



## Investigating the Crack Propagation at the Surface of the Composite Patch Bonding to the Steel Substrate

### ARTICLE INFO

#### Article Type

Original Research

#### Authors

Maleki S.<sup>1</sup> PhD,  
Andakhshideh A.\*<sup>1</sup> PhD,  
Seyfi A.R.<sup>1</sup> MSc

#### How to cite this article

Maleki S, Andakhshideh A, Seyfi A. R. Investigating the Crack Propagation at the Surface of the Composite Patch Bonding to the Steel Substrate. Modares Mechanical Engineering, 2019;19(8):1897-1906.

### ABSTRACT

One of the applications of composite materials in the oil and gas industry is to repair worn metal pipelines. Calculating the strain energy release rate of the first failure mode is an important criterion for testing the bond strength and predicting the failure of these types of structures. In this paper, the rate of strain energy release during crack growth in bonding a composite patch to a steel substrate is investigated. In this regard, using the theory of elastic beam first, a new method is proposed to calculate the thickness of the metal and composite for Unlike Double Cantilever Beam (UDCB). This is due to the fact that the standard for experimental test procedure of strain energy release rate (ASTM-D5528) is for symmetric double cantilever beams. In this study, samples are fabricated from composite consisting of unidirectional fiberglass/ epoxy resin with harder in the upper and steel in the lower half of the beam. After sample fabrication, the strain energy release rate of UDCB and Asymmetric Unlike Double Cantilever Beam (AUDCB) are calculated experimentally. In addition, for the separation of first and second failure modes in symmetric and asymmetric samples, finite element simulation based on the virtual crack closure technique is presented. This analysis is to qualify the accuracy of the proposed equation for the thickness of unlike beams to achieve the first failure pure mode of symmetric samples. Also, it calculates the contribution of the first and second modes of failure in the strain energy release rate of AUDCB samples.

**Keywords** Composite Repair of Steel Structures; Unlike Double Cantilever Beam; Strain Energy Release Rate; Virtual Crack Closure Technique; Crack Growth

<sup>1</sup>Mechanical Engineering Department, Engineering Faculty, Quchan University of Technology, Quchan, Iran

#### \*Correspondence

Address: Quchan University of Technology, 5th kilometer road of Mashhad-Quchan road, Quchan, Khorasan Razavi Province, Iran. Post Address: 9477167335  
Phone: +98 (51) 47344001  
Fax: +98 (51) 47343001  
a.andakhshideh@qiet.ac.ir

#### Article History

Received: August 27, 2018  
Accepted: January 26, 2019  
ePublished: August 12, 2019

### CITATION LINKS

- [1] Failure analysis of composite repaired pipelines with an inclined crack under static internal pressure [2] Failure analysis of ( $\pm 55^\circ$ )3 filament wound composite pipes with an inclined surface crack under static internal pressure [3] Extending onshore pipeline repair to offshore steel risers with carbon-fiber reinforced composites [4] Experimental determination of fracture toughness for adhesively bonded composite joints [5] Fatigue crack growth behavior of bonded aluminum joints [6] A new approach for determining the R-curve in DCB tests without optical measurements [7] Cohesive laws of composite bonded joints under mode I loading [8] Mixed-mode cohesive fracture of adhesive joints: Experimental and numerical studies [9] A combined experimental/numerical study of the scaling effects on mode I delamination of GFRP [10] Dynamic mixed-mode fracture of bonded composite joints for automotive crashworthiness [11] Fracture toughness of a structural adhesive under mixed mode loadings [12] Effects of aluminum surface treatments on the interfacial fracture toughness of carbon-fiber aluminum laminates [13] Analysis of a mixed mode fracture specimen: The asymmetric double cantilever beam [14] Theoretical and experimental analysis of carbon epoxy asymmetric dcb specimens to characterize mixed mode fracture toughness [15] A novel method for calculation of strain energy release rate of asymmetric double cantilever laminated composite beams [16] Stress analysis of steel/carbon composite double lap shear joints under tensile loading [17] Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites [18] Theory and analysis of elastic plates and shells [19] Fracture mechanic analysis in adhesive composite/aluminum joints [20] Experimental and numerical investigation of crack growth in adhesive bonding of two composite plates under mode I [21] Virtual crack closure technique: History, approach, and applications

## بررسی انتشار ترک بین‌لایه‌ای در سطح اتصال وصله کامپوزیتی به زیر لایه فولادی

ستار مالکی PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

عطیه اندخشیده\* PhD

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

علیرضا سیفی MSc

گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه صنعتی قوچان، قوچان، ایران

### چکیده

یکی از کاربردهای مواد کامپوزیتی در صنعت نفت و گاز، استفاده از این مواد برای تعمیر خطوط لوله فلزی فرسوده است. محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی مود اول شکست، معیار مهمی در بررسی مقاومت اتصال و پیش‌بینی خرابی این نوع سازه‌ها است. در این مقاله، نرخ رهایی انرژی کرنشی حین رشد ترک در اتصال وصله کامپوزیتی به زیر لایه فولادی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا ابتدا با استفاده از تئوری تیر الاستیک، روشی نوین برای محاسبه ضخامت فلز و کامپوزیت برای داشتن نمونه‌های یک‌سرگردار متقارن ناهمجنس (UDCB) ارائه می‌شود. این امر به این دلیل صورت می‌گیرد که استاندارد آزمون تجربی نرخ رهایی انرژی کرنشی (ASTM-D5528)، برای نمونه‌های تیر یک‌سرگردار متقارن است. نمونه‌های ساخته‌شده در این پژوهش شامل کامپوزیت ساخته‌شده از الیاف شیشه تک‌جهته، رزین اپوکسی به‌همراه سخت‌کننده در نیمه بالایی و فولاد در نیمه پایینی تیر است. پس از نمونه‌سازی، نرخ رهایی انرژی کرنشی شکست نمونه‌های تیر یک‌سرگردار دولبه متقارن و نامتقارن، به‌صورت تجربی محاسبه می‌شود. علاوه بر این برای تفکیک مود یک و دوی شکست در نمونه‌های متقارن و نامتقارن، مدل‌سازی المان محدود به‌روش بستن ترک مجازی صورت می‌گیرد. این تحلیل، صحت رابطه ارائه‌شده برای ضخامت لایه‌ها در تیرهای ناهمجنس برای رسیدن به مود یک خالص شکست در نمونه‌های متقارن را مورد آزمون قرار داده و تایید می‌کند. همچنین سهم مود اول و دوم شکست را در نرخ رهایی انرژی کرنشی کل نمونه‌های نامتقارن تعیین می‌نماید.

**کلیدواژه‌ها:** ترمیم کامپوزیتی سازه‌های فولادی، تیر یک‌سرگردار دولبه ناهمجنس، نرخ رهایی انرژی کرنشی، روش بستن ترک مجازی، رشد ترک

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۶/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۱۱/۰۶

\*نویسنده مسئول: a.andakhshideh@qiet.ac.ir

اتصالات و نحوه انتشار ترک در اتصال فلز به چندلایه کامپوزیتی صورت گیرد.

بسیاری از سازه‌های دریایی و کشتی‌ها در طول عمر خود آسیب‌های ناشی از خستگی و خوردگی را تجربه می‌کنند. به‌طور معمول این سازه‌ها با جوش تعمیر می‌شوند. تعمیرات جوش‌داده‌شده شامل کارگرم است و می‌تواند باعث آتش‌سوزی شود. همچنین ممکن است روی قسمت‌های حساس به حرارت، نزدیک به ناحیه تعمیرات اثر بگذارد. علاوه بر این، جوش ممکن است باعث تغییر شکل ساختار فلز شود. از این رو، روش‌های استفاده از تعمیر سرد رواج یافته است. ترمیم اتصالات با کامپوزیت، یک روش تعمیر سرد برای ساختار آسیب‌دیده مانند قسمت‌های آسیب‌دیده لوله فولادی است. این روش برای ترمیم کشتی‌هایی که ساختار فلزی آنها دچار خوردگی شده، استفاده شده است. الیاف تقویت‌شده با پلیمر برای تعمیرات یا تقویت لوله‌های حاوی سیال مناسب هستند. زیرا آنها دارای سختی بالا و مقاومت بالا نسبت به خوردگی هستند [1]. تجزیه و تحلیل شکست لوله تقویت‌شده با الیاف شیشه حاوی ترک و تحت فشار داخلی توسط آریکان [2] انجام گرفت. نتیجه این پژوهش نشان داد که رشد ترک در مود دو شکست رخ می‌دهد. همچنین آریکان خاطر نشان کرد که فاکتور شدت تنش بحرانی باید در حالت مود ترکیبی شکست، به‌منظور بررسی شکست لوله حاوی ترک تعیین شود [2]. الکساندر و اوچو [3] یک سیستم ترمیم کامپوزیتی جدید برای ترمیم لوله‌های فولادی ارائه دادند که در آن از الیاف تک‌جهته برای تقویت لوله استفاده شده بود. همچنین آنها یک فرمول برای محاسبه ضخامت لازم برای کامپوزیت، برای پیچیدن دور لوله فولادی بسته به استحکام کششی نهایی لوله فولادی و کامپوزیت مورد استفاده، در عملیات ترمیم ارائه کردند. به این ترتیب، روشی تحلیلی و تجربی برای ارزیابی یکپارچگی ترمیم کامپوزیت ارائه نمودند. سیستم ترمیم کامپوزیتی که آنها برای ترمیم لوله فولادی استفاده کردند، کربن/اپوکسی بود. آنها همچنین ترمیم لوله‌های فولادی تحت فشار داخلی و نیروی محوری را بررسی کردند. در این بررسی از الیاف شیشه تقویت‌شده با پلیمر برای ترمیم لوله‌های فولادی تحت فشار داخلی استفاده شد. آنها به این نتیجه رسیدند که طراحی بهینه برای ترمیم لوله‌های فلزی با کامپوزیت، به جهت گیری الیاف کامپوزیت بستگی دارد [3].

