



بررسی شکست مود مرکب الاستیک-پلاستیک ماده پلیمری ABS

مرتضی سلطانپور خامنه¹، نقدعلی چوپانی^{2*}

1- کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، تبریز

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

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

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 15 دی 1393

پذیرش: 28 دی 1393

ارائه در سایت: 11 اسفند 1393

کلید واژگان:

ماده پلیمری ABS

شکست مود مرکب

تحلیل الاستیک - پلاستیک

انتگرال J

روش نرمالیزیشن

چکیده

در حال حاضر، مواد پلیمری در بسیاری از کاربردهای صنعتی و مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. در بسیاری از این کاربردها، ترک به صورت مود ترکیبی ایجاد می‌شود. بنابراین بررسی رفتار شکست این مواد در زوایای مختلف بارگذاری در طراحی ایمن سازه‌ها بسیار اهمیت دارد. در این تحقیق به بررسی رفتار شکست مود مرکب الاستیک - پلاستیک ماده پلیمری ABS بر اساس پارامتر کلیدی و بسیار مهم انتگرال J پرداخته شده و با استفاده از گیره اصلاح شده آرکان، رفتار شکست این ماده در سه زاویه متفاوت بارگذاری به ترتیب در مود کششی خالص، مود مرکب درون صفحه‌ای و مود برشی خالص مورد بررسی قرار گرفته است. این کار با دو روش آزمایشگاهی انتگرال J به نام‌های روش چند نمونه‌ای و روش نرمالیزیشن انجام شد. در نهایت با برازش توابع خطی و توانی بر روی داده‌های به دست آمده بر اساس دو استاندارد E813-81 و E813-87 و با احراز شرط کرنش صفحه‌ای، مقدار چقرمگی شکست (J_I) این ماده پلیمری حاصل شد. با مقایسه منحنی‌های ($J-R$)، هم‌خوانی بسیار خوبی در نتایج حل دو روش مشاهده گردید. حداقل اختلاف دو روش، در مود برشی با استاندارد E813-81 به مقدار 1/37% و حداکثر اختلاف نیز در مود کششی با استاندارد E813-87 به مقدار 30/7% به دست آمد.

Investigation on mixed mode elastic-plastic fracture behavior of ABS polymeric material

Morteza Soltanpour Khamneh, Naghdali Choupani*

Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran

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

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
Received 05 January 2015
Accepted 18 January 2015
Available Online 02 March 2015

Keywords:

ABS polymeric material
mixed-mode fracture
elastic-plastic analysis
J-integral
normalization method

ABSTRACT

Nowadays, polymeric materials are used in most industrial and engineering applications. In many of the applications, crack is initiated in mixed mode loading conditions. As a result, investigation of these materials at different loading angles is essential for safe design of structures. In this paper the mixed-mode elastic-plastic fracture behavior of ABS material based on J-integral key parameter was studied and the modified Arcan fixture was employed to investigate fracture behavior of this material under pure mode I (opening mode), pure mode II (shearing mode) and in plane mixed mode loading conditions. This work has been carried out experimentally by J-integral method named multi-specimen and normalization techniques. Finally, by fitting linear and power functions based on ASTM E813-81 and E813-87 test procedures respectively, the fracture toughness of this polymeric material was obtained in plane strain condition. The (J-R) curve comparison showed good agreement between the two methods. The minimum difference between the two methods obtained in a shear mode by ASTM E813-81 was about 1.37% and the maximum difference observed in tensile mode by ASTM E813-87 was about 30.7%.

1- مقدمه

امروزه مواد پلیمری به طور فزاینده‌ای در سازه‌های صنعتی و مهندسی مورد استفاده قرار می‌گیرند. از طرفی با توجه به خصوصیت‌های فیزیکی و مکانیکی پلیمرها سعی بر آن است که بتوان، آن‌ها را جایگزین فلزها نمود. در این میان، پلیمر ABS با خصوصیت‌های خوب فیزیکی توانسته است در سطح وسیعی از صنعت، مورد استفاده قرار گیرد. این پلیمر از سه تکپار، به نام‌های آکریلونیتریل¹، بوتادین² و استایرن³ تشکیل شده است که دارای چقرمگی

بالا، استحکام ضربه‌ای عالی، پایداری ابعادی و مقاومت سایشی بالا است [1]. بنابراین پی بردن به خصوصیت‌های شکست این ماده پلیمری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در این میان روش‌های متنوعی برای تحلیل شکست این مواد وجود دارد؛ به طوری که قبل از توسعه مکانیک شکست، تنش تسلیم یا تنش نهایی با ضریب اطمینان قابل توجه یک معیار طراحی متداول به حساب می‌آمد اما در حال حاضر، نظریه مکانیک شکست الاستیک خطی⁴ (LEFM) به طور گسترده برای تعیین رفتار شکست بسیاری از مواد پلیمری و

3- Styrene
4- Linear elastic fracture mechanic

1- Acrylonitrile
2- Butadiene

Please cite this article using:

M. Soltanpour Khamneh, N. Choupani, Investigation on mixed mode elastic-plastic fracture behavior of ABS polymeric material, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 272-280, 2015 (In Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

ترک ارائه شد [11]. او با تعریف انتگرال مداری J به عنوان یک مشخصه شکست برای موادی با رفتار غیرخطی موفق شد روش مناسبی در گستره مکانیک شکست در محدوده‌ای فراتر از LEFM ارائه دهد [4]. رابیس با به کار بردن انتگرال خطی مربوط به انرژی در مجاورت نوک ترک، مسئله‌های مربوط به ترک دوبعدی را در حضور تغییر شکل پلاستیک حل کرد. فرم این انتگرال خطی در معادله (1) آمده است که در آن شکست (شروع ترک) وقتی رخ می‌دهد که J به مقدار بحرانی برسد [12].

$$J = \oint (W dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds) \quad (1)$$

در رابطه (1)، x و y مختصات مستطیلی عمود بر جبهه ترک، ds افزایش در امتداد خط مرزی، T بردار تنش که بر خط مرزی عمل می‌کند، u بردار تغییر مکان و W چگالی انرژی کرنشی است.

رابیس همچنین تعریف معادل و جایگزینی برای J در رابطه (2) ارائه داد به این صورت که J را به عنوان اختلاف انرژی پتانسیل نسبت به اختلاف جزئی طول ترک تعریف کرد [12].

$$J = -\frac{1}{B} \left(\frac{\partial U}{\partial a} \right) \quad (2)$$

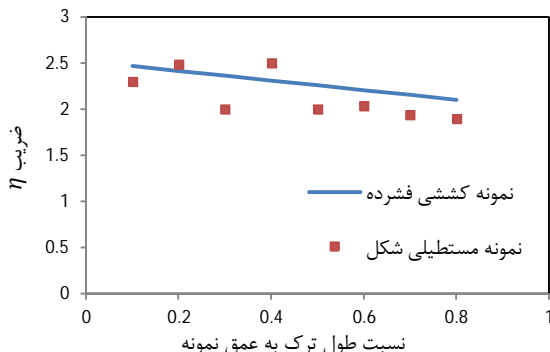
به این ترتیب، J می‌تواند هم به عنوان یک مشخصه انرژی و هم به عنوان یک مشخصه شدت تنش، مورد استفاده قرار گیرد. طبق توصیه استاندارد ASTM D6068 [13] که برای تعیین منحنی (J - R) برای مواد پلیمری به کار می‌رود مقدار J از رابطه (3) نیز تعیین می‌شود که طبق این رابطه مقدار J به سطح زیر منحنی بار-جابجایی مرتبط می‌شود.

