



بررسی اثر نیروی پیش‌بار پیچ و مهره بر T-stress در مود ترکیبی شکست

تاج‌بخش نوید چاخارلو، محمدرضا اعلمی*، هادی ناصری ملکی

دانشکده فنی مهندسی مکانیک، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۶ تیر ۱۳۹۴
بازنگری: ۲۳ فروردین ۱۳۹۵
پذیرش: ۹ خرداد ۱۳۹۵
ارائه آنلاین: ۱۸ آبان ۱۳۹۵

کلمات کلیدی:

شکست مود ترکیبی
فاکتور شدت تنش
تنش T
نیروی پیش‌بار پیچ
فیکسچر آرکان

چکیده: در این مقاله، اثر نیروی پیش‌بار پیچ بر روی مقاومت شکست و فاکتور شدت تنش مؤثر و مولفه ثابت تنش ماده پلی‌متیل متاکریلات در مودهای اول، دوم و ترکیبی شکست با زوایای مختلف، به صورت تجربی-عددی بررسی شده است. آزمایش‌های شکست بر روی چهار گروه از نمونه مستطیلی دارای ترک مرکزی انجام شده است. گستره کاملی از ترکیب مودها از مود اول خالص تا مود دوم خالص با قرار دادن نمونه‌ها در یک فیکسچر آرکان اصلاح‌شده، ایجاد و نیروی شکست نمونه‌ها در شرایط بارگذاری مختلف به وسیله یک دستگاه کشش استاتیکی ثبت شده است. برای بررسی سازگاری نتایج به دست آمده با نظریه‌های شکست مود ترکیبی، شبیه‌سازی اجزای محدود آزمایش‌های عملی برای تعیین فاکتورهای شدت تنش و T-stress صورت گرفته است. نتایج به دست آمده بیانگر اثر مثبت نیروی پیش‌بار پیچ بر مقاومت شکست نمونه‌های مورد آزمایش در تمامی زوایای بارگذاری می‌باشد. نتایج، همچنین نشان‌دهنده اثر قابل توجه نیروی پیش‌بار در افزایش مقدار T-stress و نقش مهم این کمیت در توجیه شکست ترد نمونه‌ها می‌باشد.

۱- مقدمه

وجود ترک ذاتی در قطعات مکانیکی می‌تواند سبب تسریع خرابی و شکست آنها حتی در تنش‌های کمتر از استحکام تسلیم که خرابی مورد انتظار نیست، شود. ترک‌ها و شکاف‌ها ممکن است در زوایای مختلفی نسبت به راستای بارگذاری در ماده وجود داشته باشند. این امر سبب می‌شود تا رشد ترک و شکست نهایی ماده تحت مود ترکیبی شکست صورت گیرد. بنابراین بررسی عوامل مؤثر بر مقاومت ماده در برابر شکست، تحت بارگذاری مود ترکیبی از اهمیت بالایی برخوردار است.

اتصالات مکانیکی یکی از مهم‌ترین بخش‌های هر سازه هستند. اتصال با پیچ و مهره از اتصالات مهمی است که کاربرد گسترده‌ای در صنایع دارد. در این نوع اتصالات، گشتاور پیچشی اعمال شده به پیچ‌ها جهت محکم نمودن اتصال، باعث ایجاد نیروی پیش‌بار کششی در ساق پیچ می‌شود. این نیروی پیش‌بار باعث فشردن اجزای اتصال به هم می‌شود و علاوه بر ایجاد تنش فشاری در اطراف سوراخ، در اثر اعمال نیروی خارجی به اجزای اتصال باعث تحریک نیروی اصطکاک در سطوح تماس اجزا می‌گردد. در صورت وجود یا رشد تدریجی ترک در لبه سوراخ اتصال پیچ و مهره، در قطعه‌ای تحت بارگذاری، نیروی پیش‌بار و نیروی اصطکاک، باعث توزیع تنش و کرنش پیچیده در اطراف سوراخ شده و ضریب شدت تنش و مولفه ثابت تنش اطراف ترک را نیز تحت تأثیر قرار می‌دهد. کمیت T یک تنش

ثابت به موازات ترک می‌باشد که فقط ناشی از مولفه متقارن بارگذاری می‌باشد و برای بارگذاری مود دوم خالص از بین می‌رود. با این وجود در بارگذاری برشی نمونه ترک‌دار T فقط زمانی از بین می‌رود که میدان تغییر شکل کاملاً پادمقارن وجود داشته باشد که این امر در عمل به ندرت اتفاق می‌افتد و وجود T در بارگذاری برشی اغلب اجتناب‌ناپذیر است. حتی در بیشتر موارد مقدار T در برش، بسیار بیشتر از مقدار آن در کشش است. در مسائل تسلیم محدود، T-stress الاستیک به عنوان میزان محدودیت و قید در حوالی نوک ترک شناخته می‌شود [۱].

پلی‌متیل متاکریلات به این دلیل که در دمای محیط و تحت نرخ‌های بارگذاری متوسط به صورت ترد می‌شکند، یک پلیمر شناخته شده برای انجام تست‌های شکست می‌باشد. این ماده به دلیل قابلیت ماشینکاری، سادگی آماده‌سازی نمونه‌های تست و شفافیت که امکان مشاهده مستقیم ناحیه نوک ترک و مسیر رشد ترک را به وسیله روش‌های اپتیکال فراهم می‌سازد، به صورت گسترده در آزمایش‌های مطالعه شکست استفاده شده است [۲].