پیش‌بینی پارامترهای شکست مانند انتگرال  $I$ ، فاکتور شدت تنش، چقرمگی شکست و نرخ انرژی کرنشی بحرانی شکست، یکی از مهم‌ترین جنبه‌های طراحی ترمیم کامپوزیتی است. اگر لوله‌های فولادی در معرض آسیب‌های جزئی باشد، استفاده از سیستم ترمیم کامپوزیتی می‌تواند گسترش این آسیب را کاهش دهد. سنتیل و همکاران [4] چقرمگی شکست اتصالات چسبی کامپوزیتی را برای سه حالت مود یک، دو و سه با نمونه تیر یک‌سرگردار دولبه متقارن (DCB)، نمونه خمشی انتها ترک‌دار (ENF) و نمونه پیچشی انتها ترک‌دار (ECT) به‌صورت تجربی تعیین کردند. در این مقاله، نمونه‌ها با چسب‌های اپوکسی در دمای اتاق، متصل و از روش نشر آوایی نیز برای تعیین چقرمگی شکست در اتصالات، بهره گرفته شد. نتایج آنها نشان داد که سیگنال‌های آکوستیک همبستگی خوبی با رفتار بار-جابجایی برای تعیین مرحله شروع شکست به‌خصوص در بارگذاری مود دو دارد. کامپوس و همکاران [5] به‌صورت تجربی و عددی، مطالعات خود را روی رفتار رشد ترک خستگی در اتصالات آلومینیومی با آلیاژ T6-۶۰۶۱-۶۵۱ انجام دادند. آنها در آزمایش‌های خود از نمونه‌های یک‌سرگردار دولبه و

### ۱- مقدمه

یکی از روش‌هایی که در سال‌های اخیر برای ترمیم خطوط لوله فلزی تخریب‌شده مورد توجه صنعتگران و محققان قرار گرفته، ترمیم این خطوط فرسوده فلزی با چندلایه‌های کامپوزیتی است. در مواردی که امکان تعویض خطوط لوله فلزی خورده‌شده به‌صورت موضعی یا کامل وجود ندارد، ترمیم خطوط لوله فلزی با کامپوزیت یک راه‌حل کارآمد است. در مقایسه با روش‌های معمول مانند جوشکاری، برش و تعویض لوله‌ها، روش فوق از مزایایی مانند ایمنی، وزن پایین، سهولت در نصب، طول عمر بالا و هزینه تمام‌شده پایین‌تر برخوردار است. ترمیم لوله‌های فلزی با کامپوزیت‌ها، در سطح خارجی لوله، بسته به شرایط تخریب لوله قابل انجام است. البته برای سایزهای نسبتاً بزرگ لوله، ترمیم کامپوزیتی در سطح داخلی لوله نیز صورت می‌گیرد. عطف به اینکه اغلب واماندگی‌های به‌وقوع‌پیوسته در مورد ترمیم کامپوزیتی سازه‌های فلزی بالاخص لوله و مخازن تحت فشار، مربوط به ایجاد و رشد ترک بین‌لایه‌ای در سطح مشترک کامپوزیت و فلز است. لذا ضروری است که بررسی دقیق‌تری در زمینه عوامل شکست این

مولون و همکاران<sup>[14]</sup> به صورت تجربی و عددی، نرخ رهایی انرژی کرنشی تیر یک‌سرگردار دولبه نامتقارن کامپوزیتی را محاسبه کردند. در این پژوهش از روش تئوری تیرها برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی کل و از فرمول تجربی ارائه شده، برای به دست آوردن نرخ رهایی انرژی کرنشی مود یک و دو استفاده شد. شکریه و زین‌الدینی<sup>[15]</sup> به صورت تجربی و عددی، نرخ رهایی انرژی کرنشی نمونه یک‌سرگردار دولبه نامتقارن کامپوزیتی را به دست آوردند. آنها برای این منظور، روش جدید تئوری تیر الاستیک اصلاح شده را ارائه و برای تفکیک مود ترکیبی از روش بستن ترک مجازی استفاده کردند. در این مطالعه، نمونه‌های کامپوزیتی ساخته شده از ۱۸ لایه با الیاف تک‌جهته و جدایش بین‌لایه  $\theta//\emptyset$  به کار رفت. نتایج تست تجربی با استفاده از روش تئوری تیر اصلاح شده با نتایج عددی، مقایسه و دقت مطلوبی از روش فوق حاصل شد.

در سال‌های اخیر، بررسی تجربی شکست در اتصال برشی دولبه فلز/کامپوزیت در مقاله یحیی و هاشم<sup>[16]</sup> صورت گرفت. در این مقاله، هدف، بررسی انرژی کرنشی بحرانی در مود یک و دو شکست برای لایه چسب واسط بین فلز و کامپوزیت بود. آنها به بررسی تست‌های نیرو-جابجایی و رشد ترک در اتصال فوق پرداختند و سطوح شکست، مناطق آغازین ایجاد ترک در اتصال و مسیر رشد ترک را دنبال کردند. همچنین به بررسی تاثیر طول اتصال و لایه چینی کامپوزیت در اتصال برشی دولبه فلز/کامپوزیت بر میزان تنش حداکثر عمودی و برشی در لایه چسب واسط پرداخته و در ادامه، تحلیل المان محدود نمونه را به روش مدل ناحیه چسبنده انجام دادند. نتایج این مقاله نشان داد که دو مکانیزم برای شروع و رشد ترک در اتصال برشی دولبه فلز/کامپوزیت وجود دارد که یکی شامل شکست در چسب و دیگری شامل جدایش بین‌لایه‌ای در کامپوزیت است.

در این پژوهش، هدف، محاسبه تجربی نرخ رهایی انرژی کرنشی مود اول شکست ( $G_I$ ) در اتصال وصله کامپوزیتی به زیر لایه فولادی است که کاربرد فراوانی در ترمیم خطوط لوله فلزی فرسوده دارد. استاندارد تست تجربی نرخ رهایی انرژی کرنشی مود اول شکست، ASTM-D5528<sup>[17]</sup> است. این استاندارد برای نمونه‌های تیر یک‌سرگردار همجنس است که در آن هدف، محاسبه  $G_I$  خالص برای رشد ترک بین‌لایه‌ای در نمونه‌ای بوده که بالا و پایین ترک از جنس مشابه باشد، لذا ضخامت تیرها در دو سمت ترک یکسان است. این نمونه هم به لحاظ هندسی و هم به لحاظ انحنای خمشی در دو سمت ترک مشابه است. اما در نمونه ناهمجنس، وقتی نمونه با ضخامت برابر از دو جنس متفاوت ساخته شود، علی‌رغم اینکه به لحاظ هندسی تقارن وجود دارد، ولی به لحاظ انحنای خمشی، تیر بالا و پایین متفاوت است و این باعث خواهد شد که مود ترکیبی بازشوندگی و برشی همزمان در رشد ترک ایجاد شوند و نرخ رهایی انرژی کرنشی حاصل مود اول خالص،  $G_I$  نباشد. لذا نیاز به ارائه اصلاحاتی در ضخامت نمونه جاری بوده که ناهمجنس و در نتیجه نامتقارن است. به این منظور، ابتدا رابطه نوینی برای محاسبه ضخامت هر یک از دو لایه کامپوزیت و فولاد ارائه می‌شود. سپس نمونه‌های ساخته شده که شامل کامپوزیت متشکل از الیاف شیشه تک‌جهته/رزین اپوکسی در نیمه بالایی و فولاد در نیمه پایینی تیر است، به صورت تجربی تست می‌شوند.

