



اندازه گیری چقرمگی شکست پلی پروپیلن در مود مرکب با استفاده از روش انتگرال J چند نمونه‌ای

محرم شاملی¹، نقدعلی چوپانی^{2*}، میرکریم رضوی³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

3- دانشیار، مهندسی پلیمر، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

* صندوق پستی 51335-1996، choupani@sut.ac.ir

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 آذر 1394

پذیرش: 11 اسفند 1394

ارائه در سایت: 11 اردیبهشت 1395

کلید واژگان:

شکست الاستیک-پلاستیک

انتگرال J

منحنی J-R

مود مرکب I/II

فیکسچر بهبود یافته

چکیده

برای شکست نرم، چقرمگی را می‌توان به عنوان یک پارامتر تک مقداری و یا در قالب منحنی مقاومت اندازه‌گیری کرد که اغلب توسط انتگرال J مشخص می‌شود. امروزه انتگرال J و منحنی J-R به علت اثربخشی مفیدشان در اندازه‌گیری چقرمگی به مهم‌ترین پارامترهای مواد در مکانیک شکست الاستیک-پلاستیک تبدیل شده‌اند و به‌طور گسترده‌ای در کاربردهای مهندسی استفاده می‌شوند. هدف اصلی در این مقاله، بررسی رفتار شکست مود مرکب I/II پلی‌پروپیلن با رویکرد انتگرال J و به دست آوردن منحنی J-R با رعایت استانداردهای موجود شکست الاستیک-پلاستیک پلیمرها و نیز تخمین مقدار JIC این ماده می‌باشد. در اجرای پژوهش از فیکسچر بهبود یافته‌ای که معایب روشهای آزمایش قبلی را برطرف کرده و آزمایش حالت‌های مختلف بارگذاری مود مرکب داخل صفحه، از حالت مود خالص I (زاویه 0 درجه) تا مود خالص II (زاویه 90 درجه) و هر حالت ترکیبی بین آنها را امکان‌پذیر می‌سازد بهره گرفته شده است. ضرایب بی‌بعد شدت تنش، ضرایب تاثیر کار و برخی از نتایج با استفاده از روش اجزاء محدود و با به‌کارگیری نرم‌افزار آباکوس به دست آورده شده‌اند. برای تخمین مقادیر انتگرال J و تهیه منحنی‌های J-R از روش چند نمونه‌ای مطابق با استاندارد مختص پلاستیکها، ASTM-D6068 و برای تخمین JIC از استاندارد E1820-13 استفاده شده است. منحنیهای مقاومت مود I، مود II و حالات ترکیبی با گام 15 درجه (7 حالت) با استفاده از آزمایش‌های تجربی تهیه و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. نتایج حاصل، رفتار چقرمه‌تر این ماده در حالت‌های نزدیک به مود بارگذاری I را نشان می‌دهد.

Measurement of Mixed-mode Fracture Toughness of Polypropylene using Multi-specimen J-integral Method

Moharram Shameli¹, Naghdali Choupani^{1*}, Mir Karim Razavi²

1-Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

2-Department of Polymer Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran.

*P.O.B. 51335-1996, Tabriz, Iran, choupani@sut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 06 December 2015
Accepted 01 March 2016
Available Online 30 April 2016

Keywords:
Elastic-Plastic Fracture
Mixed-Mode I/II
J-Integral
J-R curve
Modified Fixture

ABSTRACT

For ductile fracture, the toughness can be measured as a single parameter value or in a resistance curve format (J-R curve) and is often characterized by the J-integral for elastic-plastic materials. Because of their effectiveness in measuring toughness, the J-integral and J-R curve have become the most important material parameters in elastic-plastic fracture mechanics, and have been applied widely in practical engineering. Polymeric materials are widely used for load-bearing structural applications and, therefore, understanding their fracture properties is becoming more important. In this study, mixed-mode I/II stable crack growth experiments were carried out on a commonly used polymeric material, polypropylene, using recently modified fixture. Multi-specimen R-curve method was used for obtaining J-R curves of different states of mixed-mode loading conditions from pure mode-I to pure mode-II by varying the loading angle by 15° steps in accordance with the standard ASTM-D6068 and then the resulting R-curves have been evaluated to determine the values of initiation toughness, JIC, following the schemes of the E813 and E1820 standard procedures. Finite-element analyses were done by ABAQUS and mode-I and mode-II non-dimensional stress intensity factors and geometric work factors of elastic-plastic fracture were obtained for different conditions. Results show that for this material the value of JIC is much more than the value obtained for the JIIC. This material also exhibited a greater resistance to ductile crack growth in mode-I.

1- مقدمه

سازه‌های مهندسی پیدا کرده‌اند به طوری که تصور انواع صنایع پیشرفته

امروزه پلیمرهای مهندسی به خوبی جایگاه خود را در ساخت قطعات و بدون حضور پلیمرها و پلاستیک‌های مهندسی مشکل است. اکنون این

Please cite this article using:

M. Shameli, N. Choupani, M. K. Razavi, Measurement of Mixed-mode Fracture Toughness of Polypropylene using Multi-specimen J-integral Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 333-344, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Shameli, N. Choupani, M. K. Razavi, Measurement of Mixed-mode Fracture Toughness of Polypropylene using Multi-specimen J-integral Method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 4, pp. 333-344, 2016 (in Persian)

اولین پارامتر شکست الاستیک-پلاستیک واقعی، یعنی جابجایی شکاف نوک ترک (CTOD)⁶، توسط ولز [4] در سال 1961 مطرح شد. چند سال بعد، رایس [5] انتگرال کانتور J^7 را توسعه داد که پارامتری برای تخمین تغییر شکل الاستیک-پلاستیک با فرض ماده الاستیک غیرخطی بود. انتگرال J را می‌توان هم به عنوان پارامتر انرژی و هم به عنوان یک کمیت شبیه به شدت تنش در نظر گرفت. علاوه، J تحت شرایط خاصی به CTOD مرتبط می‌گردد.

برای شکست نرم، چقرمگی می‌تواند به عنوان یک پارامتر تک مقداری و یا در قالب منحنی مقاومت اندازه‌گیری شود و اغلب توسط انتگرال J مشخص می‌گردد که برای مواد با رفتار الاستیک-پلاستیک استفاده می‌شود. معمولاً، یک منحنی مقاومت بر اساس انتگرال J (به عنوان مثال، یک منحنی J - R) برای توصیف مقاومت مواد نرم در برابر شروع ترک، رشد پایدار و بی‌ثباتی پارگی و گسیختگی مورد استفاده قرار می‌گیرد [6]. انتگرال J و منحنی J - R ⁸ به علت اثربخشی مفیدشان در اندازه‌گیری چقرمگی به مهم‌ترین پارامترهای مواد در مکانیک شکست الاستیک-پلاستیک⁹ (EPFM) تبدیل شده‌اند و به طور گسترده‌ای در کاربردهای مهندسی استفاده می‌شوند. چنین مقادیر چقرمگی شکست را می‌توان به عنوان پایه‌ای برای خصوصیات مواد، ارزیابی عملکرد و تضمین کیفیت به کار گرفت. همچنین می‌توان این روشها را برای ارزیابی ترانس آسب سازه‌ها، ارزیابی تناسب برای خدمات، تحلیل مقاومت باقیمانده و مدیریت یکپارچگی سازه‌ای برای اجزای مختلف مهندسی و سازه‌ها، مانند مخازن تحت فشار و لوله‌کشی در نیروگاه‌های هسته‌ای، مخازن تحت فشار و ذخیره مواد پتروشیمی و خطوط لوله دریایی و ساحلی در صنایع نفت و گاز و سازه‌های هواپیماها و صنایع دریایی به کار برد [6].

هدف اصلی در این مقاله، بررسی رفتار شکست پلی پروپیلن با رویکرد انتگرال J و به دست آوردن منحنی J - R با رعایت استانداردهای موجود شکست الاستیک-پلاستیک پلیمرهای نرم و در نتیجه تخمین مقدار J_{IC} ماده می‌باشد. در این راستا تفاوت‌های استانداردهای موجود نیز تشریح و نتایج حاصله از هر کدام مقایسه خواهد شد. همچنین در این تحقیق از یک فیکسچر جدید و بهبودیافته، که قبلاً با رفع عیوب و کاستی‌های فیکسچر آرکان اصلاح یافته طراحی و ساخته شده، استفاده گردیده است. برای مطالعات، شکست تحت بارگذاریهای موده‌ای خالص I و II و مود مرکب داخل صفحه I/II بررسی شده است. مشخصات و توضیحات در مورد این فیکسچر در بخشهای بعدی آورده شده است.

1-2- پلی پروپیلن

پلی پروپیلن (PP) یکی از پلاستیکهای همه منظوره و پر مصرف عمومی با درجه‌بندی‌های زیاد است و با اتیلن نیز تشکیل کوپلیمر (اتیلن-پروپیلن) می‌دهد. پلی پروپیلن یک ماده گرمانرم است که از طریق پلیمریزاسیون مولکول‌های پروپیلن (که واحدهای مونومر هستند) به مولکول‌های پلیمری بسیار بزرگ و یا با ساختار زنجیره‌ای تولید شده است. روش‌های مختلفی برای اتصال مونومرها به یکدیگر وجود دارد ولی فرم تجاری PP به عنوان پرکاربردترین فرم ساخته شده آن با کاتالیست تهیه می‌شود که به منظور تولید زنجیره‌های پلیمری با قابلیت بلوره شدن است. این روش منجر به تولید یک جامد نیمه بلورین با خواص فیزیکی، مکانیکی و حرارتی خوبی می‌شود.

پلیمرها در ساخت تولیدات مختلف از قبیل لوازم خانگی، مصارف عمومی، تجهیزات علمی و پزشکی، صنایع خودروسازی، حمل و نقل زمینی و دریایی، صنعت هوافضا و مواد مرکب زمینه پلیمری به کار می‌روند. پلاستیک‌ها به دلیل وجود ترکیبی از خواص متنوع در مقایسه با سایر مواد بیشتر جلب توجه می‌کنند. از جمله این خواص می‌توان به سبکی وزن، انعطاف‌پذیری، مقاومت در برابر خوردگی، شفافیت و سهولت شکل‌پذیری اشاره کرد.

در دهه‌های گذشته، نقش به کارگیری روش مکانیک شکست در طراحی قطعات و سازه‌های مهندسی به منظور جلوگیری از شکست‌های دور از انتظار، کاملاً برجسته و آشکار شده است به طوری که امروزه این روش برای اکثر سازه‌های حساس در مراحل طراحی و آزمایش، همپای روش طراحی بر اساس تنش مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در این مطالعه، شکست تحت مود مرکب داخل صفحه‌ای پلی پروپیلن¹ با رفتار الاستیک-پلاستیک با به کارگیری یک فیکسچر بهبودیافته به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این راستا مقدمه‌ای از مباحث لازم در بخشهای زیر آورده شده است.

1-1- مکانیک شکست مواد نرم

چقرمگی شکست² خصوصیتی از ماده می‌باشد که توانایی ماده حاوی ترک را برای مقاومت در برابر شکست توصیف می‌کند.