مطالعات متنوعی در خصوص شکست ترد مواد مهندسی تحت بارگذاری مود ترکیبی و اثر نیروی پیش‌بار بر مقاومت شکست نمونه‌ها صورت گرفته است. برای نمونه، اثر نیروی پیش‌بار پیچ بر مقاومت شکست مود ترکیبی و فاکتور شدت تنش در نمونه‌های دارای ترک لبه‌ای با طول‌های متفاوت PMMA بررسی و نشان داده شده است که نیروی پیش‌بار پیچ اثر مهمی در کاهش فاکتور شدت تنش مود ترکیبی مؤثر در تمام زوایای بارگذاری دارد

بسط سری بی‌نهایت جمله ویلیامز [۶] نوشته شود. با توجه به شکل ۲، نزدیک نوک ترک که عبارات مرتبه بالاتر بسط سری قابل چشم‌پوشی هستند، تنش‌ها برای مود ترکیبی به صورت معادلات (۱) نوشته می‌شوند.

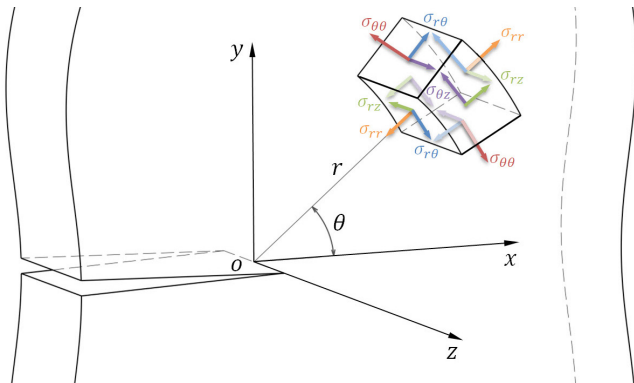


Fig. 2. Stress field around a crack tip
 شکل ۲: تنش‌های اطراف نوک ترک

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{K_I}{4} \left(5 \cos \frac{\theta}{2} - \cos \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{4} \left(-5 \sin \frac{\theta}{2} + 3 \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] + T \cos^2 \theta \\ \sigma_{\theta\theta} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{K_I}{4} \left(3 \cos \frac{\theta}{2} + \cos \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{4} \left(-3 \sin \frac{\theta}{2} - 3 \sin \frac{3\theta}{2} \right) \right] + T \sin^2 \theta \\ \sigma_{r\theta} &= \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \left[\frac{K_I}{4} \left(\sin \frac{\theta}{2} + \sin \frac{3\theta}{2} \right) + \frac{K_{II}}{4} \left(\cos \frac{\theta}{2} + 3 \cos \frac{3\theta}{2} \right) \right] - T \sin \theta \cos \theta \\ \sigma_{\theta z} &= \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2}, \quad \sigma_{rz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2}\end{aligned}\quad (1)$$

که در این دسته معادلات، K_I و K_{II} به ترتیب فاکتورهای شدت تنش مود اول، دوم و سوم و T نشان‌دهنده T -stress می‌باشد. معیار شکست، پایه اصلی ارزیابی ایمنی در مواد و قطعات ترک‌دار می‌باشد. برای یک ترک تحت بارگذاری مود ترکیبی، معیارهای شکست مختلفی به وسیله محققان، توسعه داده شده است. اردوغان و سیه [۷] معیار بیشینه تنش محیطی (بیشینه تنش مماسی یا بیشینه تنش کششی) را پیشنهاد کردند که فرض می‌کند شکست در راستایی صورت می‌گیرد که تنش محیطی که نوک ترک را احاطه می‌کند، بیشینه باشد. یعنی:

$$\left. \frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} \right|_{\theta=\theta_0} = 0 \left(\left. \frac{\partial^2 \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta^2} \right|_{\theta=\theta_0} < 0 \right) \quad (2)$$

که در این رابطه θ_0 زاویه شروع گسترش ترک می‌باشد. اسمیت و همکاران [۸] معیار بیشینه تنش کششی را برای پیش‌بینی شکست ترد در شرایط مود ترکیبی مورد بازبینی قرار دادند و معیار تعمیم‌یافته بیشینه تنش کششی را با در نظر گرفتن T -stress گسترش دادند. آنها نشان دادند که شکست ترد می‌تواند به وسیله ترکیب تنش‌های تکین که با K

و این اثر برای طول‌های ترک متفاوت تقریباً یکسان است [۳ و ۲]. مطالعات انجام شده در مورد اثر نیروی پیش‌بار در اتصالات پیچ و مهره نیز به طور کلی نشان می‌دهند که نیروی پیش‌بار باعث کاهش تمرکز تنش در اتصال بدون ترک و کاهش فاکتور شدت تنش و افزایش عمر خستگی اتصالات ترک‌خورده می‌شود [۵ و ۴].

در این مقاله برای ارزیابی اثر نیروی پیش‌بار بر پارامترهای نوک ترک در شرایط بارگذاری مود ترکیبی از چهار گروه نمونه تست مستطیلی دارای ترک مرکزی با نسبت طول ترک به عرض نمونه ۰/۵، از جنس پلی‌متیل متاکریلات استفاده می‌شود که با قرار گرفتن در فیکسچر آرکان اصلاح‌شده و با استفاده از یک دستگاه کشش استاتیکی، امکان اعمال زوایای بارگذاری مختلف و به دست آوردن مقاومت شکست نمونه‌ها در مودهای مختلف، به وجود می‌آید. در بخش بررسی عددی نیز، مدلسازی شرایط تست‌های تجربی توسط نرم‌افزار المان محدود انسیس، صورت گرفته و نتایج برای محاسبه فاکتورهای شدت تنش و مؤلفه‌های ثابت تنش در حالت‌های مختلف مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۲- شکست مود ترکیبی

مطابق شکل ۱ مودهای شکست به سه دسته اصلی تقسیم می‌شوند. مود اول یا مود بازشوندگی ترک که در آن، جابجایی لبه‌های ترک، عمود بر راستای انتشار ترک می‌باشد و دو سطح ترک به وسیله نیروهای کششی که به صورت عمود بر سطح ترک اعمال می‌شوند، از هم جدا می‌شوند، مود دوم یا مود لغزشی یا برش داخل صفحه که در آن، نیروی برشی و جابجایی لبه‌های ترک به موازات صفحه ترک و عمود بر لبه ترک می‌باشد و مود سوم یا مود پارگی یا برش خارج از صفحه که در آن، نیروی برشی به موازات صفحه و لبه ترک اعمال می‌شود. در بین موارد بالا شکست در مودهای اول و دوم خالص و مود ترکیبی اول و دوم بیشتر اتفاق می‌افتد.

