مجله مهندسی مکانیک، شماره پیاپی ۷۸، جلد ۴۷، شماره ۱، بهار، ۱۳۹۶، صفحه ۱۳۱-۱۳۹

بررسی تجربی و عددی استحکام اتصال چسبی با مدل ناحیه چسبناک پی. پی. آر. اصلاح‌شده

محمدحسن شجاعی فرد استاد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

حامد سعیدی گوگرچین * استادیار، مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران ، تهران

محمدرضا غیبی دانشجوی دکتری، مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

محمد ارجمندی کارشناسی ارشد، مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

چکیده

هدف اصلی از انجام این پژوهش امکان‌سنجی بکارگیری مدل ناحیه چسبناک پی. پی. آر. اصلاح‌شده جهت شبیه‌سازی آسیب در لایه چسب اتصال تیر دو لبه یکسر گیردار با چسبنده‌های فلزی است. برای شبیه‌سازی عددی آسیب در لایه چسب، نخست از قانون کشش - جدایش دوخطی بهره برده شده است. با استفاده از نتایج منحنی نیرو - جابجایی حاصل از آزمون‌های تجربی و مقایسه آن با پاسخ عددی، پارامترهای چسبناک مدل دوخطی برای ضخامت مشخصی از چسب حاصل می‌گردد. در ادامه به کمک پارامترهای به دست آمده، پارامترهای چسبناک مدل پی. پی. آر. اصلاح‌شده استخراج می‌شود. با استخراج انرژی شکست و کالیبراسیون مدل‌های عددی، در نهایت مدل پی. پی. آر. اصلاح‌شده علاوه بر قابلیت کاربرد در اتصالات چسبی فلزی، برتری نسبی خود را نیز در مدل‌سازیِ بهتر چسب نشان می‌دهد. بررسی تاثیر پارامترهای هندسی طول ترک اولیه و ضخامت چسبنده‌ها بر سفتی و استحکام نهایی اتصال چسبی نیز نشان می‌دهد که افزایش طول ترک اولیه و ضخامت چسبنده‌ها، به ترتیب اثر وارون و مستقیم بر سفتی و استحکام اتصال دارد.

واژه‌های کلیدی: اتصال چسبی، تیر دو لبه یکسر گیردار، مدل ناحیه چسبناک، مدل پی. پی. آر. اصلاح‌شده ، چقرمگی شکست، اسیدشویی.

An Experimental and Numerical Study of Geometrical parameters' Effects on the Strength of Adhesively bonded aluminum Double-cantilever Beam Specimens Using Modified-PPR CZM

M. H. Shojaeefard Department of Mechanical Engineering, Iran University of science and technology, Tehran, Iran.

H. Saeidi Googarchin School of Automotive Engineering, Iran University of science and technology, Tehran, Iran.

M. R. Gheibi School of Automotive Engineering, Iran University of science and technology, Tehran, Iran.

M. Arjomandi School of Automotive Engineering, Iran University of science and technology, Tehran, Iran.

Abstract

The main objective of this study is the feasibility of using Modified Park-Paulino-Roesler (M-PPR) cohesive zone model to simulate The damage in adhesive layer of the double cantilever beam specimen with metal adherents. Considering VIS method for capturing the crack initiation, fracture energy of Araldite® AV138 adhesive with bond-line thickness equal 0.2 mm has been identified based on the linear elastic fracture mechanics (i.e. classic beam theory (CBT), corrected beam method (CBM) and compliance based beam method (CBBM)) and J-integral method (Pradeep method). Following, the bi-linear traction-separation law is first utilized to numerically simulate damage in adhesive layer. The force-displacement curve results obtained through experiments would further be compared with the simulated model and thus bi-linear parameters for this specific adhesive thickness would be inversely obtained. The M-PPR cohesive parameters can be determined by satisfying the boundary conditions along with bi-linear extracted cohesive parameters. First, it is concluded that CBBM is the best method to obtain adhesive fracture toughness in mode I. Using the obtained cohesive parameters and calibration of both models, M-PPR cohesive model in addition to use in metal adhesive joints, presented comparative advantage relative to bi-linear model to simulate adhesive joints under peeling. Meanwhile, effects of the geometrical parameters such as the initial length of the crack and the thickness of substrates on the ultimate strength and stiffness of the adhesively bonded joint have been evaluated.

Keywords : Adhesive joint, double cantilever beam, modified Park-Paulino-Roesler cohesive zone model, fracture toughness, etching.

۱- مقدمه

اتصالات چسبی در صنعت خودروسازی برای غلبه بر محدودیت‌های جوش نقطه‌ای توسعه داده شده است. تعداد، جنس و ضخامت ورق‌های مورد استفاده در یک اتصال و نیز عدم امکان دسترسی به هر دو طرف ورق‌ها حین ایجاد اتصال از جمله این محدودیت‌ها محسوب می‌شوند [۱, ۲]. از سوی دیگر، نیاز روز افزون به خودروهای سبک‌تر، امکان‌سنجی استفاده از مواد سبک‌تر را در پی داشته است، به طوریکه مطلوب است هزینه تمام‌شده خودروها با کاهش تعداد بخش‌ها یا فرایندهای تولید ارزان‌تر، کاهش یابد. در این میان استفاده از ورق‌های آلومینیومی در کنار ورق‌های فولادی مورد استفاده در خودرو جهت کاهش وزنِ سازه بدنه آن، با استقبال

* نویسنده مکاتبه کننده، آدرس پست الکترونیکی: hsaeidi@iust.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۵/۰۹/۱۵
تاریخ پذیرش: ۹۶/۰۲/۱۸

چشمگیری مواجه شده است. مزیت مثال زدنی اتصالات چسبی در ایجاد اتصال بین مواد غیر مشابه، طراحان خودرو را به استفاده روز افزون از این روش سوق داده است. در این رابطه، مزایای توزیع تنش در محل اتصال و میراکنندگی ارتعاشاتی این اتصالات مزید بر علت بوده است.

امروزه برای مدل‌سازی لایه چسب در اتصالات چسبی، عمدتاً از مدل ناحیه چسبناک استفاده می‌شود. این مدل که از پدیده شکست بین اتمی نشأت گرفته است به کمک قوانین کشش - جدایش توصیف می‌گردد. این قوانین به کمک پارامترهای چسبناک (شکل قانون کشش - جدایش، سفتی اولیه، کشش چسبناک، انرژی شکست) تعیین می‌گردند. تعیین دقیق پارامترهای مشخص‌کننده مدل‌های ناحیه چسبناک همواره با مشکلاتی همراه بوده است [۳]. این پارامترها از سه طریق قابل دستیابی هستند: تکنیک تعیین مشخصه[1]، روش مستقیم[2] و و روش وارون[3]. در تکنیک تعیین مشخصه، هر کدام از پارامترهای مدل ناحیه چسبناک به طور مستقل و طی آزمون‌های مشخصی استخراج می‌شود [۴]. اما این تکنیک به دلیل دشواری انجام آزمایشات خاص آن و در نهایت همبستگی نه چندان خوب پارامترهای استخراج شده با یکدیگر، تقریباً مورد استقبال قرار نگرفته است.

برای استخراج پارامترهای مدل‌های ناحیه چسبناک، به تازگی از روش‌های مستقیم بهره گرفته می‌شود. این روش‌ها یا مبتنی بر مکانیک شکست الاستیک خطی هستند [۵-۹] یا بر پایه انتگرال جِی استوار گشته‌اند [۱۰-۱۳]. دشواری پایش ترک[4] و عرض بازشدگی دهانه ترکِ[5] اولیه به خصوص در چسب‌های ترد از عمده موارد بازدارنده جهت استفاده از این روش می‌باشند.