برای شکست ترد، چقرمگی اغلب به عنوان یک پارامتر تک مقداری اندازه‌گیری شده و توسط فاکتور شدت تنش K^3 مشخص می‌گردد که برای مواد الاستیک خطی استفاده می‌شود. مکانیک شکست الاستیک خطی⁴ (LEFM)، روشی برای بیان میدان توزیع تنش و جابجایی‌ها در حوالی نوک ترک بر حسب تنش اسمی اعمالی به قطعه، اندازه و شکل هندسی ترک و خصوصیت‌های ارتجاعی ماده به دست می‌دهد. در مکانیک الاستیک خطی فرض می‌شود که تغییرمکانهای نقاط مختلف ماده در اثر اعمال بار بسیار کوچک بوده و ماده دارای رفتار خطی است بدین معنا که تنش‌ها و کرنش‌های موجود در ماده با هم به طور خطی متناسب باشد. در این روش دو عامل فاکتور شدت تنش K و نرخ‌های انرژی کرنشی⁵ G محاسبه می‌شود. این دو عامل در علم مکانیک شکست نقش اساسی دارند و علاوه بر نشان دادن حساسیت قطعه به ترک، می‌توانند نحوه رشد ترک (از نظر پایداری و ناپایداری) و جهت رشد ترک را نیز تبیین کنند.

در شکست نرم، رشد ناحیه پلاستیسیته نوک ترک (قبل از گسترش ترک و شکست نهایی) در مقایسه با ابعاد قطعه بزرگ است و در این حالت دیگر نمی‌توان از اصول LEFM استفاده کرد. استفاده از فاکتور شدت تنش در این موارد مفهومی نداشته و نمی‌توان به طور مستقیم از آن برای بررسی استحکام و نحوه شکست بهره گرفت و به معیارهای شکست جامع‌تری با در نظر گرفتن ناحیه پلاستیک بزرگ در نوک ترک نیاز می‌باشد. روش‌های مکانیک شکست برای بررسی پلاستیسیته نوک ترک به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند: 1) اصلاحات ساده در تئوری LEFM، و 2) پارامترهای شکست که برای رفتار غیرخطی ماده به کار گرفته می‌شوند. ایروین [1] یک تصحیح ناحیه پلاستیک ساده برای فاکتور شدت تنش ارائه کرد. تصحیح ناحیه پلاستیک دیگری نیز توسط داگدال [2] و بارنالت [3] ارائه گردید.

¹ Polypropylene (PP)

² Fracture Toughness

³ Stress Intensity Factor

⁴ Linear Elastic Fracture Mechanics

⁵ Strain Energy Release Rate

⁶ Crack Tip Opening Displacement

⁷ J-Integral

⁸ J-R curve

⁹ Elastic-plastic Fracture Mechanics

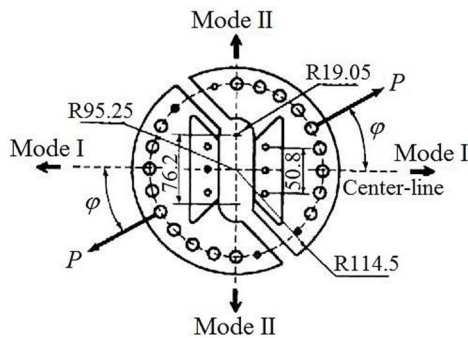


Fig. 1 Modified Arcan fixture [9]

شکل 1 فیکسچر اصلاح شده آرکان [9]

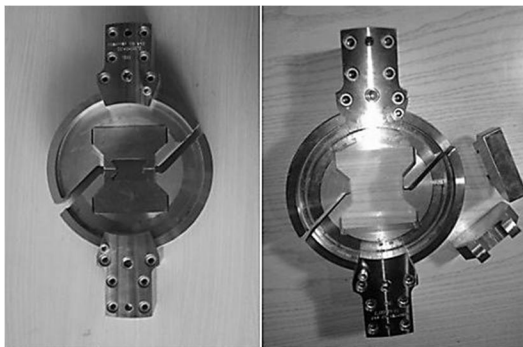


Fig. 2 Modified and Improved Fixture

شکل 2 فیکسچر بهبود و توسعه یافته

الاستیک - پلاستیک مواد مهندسی استفاده می‌شود. در عین این که انتگرال J یک اندازه تقریبی از دامنه تکنیکی میدان کرنش و تنش ناحیه نوک ترک است، همچنین پارامتری جذاب برای توصیف شکست است زیرا به آسانی و بدون نیاز به تجزیه و تحلیل مفصل و خسته‌کننده از ناحیه نوک ترک مستقیماً تعیین می‌شود [12]. برای رفتار تسلیم پلاستیک با مقیاس کوچک، J با G برابر می‌شود که به سادگی به فاکتور شدت تنش K در مکانیک شکست الاستیک خطی مربوط می‌شود و این رابطه می‌تواند ابزار مقرون به صرفه در برآورد چقرمگی شکست کرنش صفحه‌ای، K_{IC} ، با نمونه‌های کوچک آزمایشگاهی باشد.

رایس [5] با تعریف انتگرال مداری J به عنوان یک مشخصه شکست برای مواد با رفتار غیر خطی موفق شد مسئله‌های مربوط به ترک دو بعدی را در حضور تغییر شکل پلاستیک حل کند. فرم این انتگرال خطی در معادله زیر ارائه شده است که بر این اساس شکست (شروع رشد ترک) وقتی رخ می‌دهد که J به مقدار بحرانی خود برسد [13، 14]:

$$J = \int_c \left(w dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds \right) \quad (1)$$

که x و y مختصات عمود در نوک ترک (شکل 3)، ds افزایش در امتداد خط مرزی c ، T بردار تنش که بر خط مرزی عمل می‌کند، u بردار تغییر مکان و w چگالی انرژی کرنش است.

انتگرال J برای اولین بار به عنوان یک انتگرال مستقل از مسیر برای مسائل دوبعدی معرفی شد که در اطراف نوک ترک کشیده شده و می‌تواند هم به عنوان یک پارامتر نرخ رهایی انرژی کرنشی و هم یک پارامتر شدت تنش مشاهده شود و می‌توان آن را بر حسب جملات انرژی به صورت زیر بیان کرد [12، 14]:

این ماده پلیمری، کمترین چگالی را در بین گرمانرم‌ها دارد (حدود 900 کیلوگرم بر متر مکعب) و استحکام، سختی و مقاومت خستگی خوب، مقاومت عالی در برابر مواد شیمیایی، نقطه ذوب نسبتاً بالا و قیمت پایین آن را برای بسیاری از کاربردها مورد توجه قرار داده است. همچنین این ماده بالانس بهتری بین سختی و چقرمگی شکست نسبت به سایر پلاستیک‌های هم‌رده دارد [7]. بنابراین مطالعه خواص مکانیکی و رفتار شکست این ماده اهمیت دوچندانی دارد.

2- معرفی فیکسچر بهبود یافته

2-1- آزمایش اصلاح شده آرکان¹

یکی از بهترین روش‌های اندازه‌گیری شکست مود مرکب، روش آرکان می‌باشد که در سال 1978 توسط آرکان و همکاران بر روی مواد کامپوزیتی استفاده شد [8]. آزمایش بر مبنای بارگذاری تک محوری نمونه‌ی ترک‌دار که بین دو قطعه‌ی فلزی جهت ترکیب مودهای مشخص داخل صفحه، قرار گرفته، استوار است. در سال 1995 آمستوتز و همکاران با ایجاد سوراخ‌هایی در محیط دستگاه جهت اعمال بار، دستگاه را اصلاح نمودند [9]. در واقع این روش، روش مناسبی جهت اندازه‌گیری مود اول و دوم و مود مرکب، تنها با استفاده از یک گیره برای آزمایش می‌باشد. نمونه‌ی آزمایش آرکان، به شکل پروانه‌ای است که ترکی در وسط آن ایجاد می‌شود و توسط پین به فیکسچر متصل می‌شود. نمایی از این فیکسچر در شکل 1 نشان داده شده است.

2-2- معرفی فیکسچر بهبود یافته

در سال‌های اخیر طی تحقیقات متعددی که با استفاده از دستگاه آرکان صورت گرفته، به تدریج نقایص این دستگاه آزمایش به‌روز کرده و باعث احساس نیاز به طراحی دستگاه آزمایش جدید یا رفع نقایص آن شده است. برخی از این نقایص در مراجع [10، 11] جمع‌آوری و ذکر شده است. طراحی وسیله‌ی آزمایشی که این نقایص را رفع کند توسط چوپانی [11] پایه‌گذاری شد. این امر توسط ایشان و همکارانشان انجام گرفته و برخی از مطالعات مربوط گزارش شده است. نمای این فیکسچر در شکل 2 نشان داده شده است. نحوه‌ی طراحی گیره‌ی جدید به گونه‌ای است که تقارن کامل در آن رعایت می‌شود، لذا اثرات مود سوم در آن ایجاد نمی‌شود. در این فیکسچر، بار به جای اینکه توسط تعداد محدودی پین تحمل شود، توسط سطحی گسترده تحمل می‌شود که این امر مقاومت دستگاه را به میزان خیلی زیادی افزایش می‌دهد. همچنین در فیکسچر جدید محدودیتی برای ضخامت نمونه وجود ندارد و نمونه با هر ضخامتی، بدون برهم زدن تقارن بارگذاری، قابل استفاده است. برخلاف گیره‌ی آرکان که در آن کاربر برای جایگزینی نمونه‌ی آزمایش پروانه‌ای بزرگ به جای نمونه‌ی پروانه‌ای کوچک و یا برعکس، مجبور به باز و بسته کردن پیچ‌هایی می‌بود، در گیره‌ی جدید نیاز به چنین کاری نیست و به جای آن از یک قطعه‌ی واسطه که به صورت شیاری در گیره‌ی اصلی محکم می‌شود استفاده شده است. چنانکه تصاویر فیکسچر جدید نشان می‌دهد، به جای استفاده از تعداد محدودی سوراخ جهت تغییر زاویه‌ی بارگذاری، از یک بخش نر و ماده‌ی T شکل استفاده شده که بارگذاری در تمامی زوایا را ممکن می‌سازد و لذا امکان بررسی دقیق تر فراهم می‌شود.

