



بررسی تجربی و عددی چقرمگی شکست مود دو پلی متیل متاکریلات چقرمه شده با لاستیک با استفاده از روش کار ضروری شکست

الیاس حدادی¹، نقدعلی چوپانی^{2*}، فرهنگ عباسی³

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز
 2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز
 3- استاد، مهندسی پلیمر، دانشگاه صنعتی سهند تبریز، تبریز
 *choupani@sut.ac.ir، 1996-51335

اطلاعات مقاله

چکیده

مقاله پژوهشی کامل
 دریافت: 07 آذر 1394
 پذیرش: 19 دی 1394
 ارائه در سایت: 11 اسفند 1394
 کلید واژگان:
 پلی متیل متاکریلات چقرمه شده با لاستیک
 مود دو شکست
 چقرمگی شکست
 کار ضروری شکست
 طول لیگامنت

چقرمگی شکست مود دو پلی متیل متاکریلات و آمیزه‌های مختلف آن توسط کار ضروری شکست در این تحقیق به صورت تجربی و عددی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌های شکست به وسیله نمونه کششی دارای ترک در دو لبه پلیمر پلی متیل متاکریلات چقرمه شده با لاستیک در دمای اتاق انجام شدند. در این بررسی، شکست مود دو آمیزه‌های پلی متیل متاکریلات / گرافت-آکریلونیتریل بوتادین استایرن با درصد وزنی مختلف لاستیک (صفر، 10، 15 و 20) مورد ارزیابی قرار گرفته است. ضخامت نمونه‌های مورد استفاده در این آزمایش‌ها 0.8 و 4 میلی‌متر بودند. نتایج نشان داد که هر چه طول لیگامنت کمتر باشد مقادیر به دست آمده برای کار ضروری شکست به دلیل تسلیم کامل لیگامنت از دقت بالایی برخوردار است. همچنین نتایج نشان داد که محتنی‌های بار-جاب‌جایی حاصل از این ماده با درصد‌های مختلفی از لاستیک و طول لیگامنت‌های مختلف از نظر شکل ظاهری با هم تقریباً یکسان بوده و کار ویژه کلی شکست با افزایش درصد لاستیک افزایش قابل ملاحظه‌ای از خود نشان داده است. کار ضروری و غیر ضروری شکست در هر دو ضخامت مختلف نمونه‌ها با افزایش درصد لاستیک افزایش یافته است. بیشترین مقدار کار ویژه ضروری و غیر ضروری شکست در نمونه‌هایی با ضخامت 0.8 میلی‌متر به ترتیب 122.19 نیوتن بر میلی‌متر و 5.54 نیوتن بر میلی‌متر مربع و با ضخامت 4 میلی‌متر 51.231 نیوتن بر میلی‌متر و 10.258 نیوتن بر میلی‌متر مربع مربوط به نمونه 20 درصد لاستیک بوده است. با تغییر در ضخامت نمونه‌ها مقدار کار ضروری و غیر ضروری شکست تغییرات محسوسی را از خود نشان داد.

Experimental and numerical investigation of mode ii fracture toughness of rubber-toughened polymethyl methacrylate by using the essential fracture work

Elyas Haddadi¹, Naghdali Choupani^{1*}, Farhang Abbasi²

1- Department of Mechanical Engineering, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
 2- Institute of Polymeric Materials, Sahand University of Technology, Tabriz, Iran
 *P.O.B. 51335-1996 Tabriz, Iran, choupani@sut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper
 Received 28 November 2015
 Accepted 09 January 2016
 Available Online 01 March 2016

Keywords:

Rubber-toughened PMMA
 Mode II fracture
 Fracture toughness
 Essential work of fracture
 Ligament length

ABSTRACT

Pure mode II fracture toughness of polymethyl methacrylate and its components has been studied by essential work of fracture (EWF) approach via experimental and numerical methods. EWF fracture tests with double edge notched tension (DENT) were performed on the RT-PMMA specimens at room temperature. In this investigation, the mode II fracture of polymethyl methacrylate/graft-acrylonitrile butadiene styrene (PMMA/g-ABS) blends with different weight percentage of rubber (0, 10, 15, and 20) and the thickness of 0.8 and 4 millimeter samples was investigated. The results showed that the value for the specific essential work of fracture given by including lower ligament length may be more accurate because the ligament is completely yielded. The results also showed that for the load-displacement curves that have self-similarity in shape for the specimens with different rubber content, specimen thicknesses, and ligament lengths and the specific work of fracture (wf) increases significantly with the increasing of rubber content. The essential work (we) and the non-essential work (β wp) of fracture increase with the increased rubber for both thicknesses. The highest value of the specific essential work and the specific non-essential work of fracture belong to 20% composition in 0.8 mm specimen thickness 122.19 N/mm and 5.54 N/mm² and in 4 mm specimen thickness 51.231 N/mm and 10.258 N/mm², respectively. Significant changes were observed in the amount of essential and non-essential work of fracture when the thickness of the samples was changed.

1- مقدمه

چقرمگی شکست یکی از مهم‌ترین خصوصیات مواد در کاربردهای مهندسی است. تئوری‌های سیستماتیک پدیده‌های شکست در اوایل 1920 توسط اینگلس پایه گذاری و به دنبال آن توسط گریفیث توسعه داده شد [2,1]. امروزه این تئوری‌ها به عنوان مبانی تئوری‌های شکست جدید شناخته می‌شوند. چقرمگی، مقدار مقاومت ماده در مقابل شکست مواد پلیمری با استفاده از مفاهیم ضریب شدت تنش¹، نرخ رهایی انرژی² و غیره ارزیابی می‌شود [3]. این نوع از روش‌های ارزیابی چقرمگی برای بررسی مکانیک شکست الاستیک خطی³ مناسب هستند [4-6]. مکانیک شکست الاستیک خطی (از جمله روش‌های ضریب شدت تنش و نرخ رهایی انرژی) تا زمانی معتبر است که تغییرات غیر خطی مواد، محدود به ناحیه کوچکی در اطراف نوک ترک باشد [7-9]. به هر حال، این روش‌ها برای موادی که پلاستیسیته زیادی را در هنگام شکست از خود نشان می‌دهند مناسب نبوده و نمی‌توانند چقرمگی شکست برشی (مود دو)⁴ را برای این نوع مواد اندازه‌گیری نمایند. همچنین فقدان روش آزمایش استاندارد برای اندازه‌گیری چقرمگی شکست مود دو مانعی است برای بررسی شکست موادی که تحت نیروی برشی خالص قرار گرفته‌اند. برای تعیین چقرمگی شکست همچون مواد پلیمری، کار ضروری شکست⁵ روشی است که می‌تواند برای ارزیابی چقرمگی شکست مود دو فوق بدلیل سادگی مفید واقع شود [10-12]. کار ضروری شکست برای اولین بار توسط بروبرق بکار گرفته شد [3]. او پیشنهاد کرد که ناحیه غیر الاستیک موجود در نوک ترک را می‌توان به دو ناحیه تقسیم‌بندی کرد. ناحیه داخلی که در آن فرایند شکست رخ می‌دهد و ناحیه خارجی که ناحیه داخلی را در بر گرفته و در آن سایر مکانیسم‌های جذب و اتلاف انرژی رخ می‌دهد. این ایده توسط کوتزل، ردل و مای برای فلزات [13,14] و اخیراً توسط افراد دیگری برای پلیمرهای چقرمه شده توسعه یافته است [15-19]. نشان داده شده که برای یک ضخامت معین، کار ضروری شکست یک خاصیت از ماده بوده و مستقل از هندسه قطعه می‌باشد [20]. تئوری کار ضروری شکست که عبارت است از کل انرژی مورد نیاز برای شکست ماده‌ای که دارای پیش ترک است به دو مؤلفه کار ضروری شکست⁶ و کار غیر ضروری یا پلاستیک شکست⁷ تقسیم می‌شود. مؤلفه اول برای ایجاد سطح جدید در ناحیه فرایند شکست مواد پلیمری مورد نیاز است و مؤلفه دوم در ناحیه پلاستیک خارجی، جایی که سایر مکانیسم‌های جذب و اتلاف انرژی رخ می‌دهد، مصرف می‌شود. کل انرژی جذب شده⁸ برای شکست یک نمونه، با عبارت (1) بیان می‌شود:

$$W_f = W_e + W_p \quad (1)$$

کار غیر ضروری شکست به شکل ناحیه پلاستیک اطراف ترک وابسته بوده و با اتلاف کار پلاستیک در واحد حجم ماده (کار غیر ضروری) در ارتباط است. در واقع کار ضروری شکست با سطح شکست و بنابراین با طول لیگامنت، و کار غیر ضروری شکست با حجم ناحیه خارجی متناسب است. برای فلزات و پلاستیک‌ها مشاهده شده است که حجم ناحیه خارجی با مربع طول لیگامنت متناسب است، لذا با در نظر گرفتن سطح Lt و حجم متناظر L^2t مربوط به مؤلفه‌های سازنده معادله (1)، می‌توان ترم‌های ویژه را به صورت معادله (2) نوشت:

$$W_f = w_e Lt + \beta w_p L^2 t \quad (2)$$

که در آن L طول لیگامنت، t ضخامت نمونه و β ضریب شکل مربوط به ناحیه پلاستیک است [21].