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

که در رابطه (3)، U سطح زیر منحنی بار-جابجایی، B ضخامت نمونه، W عمق نمونه، a طول ترک اولیه و η نیز ضریبی است که مقدار J را به سطح زیر منحنی بار-جابجایی مرتبط می‌کند. این ضریب به نوع نمونه آزمایشی بستگی دارد که برای نمونه‌های کششی فشرده⁶ (CT)، این مقدار با رابطه (4) بیان می‌شود.

$$\eta = 2 + 0.522 \frac{b_0}{W} \quad (4)$$

مقدار η برای نمونه مورد مطالعه در این تحقیق از طریق مدل‌سازی نمونه در نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس محاسبه گردید. برای این کار در یک مقدار بار ثابت، مقدار انتگرال J و مقدار سطح زیر منحنی بار-جابجایی نقطه اعمال بار به دست آمده و با توجه به ابعاد نمونه، مقدار η از رابطه (3) محاسبه شد که این مقدار در شکل 1 نمایش داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود این مقدار تفاوت چندانی با مقدار به دست آمده از رابطه (4) ندارد.



شکل 1 تغییرات ضریب η نسبت به تغییرات طول ترک برای دو نمونه

فلزی به کار می‌رود [2]. این نظریه به خوبی پایه‌ریزی شده و به طور کامل پذیرفته شده است. پارامترهای مستقل از اندازه و هندسه نمونه، نظیر ضریب شدت تنش بحرانی (K_{IC}) و یا نرخ رهایی انرژی کرنشی بحرانی (G_{IC}) برای نشان دادن ثابت‌های ماده در این نظریه به کار می‌روند [3]. مکانیک شکست الاستیک خطی تا زمانی معتبر است که تغییرات غیرخطی مواد، محدود به ناحیه کوچکی در اطراف نوک ترک باشد. البته بعضی از مواد نیز دارای ناحیه پلاستیک در نوک ترک هستند ولی این ناحیه به قدری کوچک است که می‌توان از اندازه آن در مقایسه با طول ترک و سایر ابعاد نمونه صرف‌نظر کرد. در این موارد با اعمال بار، نوک ترک تا حدودی حالت تیزی خود را از دست داده و حالت انحنا به خود می‌گیرد ولی همچنان ماده به شکل ترد عمل کرده و قبل از رسیدن بار اعمال‌شده به حد تسلیم، نمونه دچار شکست می‌شود. در این شرایط همچنان می‌توان با دقت مناسب از نظریه (LEFM) استفاده کرد. اما در بسیاری از مواد از جمله پلیمرها، فولادهای نرم و فولادهایی با استحکام متوسط و در بسیاری از آلیاژهای آلومینیوم و فلزهای دیگر به علت بزرگ بودن نسبی اندازه ناحیه پلاستیک تشکیل‌شده در نوک ترک، نمی‌توان از نظریه (LEFM) استفاده کرد و باید تحلیل، بر اساس نظریه مکانیک شکست الاستیک-پلاستیک 1 (EPFM) باشد. در این نظریه برای مشخص کردن شرایط نوک ترک، دو پارامتر کلیدی و بسیار مهم به نام کانتور انتگرال J و تغییر مکان بازشدگی نوک ترک 2 (CTOD) معرفی شده است که هر یک را می‌توان به طور جداگانه به عنوان یک معیار شکست در نظر گرفت [4]. هر دو پارامتر، بیان‌کننده شرایط نوک ترک در مواد غیرخطی می‌باشند. روش انتگرال J خود شامل روش‌های آزمایشگاهی متنوعی است. در ادامه، مهم‌ترین فعالیت‌های انجام‌شده در این زمینه به طور خلاصه بیان می‌شود. مینگ لیون و همکارانش [5,2] تحلیل الاستیک-پلاستیک آلیاژهای پلیمری را با دو روش انتگرال J و بازشدگی نوک ترک مورد بررسی قراردادند. لونا و همکارانش [6] مقدار کار ضروری شکست 3 را برای ماده تجاری ABS در دماها و ضخامت‌های متفاوت به دست آوردند. یان [7] چقرمگی شکست 4 یک ماده پلیمری مورد استفاده در دندان‌سازی را با دو روش الاستیک و الاستیک-پلاستیک به دست آورد. محرابی و رضوی [8] با تغییر درصد فاز لاستیکی ماده ABS به بررسی چقرمگی شکست این ماده پرداختند. چوپانی و اسکوئی [9] با استفاده از گیره اصلاح‌شده آرکان و گیره جدید تحلیل الاستیک خطی ماده ABS را انجام دادند.

در این مقاله، شکست الاستیک - پلاستیک ماده پلیمری ABS، مورد مطالعه قرار گرفته است. در این کار، از دو روش آزمایشگاهی نرمالیزیشن⁵ و روش چند نمونه‌ای انتگرال J برای به دست آوردن مقادیر بحرانی J در سه زاویه مختلف بارگذاری، به ترتیب در مود کششی خالص (صفر درجه)، مود مرکب درون صفحه‌ای (45 درجه) و مود برشی خالص (90 درجه) استفاده شده است. در نهایت با احراز شرایط کرنش صفحه‌ای، چقرمگی شکست این ماده پلیمری حاصل شد. هدف از انجام این پژوهش استخراج پارامترهای بحرانی شکست در زوایای مختلف بارگذاری و مقایسه دو روش مزبور است.

2- انتگرال J

انتگرال J برای نخستین بار در سال 1968 توسط رابیس [10] به عنوان یک انتگرال مستقل از مسیر برای اندازه‌گیری شدت میدان تنش و کرنش در نوک

1- Elastic-plastic fracture mechanic
2- Crack tip opening displacement
3- Essential work of fracture
4- Fracture toughness
5- Normalization

6- Compact tension

1-2- روش چند نمونه‌ای

در رابطه (8)، P_{Ni} نیروی نرمالیزه شده V_{pli} ، جابجایی پلاستیک راستای اعمال بار و ضرایب a, b, c و d نیز مقادیر ثابتی هستند که از برازش تابع رابطه (8) بر روی داده‌ها به دست می‌آیند.

با به دست آوردن تابع P_{Ni} و استفاده مجدد از رابطه (5)، طول ترک متناظر با هر نقطه از نمودار بار-جابجایی به دست می‌آید.

3- گیره آرکان

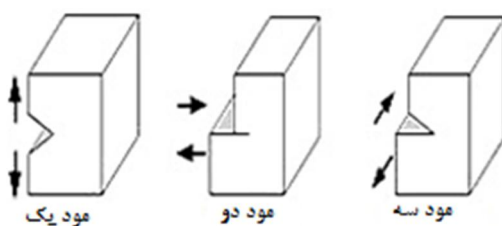
حالت مود ترکیبی وقتی ایجاد می‌گردد که علاوه بر تنش‌های عمودی، تنش‌های برشی نیز به ترک اعمال شوند. بنابراین بررسی شکست قطعات در سه مود بارگذاری که در شکل 2 نمایش داده شده است ضروری است [18].