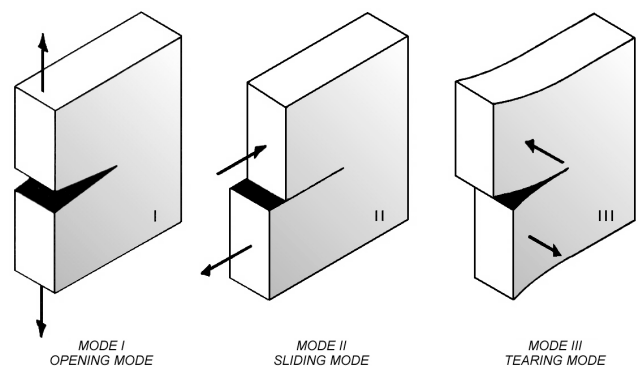


Fig. 1. The three fracture modes

شکل ۱: مودهای اصلی شکست

تنش‌های الاستیک خطی داخل صفحه در حوالی نوک ترک می‌تواند به صورت میدان‌های متقارن و پادمقارن که به ترتیب مود اول و مود دوم نامیده می‌شوند، توصیف شود. تنش‌ها برای هر میدان می‌تواند به صورت

با توجه به سرعت و دقت بالا و تolerانس مناسب، کلیه مراحل برش ورق به ابعاد مناسب، ایجاد سوراخ‌های لازم و حتی ایجاد ترک اولیه در نمونه‌ها توسط لیزر صنعتی انجام شده است. برش به وسیله لیزر یک روش قابل تکرار می‌باشد و می‌تواند با کمترین آسیب در نوک ترک، طول ترک مورد نظر را با سرعت و دقت بالا ایجاد کند. تحقیقات سالازار و همکاران [۱۰ و ۹] نشان می‌دهد که برش لیزر روش مناسبی جهت ایجاد ترک اولیه در نمونه‌های پلیمری می‌باشد.

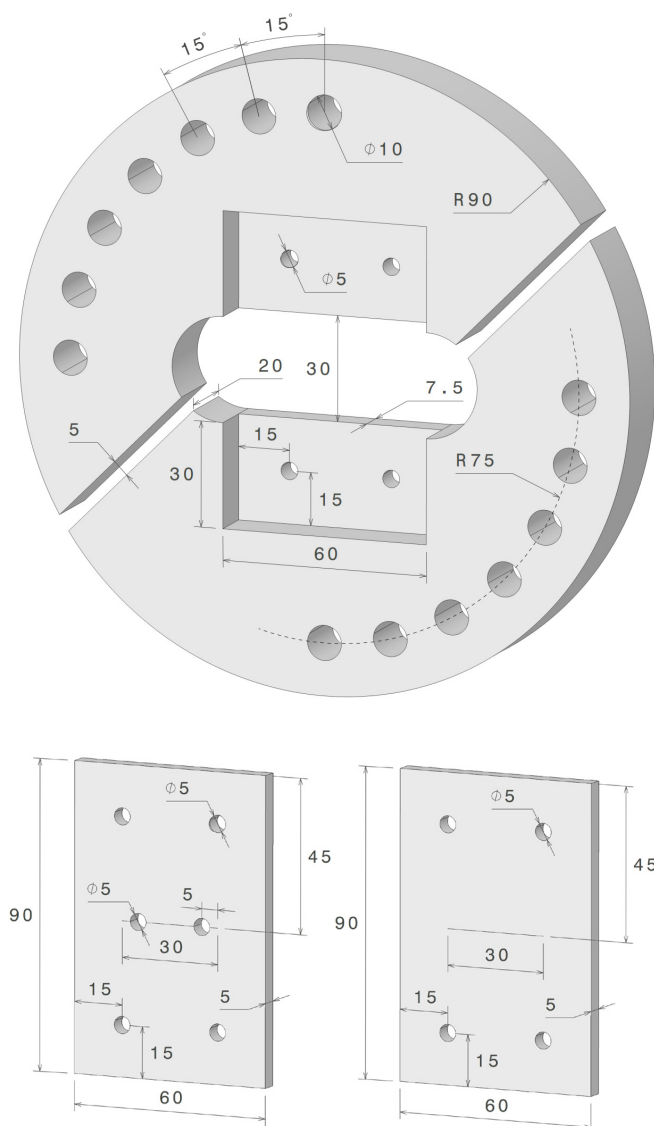


Fig. 3. The geometry and dimensions of modified Arcan fixture and test specimens in millimeter

شکل ۳: شکل و ابعاد فیکسچر آرکان اصلاح شده و نمونه‌های مورد استفاده (ابعاد به میلی‌متر)

پیچ مورد استفاده جهت ایجاد نیروی پیش‌بار باید دارای استحکام بالا باشد تا رزوه‌های آن در اثر باز و بسته شدن تغییر شکل پلاستیک ندهند، بنابراین در آزمایش‌ها از پیچ شش گوش متریک M5×0.8 گرید ۱۲/۹

مشخص می‌شود و تنش ناتکین T کنترل شود. در این معیار برای شروع ترک در مواد الاستیک خطی از این مفهوم استفاده می‌شود که رشد ترک در مود یک وقتی آغاز می‌شود که تنش مماسی $\sigma_{\theta\theta}$ در یک شعاع بحرانی r_c که در بسیاری از مواد ترد با شعاع ناحیه فرآیند شکست تقریب زده می‌شود، در جلوی نوک ترک به یک مقدار بحرانی $(\sigma_{\theta\theta})_c$ برسد. پارامترهای r_c و $(\sigma_{\theta\theta})_c$ جزو خواص ماده هستند که فرض می‌شود که مستقل از هندسه نمونه و شرایط بارگذاری باشند. با توجه به روابط (۱) و (۲) معیار بیشینه تنش کششی تعمیم‌یافته با معادلات زیر معرفی می‌شود:

$$[K_I \sin \theta_0 + K_{II} (3 \cos \theta_0 - 1)] - \frac{16}{3} T \sqrt{2\pi r_c} \sin \frac{\theta_0}{2} \cos \theta_0 = 0 \quad (3)$$