با تقسیم رابطه (2) بر سطح لیگامنت (Lt)، رابطه (3) به دست می‌آید:

$$w_f = \frac{W_f}{Lt} = w_e + \beta w_p L \quad (3)$$

پلی متیل متاکریلات یک پلیمر آمورف شیشه‌ای نسبتاً ارزان و پلاستیکی بسیار با ارزش، دارای استحکام و مدول کششی بالا، رفتار پیر شدگی خوب، سهولت نسبی شکل‌دهی، خواص نوری (وضوح، درخشندگی و شفافیت) برجسته و در مقابل تجزیه در مقابل امواج ماوراء بنفش و خوردگی در اثر آب و هوا مقاوم است. به عنوان یک ماده سخت، سفت و محکم، اما ترد طبقه‌بندی می‌شود. این مشخصات مطلوب را می‌توان با اصلاح سطح محصولات (به عنوان مثال، پوشش مقاوم در برابر خراش و یا آنتی استاتیک)، رنگ یا رنگدانه، مقاوم ساختن در برابر خوردگی شیمیایی و با چقرمه‌سازی آن برای طیف وسیعی از کاربردهای بالقوه برای این پلیمر توسعه داد. یکی از پلاستیک‌های مهم مورد استفاده در صنعت و پزشکی پلی متیل متاکریلات می‌باشد. این پلیمر به طور گسترده برای جایگزینی قرنیه و نیز جهت جایگزین‌سازی بخش‌های صدمه دیده استخوان جمجمه سر مورد استفاده قرار گرفته است [22]. در ساخت تجهیزات پزشکی، سیستم‌های الکتریکی، ذخیره داده‌های نوری، بسته‌بندی، لوازم آرایشی، ساخت و ساز (33 درصد در ساختمان‌سازی و صنایع روشنایی)، آکواریم‌های بزرگ، لنزهای فانوس دریایی، تولید صفحات قالب‌گیری و تزئینی و صنعتی (در هواپیماسازی و حدود 40 الی 50 درصد در صنایع اتومبیل‌سازی) به کار می‌رود. پلی متیل متاکریلات از سخت‌ترین و محکم‌ترین پلیمرها می‌باشد و مقاومت خیلی کمی در مقابل انتشار ترک دارد با این حال نسبت به شیشه، که کاملاً ترد است، مقاومت به ضربه خوبی (در حدود 5 برابر شیشه) از خود نشان می‌دهد. به هر حال این ماده با توجه به دامنه وسیع کاربردش در بسیاری از تحقیقات مورد توجه قرار گرفته است [23].

شکست در ماده معمولاً تنها نتیجه مود یک نبوده بلکه ناشی از شرایط بارگذاری مود دو و یا مود مرکب نیز می‌باشد. به این دلیل، مطالعه چقرمگی شکست مود دو حائز اهمیت است [24-26]. به هر حال، مود دو شکست تا به حال کمتر مورد بررسی قرار گرفته لذا لازم است که بیشتر مورد توجه قرار گیرد. بنابراین، در این تحقیق نمونه‌های کششی دارای ترک در دو لبه⁹ ساخته شده از طریق قالب‌گیری از ماده پلیمری آمورف پلی متیل متاکریلات¹⁰ و چقرمه شده آن با لاستیک توسط کار ضروری شکست با بارگذاری مود دو خالص با استفاده از روش‌های تجربی و عددی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

2- کارهای تجربی

مواد مورد استفاده در این تحقیق گرانول صنعتی پلی متیل متاکریلات ساخت شرکت ال جی کره و پودر گرفت-آکریلونیتریل بوتادین استایرن¹¹ شرکت پتروشیمی تبریز بودند. نسبت لاستیک به پلی متیل متاکریلات صفر، 10، 15 و 20 درصد وزنی بود.

از نمونه‌های کششی دارای ترک در دو لبه پلی متیل متاکریلات و چقرمه شده آن با لاستیک برای آزمایش‌های کار ضروری شکست تولید شده توسط قالب‌گیری با ماشین ساخت آلمان استفاده شدند. نمونه‌های آزمایش در دو

⁹ Double edge notched tension (DENT)

¹⁰ Polymethyl methacrylate (PMMA)

¹¹ Graft-acrylonitrile butadiene styrene (g-ABS)

¹ Stress intensity factor (K)

² Energy release rate (G)

³ Linear elastic fracture mechanic (LEFM)

⁴ Mode II

⁵ Essential work of fracture (EWF)

⁶ Essential fracture work (W_e)

⁷ Nonessential or plastic work of fracture (W_p)

⁸ Total fracture energy (W_t)

کشش ثبت گردیدند. مقدار کار ضروری شکست برای هر نمونه پس از انجام آزمایش کشش مورد محاسبه قرار گرفت.

3- بحث و نتایج

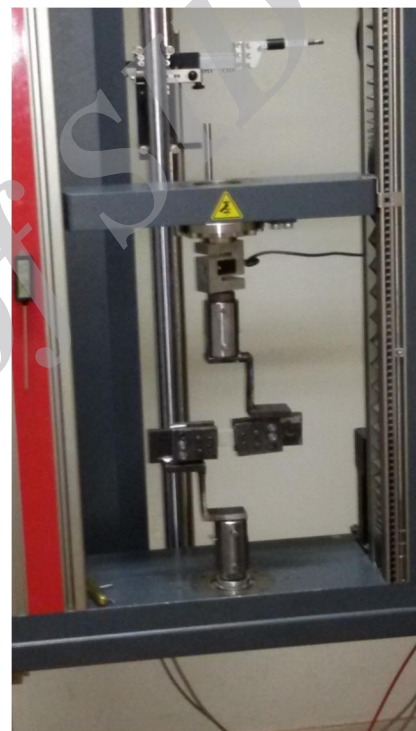
3-1- رفتار مکانیکی مواد

برای بررسی اثر ریزساختار ماده بر خواص ماکروسکوپی و برای تشریح تأثیر افزایش تدریجی کسر حجمی فاز گرفت - آکریلونیتریل بوتادین استایرن بر تغییر شکل‌های القایی درون پلیمر پلی متیل متاکریلات در محدوده ترکیب درصد مورد مطالعه بر مبنای رفتار مکانیکی آنها، منحنی‌های تنش (مهندسی) - کرنش در شکل 2 آورده شده است.

