن با تقریب 5 گرم، طول 2.5 سانتی‌متر،

جدول 2 خواص مکانیکی پلی‌وینیل کلراید سخت

Table 2 Mechanical properties of PVCU

ν	E (GPa)
0.4	2.456

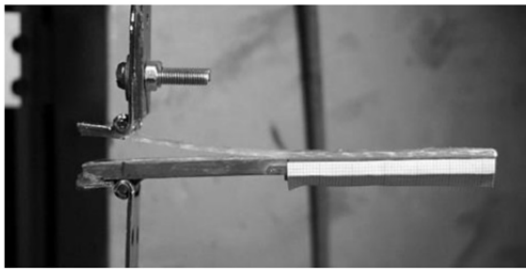


Fig. 15 UDCB sample

شکل 15 نمونه تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس

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 نمونه‌ها به صورت جابه‌جایی کنترل با نرخ جابه‌جایی عمودی ثابت 2 میلی‌متر بر دقیقه به تیر پایینی وارد می‌شود که از جنس ترموپلاستیک است. میزان جابه‌جایی و بار اعمال شده بر هر نمونه توسط دوربین و دستگاه کشش به صورت پیوسته ثبت می‌شود. از دوربین فیلم‌برداری دیجیتال SONY مدل NEX-5T با کیفیت فیلم‌برداری 60 فریم بر ثانیه برای ثبت لحظه بازشدگی و مسیر رشد ترک استفاده شده است.

3-2- دستگاه آزمون کشش

برای انجام آزمایش‌ها 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 میلی‌متر بر دقیقه است. این دستگاه مجهز به دو نیروسنج 2 و 250 کیلونیوتنی است. برای انجام آزمایش کشش به دلیل کم بودن نیروی اعمالی از نیروسنج 2 کیلونیوتنی استفاده شده است. نمونه‌ها با سرعت 2 میلی‌متر بر دقیقه تحت بارگذاری به صورت جابه‌جایی کنترل قرار گرفته‌اند. شکل 15 نمونه تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس تحت بارگذاری بازشدگی به وسیله این دستگاه را نشان می‌دهد.

3- روش‌های محاسبه نرخ رهاسازی انرژی کرنشی

در این بخش دو روش محاسبه نرخ رهاسازی انرژی کرنشی در مود اول شکست براساس استاندارد ASTM-D5528 ارائه شده است. این دو روش به ترتیب با نام‌های تیر اصلاح شده و کالیبره کردن نرمی¹ معرفی می‌شوند [17].

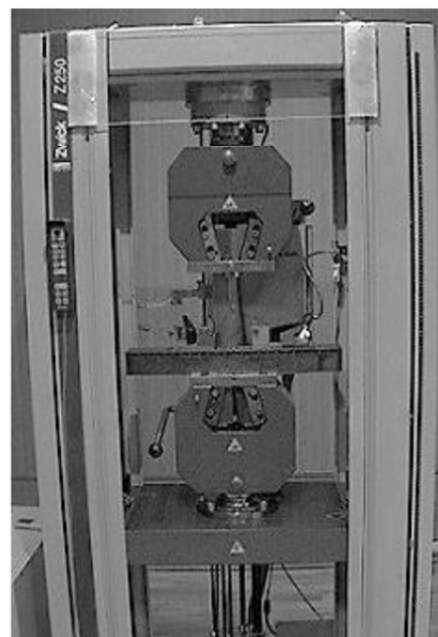


Fig. 14 Tensile test machine ZWICK/Z250

شکل 14 دستگاه تست کشش زوئیک-250

3-1- روش تیر اصلاح شده

این روش برای محاسبه انرژی شکست مورد استفاده قرار گرفته است و مطمئن‌ترین مقدار انرژی شکست را در بیش از 80% نمونه‌ها محاسبه می‌کند [17]. در مکانیک شکست این روش برای محاسبه نرخ رهاسازی انرژی کرنشی اولیه بحرانی (G_{IC}) و منحنی مقاومت جسم در برابر رشد ترک² پیشنهاد شده است [17].

رابطه (3) نرخ رهاسازی انرژی کرنشی در روش تیر اصلاح شده برای تیر یک سرگیردار متقارن را نشان می‌دهد [17].

