



بررسی تجربی و عددی رشد ترک در اتصال چسبی دو صفحه کامپوزیتی در حالت مود I شکست

امیر کریمان مقدم¹، سعید رهنما^{2*}، ستار مالکی³

- 1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
 2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه بیرجند، بیرجند
 3- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه مهندسی فناوری‌های نوین، قوچان
 * بیرجند، صندوق پستی 615/97175، srahnama@birjand.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 15 بهمن 1394
 پذیرش: 06 فروردین 1395
 ارائه در سایت: 05 خرداد 1395
 کلید واژگان:
 کامپوزیت‌ها
 اتصال چسبی
 روش اجزای محدود توسعه یافته
 رشد ترک
 نرخ رهایی انرژی کرنشی

در این مقاله، نرخ رهایی انرژی کرنشی مود اول شکست در اتصال چسبی دو صفحه کامپوزیتی با الیاف شیشه تک جهت با استفاده از نمونه تیریکسرگیردار دولبه محاسبه شده است. برای ایجاد اتصال از چسب آرالدایت 2011 که بطور گسترده در صنعت هوافضا کاربرد دارد، استفاده شده، نرخ رهایی انرژی کرنشی با سه روش تیر اصلاح شده، روش کالیبره کردن نرمی و روش اصلاح شده کالیبره کردن نرمی از نتایج تجربی محاسبه شده است. برای مدل‌سازی رشد ترک در اتصال چسبی دو صفحه کامپوزیتی از روش اجزای محدود توسعه یافته استفاده شده است. مقدار میانگین نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی محاسبه شده به روش اصلاح شده کالیبره کردن نرمی به عنوان ورودی نرم افزار در نظر گرفته شده است. بعد از مقایسه نمودار نیرو - جابه‌جایی بدست آمده از نتایج آزمایش‌های تجربی و حل عددی که نشان دهنده دقت مطلوب روش اجزای محدود توسعه یافته در محاسبه نیرو حداکثر و جابه‌جایی متناظر با آن و همچنین قسمت خطی نمودار نیرو - جابه‌جایی می‌باشد، نمودارهای نرخ رهایی انرژی کرنشی - نیرو، نمودار ضریب شدت تنش - نیرو، نمودار نرخ رهایی انرژی کرنشی - جابه‌جایی محل اعمال بار و نمودار تنش گسیختگی - ضریب شدت تنش مورد بررسی قرار گرفته است.

Experimental and numerical investigation of crack growth in adhesive bonding of two composite plates under mode I

Amir Kariman Moghadam¹, Saeed Rahnema^{1*}, Sattar Maleki²

- 1- Department of Mechanical Engineering, Birjand University, Birjand, Iran
 2- Department of Mechanical Engineering, Advanced Technologies Engineering University, Quchan, Iran
 * P.O.B. 97175/615, Birjand, Iran, srahnama@birjand.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 04 February 2016
 Accepted 25 March 2016
 Available Online 25 May 2016

Keywords:
 Composites
 Adhesive Joint
 Extended Finite Element Method
 Crack Growth
 Strain Energy Release Rate

ABSTRACT

In this paper, the strain energy release rate of first mode of failure in the adhesive bonding of two composite plates composed of unidirectional glass fiber is calculated using double cantilever beam specimen. Araldite 2011 adhesive connection which is widely used in the aerospace industry has been employed. Strain energy release rate is calculated by the modified beam method, compliance calibration method and modified compliance calibration method from experimental results. For modeling crack growth in adhesive bonding of two composite plates, the Extended Finite Element Method has been employed. Average value of critical strain energy release rate calculated by the modified compliance calibration method is considered as software input. After comparing force - displacement curve obtained from experimental data and numerical solution that represents good precision of the Extended Finite Element Method in calculating the maximum force and corresponding displacement and also linear part of force-displacement curve, strain energy release rate - force curve, stress intensity factor - force curve, strain energy release rate - displacement of the load effective point and failure stress - stress intensity factor curve are evaluated.

1- مقدمه

از اهمیت بالایی برخوردار است. از مهمترین سازوکارهایی که باعث تخریب مواد کامپوزیتی می‌شود، ایجاد ترک و گسترش آن می‌باشد [1]. در بسیاری از سازه‌های مهندسی، استفاده از اتصالات چسبی بدلیل کاهش تمرکز تنش و وزن، جایگزین مناسبی برای سایر اتصالات از قبیل جوشکاری و پرچکاری می‌باشد. لذا تعیین استحکام و مقاومت در برابر رشد

امروزه کامپوزیت‌ها به دلیل خواص متنوع از جمله وزن کم، استحکام، سختی، مقاومت در برابر ضربه و مقاومت در برابر خوردگی به یکی از پرکاربردترین مواد در صنایع گوناگون تبدیل شده‌اند. طراحی و ساخت مواد کامپوزیتی و پیش‌بینی عمر آن‌ها در صنایع خودرو سازی، هواپیماسازی و ساخت موشک

ترک این اتصالات در شرایط مختلف بارگذاری از اهمیت بالای برخوردار می‌باشد [1].

در چند دهه گذشته مهمترین روش عددی مورد استفاده در تحلیل مسائل مختلف، از جمله مسائل مرتبط با مکانیک شکست روش اجزای محدود بوده است. این روش دارای مزیت‌های بسیاری است که باعث ساده سازی حل بسیاری از مسائل می‌شود، اما در کنار این مزیت‌ها معایبی نیز دارد که حل برخی مسائل مانند مسائل مربوط به حوزه مکانیک شکست را مشکل می‌سازد. به همین دلیل نیاز بود تا روش‌های جایگزینی که در اصول اولیه مشابه روش المان محدود بوده، اما کاملتر از این روش هستند، مورد استفاده قرار گیرد. روش‌هایی نظیر پارتیشن واحد¹، اجزای محدود تعمیم یافته و یا اجزای محدود توسعه یافته² نتیجه نیاز برای تولید روش‌های دقیق‌تر و کامل‌تری نسبت به روش المان محدود هستند. روش‌های فوق در ماهیت کلی مشابه هستند، ولی در جزئیات نسبت به هم متفاوت‌اند که این تفاوت باعث کارآمدتر شدن هر یک از این روش‌ها در زمینه خاصی می‌شوند [2,3].

به کمک روش اجزای محدود توسعه یافته تحلیل ناپوستگی‌ها از جمله ترک‌ها بسیار ساده‌تر شده است. روش اجزای محدود برای برخی از تحلیل‌ها در زمینه مکانیک شکست، نظیر محاسبه ضریب شدت تنش و یا نسبت انرژی آزاد شده مناسب است، اما در زمینه گسترش ترک نیاز به شبکه‌بندی در هر مرحله دارد و مسیر رشد ترک نیز باید معلوم باشد، در حالی که در بسیاری از مسائل واقعی مسیر رشد ترک معلوم نیست. بخاطر این مشکلات روش اجزای محدود توسعه یافته در این تحقیق پیشنهاد شده است [2,3].

مورا و همکارانش از روش نرمی بر پایه تئوری تیر برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی در حالت مود یک شکست در اتصال چسبی استفاده کردند. آنها مقادیر بدست آمده از این روش را با سایر روش‌های تئوری مستقیم، کالیبره کردن نرمی و تئوری تیر اصلاح شده مقایسه کرده‌اند [4]. سپس برای تأیید روش پیشنهادی نتایج را با روش المان چسبیده مقایسه کرده‌اند.

املی و همکارانش تأثیر ضخامت چسب در نرخ رهایی انرژی کرنشی در دو نوع چسب را مورد بررسی قرار دادند [5]. در این تحقیق برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی از تئوری تیر ساده و تیر اصلاح شده استفاده شده است. نتایج نشان دهنده این بود که با افزایش ضخامت چسب، نرخ رهایی انرژی کرنشی به صورت خطی افزایش می‌یابد.

خوشروان و همکارانش شکست در اتصال بین الیاف کربن و یک صفحه آلومینیومی را تحت بارگذاری مود یک با استفاده از نمونه تیریک سرگردار مورد بررسی قرار دادند [6]. نمونه‌ها با 5 طول ترک متفاوت 55، 65، 75، 85 و 95 میلی‌متر ساخته شده و برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی از دو روش تئوری تیر اصلاح شده و کالیبره کردن نرمی استفاده شده است. منحنی مقاومت در برابر رشد ترک را برای نمونه‌ها از روی مقادیر آزمایشگاهی محاسبه نموده، و سپس مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی بدست آمده از نتایج تجربی را با نتایج حل عددی دو روش VCCT و روش انگرال J مقایسه نمودند.