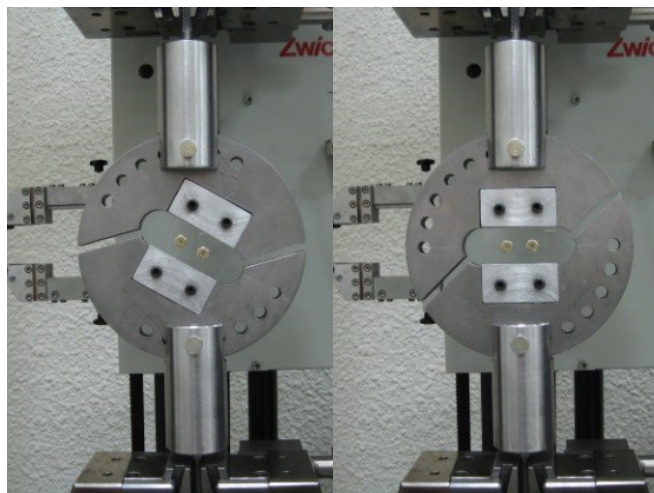
$$\cos \frac{\theta_0}{2} \left[K_I \cos^2 \frac{\theta_0}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta_0 \right] = K_{IC} - T \sqrt{2\pi r_c} \sin^2 \theta_0 \quad (4)$$

شرایط وجود و روش حل شکل بسته معادلات (۳) و (۴) به طور مفصل در مطالعه اسمیت و همکاران [۸] توضیح داده شده است. نتایج آنها نشان می‌دهد که T -stress اثر مهمی بر چقرمگی شکست مود دوم دارد و چقرمگی شکست در مود ترکیبی برای مقادیر منفی T افزایش و برای مقادیر مثبت آن کاهش پیدا می‌کند.

۳- آزمایش‌های تجربی

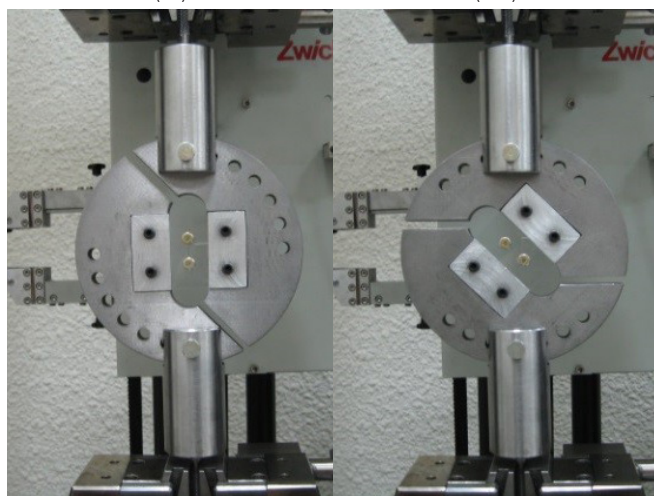
برای انجام تست‌های شکست در مود اول، دوم و موده‌های ترکیبی از فیکسچر آرکان اصلاح شده استفاده شده است. فیکسچر آرکان مورد استفاده از ورق فولادی دارای مقاومت بالای CK45 به ضخامت ۲۰ میلی‌متر طوری ساخته شده است که نمونه شکست به ضخامت ۵ میلی‌متر می‌تواند در وسط آن قرار بگیرد. برای محدود کردن حرکت نمونه در راستای عمق فیکسچر و در جای خود نگاه داشتن آن، دو صفحه فلزی به ابعاد ۶۰×۳۰×۷/۵ میلی‌متر به نمونه و فیکسچر پیچ می‌شوند. سوراخ‌هایی به قطر ۱۰ میلی‌متر با زاویه ۱۵° نسبت به هم برای اعمال بار در زوایای مختلف نزدیک لبه فیکسچر ایجاد شده‌اند.

نمونه‌های مورد استفاده برای تست، نمونه‌های مستطیلی دارای ترک مرکزی به طول ۳۰ میلی‌متر می‌باشند که در گروهی از آنها، جهت بستن پیچ و مهره و اعمال نیروی پیش‌بار، سوراخ‌هایی به قطر ۵ میلی‌متر که مرکز آن در فاصله ۵ میلی‌متر از نوک ترک واقع است، در طرفین ترک، ایجاد شده است. فاصله مرکز سوراخ از نوک ترک طوری انتخاب شده است که پس از بسته شدن پیچ و مهره، لبه واشر به قطر خارجی ۱۰ میلی‌متر، در حالت مماس بر نوک ترک، قرار گیرد. چهار گروه نمونه، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند که عبارتند از نمونه دارای ترک مرکزی ساده، نمونه دارای ترک مرکزی با سوراخ‌هایی در نزدیکی نوک ترک و نمونه‌های دارای ترک مرکزی با پیچ‌های سفت شده با دو نوع گشتاور ۳/۵ و ۷ نیوتن‌متر. طرح کلی و ابعاد فیکسچر و نمونه‌های استفاده شده در شکل ۳ قابل مشاهده است.