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

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

در این روش به دلیل این‌که امکان چرخش تیر در حین بارگذاری وجود دارد، نرخ رهاسازی 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 جابه‌جایی کنترل و شعاع انحنای مساوی است؛ بنابراین باید ضریبی پیدا کرد که رابطه بین ممان خمشی و انحنای تیرهای ناهمجنس را مشخص کند. رابطه (5) نرخ رهاسازی انرژی کرنشی در روش تیر اصلاح شده را برای یک تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس نشان می‌دهد.

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

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

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

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

نرخ رهاسازی انرژی کرنشی در روش تیر اصلاح شده برای تیر یک سرگیردار 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 رهاسازی انرژی کرنشی برای تیر یک سرگیردار 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)

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

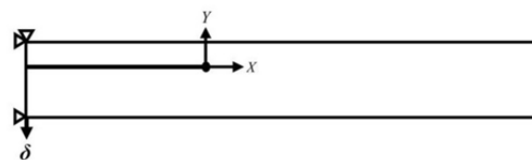


Fig. 16 Boundary conditions of UDCB model in ABAQUS

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

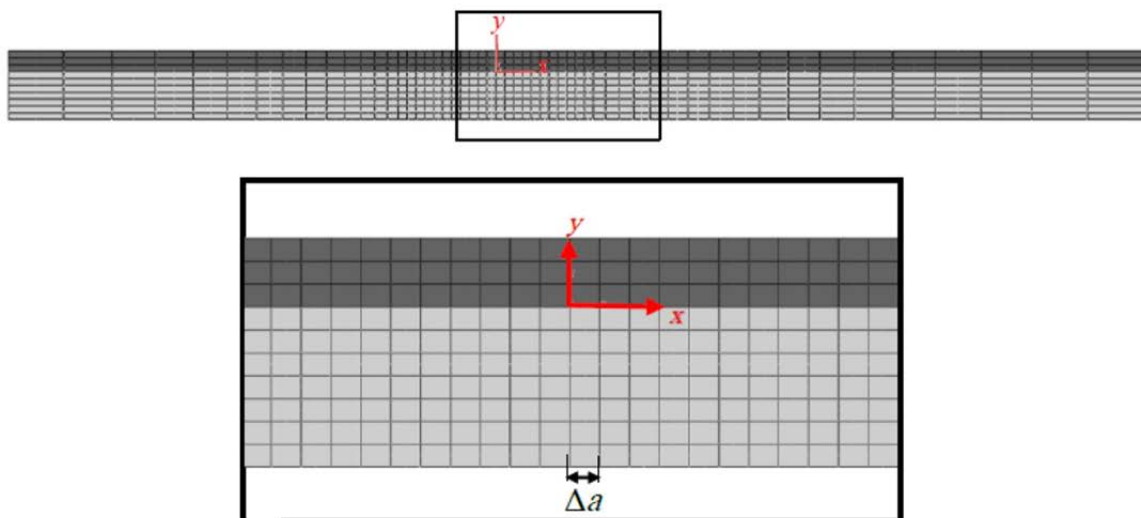


Fig. 17 Mesh size index of UDCB model in ABAQUS

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

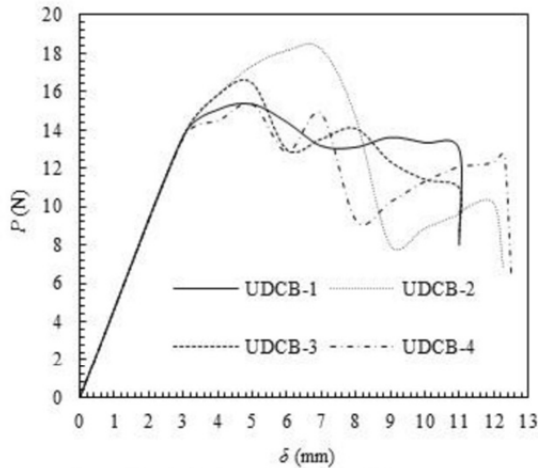


Fig. 18 Experimental load-displacement curves of the UDCB specimens with NCEP25

شکل 18 نمودار نیرو- جابه‌جایی براساس نتایج تجربی نمونه‌های تیر یک سر گیردار دولبه ناهمجنس با پرایمر اپوکسی