در این میان گیره آرکان، قابلیت بارگذاری در حالت مود یک، مود دو و حالت ترکیبی دو مود را داراست. گیره آرکان برای نخستین بار در سال 1978 توسط آرکان و همکارانش [19] برای تست مواد کامپوزیتی طراحی و ساخته شد. در ادامه این کار، آمستاد در سال 1995 در جهت پایدار کردن این گیره تغییراتی بر روی آن انجام داد که در نهایت، این گیره تحت عنوان آرکان اصلاح شده نام‌گذاری شد [18]. به دلیل اینکه بیشینه تنش و تغییر مکان در قسمت مرکزی این گیره است نمونه اصلی تحت کشش در این ناحیه قرار گرفته و قطعاً شکست از این ناحیه خواهد بود. همان‌طور که در شکل 3 مشاهده می‌شود محیط این نمونه سوراخ‌کاری شده و با قرار دادن پین متصل شونده به دستگاه کشش در هر یک از این حفره‌ها زاویه اعمال بار، تغییر می‌کند. بر این اساس این گیره قابلیت بارگذاری در زوایای مختلف درون صفحه‌ای یعنی مود کششی خالص (صفر درجه)، مود برشی خالص (90 درجه) و مود مرکب درون صفحه‌ای (0-90 درجه) را داراست.

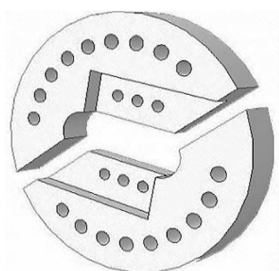
4- آزمایش‌های تجربی

4-1- مواد و روش‌ها

در این پژوهش، تست‌ها بر روی ماده تجاری ABS محصول شرکت پتروشیمی تبریز انجام شده است. ابتدا ورق‌های ABS به صورت نمونه‌های مستطیلی شکل در ابعاد صفحه‌ای (60×90) میلی‌متر و در ضخامت‌های 21 میلی‌متری برش داده شد و در ادامه بعد از سوراخ‌کاری نمونه‌ها جهت اتصال به گیره آرکان، ترک عمیقی به اندازه 30 میلی‌متر به صورت دو مرحله‌ای بر روی



شکل 2 انواع مودهای بارگذاری



شکل 3 گیره اصلاح شده آرکان

این روش، یکی از معتبرترین روش‌های آزمایشگاهی انگترال I است که برای نخستین بار توسط بگلی و لاندز در سال 1972 برای ارزیابی چقرمگی شکست (J_{Ic}) ارائه شد. در این روش، از چند نمونه با ابعاد هندسی و طول ترک‌های یکسان استفاده می‌شود. در واقع هر نمونه باید تا نقطه متفاوتی بر روی نمودار بار-جابجایی تحت بارگذاری قرار گیرد به طوری که طول ترک گسترش یافته برای هر نمونه تحت کشش، باید اندکی متفاوت از دیگر نمونه‌ها باشد. سپس باربرداری صورت گرفته و نمونه‌ها از دستگاه تست جدا می‌شوند تا میزان گسترش ترک برای تک‌تک نمونه‌ها اندازه‌گیری شود. در این روش هدف گسترش میزان ترک است و نباید به هیچ‌وجه شکست کامل صورت بگیرد [11].

2-2- روش نرمالیزیشن

چنانچه بحث شد روش چند نمونه‌ای شامل آزمون روی چندین نمونه یکسان است که متأسفانه روش آزمون را پرهزینه و خسته‌کننده می‌کند. خوشبختانه روش‌های دیگری عرضه شده است که می‌تواند مقدار چقرمگی شکست را با بارگذاری روی یک نمونه به دست آورد. روش تک نمونه‌ای خود شامل چندین روش متفاوت است که مهم‌ترین آن‌ها روش نرمالیزیشن است.

روش نرمالیزیشن برای نخستین بار در سال 1988 توسط هرا و لاندز [14] ارائه شد. این روش در موارد خاصی که سرعت بارگذاری بالا بوده و یا در مکان‌هایی که دما بالاست به طور مستقیم از نمودار بار-جابجایی و طول اولیه و نهایی ترک برای تعیین نمودار ($J-R$) به کار می‌رود [15]. این روش که بیشتر برای فلزهای نرم و مواد پلیمری کاربرد دارد در مقایسه با سایر روش‌های تک نمونه‌ای دارای مزایایی است که از جمله آن عدم نیاز به تجهیزات و امکانات آزمایشگاهی پیشرفته است. در مقابل، عدم دقت کافی به دلیل استفاده از فرضیات و ساده‌سازی روابط و همچنین غیر کاربردی بودن در مواردی با ابعاد بالا و چقرمگی پایین از جمله معایبی است که در این روش وجود دارد [16]. روش نرمالیزیشن بر مبنای اصل جدایی بار، توسعه یافته است. قدم اول در تعیین منحنی ($J-R$)، اندازه‌گیری دقیق طول اولیه و نهایی ترک است در واقع نباید میزان نهایی گسترش ترک از 4 میلی‌متر یا به عبارتی از 15% طول قسمت غیر ترک اولیه نمونه تجاوز کند. سپس هر مقدار بار از نمودار بار-جابجایی توسط رابطه (5) نرمالیزه می‌شود [17].

$$P_{Ni} = \frac{P_i}{WB(1 - \frac{a_{bi}}{W})^{\eta_{pl}}} \quad (5)$$

در رابطه (5)، P_{Ni} بار نرمالیزه شده، P_i مقدار بار واقعی اندازه‌گیری شده و a_{bi} مقدار طول ترک اصلاح شده است که با رابطه (6) تعریف می‌شود.

$$a_{bi} = a_0 + \frac{J_i}{2\sigma_y} \quad (6)$$

در ادامه مقدار جابجایی متناسب با هر مقدار بار نیز توسط رابطه (7) نرمالیزه می‌شود تا مقادیر جابجایی راستای اعمال بار نرمالیزه شده، حاصل گردد.

$$V_{pli} = \frac{v_{pli}}{W} = \frac{V_i - c_i P_i}{W} \quad (7)$$

که c_i نرمی الاستیک نمونه، V_i مقدار جابجایی واقعی اندازه‌گیری شده و V_{pli} نیز مقدار جابجایی پلاستیک راستای اعمال بار است. در ادامه برای حصول داده‌های مربوط به نقطه پایانی از همان معادلات فوق استفاده می‌شود با این تفاوت که طول نهایی ترک در رابطه (6) گنجانده می‌شود. در نهایت تابعی به فرم معادله (8) با ترسیم خطی مماس از نقطه مربوط به طول ترک نهایی به بقیه داده‌ها برازش می‌شود.

$$P_{Ni} = \frac{a + bV_{pli} + cV_{pli}^2}{d + V_{pli}} \quad (8)$$

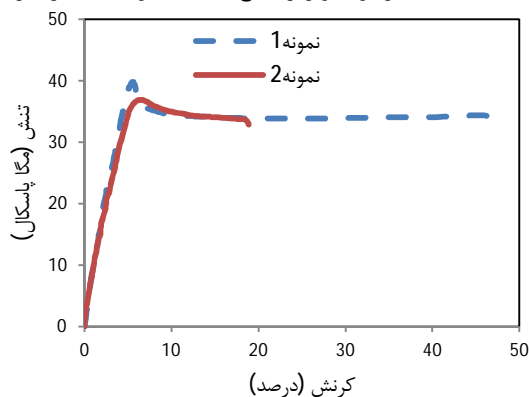
راستای ترک شکسته و از سطوح ترک اقدام به اندازه‌گیری میزان گسترش ترک نمود که بر اساس پیشنهاد استاندارد ASTM D6068 میانگین‌گیری پنج نقطه‌ای در راستای ضخامت برای اندازه‌گیری این مقدار به کار رفت.

