



## بررسی چقرمگی شکست ویسکوالاستیک ماده پلیمری ABS تحت بارگذاری مود ترکیبی با استفاده از دستگاه آرکان

ابوذر اسحق‌ی اسکوئی<sup>۱</sup>، مجتبی یزدی<sup>۲\*</sup>، نقدعلی چوپانی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

۲- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تهران، تهران

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

تهران، صندوق پستی ۱۴۳۹۹۵۵۹۶، mohaghighi@ut.ac.ir

### چکیده

امروزه پلیمر ABS به‌طور فزاینده‌ای در صنایع مختلف استفاده می‌شود. افزایش تقاضا برای این ماده در کاربردهای مختلف، نیازمند شناخت دقیق‌تر رفتار آن در حین شکست می‌باشد. در این تحقیق، رفتار شکست مود ترکیبی پلیمر ABS به‌صورت عددی و آزمایشگاهی بررسی شده است. آزمایش‌ها با استفاده از دستگاه اصلاح شده آرکان صورت گرفته است که در آن با تغییر زاویه بارگذاری از ۰ تا ۹۰ درجه، مود یک خالص، مود دوی خالص و تمامی مدهای داخل صفحه قابل بررسی می‌باشند. همچنین تحلیل المان محدود برای محاسبه ضرایب هندسی، که در محاسبه مقادیر چقرمگی شکست مورد نیاز می‌باشند، انجام شده است. در این تحقیق رفتار ویسکوالاستیک برای نمونه مورد آزمایش در نظر گرفته شده است. بنابراین انتظار می‌رود که مقادیر ضرایب شدت تنش وابسته به زمان (فرکانس) باشند. بنابراین با استفاده از اصل تناظر و با فرض شکست الاستیک خطی، مقادیر چقرمگی شکست مود ترکیبی وابسته به زمان برای پلیمر ABS تعیین شد. نتایج حاکی از آن است که در آزمایش ورودی کرنش ثابت، در تمامی شرایط بارگذاری، با گذشت زمان از مقادیر چقرمگی شکست، تا یک زمان مشخص، کاسته می‌شود. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که حداقل مقدار چقرمگی شکست پلیمر ABS، که نقش تعیین‌کننده‌ای در کاربردهای مختلف دارد، در لحظه اول بارگذاری اتفاق نمی‌افتد.

### اطلاعات مقاله

دریافت: ۹۴/۱۰/۹

پذیرش: ۹۵/۱/۸

### کلیدواژگان:

پلیمر ABS

شکست مود ترکیبی

رفتار ویسکوالاستیک

گیره اصلاح شده آرکان

## Characterization of mixed-mode fracture toughness of viscoelastic ABS polymeric material by using modified Arcan set-up

Abuzar Es'haghi Oskui<sup>1</sup>, Mojtaba Haghghi-Yazdi<sup>1\*</sup>, Naghdali Choupani<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

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

\*P.O.B. 143995596, Tehran, Iran, mohaghighi@ut.ac.ir

### Keywords

ABS polymer  
Mixed-mode fracture  
Viscoelastic behavior  
Modified arcan device

### Abstract

ABS (Acrylonitrile butadiene styrene) polymeric material is widely used in different industries. The increasing demand of ABS for different applications has required a thorough understanding of its fracture behavior. This paper investigates mixed-mode fracture behavior of ABS polymeric material based on experimental and numerical analyses. Experiments were conducted on modified Arcan set-up. By varying the loading angle from 0° to 90°, pure mode-I, pure mode-II and a wide range of mixed-mode data were obtained experimentally. Also, finite element analysis was carried out for different loading conditions in order to determine correction factors needed for fracture toughness calculations. In this study viscoelastic behavior was considered for ABS specimens. Therefore, it is expected that the values of stress intensity factors to be time (frequency) dependent. Consequently, based on correspondence principle and assuming linear elastic fracture mechanics, time dependent mixed-mode fracture toughness for ABS polymeric material was determined. Results indicated that in all loading conditions, values of fracture toughness decrease while time increases in stress relaxation test, until a specific time. Accordingly, it can be resulted that the minimum value of fracture toughness of ABS, which plays a crucial role in various applications, does not appear in the first instance of loading.

### ۱- مقدمه

استفاده قرار می‌گیرند. از طرفی با توجه به خصوصیات فیزیکی و مکانیکی

پلیمرها سعی بر آن است که بتوان آن‌ها را جایگزین فلزها نمود. در این میان

امروزه مواد پلیمری به‌طور فزاینده‌ای در سازه‌های صنعتی و مهندسی مورد

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده نمایید:

Please cite this article using:

Es'haghi Oskui, A. Haghghi-Yazdi, M. and Choupani, N., "Characterization of mixed-mode fracture toughness of viscoelastic ABS polymeric material by using modified Arcan set-up", In Persian, Journal of Science and Technology of Composites, Vol. 3, No. 2, pp. 131-138, 2016.

نویسندگان مقاله اطلاع دارند، اطلاعاتی راجع به مقادیر چقرمگی شکست ماده پلیمری ABS با لحاظ کردن رفتار ویسکوالاستیک در مقالات پژوهشی وجود ندارد. لذا در این تحقیق با استفاده از اصل تناظر<sup>۹</sup>، تئوری مربوط به شکست الاستیک خطی برای بررسی رفتار شکست مود ترکیبی ماده پلیمری ABS با فرض رفتار ویسکوالاستیک مورد استفاده قرار گرفته است و نهایتاً مقادیر چقرمگی شکست برای مود یک، مود دو و مود ترکیبی داخل صفحه به صورت تابعی از زمان استخراج شده است.

## ۲- روش شکست مورد استفاده و حل مسئله ویسکوالاستیک

در اغلب مواد تحت بارگذاری، به ندرت یافت می‌شود که نمونه‌ای تحت مود اول یا دوم خالص دچار شکست شود و اغلب شکست مواد به صورت ترکیبی از مود اول و دوم می‌باشد. مطالعه این نوع رفتار به عنوان ترکیبی از مود اول و دوم می‌تواند خواص شکست را به خوبی توصیف کند. علاوه بر آن در بسیاری از قطعات مهندسی که ترک به صورت مود یک ایجاد شده است، امکان دارد در طول عمر سازه به یک ترک با مود ترکیبی تبدیل شود. 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 و در حالت ترکیب آن‌ها ضروری می‌باشد [۹].