برای بررسی صحت نتایج تست، مدل‌سازی عددی المان محدود به روش بستن ترک مجازی نیز صورت می‌گیرد و به کمک آن، تفکیک نرخ رهایی انرژی کرنشی کل به هر یک از دو مود شکست

نمونه‌های خمشی انتها‌ترک‌دار استفاده کردند. چسب مورد استفاده در پژوهش آنها، آردایت ۲۰۱۵ بود. در این مقاله، علاوه بر نرخ رشد ترک خستگی یکنواخت، رفتار شکست شبه‌استاتیک اتصالات چسب نیز برای هر دو شرایط بارگذاری بررسی شد. نتایج تجربی آنها تطابق خوبی با قانون پاريس اصلاح شده داشت. دی‌گراسیا و همکاران<sup>[6]</sup> به صورت عددی، روش جدیدی برای به دست آوردن نقطه به نقطه منحنی مقاومت با استفاده از آزمون تیر یک‌سرگردار دولبه ارائه کردند. دیاس و همکاران<sup>[7]</sup> به صورت تجربی و عددی، یک روش مستقیم برای به دست آوردن رابطه چسب (رابطه بین جابه‌جایی و انرژی کرنشی مود یک شکست) اتصالات کربن/اپوکسی تحت بارگذاری مود یک شکست در نمونه تیر یک‌سرگردار دولبه ارائه کردند. روش فوق، مستلزم یافتن رابطه بین نرخ رهایی انرژی کرنشی و بازشوندگی نوک ترک در طول آزمون است. چوپانی<sup>[8]</sup> پارامترهای شکست اتصال چسبی کامپوزیت ساخته شده از الیاف کربن و فلز (آلومینیوم/فولاد) تحت بارگذاری مود یک، دو و ترکیبی را بررسی کردند. وی منحنی مقاومت در برابر رشد ترک نمونه‌ها را به روش آزمایشگاهی محاسبه نمود و سپس مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی به دست آمده از نتایج تجربی را با نتایج حل عددی حاصل از دو روش بستن ترک مجازی و روش انتگرال / مقایسه نمود. هدف اصلی این پژوهش، بررسی سطوح شکست، چقرمگی شکست و رابطه چقرمگی شکست با فاکتور شدت تنش در مود ترکیبی شکست اتصال چسبی بود.

دهقان‌منشادی و همکاران<sup>[9]</sup> به صورت تجربی و عددی، اثر پل‌زدن الیاف در مواد کامپوزیتی را در نمونه تیر یک‌سرگردار دولبه بررسی کردند. در این پژوهش، از روشی نیمه‌تجربی برای تعیین اثر ضخامت در نرخ رهایی انرژی کرنشی نمونه تیر یک‌سرگردار دولبه کامپوزیتی شامل الیاف شیشه تک‌جهته و رزین پلیمری در مود اول شکست، استفاده شد. پلیت<sup>[10]</sup> به بررسی مود اول، دوم، سوم و همچنین مود ترکیبی شکست در قطعات خودرویی شامل اتصالات چسبی کامپوزیتی تحت انواع بارگذاری‌های استاتیک و دینامیک پرداخت. داسیلوا و همکاران<sup>[11]</sup>، چقرمگی شکست اتصالات فولاد/چسب/فولاد تحت بارگذاری مود یک، دو و مود ترکیبی شکست را به صورت تجربی تعیین کردند. در این مقاله، از نمونه تیر یک‌سرگردار دولبه نامتقارن مخروطی، تیر یک‌سرگردار دولبه متقارن، تیر یک‌سرگردار دولبه نامتقارن (ADCB)، تیر خمشی انتها‌ترک‌دار استفاده شد. برای به دست آوردن نرخ رهایی انرژی کرنشی مود یک از نمونه تیر یک‌سرگردار دولبه و برای مود دو از نمونه خمشی انتها‌ترک‌دار استفاده شد. زمانی‌زکریا و همکاران<sup>[12]</sup> به صورت تجربی و عددی، اثر بهبود سطح آلومینیوم را در جدایش بین‌لایه‌ای کامپوزیت الیاف کربن و آلومینیوم مطالعه کردند. آنها تست‌ها را در حالتی که برای بهبود سطح از اسید، باز و همزمان از هر دو استفاده شده است، انجام دادند. در نمودار نیرو-جابجایی به دست آمده از آزمون تجربی، وقتی برای بهبود سطح، از اسید و باز به طور همزمان استفاده شود، ماکزیمم نیرو بیشتر از زمانی است که از اسید و باز به طور جداگانه استفاده شود. در این مقاله، از نظریه صفحه‌ها برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی، استفاده و با روش کالیبراسیون نرمی مقایسه شده است.

ژائو و همکاران<sup>[13]</sup> به صورت تجربی از تیر یک‌سرگردار دولبه نامتقارن برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست بین‌لایه‌ای مواد پلیمر/پلیمر و پلیمر/غیر پلیمر استفاده کردند. آنها نرخ رهایی انرژی کرنشی کل را با استفاده از روش تئوری تیرها و براساس مدل تیر کایننر در بستر الاستیک محاسبه کردند.

کامپوزیت در جهت یک (راستای طولی نمونه)،  $E_2$ ، مدول الاستیسیته کامپوزیت در جهت دو (راستای عرضی نمونه) و  $\nu_{21}, \nu_{12}$  مدول پواسون کامپوزیت است.

بنابراین همان‌طور که قبلاً نیز گفته شد، در تمام متن به نمونه‌هایی که شرط تشابه انحنای خمشی در آنها اعمال نشده و نسبت ضخامت تیرها با رابطه ۶ محاسبه نشده است، نمونه نامتقارن و به نمونه‌هایی که تیرهای ناهمجنس به لحاظ انحنای خمشی مشابه هستند، نمونه متقارن گفته شده است.

### ۳- روش تحقیق

#### ۳-۱- مراحل ساخت نمونه‌ها

در این پژوهش، نمونه‌های ساخته‌شده برای تست شامل تیر یک‌سرگردار ناهمجنس دولبه متقارن (UDCB) و نامتقارن (AUDCB) هستند. این نمونه‌ها دوجنسی بوده و متشکل از فولاد و کامپوزیت است که ضخامت کامپوزیت در نمونه یک‌سرگردار دولبه متقارن، ۴.۶ میلی‌متر است. این ضخامت با استفاده از برابری انحنای دو تیر بالایی (کامپوزیت) و پایینی (فولاد) با استفاده از رابطه ۶ به دست آمده است. همچنین ضخامت کامپوزیت در نمونه یک‌سرگردار دولبه نامتقارن، ۳ میلی‌متر است. بخش کامپوزیتی نمونه‌ها شامل الیاف شیشه تک‌جهته با رزین اپوکسی و سخت‌کننده بوده که با لایه‌چینی دستی (شکل ۲) تولید شده است و در نمونه‌های متقارن و نامتقارن، به ترتیب ۸ و ۶ لایه دارند. در هر دو نوع نمونه، ضخامت فولاد، ۲ میلی‌متر که برای بهبود سطح اتصال، از سندبلاست SA3، اندازه مش ۸ تا ۱۶ و سایز ۱ تا ۲.۵ میلی‌متر استفاده شده است. قبل از اینکه لایه‌چینی کامپوزیت روی فلز انجام شود، سطح تماس به‌وسیله استون تمیز کاری شده است تا عاری از گرد و خاک باشد. همچنین برای ایجاد ترک اولیه از ورق نجسب ۲۰ میکرومتر استفاده شده است. تیر یک‌سرگردار دولبه با استفاده از دستگاه برش واترجت با فشار ۱۴ امگاپاسکال و با مخلوط ماسه و آب برشکاری شده است.



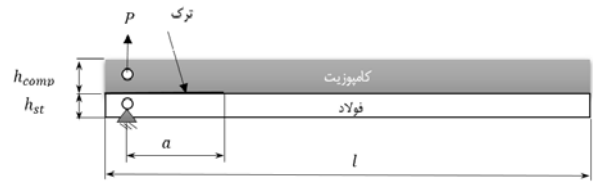
شکل ۲) لایه چینی کامپوزیت روی فولاد

لازم به ذکر است که لایه کامپوزیتی روی زیر لایه فلزی تولید و پخت شده که این امر به این دلیل است که در ترمیم سازه‌های فلزی با کامپوزیت نیز همین فرآیند صورت می‌گیرد. لذا برای انجام فرآیند مشابه عملیات اجرایی، امکان تولید صفحات کامپوزیتی جداگانه و اتصال با چسب یا رزین به زیر لایه فلزی نبوده است. از طرفی، به دلیل اینکه در فرآیند برش‌کاری با واترجت نیاز به فشار بالا نباشد که منجر به جدایش بین لایه کامپوزیت و فلز شود، ابتدا نمونه‌های فلزی برش‌کاری شده، سپس لایه کامپوزیت روی آنها کار شده و با برش واترجت لایه‌های کامپوزیت چیده شده است. به این ترتیب سالم‌ترین اتصال حاصل می‌شود. اما کلیه نمونه‌ها به‌طور

انجام می‌شود. مقایسه نتایج این مدل‌سازی حاکی از دقت خوب رابطه محاسبه ضخامت است که می‌تواند در آینده برای انواع دیگر تیرهای نامتقارن دو جنسی مورد استفاده محققان قرار گیرد.