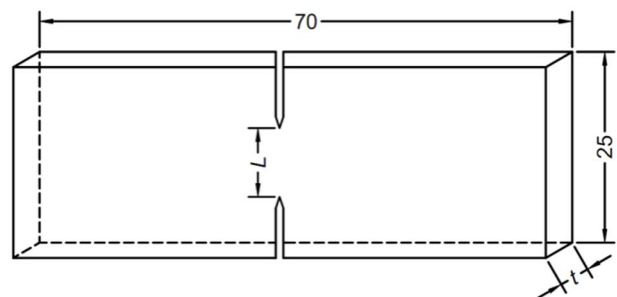
برای این منظور نمونه‌های دمبیلی شکل مطابق استاندارد ایزو 527 تهیه و با استفاده از دستگاه کشش مورد آزمایش قرار گرفتند. نمونه حاوی پلی متیل متاکریلات خالص تنش تسلیم بسیار بالایی دارد به طوری که نمونه قبل از رسیدن به تنش تسلیم خود با ماهیت کاملاً شکننده دچار شکست می‌شود. این شکست معمولاً در نواحی ای اتفاق می‌افتد که ماده دارای نواقص فیزیکی، سطحی، ساختاری یا ناهماهنگی‌های داخلی باشد. در اثر اعمال تنش، این نواحی به عنوان محل‌های تمرکز تنش (و در نتیجه تغییر شکل و کرنش) عمل می‌کنند و فرایندهای تسلیم برشی² و تغییر شکل پلاستیک کاملاً موضعی در این نواحی کوچک منجر به هسته‌زایی یک ترکچه می‌شود. با ادامه اعمال تنش، تعداد ترکچه‌های این نواحی نیز به تدریج بیشتر و از نظر ابعادی بزرگتر می‌شوند. سرانجام در اثر شکست فیبریل‌های³ درون ترکچه‌ها و عدم توانایی ماده برای پایدارسازی و مقاومت در برابر رشد ترکچه، شکست ماکروسکوپی نمونه به سرعت و به طور ناگهانی رخ می‌دهد. بنابراین برای این نوع نمونه‌ها فرایند تسلیم و تغییر شکل پلاستیک به صورت کاملاً موضعی و تنها در حجم بسیار کوچکی از ماده رخ می‌دهد. مکانیسم غالب تغییر شکل در این مواد ترکچه‌زایی⁴ است. با افزودن 10 درصد از فاز گرفت - آکریلونیتریل بوتادین استایرن، هنوز تنش تسلیم ماده بسیار بالا است و پاسخ ماکروسکوپی ماده تا حدی شکننده است. در اینجا تنش لازم برای ترکچه‌زایی کمتر از نمونه پلی متیل متاکریلات خالص است و چون ذرات لاستیکی نیز خود به عنوان هسته‌های ایجاد ترکچه عمل می‌کنند، تعداد ترکچه‌های ایجاد شده در ماده بیشتر از نمونه پلی متیل متاکریلات خالص خواهد بود. با افزایش بیشتر درصد فاز گرفت - آکریلونیتریل بوتادین استایرن و برای نمونه‌های شامل 15 و 20 درصد از این فاز، حضور تعداد بیشتری از ذرات لاستیکی که به طور کاملاً تصادفی و در حجم وسیع‌تری از ماتریس پخش شده‌اند، باعث می‌شوند که حجم بیشتری از نمونه در فرایند تغییر شکل و جذب و اتلاف انرژی شرکت کنند. در درون نمونه و به دلیل نزدیکی بیشتر ذرات به یکدیگر و همچنین اثر هم‌پوشانی بیشتر میدان‌های تنش حول این ذرات، لیگامنت ماتریس به صورت کاملاً موضعی توانایی تسلیم و تغییر شکل برشی را از خود نشان می‌دهد که این رفتار متناظر با نقطه ماکزیمم بر روی منحنی تنش (مهندسی) - کرنش است. پس از این تسلیم، این ناحیه دچار نرم‌شدگی کرنشی⁵ شده که به ایجاد یک ناحیه گردنه‌ای⁶ در این ناحیه منجر می‌شود. با افزایش میزان لاستیک در نمونه و با قرار گرفتن تعداد بیشتری از ذرات در نزدیکی یکدیگر و در نواحی مختلف از نمونه و در نتیجه سهولت بیشتر فرایند

سایز مختلف به ابعاد $70 \times 25 \times 0.8$ و $70 \times 25 \times 4$ میلی‌متر و با طول لیگامنت - های مختلف 4، 5، 6، 9، 12 و 15 میلی‌متر برای نمونه‌هایی با ضخامت 0.8 میلی‌متر و 12، 13، 14، 15، 17 و 19 میلی‌متر برای نمونه‌هایی با ضخامت 4 میلی‌متر ساخته شدند (شکل 1). ترک‌های اولیه توسط تیغه با نوک تیز و به صورت لغزشی¹ با شعاع نوک ترک تقریباً 13 میکرون‌متر و با طول‌های مختلف ایجاد شدند (شعاع نوک ترک بایستی کمتر از 20 میکرون‌متر باشد [27]). حداقل هفت نمونه برای هر آزمایش تکرار شدند. طول لیگامنت‌ها و ضخامت نمونه‌ها با دقت ± 1 میکرون‌متر توسط میکروسکوپ مجهز به میکرون‌متر مورد اندازه‌گیری قرار گرفتند.

تمامی آزمایش‌ها با دستگاه کشش آلمانی زویخ و با استفاده از قید و بند طراحی شده برای این کار (شکل a-1) در دمای 23 درجه سانتی‌گراد و با سرعت کششی ثابت یک میلی‌متر بر دقیقه انجام گرفتند. نیروها و جابه‌جایی‌ها به صورت اتوماتیک در حین انجام عمل کشش توسط دستگاه



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Configuration of Zwick/z10 10 kN tensile machine with new fixture and double edge notch tensile (DENT) specimens, (b) sketch map of DENT specimen geometry

شکل 1 (a) دستگاه تست کشش با قید و بند جدید و نمونه کششی دارای ترک در دو لبه و (b) مشخصات هندسی نمونه کششی

² Shear yielding

³ Fibrill

⁴ Crazing

⁵ Strain softening

⁶ Necking

¹ Razor-sliding

بار-جابه‌جایی هم کاهش یافته و در نتیجه نیروی لازم برای شکست نمونه هم کاهش می‌یابد. با افزایش درصد لاستیک در نمونه‌ها، نمونه در تمامی طول لیگامنت‌های خود رفتار کاملاً غیر خطی را نشان می‌دهد، همچنین علاوه بر اثر تغییر در ترکیب نمونه، اثر کاهش طول لیگامنت بر تغییر رفتار ماده در یک ترکیب درصد معین نیز کاملاً مشهود است. در ترکیب درصد‌های لاستیک بیشتر بعد از نقطه تسلیم رفتار پایداری را از خود نشان می‌دهند و همچنین شدت فرایند تسلیم و تغییر شکل پلاستیک در آنها نسبت به سایر نمونه‌ها با میزان فاز لاستیکی کمتر بیشتر است. این امر به وجود یک ناحیه پلاستیک بزرگتر در نوک ترک منجر می‌شود. به طوری که بخشی از انرژی که در این ناحیه جذب و تلف خواهد شد در مقایسه با دیگر نمونه‌ها قابل توجه‌تر خواهد بود. در لیگامنت‌های با طول کوتاه‌تر تمام نمونه‌ها در طول آزمایش تا نقطه شکست در مود برشی (II) قرار داشتند. با وجود این در لیگامنت‌های با طول بزرگتر بعضی از نمونه‌ها با تغییر شکل در لیگامنت وارد مودهای دیگر نیز می‌شدند که این نمونه‌ها از چرخه تحلیل خارج شدند (منحنی‌های بار-جابه‌جایی برای طول لیگامنت‌های 12، 15، 17 و 19 میلی‌متر برای آمیزه 15 و 20 درصد لاستیک از چرخه تحلیل تجربی به دلیل تغییر شکل لیگامنت نمونه‌ها در حین آزمایش شکست خارج شده‌اند (شکل‌های 2 e, f, g, h)). رفتار نمودارهای بار-جابه‌جایی نیز این مطلب را تأیید می‌کند. با مقایسه منحنی‌های بار-جابه‌جایی ترکیب درصد‌های مختلف مشاهده می‌شود که با افزایش درصد لاستیک در نمونه‌ها میزان جابه‌جایی تا نقطه شکست در یک لیگامنت معین افزایش می‌یابد. از طرف دیگر میزان تغییر شکل نمونه بعد از نقطه تسلیم نیز زیاده‌تر می‌شود که باعث افزایش

تسلیم و تغییر شکل برشی در ماتریس بین ذرات و نقاط مختلف بر روی نمونه، از یک طرف استحکام تسلیم نمونه به تدریج کاهش یافته و از طرف دیگر میزان پایداری در رفتار مکانیکی بعد از نقطه تسلیم نیز بیشتر می‌شود. به طوری که این نمونه‌ها یک ناحیه گردنه کاملاً پایداری را از خود نشان می‌دهند و به دنبال آن نمونه‌ها تحت تأثیر فرایند تغییر شکل پلاستیک قرار می‌گیرند. خواص مکانیکی پلیمر پلی متیل متاکریلات و آمیزه‌های مختلف به دست آمده از آزمایش کشش شامل استحکام کششی، حداکثر افزایش طول و مدول الاستیسیته در شکل 2 نشان داده شده است.