روش‌های آزمایشی مختلفی جهت برآورد پارامترهای شکست نمونه تحت مود ترکیبی داخل صفحه ارائه شده است. آزمایش خمش مود ترکیبی<sup>۱۰</sup> (MMB) در سال‌های ۱۹۹۰ و ۱۹۹۲ توسط ریدر و کروس<sup>۱۱</sup> پیشنهاد و در سال ۲۰۰۳ اصلاح شد [۱۰]. این آزمایش عموماً برای تعیین چقرمگی بین لایه ای بکار می‌رود. آزمایش مود ترکیبی بارگذاری انتهایی تیر شکاف دار<sup>۱۲</sup> (MMELS)، که به آزمایش مود ترکیبی نیز معروف است توسط هاشمی و همکاران، در سال ۱۹۹۰ مطرح شد [۱۱]. آزمایش کششی، برشی تیر ترک دار<sup>۱۳</sup> (CLS) که بیشتر برای آزمایش مواد کامپوزیتی کاربرد دارد، اولین بار در سال ۱۹۸۵ توسط رامکومار و وایت کام<sup>۱۴</sup> برای آزمایش خستگی و شکست بین لایه ای مواد کامپوزیتی مورد استفاده قرار گرفت [۱۲]. آزمایش مود ترکیبی خمشی<sup>۱۵</sup> (MMF) در سال ۱۹۸۵ توسط راسل و استریت<sup>۱۶</sup> پیشنهاد شد [۱۳]. که به نام خمش تک پایه<sup>۱۷</sup> (SLB) نیز معروف است.

در این میان گیره آرکان از جایگاه ویژه‌ای برخوردار است چرا که قابلیت بارگذاری در حالت مود یک، مود دو و حالت ترکیبی دو مود را داراست. در واقع می‌توان ادعا کرد که یکی از بهترین روش‌های اندازه‌گیری مود ترکیبی، روش آرکان می‌باشد که در سال ۱۹۸۷ توسط آرکان<sup>۱۸</sup> و همکاران بر روی مواد کامپوزیتی استفاده شد [۱۴]. آزمایش بر مبنای بارگذاری تک محوری نمونه ترک دار که بین دو قطعه فلزی جهت ترکیب مدهای مشخص داخل صفحه، قرار گرفته، استوار است. در سال ۱۹۹۵ آمستوتز<sup>۱۹</sup> و همکاران با ایجاد سوراخ‌هایی در محیط دستگاه جهت اعمال بار، دستگاه را اصلاح نمودند [۱۵]. در واقع این روش، روش مناسبی جهت اندازه‌گیری مود اول و دوم و مود ترکیبی، تنها با استفاده از یک شکل نمونه برای آزمایش می‌باشد.

پلیمر ABS با خصوصیات خوب فیزیکی توانسته است در سطح وسیعی از صنعت مورد استفاده قرار گیرد. این پلیمر از سه تکپار به نام‌های آکریلونیتریل<sup>۱</sup>، بوتادین<sup>۲</sup> و استایرن<sup>۳</sup> تشکیل شده است که دارای چقرمگی بالا، استحکام ضربه ای عالی، پایداری ابعادی و مقاومت سایشی بالا می‌باشد [۱]. بنابراین پی بردن به خصوصیت‌های شکست این ماده پلیمری از اهمیت ویژه ای 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 تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی<sup>۴</sup> (LEFM) به طور گسترده برای تعیین رفتار شکست بسیاری از مواد پلیمری و فلزی به کار می‌رود [۲].

در تئوری مکانیک شکست الاستیک خطی که به خوبی پایه ریزی 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 به کار می‌روند [۳]. مکانیک شکست الاستیک خطی تا زمانی معتبر است که تغییرات غیرخطی مواد محدود به ناحیه کوچکی در اطراف نوک ترک باشد چرا که برخی از مواد 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 صرفه نظر کرد. در این موارد با اعمال بار، نوک ترک قدری 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 اعمال شده به حد تسلیم نمونه دچار شکست می‌شود در این شرایط هم چنان می‌توان با دقت مناسب از تئوری (LEFM) استفاده کرد. محرابی و رضوی [۴] با تغییر درصد فاز لاستیکی ماده ABS به بررسی چقرمگی شکست این ماده پرداختند. چوپانی و اسکویی [۵] نیز با استفاده از گیره اصلاح شده آرکان و گیره جدید تحلیل الاستیک خطی ماده ABS را انجام دادند. اما بایستی توجه شود که در واقعیت، ماده کاملاً الاستیک وجود ندارد و مقداری از انرژی تغییر شکل بصورت الاستیک ذخیره و مقداری از آن بدلیل ویسکوزیته ماده پلیمری، تلف می‌شود. این اتلاف باعث وابستگی خواص مکانیکی به زمان می‌شود که با توجه به سهم هر کدام از موارد مذکور برخی مواد را با تقریب می‌توان الاستیک در نظر گرفت (مثلاً در فلزات و بیشتر الاستومرها) و در برخی دیگر چنین فرضی دور از واقعیت است. پلیمر ABS از جمله موادی است که انتظار می‌رود رفتار ویسکوالاستیک قابل توجهی داشته باشد. در مواد الاستیک، ضریب شدت تنش به عنوان ثابتی مستقل از زمان بیان می‌شود، در حالی که در مواد ویسکوالاستیک، این پارامتر وابسته به زمان (یا فرکانس) می‌باشد و در پاسخ ماده به تست ورودی کرنش ثابت<sup>۵</sup> قابل استخراج می‌باشد.

وانگ و همکاران در سال ۲۰۰۸ و ۲۰۱۰ پلیمر ABS را به عنوان ماده‌ای ویسکوالاستیک تحت آزمایش قرار داده و پارامترهای ویسکوالاستیک ماده و پاسخ ماده به ورودی کرنش را استخراج کرده اند [۷،۶]. همچنین میرایی فراصوتی<sup>۷</sup> مدول یانگ دینامیکی و مقاومت در مقابل ضربه پلیمر ABS توسط نیشیکاوا<sup>۸</sup> و همکاران مورد بررسی قرار گرفته است [۸]. تا آنجایی که

9. Correspondence Principle  
10. Mixed-Mode Bending  
11. Reeder & Crews  
12. Mixed-Mode End Load Split  
13. Cracked Lap Shear  
14. Ramkumar and Whitcomb  
15. Mixed-Mode Flexure  
16. Russell & Street  
17. Single Leg Bending  
18. Arcan  
19. Amstutz

1. Acrylonitrile  
2. Butadiene  
3. Styrene  
4. Linear Elastic Fracture Mechanic  
5. Stress Relaxation Test  
6. Wang  
7. Ultrasonic Attenuation  
8. Nishikawa

شدت تنش بی‌بعد حاصل شده از تحلیل المان محدود و نتایج آزمایشگاهی مربوط به بارهای بحرانی شکست، مکمل یکدیگر می‌باشند و با هم در رابطه ۱ مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ لذا می‌توان خروجی این تحقیق را به عنوان مقادیر آزمایشگاهی چقرمگی شکست مود ترکیبی وابسته به زمان برای پلیمر ABS در نظر گرفت.