### ۲- محاسبه ضخامت برای رسیدن به مود اول شکست در تیر یک‌سرگردار دولبه ناهمجنس

در مود یک شکست برای داشتن تیر یک‌سرگردار دولبه متقارن، باید انحنای دو تیر در قسمت بالا و پایین ترک یکسان باشد. لذا در این پژوهش با توجه به دو جنسی بودن نمونه، باید ضخامت‌های تیر کامپوزیتی و فلزی به نسبتی انتخاب شود که دارای انحنای یکسان باشند. شکل ۱، شماتیک نمونه یک‌سرگردار دولبه متقارن را نشان می‌دهد که تیر بالایی کامپوزیتی و تیر پایینی فولادی است.



شکل ۱) شماتیک نمونه یک‌سرگردار دولبه متقارن

مقدار شعاع انحنای تیر فولادی  $\rho_{st}$  و کامپوزیتی  $\rho_{comp}$ ، به ترتیب در روابط ۱ و ۲ ارائه شده است [18].

$$\frac{1}{\rho_{st}} = \frac{M_{st}}{E_{st} I_{st}} \quad (1)$$

$$\kappa_x = \frac{1}{\rho_{comp}} \quad (2)$$

در این روابط،  $M_{st}$  ممان خمشی تیر فولادی،  $E_{st}$  مدول الاستیسیته فولاد،  $I_{st}$  ممان اینرسی دوم سطح تیر فولادی و  $\kappa_x$  انحنای تیر کامپوزیتی است. رابطه منته‌های گشتاور کامپوزیت در رابطه ۳ ارائه شده است [18]:

$$\{M\} = \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} [Q]\{\epsilon_0\} z dz + \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} [Q]\{\kappa\} z^2 dz \quad (3)$$

در رابطه ۳،  $Q$  ماتریس سختی تیر کامپوزیتی است. رابطه ۳، به صورت زیر ساده می‌شود [18]:

$$\{M\} = \sum_{k=1}^N \int_{h_{k-1}}^{h_k} z^2 dz [Q]\{\kappa\} = \quad (4)$$

$$\frac{1}{3} \sum_{k=1}^N (h_k^3 - h_{k-1}^3) [Q]\{\kappa\} = \frac{h_{comp}^3}{12} [Q]\{\kappa\}$$

در نهایت با برابری انحنای دو تیر کامپوزیتی و فلزی و فرض  $M = M_{comp} = M_{st}$  [19]، داریم:

$$\frac{M_{st}}{E_{st} I_{st}} = \frac{12}{h_{comp}^3} Q_{11}^* M_{comp} \quad (5)$$

در رابطه ۵،  $Q_{11}^*$ ، درایه اول ماتریس معکوس  $Q$  است. با جای‌گذاری مقدار  $Q_{11}^*$ ، رابطه محاسبه ضخامت فولاد و کامپوزیت به صورت زیر به دست می‌آید.

$$\frac{h_{comp}}{h_{st}} = \sqrt[3]{\frac{E_{st}(1 - \nu_{21}\nu_{12})E_2}{E_1 E_2 - \nu_{12}^2 E_2^2}} \quad (6)$$

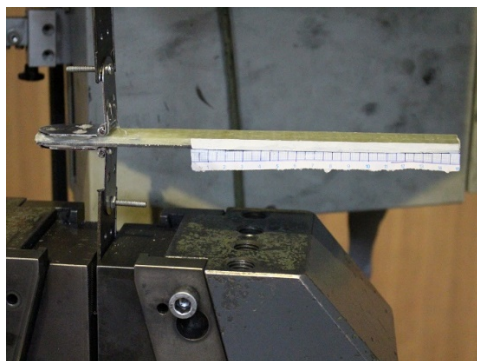
که در آن  $h_{comp}$  ضخامت بازوی کامپوزیتی،  $h_{st}$  ضخامت بازوی فولادی،  $E_{st}$  مدول الاستیسیته فولاد،  $E_1$  مدول الاستیسیته

### ۲-۳- روش انجام آزمون تجربی

آزمون کشش براساس استاندارد ASTM-D5288 [17] با استفاده از دستگاه تست کشش زوئیک-۲۵۰ (Zwick/Z250؛ شکل ۶) با نیروسنج ۲ کیلو نیوتنی با سرعت ۲ میلی‌متر بر دقیقه به صورت کنترل جابه‌جایی در دمای اتاق انجام شده است. شکل ۷ نمونه تیر یک‌سرگردار را در حین تست بازشوندگی مود اول شکست نشان می‌دهد. در تمامی مراحل رشد ترک برای رصد ترک از دوربین Canon EOS 100D استفاده شده است. در تست‌ها برای اندازه‌گیری طول ترک از کاغذ میلی‌متری استفاده شده و دقت در حد میلی‌متر بوده است (شکل ۶). علاوه بر این، ابعاد نمونه نیز به دقت میلی‌متر اندازه‌گیری شده است (شکل ۳).



شکل ۶) دستگاه آزمون کشش زوئیک-۲۵۰



شکل ۷) نمونه یک‌سرگردار ناهمجنس دولبه متقارن تحت آزمون کشش

### ۳-۳- روش محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی مود یک شکست

براساس استاندارد ASTM-D5528، یکی از روش‌های ارائه شده برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی در مود اول شکست، روش تیر اصلاح شده است [17]. در مکانیک شکست، این روش برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی اولیه بحرانی ( $G_{IC}$ ) و منحنی مقاومت جسم در برابر رشد ترک (R-Curve) پیشنهاد شده است [17].

رابطه ۷، نرخ رهایی انرژی کرنشی در روش تیر اصلاح شده برای تیر یک‌سرگردار متقارن را نشان می‌دهد [17]:

$$G = \frac{3S\delta^2}{2ba^4} \quad (7)$$

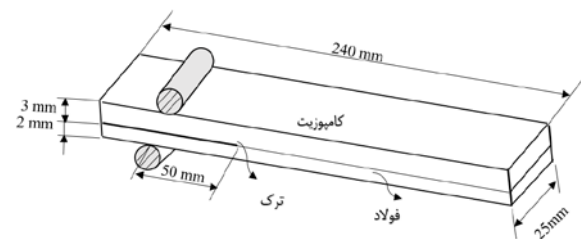
همزمان، در شرایط آزمایشگاهی مشابه، رزین و الیاف یکسان و شرایط پخت مشابه ساخته شده‌اند.

طول نمونه‌ها ۲۴۰ میلی‌متر، عرض نمونه‌ها ۲۵ میلی‌متر و طول ترک اولیه ۵۰ است. برای قرارگرفتن نمونه‌ها داخل فک‌های دستگاه تست کشش، از لولاهایی از جنس فولاد هم‌عرض نمونه‌ها استفاده شده است. شکل‌های ۳ و ۴ به ترتیب نمونه تیر یک‌سرگردار دولبه متقارن ساخته شده و شماتیک تیر یک‌سرگردار دولبه نامتقارن را نشان می‌دهند.

خواص مکانیکی کامپوزیت ساخته شده در پژوهش جاری که شامل الیاف شیشه تک‌جهته و رزین اپوکسی است، طبق جدول ۱ [20] و خواص مکانیکی فولاد از طریق آزمون کشش، طبق استاندارد ASTM-E8 با میانگین‌گرفتن از داده‌های آزمایشگاهی به دست آمده است (نمودار ۱ و جدول ۲). شکل ۵ نمونه فولادی را که برای تست تعیین خواص مکانیکی استفاده شده است، نشان می‌دهد.