3-2- منحنی‌های بار-جابه‌جایی

شکل 3 منحنی‌های بار-جابه‌جایی مود دو برای آمیزه‌های مختلف، طول لیگامنت‌ها و ضخامت‌های مختلف را نشان می‌دهد. در این شکل می‌توان الگوهای مختلف منحنی‌های بار-جابه‌جایی به دست آمده برای دو ضخامت مختلف را مشاهده نمود. به هر حال، منحنی‌های بار-جابه‌جایی نشان داده شده در شکل فوق یک هم‌مانندی براساس طول لیگامنت‌های مختلف را نشان می‌دهد که می‌تواند ناشی از تنش‌های اتفاق افتاده مشابه در لیگامنت برای مود خالص دو باشد. تقریباً می‌توان گفت که با افزایش طول لیگامنت مقدار ماکزیمم نیرو و میزان جابه‌جایی تا نقطه شکست نیز افزایش می‌یابند. از طرف دیگر منحنی‌های بار-جابه‌جایی برای تمامی لیگامنت‌ها تقریباً مشابه یکدیگر هستند. این شباهت در رفتار منحنی‌های بار-جابه‌جایی یکی از پیش شرط‌های اصلی اعتبار داده‌های حاصل از این روش است و بر این نکته اشاره دارد که روند تغییر شکل و آهنگ رشد ترک‌های موجود بر روی نمونه و در لیگامنت‌های مختلف بایستی، همگی یکسان بوده و از یک نوع رفتار تبعیت کنند. نقطه ماکزیمم بر روی هر منحنی متناظر با محل تسلیم کامل آن لیگامنت است. بعد از تسلیم لیگامنت، ترک‌ها از دو طرف و از نوک ترک‌های تعبیه شده بر روی نمونه، به سمت یکدیگر شروع به رشد کرده و با رسیدن به هم در قسمت میانی لیگامنت به شکست کامل قطعه می‌انجامد. با توجه به منحنی‌های فوق، مشاهده می‌شود که میزان جابه‌جایی ماده در اغلب نمودارها بعد از نقطه تسلیم در مقایسه با میزان تغییر شکل تا نقطه تسلیم کمتر است. افت نیرو بعد از نقطه تسلیم، به تغییر شکل راحت‌تر ناحیه لیگامنت مربوط می‌شود. تسلیم کامل لیگامنت قبل از شروع رشد ترک برای همه نمونه‌ها به جزء پلی متیل متاکریلات خالص اتفاق افتاده که یکی دیگر از معیارهای اعتبار داده‌های حاصل از این روش است. با کاهش طول لیگامنت، سطح زیر منحنی

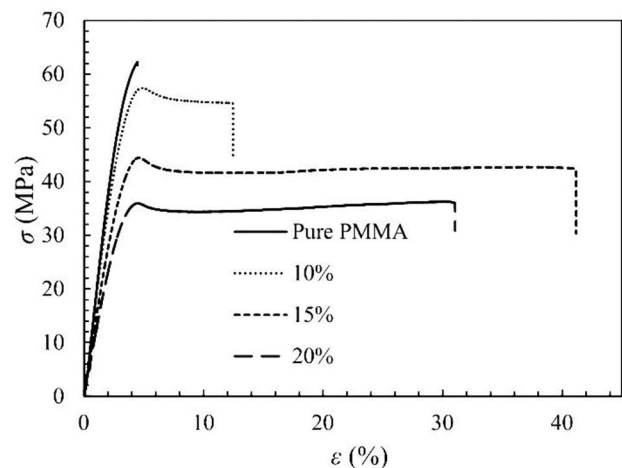
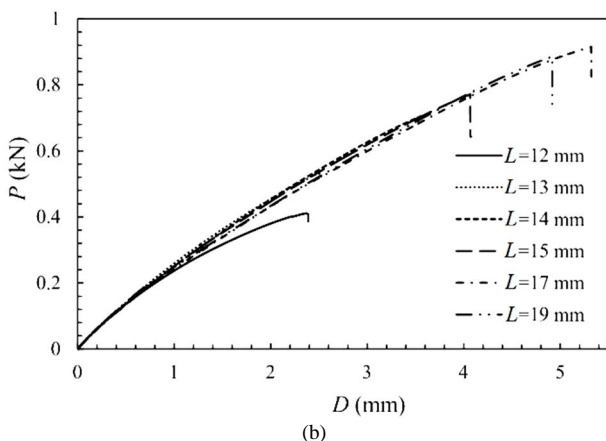
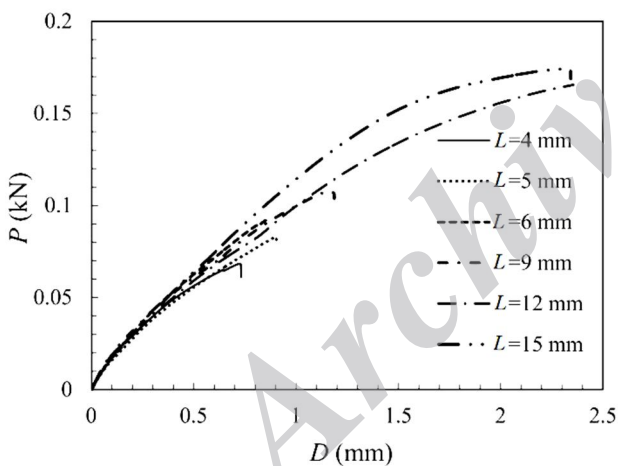


Fig. 2 The tensile properties of the PMMA and its components

شکل 2 خواص کششی پلیمر پلی متیل متاکریلات و آمیزه‌های مختلف آن

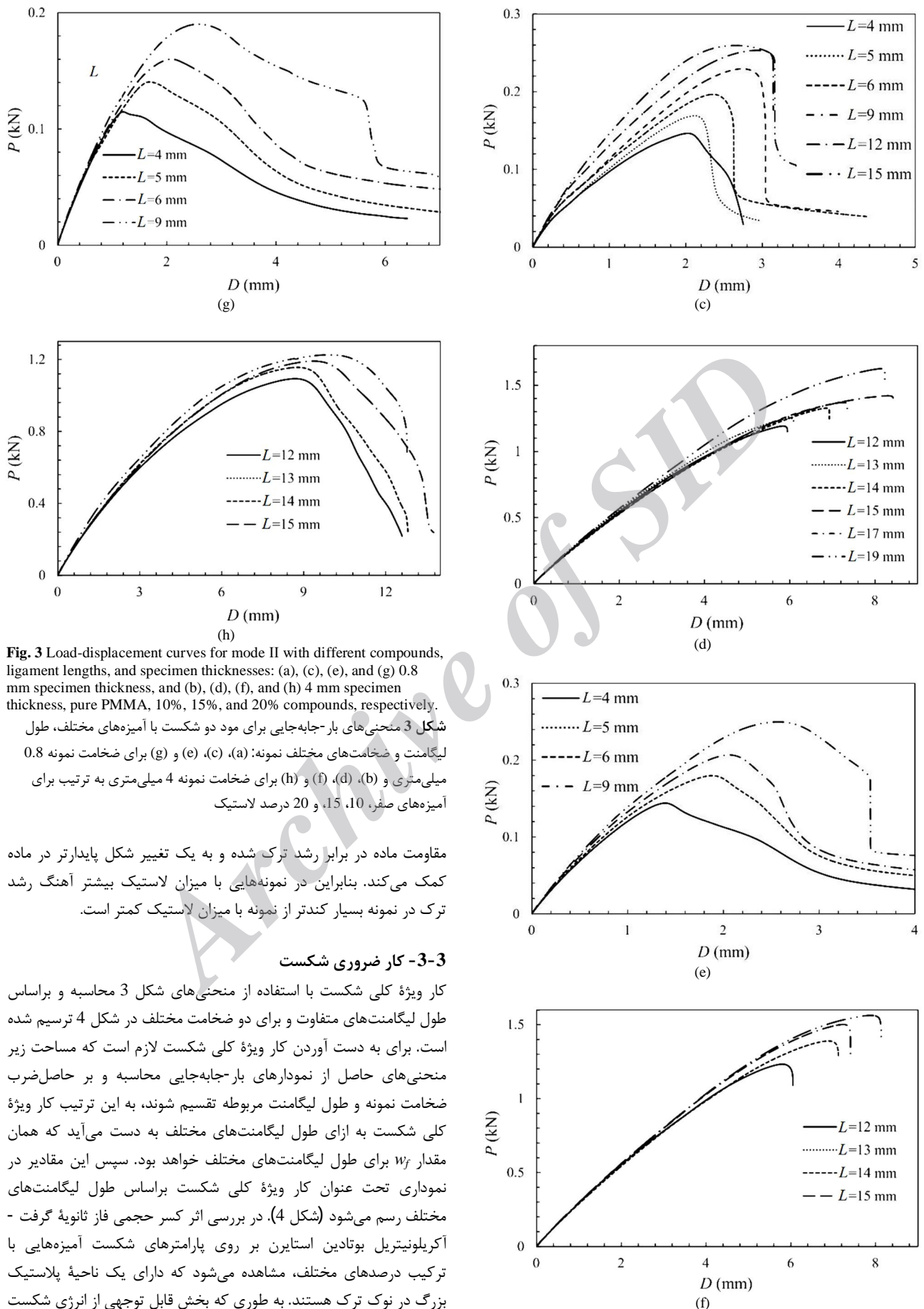


Fig. 3 Load-displacement curves for mode II with different compounds, ligament lengths, and specimen thicknesses: (a), (c), (e), and (g) 0.8 mm specimen thickness, and (b), (d), (f), and (h) 4 mm specimen thickness, pure PMMA, 10%, 15%, and 20% compounds, respectively.