(ب)

(الف)



(د)

(ج)

Fig. 5. Mixed mode fracture tests under different loading conditions
(a) 0° (b) 30° (c) 45° (d) 90°

شکل ۵: نحوه انجام تست در زوایای بارگذاری مختلف
(الف) صفر درجه (ب) ۳۰° (ج) ۴۵° (د) ۹۰°

ضخامت آنها، فقط نصف فیکسچر و نمونه‌ها مدل شده اند. علاوه بر آن، با توجه به خواص مکانیکی تقریباً یکسان پیچ و واشر، مدل واشر و پیچ به صورت یک تکه و واشر به عنوان قسمتی از سر پیچ، فرض شده است. این فرض باعث حذف المانهای تماسی اضافی بین پیچ و واشر شده و بدون آنکه تأثیری بر توزیع تنش‌ها، نتایج و کلیت مسئله داشته باشد، موجب کاهش زمان تحلیل می‌گردد. خواص مکانیکی مواد مورد استفاده نیز از آزمایش‌های عملی تعیین و مطابق جدول ۱ اعمال شده‌اند.

برای مش‌بندی فیکسچر و پیچ‌ها از المان SOLID 185 استفاده شده است. این المان برای مدل‌سازی سه بعدی سازه‌های حجمی استفاده می‌شود و به وسیله ۸ گره که هر یک دارای سه درجه آزادی جابجایی در راستاهای x و y و z می‌باشد، تعریف می‌شود [۱۲]. درمورد نمونه‌ها با توجه به رفتار تکین نوک ترک، باید المانی انتخاب شود که قابلیت مدل‌سازی این حالت را داشته باشد. به همین دلیل از المان SOLID 186 برای مش‌بندی نمونه‌ها

استفاده شده است. در شکل ۴ جزئیات هندسی پیچ و نحوه قرارگیری یکی از پیچ‌ها بر روی نمونه نشان داده شده است.

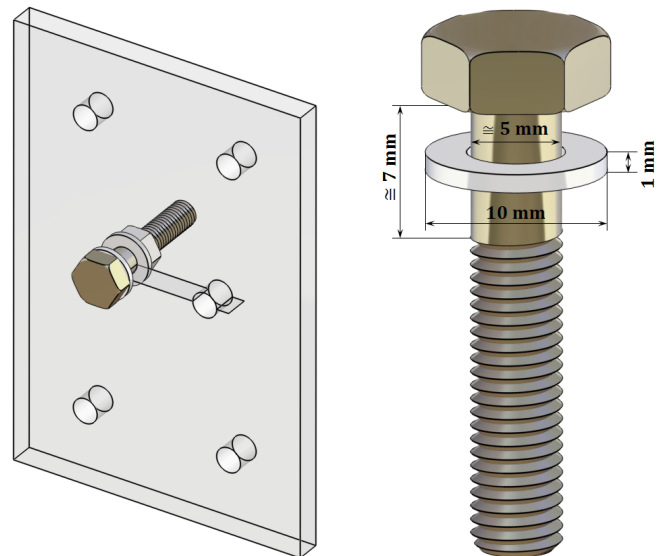


Fig. 4. The geometry details of the bolt and hole

شکل ۴: جزئیات هندسی پیچ و سوراخ

همانگونه که در شکل ۴ قابل ملاحظه می‌باشد، به منظور اینکه هیچ رزوه‌ای از پیچ داخل سوراخ نمونه قرار نگیرد، از پیچ‌هایی با قسمت بدون رزوه به طول تقریبی ۷ میلی‌متر استفاده شده است و به کمک واشرهایی به ضخامت ۱ میلی‌متر در دو طرف نمونه شرایط اعمال نیروی پیش‌بار فراهم شده است. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهند که در اثر اعمال گشتاورهای مورد نظر، تغییر شکل پلاستیک قابل ملاحظه‌ای در رزوه پیچ‌ها و سایر اجزای اتصال مشاهده نمی‌شود. جهت اعمال گشتاورهای مورد نظر برای بستن پیچ‌ها نیز از آچار گشتاورسنج با دقت مناسب بهره گرفته شده است.

پس از قرارگیری و محکم شدن نمونه در داخل فیکسچر، فیکسچر به وسیله دو پین، بر اساس زاویه بارگذاری مورد نظر، به یک رابط قرار گرفته بین فک‌های دستگاه کشش، متصل شده و بارگذاری با سرعت ۰/۱ کیلو نیوتن بر ثانیه [۲] تا شکست نهایی نمونه، ادامه می‌یابد. دستگاه کشش مورد استفاده، دستگاه تست کشش استاتیکی Zwick/Roell با ظرفیت کشش ۱۰۰ کیلو نیوتن می‌باشد که قابلیت بارگذاری با سرعت‌های متفاوت را دارد. برای مثال در شکل ۵ چگونگی انجام آزمایش در چهار زاویه بارگذاری مختلف نشان داده شده است.

۴- روش عددی

برای بررسی و شبیه‌سازی دقیق شرایط تست‌های تجربی، فیکسچر آرکان اصلاح‌شده، نمونه‌های آزمایش و پیچ‌ها به صورت سه‌بعدی و با رعایت کامل جزئیات، مدل‌سازی شده‌اند. به منظور سادگی و افزایش سرعت تحلیل، با توجه به تقارن فیکسچر و نمونه‌ها نسبت به صفحه گذرنده از وسط

جدول ۱: خواص مکانیکی مواد مورد استفاده

Table 1. Mechanical properties of materials

اجزا	مدول الاستیسیته (گیگاپاسکال)	ضریب پواسون
فیکسچر آرکان	۲۰۱	۰/۳
نمونه PMMA	۲/۶۵	۰/۳۵
پیچ‌ها و واشرها	۲۰۷	۰/۳