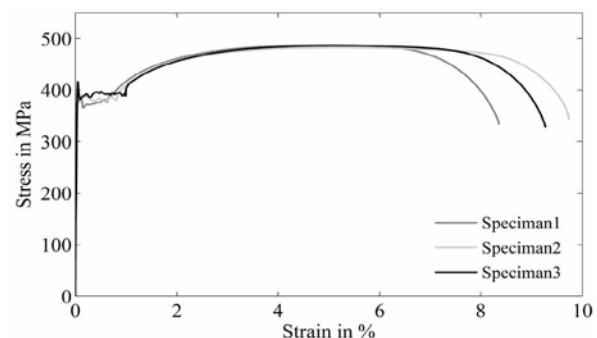
شکل ۳) نمونه یک‌سرگردار دولبه متقارن



شکل ۴) شماتیک نمونه یک‌سرگردار دولبه نامتقارن ناهمجنس

جدول ۱) خواص مکانیکی کامپوزیت (الیاف تک‌جهته شیشه/رزین اپوکسی) [20]

$E_1$ (GPa)	$E_2$ (GPa)	$E_3$ (GPa)	$\nu_{12} = \nu_{23} = \nu_{13}$	$G_{12} = G_{13} = G_{23}$ (GPa)
۳۰	۳	۲	۰.۳	۴



نمودار ۱) منحنی تنش-کرنش نمونه‌های فولادی

جدول ۲) خواص مکانیکی نمونه فولادی

$E_{st}$ (GPa)	$\nu_{st}$
۲۰۸	۰.۳



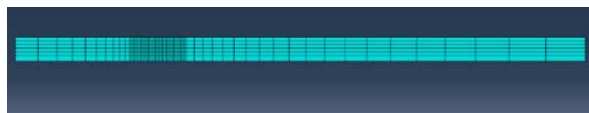
شکل ۵) نمونه فولادی برای تست کشش طبق استاندارد ASTM E8

کشش قرار می‌گیرد. فک بالایی در تمامی جهات ثابت بوده و نیرو به صورت کنترل جابه‌جایی به فک پایینی اعمال می‌شود. فک پایینی در بقیه جهات ثابت است. بنابراین برای مدل‌سازی دقیقاً همین شرایط مرزی در نرم‌افزار المان محدود آباکوس مطابق شکل ۸ پیاده می‌شود.

در این پژوهش، به دلیل بزرگی عرض نمونه نسبت به ضخامت رزین واسط که ترک در آن رشد می‌کند، از مدل المان محدود دوبعدی استفاده شده است که در آن گره‌ها در سطح بالا و پایین ناپیوستگی، مختصات یکسانی دارند. با این حال به یکدیگر متصل نیستند و باعث می‌شوند المان‌های متصل به سطح بالای ترک به‌طور مستقل از گره‌هایی که به سطح پایین متصل شده‌اند، تغییر شکل دهند و ترک باز شود. برای شبکه‌بندی نمونه‌ها از المان‌های کرنش صفحه‌ای چهارگره‌ای (CPE4R) استفاده شده است. شکل ۹، نمایی از شبکه‌بندی نمونه یک‌سرگردار دولبه را در روش بسته‌شدن ترک مجازی نشان می‌دهد.



شکل ۸) شرایط مرزی نمونه‌ها در روش بسته‌شدن ترک مجازی



شکل ۹) شبکه‌بندی نمونه‌ها در روش بسته‌شدن ترک مجازی

### ۵- نتایج

در این قسمت به بررسی نتایج به‌دست‌آمده از آزمون تجربی و مدل‌سازی مود یک و مود ترکیبی شکست پرداخته شده است. تعداد دو عدد نمونه یک‌سرگردار دولبه متقارن برای آزمون مود یک شکست و دو عدد نمونه یک‌سرگردار دولبه نامتقارن برای مود ترکیبی شکست مورد بررسی قرار گرفت. نمودارهای ۳ و ۴ به ترتیب نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های یک‌سرگردار دولبه متقارن و نامتقارن را نشان می‌دهند. در تمامی مراحل تست از دوربین برای رصد رشد ترک، استفاده شده است. این نقاط، نقاطی هستند که ترک رشد کرده و نیرو با افت مقدار مواجه شده است. از همین نقاط برای رسم نمودار  $C^{1/3}$  به طول ترک اولیه در روش تیر اصلاح‌شده [17] استفاده می‌شود.

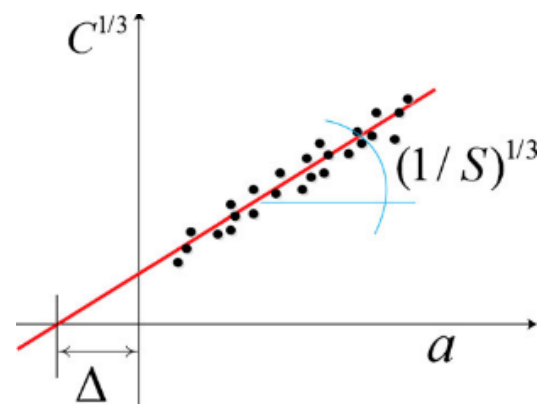
نمودارهای ۵ و ۶، ریشه سوم نرمی به طول ترک اولیه برای نمونه‌های متقارن و نامتقارن را نشان می‌دهند. از این نمودارها برای به‌دست‌آوردن مقدار اصلاحی ترک و همچنین مقدار  $S$  برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی به روش تئوری تیر الاستیک اصلاح‌شده استفاده می‌شود. طول اصلاحی برای نمونه‌های متقارن به‌طور میانگین ۲.۵۹ میلی‌متر و برای نمونه‌های نامتقارن ۲.۹۴ میلی‌متر به دست آمده است.

نمودار ۷، منحنی مقاومت نسبت به طول ترک اولیه را برای نمونه متقارن نشان می‌دهد. با توجه به این نمودار، نمودار ابتدا سیر صعودی داشته و سپس با افزایش طول ترک و افت نیرو، به مقدار نسبتاً ثابتی میل کرده است. نمودار ۸ نیز منحنی مقاومت نمونه نامتقارن را نشان می‌دهد. در تمامی این نمودارها برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی از تئوری تیر الاستیک اصلاح‌شده استفاده شده است.

در عمل به دلیل اینکه تیر به‌طور کامل گیردار نیست و امکان چرخش در حین بارگذاری وجود دارد، رابطه ۷ مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی را بیشتر محاسبه می‌کند. لذا برای از بین بردن اثرات چرخش و اصلاح رفتار تیر یک‌سرگردار، یک مقدار اصلاحی  $\Delta$  به طول ترک اولیه اضافه می‌کنند. در نهایت، نرخ رهایی انرژی کرنشی برای مود خالص یک و مود ترکیبی شکست در رابطه ۸ ارائه شده است:

$$G = \frac{3S\delta^2}{2b(a + |\Delta|)^4} \quad (8)$$

در این رابطه،  $a$  طول ترک اولیه،  $\delta$  جابه‌جایی نمونه و  $\Delta$  مقدار طول اصلاح‌شده نمونه است که از امتداد خط حاصل از نمودار  $C^{1/3}$  نسبت به طول ترک اولیه به دست می‌آید. مقدار  $S$  نیز از شیب خط نمودار ذکرشده به دست می‌آید. نمودار ۲، نمودار  $C^{1/3}$  نسبت به  $a$  را نشان می‌دهد [15, 17].



نمودار ۲) نمودار  $C^{1/3}$  نسبت به طول ترک [15]

### ۴- روش المان محدود بستن ترک مجازی

تکنیک بسته‌شدن ترک مجازی، اغلب برای تفکیک میزان نرخ رهایی انرژی کرنشی مود اول و دوم شکست براساس نتایج حاصل از مطالعات دوبعدی و سه‌بعدی در مود ترکیبی، مورد استفاده قرار می‌گیرد.

روش بسته‌شدن ترک مجازی براساس انتگرال بسته‌شدن ترک اروین ارائه شده است. این روش بر این فرض استوار است که انرژی  $\Delta E$  زمانی آزاد می‌شود که ترک به اندازه  $\Delta a$  از  $a$  به  $a + \Delta a$  گسترش یابد و این با انرژی لازم برای بستن ترک بین دو موقعیت فوق برابر است. برای تفکیک مود یک و دو شکست در حالت ترکیبی از روابط ۹ و ۱۰ استفاده می‌شود [21].

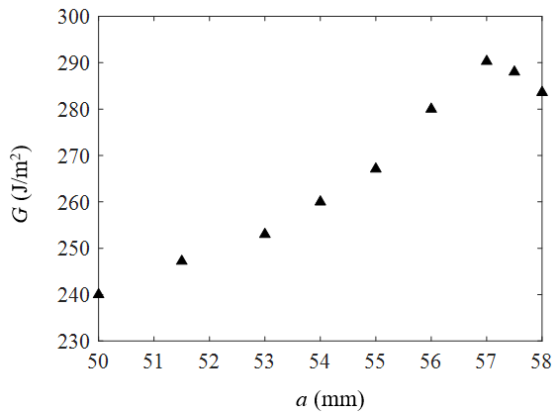
$$G_I = \frac{1}{2b\Delta a} F_y (u_{comp} - u_{st}) \quad (9)$$

$$G_{II} = \frac{1}{2b\Delta a} F_x (u_{comp} - u_{st}) \quad (10)$$

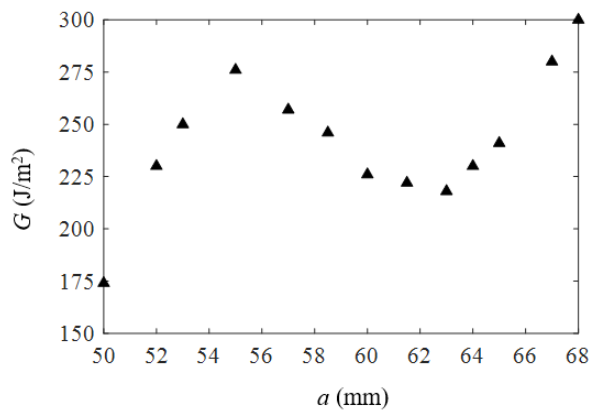
که در آن،  $b$  عرض نمونه،  $a\Delta$  فاصله دو گره شبکه‌بندی،  $F_x$  و  $F_y$  نیرو در جهت عمودی و افقی،  $u_{st}$ ،  $v_{comp}$ ،  $u_{comp}$  و  $v_{st}$  به ترتیب جابه‌جایی‌های عمودی و افقی تیر کامپوزیتی و فلزی است [21].