دیاس و همکارانش استفاده از قوانین چسبندگی برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی در حالت مود یک شکست در اتصال چسبی دو صفحه کامپوزیتی را پیشنهاد دادند [7]. لی و همکارانش یک راه حل تحلیلی برای محاسبه نرخ رهایی انرژی

کرنشی در حالت مود یک شکست در نمونه تیریک سرگردار ارائه دادند [8]. در این روش تئوری تیر الاستیک و تئوری تیر اصلاح شده با یکدیگر ادغام شدند و مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی با استفاده از یک روش جدید محاسبه گردید. این روش هم برای محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی در حالت جدایش بین لایه‌های و هم برای شکست در اتصالات چسبی مورد استفاده قرار گرفت. برای اعتبار سنجی روش پیشنهادی نتایج حل عددی در حالت شکست در اتصال چسبی با نتایج آزمایشگاهی مقایسه گردید.

گراسیا و همکارانش روش جدیدی برای محاسبه نقطه به نقطه منحنی مقاومت ماده در برابر رشد ترک برای تیر یکسرگردار ارائه دادند [9]. مدل تحلیلی ارائه شده منجر به محاسبه طول ترک برای هر جفت از مقادیر بار و جابه‌جایی بدون هیچ‌گونه اندازه‌گیری نوری شد. در این روش ابتدا با استفاده از تئوری انگسر-کاستیگیلیانو جابه‌جایی دهانه ترک محاسبه گردید و سپس با جایگذاری این رابطه در رابطه نرمی ماده مقدار طول ترک بدست آمد.

سوسا و همکارانش جدایش بین لایه‌های مود یک را در مواد GLARE که به طور گسترده در ساخت بدنه هواپیما استفاده می‌شوند، با روش اجزای محدود توسعه یافته مدلسازی کردند [10].

گروگان و همکارانش روش اجزای محدود توسعه یافته را برای شبیه‌سازی رشد جدایش بین لایه‌های خستگی حرارتی و پیش‌بینی جابه‌جایی دهانه ترک و نفوذپذیری ورقه‌های کامپوزیتی ارائه دادند [11]. برای مدلسازی جدایش بین لایه‌های مود یک از نمونه DCB و برای مود دو از نمونه ENF استفاده کردند.

ناگاشیما و همکارانش استفاده از المان‌های پوسته‌ای را برای تحلیل جدایش بین لایه‌های در سازه‌های جدار نازک کامپوزیتی پیشنهاد کردند. آن‌ها تحقیقات خود را بر روی پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف کربن (CFRP) که بدلیل وزن کم و خواص مکانیکی مطلوب دارای کاربردهای مهندسی بسیار هستند، انجام دادند [12].

چانگ و همکارانش از روش اجزای محدود توسعه یافته برای شبیه‌سازی رشد ترک و پیش‌بینی تأثیر تقویت کننده بر رفتار گسترش ترک مواد کامپوزیتی $Al_2O_3/A6061$ استفاده کردند [13]. آن‌ها برای انجام مدل‌سازی خود از نرم افزار آباکوس استفاده نمودند. میدان تنش تعیین شده به روش XFEM در طی مرحله گسترش ترک به درک رفتار گسترش ترک در طی سیکل بارگذاری کمک می‌کرد.

معتدی و همکارانش از روش اجزای محدود توسعه یافته برای تحلیل دینامیکی ترک‌های متحرک با توابع غنی سازی اورتروپیک مستقل از زمان در کامپوزیت‌ها استفاده کردند [14]. روش پیشنهادی نیازی به تعریف مسیر رشد ترک و شبکه‌بندی مجدد نداشت.

قاسمی و همکارانش از روش XFEM برای بررسی رشد ترک خستگی ورق‌های ترک‌دار آلومینیومی، تعمیر شده توسط وصله کامپوزیتی (FML) استفاده نمودند [15]. آن‌ها از روش فوق برای تأثیر لایه چینی وصله‌های کامپوزیتی بر روی جابه‌جایی نقاط دهانه ترک و ضریب شدت تنش و همچنین برای بررسی تأثیر زاویه ترک بر روی ضریب شدت تنش در ورق تعمیر شده، استفاده کردند.

همان‌طور که مشخص است در تحقیقات انجام گرفته در زمینه شکست اتصالات چسبی در حالت مود یک برای مقایسه نتایج آزمایشگاهی استفاده از حل عددی روش المان چسبیده به عنوان یک روش کارآمد مورد توجه بوده است، اما کمتر از روش اجزای محدود توسعه یافته برای مدل‌سازی اتصالات

¹ Partition of Unity

² Extended Finite element Method



Fig. 2 DCB specimen

شکل 2 نمونه تیر یکسر گیردار دولبه

جدول 1 خواص مکانیکی الیاف تک‌جهته شیشه اپوکسی

$G_{12} = G_{13} = G_{23}$ (GPa)	$\nu_{12} = \nu_{13} = \nu_{23}$	E_{33} (GPa)	E_{22} (GPa)	E_{11} (GPa)
4	0.3	2	3	30

جدول 2 خواص مکانیکی چسب آرالدایت 2011 [16]

σ_Y (MPa)	ν	E (GPa)
36.3	0.37	1.8532

2-2- روش آزمایش

آزمایش بر اساس استاندارد ASTM D5528 انجام شده است [17]. بار اعمالی به نمونه‌ها به صورت جابه‌جایی کنترل به نیمه پایینی وارد می‌شود. آزمایش‌ها در دمای 24 درجه سانتی‌گراد و با نرخ جابه‌جایی ثابت 2 mm/min انجام شده است. میزان جابه‌جایی و بار اعمالی به طور پیوسته توسط دستگاه تست کشش ثبت گردید. بدلیل عدم وجود دوربین با قابلیت ثبت مسیر رشد ترک در هر لحظه، براساس روش ارائه شده توسط خوشروان و همکارانش نمونه‌ها با پنج طول ترک متفاوت ساخته شدند.

2-3- دستگاه آزمون کشش

برای بارگذاری نمونه‌ها از دستگاه آزمایش کشش مدل زونیک-250 ساخت کشور آلمان موجود در آزمایشگاه خواص مکانیکی دانشگاه فردوسی مشهد با ظرفیت 5 تن، با قابلیت تنظیم سرعت بارگذاری 0.1-500 mm/min استفاده شده است. نمونه‌ها با سرعت 2 mm/min تحت بارگذاری به صورت کنترل جابه‌جایی قرار گرفته‌اند. برای ثبت بار اعمالی به نمونه‌ها از نیروسنج 200 کیلوگرمی استفاده شده است. شکل 3 نمونه DCB تحت بارگذاری مود یک به وسیله دستگاه آزمایش کشش را نشان می‌دهد.

3- روش‌های محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی مود I

در این تحقیق نرخ رهایی انرژی کرنشی با سه روش: تیر اصلاح شده، کالیبره کردن نرمی و اصلاح شده کالیبره کردن نرمی محاسبه شده است.

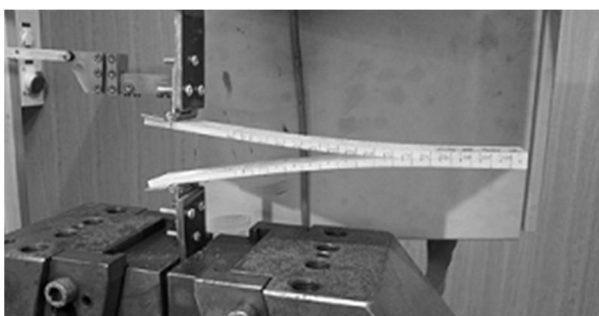


Fig. 3 DCB specimen under tensile test

شکل 3 نمونه DCB تحت آزمایش کشش

چسبی استفاده شده است. همچنین در این تحقیق نرخ رهایی انرژی کرنشی مود اول شکست با سه روش، روش تیر اصلاح شده¹، روش کالیبره کردن نرمی² و روش اصلاح شده کالیبره کردن نرمی³ برای چسب آرالدایت⁴ 2011 از نتایج تجربی محاسبه شده است؛ که البته تاکنون بر روی این چسب خاص تحقیقات مشابه انجام نشده است. سپس از روش اجزای محدود توسعه یافته برای مدل‌سازی رشد ترک و بررسی سایر پارامترهای مکانیک شکست و همچنین محاسبه چقرمگی شکست در مود اول در اتصال چسبی استفاده شده است.