استفاده شده است. این المان یک المان سه بعدی مرتبه بالاست که رفتار جابجایی درجه دوم از خود نشان می‌دهد. این المان به وسیله ۲۰ گره (۳ گره در هر لبه) که هر یک دارای سه درجه آزادی جابجایی در راستاهای x ، y و z می‌باشد، تعریف می‌شود [۱۲]. با توجه به اینکه این المان دارای گره میانی بین گره‌های گوشه‌ای است، قابلیت تبدیل شدن به المان منفرد که برای مدلسازی ترک و محاسبه فاکتور شدت تنش در نوک ترک، مناسب می‌باشد را دارد. برای شبیه‌سازی تماس و انتقال فشار بین اجزای مختلف مانند تماس بین نمونه و فیکسچر، تماس بین سر پیچ و سطح نمونه و سایر تماس‌ها از المان‌های TARGE 170 و CONTA 174 استفاده شده است. به دلیل سازگاری المان‌های TARGE 170 و CONTA 174 اثر اصطکاک بین سر پیچ و نمونه نیز توسط مدل اصطکاک الاستیک کولمب با تعریف ضریب اصطکاک ایستایی ۰/۱ [۲] که به وسیله آزمایش زیر تعیین شده است، شبیه‌سازی شده است. در این آزمایش، یک نمونه مستطیلی بدون ترک با یک سوراخ در مرکز، از طول به دو بخش تقسیم می‌شود. دو بخش کنار هم قرار داده شده و پیچ با گشتاور مشخصی بسته می‌شود. نمونه داخل فیکسچر قرار داده شده و کشیده می‌شود. نیروی شروع جدایش دو قسمت به منزله نیروی اصطکاک آستانه حرکت می‌باشد و با مشخص بودن نیروی پیش‌بار در آن گشتاور مشخص، ضریب اصطکاک ایستایی قابل تعیین است. مقدار به دست آمده از تکرار این آزمایش برای ضریب اصطکاک ایستایی در حدود ۰/۱ می‌باشد. برای دقت بیشتر و استفاده بهینه از المان‌ها سعی شده است تا کلیه شبکه‌بندی‌ها مطابق شکل ۶ به صورت دستی و با استفاده از المان‌های ۶ وجهی انجام گیرد.

۵- نتایج

نتایج به دست آمده از انجام آزمایش شکست در زوایای مختلف بارگذاری در شکل ۷ نشان داده شده است. در این شکل، تغییرات نیروی شکست میانگین حاصل از ۳ بار تکرار هر آزمایش، در برابر زاویه بارگذاری نمونه‌ها رسم شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، وجود نیروی پیش‌بار تأثیر مثبتی بر مقاومت شکست نمونه‌ها دارد و این تأثیر برای زوایایی که مود اول غالب است، بیشتر است.

با در نظر گرفتن نتایج نمونه‌های دارای ترک مرکزی ساده، مقادیر ۱/۰۱ و ۰/۸۷ به ترتیب برای فاکتور شدت تنش بحرانی مود اول (K_{IC}) یا

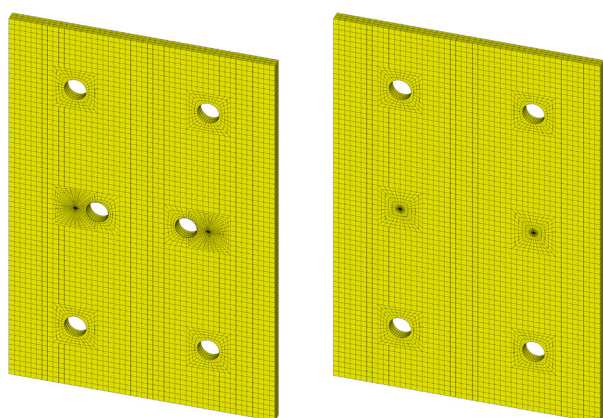
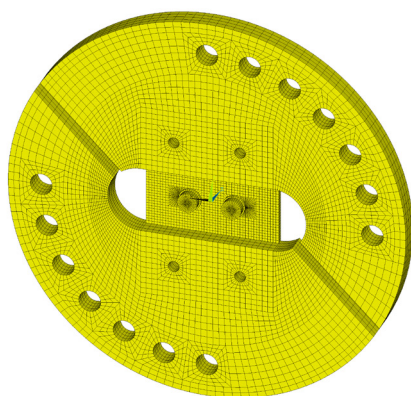


Fig. 6. FE mesh of fixture, specimens and bolts (1/2 symmetry)

شکل ۶: نحوه مش‌بندی فیکسچر، نمونه‌ها و پیچ‌ها (نصف مدل)

(K_{IC}) و فاکتور شدت تنش بحرانی مود دوم (K_{IIC} یا K_{2C}) به دست می‌آیند. در مورد نمونه‌های دارای ترک مرکزی با سوراخ این مقادیر به ترتیب ۰/۹۵ و ۰/۷۵ می‌باشند. در نمونه‌های دارای ترک مرکزی با پیچ‌های سفت شده با گشتاورهای ۳/۵ و ۷ نیوتن‌متر نیز به ترتیب مقادیر ۰/۷۵ و ۰/۷۶ برای فاکتور شدت تنش بحرانی مود اول به دست می‌آید ولی فاکتور شدت تنش مود دوم بحرانی در این حالات عدد بزرگتری می‌باشد.

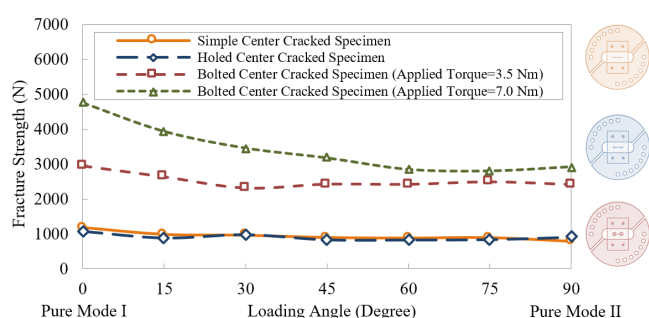


Fig. 7. Variation of fracture strength with loading angle

شکل ۷: مقاومت شکست نمونه‌ها در زوایای مختلف بارگذاری

مقدار T -stress مطابق روش ارائه شده در تحقیقات قبلی [۱] با استفاده از نتایج تحلیل اجزای محدود قابل محاسبه می‌باشد. مقدار این کمیت به شدت به نحوه مش‌بندی و اندازه المان‌های ناحیه اطراف نوک ترک وابسته