### ۴-۱- مدل‌سازی المان محدود

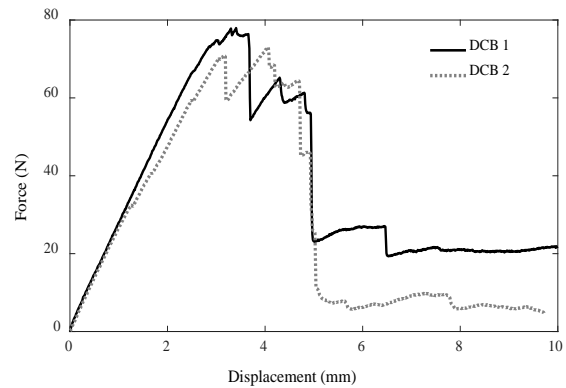
این نمونه‌ها طبق آزمون تجربی، توسط لولا در قید و بند آزمون



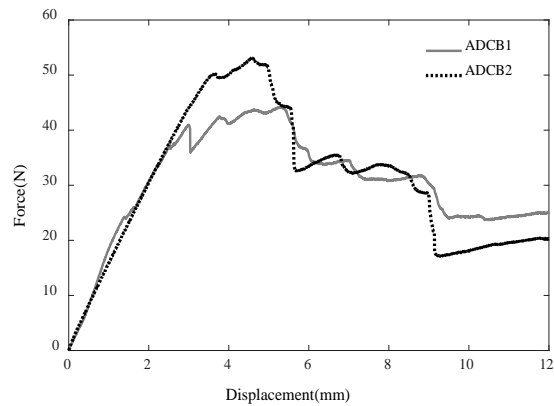
نمودار (۷) منحنی مقاومت نمونه یک‌سرگیردار دولبه متقارن



نمودار (۸) منحنی مقاومت نمونه یک‌سرگیردار دولبه نامتقارن



نمودار (۹) نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های تیر یک‌سرگیردار ناهمجنس دولبه نامتقارن



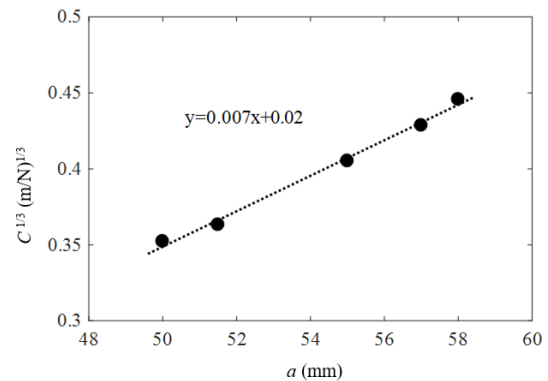
نمودار (۱۰) نمودار نیرو- جابه‌جایی نمونه‌های تیر یک‌سرگیردار ناهمجنس دولبه نامتقارن

شکل‌های ۱۰ و ۱۱ به ترتیب سطوح شکست برای نمونه‌های متقارن و نامتقارن را نشان می‌دهند. با توجه به روش تولید نمونه که در بخش قبل گفته شد، اتصال بین کامپوزیت و فلز به این صورت است که یک لایه نازک رزین در بین فلز و کامپوزیت وجود دارد، بنابراین یک فصل مشترک بین رزین و کامپوزیت در بالای اتصال و یک فصل مشترک دیگر بین رزین و فلز در قسمت پایین اتصال داریم. در تمامی نمونه‌ها، رشد ترک بین کامپوزیت و فلز بوده و به لایه کامپوزیتی سرایتی نداشته است.

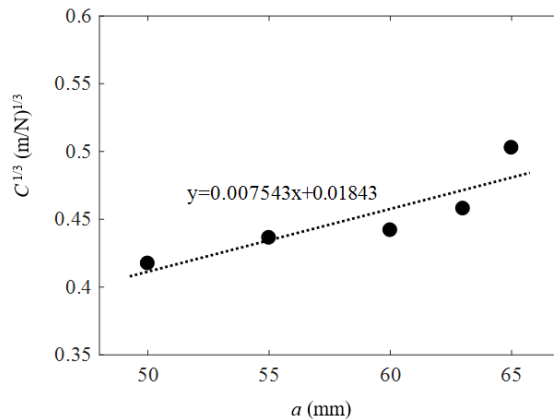
با توجه شکل ۱۱ مشاهده می‌شود که نامتقارن بودن نمونه یک‌سرگیردار یا به بیان بهتر، کمتر شدن ضخامت تیر کامپوزیتی، تمایل رشد ترک به سمت لایه کامپوزیتی را افزایش می‌دهد، اما در نهایت، رشد ترک در بین سطح اتصال چندلایه کامپوزیتی و زیر لایه فولادی همانند نمونه‌های یک‌سرگیردار دولبه متقارن رخ داده است. شکل‌های ۱۲ و ۱۳ نیز مسیر رشد ترک برای نمونه یک‌سرگیردار دولبه متقارن و نامتقارن حین آزمون کشش را نشان می‌دهند. در این نمونه‌ها، ترک در فصل مشترک سطوح کامپوزیت و فولاد رشد کرده است.



شکل (۱۰) سطوح شکست چندلایه کامپوزیتی و زیر لایه فولادی نمونه یک‌سرگیردار دولبه متقارن



نمودار (۱۱) نمودار  $C^{\frac{1}{3}}$  نسبت به طول ترک نمونه یک‌سرگیردار دولبه متقارن



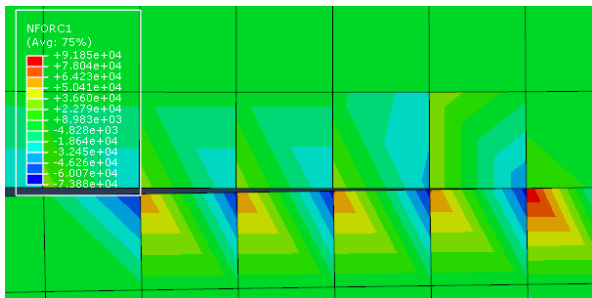
نمودار (۱۲) نمودار  $C^{\frac{1}{3}}$  نسبت به طول ترک نمونه یک‌سرگیردار دولبه نامتقارن

**جدول ۳** مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی برای نمونه‌های یک‌سرگردار دولبه متقارن و نامتقارن

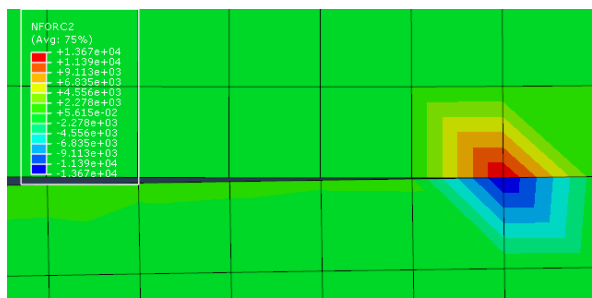
نوع	$G_{exp}$	$G_{vcct}$	$G_{Ivcct}$	$G_{IIvcct}$
متقارن	۲۴۰.۱	۲۴۵.۶۸	۲۳۱.۵۳	۱۴.۱۵
نامتقارن	۱۷۳.۸۶	۱۷۵.۰۳	۹۷.۰۳	۷۷.۷۳

**جدول ۴** تفکیک نرخ رهایی انرژی کرنشی مود اول و دوم در نمونه‌های یک‌سرگردار دولبه متقارن و نامتقارن

نوع	$G_I/G_T$	$G_{II}/G_T$
متقارن	%۹۴.۲۵	%۵.۷۶
نامتقارن	%۵۵.۵۹	%۴۴.۴۱



**شکل ۱۴** بستن نوک ترک نمونه یک‌سرگردار دولبه نامتقارن در جهت محور افقی



**شکل ۱۵** بستن نوک ترک نمونه یک‌سرگردار دولبه نامتقارن در جهت محور عمودی



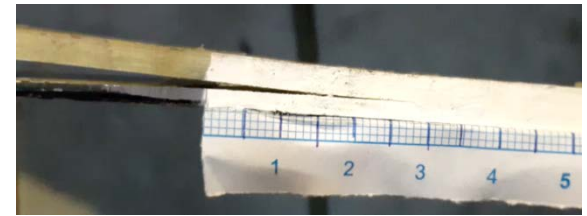
**شکل ۱۶** بازشدن نوک ترک برای نمونه یک‌سرگردار دولبه نامتقارن