2- روش تحقیق

2-1- مواد و آماده سازی نمونه‌ها

برای تولید صفحات کامپوزیتی از الیاف شیشه تک‌جهته استفاده شده است. صفحات کامپوزیتی از 8 لایه با زاویه صفر درجه به صورت دستی ساخته شده‌اند. برای لایه‌چینی از چسب اپوکسی ایپون همراه با سخت‌کننده تنا استفاده شده است. بعد از لایه‌چینی صفحه کامپوزیتی به مدت 24 ساعت تحت فشار در دمای اتاق قرار داشته و برای سخت شدن نهایی یک ساعت در کوره با دمای 100 درجه سانتی‌گراد قرار داده شده است. بعد از تولید صفحه کامپوزیتی ابتدا آن را به دو قسمت مساوی برش داده، سپس هر صفحه را به میزان 0.1 میلیمتر به چسب آرالدایت 2011 آغشته کرده و بعد از قرار دادن در قید و بند ساخته شده به مدت 24 ساعت در دمای اتاق و برای سخت شدن نهایی به مدت 2 ساعت در کوره با دمای 120 سانتی‌گراد گذاشته شده است. برای ایجاد ترک اولیه از ورق مایلر نجسب با ضخامت 20 میکرومتر استفاده شده است.

برای برشکاری نمونه‌ها از دستگاه برش سی ان سی استفاده شده است. تعداد 11 عدد نمونه برشکاری شده که از این تعداد 3 نمونه با طول ترک 40 میلیمتر و با طول ترک 60، 50، 70 و 80 میلیمتر هرکدام دو نمونه برش داده شده است. تمامی نمونه‌ها با طول (L) 200 میلی‌متر، عرض (b) 24 میلی‌متر، ضخامت چسب (t) 0.2 میلی‌متر و ضخامت هر صفحه کامپوزیتی (h) 4 میلیمتر تولید شده‌اند. در شکل 1 نمونه DCB نشان داده شده است. برای قرارگیری نمونه‌ها در داخل فک‌های دستگاه آزمایش کشش، لولاهایی از جنس فولاد در لبه‌های نمونه‌ها چسبانده شده است. شکل 2 نمونه‌ای از تیر یکسرگیردار دولبه ساخته شده را نشان می‌دهد. خواص مکانیکی الیاف شیشه تک‌جهته بکار رفته برای لایه‌چینی صفحات کامپوزیتی براساس گزارش ارائه شده به وسیله پژوهشکده هوا - خورشید مشهد مطابق جدول 1 و خواص مکانیکی چسب آرالدایت 2011 که برای ایجاد اتصال چسبی استفاده شده، مطابق جدول 2 می‌باشد.

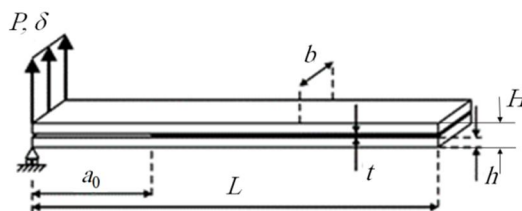


Fig. 1 Schematic representation of the DCB specimen [4]

شکل 1 نمای شماتیکی از نمونه DCB [4]

¹ Modified beam theory

² Compliance Calibration Method

³ Modified Compliance Calibration Method

⁴ Araldite

1-3- روش تیر اصلاح شده

معادله نرخ رهایی انرژی کرنشی در روش تیر ساده، برای یک تیر یکسرگیردار ساده به صورت [17]:

$$G = \frac{3P\delta}{2ba} \quad (1)$$

می‌باشد که P بار اعمالی، δ جابه‌جایی نقطه اعمال بار، b عرض نمونه و a طول ترک اولیه می‌باشد. در عمل این عبارت بدلیل اینکه تیر به طور کامل گیردار نیست و امکان چرخش در حین بارگذاری وجود دارد، مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی را بیشتر محاسبه می‌کند. به همین دلیل برای از بین بردن اثرات چرخش و اصلاح رفتار تیر یکسرگیردار، یک مقدار اصلاحی $|\Delta|$ به طول ترک a اضافه می‌شود $(a + |\Delta|)$. مقدار $|\Delta|$ به صورت عملی و از نمودار ریشه سوم نرمی $C^{1/3} = \left(\frac{\delta}{P}\right)^{1/3}$ برحسب طول ترک a بدست می‌آید. در نتیجه نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی در روش تیر اصلاح شده از رابطه:

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

محاسبه می‌شود.

2-3- روش کالیبره کردن نرمی

در روش کالیبره کردن نرمی ابتدا مقادیر بار بحرانی شروع رشد ترک و جابه‌جایی متناظر با آن را از نمودار نیرو - جابه‌جایی استخراج نموده، سپس نمودار لگاریتمی نرمی $\left(\log\left(\frac{\delta}{P}\right)\right)$ بر حسب لگاریتم طول ترک $\log(a)$ رسم می‌شود. در نتیجه نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی در روش کالیبره کردن نرمی با استفاده از رابطه [17]:

$$G_{IC} = \frac{nP_C\delta_C}{2ba} \quad (3)$$

محاسبه می‌شود که در آن n شیب نمودار $\log(C) - \log(a)$ می‌باشد.

3-3- روش اصلاح شده کالیبره کردن نرمی

در روش اصلاح شده کالیبره کردن نرمی که مشابه روش قبل می‌باشد با استفاده از شیب نمودار بی‌بعد شده، مقادیر طول ترک به ضخامت نمونه بر ریشه سوم مقادیر نرمی $(C^{1/3})$ ، می‌توان نرخ رهایی انرژی کرنشی¹ را بدست آورد. نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی با استفاده از روش اصلاح شده کالیبره کردن نرمی از طریق معادله [17]:

$$G_{IC} = \frac{3P_C^2 C^{2/3}}{2A_1 b H} \quad (4)$$

بدست می‌آید در این رابطه، H ضخامت نمونه و A_1 شیب نمودار بی‌بعد شده، مقادیر طول ترک به ضخامت نمونه بر حسب ریشه سوم مقادیر نرمی $(C^{1/3})$ می‌باشد.

4- معیارهای تشخیص شروع رشد ترک

در استانداردها و منابع مربوطه روش‌هایی نیز برای تشخیص شروع رشد ترک ذکر شده است که در اینجا به سه مورد آنها اشاره می‌شود [17]:

1. انحراف از حالت خطی² (NL): این معیار بیان می‌کند که بار بحرانی برای شروع رشد ترک، انحراف از حالت خطی یا همان شروع غیرخطی شدن نمودار بار - جابه‌جایی می‌باشد.

2. مشاهده چشمی (VIS): در این حالت با استفاده از دوربین

مجهز به لنز مخصوص (چشم مسلح) شروع رشد ترک در حین بارگذاری رصد می‌شود.

3. انحراف 5% بار بحرانی حداکثر: در این حالت، پس از بدست

آوردن منحنی بار - جابه‌جایی، خطی از محل شروع منحنی اولیه رسم شده، طوری که به مقدار نرمی اولیه بدست آمده از قسمت خطی نمودار 5% اضافه می‌شود. اگر خط جدید منحنی بار - جابه‌جایی را در محلی بعد از نقطه بار حداکثر قطع کرد، در این صورت بار حداکثر به عنوان بار بحرانی شروع رشد ترک در نظر گرفته می‌شود.

شکل 4 به صورت شماتیک نقاط بدست آمده از معیارهای گفته شده را نشان می‌دهد. در این مقاله از معیار انحراف از حالت خطی برای تشخیص بار بحرانی شروع رشد ترک استفاده شده است.

5- مدل اجزای محدود

برای مدل‌سازی رشد ترک در اتصال چسبی دو صفحه کامپوزیتی از روش اجزای محدود توسعه یافته در نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. روش اجزای محدود توسعه یافته برای اولین بار برای تحلیل ترک و رشد آن بدون نیاز به شبکه بندی مجدد توسط بلیتچکو و همکارانش پیشنهاد شده است [18]. این روش تقریب غنی‌سازی محلی که دانش پیش بینی از حل را شامل می‌شود، بکار می‌گیرد. غنی‌سازی محلی برای هر گره پایه تعریف شده است و می‌تواند مستقیماً ناپیوستگی‌ها، گرادیان‌های بالا و تکینگی‌ها را در تقریب زدن مستقل از موقعیت مش، تعریف کند.