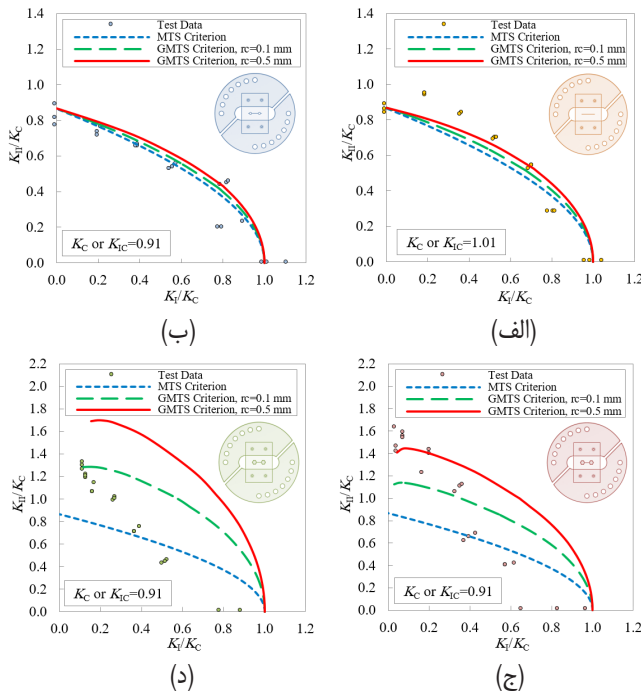


Fig. 9. GMTS curve for complete mode mixtures

(a) simple specimens (b) holed specimens

(c) bolted specimens (3.5 N.m) (d) bolted specimens (7.0 N.m)

شکل ۹: منحنی‌های شکست (الف) نمونه‌های دارای ترک مرکزی ساده (ب) نمونه‌های دارای ترک مرکزی با سوراخ (ج) نمونه‌های دارای ترک مرکزی با پیچ‌های سفت شده با گشتاور ۵/۳ نیوتن‌متر (د) نمونه‌های دارای ترک مرکزی با پیچ‌های سفت شده با گشتاور ۷ نیوتن‌متر

۶- نتیجه‌گیری

نتایج آزمایش‌های عملی نشان می‌دهد که وجود نیروی پیش‌بار پیچ باعث افزایش مقاومت شکست نمونه‌ها در تمام زوایای بارگذاری مود ترکیبی می‌شود و تأثیر افزایش گشتاور سفت‌کننده پیچ بر مقاومت شکست نمونه‌ها در زوایای بارگذاری با مود یک غالب قابل توجه‌تر می‌باشد.

با در نظر گرفتن نتایج هر سری از نمونه‌ها مقادیر متفاوتی برای چقرمگی شکست ماده مورد آزمایش به دست می‌آید که این مقدار برای نمونه‌های دارای پیچ، کوچکتر از مقدار آن برای نمونه‌های بدون پیچ می‌باشد.

بررسی‌های عددی ثابت می‌کنند که نیروی پیش‌بار پیچ اثر مهمی در کاهش فاکتورهای شدت تنش مود یک و مود دو در تمام زوایای بارگذاری دارد. نمونه‌های بدون سوراخ و نمونه‌های دارای سوراخ بدون پیچ با وجود اینکه فاکتور شدت تنش مود اول تقریباً یکسانی دارند، در مورد فاکتور شدت تنش مود دوم اختلاف قابل ملاحظه‌ای دارند.

وجود پیچ و نیروی پیش‌بار آن سبب افزایش مقادیر T -stress در تمام زوایای بارگذاری می‌شود. مقدار T -stress در بارگذاری مود دوم نمونه‌های بدون پیچ تقریباً برابر صفر می‌باشد که این موضوع نشان‌دهنده میدان تغییر شکل کاملاً پادمتقارن ایجاد شده به وسیله فیکسچر آرکان در بارگذاری برشی نمونه‌ها می‌باشد. با افزایش زاویه بارگذاری نیز، اختلاف بین مقادیر

است و در فواصل مختلف از نوک ترک، متفاوت است.

در شکل ۸ نمودار تغییرات T -stress مربوط به نیروی شکست نمونه‌ها نسبت به زاویه بارگذاری برای نمونه‌های مختلف رسم شده است.

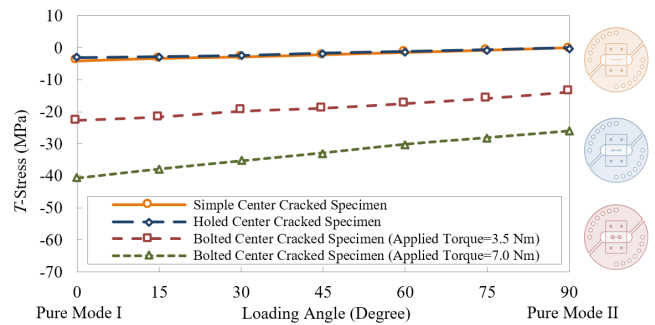


Fig. 8. Variation of T -stress with loading angle

شکل ۸: تغییرات T -stress متناظر با نیروی شکست نمونه‌ها نسبت به زاویه بارگذاری

نمودار شکل ۸ بیانگر آن است که نیروی پیش‌بار باعث افزایش مقادیر T -stress در تمام زوایای بارگذاری می‌شود و افزایش زاویه بارگذاری باعث کاهش مقدار آن خواهد شد و با توجه به علامت منفی آنها و اینکه T -stress منفی باعث افزایش مقاومت شکست در بارگذاری مود ترکیبی می‌شود، وجود نیروی پیش‌بار از این نظر نیز مفید خواهد بود.