4-2- تعیین خواص مکانیکی ماده

برای به دست آوردن خواص مکانیکی ماده ABS، از نمونه‌های دمبلی شکل مطابق با استاندارد ASTM D638 [20] استفاده شد. نمونه‌های دمبلی شکل به تعداد دو عدد تحت کشش قرار گرفتند و به دلیل شباهت در منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های تست شده، از تست‌های اضافی صرف‌نظر شد و در نهایت خواص مکانیکی ماده از جمله مدول الاستیسیته و تنش تسلیم از میانگین داده‌های به دست آمده برای این دو نمونه، استخراج گردید که این مقادیر در جدول 1 آورده شده است. در شکل‌های 6 و 7 به ترتیب منحنی‌های تنش-کرنش و نمونه‌های دمبلی شکل قابل مشاهده هستند.

4-3- بررسی سطوح شکست

بعد از شکست کامل نمونه‌ها، سطوح شکست نمونه‌های تست شده در هر سه زاویه بارگذاری، مورد بررسی میکروسکوپ الکترونی روبشی¹ (SEM) قرار گرفت. میکروسکوپ الکترونی روبشی یکی از ابزارهای مورد استفاده در فناوری نانو است که با کمک بمباران الکترونی، تصاویر اجسامی به کوچکی 10 نانومتر را برای مطالعه تهیه می‌کند. قبل از تصویربرداری سطح شکست نمونه‌ها با طلا به ضخامت 10 میکرومتر روکش‌دهی شد. در بررسی سطوح شکست دو عامل به وضوح قابل مشاهده است. در نگاه اول، نوع شکست از جهت ترد و نرم بودن کاملاً مشخص است. همان‌طور که در شکل‌های 8 و 9 نمایش داده شده است هر دو تصویر از سطح شکست نمونه تحت بارگذاری



شکل 6 منحنی‌های تنش-کرنش نمونه‌های دمبلی شکل



شکل 7 نمونه‌های دمبلی شکل

جدول 1 خواص مکانیکی نمونه‌های دمبلی شکل

خواص مکانیکی	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	تنش تسلیم (مگاپاسکال)
نمونه 1	1066/13	39/85
نمونه 2	1000/48	36/94
میانگین	1033	38/4

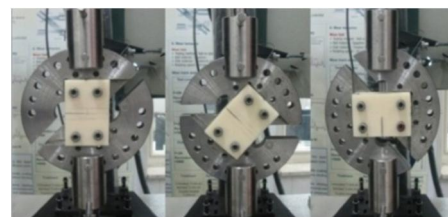
1- Scanning Electron Microscope

نمونه‌ها ایجاد شد. طبق استانداردهای موجود برای اعمال پیش ترک بر روی نمونه‌ها، بارگذاری چرخه‌ای پیشنهاد شده است. در مراجعه به کارهای مینگ لیون و همکارانش [2,5] که مطالعات گسترده‌ای بر روی پلیمرها انجام داده‌اند، برای ایجاد پیش ترک از تیغ تیز ریش‌تراشی استفاده کرده‌اند. در تحقیق حاضر، ابتدا ترک اولیه به میزان 0/45 عمق نمونه با ماشین‌کاری ایجاد شده و سپس در مرحله بعد، ادامه ترک توسط اهر مویی که دارای تیغه بسیار نازکی به اندازه 0/2 میلی‌متر است برش داده شد تا ترک به مقدار 0/05 عمق نمونه رشد کرده تا اندازه نهایی آن به مقدار مورد نظر برسد. استفاده از این روش برای ایجاد پیش ترک، مطالعات آتی بیشتری را نیاز دارد.

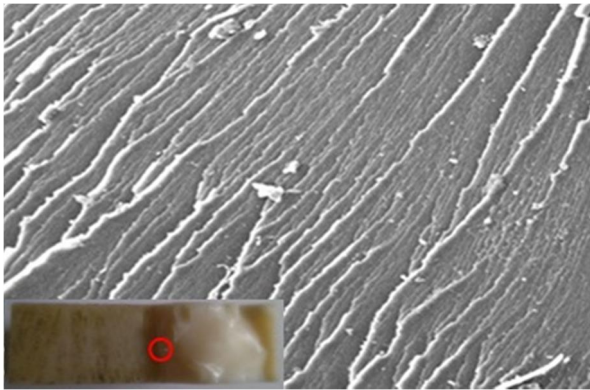
بعد از آماده‌سازی، نمونه‌ها با استفاده از گیره اصلاح شده آرکان در سه زاویه بارگذاری متفاوت به ترتیب در زوایای 0، 45 و 90 درجه تحت کشش قرار گرفتند. دستگاهی که برای تست نمونه‌ها از آن استفاده شد دستگاه سننام با حداکثر قابلیت بارگذاری 5 کیلو نیوتن بود که نمایی از این دستگاه در شکل 4 نمایش داده شده است. در انجام تست‌ها نرخ کرنش برای تمامی نمونه‌ها 1 میلی‌متر بر دقیقه اعمال شد و نمودارهای بار-جابجایی به صورت لحظه‌ای توسط رایانه متصل به دستگاه برای همه نمونه‌ها به دست آمد. 5 نمونه در هر زاویه، تحت بارگذاری قرار گرفت به طوری که هر نمونه تا نقطه متفاوتی بر روی نمودار پیشروی داشت تا در میزان گسترش ترک بر روی نمونه‌ها مقادیر متفاوتی حاصل شود. زوایای مطرح شده به ترتیب بارگذاری در مود کششی خالص، مود مرکب درون صفحه‌ای و مود برشی خالص را ایجاد می‌کنند که در شکل 5، سه زاویه بارگذاری نمونه به همراه گیره آرکان نمایش داده شده است. بعد از پیشروی مقدار ترک در حد قابل قبول، نمونه‌ها از دستگاه تست جدا شده و اقدام به اندازه‌گیری میزان گسترش ترک شد. جهت اندازه‌گیری این مقدار، از نیتروژن مایع استفاده شد. نیتروژن مایع در دمای 196- درجه سانتی‌گراد موجب ترد شدن لحظه‌ای نمونه‌ها می‌شود. این ترد شدن به قدری شدید است که می‌توان با ضربه کوچکی نمونه‌ها را در