مهمترین کاربرد روش اجزای محدود توسعه یافته برای تحلیل مسائل در زمینه مکانیک شکست الاستیک خطی³ می‌باشد. بدلیل سازگاری مدل با شرایط مکانیک شکست الاستیک خطی این مدل‌سازی بر مبنای این تئوری انجام شده است. از جمله مهمترین شرایط مکانیک شکست الاستیک خطی همسانگرد بودن ماده و محدود بودن طول ترک اولیه (طول ترک اولیه باید کمتر از نصف طول نمونه باشد) می‌باشد [19]؛ که در نرم‌افزار آباکوس چسب به عنوان یک ماده ایزوتروپیک در نظر گرفته شده است. در این مسئله با توجه به بزرگی قابل توجه عرض نمونه نسبت به ضخامت چسب که ترک در آن رشد می‌کند از مدل دو بعدی برای کاهش زمان محاسبات استفاده شده است. در مدل‌سازی دوبعدی رشد ترک به روش اجزای محدود توسعه یافته برای ایجاد ترک اولیه از مدل میله‌ای استفاده شده است. در مدل‌سازی انجام گرفته خواص مکانیکی صفحات کامپوزیتی مطابق با جدول 1 و خواص مکانیکی چسب مطابق با جدول 2 می‌باشد. با توجه به دوبعدی بودن مدل‌سازی برای شبکه‌بندی اجزای محدود از المان‌های کرنش صفحه‌ای چهار گره‌ای (CPE4R) استفاده شده است. تعداد المان‌های بکار رفته برای انجام مدل‌سازی 33184 عدد می‌باشد. شکل 5 نمای شبکه‌بندی شده مدل‌ها را نشان می‌دهد. برای مدل‌سازی رشد ترک مطابق معادله 5 از معیار توانی⁴ استفاده شده است [20]. در این معیار مقدار میانگین نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود I محاسبه شده از نتایج تجربی به عنوان ورودی نرم افزار در نظر گرفته شده است.

$$\frac{G_{equiv}}{G_{equivC}} = \left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^{a_m} + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^{a_n} + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIC}}\right)^{a_0} \quad (5)$$

³ Linear Elastic Fracture Mechanics

⁴ Power Law

¹ Strain Energy Release Rate

² Deviation from Linearity

مخصوص وجود نداشت، اولین افت در بار اعمالی حداکثر بار که تقریباً بعد از شروع غیر خطی شدن رخ می‌دهد، به عنوان بار بحرانی شروع رشد ترک در نظر گرفته شده است.

در این نمودارها، بیشترین بار بحرانی مربوط به کمترین طول ترک اولیه می‌باشد و با افزایش طول ترک بار اعمالی برای شروع رشد ترک کاهش می‌یابد. تقریباً در همه نمونه‌ها نمودار به صورت خطی تا شکست اولیه پیش رفته است.

همانطور که گفته شد، با استفاده از این نمودار مقادیر بار بحرانی و جابه‌جایی مربوطه استخراج شده است. شکل 8 نمودار $C^{1/3}$ بر حسب طول ترک را نشان می‌دهد. با عبور یک منحنی درجه یک از نقاط بدست آمده می‌توان مقدار $|\Delta|$ در معادله 2 در روش MBT را بدست آورد. در اینجا مقدار $|\Delta| = 4 \text{ mm}$ بدست آمده است.

در شکل 9 نمودار $\log C$ بر حسب $\log a$ نشان داده شده است. از این نمودار نیز برای به دست آوردن مقدار n در معادله 3 در روش CCM استفاده شده است. در اینجا مقدار n برابر با $n = 2.7696$ بدست آمده است.

نمودار دیگری که از نتایج نمودار نیرو - جابه‌جایی بدست می‌آید، نمودار a/H بر حسب $C^{1/3}$ می‌باشد، که در شکل 10 نشان داده شده است. با عبور معادله درجه یک از این نقاط مقدار A_1 در روش اصلاح شده کالیبره کردن نرمی برابر با مقدار $A_1 = 18.881$ بدست می‌آید. با قرار دادن مقدار A_1 در معادله 4 می‌توان مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی با روش اصلاح شده کالیبره کردن نرمی را محاسبه نمود.

شکل 11 نمودار انرژی شکست در مود اول بر حسب طول ترک را نشان می‌دهد که با استفاده از روش تیر اصلاح شده (MBT)، روش کالیبره کردن نرمی (CCM) و روش اصلاح شده کالیبره کردن (MCCM) به دست آمده است. مقادیر انرژی شکست بدست آمده از روش‌های مختلف تقریباً به یکدیگر نزدیک می‌باشد. نمودار مقاومت یا نمودار انرژی شکست بر حسب طول ترک برای مواد ترد مسطح است، چرا که انرژی سطح نسبت به خواص مواد تغییر نمی‌کند [19]. پس با توجه به اینکه در نمودار مقاومت بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی، با افزایش طول ترک مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی مود اول به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کند که همان نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی می‌باشد و می‌توان گفت که در نمونه DCB شکست غالب، شکست ترد است.

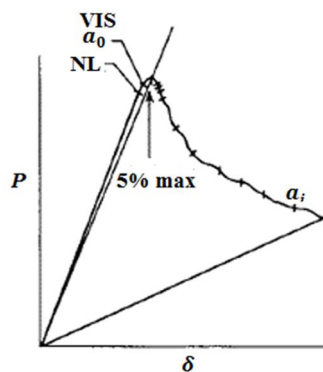


Fig. 4 Crack growth initiation criteria [17]

شکل 4 معیارهای شروع رشد ترک [17]

توان‌های این معادله در این تحلیل برابر با $a_m = a_n = a_0 = 1$ در نظر گرفته شده است.

شرایط مرزی بکار رفته برای مدل‌سازی همانند شکل 6 مطابق با شرایط آزمایش‌های تجربی می‌باشد. بار اعمالی به صورت جابه‌جایی رو به پایین به لبه پایینی سمت چپ نمونه وارد شده و تغییر مکان در جهت دیگر ثابت شده است و لبه بالایی سمت چپ نمونه در تمامی جهات ثابت می‌باشد.

در نرم افزار آباکوس مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی محاسبه شده از نتایج تجربی به عنوان ورودی نرم افزار در نظر گرفته شده است. سپس برای بررسی چگونگی رشد ترک محل اتصال در مراحل مختلف قبل از شروع رشد ترک و بعد از شروع رشد ترک از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است و در نهایت فرآیند رشد ترک (نمودار نیرو - جابه‌جایی) حاصل از نتایج تجربی و مدل‌سازی با یکدیگر مقایسه شده است.

6- نتایج

در این قسمت نتایج بدست آمده از آزمایش تجربی و مدل‌سازی مود اول شکست در اتصالات چسبی کامپوزیتی ارائه شده است.

در ابتدا به بررسی نمودار نیرو - جابه‌جایی بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی برای نمونه‌ها پرداخته شده است. در شکل 7 این نمودار برای طول ترک‌های 40، 50، 60، 70 و 80 میلی‌متر ارائه شده است. لازم به ذکر است که این نمودار تا اولین افت در بار اعمالی رسم شده است. در واقع دلیل اینکه امکان مشاهده شروع رشد ترک با استفاده از دوربین مجهز به لنزهای

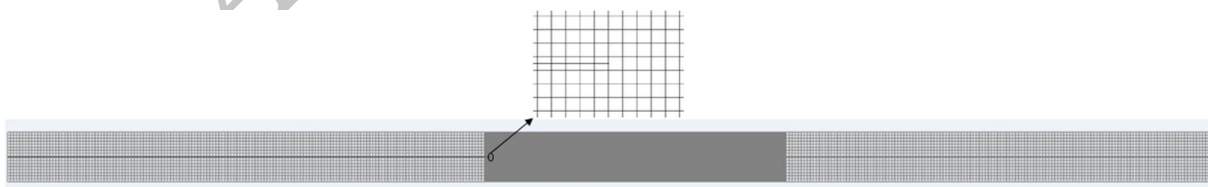


Fig. 5 Meshing view model DCB

شکل 5 نمای شبکه‌بندی شده مدل DCB

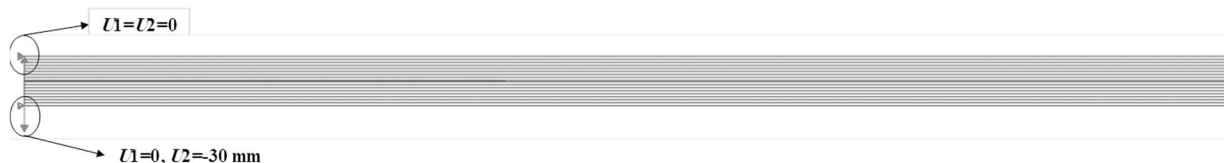


Fig. 6 DCB specimens boundary conditions

شکل 6 شرایط مرزی نمونه DCB

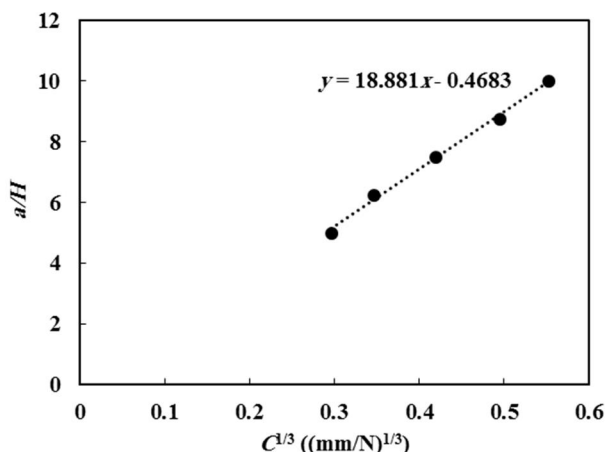


Fig. 10 a/H vs. $C^{1/3}$ curve for DCB specimen
شکل 10 نمودار a/H بر حسب $C^{1/3}$ برای نمونه‌های DCB