بنابراین کاربرد روش وارون برای استخراج پارامترهای مدل ناحیه چسبناکِ چسب‌های ترد توصیه می‌شود. در این روش نخست شکل قانون کشش - جدایش[6] متناسب با چسب مورد استفاده انتخاب می‌شود و در ادامه پارامترهای چسبناک با به حداقل رساندن اختلاف نتایج عددی با نتایج تجربی به دست می‌آید [۱۴].

چاندرا و همکارانش مرور مفصلی بر مدل‌های ناحیه چسبناک ارائه کردند و نیز مقایسه‌ای بین برخی از نتایج دو قانون مختلف نمایی و دوخطی انجام دادند. ایشان نشان دادند که شکل قانون کشش – جدایش اثر قابل توجهی روی نتایج عددی شبیه‌سازی‌ها دارد و بنابراین باید به دقت انتخاب شود و پارامترهای آن بر مبنای آزمون‌های تجربی مناسبی استخراج گردد [۱۵].

بیل و استیگ به کمک روابط مبتنی بر مکانیک شکست خطی و غیر خطی، چقرمگی شکست اتصال تیر دو لبه یکسر گیردار[7] (DCB) را مورد ارزیابی قرار دادند. ایشان بیان کردند که خطاهای ناشی از رفتارهای غیر خطی چسب‌ها با افزایش طول پیش ترک افزایش می‌یابد [۱۶]. بادر [۱۷] و داسپ [۱۸] نشان دادند که رشد ناپایدار ترک مانع از پایش واضح طول ترک در زمان تست نمونه DCB می‌شود. به علاوه اینکه در این اتصالات چسبی رویت دهانه ترک در برخی موارد به خوبی امکان‌پذیر نیست که این موضوع به نوع چسب بستگی دارد [۱۹].

هان و سیگموند اختلاف قابل توجهی را میان نتایج جدایش لبه‌های نمونه DCB ای که با مدل چسبناک سه‌بعدی و مدل چسبناک دوبعدی کرنش صفحه‌ای شبیه‌سازی کرده بودند، مشاهده کردند [۲۰]. این اختلاف که ناشی از اثرات پواسون وابسته به خمش طولی چسبنده‌ها می‌باشد سبب تغییر شکل‌های غیر همسوی[8] چسبنده‌ها می‌شود. این امر باعث توزیع غیر یکنواخت G_{Ic} در عرض نمونه می‌شود که به نوبه خود منجر به افزایش رشد ترک نابالغ[9] در مرکز مدل سه بعدی می‌گردد. به عبارت دیگر، مدل دوبعدی ضمن اینکه پاسخ قابل قبولی ارائه می‌کند، با مشکلات همگرایی کمتری نیز روبرو است. بر این اساس، در این پژوهش نیز از مدل‌سازی دوبعدی برای شبیه‌سازی اتصال چسبی بهره گرفته می‌شود.

استفاده از مدل‌های ناحیه چسبناک برای طراحی اتصالات چسبی در خودرو با استقبال فزاینده‌ای مواجه شده است [۲۱]. با وجود این، انتخاب چسب و مدل چسبناک مناسب برای شبیه‌سازی آن همچنان حائز اهمیت است. در این پژوهش تلاش شده است که پارامترهای چسبناک اتصال چسبی تیر دو لبه یکسر گیردار با چسبنده‌های آلیاژ آلومینیومی و چسب ترد AV138 با روش متداول وارون تعیین گردد. شایان ذکر است که چقرمگی شکست چسب به دلیل وجود اثرات قیدی چسبنده‌ها، از مشخصات مادی نمونه حجمی آن قابل دستیابی نیست [۲۲, ۲۳] و بدین منظور از نمونه DCB به عنوان نمونه استاندارد بارگذاری در مود اول شکست استفاده می‌شود.

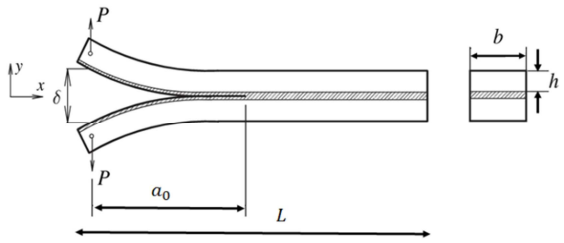
هدف اصلی در این پژوهش شبیه‌سازی آسیب در لایه چسب با استفاده از مدل ناحیه چسبناک پی. پی. آر. اصلاح‌شده[10] است. این مدل چسبناک نخست به منظور شبیه‌سازی پارگی در مواد نرم توسط باتاچارجی معرفی شده [۲۴] و تاکنون برای شبیه‌سازی اتصال چسبی با چسبنده‌های فلزی مورد بهره‌برداری قرار نگرفته است. علت بکارگیری این مدل علاوه بر شناسایی قابلیت آن جهت مدل‌سازی آسیب در اتصالات چسبی فلزی، بررسی میزان دقت آن در حل مسأله است. در این میان جهت استخراج پارامترهای این مدل از قانون کشش – جدایش دوخطی کمک گرفته می‌شود به این دلیل که طبق مطالعات صورت گرفته در حوزه اتصالات چسبی، استفاده از مدل چسبناک دوخطی به منظور شبیه‌سازی چسب‌های ترد، نتایج مطلوبی را به ارمغان آورده است [۱۴, ۲۵-۲۷].

۲- مبانی مسأله

۲-۱- تعیین انرژی شکست چسب

نخستین گام در شبیه‌سازی هر اتصال چسبی، تعیین پارامتر انرژی شکست چسب مورد استفاده می‌باشد. اتصال تیر دو لبه یکسر گیردار، رایج‌ترین نمونه جهت مطالعه استحکام چسب‌ها در مود اول شکست و پدیده تورق در کامپوزیت‌ها است. هندسه و پارامترهای این نمونه در شکل ۱ نشان داده شده است:

[1] Property determination technique
[2] Direct method
[3] Inverse method
[4] Crack propagation monitoring
[5] Crack opening displacement (COD)
[6] Traction-Separation law (TSL)
[7] Double cantilever beam
[8] Anticlastic deformations
[9] Not matured
[10] Modified Park-Paulino-Roesler (M-PPR)



شکل ۱ - هندسه و پارامترهای نمونه تیر دو لبه یکسر گیردار

در این شکل، b، عرض چسبنده، h، ضخامت چسبنده، a_0، طول ترک اولیه و δ جابجایی محل اعمال نیروی کششی، P، می‌باشد. روش‌های مختلفی مبتنی بر مکانیک شکست الاستیک خطی جهت محاسبه انرژی شکست چسب در این نمونه توسعه یافته است که همه آن‌ها از رابطه (۱) موسوم به رابطه اِروین - کِیس پیروی می‌کنند [۲۸]. در این رابطه، C معرّف نرمی بوده و به کمک رابطه (۲) تعیین می‌گردد.

$$G_{\mathrm{Ic}} = \frac{P^2}{2b}\frac{dC}{da} \qquad (۱)$$

$$C = \frac{\delta}{P} \qquad (۲)$$

به منظور محاسبه آهنگ رهایی انرژی کرنشی در مود اول شکست (G_{Ic})، بایستی مقادیر نیروی کششی، P، جابجایی اعمال شده، δ، و طول ترک، a، طی تاریخچه بارگذاری ثبت شوند. در این میان، رابطه (۳) که حاصل تئوری تیر کلاسیک[1] است، ساده‌ترین روش محاسبه G_{Ic} می‌باشد [۲۹]. در این روش به دلیل اینکه تیر کامل گیردار نیست، امکان چرخش حین بارگذاری وجود دارد و بنابراین مقدار چقرمگی شکست را بیشتر پیش‌بینی می‌کند.