روابط ۱ و ۲ برای ماده الاستیک صادق می‌باشد، در حالی که طبق مباحث اشاره شده در بخش‌های قبلی، پلیمر ABS جزو مواد ویسکوالاستیک محسوب می‌شود. روش‌های مختلفی برای تحلیل مواد ویسکوالاستیک وجود دارد. یکی از معروف‌ترین این روش‌ها استفاده از اصل تناظر می‌باشد. به این معنی که طبق اصل تناظر، در صورت معلوم بودن جواب مسئله برای ماده الاستیک، جواب مسئله با استفاده از تبدیل لاپلاس، برای مواد ویسکوالاستیک نیز قابل دستیابی است، با این شرط که تمامی مفروضات و شرایط اعمال شده بر مسئله الاستیک، در حل مسئله ویسکوالاستیک هم صادق باشد [۱۸]. لذا برای استفاده از مسائل الاستیک در حوزه ویسکوالاستیک، قدم اول محاسبه خواص وابسته به زمان ماده از جمله ضرایب شدت تنش بی‌بعد می‌باشد؛ واضح است که با فرض ویسکوالاستیک بودن ماده، تمامی پارامترهای شکست از جمله ضرایب شدت تنش و چقرمگی شکست وابسته به زمان خواهند بود. با لاپلاس‌گیری از رابطه ۱ می‌توان به رابطه متناظر در حوزه لاپلاس دست یافت.

$$\bar{K}(s) = \frac{\bar{P}(s)\sqrt{\pi a}}{wb} \bar{F}(a/w) \quad (3)$$

دقت شود که مطابق رابطه فوق، در صورت استفاده از باری کمتر از بار بحرانی، ضریب شدت تنش متناظر با بار اعمال شده و نه ضریب شدت تنش بحرانی بدست خواهد آمد. همچنین در هر زاویه، بار اعمال شده مقدار ثابتی می‌باشد که بصورت بار پله‌ای واحد به نمونه اعمال می‌شود.

$$P(t) = P_0 H(t) \quad (4)$$

با جایگذاری تبدیل لاپلاس رابطه (۴) در رابطه (۳) خواهیم داشت.

$$\bar{K}(s) = \frac{P_0 \sqrt{\pi a}}{s wb} \bar{F}(a/w) \quad (5)$$

و از آن تبدیل لاپلاس ضریب شدت تنش بدست می‌آید.

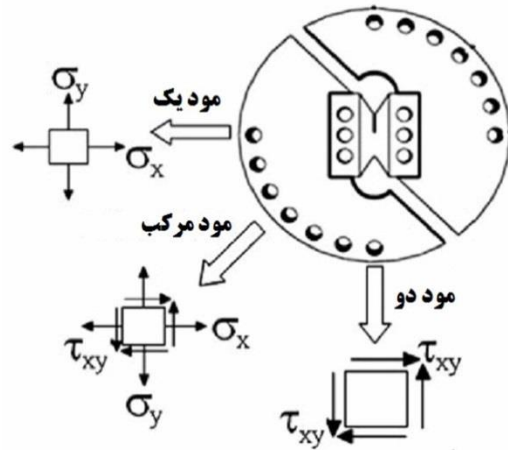
$$\bar{F}(a/w) = \frac{wb}{P_0 \sqrt{\pi a}} s \bar{K}(s) \quad (6)$$

با توجه به رابطه ۶، در صورت محاسبه مقادیر ضریب شدت تنش وابسته به زمان و استفاده در رابطه فوق و با استفاده از لاپلاس معکوس رابطه ۶، می‌توان به رابطه ضریب شدت تنش بی‌بعد برحسب زمان دست یافت.

لذا در صورت محاسبه مقادیر ضرایب شدت تنش مود یک و دو به ازای زوایای بارگذاری مختلف، با گذر زمان، مقادیر ضرایب شدت تنش بی‌بعد در زمان‌های مختلف محاسبه خواهد شد. این محاسبات با به کارگیری روش اجزاء محدود در نرم افزار Abaqus انجام شده است. در حل المان محدود مسئله، بار ثابت ۱۰۰۰ نیوتن در زمان ۰/۰۰۵ ثانیه اعمال شده و در همان حال، تغییرات مقادیر ضرایب شدت تنش با گذر زمان مورد بررسی قرار گرفته است.

لازم به ذکر است مقادیر ضرایب شدت تنش جزو خواص ماده نمی‌باشد، بلکه متناسب با مقدار بار اعمالی می‌باشد، در حالی که ضرایب شدت تنش بی‌بعد مستقل از مقدار بارگذاری و همچنین مستقل از جنس ماده می‌باشد؛ لذا در این مرحله مقادیر ضرایب شدت تنش بی‌بعد با استفاده از رابطه ۶ در مدهای مختلف بارگذاری استخراج شده و مورد بررسی دقیق‌تر قرار گرفته

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود به دلیل هندسه خاص دستگاه آرکان، این گیره قابلیت بارگذاری در زوایای مختلف درون صفحه‌ای یعنی مود کششی خالص (صفر درجه)، مود برشی خالص (۹۰ درجه) و مود ترکیبی درون صفحه‌ای (۰ تا ۹۰ درجه) را داراست.