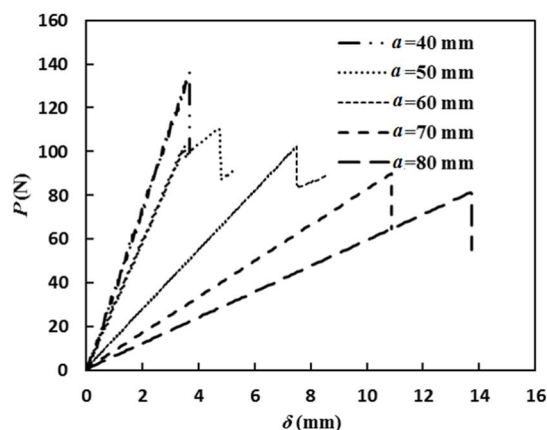


Fig. 7 Experimental load-displacement curves of the DCB specimens
شکل 7 نمودار نیرو-جابجایی حاصل از نتایج آزمایشگاهی نمونه‌های DCB

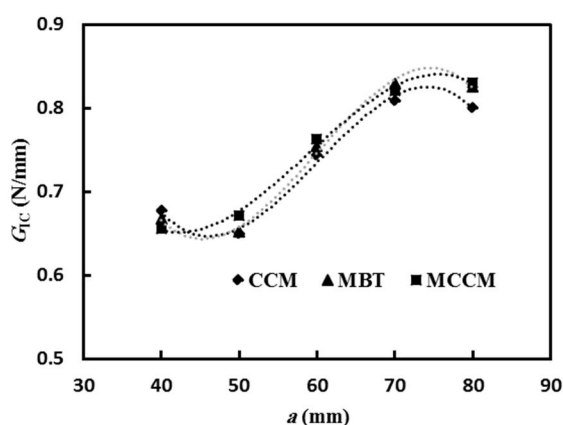


Fig. 11 Experimental R-curves obtained by the MBT, CCM & MCCM
شکل 11 نمودار مقاومت ماده بدست آمده از نتایج تجربی با سه روش MBT, MCCM و CCM

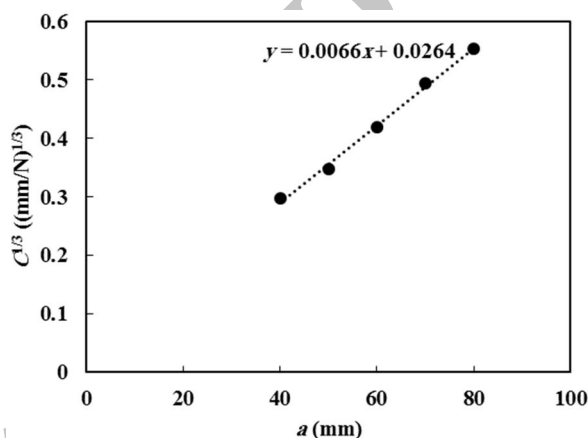


Fig. 8 $C^{1/3}$ vs. crack length for DCB specimens
شکل 8 نمودار $C^{1/3}$ بر حسب طول ترک برای نمونه‌های DCB

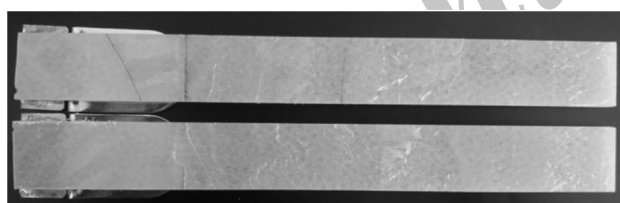


Fig. 12 Failure surfaces for DCB sample
شکل 12 سطوح شکست برای نمونه DCB

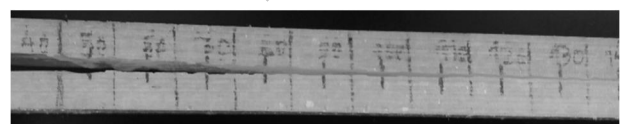


Fig. 13 Crack growth path in the DCB sample
شکل 13 مسیر رشد ترک در نمونه DCB

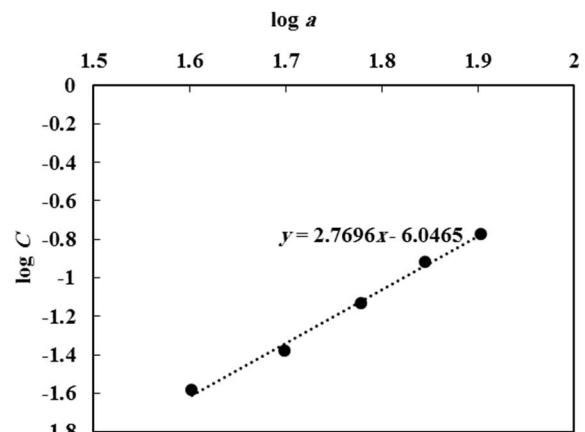


Fig. 9 $\log C$ vs. $\log a$ curve for DCB specimens
شکل 9 نمودار $\log C$ بر حسب $\log a$ برای نمونه‌های DCB

جدول 3 مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی بدست آمده از سه روش تیر اصلاح شده، روش کالیبره کردن نرمی و روش اصلاح شده کالیبره کردن نرمی برای مود اول شکست را نشان می‌دهد.

برای انجام مدل‌سازی مقدار میانگین نرخ رهایی انرژی کرنشی محاسبه شده به روش اصلاح شده کالیبره کردن نرمی به عنوان ورودی نرم افزار در نظر گرفته شده است. سایر خواص مواد مطابق جداول 1 و 2 می‌باشد. شکل

شکل‌های 12 و 13 به ترتیب سطوح شکست و مسیر رشد ترک در نمونه تیر یکسرگیردار دولبه با طول ترک اولیه 40 میلی‌متر را نشان می‌دهند. این دو شکل به خوبی نشان می‌دهند که ترک در لایه چسب رشد می‌کند، البته نکته مهم تغییر مسیر رشد ترک در لایه چسب می‌باشد؛ که به نظر می‌رسد این تغییر مسیر رشد ترک می‌تواند باعث افزایش چقرمگی چسب در طی مسیر رشد ترک باشد.

ثابت اتفاق می‌افتد. نکته قابل بحث این است که در نمونه‌ها با طول ترک کمتر بدلیل بالا بودن محدوده نیروهای اعمالی و طولانی بودن مسیر رشد ترک این حالت زیگزاگی دفعات بیشتری تکرار شده است، اما با افزایش طول ترک اولیه که موجب کاهش محدوده نیروی اعمالی و مسیر رشد ترک می‌گردد، حالت زیگزاگی با دفعات کمتری اتفاق می‌افتد و در نتیجه نمودار نیرو جابه‌جایی در طول ترک اولیه بیشتر، دارای حالت پایدارتر می‌باشد. نکته مهم دیگر در این مورد تغییر مسیرهای رشد ترک در داخل لایه چسب در آزمایش تجربی می‌باشد که در شکل 13 نشان داده شده است. این تغییر مسیرها در ابتدای رشد ترک به دفعات ایجاد شده، که در نتیجه آن حالت زیگزاگی در نمودار نیرو - جابه‌جایی به دفعات تکرار شده است، اما با ادامه