$$G_{\mathrm{Ic}} = \frac{3P\delta}{2ba} \qquad (۳)$$

همچنین می‌توان از روش تیر اصلاح شده[2] به عنوان روش جایگزین استفاده کرد [۳۰]. در این روش، نرمی و انرژی شکست را می‌توان به ترتیب از رابطه (۴) و (۵) به دست آورد:

$$C = \frac{8\left(a+|\Delta|\right)^3}{Ebh^3} \qquad (۴)$$

$$G_{\mathrm{Ic}} = \frac{3P\delta}{2b\left(a+|\Delta|\right)} \qquad (۵)$$

که در این روابط، Δ، تصحیحی بر تغییر شکل و چرخش دهانه ترک است که مقدار آن از تحلیل رگرسیون خطی منحنی $C^{1/3}$ بر حسب a تعیین می‌گردد. البته باید تاکید کرد که روش تیر اصلاح‌شده به اندازه طول ترکِ در حال رشد وابسته است. از سوی دیگر اندازه‌گیری رشد ترک آسان نیست و امکان بروز خطاهای قابل توجهی وجود دارد که بر محاسبه انرژی شکست تاثیرگذار است.

به دلیل وجود مشکلات برداشت داده‌های آزمایشگاهی، استقبال از روش‌های کاهش داده[3] افزایش یافته است. یکی از کاربردی‌ترین روش‌های کاهش داده برای تعیین چقرمگی شکست مود اول، بهره‌گیری از روش تیر مبتنی بر نرمی[4] می‌باشد [۱۹]. این روش که با رابطه (۶) بیان می‌شود، بر اساس مفهوم ترک معادل، a_{eq}، ارائه گردیده است، به نحوی که به اندازه‌های طول ترک نیاز ندارد و انرژی تلف شده در ناحیه تحت شکست[5] را نیز در نظر می‌گیرد. این ناحیه در مقابل دهانه ترک در نتیجه تجمیع میکروترک‌های متعدد در ضخامت چسب و فرایند نرم‌سازی یا پلاستیکی شدن[6] ایجاد شده و رشد می‌کند. بنابراین، اثر ناحیه تحت شکست باید در محاسبه G_{Ic} در نظر گرفته شود در حالیکه این مهم در روش‌های قبلی ناچیز انگاشته می‌شد.

$$G_{\mathrm{Ic}} = \frac{6P^2}{b^2h}\left(\frac{2a_{\mathrm{eq}}^2}{h^2E_{\mathrm{eq}}} + \frac{1}{5G}\right) \qquad (۶)$$

در رابطه (۶)، G، مدول برشی چسبنده و E_{eq}، مدول خمشی معادل است که از رابطه (۷) محاسبه می‌شود.

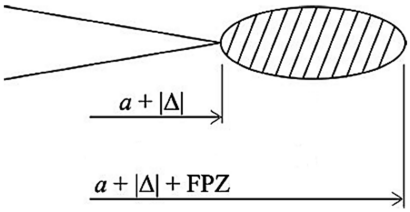
$$E_{\mathrm{eq}} = \left(C_0 - \frac{12(a_0+|\Delta|)}{5bhG}\right)^{-1}\frac{8\left(a_0+|\Delta|\right)^3}{bh^3} \qquad (۷)$$

در روش تیر مبتنی بر نرمی، طول ترک معادل که مفهوم آن در شکل ۲ نشان داده شده است، به صورت رابطه $a_{\mathrm{eq}} = a + |\Delta| + \Delta a_{\mathrm{FPZ}}$ در نظر گرفته می‌شود [۱۹]. جهت محاسبه این طول از روابط (۸) و (۹) استفاده می‌گردد:

$$\alpha a_{\mathrm{eq}}^3 + \beta a_{\mathrm{eq}} + \gamma = 0 \qquad (۸)$$

$$\alpha = \frac{8}{bh^3E_{\mathrm{eq}}};\quad \beta = \frac{12}{5bhG};\quad \gamma = -C_0 \qquad (۹)$$

در ضمن، این روش اجازه می‌دهد تا انرژی شکست صرفاً به کمک داده‌های منحنی نیرو بر حسب جابجایی به دست آید. تنها مشخصه مادی لازم برای استفاده از این روش، مدول برشی چسبنده می‌باشد. در ادامه به منظور تعیین بار بحرانی جوانه‌زنی ترک می‌توان از معیارهای جوانه‌زنی ترک که عبارتند از انحراف از حالت خطی، پایش بصری و انحراف ۵٪ بار بحرانی حداکثر، استفاده کرد [۳۱]. از میان سه معیار موجود، مطابق شکل ۳، معیار پایش بصری جوانه‌زنی ترک مورد استفاده قرار گرفته است. طبق این روش، برای استخراج مقدار P در رابطه (۶)، بازشدگی دهانه ترک نمونه DCB به کمک دوربین پیشرفته و ساعت دیجیتال مورد پایش قرار می‌گیرد به طوریکه به محض مشاهده جوانه‌زنی ترک، نیروی متناظر با آن لحظه، P، با استفاده از آهنگ بارگذاری نمونه و زمان ثبت شده به دست می‌آید.



شکل ۲ - مفهوم ترک معادل در دهانه ترک [۱۹]

[1] Classic Beam Theory (CBT)
[2] Corrected Beam Method (CBM)
[3] Data reduction scheme
[4] Compliance Based Beam Method (CBBM)
[5] Fracture Process Zone (FPZ)
[6] Plastification

شکل ۳ - پایش جوانه‌زنی ترک

از سوی دیگر، روش‌هایی مبتنی بر تئوری تیر بر بستر الاستیک[1] نیز به منظور محاسبه چقرمگی شکست چسب توسعه یافته‌اند. ویژگی بارز این روش‌ها، در نظر گرفتن مشخصات هندسی و مادی چسب در محاسبه چقرمگی شکست آن است به طوریکه در آن‌ها چسب به صورت یک بستر الاستیک در نظر گرفته می‌شود و اثر ضخامت و مدول الاستیسیته آن بدین ترتیب در فرمول‌بندی وارد می‌گردد. پرادیپ و رائو از مفهوم سفتی خمشی برای یکپارچه کردن مشخصات چسب در فرایند مدل‌سازی نمونه تیر دو لبه یکسر گیردار بهره گرفتند [۳۲]. رابطه نرمی و انرژی شکست ارائه شده توسط ایشان عبارت است از:

$$C = \frac{a^3}{3}\left[\frac{1}{(EI)_1} + \frac{1}{(EI)_2}\right] \qquad (۱۰)$$

$$G_{Ic} = \frac{P^2 a^2}{2b}\left[\frac{1}{(EI)_1} + \frac{1}{(EI)_2}\right] \qquad (۱۱)$$

در این روابط، I، ممان اینرسی، E، مدول الاستیسیته و بالاوندهای (1)، (2) و (3) به ترتیب نشان دهنده چسبنده بالا، لایه چسب و چسبنده پایین هستند. جزئیات محاسبه چقرمگی شکست به کمک این روش، در روابط (۱۲) تا (۱۴) ارائه شده است.

$$(EI)_1 = D_{11}^{(1)}\left[1-\left(\frac{D_{12}^{(1)}}{D_{11}^{(1)}}\right)^2\right],\ \ (EI)_2 = \bar{D}_{11}\left[1-\left(\frac{\bar{D}_{12}}{\bar{D}_{11}}\right)^2\right] \qquad (۱۲)$$

$$\bar{D}_{11} = D_{11}^{(2)} + D_{11}^{(3)},\ \ \bar{D}_{12} = D_{12}^{(2)} + D_{12}^{(3)} \qquad (۱۳)$$

$$D_{11}^{(k)} = \frac{E_k I_k}{1-\nu_k^2},\ \ D_{12}^{(k)} = \nu_k D_{11}^{(k)},\ \ I_k = \frac{bh_k^3}{12} \qquad (۱۴)$$

با توجه به رابطه (۱۱) مشخص است که جهت محاسبه چقرمگی شکست چسب در مود خالص اول، به جز اندازه‌گیری نیرو به داده آزمایشگاهی دیگری نیاز نیست. شایان ذکر است که بر خلاف روش‌های مبتنی بر مکانیک شکست الاستیک خطی، در روش‌های مبتنی بر تیر بر بستر الاستیک، نیروی مورد نیاز در محاسبات، حداکثر نیرو یا همان استحکام اتصال است.