شکل ۱ گیره آرکان و بارگذاری‌های مختلف ایجاد شده توسط آن [۱۶]

### ۳- تئوری حاکم بر مسئله

مکانیک شکست الاستیک خطی (LEFM) ابزار مفیدی برای تحقیق در مورد ترک‌ها است. هدف از آزمایش چقرمگی شکست، به دست آوردن مقدار ضرایب شدت تنش بحرانی یا چقرمگی شکست ( $K_{IC}$ ) در حالت کرنش صفحه‌ای است. این خصوصیت جسم برای توصیف کردن مقاومت در مقابل شکست آن در طراحی اعضای سازه‌ای به کار می‌رود. استانداردهای ASTM با عنوان‌های ASTM E399 و ASTM D5045 برخی راهنمایی‌ها را درباره چقرمگی شکست مود کششی در حالت کرنش صفحه‌ای ( $K_{IC}$ ) برای فلزات و پلاستیک‌ها را دارند. ضریب شدت تنش در راس ترک در یک نمونه کششی پیوسته از رابطه (۱) محاسبه می‌شود [۱۷].

$$K = \frac{P\sqrt{\pi a}}{wb} f(a/w) \quad (1)$$

که در آن  $P$  بار اعمال شده،  $w$  عرض نمونه،  $b$  ضخامت نمونه،  $a$  طول ترک و  $f(a/w)$  ضریب شدت تنش بی‌بعد یا ضریب اصلاح هندسی است و از تحلیل المان محدود نمونه آزمایشگاهی بدست می‌آید. مکانیک شکست الاستیک خطی و شرایط کرنش صفحه‌ای، شرایط اولیه لازم برای استفاده از رابطه ۱ می‌باشد. ضرایب شدت تنش بحرانی در راس ترک برای یک نوع اصلاح شده نمونه آرکان با استفاده از روابط زیر محاسبه می‌شوند [۱۷].

$$K_{IC} = \frac{P_c \sqrt{\pi a}}{wb} f_1(a/w) \quad (2)$$

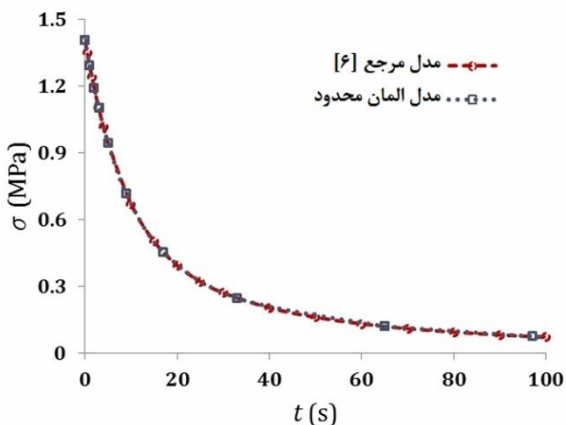
که  $P_c$  بار بحرانی شکست می‌باشد. به طریق مشابه  $K_{IIC}$  نیز با استفاده از ضریب شدت تنش  $f_{II}(a/w)$  محاسبه می‌شود. لازم به ذکر است که در صورت اعمال باری کمتر از بار بحرانی، روابط فوق برای دستیابی به مقادیر مختلف ضریب شدت تنش قابل استفاده خواهد بود.

با توجه به توضیحات ارائه شده در مورد رابطه ۱، واضح است که روش استفاده شده در این تحقیق برای استخراج مقادیر چقرمگی شکست وابسته به زمان، روشی صرفاً مبتنی بر تحلیل المان محدود نمی‌باشد و در واقع مقادیر

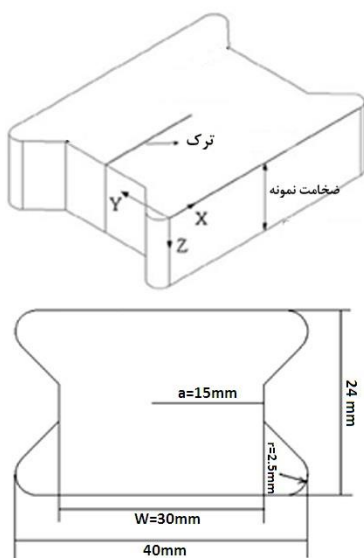
شونده به دستگاه کشش، در هر یک از این حرفه‌ها زاویه اعمال بار تغییر می‌کند؛ بر این اساس این گیره قابلیت بارگذاری در زوایای مختلف درون صفحه‌ای را داراست.

جدول ۱ مقادیر مدول آزمایش کرنش ثابت و ثابت زمانی

مقدار	کمیت
۱۹/۰۳۷۹۵	$E_e$ (MPa)
۸۸۴/۴۵۰۳	$E_1$ (MPa)
۴۶۱/۱۲۳۳	$E_2$ (MPa)
۴۳/۵۹۹۴	$E_3$ (MPa)
۸/۴	$\tau_1$ (s)
۳۳/۶	$\tau_2$ (s)
۲۸۹/۳	$\tau_3$ (s)



شکل ۲ مقایسه نتایج مدل سازی با نتایج مرجع [۶]



شکل ۳ نمونه پروانه‌ای استفاده شده در گیره اصلاح شده آرکان

است. بایستی توجه شود که در محاسبه مقادیر ضریب شدت تنش، کفایت برای مقدار بار دلخواه، مقادیر ضرایب شدت تنش متناسب با آن بارگذاری را از تحلیل المان محدود استخراج کرده و جهت محاسبه ضرایب شدت تنش بی‌بعد که در آن اثر مقدار بار حذف شده است مورد استفاده قرار داد. همچنین با توجه به استقلال این مقادیر از مقدار بارگذاری و جنس ماده، می‌توان از روابط استخراج شده برای این ضرایب بی‌بعد در تحقیقات آتی نیز استفاده نمود.

#### ۴- صحت‌سنجی مدل

در تحقیق حاضر، مشخصه ماده مورد استفاده بر مبنای آزمایش‌های انجام شده در مرجع [۶] می‌باشد. در مقاله اشاره شده نمونه‌های مستطیلی شکل در تست ورودی کرنش ثابت، مورد استفاده قرار گرفته است و نهایتاً خواص ویسکوالاستیک پلیمر ABS با درصد‌های ترکیبی مختلف استخراج شده است. سه ضریب متوالی سری پرونی<sup>۱</sup> یعنی مدول آزمایش کرنش ثابت<sup>۲</sup> و ثابت زمانی آزمایش کرنش ثابت<sup>۳</sup> ارایه شده در مرجع فوق به عنوان خواص ماده، در کنار خواص الاستیک آن، در نرم افزار المان محدود مورد استفاده قرار گرفته است. اطلاعات استفاده شده از نتایج مرجع [۶] در مدلسازی مطابق جدول ۱ می‌باشد. بر این اساس و با فرض ثابت بودن نسبت مدول حجمی به مدول برشی بر حسب زمان برای این ماده، نمونه‌ها مدل شده‌اند. همچنین لازم به ذکر است که مدل ویسکوالاستیک مورد استفاده برای ماده ABS در این مساله مدل ماکسول<sup>۴</sup> می‌باشد.

جهت حصول اطمینان از صحت فرض‌های انجام شده و استخراج درست ضرایب سری پرونی مورد استفاده، نمونه شبیه سازی شده مربوط به مرجع [۶] مطابق مقاله اشاره شده مدل‌سازی شد و بارگذاری مشابه مرجع ذکر شده اعمال شد. نتایج حاصل شده با نتایج ارایه شده در مرجع [۶] مقایسه شد. مطابق شکل ۲ تطابق قابل قبولی بین نتایج مشاهده می‌شود که بیانگر صحت مفروضات و مدل‌سازی انجام شده در تحقیق حاضر می‌باشد.