3- انتگرال J

انتگرال J به طور فزاینده‌ای به عنوان یک پارامتر شکست برای توصیف رفتار

¹ Modified-Arcan

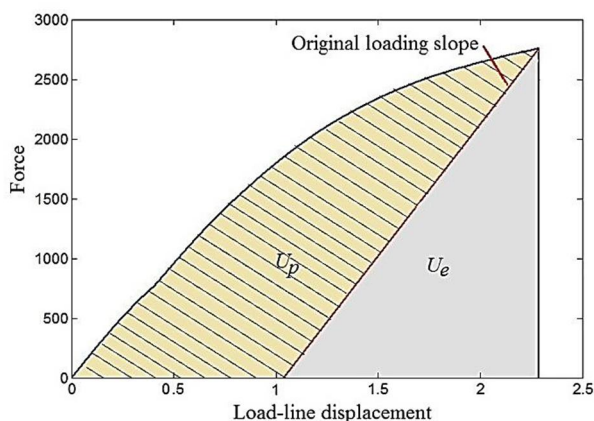


Fig. 4 Definition of the elastic and plastic energy components (areas) for J calculation

شکل 4 تعریف مولفه های الاستیک و پلاستیک انرژی (مساحت زیر منحنی) برای

محاسبه انتگرال J

$$\begin{cases} \eta_p = 2 & \text{نمونه SE(B)} \\ \eta_p = 2 + 0.522 \frac{b_0}{W} & \text{نمونه CT} \end{cases} \quad (8)$$

گرچه روابط فوق اولین بار برای بارگذاری تحت مود I شکست ارائه و مورد استفاده قرار گرفته اند [14, 18] ولی بعداً برای حالت مود II و نیز شرایط مود مرکب I/II نیز پیشنهاد و به کار گرفته شدند. در بارگذاری تحت مود II و مود مرکب داخل صفحه نیز روابط مشابهی را می توان تعمیم داد. بدین ترتیب $\eta_{p,m}$ و $\eta_{e,m}$ ضرایب مربوطه در حالت مود مرکب I/II خواهند بود که از حالت مود خالص I تا مود خالص II و حالات ترکیبی مختلف در این محدوده قابل تعریف خواهند بود [19]. بدین ترتیب می توان برای بارگذاری مود مرکب I/II روابط زیر را به کار برد:

$$J_I = J_{e,I} + J_{p,I} = \frac{K_I^2(1-\nu^2)}{E} + \frac{\eta_{p,I} U_{p,I}}{B(W-a)} \\ = \frac{1}{B(W-a)} (\eta_{e,I} U_{e,I} + \eta_{p,I} U_{p,I}) \quad (9)$$

$$J_{II} = J_{e,II} + J_{p,II} = \frac{K_{II}^2(1-\nu^2)}{E} + \frac{\eta_{p,II} U_{p,II}}{B(W-a)} \\ = \frac{1}{B(W-a)} (\eta_{e,II} U_{e,II} + \eta_{p,II} U_{p,II}) \quad (10)$$

$$J_m = J_{e,m} + J_{p,m} = \frac{(K_I^2 + K_{II}^2)(1-\nu^2)}{E} + \frac{\eta_{p,m} U_{p,m}}{B(W-a)} \\ = \frac{1}{B(W-a)} (\eta_{e,m} U_{e,m} + \eta_{p,m} U_{p,m}) \quad (11)$$

ضرایب شدت تنش مود I (K_I) و مود II (K_{II}) برای نمونه های مورد استفاده در این تحقیق از روابط زیر قابل محاسبه است [20, 8]:

$$K_I = \frac{P\sqrt{\pi a}}{BW} f_I(a/W) \quad (12)$$

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{\pi a}}{BW} f_{II}(a/W) \quad (13)$$

که P بار اعمالی، W عرض نمونه، B ضخامت نمونه و a طول ترک می باشد. $f_I(a/W)$ و $f_{II}(a/W)$ به ترتیب ضرایب هندسی یا ضرایب شدت تنش بی بعد² مود اول و مود دوم بوده و بوسیله روش های عددی نظیر آنالیز المان محدود به دست می آیند.

$$J = -\frac{1}{B} \frac{dU}{da} \quad (2)$$

که در آن U انرژی پتانسیل جسم بارگذاری شده (یا مساحت زیر منحنی بار-جابجایی خط بار)، a طول ترک و B ضخامت نمونه می باشد. مقدار J بنا به توصیه ای استاندارد ASTM-D6068 [15] به صورت رابطه ی زیر تعریف می شود.

$$J = \frac{\eta U}{B(W-a)} \quad (3)$$

با محاسبه ی مقدار انتگرال J و برآورد میزان گسترش ترک (Δa) برای نمونه های مختلف می توان نمودار ($J-\Delta a$) را ترسیم کرد. رابطه 3 بعداً به صورت زیر بیان شد [16]:

$$J = J_e + J_p \quad (4)$$

که J_e و J_p به ترتیب مولفه های الاستیک و پلاستیک J کل هستند و به صورت زیر بیان می شوند:

$$J_e = \frac{\eta_e U_e}{B(W-a)} \quad (5\text{-الف})$$

$$J_p = \frac{\eta_p U_p}{B(W-a)} \quad (5\text{-ب})$$

که U_e و U_p به ترتیب مولفه های انرژی الاستیک و پلاستیک از انرژی کل هستند که در شکل 4 نشان داده شده اند. η_e و η_p ضرایب تاثیر کار الاستیک و پلاستیک مربوطه هستند. W عرض نمونه و a طول ترک اولیه است. مولفه الاستیک انتگرال J در حالت کرنش صفحه ای به صورت زیر نیز قابل محاسبه است [17]:

$$J_e = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} \quad (6)$$

که K یا ضریب شدت تنش با توجه به نوع نمونه (معمولاً CT یا SE(B)) برای مود I و اندازه های مربوطه قابل محاسبه است. بنابراین رابطه J کل را می توان به صورت زیر نوشت [12, 18]:

$$J = \frac{K^2(1-\nu^2)}{E} + \frac{\eta_p U_p}{B(W-a)} \\ = \frac{1}{B(W-a)} (\eta_e U_e + \eta_p U_p) \quad (7)$$

ضریب تاثیر کار الاستیک η_e برای هر هندسه ای از نمونه از روش کامپلیانس یا از فاکتور هندسی $f(a/W)$ و ضریب تاثیر کار پلاستیک η_p از آنالیز بار حدی¹ یا از تحلیل المان محدود قابل محاسبه است. مقدار η_p توسط سامپتر و تورنر [16] به عنوان ضریبی برای ارتباط بین سطح پلاستیک زیر نمودار نیرو-جابجایی و انتگرال J (مولفه پلاستیک) معرفی شد که برای دو نمونه کششی فشرده (CT) و نمونه خمشی (SENB) به صورت زیر تعریف می شود:

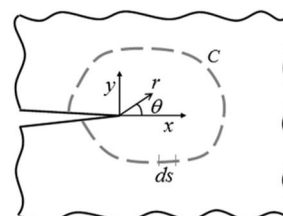


Fig. 3 Arbitrary contour around a crack tip and coordinates required in definition of the J -integral

شکل 3 یک کانتور دلخواه حول نوک ترک و مختصات مورد استفاده برای تعریف انتگرال J

² Non-dimensional stress intensity factor

¹ Limit load analysis

منطقه کش‌یافته افزایش یافته است. کندشدن (از حالت تیزی در آمدن) نوک ترک باعث شکل‌گیری این منطقه کشیده قبل از جداسازی مواد می‌شود. با فرض اینکه اندازه منطقه کشیده، $(\Delta a)_{sz}$ ، برابر با نیمی از جابجایی (باز شدن) دهانه ترک، COD^3 ، است و رابطه COD با J به صورت $J = (COD)\sigma_Y$ تنش تسلیم موثر ماده) باشد، خط کند شدن یا بی‌نوک شدن (خط بلانتینگ) می‌تواند به صورت $J = 2(\Delta a)_{sz}\sigma_Y$ بیان شود.

در نقطه شروع شیب به طور ناگهانی کاهش می‌یابد، که منعکس کننده این واقعیت است که مقاومت در برابر ازدیاد طول ترک در طی دوره رشد کمتر از مقدار مقاومت در مدت زمان شروع رشد است. با این حال، در بسیاری از مواد این تغییر در شیب تدریجی بوده و یک منحنی مقاومت خطی مطابق با آن چه در شکل 5 نشان داده شده است یک مقدار برای J_{IC} به دست می‌دهد که غیر صریح (غیر دقیق) است. به این دلیل، بخش رشد ترک نرم از منحنی $J-\Delta a$ معمولاً به صورت یک منحنی توانی بجای خطی برازش می‌شود [12].

برای تهیه یک منحنی $J-\Delta a$ دو روش آزمون می‌تواند به کار گرفته شود بسته به اینکه مقادیر Δa به صورت فیزیکی اندازه‌گیری گردد و یا تخمین زده شود [22].

4-2- روش منحنی R چند نمونه‌ای

روش چند نمونه‌ای برای اولین بار در سال 1972 توسط لاندز و بگلی [23] ارائه و امروزه تبدیل به یکی از مهمترین و معتبرترین روشهای تعیین منحنی $J-R$ شده است. در این روش، نمونه‌های یکسان و یکنواخت با طول ترک اولیه برابر تا مقادیر مختلف جابجایی خط بار برای به دست آوردن سطوح مختلف رشد ترک بارگذاری و سپس به طور کامل باربرداری می‌شود. بعد از باربرداری، نمونه‌ها برای اندازه‌گیری فیزیکی مستقیم گسترش طول ترک، شکسته شده و سطح ترک مشاهده می‌شود. مقدار J برای هر نمونه، از اندازه‌گیری مساحت زیر منحنی بار-جابجایی با استفاده از معادلات 9 تا 11 با مقادیر مناسب از η_e و η_p محاسبه می‌شود. سپس منحنی مقاومت رشد ترک با ترسیم مقادیر J در برابر مقادیر Δa مربوطه به دست می‌آید.

این روش که توسط محققان زیادی استفاده شده نشان می‌دهد که مشخصات شکست مواد پلیمری نرم را می‌توان با استفاده از روش انتگرال J تعیین کرد. در روش چند نمونه‌ای نیازی به وجود تجهیزات دقیق پایش اندازه رشد ترک در حین آزمایش نبوده و این مساله، آن را کاربردی‌تر و امکانپذیرتر ساخته است. با این حال، روش آزمون چند نمونه‌ای هم زمان‌بر است و هم نیاز به مقدار زیادی از ماده مورد نظر برای ساخت نمونه‌های آزمون دارد. به

تکنیک دیگری برای ارزیابی تجربی انتگرال J تحت بارگذاری مود مرکب توسط توگو و ایشی [21] پیشنهاد شده است. آنها با به کار بردن نمونه نامتقارن خمش سه و چهار نقطه‌ای برای ترکیب اثرات مودهای I و II رابطه زیر را برای حالت مود مرکب پیشنهاد کردند:

$$J_{p,I+II} = \frac{1}{B(W-a)} (\eta_{p,I} U_{p,I} + \eta_{p,II} U_{p,II}) \quad (14)$$

که $\eta_{p,I}$ ، $\eta_{p,II}$ و $\eta_{p,m}$ (یا $\eta_{p,I+II}$) به ترتیب مربوط به بارگذاریهای مود I، مود II و مود ترکیبی I/II هستند و این رابطه با محاسبه ضرایب مذکور به صورت زیر ارائه شده است:

$$J_{p,I+II} = \frac{1}{B(W-a)} (2.38 U_{p,I} + 0.9 U_{p,II}) \quad (15)$$

4- پلیمرها، منحنی $J-R$ و J_{IC} بعنوان پارامتر شکست

امروزه مواد پلیمری به طور فزاینده‌ای برای کاربرد در سازه‌های تحمل بار استفاده می‌شوند و در نتیجه، درک درستی از خواص شکست این مواد دارای اهمیت زیادی است. مکانیک شکست الاستیک خطی با موفقیت خواص شکست پلیمرهای با رفتار ترد را توصیف می‌کند و تحقیقات زیادی در این زمینه بررسی و کاربردی شده‌اند. روش آزمون تعیین چقرمگی شکست کرنش صفحه‌ای، K_{IC} ، به خوبی پذیرفته و مستند شده است. محدودیت اصلی این آزمون، حداقل اندازه نمونه است که می‌تواند مورد آزمایش قرار گیرد. با توجه به استاندارد ASTM، شرایط کرنش صفحه‌ای در نوک ترک زمانی حاصل می‌شود که اندازه‌های حداقل مورد نیاز زیر برآورده شوند [17]:

$$W \geq 2B \quad \text{و} \quad a, W-a, B > 2.5 (K_{IC}/\sigma_Y)^2 \quad (16)$$