شکل 3 منحنی‌های بار-جاب‌جایی برای مود دو شکست با آمیزه‌های مختلف، طول لیگامنت و ضخامت‌های مختلف نمونه: (a)، (c)، (e) و (g) برای ضخامت نمونه 0.8 میلی‌متری و (b)، (d)، (f) و (h) برای ضخامت نمونه 4 میلی‌متری به ترتیب برای آمیزه‌های صفر، 10، 15، و 20 درصد لاستیک

مقاومت ماده در برابر رشد ترک شده و به یک تغییر شکل پایدارتر در ماده کمک می‌کند. بنابراین در نمونه‌هایی با میزان لاستیک بیشتر آهنگ رشد ترک در نمونه بسیار کندتر از نمونه با میزان لاستیک کمتر است.

3-3- کار ضروری شکست

کار ویژه کلی شکست با استفاده از منحنی‌های شکل 3 محاسبه و براساس طول لیگامنت‌های متفاوت و برای دو ضخامت مختلف در شکل 4 ترسیم شده است. برای به دست آوردن کار ویژه کلی شکست لازم است که مساحت زیر منحنی‌های حاصل از نمودارهای بار-جاب‌جایی محاسبه و بر حاصل‌ضرب ضخامت نمونه و طول لیگامنت مربوطه تقسیم شوند، به این ترتیب کار ویژه کلی شکست به ازای طول لیگامنت‌های مختلف به دست می‌آید که همان مقدار w_f برای طول لیگامنت‌های مختلف خواهد بود. سپس این مقادیر در نموداری تحت عنوان کار ویژه کلی شکست براساس طول لیگامنت‌های مختلف رسم می‌شود (شکل 4). در بررسی اثر کسر حجمی فاز ثانویه گرفت - آکریلونیتریل بوتادین استایرن بر روی پارامترهای شکست آمیزه‌هایی با ترکیب درصدهای مختلف، مشاهده می‌شود که دارای یک ناحیه پلاستیک بزرگ در نوک ترک هستند. به طوری که بخش قابل توجهی از انرژی شکست

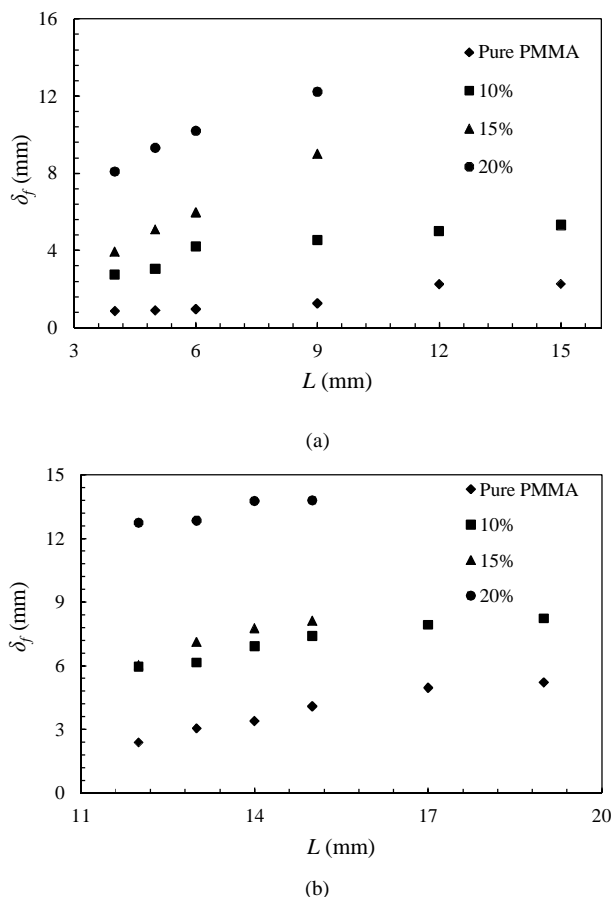


Fig. 5 Plot of ultimate elongation length as a function of ligament length with different specimen thicknesses: (a) 0.8 mm and (b) 4 mm

شکل 5 ترسیم طول کشیدگی نهایی به عنوان تابعی از طول لیگامنت با ضخامت‌های مختلف نمونه: (a) ضخامت نمونه 0.8 میلی‌متر و (b) ضخامت نمونه 4 میلی‌متر

از دیدگاه طول نهایی با افزایش درصد لاستیک، طول لیگامنت و ضخامت نمونه‌ها برای همه ترکیب درصدهای فاز لاستیکی افزایش می‌یابد، اما این افزایش در طول لیگامنت‌های کوتاه‌تر به دلیل تسلیم کامل لیگامنت، به صورت یکنواخت و با شیب تقریباً ثابت ادامه می‌یابد. با وجود این، هر چه طول لیگامنت افزایش می‌یابد، به دلیل تغییر شکل جزئی در اطراف لیگامنت، افزایش از دیدگاه طول نهایی تا حدودی یکنواختی خود را از دست می‌دهد.

همچنین، تعدادی تصویر از فرایند گسترش ترک در هنگام بارگذاری نمونه‌ها در حالت مود دو خالص در شکل 6 نشان داده شده است. به طور واضح مشاهده می‌شود هنگامی که ترک شروع به گسترش کرده لیگامنت به طور کامل تسلیم شده است که این امر به خوبی پیش شرط روش کار ضروری شکست را اغنا می‌کند. به هر حال، نتایج نشان داد وقتی که طول لیگامنت کمتر است لیگامنت به طور کامل تسلیم می‌شود (شکل 6d). همچنین در طول لیگامنت‌های بزرگتر قبل از اینکه ترک شروع به گسترش نماید تغییر شکل در نمونه اتفاق افتاده لذا بررسی کار ضروری شکست در همچون نمونه‌هایی با مشکل مواجه می‌شود (شکل 6e).

با توجه به رفتار بار-جاب‌جایی (نمودارهای شکل 3) و فتوگراف‌های شکل 6 برای نمونه‌های پلی متیل متاکریلات خالص و پلی متیل متاکریلات چقرمه شده با لاستیک در طول لیگامنت‌های مختلف می‌توان دریافت که رفتار پلی متیل متاکریلات خالص در ضخامت‌های مختلف ترد می‌باشد. این در حالی است که پلی متیل متاکریلات چقرمه شده با لاستیک در ضخامت 0.8

مربوط به نمونه در این ناحیه و به صورت تسلیم برشی و تغییر شکل‌های پلاستیک زیاد، جذب و تلف می‌شود که این امر به رفتار مکانیکی بسیار پایدارتر بعد از نقطه تسلیم منجر می‌شود. با محاسبه سطوح زیر منحنی‌های بار جابه‌جایی، یک ارتباط خطی خوبی بین کار ویژه کلی شکست و طول لیگامنت‌ها در شکل 4 مشاهده می‌شود. با برون‌یابی خطی کار ویژه کلی شکست شکل 4 تا طول لیگامنت صفر، می‌توان مؤلفه اول کار ضروری شکست را به دست آورد. شیب خطوط نشان دهنده مشخصه پلاستیکی نمونه‌ها است. با توجه به شکل 4 به طور واضح مشاهده می‌شود که کار ویژه کلی شکست مربوط به نمونه ضخامت‌های 0.8 و 4 میلی‌متر با افزایش درصد لاستیک ترکیب‌ها افزایش قابل ملاحظه‌ای یافته است. این افزایش هم شامل کار ضروری شکست و هم کار غیر ضروری شکست می‌باشد، مقادیر کار ویژه کلی شکست به دست آمده در طول لیگامنت‌های کوتاه‌تر از دقت و ضریب رگرسیون بسیار خوبی برخوردار بوده است. به هر حال، احتمال اینکه در طول لیگامنت‌های کمتر لیگامنت دچار تسلیم کامل قبل از شروع گسترش ترک شود بسیار زیاد بوده و در نتیجه مقدار کار ویژه کلی شکست به دست آمده در مورد این نوع نمونه‌ها از دقت بالایی برخوردار بوده است.

شکل 5 رابطه بین ازدیاد طول نهایی و طول لیگامنت را نشان می‌دهد. تعیین این پارامتر نشان دهنده مقاومت ماده در برابر گسترش ترک است.