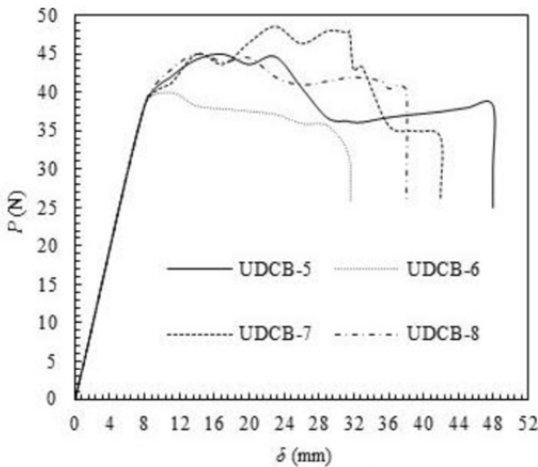


Fig. 19 Experimental load-displacement curves of the UDCB specimens with NCVP209

شکل 19 نمودار نیرو- جابه‌جایی براساس نتایج تجربی نمونه‌های 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 میلی‌متر را نشان می‌دهد.

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 میلی‌متر به کمک مدل سازی المان محدود را نشان می‌دهد.

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

4-4- روش بستن ترک با تحلیل دو مرحله‌ای

ترک در دو تحلیل مجزا به صورت فیزیکی باز و بسته می‌شود. 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 شده‌اند.

5- نتایج

لوله‌های دولبه کامپوزیتی با استری ترموپلاست معمولاً برای سیالات خورنده و در بازه دمایی استفاده می‌شوند که رزین ترموست به تنهایی پاسخگو نیست. اختلاف ضریب انبساط حرارتی بین لایه ترموپلاست و کامپوزیت ترموست باعث می‌شود که در بارگذاری‌های حرارتی و حتی در زمان تولید به دلیل دمای بالای ناشی از فرآیند 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 می‌کند؛ 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 سازه‌ها با استفاده از المان‌های چسبیده 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- جابه‌جایی از نتایج تجربی به دست آمده که نیمه مربوط به پرایمر اپوکسی (شکل 18) و نیم دیگر آن مربوط به پرایمر وینیل استر است (شکل 19). استخراج بار و جابه‌جایی بحرانی در تست‌های پژوهش با استفاده از ثبت زمان فیلم برداری دوربین دیجیتال و آزمون توسط اپراتور می‌شود.

شکل‌های 20 و 21 نمودار ریشه سوم نرمی برحسب طول ترک را به ترتیب برای اتصال پرایمر اپوکسی و وینیل استر نشان می‌دهند. با عبور یک منحنی خطی درجه یک از نقاط حاصل شده می‌توان مقدار طول اصلاح شده ترک مود اول شکست را در روش تیر اصلاح شده محاسبه کرد (جدول 3).

شکل‌های 22 و 23 نمودار لگاریتم نرمی برحسب لگاریتم طول ترک را به ترتیب برای اتصال پرایمر اپوکسی و وینیل استر نشان می‌دهند. از نمودارهای به دست آمده برای محاسبه مقدار n در روش کالیبره کردن نرمی استفاده شده است (رابطه 8).

شکل‌های 24 و 25 نمودار نرخ رها سازی انرژی کرنشی برحسب طول ترک را نشان می‌دهد 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 روش‌های مختلف برای نرخ رها سازی انرژی کرنشی در هر نوع پرایمر به هم نزدیک است.

شکل‌های 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 می‌دهند. با توجه به این شکل‌ها مسیر رشد ترک در این نمونه‌ها بین سطح لایه کامپوزیت و پرایمر اپوکسی رشد می‌کند. سطوح شکست و مسیر رشد ترک برای پرایمر وینیل استر نیز به ترتیب در شکل‌های 28 و 29 نشان داده شده که در آن مسیر رشد ترک بین سطح پلی‌وینیل کلراید سخت و پرایمر وینیل استر است.