[1] Beam-on-elastic foundation

۲-۲- قانون کشش - جدایش دوخطی و مدل پی. پی. آر. اصلاح شده

شکل کلی قانون کشش - جدایش دوخطی و پی. پی. آر. اصلاح شده به همراه پارامترهای آن در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل، E، سفتی اولیه المان چسبناک، G_c، انرژی شکست چسب، σ_c، کشش آزادسازی، δ_i، جدایش متناظر با کشش آزادسازی، D، پارامتر آسیب استاتیکی و δ_f، جدایش نهایی (بازشدگی ترک نهایی) است به طوریکه بعد از آن (D = ۱) المان چسبناک، دیگر هیچ باری را تحمل نمی‌کند. معادله حاکم بر مدل دوخطی به صورت رابطه (۱۵) می‌باشد [۳۳]. معادله حاکم بر قانون کشش - جدایش مربوط به مدل پی. پی. آر. اصلاح شده نیز در رابطه (۱۶) ارائه شده است [۲۴].

$$\sigma = \begin{cases} E\delta & \delta \le \delta_i \\ \dfrac{\delta_f - \delta}{\delta_f - \delta_i} & \delta_i \le \delta \le \delta_f \\ 0 & \delta \ge \delta_f \end{cases} \qquad (۱۵)$$

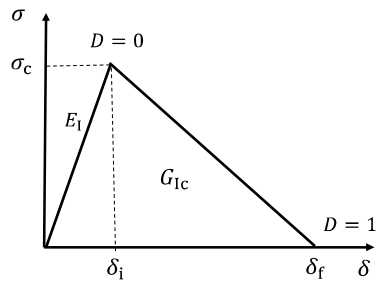
$$\sigma = \begin{cases} E\delta & \delta \le \delta_i \\ F(\delta) & \delta_i \le \delta \le \delta_f \\ 0 & \delta \ge \delta_f \end{cases} \qquad (۱۶)$$

که در آن

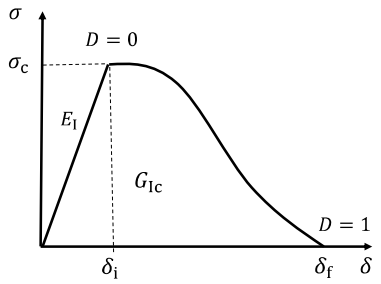
$$F(\delta) = A\left[m\left(1-\frac{\delta}{\delta_f}\right)^{\alpha}\left(\frac{m}{\alpha}+\frac{\delta}{\delta_f}\right)^{m-1} - \alpha\left(1-\frac{\delta}{\delta_f}\right)^{\alpha-1}\left(\frac{m}{\alpha}+\frac{\delta}{\delta_f}\right)^{m}\right] \qquad (۱۷)$$

$$A = \frac{\sigma_c}{C}$$

$$C = m(1-\lambda_n)^{\alpha}\left(\frac{m}{\alpha}+\lambda_n\right)^{m-1} - \alpha(1-\lambda_n)^{\alpha-1}\left(\frac{m}{\alpha}+\lambda_n\right)^{m} \qquad (۱۸)$$



(الف)



(ب)

شکل۴ - قوانین کشش - جدایش دوخطی (الف) و پی. پی. آر. اصلاح شده (ب)

در رابطه (۱۸)، α، پارامتر شکل، m توان بی بعد و λ_n نشانگر شیب اولیه[1] می‌باشد که رفتار الاستیک المان‌های چسبناک را کنترل می‌کند. این پارامترهای مشخصه به ازای ارضای شرایط مرزی قید شده در روابط (۱۹) تا (۲۱) حاصل می‌شوند:

$$\begin{cases}\sigma=\sigma_c & \delta=\delta_i\\ \sigma=0 & \delta=\delta_f\end{cases} \qquad (۱۹)$$

$$\lim_{\delta\to\delta_i}\frac{\partial\sigma}{\partial\delta}=0 \qquad (۲۰)$$

$$G_{Ic}=\int_0^{\delta_f}\sigma d\delta \qquad (۲۱)$$

در این پژوهش که هدف اصلی آن به کارگیری مدل پی. پی. آر. اصلاح‌شده برای شبیه‌سازی آسیب در لایه چسب می‌باشد، استخراج پارامترهای چسبناک ضروری است. برای این منظور نخست پارامترهای چسبناک مدل دوخطی به روش وارون تعیین می‌گردد، سپس با استفاده از مشخصات شاخه اول قانون کشش - جدایش دوخطی، پارامترهای مدل چسبناک جدید به دست می‌آید. شایان ذکر است که در روش وارون، پارامترهای چسبناک با سعی و خطا و از طریق مقایسه نمودار نیرو - جابجایی حاصل از مدل اجزای محدود با نمودار تجربی متناظر با آن که با هدف به حداقل رساندن اختلاف میان آن‌ها صورت می‌پذیرد، حاصل می‌شود.

۳- رویه انجام آزمون‌های تجربی

به منظور انجام آزمون‌های تجربی جهت دستیابی به پارامتر انرژی بحرانی شکست چسب تحت مود اول، نخست آماده‌سازی نمونه‌ها و سپس نحوه تست آن‌ها لازم به توضیح است که در ادامه به آن‌ها پرداخته می‌شود. جهت اطمینان از صحت نتایج و بررسی تکرارپذیری آن، از ۳ نمونه استفاده شده است.

۳-۱- آماده‌سازی نمونه‌های DCB

جهت ساخت نمونه‌های تیر دو لبه یکسر گیردار از چسب دو جزئی AV 138 با هاردنر HV 998 استفاده شده است. این چسب به عنوان چسبی ترد شناخته می‌شود که امروزه در صنعت خودروسازی نیز کاربرد دارد. پس از اسیدشویی چسبنده‌های سوراخ شده طبق استاندارد ASTM D2651، چسب و هاردنر با نسبت جرمی ۴۰:۱۰۰ ترکیب شده و طی زمان کاری ۳۰ دقیقه‌ای آن، روی سطوح آماده‌سازی شده اعمال گردیده است.