#### ۵- وسیله آزمایش استفاده شده در مدل‌سازی

همان‌طور که قبلاً اشاره شد، گیره آرکان از جمله تجهیزاتی است که توانایی ایجاد مود یک، مود دو و مود ترکیبی داخل صفحه را تنها با یک شکل نمونه داراست. گیره آرکان برای نخستین بار در سال ۱۹۷۸ توسط آرکان و همکارانش [۱۴] برای بررسی مواد کامپوزیتی طراحی و ساخته شد. در ادامه برای بررسی مواد مختلف از جمله پلیمرها هم مورد استفاده قرار گرفت [۵]. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های این گیره نسبت به نمونه‌های تیری شکل، قابلیت ایجاد مودهای ترکیبی مختلف تنها با یک شکل نمونه می‌باشد. نمونه‌ها با اشکال و اندازه‌های مختلفی برای آزمایش در گیره آرکان مورد استفاده قرار می‌گیرند که رایج‌ترین آن‌ها نمونه پروانه‌ای است که در شکل ۳ ارایه شده است. از طرفی نمونه بصورت فشاری و بدون هیچ قید و بند دیگری داخل گیره قرار می‌گیرد و لذا استفاده از آن نیز آسان است. در سال‌های گذشته در راستای پایدار کردن این گیره و رفع نقایص آن به دفعات تغییراتی بر روی آن انجام شد [۱۸]. یکی از اشکال بسیار پرکاربرد گیره آرکان که در تحقیق حاضر نیز مورد استفاده قرار گرفته است در شکل ۴ قابل مشاهده است. مطابق شکل محیط این گیره سوراخکاری شده و با قرار دادن بین متصل

1. Prony Series  
2. Relaxation modulus  
3. Relaxation time constant  
4. Maxwell Model

۷- نتایج

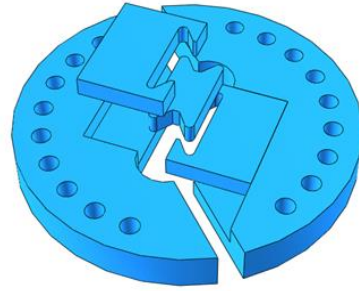
در ادامه با استفاده از مقادیر ضرایب شدت تنش محاسبه شده از تحلیل‌های المان محدود و با لاپلاس‌گیری معکوس از رابطه ۶، مقادیر ضرایب شدت تنش بی‌بعد برحسب زمان استخراج شد؛ این مقادیر برای زوایای بارگذاری ۰، ۴۵ و ۹۰ درجه به تفکیک مود اول و دوم در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲ روابط تغییرات مقادیر ضرایب شدت تنش بی‌بعد مود یک و دو با زمان به ازای زوایای بارگذاری مختلف

رابطه	زاویه بارگذاری
$f_i$	صفر درجه
$7/12 \times 10^{-6} t^2 - 1/0.5 \times 10^{-7} t + 8/52 \times 10^{-7} + 2.77 \delta(t)$	$f_i$
-	$i$
$f_i$	۴۵ درجه
$5/1 \times 10^{-6} t^2 - 7/5 \times 10^{-7} t + 6/0.667 \times 10^{-7} + 1/383 \delta(t)$	$f_i$
$1/10 \times 10^{-6} t^2 - 1/62 \times 10^{-7} t + 1/19 \times 10^{-7} + 6/38 \times 10^{-1} \delta(t)$	$f_i$
-	$i$
$f_i$	۹۰ درجه
$1/52 \times 10^{-6} t^2 - 2/24 \times 10^{-7} t + 1/69 \times 10^{-7} + 9/0.5 \times 10^{-1} \delta(t)$	$f_i$
-	$i$

روند تغییرات مقادیر ضرایب شدت تنش بی‌بعد به تفکیک مود اول و دوم به ازای زوایای بارگذاری مختلف در بازه زمانی ۰ تا ۱۰۰ ثانیه، به ترتیب در شکل‌های ۶ و ۷ ارائه شده است.

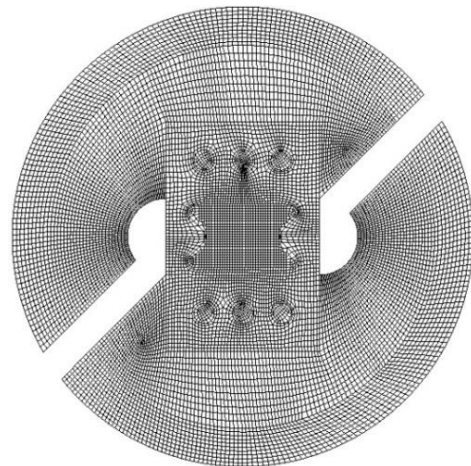
با توجه به اینکه چقرمگی شکست متناسب با ضریب شدت تنش بی‌بعد می‌باشد لذا روند تغییرات ضرایب شدت تنش دارای اهمیت زیادی می‌باشند. با توجه به اشکال فوق، روند کاهشی مقادیر ضرایب شدت تنش مود اول و دوم تا ثانیه ۷۰ و پس از آن تغییر این روند کاهشی به روند افزایشی مشاهده می‌شود که احتمالاً بتوان این رفتار را ناشی از رفتار زنجیره‌های پلیمر و حرکت مولکولی آنها که رفتار ویسکوالاستیک ماده را نیز باعث می‌شود، دانست. زمان تغییر رفتار در ۷۰ ثانیه نیز در مقایسه با زمان تقریبی ثابت شدن سطح تنش در شکل ۲ قابل توجیه است. در هر صورت برای بررسی دقیق‌تر رفتار این پلیمر در زمان‌های طولانی‌تر نیاز به آزمایشات در زمان‌های طولانی است که از اهداف این مقاله به دور است. اما دانستن مقدار حداقل ضریب شدت تنش در بازه زمانی ۱۰۰ ثانیه برای یک طراحی مطمئن سودمند می‌باشد. همچنین لازم به ذکر است هدف اصلی این تحقیق استخراج مقادیر چقرمگی شکست مود ترکیبی برای پلیمر ABS می‌باشد و چنان‌که واضح است چقرمگی شکست جزو خواص ماده است و لذا انتظار می‌رود در آزمایش نمونه‌ها با هر ابعادی، به نتایج مشابهی دست یافت. در صورتی که ترک ایجاد شده در نمونه، تمرکز تنش مورد نیاز را ایجاد کند می‌توان نتیجه گرفت که نواحی اعمال بار بر نمونه، به اندازه کافی دور از ترک محسوب خواهند شد. علاوه بر آن مطابق شکل ۸، حداقل مقدار ضریب شدت تنش بحرانی در شرایط کرنش صفحه‌ای اتفاق می‌افتد و به عنوان چقرمگی شکست ماده شناخته می‌شود که از آن می‌توان در کاربردهای مختلف استفاده کرد. در رابطه با پلیمر ABS، در تحقیقی که در مرجع [۵] صورت گرفته، مشاهده شده است که در ضخامت نمونه‌های ۱۰ میلیمتر و بیشتر از آن، شرایط کرنش صفحه‌ای بر مسئله حاکم است.