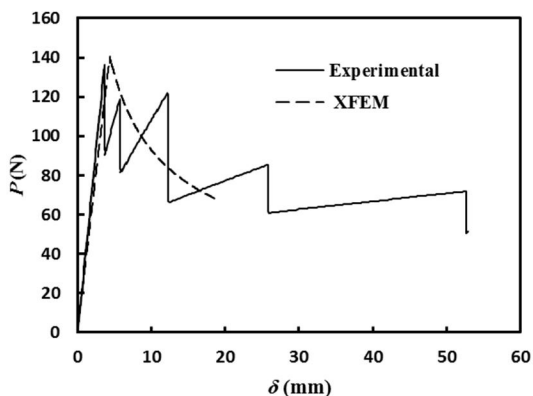


Fig. 15 Load – displacement curve with crack length 40 mm
 شکل 15 نمودار نیرو - جابه‌جایی با طول ترک 40 میلیمتر

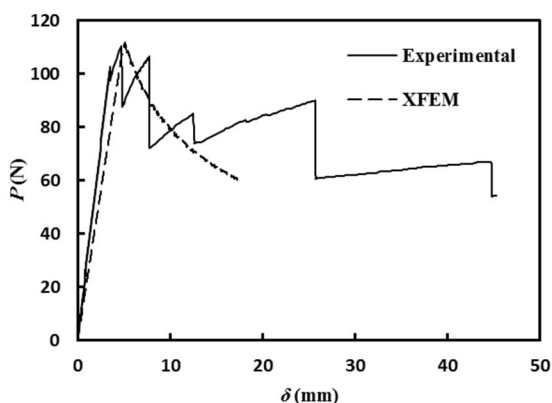


Fig. 16 Load – displacement curve with crack length 50 mm
 شکل 16 نمودار نیرو - جابه‌جایی با طول ترک 50 میلیمتر

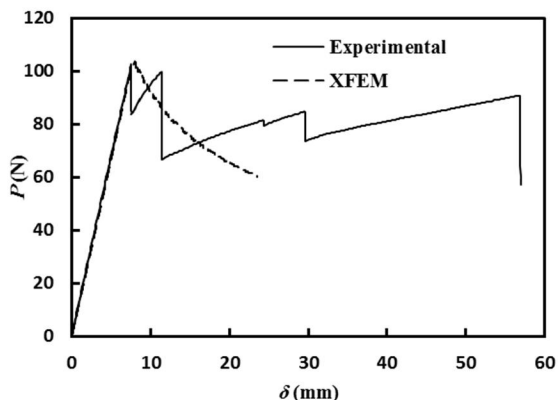


Fig. 17 Load – displacement curve with crack length 60 m
 شکل 17 نمودار نیرو - جابه‌جایی با طول ترک 60 میلیمتر

14 رشد ترک نمونه DCB در نرم افزار آباکوس را نشان می‌دهد. پارامتر PHILSM یک تابع فاصله علامت می‌باشد که فاصله نودها از سطح ترک را نشان می‌دهد به صورتی که نودهای بالایی سطح ترک دارای مقدار مثبت و نودهای پایینی سطح ترک دارای مقدار منفی می‌باشند [20]. همانطور که مشخص است مقادیر مثبت و منفی تقریباً با یکدیگر برابر می‌باشند که بدلیل تقارن نمونه تیریکسرگردار دولبه است. اگر ترک در وسط لایه چسب قرار داشته باشد در وسط لایه چسب نیز رشد می‌کند.

شکل‌های 15 تا 19 نمودار نیرو - جابه‌جایی بدست آمده از نتایج آزمایش تجربی و مدل‌سازی به ترتیب با طول ترک‌های اولیه 40، 50، 60، 70 و 80 میلیمتر را نشان می‌دهند. در این نمودارها نتایج آزمایش تجربی و مدل‌سازی با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نمودارهای تجربی و مدل‌سازی در نقاط بار بحرانی شروع رشد ترک و جابه‌جایی متناظر با آن و قسمت خطی نمودار تا حدود خیلی زیادی بر هم منطبق می‌باشند. این نمودارها به دو بخش تقسیم می‌شوند؛ بخش اول که قسمت خطی نمودار می‌باشد و در این قسمت نیرو و جابه‌جایی به صورت خطی افزایش می‌یابند و هنوز هیچ‌گونه رشد ترکی اتفاق نیافتاده است، بخش دوم که با افزایش جابه‌جایی نیرو به صورت غیر خطی کاهش می‌یابد که این قسمت نشان دهنده حالت رشد ترک در نمونه‌ها می‌باشد.

نکته مهم در قسمت غیر خطی نمودار نیرو-جابه‌جایی حالت زیگزاگی نمودارهای فوق در نتایج تجربی می‌باشد. دلیل زیگزاگ شدن نمودار نیرو جابه‌جایی بعد از رشد ترک نحوه بارگذاری می‌باشد، زیرا بارگذاری از نوع کنترل جابه‌جایی بوده و در این نوع بارگذاری رشد ترک در یک جابه‌جایی

جدول 3 مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی

طول ترک (mm)	روش تیر اصلاح شده	روش کالیبره کردن نرمی	روش اصلاح شده کالیبره کردن نرمی
40	677.27	677.626	652.22
50	651.964	650.045	671.452
60	754.824	743.311	762.992
70	828.77	808.842	720.918
80	825.615	800.318	830.855
میانگین	747.68	739.945	727.68

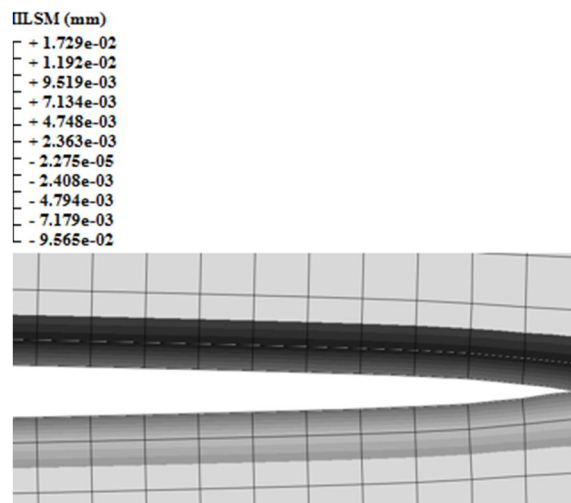


Fig. 14 crack growth in specimens DCB
 شکل 14 رشد ترک در نمونه DCB

DCB وجود دارد، می‌توان گفت که در حین رشد ترک مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مقدار ثابتی دارد.

با قرار دادن مقادیر نرخ رهایی انرژی کرنشی در معادله 6 و با توجه به این موضوع که مدل‌سازی در حالت کرنش صفحه‌ای انجام شده است، مقادیر ضریب شدت تنش در هر لحظه برای هر کدام از نمونه‌ها قابل محاسبه می‌باشد [21]. شکل 22 تغییرات ضریب شدت تنش بر حسب نیرو را نشان می‌دهد.

$$J = \frac{1}{E'} (K_I^2) \quad (6)$$

که در آن J با میزان انرژی آزاد شده‌ی شکست برای مواد الاستیک خطی، G برابر است و K_I ضریب شدت تنش برای مود I می‌باشد. E' ضریب یانگ مؤثر است که با استفاده از مدول یانگ E و نسبت پواسون ν به صورت زیر می‌باشد:

$$E' = \begin{cases} \frac{E}{1-\nu^2} & \text{plane strain} \\ E & \text{plane stress} \end{cases} \quad (7)$$

در نمودار ضریب شدت تنش - بار اعمالی با افزایش بار اعمالی ضریب شدت تنش به صورت خطی افزایش می‌یابد. با شروع رشد ترک و رسیدن نیروی اعمالی به مقدار حداکثر خود ضریب شدت تنش در یک مقدار ثابت که همان چقرمگی چسب است، ثابت باقی می‌ماند. با توجه به شکل 20 و نتایج مدل‌سازی مقدار چقرمگی شکست برای چسب آرالدایت 2011 در مود یاول شکست برابر با $K_{IC} = 39.56 \text{ N/mm}^{3/2}$ می‌باشد.

شکل 23 نمودار تنش گسیختگی بر حسب ضریب شدت تنش برای نمونه تیر یکسر گیردار با طول ترک 40 میلی‌متر در المان نوک ترک را نشان می‌دهد. دلیل ترد بودن چسب از معیار حداکثر تنش اصلی برای محاسبه تنش گسیختگی در المان نوک ترک استفاده شده است. در این نمودار با توجه به تردی ذاتی چسب آرالدایت 2011 و شرایط مکانیک شکست الاستیک خطی که در مدل‌سازی اعمال شده است، بین تنش گسیختگی و ضریب شدت تنش قبل از شروع رشد ترک رابطه خطی وجود دارد و با رسیدن شدت تنش به مقدار بحرانی خود و شروع رشد ترک، تنش در المان تخریب شده به سمت صفر میل می‌کند.