ضخامت ۰٫۲ mm چسب در سرتاسر اتصال، توسط لاتون‌چینی ۰٫۰۸-۰٫۰۴-۰٫۰۸ mm در انتها و موضع پیش ترک تنظیم شده است. سپس فرایند تثبیت در دمای ۲۷ ºC، به مدت یک شبانه روز صورت گرفت. چسبنده‌ها از جنس آلیاژ آلومینیومی 6061 T6 که کاربرد صنعتی فراوانی دارد، انتخاب شده است. مشخصات مکانیکی چسب و چسبنده مورد استفاده و همچنین ابعاد و هندسه نمونه DCB به ترتیب در جدول ۱ و جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- مشخصات مکانیکی مواد بکار رفته در نمونه تیر دو لبه یکسر گیردار

ماده	مدول الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	مدول برشی (GPa)
آلومینیوم 6061 T6	۷۰	۰٫۳	۲۶
چسب AV 138 [۳۴]	۴٫۸۹ ±۰٫۸۱	۰٫۳۵	۱٫۵۶ ±۰٫۱۰

جدول ۲ - مشخصات ابعادی و هندسی نمونه تیر دو لبه یکسر گیردار

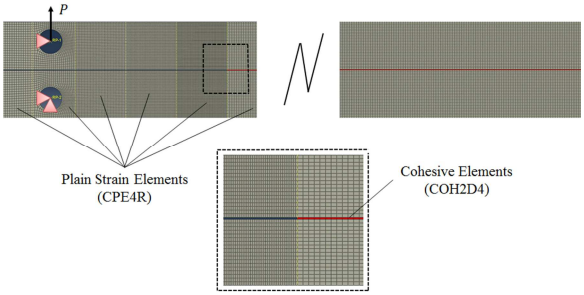
پارامتر	نماد	اندازه (mm)
طول نمونه	L	۲۹۰
ضخامت چسب	t_a	۰٫۲
ضخامت چسبنده	h	۱۲٫۲
عرض چسبنده	b	۲۵٫۸
طول ترک	a_0	۴۰

۳-۲- شرایط آزمون تجربی

به منظور آزمون نمونه‌های تهیه شده، از دستگاه کشش سنتام با نیروسنج ۱۵ تنی استفاده شده است. جهت کشش نمونه‌ها، مطابق شکل ۳، فک‌های مخصوصی طراحی و به کار گرفته شده است. بارگذاری نیز به صورت جابجایی کنترل بوده و آهنگ آن برابر ۰٫۵ mm/min انتخاب شده است.

۴- مدل‌سازی اجزای محدود

در مرحله شبیه‌سازی اجزای محدود جهت مدل‌سازی اتصال چسبی از نرم‌افزار آباکوس استفاده شده است. ابتدا هندسه کلی اتصال در این نرم‌افزار طرح ریزی شده و بعد به کمک ابزار پارتیشن‌بندی، اجزای چسب و چسبنده از یکدیگر تفکیک شده‌اند. پس از تعریف مشخصات مکانیکی هر جزء، اتصال مطابق شکل ۵ شبکه‌بندی شده است به نحوی که از ابتدای نمونه تا دهانه ترک به فواصل مشخصی از شبکه‌بندی ریزتری استفاده شده است. لازم به ذکر است که این فواصل و اندازه المان‌ها به نحوی انتخاب شده‌اند که علاوه بر افزایش دقت نتایج، مسأله ناپایداری در حل عددی مدل چسبناک را نیز مرتفع نمایند [۳۵].



شکل۵ - شبکه‌بندی اجزای محدود نمونه تیر دو لبه یکسر گیردار

[1] Initial slop indicator

در این شبیه‌سازی به ترتیب از المان‌های کرنش صفحه‌ای و المان چسبناک برای شبکه‌بندی چسبنده‌ها و لایه چسب بهره برده شده است. در حقیقت چسبنده‌ها و چسب در راستای عرض نمونه شرایط کرنش صفحه‌ای تجربه می‌کنند. این موضوع به دلیل ماهیت منشوری سازه در این راستا می‌باشد. البته باید اذعان داشت که تنها در دو وجه جانبی نمونه شرایط تنش صفحه‌ای نیز حاکم است. به علاوه ذکر این نکته ضروری است که بکارگیری فرض تنش صفحه‌ای برای نمونه منجر به افزایش مجازی اندازه ناحیه پلاستیک در نمونه می‌شود. بنابراین با اغماض از شرایط سطوح جانبی، با فرض رفتار کرنش صفحه‌ای، از المان‌های کرنش صفحه‌ای CPE4R برای شبیه‌سازی رفتار نمونه بهره برده شده است.

شایان ذکر است که کل ضخامت لایه چسب به کمک یک ردیف از المان‌های چسبناک شبکه‌بندی شده است. بدین ترتیب در این مدل‌سازی از ۴۳۹۳۳ المان کرنش صفحه‌ای چهار گرهی برای چسبنده‌ها و از ۳۹۹ المان چسبناک چهار گرهی نیز برای لایه چسب بهره برده شده است که در آن اندازه المان‌های چسبناک برابر mm ۰٫۶× ۰٫۲ می‌باشد. جهت تجویز شرایط مرزی در انتهای سمت چپِ اتصال DCB، تنها درجات آزادی عمودی و افقی پین پایین و درجه آزادی افقی پین بالا مقیّد شده و در مقابل، انتهای سمت راست اتصال کاملاً آزاد باقی مانده است. سپس جابجایی عمودی برابر با mm ۷ به پین بالا اعمال گردیده است. به دلیل تعریف شرایط تماسی میان پین‌ها و چسبنده‌ها، با وجود اینکه شرایط مرزی گیردار کامل برای پین پایین و همچنین قید حرکتی گیردار در راستای افقی به پین بالا اعمال شده است، اما چسبنده‌ها امکان حرکت دورانی حول پین‌ها خواهند داشت. در حقیقت شرایط مطابق آنچه که در آزمون تجربی حادث می‌شود، شبیه‌سازی شده است. شایان ذکر اینکه در حل مسأله، پس از بررسی اثر ضریب میرایی ویسکوز، مقدار آن برابر با ۰٫۰۰۰۵ در نظر گرفته شده است. همچنین جهت تعریف قانون کشش – جدایش پی. پی. آر. اصلاح شده، از قابلیت تعریف داده‌های آسیب بر حسب جدایش نرم‌افزار (ایجاد جدول) و برای تجویز مدل چسبناک دوخطی از مدل تعریف شده در نرم‌افزار استفاده شده است.

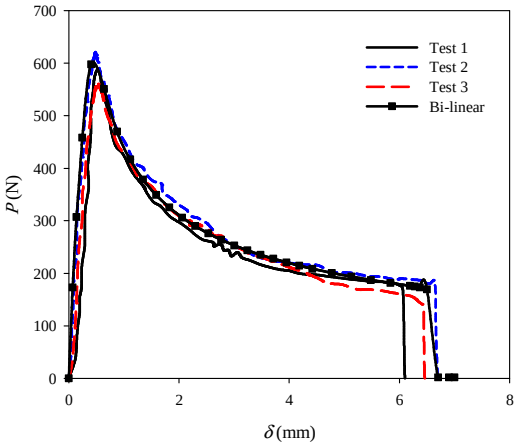
۵- نتایج مسأله و بحث

نمودارهای نیرو - جابجایی تجربی نمونه‌های DCB در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶، تکرارپذیری نتایج به خوبی قابل رویت است. نکته قابل ذکر این است که واماندگی نمونه‌ها مانند شکل ۸ کاملاً از جان چسب[1] صورت گرفته است. با توجه به این نمودارها و پایش تصاویر دیجیتالی که صورت گرفته است، انرژی بحرانی شکست این نمونه‌ها در مود اول به کمک روش‌های بیان شده در بخش ۲ محاسبه شده است. در این راستا، نخست ضریب تصحیحِ Δ مطابق شکل ۹ استخراج و مورد استفاده قرار گرفته است.