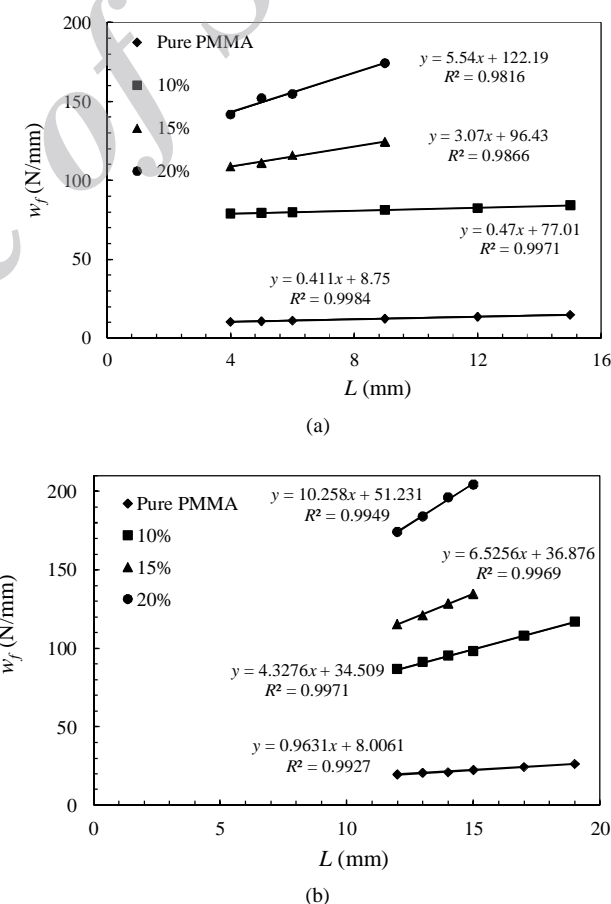


Fig. 4 Plot of specific work of fracture in mode II (w_f) as a function of ligament length with different specimen thicknesses: (a) 0.8 mm and (b) 4 mm

شکل 4 ترسیم کار ویژه کلی شکست در مود دو به عنوان تابعی از طول لیگامنت با ضخامت‌های مختلف نمونه: (a) ضخامت نمونه 0.8 میلی‌متر و (b) ضخامت نمونه 4 میلی‌متر

هندسه، خواص مکانیکی و شرایط بارگذاری با شرایط آزمایش‌های تجربی ایجاد شود. برای این منظور، نمونه‌آزمون کشش دارای ترک در دو لبه با ضخامت‌های 0.8 و 4 میلی‌متر و در طول ترک‌های مختلف، متناظر با آزمایش‌های تجربی شبیه‌سازی گردیده است (شکل 7). نمونه‌ها مطابق با شرایط مسأله به صورت دوبعدی مدل گردیده‌اند. این تحلیل‌ها برای پلی‌متیل متاکریلات خالص و نمونه‌های دارای 10، 15 و 20 درصد لاستیک انجام شدند. نمونه‌ها به صورت مواد ایزوتروپ الاستیک-پلاستیک در نظر گرفته شدند و خواص مکانیکی مورد نیاز برای تحلیل عددی (مدول الاستیک و داده‌های مربوط به قسمت تغییر شکل پلاستیک آزمون تنش-کرنش) از نتایج آزمایش‌های کشش استخراج گردیدند. در این شرایط، مدول الاستیسیته چهار درصد ترکیب به ترتیب برابر 1870، 1850، 1647 و 1400 مگاپاسکال و مقدار ضریب پواسون آنها برابر 0.33 اعمال گردید. در این مورد برای کاهش خطا از مقادیر میانگین استفاده شده است. برای به دست آوردن نتایج دقیق در نوک ترک، المان‌های نوک ترک اصلاح و کوچکترین مقدار اندازه المان در نوک ترک برابر 0.02 میلی‌متر می‌باشد. لازم به ذکر است با اصلاح المان‌های نوک ترک، مقادیر حاصل شده برای پارامترهای شکست به طور میانگین در حدود 3 درصد نسبت به حالت مش‌بندی ساده تغییر کردند و در واقع به مقادیر تجربی نزدیکتر شدند. تمامی نمونه‌ها توسط المان‌های چهارگوش اصلاح شده هشت نقطه‌ای مدل شدند و در کل 2500 المان در این مدل به کار گرفته شده است؛ با توجه به وجود نقطه میانی در این نوع المان، استفاده از آن در تحلیل ترک مفید خواهد بود. همچنین از میدان تکین استاندارد استفاده شد و در المان‌های اطراف ترک نودهای میانی آنها به 1/4 فاصله خود تا نوک ترک منتقل شدند و نحوه اصلاح المان‌ها در شکل 8 نمایش داده شده است. در این مدل از 5 کاننور در رأس ترک جهت محاسبه انتگرال J استفاده شد. بارگذاری نمونه‌ها به صورت جابه‌جایی فک و متناظر با مقدار جابه‌جایی به دست آمده از آزمایش‌های تجربی اعمال شده است. مدل‌سازی نمونه آزمون کشش دارای ترک در دو لبه و المان‌بندی آن برای طول لیگامنت 12 میلی‌متر و ضخامت نمونه 4 میلی‌متر در شکل 7 داده شده است. نمای کلی نمونه پس از تغییر شکل مطابق شکل 7 می‌باشد.

با مقایسه نتایج عددی و آزمایشگاهی (جدول 1)، اختلاف در حدود 5 تا 14 درصدی در نتایج دو روش مشاهده می‌شود که می‌تواند ناشی از وجود عیوبی چون عیوب مربوط به ساخت نمونه و یا خطاهای مربوط به پارامترهای ورودی شبیه‌سازی باشد.

3-5- شکست نگاری

در تأیید توضیحات و نتایج ارائه شده در مورد اثر افزایش تدریجی میزان

جدول 1 مقایسه تجربی و عددی مقادیر کار ضروری و غیر ضروری شکست

Table 1 Comparisons of experimental and numerical w_e (N/mm) and βw_p (N/mm²)

βw_p N/mm ²		w_e N/mm		ترکیب	ضخامت نمونه (mm)
Exp.	Num.	Exp.	Num.		
0.41	0.39	8.75	7.96	PMMA	0.8
0.47	0.44	77.01	68.54	10%	
3.07	2.90	96.43	83.90	15%	
5.54	5.18	122.19	105.08	20%	4
0.96	0.91	8.01	7.29	PMMA	
4.33	4.01	34.51	31.06	10%	
6.53	6.01	36.88	34.50	15%	
10.26	9.56	51.23	48.67	20%	

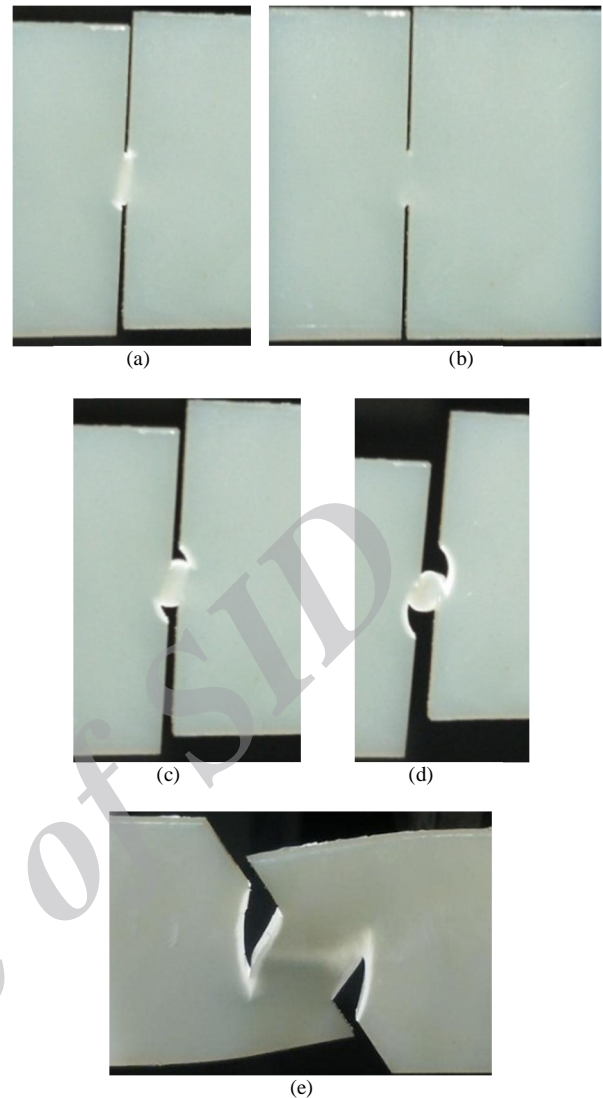


Fig. 6 Photographs of crack propagation processes for loading angle of pure mode II (a) initial stage, (b) critical stage: starting to propagate, (c) growing stage: propagate a little distance, (d) rupture stage, and (e) rupture stage for long ligament length