شکل 4 دستگاه تست کشش سننام

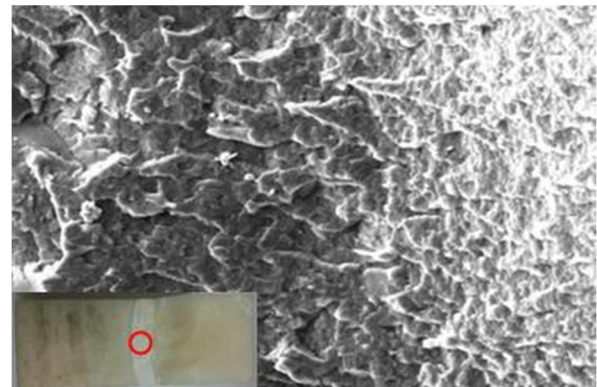


شکل 5 تست نمونه با گیره آرکان در سه زاویه متفاوت

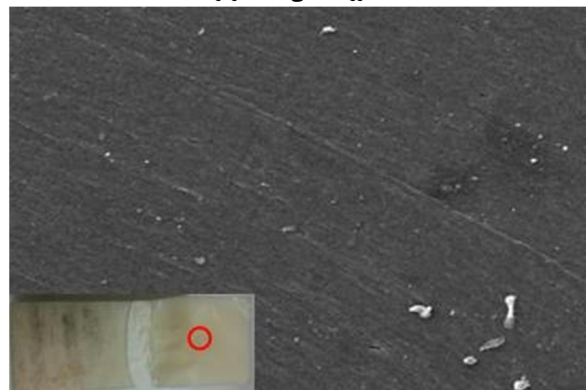


شکل 11 تصویر SEM از سطح شکست در نمونه تست شده در مود برشی با بزرگنمایی 400 برابر

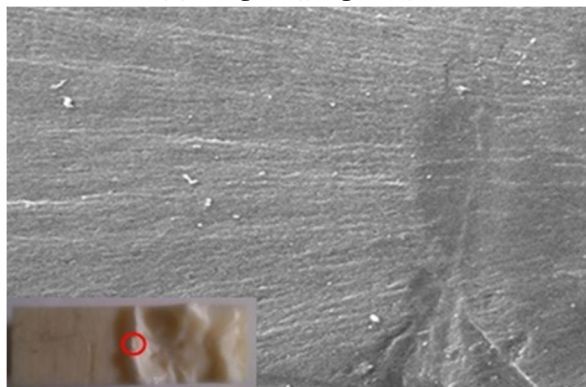
مود اول در بزرگنمایی 400 برابر گرفته شده است. از آنجا که ماده پلیمری ABS دارای شکست نرم و پایدار است، شکل 8 که از ناحیه گسترش ترک گرفته شده است به عنوان شکست نرم معرفی شده است. از طرف دیگر معرفی شکل 9 به عنوان شکست ترد صرفاً به دلیل فرایند کاهش دمای نمونه در طی استفاده از نیتروژن مایع است. بلافاصله بعد از استفاده از نیتروژن مایع، نمونه به اندازه‌ای ترد شد که با ضربه کوچکی در راستای ترک شکسته شد. چون غیر از این عمل، هیچ فرایند دیگری بر روی نمونه صورت نگرفته است به همین دلیل تنها توجیهی که در علت ناصاف بودن شکل 8 و صاف بودن شکل 9 می‌توان داشت، همین موضوع نرم و ترد بودن شکست است. در شکل‌های 10 و 11 نیز به ترتیب تصاویر گرفته شده از ناحیه گسترش ترک در بارگذاری مود مرکب و مود برشی به نمایش گذاشته شده است که خطوط تمرکز تنش به خصوص در تصویر 11 به وضوح قابل مشاهده است.



شکل 8 تصویر SEM از ناحیه گسترش ترک در نمونه تست شده در مود کششی با بزرگنمایی 400 برابر



شکل 9 تصویر SEM از ناحیه شکسته شده با نیتروژن مایع در نمونه تست شده در مود کششی با بزرگنمایی 400 برابر

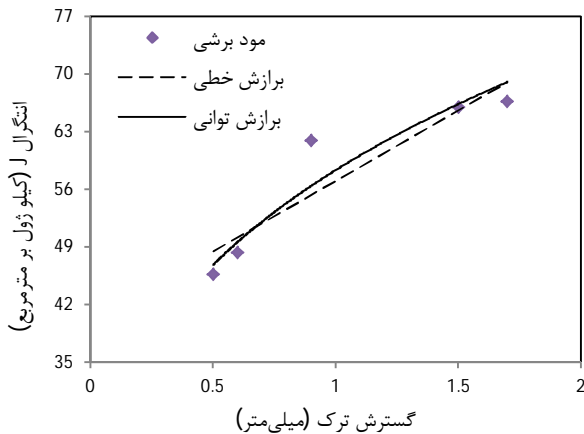


شکل 10 تصویر SEM از سطح شکست در نمونه تست شده در مود مرکب با بزرگنمایی 400 برابر

5- نتایج

در این قسمت هدف آن است که با آنالیز داده‌های به دست آمده از نتایج تست‌های کشش، از دو روش متفاوت مقدار چقرمگی شکست و همچنین مقادیر بحرانی شکست به دست آیند. این دو روش که به تفصیل در مورد آن‌ها بحث شد روش چند نمونه‌ای انتگرال I و روش نرمالیزیشن است. نمودارهای بار-جابجایی که در شکل 12 برای هر سه زاویه بارگذاری ترسیم شده است نشان‌دهنده این است که انتشار ترک تحت مود یک، با بار کمتری امکان‌پذیر است و با افزایش زاویه بارگذاری تا مود دو، این مقدار بار افزایش می‌یابد. اما آنچه مهم است شکست کاملاً پایدار نمونه‌های پلیمری در همه زوایای بارگذاری بود. این موضوع در تحلیل مسائل مکانیک شکست به روش الاستیک-پلاستیک جزء یکی از اصول مهم به حساب می‌آید به طوری که شکست ناپایدار در روش انتگرال I نتایج ناصحیحی به دنبال خواهد داشت و این نتایج همواره ثابت ماده نبوده و وابستگی شدیدی به ضخامت و سایر ابعاد صفحه‌ای نمونه خواهد داشت. همان‌طور که در شکل 13 برای مود دو بارگذاری نشان داده شده است نقطه شروع گسترش ترک، دقیقاً بعد از ورود نمودار به ناحیه پلاستیک و قبل از رسیدن بار به مقدار بحرانی اتفاق افتاده است. این روال برای همه زوایای بارگذاری یکسان بود. در روش چند نمونه‌ای بعد از اتمام تست‌ها مقادیر I از رابطه (3) محاسبه شده و به صورت نمودارهایی نسبت به میزان گسترش ترک ترسیم شدند. در شکل 14 نمودار $(I-R)$ برای مود یک به روش چند نمونه‌ای ترسیم شده است. در این روش برای محاسبه نتایج مسئله از دو استاندارد E813-81 [21] و E813-87 [22] استفاده شد. این دو استاندارد دارای اصول یکسانی هستند حتی نحوه تهیه نمونه‌ها، مراحل تست و نحوه انجام آزمایش در هر دو استاندارد، یکسان بوده اما تنها تفاوت آن‌ها در برازش نوع تابع بر روی داده‌های به دست آمده است که استاندارد E813-81 برازش یک تابع خطی و استاندارد E813-87 برازش یک تابع توانی را پیشنهاد می‌دهد. هر دو استاندارد برای مواد همگن و همسان‌گرد تدوین شده است. در این پژوهش نیز با اطمینان از همگن بودن این ماده پلیمری، از این استانداردها استفاده شده است. این اصل در مورد سایر استانداردهای به کار رفته در این تحقیق نیز صادق است.