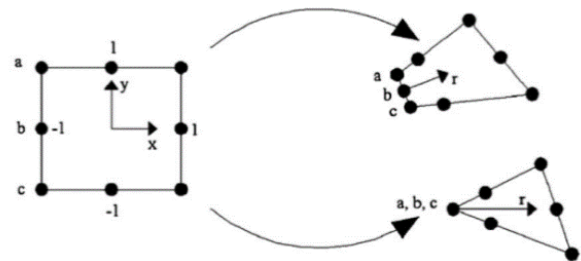
شکل ۴ گیره اصلاح شده آرکان

۶- بررسی‌های المان محدود گیره آرکان و نمونه

در ادامه برای بررسی رفتار مکانیک شکست ماده مورد بررسی و همچنین برای استخراج مقادیر ضرایب شدت تنش بی‌بعد، با استفاده از گیره آرکان، به مدل‌سازی دو بعدی نمونه و گیره پرداخته شد. مطابق شکل ۴-الف المان مربعی هشت نودی مورد استفاده قرار گرفت و همچنین نوک ترک مطابق شکل ۵-ب اصلاح شد. با توجه به دور بودن محل تماس گیره و نمونه نسبت به نوک ترک، فرض تماس کامل بین آن دو مورد استفاده قرار گرفته است. فرض شکست الاستیک خطی با تکینگی تنش در نوک ترک مطابق  $1/\sqrt{r}$  تعریف شد. مدل به صورت ماده ویسکوالاستیک مدل و بار ۱۰۰۰ نیوتن بر نمونه اعمال شد تا رفتار خزشی ماده مورد بررسی قرار گیرد و روند مقادیر ضریب شدت تنش به ازای زوایای بارگذاری و با گذشت زمان مورد بررسی قرار گیرد.



(الف)



(ب)

شکل ۵ الف) الگوی المان بندی گیره آرکان و نمونه، ب) اصلاح انجام شده برای المان نوک ترک

زاویه بارگذاری، آزمایش سه بار تکرار شده و در مقاله حاضر از مقادیر میانگین آن‌ها استفاده شده است.

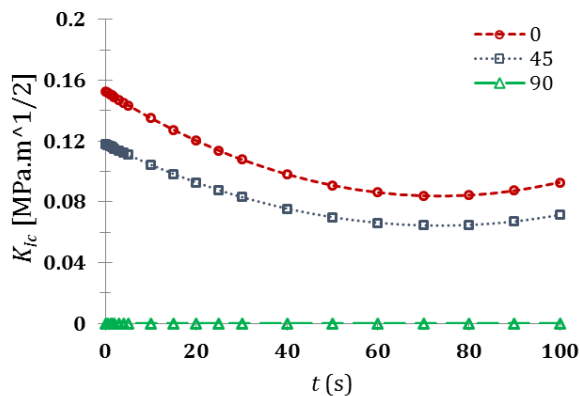
جدول ۳ مقادیر بارهای بحرانی شکست برای طول ترک ۱۵ میلیمتر بر حسب نیوتن

زاویه بارگذاری	درجه ۰	درجه ۴۵	درجه ۹۰
۱	۲۷۷۷	۲۸۲۵	۳۱۸۸
۲	۲۲۱۵	۲۵۶۶	۲۹۰۰
۳	۲۴۳۰	۲۶۶۹	۳۱۱۵
مقدار میانگین	۲۴۷۴	۲۶۸۷	۳۰۶۸

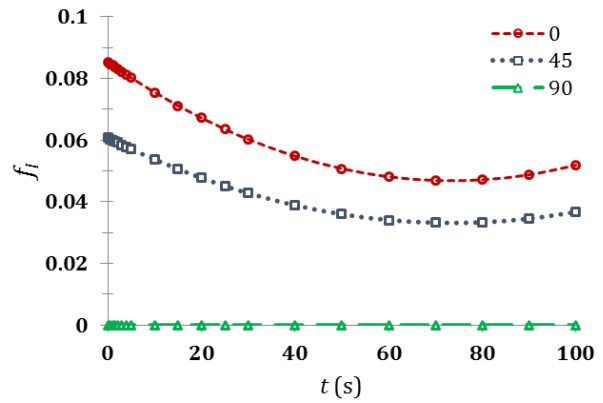
لذا با معلوم بودن مقادیر بارهای بحرانی شکست برای نمونه پروانه‌ای استفاده شده، می‌توان با استفاده از رابطه ۱، روابط متناظری برای چقرمگی شکست وابسته به زمان برای مود یک، مود ترکیبی ۴۵ درجه و مود دوم محاسبه نمود. این روابط وابسته به زمان در جدول ۴ ارائه شده است و نتایج حاصل شده در شکل‌های ۹ و ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۴ روابط تغییرات مقادیر ضریب شدت تنش بحرانی مود یک و دو با زمان به ازای زوایای بارگذاری مختلف

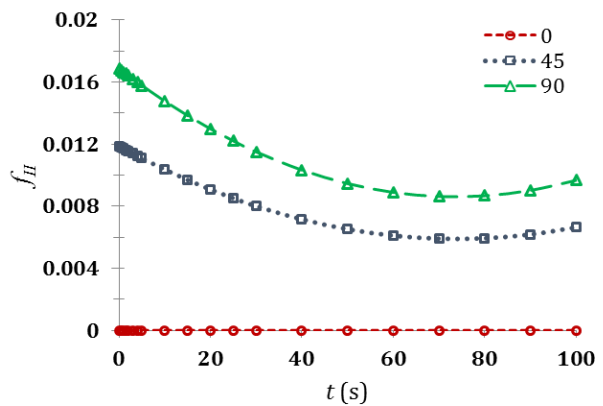
رابطه	زاویه بارگذاری
$1/27 \times 10^1 t^2 - 1/87 \times 10^2 t + 1/52 \times 10^5 + 4/95 \times 10^6 \delta(t)$	$K_{IC}$ صفر درجه
-	$K_{IIC}$
$9/92 t^2 - 1/46 \times 10^2 t + 1/18 \times 10^5 + 2/69 \times 10^6 \delta(t)$	$K_{IC}$ ۴۵ درجه
$2/13 t^2 - 3/14 \times 10^2 t + 2/31 \times 10^5 + 1/24 \times 10^6 \delta(t)$	$K_{IIC}$
-	$K_{IC}$ ۹۰ درجه
$3/38 t^2 - 4/98 \times 10^2 t + 3/74 \times 10^5 + 2/01 \times 10^6 \delta(t)$	$K_{IIC}$