شکل 6 تصاویر فرایند گسترش ترک برای حالت بارگذاری مود دو خالص (a) مرحله شروع بارگذاری (b) مرحله بحرانی: شروع گسترش ترک، (c) مرحله رشد ترک: ترک کمی گسترش یافته، (d) مرحله پارگی و (e) مرحله پارگی برای حالتی که طول لیگامنت بزرگتر است (تغییر فرم نمونه در شکل کاملاً واضح است)

میلی‌متر و طول لیگامنت‌های 4، 5 و 6 میلی‌متر و نیز در ضخامت 4 میلی‌متر و طول لیگامنت‌های 12، 13، 14 و 15 میلی‌متر تغییر شکل پایدار مشخصه تغییر شکل پلاستیک را نشان می‌دهد. با این حال در همین ضخامت‌ها با طول لیگامنت‌های بزرگتر پایداری تغییر شکل همانند طول لیگامنت‌های کوتاه‌تر نیست.

3-4- تحلیل عددی

در این بخش، آزمایش‌های انجام شده به صورت عددی و با استفاده از نرم‌افزار اجزاء محدود آباکوس مورد بررسی قرار گرفته است. تطابق نتایج عددی و آزمایشگاهی امکان پیش‌بینی نتایج را برای شرایط مشابه فراهم می‌کند. در این تحلیل تأثیر ضخامت نمونه و طول ترک بر مقادیر چقرمگی شکست مورد بررسی قرار گرفته است. در تحلیل عددی سعی شده تا حداکثر شباهت در

(شکل 9-a). مکانیسم غالب تغییر شکل برای این نمونه ترکیه‌زایی می‌باشد. به دلیل بالا بودن تنش تسلیم ماده، تقریباً هیچگونه علائمی از تسلیم، تغییر شکل پلاستیک و در هم ریختگی در سطح شکست مشاهده نمی‌شود. سطح شکست مسطح و نسبتاً صاف، مشخصه شکست از نوع ترد و کاملاً ناپایدار است. افزودن 15 درصد از ذرات لاستیکی گرفت-آکریلونیتریل بوتادین استایرن اولاً تنش تسلیم ماده را کمی کاهش داده و از طرف دیگر به دلیل توزیع اتفاقی این ذرات درون ماتریس، حجم بیشتری از ماده را در فرایند تغییر شکل شرکت می‌دهد. ذرات به عنوان محل‌های تمرکز تنش درون ماتریس عمل کرده و باعث تشکیل تعداد بیشتری از ترکیه‌زایی از ماده می‌شود. از طرفی به دلیل تسلیم موضعی نواحی اطراف این ذرات، تغییر شکل پلاستیک و در هم ریختگی در سطح شکست نیز در این ترکیب و در این نواحی مشاهده می‌شود (شکل 9-b) لذا در این نوع ماده هر دو مکانیسم ترکیه‌زایی و تسلیم برشی در سطح شکست نمونه‌ها به چشم می‌خورد.

4- نتیجه‌گیری

برای ارزیابی چقرمگی شکست مود دو پلی متیل متاکریلات چقرمه شده با لاستیک، روش کار ضروری شکست با استفاده از نمونه‌های کششی دارای ترک در دو لبه مورد استفاده قرار گرفت. اثر درصد لاستیک، طول لیگامنت و ضخامت نمونه روی چقرمگی شکست مود دو با استفاده از نمونه‌های ساخته شده از طریق قالبگیری و با بهره‌گیری از یک قید و بند جدید مورد بررسی قرار گرفت. نتایج ذیل از این تحقیق به دست آمد:

- کار ویژه کلی شکست در هر دو ضخامت مختلف نمونه‌ها با افزایش درصد لاستیک افزایش یافته است.
- بیشترین مقدار کار ویژه و ضروری شکست و کار ویژه و غیر ضروری شکست در نمونه‌هایی با ضخامت 0.8 میلی‌متر به ترتیب 122.19 نیوتن بر میلی‌متر و 5.54 نیوتن بر میلی‌متر مربع و با

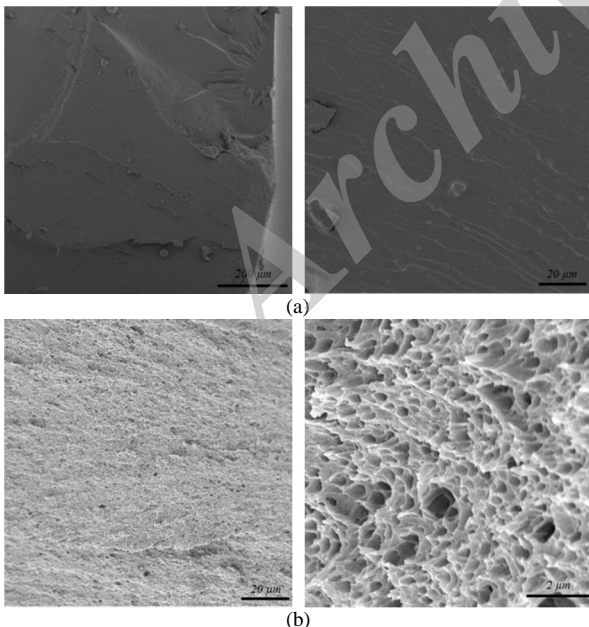


Fig. 9 SEM micrographs of fracture surface of a specimen with different magnifications and 0.8 mm specimen thickness (a) pure PMMA and (b) 15% rubber.

شکل 9 تصاویر میکروسکوپ الکترونی حاصل از ناحیه سطح شکست نمونه‌ها با بزرگنمایی‌های مختلف و ضخامت نمونه 0.8 میلی‌متر (a) پلی متیل متاکریلات خالص و (b) نمونه حاوی 15 درصد لاستیک

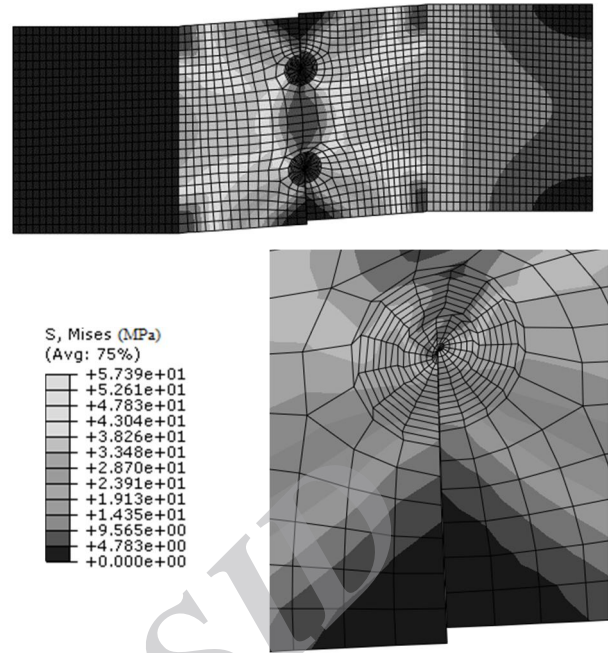
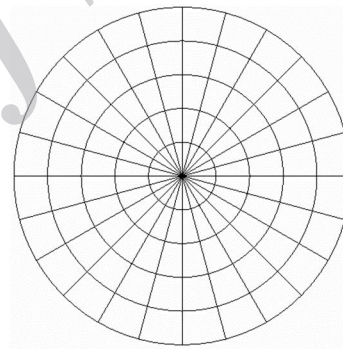
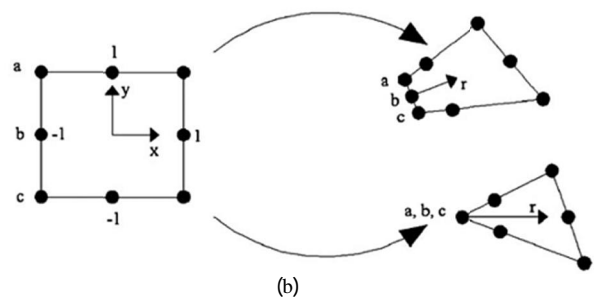


Fig. 7 Modeling and meshing of the specimen in ABAQUS

شکل 7 نمونه مدل شده در نرم افزار آباکوس و المان بندی نوک ترک پس از بارگذاری



(a)