7- نتیجه‌گیری

در این تحقیق نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی برای چسب آرالدایت 2011

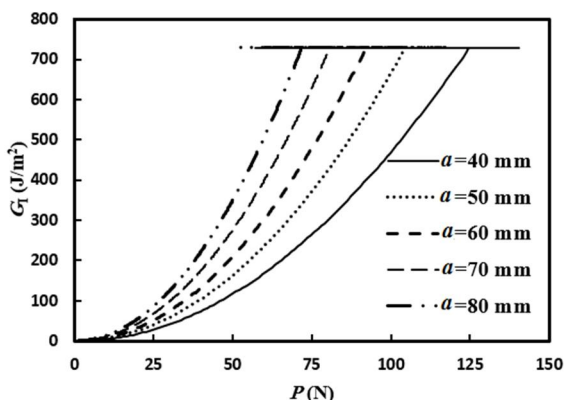


Fig. 20 Strain energy release rate – Load curve for DCB specimens with different crack length

شکل 20 نمودار نرخ رهایی انرژی کرنشی - نیرو برای نمونه‌های DCB با طول ترک‌های مختلف

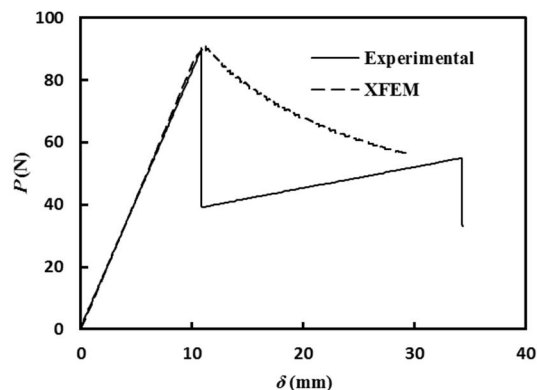


Fig. 18 Load – displacement curve with crack length 70 m

شکل 18 نمودار نیرو - جابه‌جایی با طول ترک 70 میلی‌متر

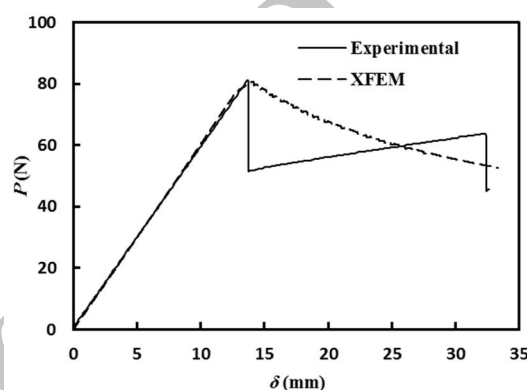


Fig. 19 Load – displacement curve with crack length 80 m

شکل 19 نمودار نیرو - جابه‌جایی با طول ترک 80 میلی‌متر

رشد ترک این تغییر مسیر رشد ترک کمتر شده و در نتیجه حالت زیگزآگی در نمودار نیرو - جابه‌جایی کمتر اتفاق می‌افتد.

یکی دیگر از نمودارهایی که می‌توان با استفاده از نتایج حل عددی از آن برای تعیین رفتار ماده استفاده کرد، نمودار نرخ رهایی انرژی کرنشی بر حسب نیرو می‌باشد. در این تحقیق نرخ رهایی انرژی کرنشی در اولین المانی که ترک در آن شروع به رشد می‌کند، در هر مرحله اعمال بار مورد بررسی قرار گرفته است. شکل 20 نمودار نرخ رهایی انرژی کرنشی بر حسب بار اعمالی با طول ترک‌های متفاوت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در این نمودار مشخص است، با افزایش نیرو و قبل از شروع رشد ترک نرخ رهایی انرژی کرنشی به صورت یک منحنی افزایش می‌یابد، اما هنگامی که ترک شروع به رشد می‌کند و نیرو به حداکثر مقدار خود می‌رسد، همراه با افت نیرو، نرخ رهایی انرژی کرنشی در یک مقدار ثابت باقی می‌ماند. نکته مهم در این نمودار این است که با رسیدن نرخ رهایی انرژی کرنشی به مقدار بحرانی خود، همچنان نیرو در حال افزایش است که این موضوع در اثر چرخش نمونه DCB می‌باشد.

شکل 21 نمودار نرخ رهایی انرژی کرنشی بر حسب جابه‌جایی محل اعمال بار را نشان می‌دهد. در این نمودار با افزایش جابه‌جایی، نرخ رهایی انرژی کرنشی افزایش می‌یابد. با رسیدن نرخ رهایی انرژی کرنشی به مقدار بحرانی خود، ترک شروع به رشد کرده و با افزایش جابه‌جایی و رشد ترک میزان نرخ رهایی انرژی کرنشی در یک مقدار ثابت می‌ماند. با توجه به این نمودار و رابطه مستقیم که بین جابه‌جایی دهانه ترک و رشد ترک در نمونه

توسعه مدل سازی شده است. سپس عوامل مختلفی که در شکست اتصال چسبی موثر می باشند، مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می دهد که:

در نمونه های DCB با توجه به نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی با افزایش طول ترک اولیه مقدار نیروی بحرانی شروع رشد ترک کاهش می یابد، اما جابه جایی متناظر با آن افزایش می یابد.

در نتایج آزمایشگاهی مسیر رشد ترک در لایه چسب دچار تغییراتی می شود که این تغییرات در مسیر رشد ترک با افزایش رشد ترک کمتر شده است. از طرفی این تغییر مسیرها در ابتدای رشد ترک باعث حالت نوسانی در نمودار نیرو - جابه جایی می شود و در نتیجه در نمونه ها با طول ترک اولیه بیشتر که باعث کمتر شدن مسیر رشد ترک می شود، نمودار نیرو - جابه جایی دارای حالت پایداری بیشتری می باشد.

نتایج آزمایش تجربی برای نمونه DCB نشان می دهد که با افزایش طول ترک، منحنی مقاومت ماده به سمت یک مقدار ثابت میل می کند که این موضوع با توجه به تردی ذاتی چسب منطقی می باشد.

با توجه به نتایج آزمایش تجربی مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی مود اول شکست برای چسب آرالدایت 2011 برابر با 727.68 J/m^2 محاسبه شده است. بدست آوردن نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی از نتایج تجربی کمک خواهد کرد که در سازه ها و مدل های مختلف که از چسب آرالدایت 2011 استفاده می شود، بتوان از این مقدار استفاده کرد و شبیه سازی های دقیقتری انجام داد.

در مدل سازی نمونه DCB نمودار نیرو - جابه جایی در تمام طول ترکها دارای حالت پایداری می باشد و روش اجزای محدود توسعه یافته در سنجش مقدار نیروی حداکثر و جابه جایی متناظر آن و قسمت خطی نمودار نیرو - جابه جایی دارای توانایی مطلوبی می باشد.

در نمونه DCB در مرحله افزایش بار مقدار نرخ رهایی انرژی کرنشی به صورت منحنی افزایش می یابد. با رسیدن نرخ رهایی انرژی کرنشی به مقدار بحرانی خود، همچنان نیرو افزایش می یابد، در حالی که نرخ رهایی انرژی کرنشی مقدار ثابتی دارد. سپس با کاهش نیروی اعمالی نرخ رهایی انرژی کرنشی در همان مقدار بحرانی خود ثابت می ماند.

در مدل سازی رشد ترک به روش اجزای محدود توسعه یافته با توجه به اینکه ترک در وسط لایه چسب مدل شده است و نمونه DCB دارای حالت تقارن می باشد، مسیر رشد ترک نیز در وسط لایه چسب است. البته در نمونه آزمایشگاهی تغییراتی در مسیر رشد ترک درون چسب ایجاد می شود که می توان آنرا بعنوان مکانیزم افزایش چقرمگی شکست در چسب در نظر گرفت.

با توجه به دوبردی بودن مدل سازی و شرایط کرنش صفحه ای مقدار چقرمگی شکست برای چسب آرالدایت 2011 در مود یک شکست برابر با $K_{IC} = 39.56 \text{ N/mm}^{3/2}$ محاسبه شده است.