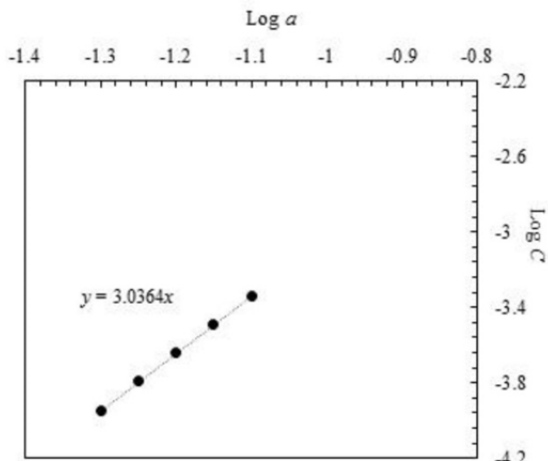


Fig. 23 Experimental Log(C)-Log(a) curve of the UDCB specimen with NCV209

شکل 23 نمودار لگاریتم نرمی-لگاریتم طول ترک براساس نتایج تجربی نمونه‌های تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس با پرایمر وینیل استر

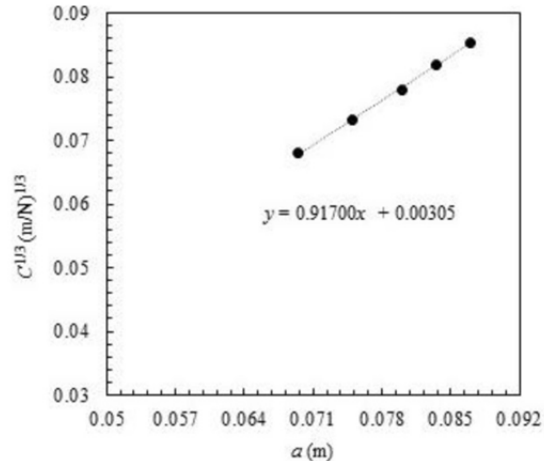


Fig. 20 Experimental cubed root of compliance versus crack length of UDCB specimens with NCEP25

شکل 20 نمودار ریشه سوم نرمی برحسب طول ترک براساس نتایج تجربی نمونه‌های تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس با پرایمر اپوکسی

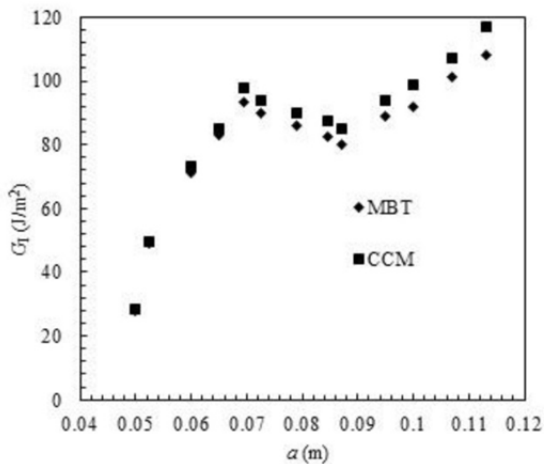


Fig. 24 Experimental R-Curve of the UDCB specimen with NCEP25

شکل 24 منحنی مقاومت ماده براساس نتایج تجربی نمونه‌های تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس با پرایمر اپوکسی

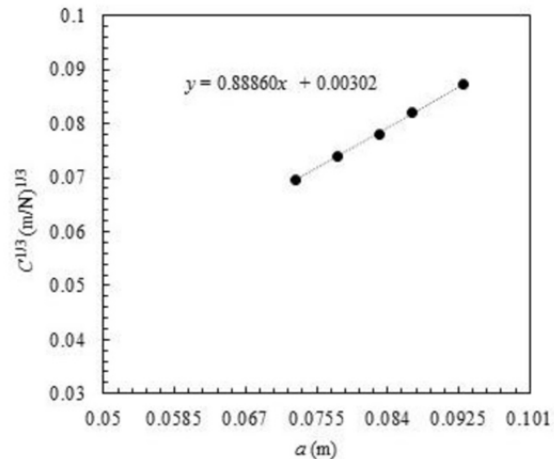


Fig. 21 Experimental cubed root of compliance versus crack length of UDCB specimens with NCV209

شکل 21 نمودار ریشه سوم نرمی برحسب طول ترک براساس نتایج تجربی نمونه‌های تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس با پرایمر وینیل استر