مطابق نتایجی که در جدول ۳ ارائه گردیده است می‌توان بیان کرد که روش تئوری تیر کلاسیک نسبت به دو روش دیگر به دلیل در نظر نگرفتن اثرات برشی و چرخش بُن ترک، مقادیر بزرگتری را نتیجه می‌دهد که استفاده از آن، طراحی بسیار محافظه‌کارانه‌ای را در پی خواهد داشت. به علاوه، در این نتایج، علت اختلاف روش پرادیپ و رائو در مقایسه با روش تیر مبتنی بر نرمی آن است که در روش مبتنی بر تیر بر بستر الاستیک با وجود در نظر گرفتن هندسه اتصال و مشخصات مادی چسب، اثر چرخش دهانه ترک[2] و برش عرضی[3] نادیده انگاشته شده است. از میان پاسخ روش تیر اصلاح‌شده و روش تیر مبتنی بر نرمی، پاسخ روش دوم مورد پذیرش قرار گرفت چرا که در روش تیر اصلاح‌شده با وجود در نظر گرفتن چرخش دهانه ترک، انرژی تلف شده در ناحیه تحت شکست محاسبه نمی‌شود.

بنابراین با استفاده از مقدار G_{Ic} = ۰/۲۴۳ N/mm در مدل‌سازی عددی و تغییر سایر پارامترهای قانون کشش - جدایش دوخطی (کشش آزادسازی و سفتی اولیه)، از رهگذر اعتبارسنجی منحنی نیرو - جابجایی تجربی با پاسخ عددی آن مطابق شکل ۶، پارامترهای چسبناک مذکور به دست می‌آید که مقادیر آن‌ها در جدول ۴ ارائه گردیده است.

در ادامه به منظور تعیین پارامترهای مشخصه مدل پی. پی. آر. اصلاح شده علاوه بر در نظر گرفتن شرایط مرزی قید شده در روابط (۱۹) تا (۲۱)، از کشش آزادسازی و جدایش بحرانی به دست آمده در قانون دوخطی بهره برده شده است. بدین ترتیب پارامترهای قانون کشش - جدایش پی. پی. آر. اصلاح‌شده محاسبه می‌شود که مقادیر آن‌ها در جدول 5 ذکر شده است. با استفاده از این پارامترها در مدل‌سازی اتصال چسبی، پاسخ عددی نیرو - جابجایی مطابق شکل ۷ حاصل می‌گردد. چنانچه در شکل ۷ مشاهده می‌شود، پاسخ منحنی نیرو - جابجایی حاصل از مدل ناحیه چسبناک پی. پی. آر. اصلاح شده با دقت بسیار خوبی بر پاسخ مدل ناحیه چسبناک دوخطی منطبق شده است. این مسأله مبیّن آن است که از قانون کشش - جدایش جدید پی. پی. آر. اصلاح شده که به منظور شبیه‌سازی پارگی در مواد نرم توسعه داده شده بود، می‌توان جهت مدل‌سازی آسیب در لایه چسب اتصالات چسبی فلزی استفاده کرد.

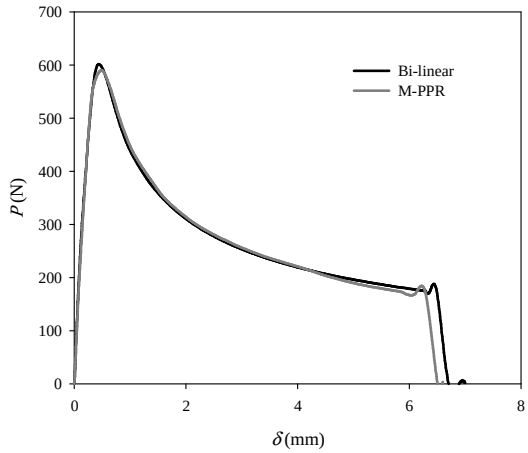


شکل ۶ - نمودار تجربی و عددی نیرو - جابجایی نمونه‌های DCB

[1] Cohesive failure

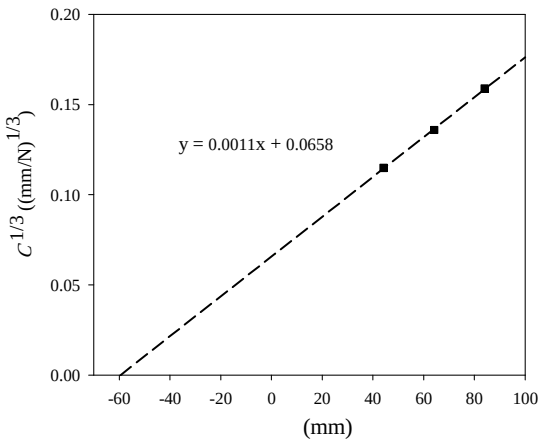
[2] Crack tip rotation

[3] Transverse shear



شکل ۷ - نمودار عددی نیرو - جابجایی مدل دوخطی و پی. پی. آر. اصلاح‌شده

شکل ۸ - سطوح شکست نمونه DCB



شکل ۹ - نمودار محاسبه Δ برای نمونه‌های DCB

جدول ۳ - مقادیر انرژی شکست بحرانی نمونه‌های DCB

	تئوری تیر کلاسیک	روش تیر اصلاح شده	روش تیر مبتنی بر نرمی	پرادیپ و رائو
۱	۰٫۶۴۷	۰٫۲۲۴	۰٫۲۲۱	۰٫۰۸۰۱
۲	۰٫۶۵۱	۰٫۲۷۰	۰٫۲۶۶	۰٫۰۸۷۸
۳	۰٫۶۲۳	۰٫۲۱۳	۰٫۲۱۰	۰٫۰۷۳۹
میانگین	۰٫۶۴۰	۰٫۲۳۶	۰٫۲۳۲	۰٫۰۸۰۶

جدول ۴ - پارامترهای قانون کشش - جدایش دوخطی

σ_c (N/mm^2)	E (N/mm^3)	G_{Ic} (N/mm)
۵٫۲	۴۸۹۰	۰٫۲۳۲

جدول ۵ - پارامترهای قانون کشش - جدایش پی. پی. آر. اصلاح شده

α	m	λ_n	G_{Ic} (N/mm)
۲	۰٫۰۵۲۳	۰٫۱۵۷۷	۰٫۲۴۳

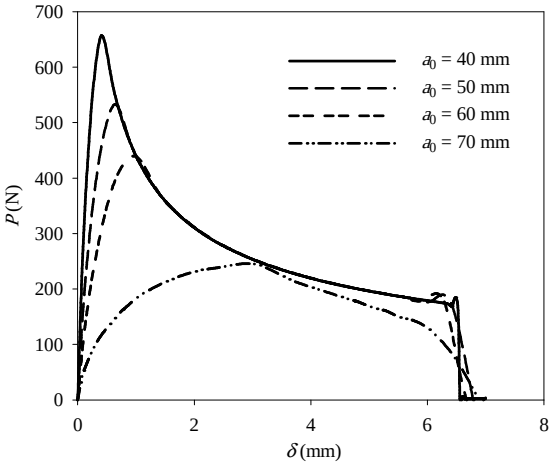
به علاوه با توجه به شکل ۷ می‌توان بیان نمود که با وجود یکسان بودن شاخه سخت‌شوندگی منحنی‌های عددی، استحکام پیش‌بینی شده توسط مدل پی. پی. آر. اصلاح‌شده دقت بیشتری نسبت به مدل دوخطی دارد به طوریکه با در نظر گرفتن میانگین استحکام نمونه‌های تحت آزمون، ۵۸۸ N، به عنوان مبنای مقایسه، مدل پی. پی. آر. اصلاح‌شده ۰٫۳٪ و مدل دوخطی ۲٫۲٪ استحکام مدل را بیشتر پیش‌بینی کرده است. همچنین مقایسه طول واماندگی مدل‌ها با مقدار میانگین طول واماندگی، ۶٫۳۹ mm، نشان می‌دهد که مدل پی. پی. آر. اصلاح‌شده، ۱٫۱- ٪، نسبت به مدل دوخطی، ۲٫۸٪، پاسخ نزدیک‌تری را ارائه می‌کند. به علاوه مدت زمان حل مسأله اجزای محدود به کمک مدل پی. پی. آر. اصلاح‌شده، ۸٪ کمتر از مدل دوخطی بود. این نتایج برتری مدل پی. پی. آر. اصلاح‌شده را نسبت به مدل دوخطی در شبیه‌سازی چسب ترد تحت بارگذاری مود اول نشان می‌دهد.