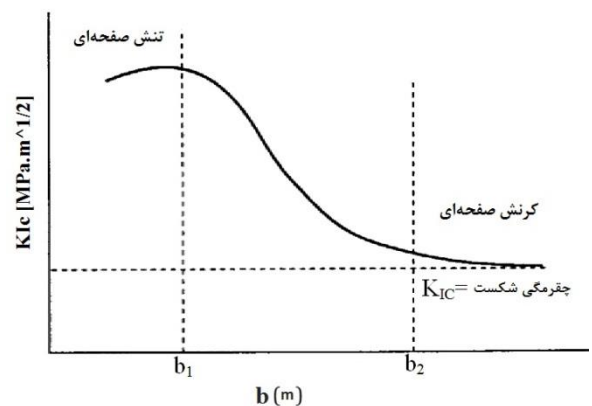
شکل ۹ روند تغییرات مقادیر ضریب شدت تنش بحرانی مود یک با زمان به ازای زوایای بارگذاری مختلف



شکل ۶ روند تغییرات مقادیر ضریب شدت تنش بی‌بعد مود یک با زمان به ازای زوایای بارگذاری مختلف



شکل ۷ روند تغییرات مقادیر ضریب شدت تنش بی‌بعد مود دو با زمان به ازای زوایای بارگذاری مختلف



شکل ۸ تغییرات ضریب شدت تنش با ضخامت صفحه

در این تحقیق نیز مطابق با مرجع اشاره شده، ضخامت ۱۰ میلیمتر ملاک عمل قرار گرفته است و لذا مقادیر حاصل شده برای ضرایب شدت تنش بحرانی، چقرمگی شکست ماده خواهند بود [۵].

مقادیر بارهای بحرانی حاصل از آزمایش‌های شکست که در بارگذاری مود اول، مود دوم و مود ترکیبی ۴۵ درجه صورت گرفته است مطابق جدول ۳ می‌باشد. طبق روند آزمایش‌های انجام گرفته، جهت کاهش خطا، برای هر

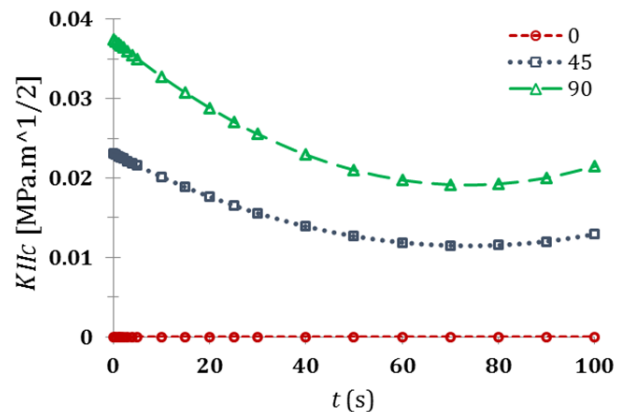
کرنش صفحه‌ای اکتفا نکرد، چرا که حتی در شرایط کرنش صفحه‌ای نیز، مشابه ماده بررسی شده در تحقیق حاضر، امکان کاهش مقدار چقرمگی شکست وجود دارد.

#### ۹- فهرست علائم

$E_e$	مدول الاستیسیته (MPa)
$E_i$	مدول آزمایش کرنش ثابت (MPa)
$f_I$	ضریب تصحیح هندسی یا ضریب شدت تنش بی‌بعد در مود یک
$f_{II}$	ضریب تصحیح هندسی یا ضریب شدت تنش بی‌بعد در مود دو
$K$	ضریب شدت تنش ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ )
$K_I$	ضریب شدت تنش مود یک ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ )
$K_{II}$	ضریب شدت تنش مود دو ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ )
$K_C$	ضریب شدت تنش بحرانی ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ )
$K_{IC}$	ضریب شدت تنش بحرانی مود یک ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ )
$K_{IIC}$	ضریب شدت تنش بحرانی در مود دو ( $\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$ )
$P$	نیروی اعمالی (N)
$P_c$	نیروی اعمالی بحرانی (N)
$b$	ضخامت نمونه (m)
$a$	طول ترک (m)
$\alpha$	زاویه بارگذاری نیرو در گیره‌ها (deg)
$\sigma$	تنش (MPa)
$t$	زمان (s)
$\tau_i$	ثابت زمانی آزمایش کرنش ثابت (s)