به طور کلی، افزایش ظاهری در طول ترک، کمتر یا مساوی شعاع نوک ترک پهن شده است که این مقدار برابر با نصف اندازه بازشدگی نوک ترک (δ) خواهد بود. با فرض اینکه $\delta_i = J/\sigma_y$ باشد آنگاه Δa را می‌توان از رابطه $J = 2\sigma_y \Delta a$ به دست آورد. پس در این حالت بعد از ترسیم خط پهن‌شدگی خط دیگری موازی با این خط، از نقطه $\Delta a = 0.2 \text{ mm}$ رسم می‌شود. I مربوط به



شکل 16 منحنی $(I-R)$ به روش چند نمونه‌ای در مود برشی خالص

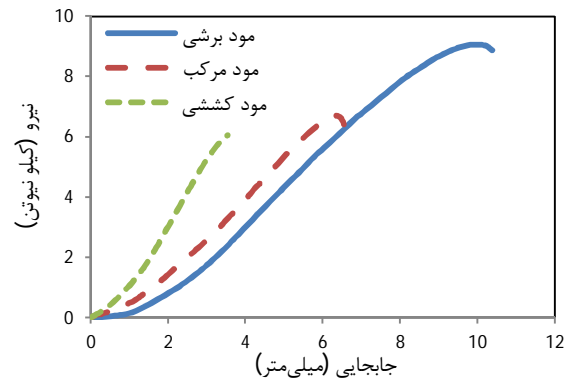
نمودارهای $(I-R)$ بار دیگر برای هر سه زاویه بارگذاری با روش نرمالیزیشن به دست آمد. در روش نرمالیزیشن با تست یک عدد نمونه در هر زاویه بارگذاری می‌توان مقادیر I بحرانی و همچنین چقرمگی شکست ماده را به دست آورد. برای این کار از نتایج کشش مربوط به یکی از چندین نمونه‌ای که در روش چند نمونه‌ای به کار رفت، استفاده شد. در شکل 17 که مربوط به مود کششی خالص است، ابتدا مقادیر بار و جابجایی نرمالیزه شده و بعد از نرمالیزه کردن داده مربوط به نقطه نهایی، خطی از نقطه نهایی بر روی منحنی نرمالیزه شده ترسیم شده است که مسیر واقعی را با در نظر گرفتن رشد ترک پیش‌بینی می‌کند. شکل 18 منحنی مقادیر I نسبت به میزان گسترش ترک در مود کششی خالص را نشان می‌دهد. در این روش، روند افزایش مقدار I از اولین مراحل بارگذاری نشان داده شده است. قسمت اول منحنی تقریباً یک خط قائم است که روند افزایش مقدار I بدون رشد ترک را نشان می‌دهد در ادامه بعد از اینکه مقدار انرژی مورد نیاز برای شروع رشد ترک، توسط سیستم تأمین شد ترک شروع به پیش‌روی کرده و در نهایت پدیده شکست اتفاق می‌افتد. شکل‌های 19 و 20 همین نمودارها را به ترتیب برای مود مرکب 45 درجه و مود برشی نمایش می‌دهند.

در تحلیل شکست به روش انتگرال I چه در حالت الاستیک خطی و چه در حالت الاستیک-پلاستیک محدودیتی در ابعاد وجود ندارد و هر نمونه‌ای صرف‌نظر از هر اندازه و ابعادی قابلیت تحلیل با این روش را دارا است. اما مقدار چقرمگی شکست که از طریق مکانیک شکست حاصل می‌شود به وسیله اندازه نمونه تست‌شده محدود می‌شود. مواد چقرمه با استحکام پایین برای قابل قبول بودن نتایج، نیازمند بزرگ بودن ابعاد نمونه هستند. برای اینکه در مود کششی خالص مقدار مشروط I به عنوان چقرمگی شکست با مقدار (I_0) برابر باشد همواره شرط کرنش صفحه‌ای باید برقرار باشد زیرا در این حالت است که مقادیر بحرانی شکست مستقل از ضخامت ماده بوده و به عنوان ثابت ماده و یا خصوصیت ماده به حساب می‌آیند. برای اینکه انجام آزمایش‌ها در محدوده کرنش صفحه‌ای باشند طبق استانداردها ابعاد و اندازه نمونه‌ها باید رابطه (9) را ارضا کند.

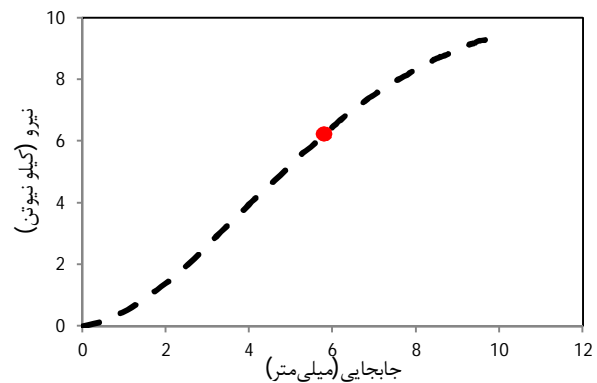
$$B, b_0 > 25 \frac{I_0}{\sigma_y} \quad (9)$$

که B و b_0 به ترتیب معرف طول اولیه قسمت غیر ترک نمونه و ضخامت نمونه می‌باشند. بررسی معیار تعیین‌شده، نشان‌دهنده این است که شرط کرنش صفحه‌ای برای نمونه‌های تهیه‌شده برقرار بوده و میزان چقرمگی شکست حاصل‌شده برای این ماده، مستقل از ضخامت نمونه‌ها است. این بررسی در جدول 2 نشان داده شده است. حداقل ضخامت مورد نیاز برای برقراری شرط کرنش صفحه‌ای $3/96$ میلی‌متر است.

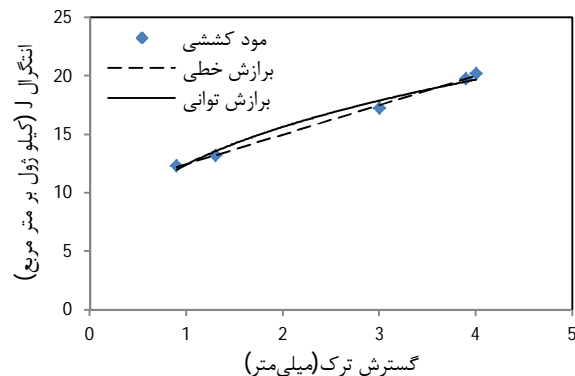
نقطه برخورد این خط، با منحنی به دست آمده از برازش داده‌ها به عنوان I مشروط (I_0) تلقی می‌گردد [11]. نمودارهای $(I-R)$ برای مود مرکب و مود برشی نیز به ترتیب در شکل‌های 15 و 16 ترسیم شده است.



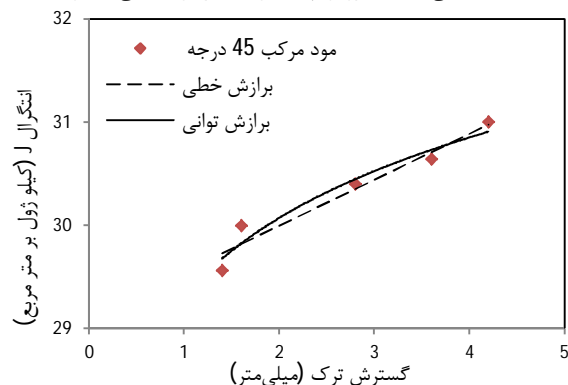
شکل 12 منحنی‌های بار-جابجایی در سه زاویه بارگذاری متفاوت



شکل 13 نقطه شروع گسترش ترک در مود برشی خالص



شکل 14 منحنی $(I-R)$ به روش چند نمونه‌ای در مود کششی خالص



شکل 15 منحنی $(I-R)$ به روش چند نمونه‌ای در مود مرکب 45 درجه

جدول 2 بررسی شرط کرنش صفحه‌ای برای مقادیر بحرانی مود کششی

روش	استاندارد ASTM	J_0 (کیلو ژول بر مترمربع)	$25J_0/\sigma_y$ (میلی متر)	شرط کرنش صفحه‌ای
چند نمونه‌ای	E813-81	10/826	3/524	✓
	E813-87	8/4317	2/744	✓
نرمالیزیشن	E813-81	11/314	3/683	✓
	E813-87	12/166	3/96	✓

همچنین در جدول 3 توابع خطی و توانی برازش شده بر روی داده‌ها و مقادیر ضریب همبستگی این توابع نمایش داده شده است. توابع برازش شده دارای ضرایب همبستگی نزدیک به مقدار یک می‌باشند پس داده‌های به دست آمده از تست‌ها حدوداً در یک مسیر خطی و توانی قرار گرفته‌اند. در واقع امتداد همین توابع، مقادیر رشد ترک‌های بسیار کوچک را نیز شامل می‌شوند.