این محدودیت ابعاد در حقیقت، اندازه ناحیه پلاستیک نوک ترک را نسبت به ابعاد نمونه، محدود می‌کند زیرا اندازه ناحیه پلاستیک متناسب با نسبت $(K_{IC}/\sigma_Y)^2$ است. تنها، هنگامی که ابعاد نمونه بزرگتر از اندازه حداقل محدود شده توسط رابطه بالا باشد می‌توان انتظار داشت که منطقه پلاستیکی دارای اثر ناچیزی بر تنش در اطراف نوک ترک و در نتیجه بر روی مقدار اندازه گیری شده K_{IC} باشد. برای مواد پلیمری چقرمه، اندازه‌های ممکن و یا در دسترس نمونه، مانع از اندازه‌گیری معتبر چقرمگی با نمونه‌های مورد تاکید مفاهیم مکانیک شکست الاستیک خطی برای تجزیه و تحلیل می‌شود زیرا که ناحیه تسلیم پلاستیک قابل توجهی در نوک ترک قبل از شروع گسترش ترک رخ می‌دهد. این محدودیت اندازه نمونه منجر به توسعه روش انتگرال J و رویکرد مقاومت در برابر رشد ترک "منحنی J " شده است که اندازه‌گیری باثبات چقرمگی شکست در نمونه‌هایی بسیار کوچکتر از ابعاد نمونه‌های روش K_{IC} را امکان‌پذیر می‌سازد [12]. مقدار بحرانی J ، J_{IC} ، که مربوط به مقدار بحرانی رشد ترک در بارگذاری مود I است، پارامتری است که محاسبه مقدار آن در این روش‌ها مورد نظر است.

4-1- منحنی مقاومت رشد ترک (منحنی R)

برای احتساب اثرات رشد ترک، مفهوم منحنی‌های مقاومت توسعه داده شده است که در آنها K شبه‌الاستیک یا J الاستیک-پلاستیک در برابر گسترش ترک رسم می‌شود. هیچ کدام از این مفاهیم دارای اعتبار کافی نیستند اما یک راهکار برای تعریف مقدار انرژی مورد نیاز برای پیشبرد ترک تامین می‌کنند. منحنی ساده شده J در برابر رشد ترک، Δa ، به صورت شماتیک در شکل 5 نشان داده شده است. بخش اول که با شیب بالا (خط بلانتینگ²) قبل از شروع توسعه می‌یابد زمانی است که طول ترک اولیه فقط کمی توسط هندسه

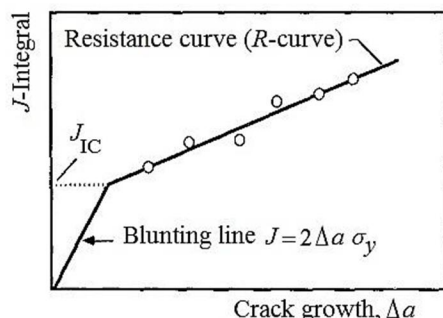


Fig. 5 Schematic J-integral – crack growth, Δa , curve [12]

شکل 5 منحنی شماتیک انتگرال J در برابر رشد ترک، Δa [12]

³ Crack opening displacement

¹ R-curve

² Blunting line

5-1-2- استاندارد ASTM E813-87 [25]

در این نسخه از استاندارد نیز نقاط منحنی J - Δa برای منحنی مقاومت، آن نقاطی هستند که بین دو خط جدایش فاصله دارموازی با خط بلانتینگ $J=2\Delta a\sigma_Y$ قرار می‌گیرند. حداقل فاصله (محل اولین خط) برابر است با 0.15 میلیمتر گسترش طول و حداکثر فاصله (محل دومین خط) با گسترش طول ترک 1.5 میلیمتر تعیین شده است. همچنین در این نسخه الزامی است که حداقل یک نقطه از نقاط منحنی در محدوده مابین خط جدایش 0.15 و خط موازی خط بلانتینگ در گسترش طول ترک 0.5 میلیمتر و نیز حداقل یک نقطه دیگر از نقاط منحنی در محدوده مابین دو خط موازی با خط بلانتینگ در گسترش طول ترک 1 و 1.5 میلیمتر قرار داشته باشد. سپس منحنی مقاومت با استفاده از برازش یک منحنی توانی به نقاط داده قابل قبول مابین این دو خط جداساز به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\ln J = \ln C_1 + C_2 \ln \Delta a_p \quad (17)$$

از تقاطع این منحنی مقاومت توانی با خطی به موازات خط بلانتینگ با فاصله 0.2 میلیمتر از آن مقدار J_{IC} به دست می‌آید.

در مرجع [26] رفتار الاستیک-پلاستیک پلیمر ABS² با استفاده از فیکسچر آرکان اصلاح یافته با بهره‌گیری از این دو نسخه استاندارد و روش نرمالیزیشن³ در سه زاویه 0، 45 و 90 درجه بررسی شده و چقرمگی‌های حاصل مورد مقایسه قرار گرفته است. مرجع [27] نیز شروع شکست نرم نمونه‌های آلومینیومی و مرجع [28] شکست نرم تحت بارگذاری ضربه‌ای را تحت بارگذاری مود مرکب بررسی نموده است.

5-1-3- استاندارد به روز شده E1820

در سال‌های گذشته مطالعات بسیاری جهت تکمیل و تصحیح دو استاندارد E813-87 و E813-81 انجام گرفته است. بعدها استاندارد (1987) E1152 بعنوان نسخه به روز شده این استانداردها مورد پذیرش قرار گرفت. سپس به عنوان یک قدم بزرگ، ترکیب آن استانداردها برای به دست آوردن چقرمگی شکست و منحنی J - R منجر به ارائه استاندارد E1737 (1996) گردید. این استاندارد همچنین محاسبه انتگرال J در شروع شکست ناپایدار را ممکن می‌کند. بدین منظور دو کمیت به صورت J_C و J_U به ترتیب برای نشان دادن پایداری شکست بدون گسترش نرم ترک و با گسترش نرم ترک معرفی می‌شود. علاوه بر این امکان اندازه‌گیری J_{IC} ترکی که ناپایدار شده به شرط وجود حدودا یک میلیمتر گسترش ترک پایدار وجود دارد.

در سال 1996 نسخه اولیه استاندارد E1820 به منظور بررسی شکست مواد فلزی و به دست آوردن منحنی J - R ، چقرمگی ماده با پارامترهای J ، K و CTOD برای مود اول شکست ارائه شد و پس از چندین ویرایش در سال 2013 نسخه نهایی آن تهیه شده و ضمن دربرگرفتن استانداردهای قبلی جایگزین آنها معرفی گردید. E1820-13e1 [18] یک استاندارد جهانی برای اندازه‌گیری مقدار بحرانی انتگرال J و تهیه منحنی J - R است. نمونه‌های توصیه شده این استاندارد، نمونه خمشی تیر با ترک یک لبه‌ای (SENB) و یا (SE (B)، نمونه کششی (CT) و نمونه کششی دیسکی (DCT) هستند. روش آزمون توصیه شده، روش کامپلیانس باربرداری الاستیک برای اندازه‌گیری داده‌های متعدد از یک تک‌نمونه است. این روش نیازمند اندازه‌گیری پیوسته بار اعمالی، جابجایی خط بار⁴ (LLD) و مقدار بازشوندگی دهانه ترک (CMOD) است. از داده‌های آزمون برای تعیین کامپلیانس نمونه،

این دلایل، به ویژه در دسترس بودن محدود از مواد، توجه زیادی به توسعه یک روش آزمون جایگزین برای تعیین منحنی R و در نتیجه مقدار J_{IC} شده است. از این رو، به موازات کاربرد روش مذکور، توسعه روش منحنی R تک‌نمونه‌ای توسط بسیاری از محققان مدنظر قرار گرفته است که همان روش دوم است که در آن مقدار گسترش طول ترک از روش تخمین به دست می‌آید.

5- مطالعات و استانداردها

مفهوم نظری انتگرال J ابتدا توسط رایس [5] در سال 1968 پیشنهاد شد و در اصل به عنوان اندازه‌ای از شدت میدانهای الاستیک-پلاستیک نوک ترک مورد استفاده قرار گرفت. تحقیقات تجربی پیشگام بگلی و لندز (1972) [23] باعث شد انتگرال J به یک پارامتر مورد اندازه‌گیری ماده تبدیل شود. از آن زمان، تحقیقات گسترده تحلیلی، عددی و تجربی در توسعه روش‌های آزمون موثر برای ارزیابی مقدار بحرانی انتگرال J ، J_{IC} برای ترک‌های ثابت و منحنی J - R برای ترک در حال رشد انجام شده است. تکنیک‌های تجربی تفصیلی و دستورالعمل‌های آزمایش برای تهیه منحنی J - R توسط ASTM توسعه یافته‌اند که به صورت کتابچه‌ی راهنمای ASTM توسط جویس (1996) [14] مستند شده است. در اولین آزمایش چقرمگی شکست بر اساس J ، استاندارد ASTM E813 1981، مصوب [24]، فقط نتیجه تجربی مقدار انتگرال J در شروع پارگی نرم¹ به عنوان یک اندازه از چقرمگی شکست مواد پذیرفته شد. نسخه‌های بعد، از جمله ASTM E1152، E1737 و E1820 حاوی دستورالعمل‌های آزمون استاندارد و روش‌هایی برای تخمین مقدار بحرانی J و تهیه منحنی‌های J - R هستند.

5-1-1- رویه‌های تشخیص صلاحیت داده‌ها در ASTM برای تهیه

منحنی J - R و تخمین J_{IC}

به منظور تعیین اندازه‌گیری معتبر چقرمگی شکست ماده، J_{IC} و تهیه یک منحنی دقیق مقاومت در برابر رشد ترک (منحنی J - Δa)، الزامات اعتبارسنجی خاص و رویه‌های کنترل و تعیین صلاحیت داده‌ها توسط ASTM مشخص شده است. نیازمندی‌های اعتبار آزمایش به داده‌ها جهت اطمینان از عدم وابستگی آزمایش به اندازه نمونه اعمال می‌شود به طوری که J_{IC} بطور منحصر به فرد رفتار شکست مواد نرم را مشخص کند. رویه‌های کنترل داده‌ها همچنین برای اطمینان از ثبات منحنی مقاومت رشد ترک استفاده می‌شوند. شکل 6 نشان دهنده دو شیوه صلاحیت‌سنجی داده‌ها است که توسط ASTM ارائه شده است. خلاصه‌ای از این دو رویه و شیوه‌ای که مقدار J_{IC} تعیین می‌شود در زیر آورده شده است.