(b)

Fig. 8 (a) Contours around the crack tip and (b) collapsed two-dimensional element

شکل 8 (a) کانطور اطراف نوک ترک و (b) المان اصلاح شده نوک ترک

لاستیک در پلی متیل متاکریلات بر پارامترهای شکست مود دو خالص و همچنین برای تعیین دقیق‌تر تغییر شکل‌های میکروسکوپی درون ماده، تعدادی از نمونه‌ها انتخاب و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی در بزرگنمایی‌های مختلف از سطوح شکست آنها تصویربرداری شد (شکل 9). همان طوری که از شکل‌ها مشاهده می‌شود، برای نمونه پلی متیل متاکریلات خالص سطوح شکست مشاهده شده معرف یک رفتار کاملاً شکننده هستند

- [5] M. R. Ayatollahi, S. Pirmohammad, Experimental determination of mode II fracture resistance in asphalt concretes, *13th International Conference on Fracture*, Beijing, China, 2013.
- [6] S. Yilmaz, T. Yilmaz, A. A. Arici, Effect of annealing process in water on the essential work of fracture response of ultra high molecular weight polyethylene, *Journal of materials science*, Vol. 46, No. 6, pp. 1758-1766, 2011.
- [7] M. M. Shokrieh, M. S. Talab, M. H. Rarani, Numerical analysis of mode I delamination growth in laminated DCB specimens using cohesive zone models, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 1, pp. 38-48, 2013. (in Persian فارسی)
- [8] 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 فارسی)
- [9] Z. Kaveh, M. R. Ayatollahi, Computation of mode I notch stress intensity factors in a V-notched TPB specimen, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 5, pp. 74-82, 2013. (in Persian فارسی)
- [10] S. Hashemi, J. Williams, Temperature dependence of essential and non-essential work of fracture parameters for polycarbonate film, *Plastics, rubber and composites*, Vol. 29, No. 6, pp. 294-302, 2000.
- [11] M. Hernández, O. O. Santana, M. N. Ichazo, J. Gonzalez, C. Albano, Fracture behavior at low strain rate of dynamically and statically vulcanized polypropylene/styrene-butadiene-styrene block copolymer blends, *Polymer Testing*, Vol. 27, No. 7, p p. 881-885, 2008.
- [12] M. Khodabandelou, M. R. Aghjeh, M. Rezaei, Fracture behavior and environmental stress cracking resistance (ESCR) of HIPS/PE blends and the effect of compatibilization on their properties, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 76, No. 18, pp. 2856-2867, 2009.
- [13] Y. W. Mai, B. Cotterell, On the essential work of ductile fracture in polymers, *International Journal of Fracture*, Vol. 32, No. 2, pp. 105-125, 1986.
- [14] A. S. Saleemi, J. A. Narin, The plane-strain essential work of fracture as a measure of the fracture toughness of ductile polymers, *Polymer Engineering Science*, Vol. 30, No. 4, pp. 211-218, 1990.
- [15] W. Y. F. Chan, J. G. Williams, Determination of the fracture toughness of polymeric films by the essential work method, *Polymer*, Vol. 35, No. 8, pp. 1666-1672, 1994.
- [16] S. Hashemi, Fracture toughness evaluation of ductile polymeric films, *Journal of Materials Science*, Vol. 32, No. 6, pp. 1563-1573, 1997.
- [17] J. Karger-Kocsis, T. Czigan, On the essential and non-essential work of fracture of biaxial-oriented filled PET film, *Polymer*, Vol. 37, No. 12, pp. 2433-2438(6), 1996.
- [18] Y. Marchal, J. Walhin, F. Delannay, Statistical procedure for improving the precision of the measurement of the essential work of fracture of thin sheets, *International Journal of Fracture*, Vol. 87, No. 2, pp. 189-199, 1997.
- [19] Y. J. Wu, Y. W. Mai, The essential fracture work concept for toughness measurement of ductile polymers, *Polymer Engineering Science*, Vol. 36, No. 18, pp. 2275-2288, 1996.
- [20] R. Hill, On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 1, No. 1, pp. 19-30, 1952.
- [21] T. Barany, J. Karger-Kocsis, In-plane fracture toughness of PET fiber-reinforced paper as a function of UV-irradiation, *Journal of Macromolecular Science, Part B*, Vol. 43, No. 3, pp. 671-683, 2004.
- [22] J. A. Brydson, *Plastics Materials*, Seventh Edition, pp. 410-415, New Delhi: Oxford, 1999.
- [23] F. Carrillo-Sánchez, G. Canche-Escamilla, P. J. Herrera-Franco, A. Brydson, A study of the fracture toughness of acrylic composites using the essential work of fracture method, *Polymer Testing*, Vol. 29, No. 5, pp. 565-571, 2010.
- [24] M. Saeedifar, M. Fotouhi, R. Mohammadi, M. A. Najafabadi, H. H. Toudeshky, Investigation of delamination and interlaminar fracture toughness assessment of Glass/Epoxy composite by acoustic emission, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 1-11, 2014. (in Persian فارسی)
- [25] H. Movahhedi Aleni, G. h. H. Liaghat, M. H. Pol, A. Afrouzian, An experimental investigation on mode-II interlaminar fracture toughness of nanosilica modified glass/epoxy, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 1-11, 2014. (in Persian فارسی)
- [26] A. E. Oskui, N. Choupani, and E. Haddadi, Experimental and numerical investigation of fracture of ABS polymeric material for different sample's thickness using a new loading device, *Polymer Engineering Science*, Vol. 54, No. 9, pp. 2086-2096, 2014.
- [27] A. Salazar, Y. Patel, Influence of crack sharpness on the fracture toughness of epoxy resins, *13th International Conference on Fracture*, Beijing, China, 2013.

ضخامت 4 میلی متر 51.231 نیوتن بر میلی متر و 10.258 نیوتن بر میلی متر مربع مربوط به نمونه 20 درصد لاستیک بوده است.

- ارزیابی کار ضروری شکست در حالت مود دو خالص در طول لیگامنت‌های بزرگتر به خصوص با افزایش درصد لاستیک به دلیل تغییر شکل نمونه‌ها قبل از گسترش ترک در حین بارگذاری نمونه‌ها امکان پذیر نبود.
- تسلیم شدگی لیگامنت در طول‌های کوتاه‌تر و درصد لاستیک کمتر به طور کامل صورت گرفت، در صورتی که این پدیده با افزایش این دو پارامتر به دلیل تغییر شکل نمونه در هنگام بارگذاری دچار مشکل شده و بررسی کار ضروری شکست را غیر ممکن می‌سازد.
- تغییر در ضخامت نمونه‌ها، تغییرات محسوسی را در مقدار کار ویژه ضروری و غیر ضروری شکست نشان داد.
- اختلاف قابل ملاحظه‌ای بین نتایج عددی و تجربی به دست آمد که می‌تواند ناشی از وجود عیوبی چون عیوب مربوط به ساخت نمونه و یا خطاهای مربوط به پارامترهای ورودی شبیه‌سازی باشد.

5- فهرست علائم

D	مقدار جابه‌جایی (mm)
L	طول لیگامنت (mm)
P	نیروی بارگذاری (kN)
t	ضخامت نمونه (mm)
W_e	کار ضروری شکست (Nmm)
w_e	کار ویژه و ضروری شکست (Nmm^{-1})
W_f	انرژی کلی شکست (Nmm)
w_f	کار ویژه و کلی شکست (Nmm^{-1})
W_p	کار غیر ضروری شکست (Nmm)
w_p	کار ویژه و غیر ضروری شکست (Nmm^{-2})
β	ضریب شکل پلاستیک
δ_f	ازدیاد طول نهایی (لحظه گسیختگی) (mm)
ε	درصد کرنش
σ	تنش (MPa)

6- مراجع

- [1] T. Backers, I. Moeck, Fault tips as favorable drilling targets for geothermal prospecting—a fracture mechanical perspective, *Proceedings World Geothermal Congress*, Melbourne, Australia, pp. 1-4, 2015.
- [2] G. R. Irwin, Onset of fast crack propagation in high strength steel and aluminium alloys, *Sagamore Research Conference Proceedings*, Naval Research Laboratory Washington D. C., pp. 289-305, 1956.
- [3] H. Kwon, P. Y. Jar, Fracture toughness of polymers in shear mode, *Polymer*, Vol. 46, No. 26, pp. 12480-12492, 2005.
- [4] J. S. Archer, A. J. Lesser, Shear band formation and mode II fracture of polymeric glasses, *Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics*, Vol. 49, No. 2, pp. 103-114, 2011.