8- فهرست علائم و نشانه ها

a	طول ترک اولیه (mm)
b	عرض نمونه تیر یکسر گیردار دولبه (mm)
C	نرمی (mm/N)
E	مدول یانگ (GPa)
G	نرخ رهایی انرژی کرنشی (J/m^2)
H	ضخامت کل نمونه (mm)

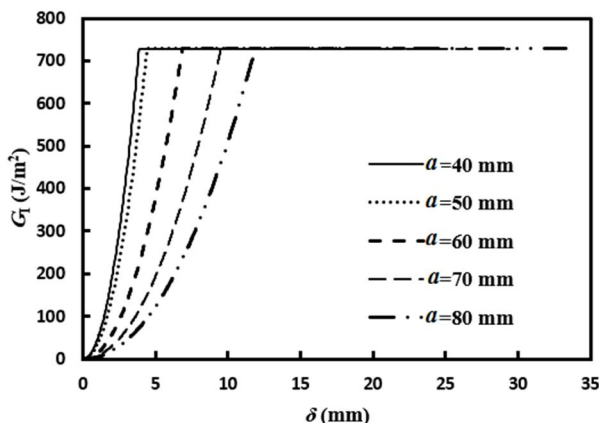


Fig. 21 Strain energy release rate – displacement curve for DCB specimens with different crack length

شکل 21 نمودار نرخ رهایی انرژی کرنشی - جابه جایی برای نمونه های DCB با طول ترک های مختلف

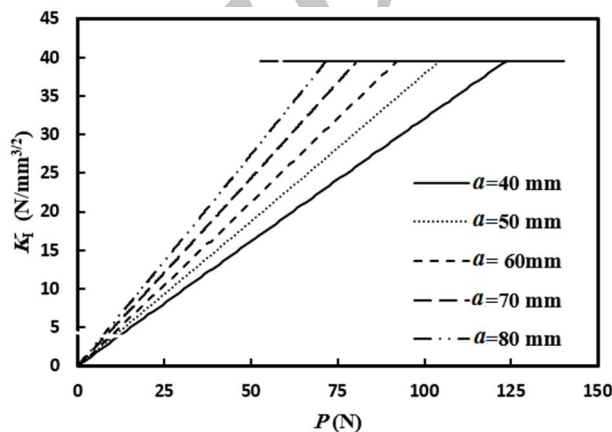


Fig. 22 Stress intensity factor – Load curve for DCB specimens with different crack length

شکل 22 نمودار ضریب شدت تنش - نیرو برای نمونه های DCB با طول ترک های مختلف

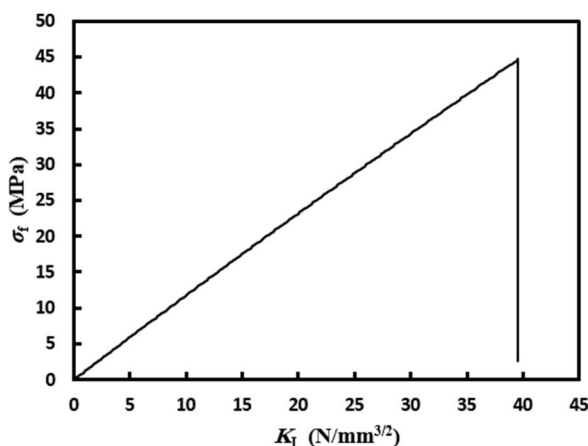


Fig. 23 Failure stress - Stress intensity factor curve

شکل 23 نمودار تنش گسیختگی بر حسب ضریب شدت تنش

در مود اول شکست با استفاده از نمونه تیر یکسر گیردار دولبه از نتایج تجربی محاسبه شده است. بعد از محاسبه نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی بصورت تجربی، رشد ترک در اتصال چسبی با استفاده از روش اجزای محدود

pp. 8–14, 2012.

[7] G. F. Dias, M. de Moura, J. A. G. Chousal, J. Xavier, Cohesive laws of composite bonded joints under mode I loading, *Composite. Structures*, Vol. 106, No. 1, pp. 646–652, 2013.

[8] G. Li, C. Li, An analytical analysis of energy release rate in bonded composite joints in a mode I condition, *Composites Part B: Engineering*, Vol. 44, No. 1, pp. 704–713, 2013.

[9] J. De Gracia, A. Boyano, A. Arrese, F. Mujika, A new approach for determining the R-curve in DCB tests without optical measurements, *Engineering. Fracture Mechanic.*, Vol. 135, No. 1, pp. 274–285, 2015.

[10] J. L. C. Sosa, N. Karapurath, Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method, *Composite Science and Technology*, Vol. 72, No. 7, pp. 788–791, 2012.

[11] D. M. Grogan, S. B. Leen, C. M. Ó. Brádaigh, An XFEM-based methodology for fatigue delamination and permeability of composites, *Composite. Structures*, Vol. 107, No. 1, pp. 205–218, 2014.

[12] T. Nagashima, H. Suemasu, X-FEM analyses of a thin-walled composite shell structure with a delamination, *Composite. Structures*, Vol. 88, No. 9, pp. 549–557, 2010.

[13] C. Ye, J. Shi, G. J. Cheng, An extended finite element method (XFEM) study on the effect of reinforcing particles on the crack propagation behavior in a metal–matrix composite, *International Journal of Fatigue*, Vol. 44, No. 1, pp. 151–156, 2012.

[14] D. Motamedi, S. Mohammadi, Fracture analysis of composites by time independent moving-crack orthotropic XFEM, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 54, No. 1, pp. 20–37, 2012.

[15] F. Ashenai Ghasemi, A. Pourkamali Anaraki, A. H. Rouzbahani, Using XFEM for investigating the crack growth of cracked aluminum plates repaired with fiber metal laminate (FML) patches, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 14, pp. 15–27, 2014. (In Persian فارسی)

[16] M. Kashfuddoja, M. Ramji, Adhesive strain measurement in patch repaired CFRP laminate using 2D DIC, in *The 19th International Conference on Composite Materials (ICCM-19)*, Quebec, Canada, July, 2013.

[17] ASTM, D5528-01: Standard test method for mode I interlaminar fracture toughness of unidirectional fiber-reinforced polymer matrix composites, *American Standard of Testing Methods*, vol. 03, no. Reapproved 2007. pp. 1–12, 2014.

[18] T. Belytschko, T. Black, “Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing, *International Journal Numerical Methods in Engineering*, Vol. 45, No. 5, pp. 601–620, 1999.

[19] T. L. Anderson, *Fracture mechanics: fundamentals and applications*. Third Edition, pp. 38–40, Boca Raton: CRC press, 2005.

[20] S. Modeling, C. A. E. User, A. A. User, S. Reference, A. Keywords, R. Manual, and A. A. User, *Abaqus 6.11*, pp. 1–1349, Accessed on 20 January 2011; <http://www.3ds.com/products-services/simulia/201>.

[21] J. R. Rice, A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks, *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 35, No. 2, p. 379, 1968.

ضخامت هر کدام از صفحات کامپوزیتی (mm)	h
ضریب شدت تنش مود اول ($N/mm^{3/2}$)	K_I
بار اعمالی (N)	P
علایم یونانی	
جابه جایی نقطه اعمال بار	δ
طول اصلاح شده ترک مود اول (mm)	Δ
ضریب پواسون (بی بعد)	ν
تنش گسیختگی (MPa)	σ_f
زیر نویس ها	
بحرانی	c
معادل	equiv
مود اول	I
مود دوم	II
مود سوم	III

9- مراجع

[1] R. Campilho, M. De Moura, J. Domingues, Modelling single and double-lap repairs on composite materials, *Composite Science and Technology*, Vol. 65, No. 13, pp. 1948–1958, 2005.

[2] J. Garzon, V. Gupta, A. Simone, C. A. Duarte, Bridging scales with a generalized finite element method, *Procedia International Union of Theoretical and Applied Mechanics*, vol. 3, No. 1, pp. 172–191, 2012.

[3] N. Sukumar, Z. Y. Huang, J. H. Prévost, Z. Suo, Partition of unity enrichment for bimaterial interface cracks, *International Journal Numerical Methods in Engineering*, Vol. 59, No. 8, pp. 1075–1102, 2004.

[4] M. De Moura, R. Campilho, J. P. M. Gonçalves, Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading, *Composite Science and Technology*, Vol. 68, No. 10, pp. 2224–2230, 2008.

[5] A. Ameli, M. Papini, J. A. Schroeder, J. K. Spelt, Fracture R-curve characterization of toughened epoxy adhesives, *Engineering. Fracture Mechanics*, Vol. 77, No. 3, pp. 521–534, 2010.

[6] M. Khoshravan, F. A. Mehrabadi, Fracture analysis in adhesive composite material/aluminum joints under mode-I loading; experimental and numerical approaches, *International Journal of Adhesion & Adhesives*, Vol. 39, No. 1,