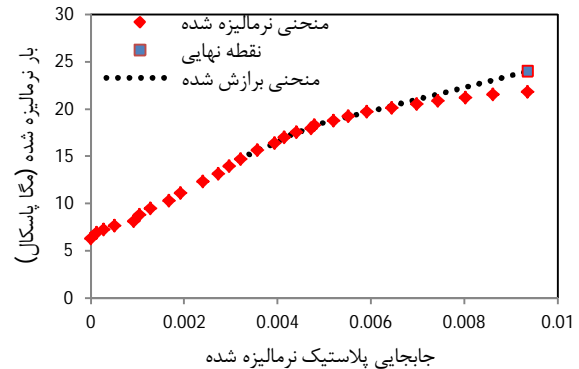
با مقایسه نتایج کار حاضر با مقالات دیگر [9] می‌توان به صراحت اعلام کرد که در تحلیل با نظریه الاستیک-پلاستیک، برای برقراری شرط کرنش صفحه‌ای نیازمند ضخامت بسیار کمتری نسبت به روش نظریه الاستیک خطی هستیم. در نظریه الاستیک خطی باید ضخامت نمونه به اندازه‌ای باشد که ناحیه پلاستیک ایجاد شده در نوک ترک تا حدودی قابل صرف نظر باشد. اندازه ناحیه پلاستیک در حالت تنش صفحه‌ای به میزان قابل توجهی بزرگ‌تر از حالت کرنش صفحه‌ای است به طوری که گسترش ناحیه پلاستیک در راستای ترک برای تنش صفحه‌ای نسبت به کرنش صفحه‌ای در حدود نه به یک است [23] به همین دلیل در نظریه الاستیک خطی نیازمند ضخامت بسیار بیشتری هستیم تا از حالت تنش صفحه‌ای دور شده و به حالت کرنش صفحه‌ای نزدیک شویم.

مقادیر بحرانی شکست برای سایر زوایا نیز در جدول 4 دسته‌بندی شده است. نتایج به دست آمده برای سه زاویه بارگذاری، معرف این است که با افزایش زاویه بارگذاری مقدار J بحرانی یا به عبارتی مقدار انرژی لازم برای شروع گسترش ترک افزایش می‌یابد.

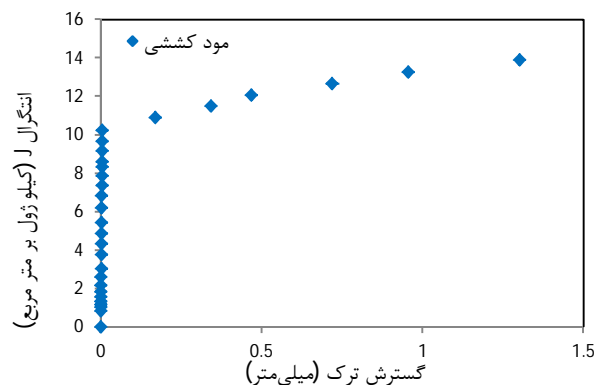
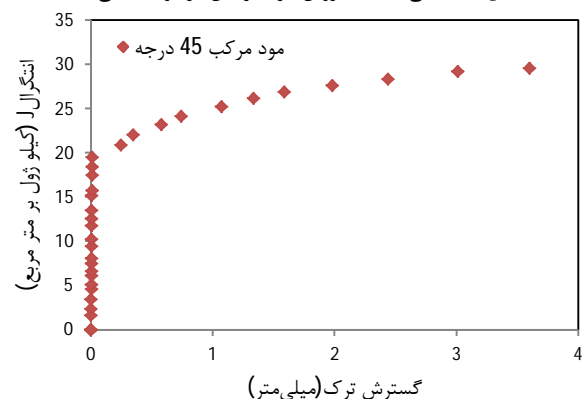
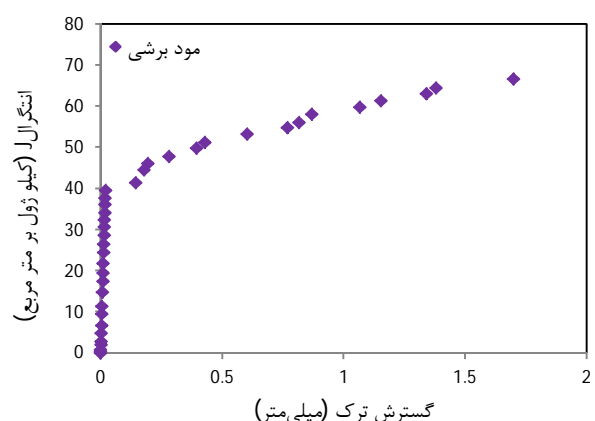
نتایج هر دو استاندارد E813-81 و E813-87 بسیار نزدیک هستند ولی از نظر اندازه، مقادیر پارامترها در روش نرمالیزیشن بر اساس استاندارد E813-87 اندکی بزرگ‌تر از همین مقادیر بر اساس استاندارد E813-81 است

جدول 3 توابع برازش شده بر روی داده‌ها و مقادیر ضریب همبستگی

روش	زاویه بارگذاری (درجه)	استاندارد ASTM	تابع برازش شده	ضریب همبستگی (R^2)
چند نمونه‌ای	0	E813-81	$J=2/518 \Delta a+9/97$	0/997
		E813-87	$J=12/43 \Delta a^{0/331}$	0/982
	45	E813-81	$J=0/44 \Delta a+29/09$	0/94
		E813-87	$J=29/31 \Delta a^{0/037}$	0/95
	90	E813-81	$J=16/02 \Delta a+41/6$	0/809
		E813-87	$J=57/78 \Delta a^{0/301}$	0/893
نرمالیزیشن	0	E813-81	$J=2/843 \Delta a+10/53$	0/978
		E813-87	$J=12/94 \Delta a^{0/056}$	0/801
	45	E813-81	$J=3/05 \Delta a+21/39$	0/91
		E813-87	$J=25/9 \Delta a^{0/103}$	0/905
	90	E813-81	$J=17/42 \Delta a+42/2$	0/971
		E813-87	$J=60/8 \Delta a^{0/153}$	0/933



شکل 17 مراحل حل به روش نرمالیزیشن


 شکل 18 منحنی ($J-R$) به روش نرمالیزیشن در مود کششی

 شکل 19 منحنی ($J-R$) به روش نرمالیزیشن در مود مرکب

 شکل 20 منحنی ($J-R$) به روش نرمالیزیشن در مود برشی

جدول 4 مقادیر J بحرانی در سه زاویه بارگذاری متفاوت با دو روش

روش	زاویه بارگذاری (درجه)	استاندارد ASTM	J بحرانی (کیلوژول بر مترمربع)	اختلاف دو استاندارد (درصد)
چند نمونه‌ای	0	E813-81 E813-87	10/826 8/431	22/12
	45	E813-81 E813-87	29/35 28/717	2/156
	90	E813-81 E813-87	56/67 56/79	0/21
	0	E813-81 E813-87	11/314 12/166	7/53
نرمالیزیشن	45	E813-81 E813-87	22/32 24/36	9/14
	90	E813-81 E813-87	57/46 58/137	1/17