5-1-1- استاندارد ASTM E813-81 [24]

این نسخه از استاندارد نقاط منحنی J - Δa برای منحنی مقاومت را آن نقاطی که بین دو خط جدایش فاصله دارموازی با خط بلانتینگ $J=2\Delta a\sigma_Y$ قرار می‌گیرند تعیین می‌کند. حداقل فاصله (محل اولین خط) برابر است با 0.6% طول قسمت ترک نخورده عرض نمونه (لیگامنت) و حداکثر فاصله (محل دومین خط) برابر با 6% طول قسمت ترک نخورده تعیین شده است. سپس منحنی مقاومت با استفاده از بهترین خط برازش خطی به نقاط داده مابین این دو خط جداساز تعریف می‌شود. تقاطع منحنی مقاومت با خط بلانتینگ مقدار J_{IC} را به دست می‌دهد.

¹ Ductile tearing² Acrylonitrile Butadiene Styrene³ Normalization method⁴ Load Line Displacement

صفحه‌ای تنش‌ها در ناحیه نوک ترک است. برای ارضاء این شرایط تنش تمام ابعاد نمونه بایستی از ضریبی از J_{IC}/σ_Y بیشتر باشد. مطابق استانداردهای ASTM، مقدار J_{IC} معتبر هنگامی حاصل می‌شود که:

$$B_1(W-a) \geq 10(J_{IC}/\sigma_Y) \quad (18)$$

$$\frac{dJ}{d(\Delta a)} \leq \sigma_Y \quad \text{در } \Delta a_Q \quad (19)$$

که شیب منحنی توانی برازش شده، $dJ/d(\Delta a)$ در $\Delta a_Q=0.2$ mm ارزیابی می‌شود. در نسخه اولیه E1820 در رابطه 18 بجای ضریب 10 مقدار 25 مورد استفاده قرار می‌گرفت. شرط 19 نیز در ویرایش 2013 حذف شده است [25، 24، 17، 15].

گذشته از این، در برخی از مراجع [12]، طبق توصیه استانداردهای قدیمی برای اینکه اطلاعات منحنی $J-\Delta a$ بعنوان یک خصوصیت ماده و مستقل از ابعاد نمونه قابل پذیرش باشد بایستی $\omega \geq 10$ شود که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\omega = \frac{W-a}{J_{IC}} \frac{dJ}{d(\Delta a)} \quad (20)$$

3-5- استاندارد ASTM D6068 [15]

این استاندارد روش آزمون تعیین منحنی مقاومت تغییرات انتگرال J در مقابل رشد ترک ($J-R$) را برای مواد پلیمری پوشش می‌دهد. این استاندارد بر اساس استفاده از روش چندنمونه‌ای بنا شده و برای نمونه‌ها نسبت طول ترک به عرض قطعه در محدوده $0.5 < a/W < 0.65$ توصیه شده است. در این استاندارد حداقل مقدار رشد ترک (Δa) برابر 0.05 میلی‌متر و حداکثر مقدار آن برابر با $0.1b_0$ تعریف شده است که به صورت خطوط عمودی (موازی محور عمودی) ترسیم می‌شوند و محدوده نقاط قابل قبول آزمایش را مشخص می‌کنند. در این استاندارد محدوده داده‌های معتبر با خطوط موازی با خط بلانتینگ مشخص نمی‌شود و مقدار حداکثری برای ظرفیت انتگرال J نمونه تعیین نمی‌گردد در حالی که در استاندارد E1820-13 حداکثر ظرفیت انتگرال J برای نمونه جهت مستقل از اندازه بودن منحنی $J-R$ برابر $J_{limit} = b_0 \sigma_Y / 7.5$ تعریف شده است که در نسخه‌های اولیه بجای 7.5 مقدار 15 استفاده می‌شد.

پس از تعیین محدوده قابل قبول، این منطقه به 4 ناحیه مساوی هم (از لحاظ محور افقی یا مقدار رشد ترک) تقسیم می‌شود. در این آزمایش الزامی است که حداقل 3 نقطه از نقاط منحنی در محدوده ناحیه اول (رشد کم ترک)، حداقل 2 نقطه در ناحیه دوم و یک نقطه در هر کدام از نواحی سوم و چهارم قرار داشته باشد. سپس منحنی مقاومت با استفاده از برازش یک منحنی توانی به نقاط داده قابل قبول مابین این دو خط جداساز به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$J = C_1 \Delta a_p^{C_2} \quad (21)$$

که بایستی توان C_2 کوچک‌تر از یک باشد. در این استاندارد روشی برای تخمین J_{IC} پیشنهاد نشده است. نتایج حاصل از این پژوهش در قالب این استاندارد ارائه شده است.

6- مواد و روشها

در این پژوهش، نمونه‌های پلی پروپیلن از ورق‌های تزریقی ساخته شده از گرانول هموپلیمر پلی پروپیلن P-FI-80 تولیدی شرکت پلی‌نار تبریز برش زده شده است. این محصول شاخص ذوب¹ (MFI) در حدود 8 dg/min

¹ Melt Flow Rate Index

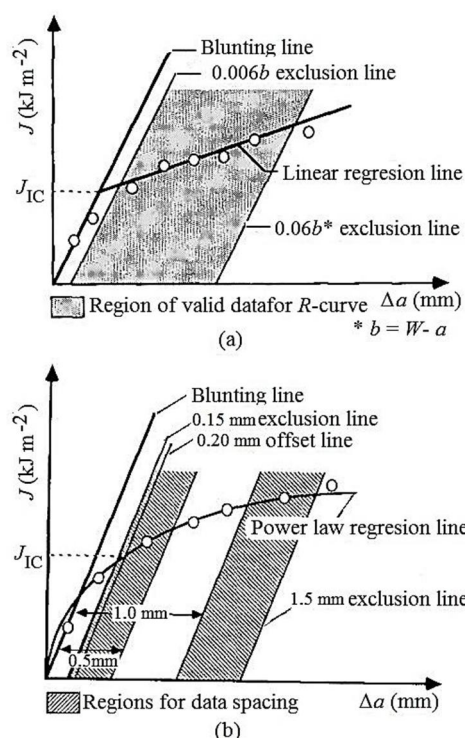


Fig. 6 J-R curve and J_{IC} data-qualifying schemes according to ASTM standards; a: E813-81 and b: E813-87 [24, 25]

شکل 6 رویه‌های تشخیص صلاحیت داده‌های منحنی $J-R$ و J_{IC} مطابق استانداردهای ASTM، a: E813-81 و b: E813-87 [25، 24]

طول لحظه‌ای ترک و مقدار انتگرال J برای ترک در حال رشد استفاده می‌شود. مقدار انتگرال J از یک معادله گام به گام مبتنی بر LLD محاسبه می‌شود. سپس منحنی $J-R$ با ترسیم تغییرات انتگرال J در برابر گسترش ترک به دست می‌آید (شکل 7).

2-5- نیازمندیهای اعتبار J_{IC}

مقدار انتگرال J در صورتی بعنوان J_{IC} ارزیابی می‌شود که نمونه از الزامات اندازه خاصی برخوردار باشد که به منظور دستیابی به شرایط حالت کرنش

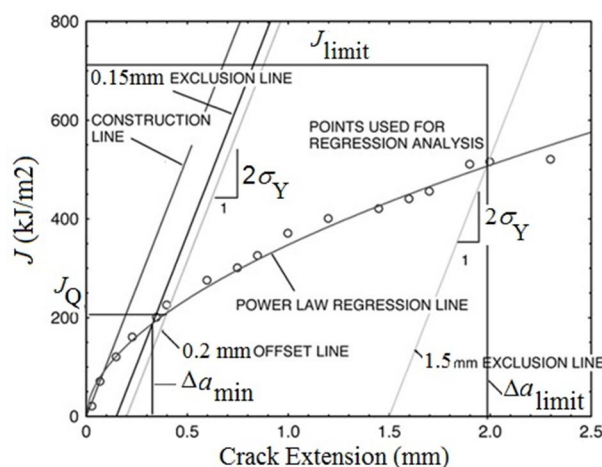


Fig. 7 Definition of construction lines for data qualification of a J-R curve and J_{IC} evaluation according to ASTM E1820-13 [18]

شکل 7 تعریف خطوط ساختاری برای تعیین صلاحیت داده‌های یک منحنی $J-R$ و ارزیابی J_{IC} مطابق ASTM E1820-13 [18]

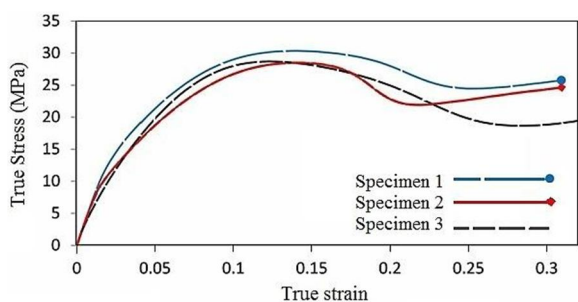


Fig. 10 True strain-stress curves obtained from tension tests

شکل 10 نمونه منحنی‌های کرنش - تنش حقیقی حاصل از آزمایش‌های کشش

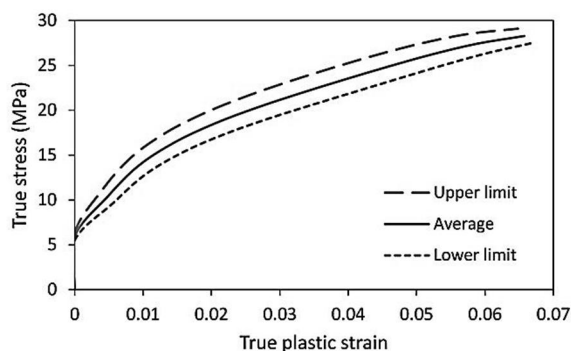


Fig. 11 True stress versus true plastic strain curves obtained from tension tests

شکل 11 منحنی تنش حقیقی در برابر کرنش پلاستیک حقیقی حاصل از آزمایش‌های کشش

جدول 1 مشخصات مکانیکی نمونه‌های پلی پروپیلن

E (MPa)	σ_{yt} (MPa)	σ_{ut} (MPa)	ν	ρ (kg/m ³)	پارامتر
830	11.5	28.5	0.42	0.9	مقدار میانگین
10.423	0.2217	0.7932	[7]	[7]	انحراف معیار یا مرجع

2-6- آزمایش‌های شکست

نمونه‌های آزمایش شکست به صورت پروانه‌ای بزرگ و با ضخامت 22 میلیمتر تهیه شدند. نسبت طول ترک به عرض نمونه با توجه به استانداردهای اشاره شده برابر $a/W=0.6$ انتخاب شد. بخشی از طول اولیه ترک توسط واترجت و با دهانه 1 میلیمتر ایجاد شده و ادامه آن توسط تیغه نازک آهن‌بری و در نهایت قسمت اصلی نوک ترک مطابق با استاندارد D6068 توسط تیغ جراحی و تیغ ریش تراشی (حداقل 5% طول ترک ≈ 1.7 میلیمتر) آماده شد (شکل 12). برای شروع آزمایش‌های شکست، ابتدا فیکسچر جدید روی دستگاه کشش نصب گردید. با چرخش این وسیله، مود یک یا مود کششی خالص، مود دو یا مود برشی خالص و مود مرکب داخل صفحه I/II، به طور پیوسته برای هر زاویه‌ای قابل بررسی می‌باشد (شکل 13). برای از بین بردن اثرات دینامیکی، مطابق با استاندارد D6068، جابجایی کششی با سرعت ثابت 1 میلی‌متر بر دقیقه اعمال گردید. نمودارهای بار-تغییر مکان توسط دستگاه کشش، ثبت و سپس از آنها برای تعیین بارهای بحرانی و سطح زیر منحنی استفاده شده است.