۶- آنالیز حساسیت پارامترهای هندسی

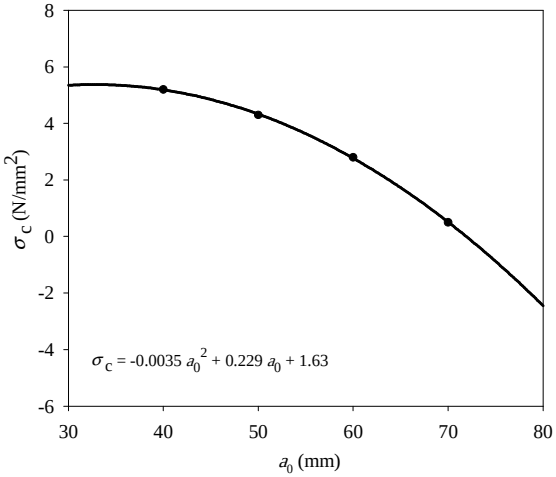
پس از تعیین پارامترهای چسبناک، در این بخش به صورت مستقل از آزمون تجربی و با تکیه بر نتایج عددی به بررسی اثر پارامترهای هندسی طول ترک اولیه (a_0) و ضخامت چسبنده (h) پرداخته می‌شود. در این بررسی‌ها، مدل عددی کالیبره شده پی. پی. آر. اصلاح‌شده به عنوان مدل مبنا در نظر گرفته شده است.

جهت مطالعه اثر طول ترک اولیه، مقدار G_{Ic} و سفتی المان‌های چسبناک در مدل‌های عددی مختلف برابر با مقادیر مدل مبنا در نظر گرفته شد و تنها a_0 از ۴۰ mm تا ۸۰ mm تغییر داده شد. مطابق شکل ۱۰ مشاهده می‌شود که افزایش طول ترک اولیه منجر به کاهش سفتی استاتیکی و استحکام اتصال DCB می‌گردد. شایان ذکر اینکه کاهش a_0 انرژی شکست کلی اتصال[1] را کاهش می‌دهد. به علاوه افزایش این پارامتر سبب کاهش کشش آزادسازیِ قانون کشش - جدایش متناظر با مدل‌های با طول ترک اولیه بیشتر می‌شود که روند کاهش کشش آزادسازی بر حسب طول ترک اولیه مطابق شکل ۱۱ با منحنی درجه سه تقریب زده شده است.

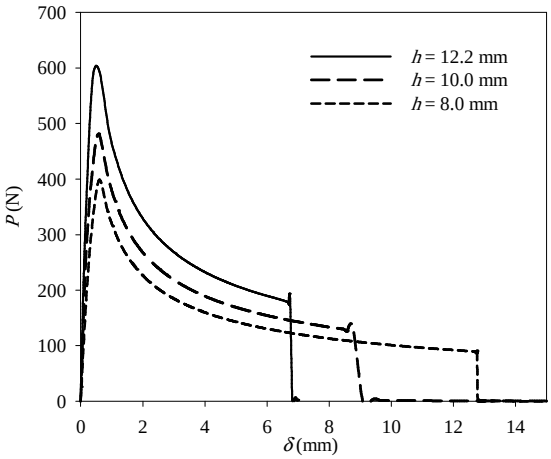
[1] Overall fracture energy



شکل ۱۰ - اثر طول ترک اولیه بر پاسخ نیرو - جابجایی نمونه DCB



شکل ۱۱ - اثر طول ترک اولیه بر کشش آزادسازی نمونه DCB



شکل ۱۲ - اثر ضخامت چسبنده بر پاسخ نیرو - جابجایی نمونه DCB

از سوی دیگر، مطابق شکل ۱۲ تغییر ضخامت چسبنده بر استحکام، سفتی و بازشدگی نهایی نمونه تاثیرگذار است به نحوی که با افزایش ضخامت چسبنده، طول واماندگی نمونه (δ) کاهش می‌یابد که این امر به دلیل افزایش سفتی خمشی چسبنده‌ها می‌باشد. همچنین قابل مشاهده است که افزایش h سبب افزایش استحکام و سفتی استاتیکی نمونه تیر دو لبه یکسر گیردار می‌شود.

۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

هدف اصلی در این پژوهش امکان‌سنجی استفاده از مدل ناحیه چسبناک پی. پی. آر. اصلاح‌شده جهت شبیه‌سازی آسیب در لایه چسبِ اتصال چسبی تیر دولبه یکسر گیردار با چسبنده‌های فلزی است. لازم به ذکر است که این مدل چسبناک نخست به منظور شبیه‌سازی پارگی در مواد نرم توسعه داده شده است و تاکنون برای شبیه‌سازی اتصالات چسبی فلزی به کار نرفته است. در این بررسی نخست لازم است که پارامترهای چسبناک این مدل استخراج گردد. برای این منظور از قانون کشش - جدایش دوخطی کمک گرفته شده است. بدین ترتیب که نخست به روش وارون پارامترهای چسبناک قانون دوخطی استخراج شده و سپس با استفاده از کشش چسبناک، جدایش بحرانی و سفتی اولیه به دست آمده، پارامترهای چسبناک مدل جدید استخراج می‌گردد. شایان ذکر است که در روش وارون، پارامترهای چسبناک آنقدر تغییر داده می‌شوند تا اختلاف بین منحنی‌های عددی و تجربی نیرو - جابجایی به حداقل برسد.

در همین راستا ابتدا ضروری است که انرژی شکست چسب در مود اول محاسبه گردد. با مقایسه‌ای که بین نتایج حاصل از روش‌های مختلف محاسبه انرژی شکست چسب صورت پذیرفت، مشخص گردید که روش تیر مبتنی بر نرمی دقیق‌ترین پاسخ را حاصل می‌کند. این روش که در حوزه مکانیک شکست الاستیک خطی توسعه داده شده است با در نظر گرفتن طول ترک معادل، علاوه بر عدم نیاز به پایش طول ترک در حین آزمون تجربی، ناحیه تحت شکست را نیز در دهانه ترک در نظر می‌گیرد و بدین ترتیب در کنار سادگی، پاسخ دقیق‌تری را نیز به ارمغان می‌آورد.

در ادامه برای شبیه‌سازی اتصال DCB از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس بهره برده شد که در آن برای شبیه‌سازی چسب و چسبنده به ترتیب از المان‌های چسبناک چهار گرهی و المان‌های کرنش صفحه‌ای چهار گرهی استفاده گردید. مقایسه بین پاسخ عددی دو مدل چسبناک به کار رفته برای شبیه‌سازی لایه چسب نشان می‌دهد که نه تنها مدل پی. پی. آر. اصلاح‌شده قادر به شبیه‌سازی آسیب در لایه چسب است، بلکه پاسخ دقیق‌تری را در زمان کمتر حاصل می‌کند که این موضوع به نوبه خود در راستای مدل‌سازی اتصالات بزرگ‌تر راهگشا خواهد بود.