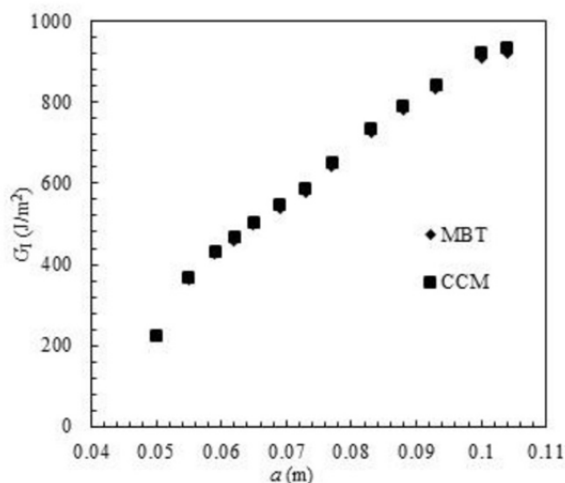


Fig. 25 Experimental R-Curve of the UDCB specimen with NCV209

شکل 25 منحنی مقاومت ماده براساس نتایج تجربی نمونه‌های تیر یک سرگیردار دولبه ناهمجنس با پرایمر وینیل استر

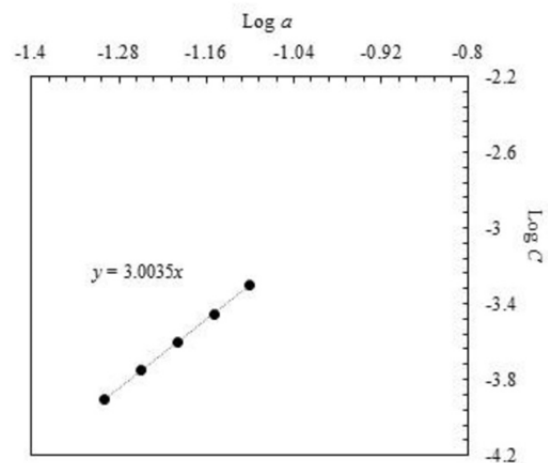


Fig. 22 Experimental Log(C)-Log(a) curve of UDCB specimen with NCEP25

شکل 22 نمودار لگاریتم نرمی-لگاریتم طول ترک براساس نتایج تجربی نمونه‌های تیر یک سرگیردار 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 عددی	درصد خطا (%)
اپوکسی	28.16	28.39	29.97	5.6
وینیل استر	222.42	225.73	215.58	3.9

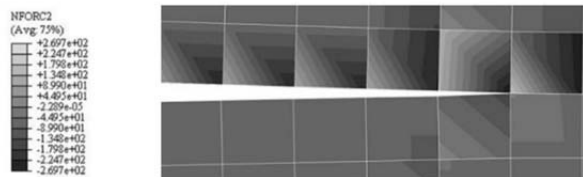


Fig. 30 Crack tip closure for UDCB sample in ABAQUS software

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

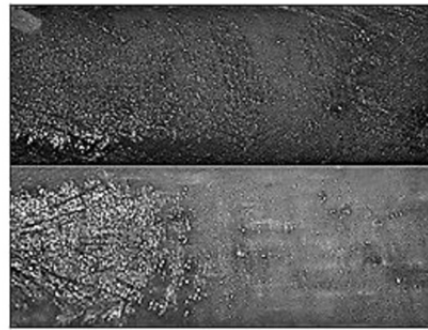


Fig. 26 Failure surfaces of UDCB sample with NCEP25

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

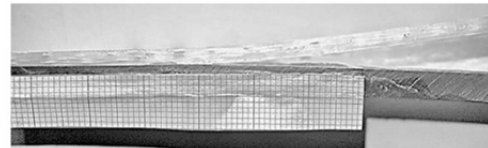


Fig. 27 Crack growth path in the UDCB sample with NCEP25

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

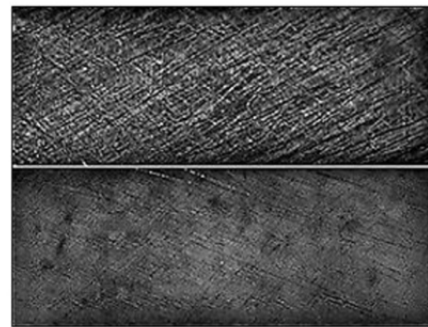


Fig. 28 Failure surfaces of UDCB sample with NCVP209

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

A	سطح مقطع ناحیه دارای ترک (m^2)
b	عرض نمونه تیر یک سرگیردار ناهمجنس (mm)
C	نرمی (mm/N)
E	مدول یانگ (GPa)
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 صدرا که در ساخت نمونه ها و تست آن همکاری ویژه ای داشته اند، قدر دانی 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.

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.

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.

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.

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.

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.

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*