آزمایش‌ها برای مود یک، مود دو و مودهای مرکب با گام 15 درجه و در دمای آزمایشگاه (25°C) مورد اجرا قرار گرفت. برای هر زاویه ابتدا یک نمونه

(230°C / 2.16kg) و دمای نرمی در حدود 154 درجه سانتیگراد دارد و چگالی آن در حدود 0.9 گرم بر سانتیمترمکعب است. تمامی نمونه‌های آزمایش کشش و آزمایش شکست همگی از یک ورق و توسط دستگاه واترجت¹ (برش با جت آب) با دقت بالا برش زده شده‌اند.

1-6- مشخصات مکانیکی ماده

مشخصات مکانیکی این محصول از آزمایش‌های کشش نمونه‌های تهیه شده مطابق استاندارد D638-14 [29] و استفاده از نمونه‌های مشابه در مراجع معتبر به دست آمده است. نمونه‌های دمبل (شکل 8) با ضخامت 9 میلیمتر تهیه و توسط دستگاه آزمایش کشش تولیدی شرکت SANTAM ایران با مدل STM-50 مورد آزمایش قرار گرفت. نمایی از این دستگاه در شکل 9 مشاهده می‌شود. حداکثر ظرفیت کشش دستگاه 50 kN می‌باشد و قابلیت کنترل جابجایی با سرعت‌های مختلف را دارا است. در آزمایش‌های کشش، جابجایی کششی مطابق استاندارد D638-14 با سرعت ثابت 5 میلی‌متر بر دقیقه به نمونه‌ها اعمال گردید.

منحنی‌های حاصل از آزمایش‌های کشش تهیه و سپس به صورت منحنی تنش حقیقی و کرنش حقیقی تبدیل شده‌اند. در شکل 10 سه نمونه از این منحنی‌ها آورده شده است. همچنین مشخصات رفتار پلاستیک این ماده با ترسیم منحنی تنش حقیقی در برابر کرنش پلاستیک حقیقی به صورت حد بالا و حد پائین آزمایش‌ها در شکل 11 نشان داده شده است. همچنین مشخصات مکانیکی پلیمر مورد استفاده در جدول 1 آورده شده است. مقاومت تسلیم موثر که میانگین مقاومت تسلیم و مقاومت کششی نهایی است برای این ماده در حدود $\sigma_Y = (\sigma_{yt} + \sigma_{ut})/2 = 20$ MPa است.

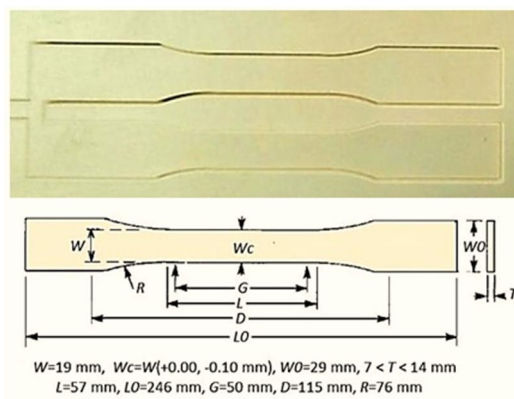


Fig. 8 Standard tension test specimens

شکل 8 نمونه‌های آزمایش استاندارد کشش

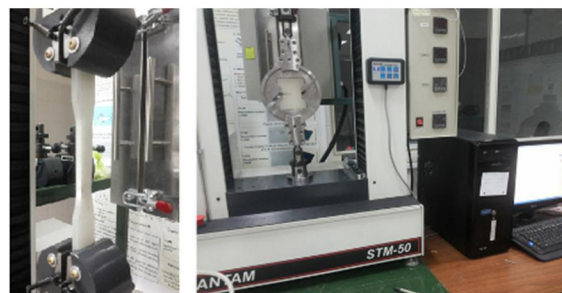


Fig. 9 Tensile testing machine; new fixture and tension specimen installed on it

شکل 9 دستگاه آزمایش کشش با فیکسچر جدید و نمونه کششی نصب شده روی آن

¹ Water-Jet

در زاویه 45 درجه را نشان می‌دهد. در شکل 16 نیز نمونه‌هایی از سطوح رشد ترک پس از عملیات ترساز و شکست نشان داده شده است. این سطوح مطابق قواعد استاندارد D6068 (شکل 17) بررسی و مقدار رشد ترک مشخص می‌شود. روال به این ترتیب است که ابتدا مقدار رشد ترک در نقاط 1 و 5 با هم میانگین‌گیری شده و سپس نتیجه حاصل با 3 عدد خوانده شده برای رشد ترک در نقاط 2، 3 و 4 میانگین‌گیری (از 4 عدد) می‌شود و مقدار نهایی رشد فیزیکی ترک، a_p ، به دست می‌آید.

7- تحلیل‌های عددی

تحلیل‌های عددی توسط نرم‌افزار آباکوس و با مدلسازی مجموعه فیکسچر و نمونه ترک‌دار و مش‌بندی آنها (شکل 18) انجام شده است. نمونه‌های شکست به همراه گیره آزمایش توسط المان‌های چهارگوش اصلاح شده‌ی هشت نقطه‌ای (CPE8R) مدل شده و از 10 کانتور در راس ترک جهت

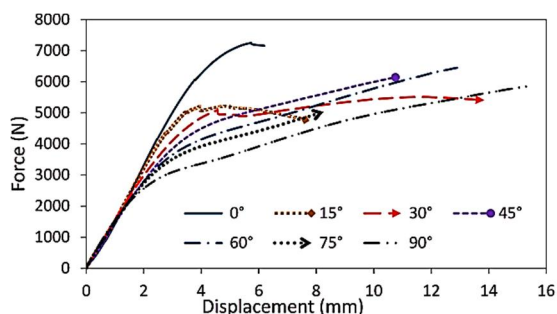


Fig. 14 Some of displacement-load curves obtained from ductile fracture tests under in-plane mixed-mode conditions with increment of 15 degrees for loading angle

شکل 14 نمونه منحنی‌های جابجایی- بار در آزمایش‌های شکست (با پارگی نرم زیاد) تحت مود مرکب صفحه‌ای از زاویه بارگذاری 0 تا 90 درجه با گام 15 درجه

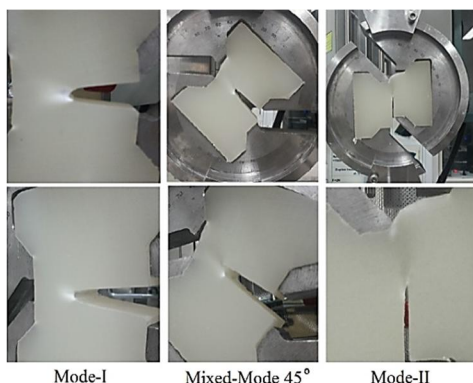


Fig. 15 Crack growth style in three loading conditions

شکل 15 الگوی رشد ترک در سه حالت مختلف بارگذاری



Fig. 16 Breaking open to expose of the crack surface after chilling specimens using immersion in liquid nitrogen

شکل 16 شکست نمونه‌ها برای رویت سطوح رشد ترک پس از ترساز با استفاده از نیتروژن مایع

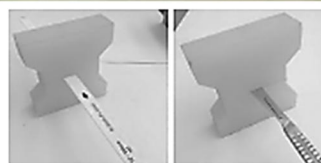
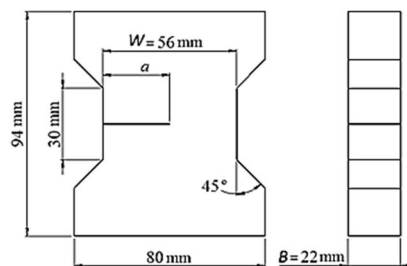


Fig. 12 Fracture butterfly-shape specimens and their preparing

شکل 12 نمونه‌های پروانه‌ای آزمایش‌های شکست و نحوه آماده سازی آنها

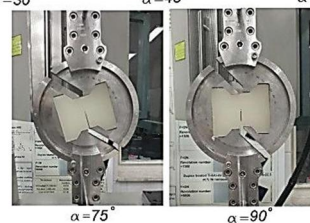
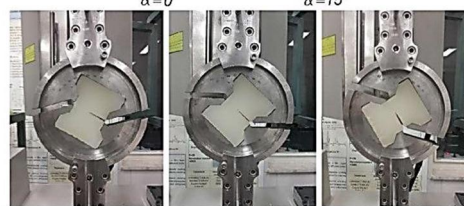
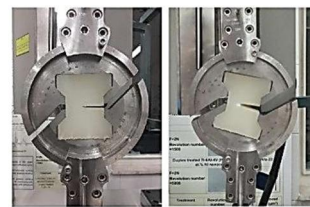


Fig. 13 Fracture tests under mode-I, mode-II and I/II mixed-mode states with increment of 15 degrees for loading angle

شکل 13 آزمایش شکست نمونه‌ها تحت مدهای I، II و مود مرکب I/II با گام افزایشی 15 درجه برای زاویه بارگذاری

تا بیشترین مقدار لازم نزدیک به گسیختگی کامل بارگذاری شد تا هم نمودار کلی بار-جابجایی برای آن و هم نحوه شروع و رشد ترک در آن زاویه شناخته شود (شکل 14). سپس برای هر زاویه بارگذاری، هر نمونه (از حداقل 7 نمونه) با توجه به شناخت منحنی بار-جابجایی تا یک بار مشخص بارگذاری شد و بعد از آن بارگذاری متوقف و باربرداری کامل انجام شد. نمونه‌ها بعداً با قرارگیری در داخل ظرف نیتروژن مایع (ازت) تحت شوک دمایی قرار گرفتند تا با ترد شدن رفتار، بسادگی با ضربه آرام جهت مطالعه سطح رشد و اندازه‌گیری مقدار رشد ترک بتوان آنها را شکست. شکل 15 سه حالت مختلف از گسترش و رشد ترک برای مدهای خالص اول و دوم و مود ترکیبی