### ۶- نتیجه‌گیری

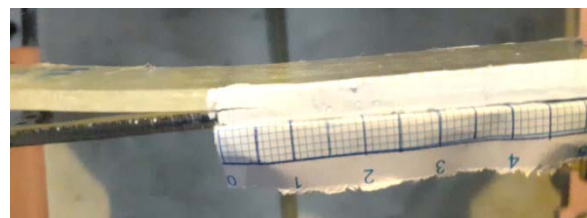
در این تحقیق، نرخ رهایی انرژی کرنشی در حین انتشار ترک بین‌لایه‌ای در سطح اتصال کامپوزیت و فولاد بررسی شد. از کاربردهای مهم این نوع اتصال می‌توان به ترمیم خطوط لوله فلزی خورده‌شده در صنایع نفت و گاز اشاره کرد. برای پیش‌بینی خرابی اتصال کامپوزیت/فولاد، محاسبه تجربی نرخ رهایی انرژی کرنشی مود اول شکست که در استاندارد ASTM-D5528 ارائه شده، معیار مناسبی است. در گام اول مقاله، برای به‌کارگیری استاندارد فوق که تنها برای نمونه‌های متقارن قابل استفاده بوده، نیاز به



**شکل ۱۱** سطوح شکست چندلایه کامپوزیتی و زیر لایه فولادی نمونه یک‌سرگردار دولبه نامتقارن



**شکل ۱۲** مسیر رشد ترک نمونه یک‌سرگردار دولبه متقارن



**شکل ۱۳** مسیر رشد ترک نمونه یک‌سرگردار دولبه نامتقارن

جدول ۳ مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی نمونه‌های یک‌سرگردار دولبه متقارن و نامتقارن را در روش تجربی و عددی نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نرخ رهایی انرژی کرنشی کل در نتایج تجربی با نتایج عددی حاصل از مدل‌سازی المان محدود به‌روش بستن ترک مجازی مطابقت خوبی دارند. در این جدول، مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی در مود اول و دوم شکست نیز از مدل‌سازی المان محدود، محاسبه و گزارش شده است.

تفکیک نرخ رهایی انرژی کرنشی مود اول و دوم نمونه‌های یک‌سرگردار دولبه متقارن و نامتقارن در جدول ۴ ارائه شده است. با توجه به رابطه ارائه‌شده برای ضخامت‌های چندلایه کامپوزیتی و تیر فولادی (رابطه ۶)، نرخ رهایی انرژی کرنشی مود یک شکست برای نمونه متقارن با استفاده از روش بستن ترک مجازی، طبق جدول ۴ تقریباً ۹۵٪ نرخ رهایی انرژی کرنشی کل است. این امر نشان‌دهنده صحت رابطه ارائه‌شده برای تعیین ضخامت بازوهای فولادی و کامپوزیتی و رسیدن به مود خالص یک شکست است. برای نمونه یک‌سرگردار دولبه نامتقارن با استفاده از روش بستن ترک مجازی، ضخامت‌هایی برای هر دو بازو انتخاب شده است که سهم هر کدام از مودهای یک و دو در مود ترکیبی شکست، ۵۰٪ باشد. به همین دلیل در این نمونه‌ها با استفاده از روش بستن ترک مجازی با میانگین‌گرفتن از تفکیک مودهای به‌دست‌آمده برای نمونه نامتقارن، سهم مود یک شکست، ۵۹.۵۵٪ و سهم مود دو، ۴۱.۴۵٪ به دست آمده است.

همان‌طور که گفته شد، برای به‌دست‌آوردن تفکیک مود نمونه‌های متقارن و نامتقارن از نرم‌افزار آباکوس و روش بستن ترک مجازی دومرحله‌ای استفاده شده است. شکل‌های ۱۶-۱۴، مراحل باز و بسته‌شدن نوک ترک نمونه‌های نامتقارن را در نرم‌افزار آباکوس نشان می‌دهند.



و هیچ‌کدام از نمونه‌ها وارد ناحیه پلاستیک نشده است. صحت این ادعا، با بررسی نمونه فلزی پس از تست که هیچ‌گونه تغییر شکل پلاستیکی در آن مشاهده نشد و همچنین بررسی مقادیر تنش وون میسر در مدل المان محدود تایید شده است.

**تشکر و قدردانی:** در اینجا نویسندگان مقاله، مراتب تشکر و قدردانی خود را از شرکت دانش بنیان مهندسی نوین کامپوزیت صدرا که جهت ساخت نمونه‌های تست تجربی با نویسندگان همکاری داشتند، اعلام می‌دارند.

**تأییدیه اخلاقی:** کلیه اصول اخلاق پژوهشی در نگارش مقاله رعایت شده است.

**تعارض منافع:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

**سهم نویسندگان:** ستار مالکی (نویسنده اول)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۳۵٪)؛ عطیه اندخشیده (نویسنده دوم)، روش‌شناس/پژوهشگر اصلی (۳۵٪)؛ علیرضا سیفی (نویسنده سوم)، نگارنده بحث (۳۰٪)

**منابع مالی:** موردی توسط نویسندگان گزارش نشده است.

## ۷- پی‌نوشت

علام	علایم
$a$	طول ترک اولیه (میلی‌متر)
$b$	عرض نمونه (میلی‌متر)
$C$	نرمی نمونه (میلی‌متر بر نیوتون)
$E_1$	مدول الاستیسیته کامپوزیت در جهت یک (گیگاپاسکال)
$E_2$	مدول الاستیسیته کامپوزیت در جهت دو (گیگاپاسکال)
$E_{st}$	مدول الاستیسیته تیر فولادی (گیگاپاسکال)
$F_x$	نیرو در جهت افقی در روش بستن ترک مجازی (نیوتون)
$F_y$	نیرو در جهت عمودی در روش بستن ترک مجازی (نیوتون)
$G$	نرخ رهایی انرژی کرنشی (ژول بر متر مربع)
$G_{23}, G_{13}, G_{12}$	مدول برشی کامپوزیت (گیگاپاسکال)
$G_{exp}$	نرخ رهایی انرژی کرنشی تجربی (ژول بر متر مربع)
$G_I$	نرخ رهایی انرژی کرنشی مود اول شکست (ژول بر متر مربع)
$G_{Ivcct}$	نرخ رهایی انرژی کرنشی مود اول شکست در روش بستن ترک مجازی (ژول بر متر مربع)
$G_{IIvcct}$	نرخ رهایی انرژی کرنشی مود دوم شکست در روش بستن ترک مجازی (ژول بر متر مربع)
$G_{Vcct}$	نرخ رهایی انرژی کرنشی در روش بستن ترک مجازی (ژول بر متر مربع)
$h_{st}$	ضخامت تیر فولادی (میلی‌متر)
$h_{comp}$	ضخامت تیر کامپوزیتی (میلی‌متر)
$I_{st}$	ممان اینرسی دوم سطح تیر فولادی ( $m^4$ )
$l$	طول نمونه (میلی‌متر)
$M_{comp}$	ممان خمشی تیر فولادی (نیوتون در میلی‌متر)
$M_{st}$	ممان خمشی تیر فولادی (نیوتون در میلی‌متر)
$P$	بار اعمالی (نیوتون)
$Q$	ماتریس سختی تیر کامپوزیتی (مگاپاسکال)
$Q_{11}^*$	درایه اول ماتریس معکوس $Q$
$S$	نرمی خمشی معادل ( $Pa/m^4$ )
$u_{comp}$	جابه‌جایی افقی کامپوزیت در روش بستن ترک مجازی (میلی‌متر)
$u_{st}$	جابه‌جایی افقی فولاد در روش بستن ترک مجازی (میلی‌متر)
$v_{comp}$	جابه‌جایی عمودی کامپوزیت در روش بستن ترک مجازی (میلی‌متر)
$v_{st}$	جابه‌جایی عمودی فولاد در روش بستن ترک مجازی (میلی‌متر)
$\delta$	علایم یونانی
$\Delta$	جابه‌جایی نقطه اعمال بار (میلی‌متر)
$\Delta a$	طول اصلاح شده ترک (میلی‌متر)
	نمو ترک (میلی‌متر)

روابطی است که نمونه‌های ناهمجنس موجود را تبدیل به نمونه‌های متقارن نمایند. این امر با استفاده از تئوری کلاسیک چندلایه‌ها صورت گرفت که در نهایت منتهی به رابطه‌ای جدید (رابطه ۶) بین ضخامت تیرهای کامپوزیتی و فولادی برحسب خواص آنها شد. بر مبنای این ضخامت‌ها، نمونه‌سازی برای انجام تست‌های تجربی صورت گرفت. نمونه‌های ساخته‌شده در این پژوهش شامل کامپوزیت ساخته‌شده از الیاف شیشه تک‌جهته، رزین اپوکسی به‌همراه سخت‌کننده در نیمه بالایی تیر و فولاد در نیمه پایینی تیر است. محاسبه عددی نرخ رهایی انرژی کرنشی با استفاده از مدل‌سازی اجزای محدود آباکوس به‌روش بستن مجازی ترک نیز صورت گرفت. این امر به‌منظور بررسی دقت رابطه محاسبه ضخامت تیرهای متقارن و تعیین سهم مود اول و دوم شکست در انرژی کرنشی کل صورت گرفت.