در ادامه با استفاده از مدل چسبناک پی. پی. آر. اصلاح‌شده، اثر طول ترک اولیه (a_0) و ضخامت چسبنده (h) بر پاسخ منحنی نیرو - جابجایی مورد بررسی واقع گردید. نمودارها نشان دادند که افزایش طول ترک اولیه اثر وارون بر سفتی و استحکام استاتیکی اتصال DCB دارد در حالیکه افزایش ضخامت چسبنده‌ها با آن‌ها رابطه مستقیم دارد. شایان ذکر اینکه طول واماندگی نمونه با افزایش ضخامت چسبنده‌ها کاهش می‌یابد در حالیکه اثر طول ترک اولیه بر مقدار آن تقریباً ناچیز است.

۸- مراجع

[1] Esmaeili J., Adhesive intense body structure, Master's thesis, Blekinge Institute of Technology. Document id: houn-8qsf7k, 2011.

[2] Alfredsson K.and Högberg J. L., Energy release rate and mode-mixity of adhesive joint specimens," *International Journal of Fracture*, Vol. 144, pp. 267-283, 2007.

[3] Nguyen N.and Waas A. M., A novel mixed-mode cohesive formulation for crack growth analysis" *Composite Structures*, 2015.

[4] Andersson T. andStigh U., The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 41, pp. 413-434, 2004.

[5] Lee M. J., Cho T. M., Kim W. S., Lee B. C., and Lee J. J., Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 30, pp. 322-328, 2010.

[6] de Moura M., Gonçalves J., and Magalhães A., A straightforward method to obtain the cohesive laws of bonded joints under mode I loading, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 39, pp. 54-59, 2012.

[7] Fernandes R., Chousal J., De Moura M., and Xavier J., Determination of cohesive laws of composite bonded joints under mode II loading, *Composites Part B: Engineering*,Vol. 52, pp. 269-274, 2013.

[8] de Morais A., Pereira A., de Moura M., Silva F., andDourado N., Bilinear approximations to the mixed-mode I–II delamination cohesive law using an inverse method, *Composite Structures*, Vol. 122, pp. 361-366, 2015.

[9] Khoramishad H., Hamzenejad M., and Ashofteh R., Characterizing cohesive zone model using a mixed-mode direct method, *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 153, pp. 175-189, 2016.

[10] Högberg J. L., Sørensen B. F., and Stigh U., Constitutive behaviour of mixed mode loaded adhesive layer, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 44, pp. 8335-8354, 2007.

[11] Zhu Y., Liechti K. M., and Ravi-Chandar K., Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 46, pp. 31-51, 2009.

[12] Ji G., Ouyang Z., Li G., Ibekwe S., and Pang S.-S., Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 47, pp. 2445-2458, 2010.

[13] Campilho R., Banea M., and da Silva L., Advanced techniques for estimation of the tensile fracture toughness of adhesive joints, *Frattura ed Integritá Strutturale*, pp. 1, 2015.

[14] Khoramishad H., Crocombe A., Katnam K., and Ashcroft I., A generalised damage model for constant amplitude fatigue loading of adhesively bonded joints, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Vol. 30, pp. 513-521, 2010.

[15] Chandra N., Li H., Shet C., and Ghonem H., Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 39, pp. 2827-2855, 2002.

[16] Biel A.and Stigh U., An analysis of the evaluation of the fracture energy using the DCB-specimen, *Archives of Mechanics*, Vol. 59, pp. 311-327, 2007.

[17] Bader M., Hamerton I., Hay J., Kemp M., and Winchester S., Double cantilever beam testing of repaired carbon fibre composites, *Composites Part A: applied science and manufacturing*, vol. 31, pp. 603-608, 2000.

[18] F. Ducept, P. Davies, and D. Gamby, "Mixed mode failure criteria for a glass/epoxy composite and an adhesively bonded composite/composite joint," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 20, pp. 233-244, 2000.

[19] M. De Moura, R. Campilho, and J. Gonçalves, "Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading," *Composites Science and Technology*, vol. 68, pp. 2224-2230, 2008.

[20] J. Han and T. Siegmund, "Cohesive zone model characterization of the adhesive hysol EA-9394," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 26, pp. 1033-1052, 2012.

[21] S. D. Barros, G. Alfano, L. Champaney, and N. Valoroso, "Use of cohesive zone models to design automotive bonded joints," *International Journal of Automotive Composites*, vol. 1, pp. 158-169, 2015.

[22] A. Kinloch, *Adhesion and adhesives: science and technology*: Springer Science & Business Media, 2012.

[23] R. Campilho, D. C. Moura, M. Banea, and L. F. da Silva, "Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 53, pp. 15-22, 2014.

[24] T. Bhattacharjee, M. Barlingay, H. Tasneem, E. Roan ,and K. Vemaganti, "Cohesive zone modeling of mode I tearing in thin soft materials," *Journal of the mechanical behavior of biomedical materials*, vol. 28, pp. 37-46, 2013.

[25] K. Katnam, A. Crocombe, H. Khoramishad, and I. Ashcroft, "The static failure of adhesively bonded metal laminate structures: a cohesive zone approach," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 25, pp. 1131-1157, 2011.

[26] P. Jousset and M. Rachik, "Comparison and evaluation of two types of cohesive zone models for the finite element analysis of fracture propagation in industrial bonded structures," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 132, pp. 48-69, 2014.

[۲۷]خرمی شاد ه. و نصیری س.، بررسی تاثیر عوامل هندسی و مادی تاثیرگذار بر استحکام اتصالات ترکیبی چسبی- پرچی، نشریه علمی - پژوهشی علوم و فناوری کامپوزیت، ج.۲، ش.۲، ص ۷۱-۷۸، ۱۳۹۴.

[28] G. R. Irwin and J. Kies, "Critical energy rate analysis of fracture strength," *SPIE MILESTONE SERIES MS*, vol. 137, pp. 136-141, 1997.

[29] V. Tamuzs, S. Tarasovs, and U. Vilks, "Delamination properties of translaminar-reinforced composites," *Composites Science and Technology*, vol. 63, pp. 1423-1431, 2003.

[30] M. De Moura, A. Pereira, and A. De Morais, "Influence of intralaminar cracking on the apparent interlaminar mode I fracture toughness of cross-ply laminates," *Fatigue & fracture of engineering materials & structures*, vol. 27, pp. 759-766, 2004.

[۳۱] کریمیان مقدم ا.، رهنما س. و مالکی س.، بررسی تجربی و عددی رشد ترک در اتصال چسبی دو صفحه کامپوزیتی در حالت مود I شکست، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، د. ۵، ش. ۱۶، ص ۲۷۱-۲۸۰، ۱۳۹۵.

[32] K. Pradeep, B. N. Rao, S. Sivakumar, and K. Balasubramanium, "Interface fracture assessment on sandwich DCB specimens," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2009.

[۳۳] شجاعی فرد م. ح.، سعیدی گوگرچین ح.، غیبی م. ر. و ارجمندی م.، شبیه سازی و بهبود استحکام و عمر خستگی اتصال چسبی تک لبه ای با بکارگیری مدل ناحیه چسبناک تضعیف شونده چرخه ای، مجله مهندسی مکانیک مدرس، د. ۵، ش. ۱۶، ص ۲۸۱-۱۸۹، ۱۳۹۵.

[34] R. Fernandes and R. Campilho, "Numerical evaluation of dissimilar cohesive models to predict the behavior of Double-Cantilever Beam specimens," *Procedia Structural Integrity* , vol. 1, pp. 42-49, 2016.

[35] L. Hamitouche, M. Tarfaoui, and A. Vautrin, "An interface debonding law subject to viscous regularization for avoiding instability: application to the delamination problems," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, pp. 3084-3100, 2008.