#### ۱۰- مراجع

- [1] KWON, H. J. JAR, P.-Y. B. and XIA, Z., "Residual Toughness of Poly (Acrylonitrile-Butadiene-Styrene) (ABS) After Fatigue Loading - Effect of Uniaxial Fatigue Loading," The Journal of Materials Science, Vol. 39, pp. 4821-4828, 2004.
- [2] Lu, M.L. Chiou, K.C. and Chang, F.C., "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] Mai, Y.W. and Cotterell, B., "Effect of Specimen Geometry on the Essential Work of Plane Stress Ductile Fracture," Engineering Fracture Mechanics, Vol. 21, No. 1, pp. 123-128, 1985.
- [4] Mazidi, M. M. Aghjeh, M. K. R. and Abbasi, F., "Evaluation of Fracture Toughness of ABS Polymers via the Essential Work of Fracture (EWF) Method," Journal of Materials Science, Vol. 47, No. 17, pp. 6375-6386, 2012.
- [5] Es'hagi Oskui, A. Choupani, N. and Haddadi, E., "Experimental and Numerical Investigation of Fracture of ABS Polymeric Material for Different Sample's Thickness Using A New Loading Device," polymer engineering and science, Vol. 54, No. 9, pp. 2086-2096, 2014.
- [6] Yin, Z.N. Fan, L.F. and Wang, T.J., "Experimental Investigation of the Viscoelastic Deformation of PC, ABS and PC/ABS Alloys," Materials Letters, Vol. 62, No. 17-18, pp. 2750-2753, 2008.
- [7] Yin, Z.N. and Wang, T.J., "Deformation Response and Constitutive Modeling of PC, ABS and PC/ABS Alloys Under Impact Tensile Loading," Materials Science and Engineering A, Vol. 527, No. 6, pp. 1461-1468, 2010.
- [8] Nishikawa, K. Hirose, Y. Urakawa, O. Adachi, K. Hatano, A. and Aoki, Y., "Ultrasonic Absorption and Relaxation in ABS Composite Polymer," Polymer, Vol. 43, No. 4, pp. 1483-1490, 2002.
- [9] Torabi, A. and Amininejad, S., "Experimental and Theoretical Fracture Analysis of Quasi-Brittle Polymer Components Containing V-Notches with End Holes Under Combined Tensile-Shear Loading," Journal of Science and Technology of Composites, Vol 2, No 2, pp. 41-54, 2015.
- [10] Reeder, J.R., "Refinements to the Mixed-Mode Bending Test for Delamination Toughness," Journal of Composites Technology & Research, Vol. 25, No. 4, pp. 191-195, 2003.
- [11] Hashemi, S. Kinloch, A.J. and Williams, J.G., "The Analysis of Interlaminar Fracture in Uniaxial Fiber-Polymer Composites," Proceeding of the Royal Society of London Series A-Mathematical Physical and Engineering Science, Vol. 427, No. 1872, pp. 173-179, 1990.



شکل ۱۰ روند تغییرات مقادیر ضریب شدت تنش بحرانی مود دو با زمان به ازای زوایای بارگذاری مختلف

با بررسی شکل‌های ۹ و ۱۰ مشاهده می‌شود که روند تغییرات ضرایب شدت تنش بحرانی و یا به عبارتی روند تغییرات مقادیر چقرمگی شکست مشابه با روند تغییرات ضرایب شدت تنش بی‌بعد بر حسب زمان می‌باشد. چنان‌که قبلاً اشاره شد فرض کرنش صفحه‌ای بر روابط استفاده شده حاکم می‌باشد؛ از طرفی با توجه به اصول مکانیک شکست، در مواد الاستیک، در شرایط کرنش صفحه‌ای، ضریب شدت تنش بحرانی از نظر مقداری به حداقل مقدار خود می‌رسد. یکی از ویژگی‌های مهم این چقرمگی کم (چقرمگی شکست کرنش صفحه ای  $K_{IC}$ ) این است که با افزایش ضخامت کاهش نمی‌یابد، بنابراین در هر کاربرد مهندسی این مقدار به عنوان کمترین چقرمگی ماده به حساب می‌آید. در صورت فرض ویسکوالاستیک برای ماده مورد بررسی، انتظار می‌رود با گذشت زمان، مقادیر ضرایب شدت تنش بحرانی تغییر کند؛ لذا نکته قابل توجهی که با بررسی نتایج تحقیق حاضر استنتاج می‌شود کاهش مقادیر چقرمگی شکست ماده ویسکوالاستیک با گذشت زمان حتی در شرایط کرنش صفحه‌ای می‌باشد. لذا در بررسی خواص مواد ویسکوالاستیک بایستی محتاط بود و تنها به شرایط کرنش صفحه‌ای در زمان صفر اکتفا نکرد چرا که مشاهده می‌شود مقاومت ماده در مقابل رشد ترک، با گذشت زمان کاهش می‌یابد. نکته دیگر که از مقایسه روند تغییرات مقادیر چقرمگی شکست مود اول و دوم استنتاج می‌شود تغییرات ناچیز مقادیر چقرمگی شکست مود دوم در مقایسه با مقادیر مود اول می‌باشد، به طوری که می‌توان با تقریب خوبی مقادیر مربوط به مود دوم را در طول زمان ثابت در نظر گرفت.

#### ۸- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در تحقیق حاضر رفتار پلیمر ABS در حضور ترک، تحت بارگذاری مود ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت. در این تحقیق، نمونه مورد بررسی به صورت ماده‌ای ویسکوالاستیک مدل‌سازی شد که این فرض منجر به استخراج پارامترهای شکست وابسته به زمان شد. تئوری شکست خطی و اصل تناظر در استخراج پارامترهای شکست مورد استفاده قرار گرفت. مقادیر ضرایب شدت تنش بی‌بعد و نهایتاً مقادیر چقرمگی شکست تحت بارگذاری‌های صفر، ۴۵ و ۹۰ درجه، به تفکیک مود اول و دوم بر حسب زمان محاسبه شد. با بررسی نتایج مشاهده شد که مقادیر چقرمگی شکست تا ثانیه ۷۰ دارای روندی کاهشی می‌باشد و پس از آن روندی افزایشی را در پیش می‌گیرد، لذا در بررسی خواص مواد ویسکوالاستیک بایستی محتاط بود و تنها به شرایط

- [12] Ramkumar, R.L. and Whitcomb, J.D., "Characterization of Mode-I and Mixed-Mode Delamination Growth in T300/5208 Graphite/Epoxy," Delamination and Debonding of Materials, ASTM STP 876, W.S. American Society for Testing and Materials, Philadelphia (USA), pp. 315-335, 1985.
- [13] Russell, A.J. and Street, K.N., "Moisture and Temperature Effects on the Mixed-Mode Delamination Fracture of Unidirectional Graphite/Epoxy," Delamination and Debonding of Materials, ASTM STP 876, W.S. American Society for Testing and Materials, Philadelphia (USA), pp. 349-370, 1985.
- [14] Arcan, M. Hashin, Z. and 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.
- [15] Amstutz, B.E. Sutton, M.A. Dawicke, D.S. and Newman Jr., I.C., "An Experimental Study of CTOD for Mode I/II Stable Crack Growth in Thin 2024-T3 Aluminum Specimens," national symposium on fracture mechanics Fracture Mechanics ASTM STP, American Society for Testing and Materials, pp. 256-271, 1995.
- [16] Heydari, M. H. Choupani, N. and Shameli, M., "Experimental and Numerical Investigation of Mixed-Mode Interlaminar Fracture of Carbon-Polyester Laminated Woven Composite By Using Arcan Set-Up," Appl Compos Mater, Vol. 18, No. 6, pp. 499-511, 2011.
- [17] Gdoutos E. E., "Fracture Mechanics," Second ed., Springer, Greece, pp. 15-57, 2005.
- [18] Brinson, H. F. and Brinson, L. C., "Polymer Engineering Science and Viscoelasticity," Springer, New York, pp. 180-297, 2008.