با بررسی سطوح شکست برای نمونه‌های متقارن و نامتقارن مشاهده شد که در هر دو نوع نمونه یک‌سرگردار دولبه متقارن و نامتقارن، رشد ترک بین کامپوزیت و فلز بوده و هیچ‌گونه سرائیتی به لایه کامپوزیتی نبوده است. اما در نمونه نامتقارن به‌دلیل کاهش ضخامت کامپوزیت، تمایل رشد ترک به سمت لایه کامپوزیتی بوده که در سطح آثار پوست‌کن‌شده کامپوزیت به میزان جزئی قابل رویت است. این امر ناشی از تغییر مسیر ترک به سمت فصل مشترک کامپوزیت و رزین واسط و همچنین وجود مود ترکیبی شکست در نمونه‌های نامتقارن است.

تفاوت جدایش‌ها در دو حالت متقارن و نامتقارن که در بررسی سطوح شکست قابل رویت است، باعث اختلاف نرخ رهایی انرژی کرنشی می‌شود. نرخ رهایی انرژی کرنشی نمونه متقارن بیشتر از نامتقارن و به‌طور تقریبی ۱.۵ برابر است. نمودار تغییرات نرخ رهایی انرژی کرنشی در دو حالت متقارن و نامتقارن نیز روند متفاوتی دارد. در نمونه‌های متقارن، انرژی کرنشی ابتدا روال افزایشی داشته و پس از رسیدن به یک مقدار حداکثر، تغییرات کمی دارد. این امر تغییر در موقعیت جدایش و رشد ترک نمونه نامتقارن را نیز نشان می‌دهد.

با توجه به رابطه ارائه‌شده برای ضخامت‌های چندلایه کامپوزیتی و تیر فولادی (رابطه ۶)، نرخ رهایی انرژی کرنشی مود یک شکست برای نمونه متقارن با استفاده از روش بستن ترک مجازی، تقریباً ۹۵٪ انرژی کرنشی کل به دست آمده است. اعتبارسنجی نتایج تجربی و عددی نمونه‌های متقارن و نامتقارن نیز بیانگر دقت رابطه ارائه‌شده برای تعیین ضخامت تیرهای فولادی و کامپوزیتی است. بنابراین ضخامت‌های در نظر گرفته‌شده برای تیر بالا و پایین و همچنین روش تست پیشنهادشده برای محاسبه انرژی خالص مود یک معتبر است و می‌توان آن را مود اول شکست خالص محسوب کرد. برای نمونه یک‌سرگردار دولبه نامتقارن نیز با استفاده از روش بستن ترک مجازی، ضخامت‌ها به قسمی انتخاب شد که سهم هر کدام از مودهای یک و دو در مود ترکیبی شکست، ۵۰٪ باشد. در نتایج تجربی حاصل برای تیر نامتقارن، سهم مود یک، ۵۵.۵۹٪ و سهم مود دو شکست، ۴۴.۴۱٪ به دست آمده است که دقت خوبی دارد.

به‌طور میانگین، مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی به‌دست‌آمده برای نمونه متقارن از آزمون تجربی ۲۴۰.۱ ژول بر متر مربع و با استفاده از روش بستن ترک مجازی ۲۴۵.۶۸ ژول بر متر مربع است. همچنین برای نمونه‌های نامتقارن طبق آزمون تجربی و مدل‌سازی به‌ترتیب ۱۷۳.۸۶ و ۱۷۵.۰۳ ژول بر متر مربع به دست آمده است.

تمامی دو نوع نمونه‌های متقارن و نامتقارن در حوزه الاستیک بوده

Institute and State University; 2007.

11- Da Silva LFM, Esteves VHC, Chaves FJP. Fracture toughness of a structural adhesive under mixed mode loadings. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*. 2011;42(5):460-470.

12- Zamani Zakaria A, Sheleshnezhad K, Navid Chakherlou T, Olad A. Effects of aluminum surface treatments on the interfacial fracture toughness of carbon-fiber aluminum laminates. *Engineering Fracture Mechanics*. 2017;172:139-151.

13- Xiao F, Hui CY, Kramer EJ. Analysis of a mixed mode fracture specimen: The asymmetric double cantilever beam. *Journal of Materials Science*. 1993;28(20):5620-5629.

14- Mollón V, Bonhomme J, Viña J, Argüelles A. Theoretical and experimental analysis of carbon epoxy asymmetric dcB specimens to characterize mixed mode fracture toughness. *Polymer Testing*. 2010;29(6):766-770.

15- Shokrieh MM, Zeinedini A. A novel method for calculation of strain energy release rate of asymmetric double cantilever laminated composite beams. *Applied Composite Materials*. 2014;21(3):399-415.

16- Yahya NA, Hashim S. Stress analysis of steel/carbon composite double lap shear joints under tensile loading. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part L Journal of Materials Design and Applications*. 2016;230(1):88-104.

17- ASTM. Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites [Internet]. West Conshohocken PA: ASTM International; 2007 [cited 2018 August 01]. Available from: <https://www.astm.org/DATABASE.CART/HISTORICAL/D5528-01R07.htm>.

18- Reddy JN. *Theory and analysis of elastic plates and shells*. Boca Raton: CRC Press; 2006.

19- Asgari Mehrabadi F. *Fracture mechanic analysis in adhesive composite/aluminum joints* [Dissertation]. Tabriz: University of Tabriz; 2011. [Persian]

20- Kariman Moghadam A, Rahnema S, Maleki S. Experimental and numerical investigation of crack growth in adhesive bonding of two composite plates under mode I. *Modares Mechanical Engineering*. 2016;16(5):271-280. [Persian]

21- Krueger R. Virtual crack closure technique: History, approach, and applications. *Applied Mechanics Reviews*. 2004;57(2):109-143.

انرژی آزاد شده حین رشد ترک (ژول)	$\Delta E$
انحنای تیر کامپوزیتی <sup>-1</sup> (متر)	$\kappa_x$
شعاع انحنای تیر کامپوزیتی (متر)	$\rho_{comp}$
شعاع انحنای تیر فولادی (متر)	$\rho_{st}$
مدول پواسون کامپوزیت	$\nu_{23}, \nu_{21}, \nu_{12}$
مدول پواسون فولاد	$\nu_{st}$
کرنش صفحه میانی	$\epsilon_0$
تنش (مگاپاسکال)	$\sigma$

### منابع

1- Abd-Elhady AA, Sallam HEM, Mubarak MA. Failure analysis of composite repaired pipelines with an inclined crack under static internal pressure. *Procedia Structural Integrity*. 2017;5:123-130.

2- Arikan H. Failure analysis of  $(\pm 55^\circ)_3$  filament wound composite pipes with an inclined surface crack under static internal pressure. *Composite Structures*. 2010;92(1):182-187.

3- Alexander C, Ochoa OO. Extending onshore pipeline repair to offshore steel risers with carbon-fiber reinforced composites. *Composite Structures*. 2010;92(2):499-507.

4- Senthil K, Arockiarajan A, Palaninathan R. Experimental determination of fracture toughness for adhesively bonded composite joints. *Engineering Fracture Mechanics*. 2016;154:24-42.

5- Campos AAMA, De Jesus AMP, Correia JAF, Morais JLL. Fatigue crack growth behavior of bonded aluminum joints. *Procedia Engineering*. 2016;160:270-277.

6- De Gracia J, Boyano A, Arrese A, Mujika F. A new approach for determining the R-curve in DCB tests without optical measurements. *Engineering Fracture Mechanics*. 2015;135:274-285.

7- Dias GF, De Moura MFSF, Chousal JAG, Xavier J. Cohesive laws of composite bonded joints under mode I loading. *Composite Structures*. 2013;106:646-652.

8- Choupani N. Mixed-mode cohesive fracture of adhesive joints: Experimental and numerical studies. *Engineering Fracture Mechanics*. 2008;75(15):4363-4382.

9- Dehghan Manshadi B, Vassilopoulos AP, Botsis J. A combined experimental/numerical study of the scaling effects on mode I delamination of GFRP. *Composites Science and Technology*. 2013;83:32-39.

10- Pohlit II DJ. *Dynamic mixed-mode fracture of bonded composite joints for automotive crashworthiness* [Dissertation]. Blacksburg VA: Virginia Polytechnic