J_0	مقدار مشروط انتگرال J (kJ/m^2)
P_1	نیرو (N)
P_{NI}	مقدار نیروی نرمالیزه شده (MPa)
T	بردار تنش (Pa)
u	مقدار جابجایی (m)
U	انرژی پتانسیل (J)
v_i	جابجایی (m)
v_{pli}	مؤلفه پلاستیک جابجایی (m)
W	چگالی انرژی کرنشی
W	عمق نمونه (m)
علائم یونانی	
σ_y	تنش تسلیم (MPa)
δ_t	مقدار بازشدگی نوک ترک (m)

8- مراجع

- [1] S. S. Schwartz, S. H. Goodman, *Plastics Materials and Processes*: Van Nostrand Reinhold, 1982.
- [2] M.L.Lu, K.C.Chiou, F.C.Chang, Elastic-plastic fracture toughness of PC/ABS blend based on CTOD and J-integral methods, *Polymer*, Vol. 37, No. 19, pp. 4289-4297, 1996.
- [3] M.M.Shokrieh, A.Zeinedinil, Prediction of Strain Energy Release Rate of Asymmetric Double Cantilever Composite Beam in Mixed-mode I/II Delamination using Equivalent Lay-up, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 13, pp. 214-225, 2014. (In Persian)
- [4] T.L.Anderson, *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*, Third Edition: Taylor & Francis, 2005.
- [5] M.L.Lu, F.C.Chang, Determination of J_c for a polycarbonate (PC)/poly(butylene terephthalate) (PBT) blend based on the analyses of multiple-specimen J-R curves, *Polymer*, Vol. 36, No. 24, pp. 4639-4649, 1995.
- [6] P.Luna, C.Bernal, A. Cislino, P. Frontini, B. Cotterell, Y. W. Mai, The application of the essential work of fracture methodology to the plane strain fracture of ABS 3-point bend specimens, *Polymer*, Vol. 44, No. 4, pp. 1145-1150, 2003.
- [7] J.Yan, B.Taskonak, J.A. Platt, J.J. Mecholsky Jr, Evaluation of fracture toughness of human dentin using elastic-plastic fracture mechanics, *Journal of Biomechanics*, Vol. 41, No. 6, pp. 1253-1259, 2008.
- [8] M. M. Mazidi, M. K. R. Aghjeh, F. Abbasi, Evaluation of fracture toughness of ABS polymers via the essential work of fracture (EWF) method, Vol. 47, pp. 6375-6386, 2012.
- [9] A.E.Oskui, N.Choupani, E.Haddadi, Experimental and Numerical Investigation of Fracture of ABS Polymeric Material for Different Sample's Thickness Using a New Loading Device, *Polymer Engineering And Science*, 2013.
- [10] J.R.Rice, A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks, *Journal of Applied Mechanics*, 1968.
- [11] J.A.Joyce, *Manual on Elastic-plastic Fracture: Laboratory Test Procedures*: ASTM, 1996.
- [12] S.A.Sadough Vanini; M.M.Shirbani, Analytical modeling of fracture toughness JIC of austenitic-martensitic functionally graded steels with crack arrester layers, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 11, pp. 110-121, 2014. (In Persian).
- [13] ASTM D6068-96, "Standard Test Method for Determining J-R Curves of Plastic Materials" *Annual Book Of ASTM Standards*, Vol. 03.01, 2008.
- [14] J.Lands, R.Herrera, A New look at J-R analysis, *International Journal of Fracture*, Vol. 36, 1988.
- [15] X.-K.Zhu, J.A.Joyce, J-Resistance curve testing of HY80 steel using SE(B) specimens and normalization method, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 74, No. 14, pp. 2263-2281, 2007.
- [16] J.Dzigan, H.W.Viehrig, Application of the normalization method for the determination of J-R curves, *Materials Science and Engineering*, Vol. 387-389, pp. 307-311, 2004.
- [17] ASTM E1820-01, "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness" *Annual Book Of ASTM Standards*, Vol. 03.01, 2003.
- [18] S. R.Hosseini, N.Choupani, A. R. M. Gharabaghi, Experimental Estimation of Mixed-Mode Fracture Properties of Steel Weld, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 2, 2008.

اما در روش چند نمونه‌ای همین نتیجه برعکس بوده و مقادیر داده‌ها بر اساس استاندارد E813-81 بزرگ‌تر از مقادیر استاندارد E813-87 می‌باشند. در نهایت در حالت محافظه‌کارانه کمترین مقدار J در مود کششی خالص به عنوان چقرمگی شکست برای ماده پلیمری ABS معرفی می‌گردد که این مقدار برابر با 8/431 کیلوژول بر متر مربع است.

6- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این تحقیق رفتار الاستیک-پلاستیک ماده پلیمری ABS تحت بارگذاری مود مرکب، به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. این کار با تست 15 نمونه یکسان در سه زاویه بارگذاری متفاوت به ترتیب در مود کششی خالص (صفر درجه)، مود مرکب 45 درجه‌ای و مود برشی خالص (90 درجه) انجام شد و مقادیر J نسبت به میزان گسترش ترک در قالب نمودارهایی با دو روش چند نمونه‌ای و تک نمونه‌ای نرمالیزیشن و بر اساس دو استاندارد E813-81 و E813-87 به دست آمد. بررسی نتایج، نشان‌دهنده این بود که با افزایش زاویه بارگذاری مقادیر بحرانی J افزایش یافته و مقاومت نمونه‌ها در برابر شکست بیشتر می‌شود. در نهایت با احراز شرط کرنش صفحه‌ای مقدار چقرمگی شکست این ماده پلیمری و همچنین حداقل ضخامت مورد نیاز نمونه برای برقراری این شرط به دست آمد. هم‌خوانی بسیار خوبی در نتایج حل بر اساس دو روش حاصل شد. حداقل اختلاف دو روش در مود برشی با استاندارد E813-81 به مقدار 1/37% و حداکثر اختلاف نیز در مود کششی با استاندارد E813-87 به مقدار 30/7% به دست آمد.

7- فهرست علائم

a	طول ترک (m)
a_0	طول ترک اولیه (m)
a_{bi}	طول ترک پهن اصلاح شده (m)
b_0	طول قسمت غیر ترک نمونه (m)
B	ضخامت نمونه (m)
C_i	مقدار نرمی الاستیک (m/N)
J	انتگرال J (kJ/m^2)
J_c	مقدار بحرانی انتگرال J در مود یک بارگذاری (kJ/m^2)

- [21] ASTM E813-81, "Standard Test Method for, Jlc, A Measure of Fracture Toughness", *Annual Book of ASTM standards*, Vol.03.01, 1981.
- [22] ASTM E813-87, "Standard Test Method for, Jlc, A Measure of Fracture Toughness", *Annual Book of ASTM standards*, Vol.03.01, 1987.
- [23] E. E. Gdoutos, *Fracture Mechanics: An Introduction*: Springer, 2006.
- [19] M.Arca, Z.Hashin, A.Voloshi, A Method to Produce Uniform Plane-stress States with Applications to Fiber-reinforced Materials, *Experimental Mechanics*, 1978.
- [20] ASTM D638-03, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics" *Annual Book Of ASTM Standards*, Vol .03.01, 2003.