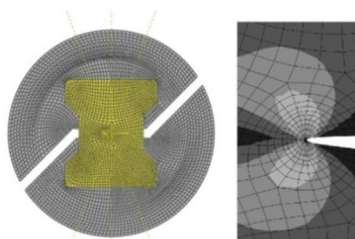


Fig. 18 Meshing of the fixture and specimen in ABAQUS

شکل 18 مش بندی فیکسچر و نمونه در نرم افزار آباکوس

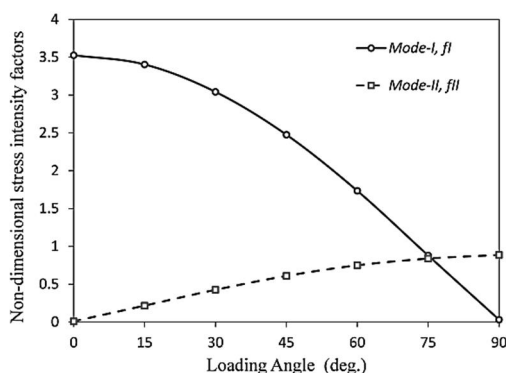


Fig. 19 Mode-I and mode-II non-dimensional stress intensity factors versus mixed-mode I/II loading angle

شکل 19 تغییرات ضرایب بی بعد شدت تنش مود I و مود II در برابر زاویه بارگذاری در مود مرکب I/II

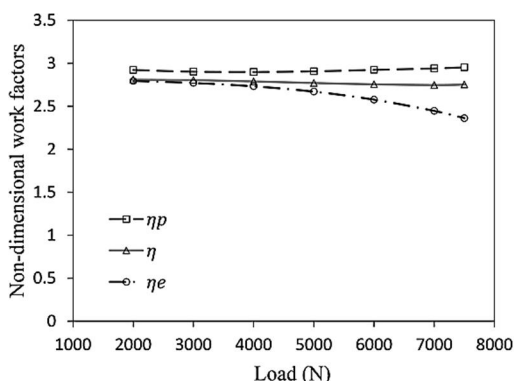


Fig. 20 Mode-I total, elastic and plastic geometrical work factors; η , η_e and η_p

شکل 20 ضرایب هندسی کار کل، الاستیک و پلاستیک؛ η و η_e برای مود I

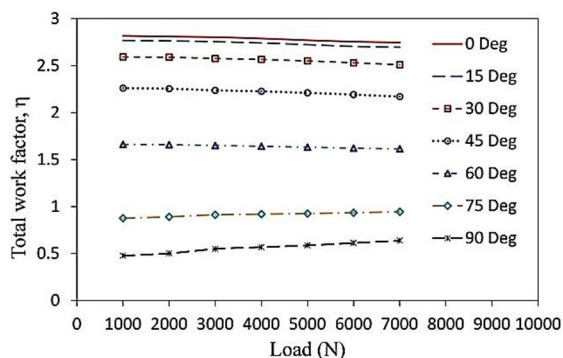


Fig. 21 Total work factor, η , for several in-plane mixed-mode loading angle versus load

شکل 21 تغییرات ضریب کار η در برابر بار وارده برای زوایای مختلف مود مرکب داخل صفحه

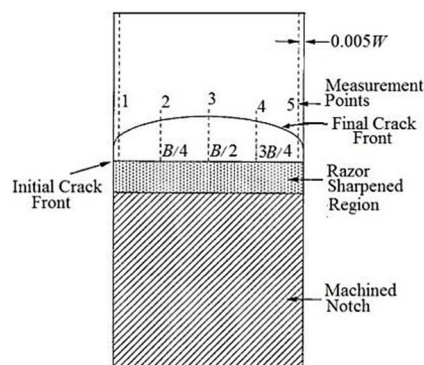


Fig. 17 Measurement of crack growth, Δa [15]

شکل 17 اندازه گیری مقدار رشد ترک، Δa [15]

محاسبه ای انتگرال J استفاده گردیده است. بار بصورت گسترده در دو طرف گیره (مطابق با سطح درگیری گیره های کشش دستگاه) اعمال شده است. اجزاء گیره و نمونه آزمایش به صورت کامل با یکدیگر درگیر و منطبق بوده و حرکت اصطکاکی بین آنها در نظر گرفته نشده است. در این مطالعه شرایط استاندارد برای تحلیلهای خطی المان محدود تحت شرایط کرنش صفحه ای و با استفاده از میدان تکنیکی $1/\sqrt{r}$ استفاده شده است و در المان های اطراف ترک گره های میانی به $1/4$ فاصله ی خود تا نوک ترک منتقل شده اند. تعداد المان ها جهت دستیابی به نتایج بهتر، برای نمونه 1638 و برای گیره 2965 و در مجموع برابر 4603 اختیار شده است و ریزتر کردن المان ها تغییر محسوسی در نتایج (کمتر از 0.1 درصد) نشان نداد. اعمال بار در زوایای بارگذاری متفاوت (از 0 تا 90 و با گام 15 درجه) و به صورت بار گسترده در طول یک کمان انجام گرفته است. مشخصات ماده نمونه ها به صورت یک ماده ایزوتروپ الاستیک-پلاستیک از نتایج مشخصات مکانیکی تعریف شده است.

با اعمال یک بار دلخواه (1000N) و به دست آمدن ضرایب شدت تنش مود I و مود II برای زوایای مختلف، از طریق روابط 12 و 13 ضرایب بی بعد شدت تنش مود I و مود II در این زوایا محاسبه شد که نتایج در شکل 19 آورده شده است. همچنین به کمک نتایج حاصل از شبیه سازی های عددی و روابط 3 و (9-11) ضرایب هندسی بی بعد تأثیر کار η ، η_e و η_p که به ترتیب مربوط به انرژی پتانسیل کل، انرژی الاستیک و انرژی پلاستیک هستند برای زوایای مختلف محاسبه گردید. در شکل 20 این سه ضریب برای مود خالص I مقایسه شده است. چنان که مشاهده می گردد با افزایش مقدار بار چندان تغییراتی در این ضرایب (که در اصل وابسته به هندسه هستند) رخ نمی دهد. البته با افزایش بیشتر نیرو و تغییر شکل های پلاستیک بیشتر (به علت تغییر اندازه ها و تغییر شکل مجموعه در اثر بزرگ شدن ناحیه پلاستیک)، مقدار این پارامترها بخصوص مولفه الاستیک تغییرات محسوسی نشان می دهند و در نتیجه برای محاسبه مقادیر این پارامترها از نتایج حاصل از مقادیر پائین تر نیروها (تا 5000 نیوتن) میانگین گیری شده است. در شکل 21 تغییرات ضریب η به ازای تغییرات بار وارده در زوایای مختلف بارگذاری مقایسه شده که نشان می دهد هر چقدر زاویه بارگذاری از 0° یا مود I خالص بیشتر به سمت زاویه بارگذاری 90° یا مود II خالص افزایش می یابد مقدار η کاهش می یابد.

8- تحلیل نتایج تجربی

در این بخش با استفاده از نتایج آزمایش های شکست و با به کارگیری اصول گفته شده، منحنیهای $J-R$ برای بارگذاریهای مود مرکب I/II مطابق

انتگرال J ، J_C و رابطه برازش شده طبق استاندارد D6068 برای زوایای بارگذاری مذکور است.

9- نتیجه گیری

در این پژوهش، شکست الاستیک-پلاستیک پلیمر پر کاربرد پلی پروپیلن تحت بارگذاری مود مرکب I/II از حالت مود I خالص تا مود II خالص با زاویه گام 15 درجه مطابق با استانداردهای ASTM E1820-13 و ASTM D6068 بررسی و منحنی های J - R حاصله گزارش گردید. فیکسچر مورد استفاده امکان استفاده از نمونه های یکسان و هم شکل بدون سوراخکاری نمونه ها را فراهم کرده و قابلیت آزمایش نمونه ها در زوایای دیگر را داراست. روش مورد استفاده برای تهیه منحنی های J - R روش چند نمونه ای است که در حین آزمایش نیازمند تجهیزات خاص برای اندازه گیری مداوم طول ترک یا بارگذاری و باربرداری چرخه ای نمی باشد ولیکن تعداد نمونه های مورد استفاده زیاد است که برای پلاستیک ها چندان هزینه بر نمی باشد. مقدار J_{IC} برای ماده مذکور مطابق استاندارد E1820-13 در حدود 30 و بر پایه استاندارد D6068 در حدود 28 kJ/m^2 به دست آمد که اختلافی حدود 7% وجود دارد. این مقدار که برای مود I یا بارگذاری کششی خالص است در حدود 35

استانداردهای ذکر شده استخراج شده است. ابتدا با بهره گیری از استاندارد E1820-13، نتایج حاصل از آزمایش های تجربی و ضرایب به دست آمده از تحلیل های عددی، منحنی J - R مود I مطابق شکل 22 به دست آورده شده است. تنها نکته ای که در استخراج رابطه منحنی مذکور رعایت نشده است بالاتر بودن مقدار انتگرال J دو داده از خط J_{limit} است که تخطی از این خط استقلال منحنی از اندازه نمونه ها را زیر سوال می برد البته در روابط حاصله تاثیر جزئی گذاشته است. روابط حاصله از برازش خطی و توانی بر این داده ها در روی شکل آورده شده است. در شکل 23 منحنی J - R مود I بر اساس استاندارد مخصوص پلاستیک ها یعنی E6068 ترسیم و رابطه برازش توانی با فرمت استاندارد به همراه برازش خطی به دست آمده است. در هر دو شکل، مقدار ضرایب همبستگی (R^2) برازش حداقل مربعات بزرگتر از 0.96 ذکر شده در استاندارد E1820 است. مقدار J_Q مود I با توجه به معیار قطع خط بلانتینگ 0.2 برای هر دو استاندارد استخراج و در جدول 2 نشان داده شده است. همچنین معیارهای برقراری شرط کرنش صفحه ای از استانداردهای مذکور بررسی و ذکر شده است. مقادیر به دست آمده نشان می دهد شرایط کرنش صفحه ای برای نتایج حاصله مطابق استانداردهای E1820-13 و D6068 معتبر است و J_Q های محاسبه شده همان J_{IC} می باشد.

در شکل 24 منحنی های J - R برای تمامی حالات آزمایش شده مود مرکب I/II از حالت مود I خالص (زاویه 0 درجه) تا مود II خالص (زاویه 90 درجه) و با گام زاویه ای 15 درجه برای زاویه بارگذاری به دست آورده شده است. همچنانکه از شکل مشخص است منحنی J - R مود I بالاتر از سایر حالت ها و منحنی J - R مود II در پائین ترین حالت قرار گرفته است و منحنی ها دارای یک نظم مشخص هستند. جدول 3 حاوی مقدار بحرانی

جدول 2 مقادیر J_Q ($J_{0.2}$) و بررسی شرایط کرنش صفحه ای
Table 2 J_Q ($J_{0.2}$) values and evaluation of plane strain requirements

کرنش صفحه ای	شرط رابطه برازش	شرط اندازه b_0 و a mm	J_Q kJ/m^2	استاندارد
✓	$C_2=0.7626 < 1$ $R^2 > 0.96$	$10J_Q/\sigma_Y = 15$	30	E1820-2013
✓	$C_2=0.8184 < 1$ $R^2 > 0.96$	-----	28	D6068
×	$R^2 > 0.96$	$25J_Q/\sigma_Y = 38.75$	31	E813-81

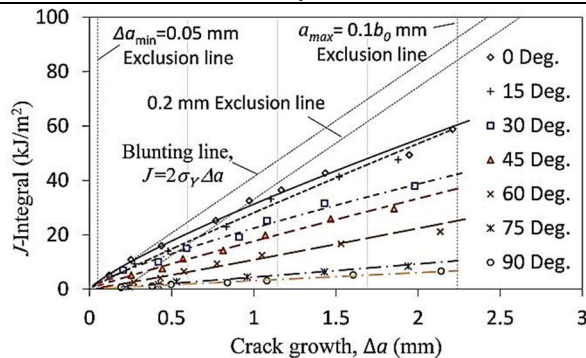


Fig. 24 Polypropylene mixed-mode I/II J - R curves according to ASTM D6068

شکل 24 منحنی های J - R پلی پروپیلن در مود مرکب I/II مطابق استاندارد D6068

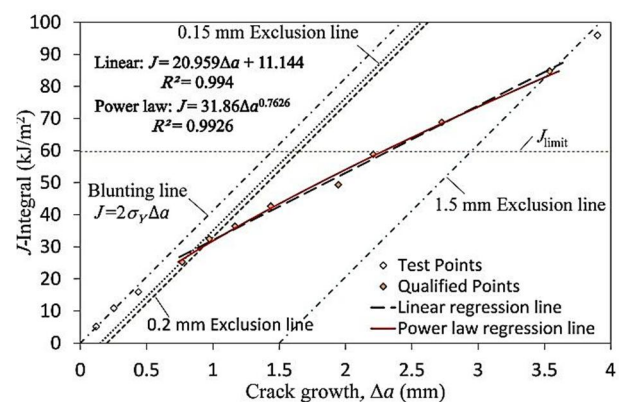


Fig. 22 Mode-I J - R curve according to ASTM E1820-13

شکل 22 منحنی J - R مود I مطابق با استاندارد ASTM E1820-13

جدول 3 مقدار بحرانی انتگرال J و رابطه برازش شده منحنی J - R برای حالت های مختلف مورد مطالعه در مود مرکب I/II

Table 3 Critical J -integral values and J - R curves equations for all studied mixed-mode I/II conditions

ضریب همبستگی R^2	رابطه منحنی J - R	J_C kJ/m^2	زاویه بارگذاری
$R^2 = 0.9955$	$J = 31.234 \Delta a^{0.8184}$	28	0
$R^2 = 0.9951$	$J = 28.085 \Delta a^{0.9302}$	19	15
$R^2 = 0.9854$	$J = 22.408 \Delta a^{0.7871}$	13.5	30
$R^2 = 0.9908$	$J = 17.629 \Delta a^{0.9179}$	7	45
$R^2 = 0.9796$	$J = 11.152 \Delta a^{0.991}$	2.8	60
$R^2 = 0.9812$	$J = 4.593 \Delta a^{0.985}$	0.9	75
$R^2 = 0.9919$	$J = 3.0857 \Delta a^{0.9718}$	0.8	90

برابر مقدار J_{IIc} برای مود II یا مود برشی است. همچنین مشاهده گردید با

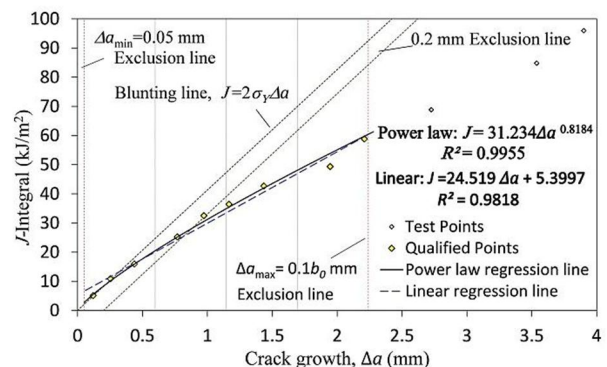


Fig. 23 Mode-I J - R curve according to ASTM D6068

شکل 23 منحنی J - R مود I مطابق با استاندارد D6068

- [9] S. M. Amstutz B. E., Dawicke D. S., Experimental study of mixed mode I/II stable crack growth in thin 2024-T3 aluminum, *Fatigue and Fracture, ASTM STP 1256*, Vol. 26, pp. 256-273, 1995.
- [10] A. Es'hagi Oskui, Choupani, N., Haddadi, E., Experimental and numerical investigation of fracture of ABS for different sample's thickness using a new loading device, *Polymer Engineering and Science Journal*, Vol. 54, No. 9, pp. 2086-2096, 2014.
- [11] A. Es'hagi Oskui, N. Choupani, *Development & Design of an Experimental Setup for Determining of Mixed Mode Fracture Toughness*, MSc Thesis, Mechanical Engineering Departement, Sahand University of Technology, Sahand, 2012. (in Prsian فارسی)
- [12] S. Hashemi, J. G. Williams, Single and multi-specimen R-curve methods for J_{IC} determination of toughened nylons, *Journal of Materials Science*, Vol. 26, No. 3, pp. 621-630, 1991.
- [13] T. L. Anderson, *Elastic-Plastic Fracture Mechanics; A Critical Review*, Report Number: SSC-345-Part1, Texas A&M Research Foundation, United States Ship Structure Committee, 1990.
- [14] J. A. Joyce, *Manual on Elastic-Plastic Fracture: Laboratory Test Procedures*, Manual Book series: MNL 27, American Society of Testing and Materials, West Conshohocken, 1996.
- [15] American Society for Testing and Materials, *ASTM D6068-10: Standard Test Method for Determining J-R Curves of Plastic Materials*, ASTM International, Conshohocken, Pa, USA, 2010.
- [16] J. D. Sumpter, C. E. Turner, Note on the applicability of J to elastic-plastic materials, *International Journal of Fracture*, Vol. 9, No. 3, pp. 320-321, 1973.
- [17] American Society for Testing and Materials, *ASTM E399-12e3: Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness K_{IC} of Metallic Materials*, ASTM International, Conshohocken, Pa, USA, 2012.
- [18] American Society for Testing and Materials, *ASTM E1820-13e1: Standard test method for measurement of fracture toughness American Society for Testing and Materials*, ASTM International, Conshohocken, Pa, USA, 2013.
- [19] A. Pironi, C. Dalle Donne, Mixed Mode Fracture of a Ferritic Steel: J-Integral against CTOD, *Proceedings of The 5th International Conference on Biaxial/Multiaxial Fatigue and Fracture*, Cracow, Poland, September 8-12, 1997.
- [20] N. Choupani, Experimental and numerical investigation of mixed-mode delamination in Arcan laminated specimens, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 478, No. 1-2, pp. 229-242, 2008.
- [21] K. Thogo, H. Ishii, Elastic-Plastic Fracture Toughness Test Under Mixed Mode I-II Loading, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 41, No. 4, pp. 529-540, 1992.
- [22] X. K. Zhu, J. A. Joyce, Review of fracture toughness (G, K, J, CTOD, CTOA) testing and standardization, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 85, No. 1, pp. 1-46, 5, 2012.
- [23] J. A. Begley, Landes, J.D., The J-Integral as a Fracture Criterion, *Proceedings of The 1971 National Symposium on Fracture Mechanics*, ASTM STP 514, American Society for Testing and Materials, pp. 1-23, 1972.
- [24] American Society for Testing and Materials, *ASTM E813-81: Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness*, 1981 Annual Book of ASTM standards; Part 10 810, ASTM International, Conshohocken, Pa, USA, 1981.
- [25] American Society for Testing and Materials, *ASTM E813-87: Standard Test Method for J_{IC} , A Measure of Fracture Toughness*, 1987 Annual Book of ASTM standards, Part 10 968, ASTM International, Conshohocken, Pa, USA, 1987.
- [26] N. Choupani, M. Soltanpour Khamaneh, Investigation on mixed mode elastic-plastic fracture behavior of ABS polymeric material, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 272-280, 2015. (in Prsian فارسی)
- [27] X. Qian, W. Yang, Initiation of ductile fracture in mixed-mode I and II aluminum alloy specimens, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 93, No. 1, pp. 189-203, 2012.
- [28] Z. Xu, Y. Li, A novel method in determination of dynamic fracture toughness under mixed mode I/II impact loading, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 49, No. 2, pp. 366-376, 2012.
- [29] American Society for Testing and Materials, *ASTM D638-14: Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*, Book of Standards, Vol. 08.01, ASTM International, Conshohocken, 2014.

افزایش زاویه بارگذاری و افزایش سهم مود II مقدار بحرانی انتگرال J و سطح منحنی J-R کاهش چشمگیری می یابد و در نتیجه ماده مورد مطالعه دارای چقرمگی و مقاومت به رشد ترک بیشتری در مود I می باشد.

10- فهرست علائم

a, a_0	طول ترک، طول ترک اولیه (mm)
b_0	طول قسمت ترک نخورده از عرض (لیگامنت) (mm)
B	ضخامت نمونه (mm)
E	مدول الاستیسیته (MPa)
f_I, f_{II}	ضرایب بی بعد شدت تنش مود I و مود II
J, J_c	انتگرال J (kJ/m^2) و مقدار بحرانی انتگرال J
J_e	مولفه الاستیک انتگرال J
J_{IC}	مقدار بحرانی انتگرال J مود I، چقرمگی
J_p	مولفه پلاستیک انتگرال J
J_Q	مقدار مشروط انتگرال J
P	بار وارده (N)
u	بردار جابجایی (m)
U	انرژی پتانسیل (J)
v	مقدار جابجایی (m)
w	چگالی انرژی کرنشی (J/m^3)
W	عرض نمونه (mm)

علائم یونانی

η, η_e, η_p	ضرایب تاثیر کار کل، الاستیک و پلاستیک
σ_{ut}	مقاومت کششی نهایی (MPa)
σ_Y	مقاومت تسلیم موثر (MPa)
σ_{yt}	مقاومت تسلیم (MPa)
v	ضریب پواسون

11- مراجع

- [1] G. R. Irwin, Plastic Zone near a Crack and Fracture Toughness, *Proceedings of The 7th Sagamore Ordnance Materials Research Conference*, Syracuse University, New York, August 16-19, 1960.
- [2] D. S. Dugdale, Yielding of steel sheets containing slits, *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, Vol. 8, No. 2, pp. 100-104, 1960.
- [3] G. I. Barenblatt, Mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture, *Advances in Applied Mechanics*, Vol. 7, No. 1, pp. 55-129, 1962.
- [4] A. A. Wells, Unstable crack propagation in metals: cleavage and fast fracture, *Proceedings of The Crack Propagation Symposium*, Vol. 1, Paper 84, Cranfield, United Kingdom, September 1, 1961.
- [5] 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, pp. 379-386, 1968.
- [6] X. k. Zhu, J-integral resistance curve testing and evaluation, *Journal of Zhejiang University Science A*, Vol. 10, No. 11, pp. 1541-1560, 2009.
- [7] M. J. Balow, Global Trends for Polypropylene, H. G. Karian (Editor), *Handbook of Polypropylene and Polypropylene Composites*, Second Edition, pp. 1-9, New York: CRC Press, 2003.
- [8] M. Arcan, Z. Hashin, A. Voloshin, A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials, *Experimental Mechanics*, Vol. 18, No. 4, pp. 141-146, 1978.