به وسیله معیار تعمیم‌یافته بیشینه تنش کششی (GMTS) [۸] می‌توان دیاگرام‌های شکست را برای هر گروه از نمونه‌ها با در نظر گرفتن پارامتر T -stress رسم کرد. با توجه به تغییر مقادیر T -stress در زوایای مختلف بارگذاری باید این تغییر در دیاگرام‌های شکست نیز منعکس شود. با توجه به وابسته بودن معیار تعمیم‌یافته بیشینه تنش کششی به شعاع بحرانی لازم است مقداری برای آن در نظر گرفته شود. در بسیاری از مطالعات صورت گرفته در گذشته [۱۳]، شعاع بحرانی برای ماده PMMA، مقدار ۰/۱ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. با این وجود برخی نیز مقدار ۰/۵ میلی‌متر را توصیه می‌کنند. بنابراین در شکل ۹، منحنی‌های شکست پیش‌بینی شده توسط معیار GMTS برای نمونه‌های مختلف به ازای دو شعاع بحرانی ۰/۱ و ۰/۵ به همراه منحنی معیار بیشینه تنش کششی (MTS) که به ازای $T=0$ به دست می‌آید و همچنین داده‌های تست‌های تجربی رسم شده‌اند. عدم تطابق بین داده‌های تجربی و منحنی‌های شکست معیارها در نمونه‌های دارای نیروی پیش‌بار می‌تواند به تحت تأثیر قرار گرفتن حالت تنش و در نتیجه چقرمگی شکست به دست آمده و یا حتی سایر پارامترها از جمله شعاع بحرانی در اثر اعمال نیروی پیش‌بار، نزدیک نوک ترک مربوط باشد. مورد دیگر قابل ذکر آن است که بررسی تحقیقات گذشته در مورد تنش T نشان می‌دهد که این کمیت علاوه بر اثر مهمی که بر فاکتور شدت تنش مود دوم دارد و این اثر به طور کمی توسط معیار بیشینه تنش کششی تعمیم‌یافته تا حدود زیادی قابل توجه می‌باشد، بر فاکتور شدت تنش مود اول نیز دارای تأثیر می‌باشد [۸] که این اثر در معیار نامبرده در نظر گرفته نمی‌شود.

the fatigue strength of bolted joints, *Engineering Failure Analysis*, 13(8) (2006) 1410-1421.

- [5] H.E.M. Sallam, A.E.A. El-Sisi, E.B. Matar, O.M. El-Hussieny, Effect of clamping force and friction coefficient on stress intensity factor of cracked lapped joints, *Engineering Failure Analysis*, 18(6) (2011) 1550-1558.
- [6] M. Williams, The bending stress distribution at the base of a stationary crack, *J Appl Mech*, 24 (1957) 109-114.
- [7] F. Erdogan, G. Sih, On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear, *Journal of basic engineering*, 85(4) (1963) 519-527.
- [8] D. Smith, M. Ayatollahi, M. Pavier, The role of T -stress in brittle fracture for linear elastic materials under mixed-mode loading, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 24(2) (2001) 137-150.
- [9] A. Salazar, J. Rodr?guez, A. Segovia, A.B. Mart?nez, Influence of the notch sharpening technique on the fracture toughness of bulk ethylene-propylene block copolymers, *Polymer Testing*, 29(1) (2010) 49-59.
- [10] A. Salazar, A. Segovia, A.B. Mart?nez, J. Rodr?guez, The role of notching damage on the fracture parameters of ethylene-propylene block copolymers, *Polymer Testing*, 29(7) (2010) 824-831.
- [11] D. ASTM, 638-02: "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics" - *Annual Book of ASTM Standards*, in, Philadelphia, 2002.
- [12] A.M. APDL, *Mechanical applications Theory reference*, ANSYS Release, 13 (2010).
- [13] M.R.M. Aliha, M.R. Ayatollahi, Geometry effects on fracture behaviour of polymethyl methacrylate, *Materials Science and Engineering: A*, 527(3) (2010) 526-530.

T -stress در نیروهای اعمالی مختلف کاهش پیدا می کند.

مقایسه منحنی های شکست پیش بینی شده و نتایج به دست آمده نشان می دهد که اختلاف قابل ملاحظه ای بین نتایج تجربی و نتایج عددی برای نمونه های دارای پیچ مشاهده می شود که می تواند ناشی از اثر نیروی پیش بار و T -stress بر چقرمگی شکست مود اول باشد. همچنین ملاحظه می شود که بین منحنی معیار بیشینه تنش کششی و نتایج تجربی اختلاف زیادی به خصوص در نمونه های دارای پیچ که مقدار T -stress بزرگتر است، وجود دارد و معیار بیشینه تنش کششی تعمیم یافته با در نظر گرفتن T -stress، پیش بینی بهتری برای شروع شکست و زاویه شکست در نمونه ها ارائه می دهد. به طور کلی می توان گفت T -stress اثر بسیار مهمی بر رفتار شکست نمونه ها دارد و در نظر گرفتن آن همراه با فاکتور شدت تنش به عنوان پارامترهای نوک ترک، ضروری به نظر می رسد.

منابع

- [1] M. Ayatollahi, M. Pavier, D. Smith, Determination of T -stress from finite element analysis for mode I and mixed mode I/II loading, *International journal of fracture*, 91(3) (1998) 283-298.
- [2] T.N. Chakherlou, H.N. Maleki, B. Abazadeh, A.B. Aghdam, Investigating bolt clamping force effect on the mixed mode fracture strength and stress intensity factor for an edge crack in PMMA specimens, *Materials Science and Engineering: A*, 533 (2012) 71-81.
- [3] T.N. Chakherlou, H.N. Maleki, A.B. Aghdam, B. Abazadeh, Effect of bolt clamping force on the fracture strength of mixed mode fracture in an edge crack with different sizes: Experimental and numerical investigations, *Materials & Design*, 45 (2013) 430-439.
- [4] J.M. M?nguez, J. Vogwell, Effect of torque tightening on

Please cite this article using:

T.N. Chakherlou, M.R. Aalami, H.N. Maleki, "Investigation of Bolt Clamping Force Effect on T-stress in Mixed Mode Fracture" *Amirkabir J. Mech. Eng.*, 49(2) (2017) 291-298.
DOI: 10.22060/mej.2016.760

برای ارجاع به این مقاله از عبارت زیر استفاده کنید:



