

مطالعه شکست ترد در قطعات گرافیتی دارای شیار کلیدی شکل تحت بارگذاری مرکب I/II

علیرضا ترابی^۱، ابراهیم پیرهادی^۲

آزمایشگاه تحقیقاتی شکست، گروه مهندسی هوافضا، دانشکده علوم و فنون نوین دانشگاه تهران

چکیده

در این تحقیق، از دو معیار تنش متوسط و حداکثر تنش محیطی شیار برای پیش بینی چقرمگی شکست شیار در قطعات گرافیتی دارای شیار کلیدی شکل، تحت بارگذاری مرکب I/II استفاده شده است. به کمک این معیارها، ظرفیت تحمل بار نمونه های آزمایشگاهی دارای شیار کلیدی شکل از جنس گرافیت- گزارش شده توسط سایر محققین- پیش بینی می شود. نشان داده می شود که ظرفیت تحمل بار پیش بینی شده برای نمونه های گرافیتی دارای شیار کلیدی شکل، تطابق بسیار خوبی با مقادیر تجربی دارد.

واژه های کلیدی: گرافیت- شیار کلیدی شکل- معیار حداکثر تنش محیطی- معیار تنش متوسط- بارگذاری مرکب I/II

مقدمه

گرافیت در قطعات مهندسی به روش فشار سرد استاتیکی ساخته شده و در اغلب موارد، ساختاری همگن با خواص یکسان حرارتی و الکتریکی دارد. گرافیت یکی از پرکاربردترین مواد در صنایع مختلف، مانند صنایع نیروگاهی (از جمله نیروگاه های هسته ای)، صنایع تولید فولاد و ذوب فلزات و صنایع هوافضا بوده و در صنعت به شکل های گوناگون از جمله الکترودهای گرافیتی، قطعه های نسوز و مقاوم در برابر حرارت و غیره به کار برده می شود. این ماده به دلیل تحمل دماهای بالا، بیشتر به عنوان ماده نسوز به کار برده می شود. گرچه گرافیت در درجه اول به عنوان یک ماده مقاوم در برابر حرارت مطرح می باشد، لیکن، در کاربردهای عملی، علاوه بر بارهای حرارتی، همزمان تحت بارهای مکانیکی نیز قرار می گیرد. مروری بر خواص مکانیکی گرافیت از جمله استحکام کششی آن نشان می دهد که برخلاف مقاومت حرارتی مطلوب، این ماده در برابر بارهای مکانیکی بسیار ضعیف می باشد. در کاربردهای صنعتی، بسته به شرایط حاکم بر طراحی قطعه گرافیتی، معمولاً شیارهایی به شکل های مختلف در قطعه ایجاد می شود [۱]. برخلاف ترک ها که عموماً به صورت ناخواسته در قطعات و سازه های مهندسی ایجاد می شوند، شیارها توسط طراح و برای تامین مقاصد طراحی مورد استفاده قرار می گیرند. شیارها نقش متمرکز کننده تنش را داشته و ظرفیت تحمل بار قطعه شیاردار را به شدت کاهش می دهند. چنانچه قطعه شیاردار از جنس یک ماده ترد (مانند گرافیت) ساخته شده باشد، شروع ترک مقارن با شکست ناگهانی قطعه خواهد بود، چرا که مرحله رشد ترک در این مواد با سرعت سرسام آوری انجام می پذیرد. بنابراین، جلوگیری از وقوع شکست ناگهانی در قطعات گرافیتی دارای شیار از اهمیت بسیاری برخوردار است.

اولین تحقیق در رابطه با بررسی شکست ترد در قطعات گرافیتی دارای شیار V شکل، توسط آیت الهی و ترابی انجام گرفت [۲]. ایشان ابتدا، آزمایش های شکست را بر روی سه نمونه آزمایشگاهی دارای شیار V شکل نوک گرد و ساخته

شده از گرافیت پلی کریستال، تحت بارگذاری مد I خالص انجام داده و چقرمگی شکست نمونه ها را به روش تجربی اندازه گیری نمودند [۲]. سپس، معیار شکست تنش متوسط برای پیش بینی نتایج تجربی حاصل از آزمایش های شکست قطعات گرافیتی مورد استفاده قرار گرفت. نشان داده شد که تطابق بسیار خوبی مابین نتایج تئوری و تجربی وجود دارد [۲]. آیت الهی و ترابی [۳] در پژوهش دیگری، به بررسی تجربی و تئوری شکست قطعات گرافیتی دارای شیار V شکل، تحت بارگذاری مد ترکیبی I/II پرداختند که در این تحقیق، از معیار حداکثر تنش محیطی (MTS) برای پیش بینی نتایج تجربی استفاده شده است. در تحقیق دیگری، آیت الهی و همکاران [۴] از معیار شکست چگالی انرژی کرنشی (SED) برای پیش بینی نتایج آزمایش های شکست گزارش شده در [۳] استفاده نموده و نشان دادند که معیار SED نیز مانند معیار MTS از دقت خوبی برخوردار است. در رابطه با تحقیقات انجام شده بر روی شکست ترد قطعات گرافیتی دارای شیار U شکل، می توان به مقاله Berto و همکاران [۴] اشاره نمود. ایشان ابتدا، با استفاده از نمونه های آزمایشگاهی کششی دارای شیار مرکزی U شکل، ساخته شده از گرافیت پلی کریستال، آزمایش های شکست را در دمای اتاق و تحت بارگذاری مد I خالص و مد ترکیبی I/II انجام داده و بار شکست نمونه ها و زاویه شروع شکست در آنها را ثبت نمودند. سپس، معیار شکست SED برای پیش بینی نتایج تجربی مورد استفاده قرار گرفته و دقت خوب معیار نشان داده شد [۴]. از معایب عمده تحقیقات ایشان می توان به پیچیدگی فرمولاسیون معیار SED و وابستگی مستقیم فرآیند پیش بینی چقرمگی شکست و زاویه شروع شکست به نتایج تحلیل های اجزای محدود اشاره نمود.

به عنوان جدیدترین تحقیق در این حوزه، ترابی و همکاران [۵] با استفاده از نتایج تجربی حاصل از شکست نمونه های دیسک برزیلی با شیار مرکزی U شکل ساخته شده از گرافیت پلی کریستال، تحت بارگذاری مرکب I/II، صحت اعتبار دو معیار تنش متوسط و حداکثر تنش محیطی را ارزیابی نمودند. تحقیقات ایشان، بر روی سی و شش نمونه آزمایشگاهی به ازای مقادیر مختلف شعاع نوک شیار (۰.۵، ۱، ۲، ۴ میلیمتر) و تحت بارگذاری مد I خالص صورت گرفته است. مقایسه نتایج تجربی حاصل از آزمایش های شکست و نتایج تئوری، حاکی از دقت بالای دو معیار ذکر شده می باشد.

در رابطه با شکست ترد در شیارهای کلیدی شکل، می توان به مقاله Berto و همکاران [۶] اشاره نمود. ایشان در این تحقیق که بر روی قطعات گرافیتی دارای شیار کلیدی شکل انجام گرفته است، از معیار SED برای پیش بینی نتایج تجربی استفاده کرده اند. در پژوهش ایشان، آزمایش های شکست بر روی شصت نمونه مختلف آزمایشگاهی دارای شیار کلیدی شکل از جنس گرافیت تحت بارگذاری مد I خالص و مد ترکیبی I/II انجام شده است [۶].

۱- استادیار، ۰۰۲۱-۶۱۱۱۸۵۷۲، a_torabi@ut.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد

$$(\sigma_{\theta\theta})_c = \frac{K_I^{key}}{2\sqrt{2\pi r_{c,k}}} \left\{ \cos \frac{\theta_0}{2} [A] + \cos \frac{3\theta_0}{2} [B] \right\} - \frac{K_{II}^{key}}{2\sqrt{2\pi r_{c,k}}} \left\{ \sin \frac{\theta_0}{2} [A] + \sin \frac{3\theta_0}{2} [C] \right\} \quad (4)$$

ضرایب A, B, C به منظور ساده سازی در روابط به کار برده شده اند. هرکدام از این ضرایب به صورت تابعی از شعاع نوک شیار کلیدی شکل و فاصله بحرانی از نوک شیار می باشند که در مرجع [5] ارائه شده اند.

با اعمال شرایط شکست تحت شرایط مد I خالص، مطابق رابطه (5)، می توان به مقدار $(\sigma_{\theta\theta})_c$ دست یافت.

$$\begin{cases} K_{II}^{key} = 0 \\ K_I^{key} = K_{Ic}^{key} \\ \theta_0 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

شروط ذکر شده در بالا بیانگر این واقعیات هستند که شکست در قطعه شیاردار هنگامی رخ می دهد که میزان ضریب شدت تنش شیار در حالت مد I خالص به مقدار بحرانی خود برسد. همچنین در این شرایط، به دلیل تقارن در هندسه و بارگذاری، زاویه شروع شکست برابر با صفر در نظر گرفته می شود. این شرط موجب می گردد که میزان ضریب شدت تنش شیار در حالت مد II خالص برابر با صفر شود. با قراردادن رابطه (5) در رابطه (4)، مقدار بحرانی تنش محیطی حاصل می شود:

$$(\sigma_{\theta\theta})_c = \frac{K_{Ic}^{key}}{2\sqrt{2\pi r_{c,k}}} (A + B) \quad (6)$$

با مساوی قراردادن روابط (4) و (6) و حذف عبارات مشترک، رابطه زیر بدست می آید:

$$(A + B) = \frac{K_I^{key}}{K_{Ic}^{key}} \left\{ A \cos \frac{\theta_0}{2} + B \cos \frac{3\theta_0}{2} \right\} - \frac{K_{II}^{key}}{K_{Ic}^{key}} \left\{ A \sin \frac{\theta_0}{2} + C \sin \frac{3\theta_0}{2} \right\} \quad (7)$$

با تقسیم طرفین رابطه (7) به عبارت K_{Ic}^{key} (چقرمگی شکست مد I شیار کلیدی شکل)، رابطه حاصل به همراه رابطه (7) تشکیل یک دستگاه معادلات جبری را می دهند که با حل آن به ازای مقادیر مختلف زاویه شروع شکست، منحنی های شکست معیار حداکثر تنش محیطی شیار حاصل می شود. فرآیند مشابهی در مرجع [3] برای شیارهای V شکل ارائه شده است که برای مطالعه بیشتر توصیه می شود.

با معلوم بودن مقادیر K_{Ic}^{key} (از آزمایش های شکست مد I) و $(\sigma_{\theta\theta})_c$ (استحکام کششی ماده)، می توان به کمک رابطه (6) مقدار فاصله بحرانی را محاسبه نمود. لازم به ذکر است که سمت راست رابطه (8) نیز شامل عباراتی بر حسب $r_{c,k}$ می باشد.

$$r_{c,k} = \frac{1}{8\pi} \left(\frac{K_{Ic}^{key}}{(\sigma_{\theta\theta})_c} \right)^2 (A + B)^2 \quad (8)$$

معیار تنش متوسط شیار

معیار تنش متوسط شیار همانند معیار حداکثر تنش محیطی است، با این تفاوت که مقدار متوسط تنش بر روی فاصله بحرانی از نوک شیار به عنوان پارامتر تعیین کننده شکست مطرح می شود، نه مقدار تنش در یک نقطه خاص (فاصله بحرانی). رابطه تنش متوسط بر روی فاصله بحرانی به صورت زیر نوشته می شود [5]:

$$\frac{1}{d_c} \int_{r=\rho}^{r=d_{c,k}} \sigma_{\theta\theta} dr = (\sigma_{\theta\theta})_c \quad (9)$$

در پژوهش حاضر، از نتایج تجربی گزارش شده توسط Bertó و همکاران [6] برای ارزیابی اعتبار دو معیار تنش متوسط و حداکثر تنش محیطی شیار استفاده شده و دقت بسیار خوب دو معیار نشان داده می شود.

معیارهای شکست ترد

معیار حداکثر تنش محیطی شیار

معیار حداکثر تنش محیطی شیار (MTS) به خوبی شناخته شده و برای بررسی شکست ترد در قطعات حاوی شیار V شکل و U شکل، تحت بارگذاری ترکیبی مورد استفاده قرار می گیرد. بر اساس این معیار، شکست ترد زمانی رخ می دهد که تنش محیطی در فاصله بحرانی r_c از نوک شیار، به مقدار بحرانی خود $(\sigma_{\theta\theta})_c$ برسد. مطالعات انجام شده بر روی مواد مهندسی مختلف نشان می دهد که پارامترهای r_c و $(\sigma_{\theta\theta})_c$ جزء خواص ماده فرض شده و مستقل از نوع بارگذاری در نظر گرفته می شوند. بنابر الزامات معیار MTS میزان تنش محیطی باید حداکثر شود. بنابراین داریم:

$$\frac{\partial \sigma_{\theta\theta}}{\partial \theta} = 0 \longrightarrow \theta = \theta_0 \quad (1)$$

توزیع تنش در اطراف شیار V شکل نوک گرد، اولین بار توسط Filippi و همکاران [7] ارائه شده است. با در نظر گرفتن زاویه دهانه صفر درجه، روابط برای شیار U شکل اصلاح می گردد. اخیراً، تحقیق دیگری توسط Lazzarin و همکاران [8] انجام شده است که در آن، توزیع تنش در اطراف شیار V شکل با سوراخ انتهایی استخراج گردیده است (شکل 1 را ببینید). در این تحقیق نیز با در نظر گرفتن زاویه دهانه صفر درجه، روابط توزیع تنش برای شیار کلیدی شکل استخراج شده است. توزیع تنش محیطی الاستیک در اطراف شیار کلیدی شکل عبارتست از [8]:

$$\begin{aligned} \sigma_{\theta\theta} = & \frac{K_I^{key}}{2\sqrt{2\pi r}} \left\{ \cos \frac{\theta}{2} \left[\frac{3}{2} + \left(\frac{\rho}{r}\right) + \frac{3}{2} \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \right] + \cos \frac{3\theta}{2} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{4} \left(\frac{\rho}{r}\right) + \frac{5}{4} \left(\frac{\rho}{r}\right)^3 \right] \right\} \\ & + \frac{K_{II}^{key}}{2\sqrt{2\pi r}} \left\{ \sin \frac{\theta}{2} \left[\frac{3}{2} + \left(\frac{\rho}{r}\right) + \frac{3}{2} \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \right] + \sin \frac{3\theta}{2} \left[\frac{3}{2} + \frac{3}{4} \left(\frac{\rho}{r}\right) + \frac{15}{4} \left(\frac{\rho}{r}\right)^3 \right] \right\} \end{aligned} \quad (2)$$

در رابطه بالا، K_{II}^{key} و K_I^{key} به ترتیب، ضرایب شدت تنش شیار کلیدی شکل برای شرایط بارگذاری مد I و مد II بوده و ρ شعاع نوک شیار می باشد. پارامترهای r و θ نیز، مولفه های مختصات قطبی شیار کلیدی شکل می باشند که این مختصات در مرکز دایره نوک شیار قرار می گیرد.

با قراردادن رابطه (2) در رابطه (1)، رابطه زیر حاصل می شود:

$$\begin{aligned} -\frac{K_I^{key}}{2\sqrt{2\pi r}} \left\{ \sin \frac{\theta_0}{2} \left[\frac{3}{4} + \frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{r}\right) + \frac{3}{4} \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \right] + \sin \frac{3\theta_0}{2} \left[\frac{3}{4} + \frac{3}{8} \left(\frac{\rho}{r}\right) + \frac{15}{8} \left(\frac{\rho}{r}\right)^3 \right] \right\} \\ + \frac{K_{II}^{key}}{2\sqrt{2\pi r}} \left\{ \cos \frac{\theta_0}{2} \left[\frac{3}{4} + \frac{1}{2} \left(\frac{\rho}{r}\right) + \frac{3}{4} \left(\frac{\rho}{r}\right)^2 \right] + \cos \frac{3\theta_0}{2} \left[\frac{9}{4} + \frac{9}{8} \left(\frac{\rho}{r}\right) + \frac{45}{8} \left(\frac{\rho}{r}\right)^3 \right] \right\} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

دانستن این نکته نیز ضروری است که شکست هنگامی رخ می دهد که میزان تنش محیطی در فاصله بحرانی از شیار کلیدی شکل، به مقدار بحرانی خود برسد. یعنی: $(\sigma_{\theta\theta})_c = \sigma_{\theta\theta}$. در این شرایط نیز، متغیر r به مقدار بحرانی خود یعنی $r_{c,k}$ تبدیل می گردد. حال شرایط ذکر شده بر روی رابطه (2) اعمال می شود. در نهایت، رابطه زیر را خواهیم داشت:

این زاویه، اثرات بارگذاری مد II نیز ظاهر شده و شرایط بارگذاری مرکب I/II حاکم خواهد بود.

جدول ۱: خواص مکانیکی گرافیت مورد مطالعه [۶]

Material property	Value
Elastic modulus, E (GPa)	8.05
Poisson's ratio, ν	0.2
Ultimate tensile strength (MPa)	46
Fracture toughness ($MPa m^{0.5}$)	1.0
Density (kg/m^3)	1710

جدول ۲ مقادیر بدست آمده برای چقرمگی شکست مد I شیار و همچنین فواصل بحرانی از نوک شیار کلیدی شکل، برای دو معیار تئوری را ارائه می دهد. این مقادیر برای نمونه های گرافیتی مورد مطالعه معتبر می باشند.

جدول ۲: چقرمگی شکست مد I شیار و فواصل بحرانی از نوک شیار کلیدی شکل

Notch radius (mm)	K_{Ic}^{key} ($MPa \sqrt{m}$)	d_c (mm)	$r_{c,k}$ (mm)
0.25	1.1385	0.544	0.530
0.5	1.2720	0.757	0.970
1	1.3419	0.98	1.810
2	1.9164	2.99	3.381
4	2.3773	3.309	6.399

از آنجا که منحنی های شکست به دست آمده، بر حسب ضرایب شدت تنش شیار استوار می باشند، به منظور مقایسه نتایج تئوری با نتایج تجربی، ضروری است که مقادیر بار شکست نمونه های گرافیتی گزارش شده در مرجع [۶] به مقادیر متناظر ضرایب شدت تنش شیار بحرانی تبدیل شوند. برای این منظور، می توان از روش اجزای محدود و محاسبه توزیع تنش در اطراف شیار استفاده نمود که جزئیات این فرآیند در مرجع [۳] برای شیارهای V شکل ارائه شده است. بدیهی است که روند مشابهی را می توان برای شیارهای کلیدی شکل دنبال نمود. روابط بسته مربوط به مقادیر ضرایب شدت تنش شیار کلیدی شکل را نیز می توان از مرجع [۸] اخذ کرده و استفاده نمود.

شکل ۶ منحنی های شکست مربوط به دو معیار تئوری حداکثر تنش محیطی شیار و تنش متوسط شیار را به همراه داده های تجربی برداشت شده از مرجع [۶] نشان می دهد. همانطور که ملاحظه می شود، نمودارهای (a)، (b)، (c)، (d) و (e) به ترتیب مربوط به شعاع های نوک شیار ۰.۲۵، ۰.۵، ۱، ۲ و ۴ میلیمتر می باشند. در هر نمودار دو منحنی ترسیم گردیده است. منحنی توپر نشان دهنده معیار حداکثر تنش محیطی شیار بوده و منحنی نشان داده شده با نقطه چین، بیانگر پیش بینی معیار تنش متوسط شیار می باشد. مقادیر تجربی نیز، به ازای زوایای مختلف بارگذاری (۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) به صورت پراکنده در صفحه ترسیم شده اند. طبق نمودارهای بدست آمده، معیار حداکثر تنش محیطی شیار، پیش بینی های محافظه کارانه تری نسبت به معیار تنش متوسط شیار دارد.

در حالت کلی و با نگاهی اجمالی به تمامی نمودارها، به این نکته مهم می توان پی برد، که هر دو معیار حداکثر تنش محیطی و معیار تنش متوسط شیار، مقادیر بدست آمده از آزمایش را به خوبی پوشش می دهند. بدین معنی که میزان خطای کلی در هر دو معیار، از دیدگاه مهندسی، در حد بسیار خوب می باشد (جزئیات

در رابطه بالا، پارامترهای $d_{c,k}$ و d_c فواصل بحرانی شیار برای معیار تنش متوسط می باشند که به ترتیب از مبدا مختصات و نوک شیار اندازه گیری می شوند (شکل ۲ را ببینید). با قرار دادن رابطه (۲) در رابطه (۹) داریم:

$$\frac{K_I^{key}}{2d_c \sqrt{2\pi}} \left\{ \cos \frac{\theta_0}{2} \left[3A - \frac{2\rho}{A} - \frac{\rho^2}{A^3} \right] + \cos \frac{3\theta_0}{2} \left[A - \frac{\rho}{2A} - \frac{\rho^3}{2A^5} \right] \right\} + \frac{K_{II}^{key}}{2d_c \sqrt{2\pi}} \left\{ \sin \frac{\theta_0}{2} \left[3A - \frac{2\rho}{A} - \frac{\rho^2}{A^3} \right] + \sin \frac{3\theta_0}{2} \left[2A - \frac{\rho}{A} - \frac{\rho^3}{A^5} \right] \right\} = (\sigma_{\theta\theta})_c \quad (10)$$

به منظور خلاصه سازی روابط، پارامتر $(A = \sqrt{d_{c,k} - \rho})$ تعریف می شود. رابطه (۱۰) در شرایط شکست مد I خالص به صورت زیر نوشته می شود:

$$\frac{K_{Ic}^{key}}{2d_c \sqrt{2\pi}} \left\{ \left[3A - \frac{2\rho}{A} - \frac{\rho^2}{A^3} \right] + \left[A - \frac{\rho}{2A} - \frac{\rho^3}{2A^5} \right] \right\} = (\sigma_{\theta\theta})_c \quad (11)$$

با اعمال شرط حداکثر میزان تنش متوسط (گرفتن مشتق از عبارت سمت چپ رابطه (۱۰) نسبت به زاویه شروع شکست) داریم (مشابه با رابطه (۳)):

$$-\frac{K_I^{key}}{2d_c \sqrt{2\pi}} \left\{ \frac{1}{2} \sin \frac{\theta_0}{2} \left[3A - \frac{2\rho}{A} - \frac{\rho^2}{A^3} \right] + \frac{3}{2} \sin \frac{3\theta_0}{2} \left[A - \frac{\rho}{2A} - \frac{\rho^3}{2A^5} \right] \right\} + \frac{K_{II}^{key}}{2d_c \sqrt{2\pi}} \left\{ \frac{1}{2} \cos \frac{\theta_0}{2} \left[3A - \frac{2\rho}{A} - \frac{\rho^2}{A^3} \right] + \frac{3}{2} \cos \frac{3\theta_0}{2} \left[2A - \frac{\rho}{A} - \frac{\rho^3}{A^5} \right] \right\} = 0 \quad (12)$$

چنانچه رابطه (۱۱) در رابطه (۱۰) جایگذاری شده و طرفین روابط (۱۰) و (۱۲) به عبارت K_{Ic}^{key} (چقرمگی شکست مد I شیار کلیدی شکل) تقسیم شوند، می توان به طور مشابه با معیار حداکثر تنش محیطی، دستگاه حاصل را برای زوایای مختلف شروع شکست حل نموده و منحنی های شکست معیار تنش متوسط را نیز بر حسب $\frac{K_I^{key}}{K_{Ic}^{key}}$ و $\frac{K_{II}^{key}}{K_{Ic}^{key}}$ ترسیم نمود. با معلوم بودن مقادیر K_{Ic}^{key} (از آزمایش های شکست مد I) و $(\sigma_{\theta\theta})_c$ (استحکام کششی ماده)، می توان به کمک رابطه (۶) مقدار فاصله بحرانی d_c را محاسبه نموده و در ترسیم منحنی ها استفاده نمود.

مطالعات تجربی شکست (گزارش شده در سایر مراجع)

در بخش قبل، با استفاده از نتایج تجربی بدست آمده از تحقیق انجام شده توسط Berto و همکاران [۶] (همین بخش) و همچنین دانستن خواص مکانیکی گرافیت مورد مطالعه، نمودارهای شکست ترسیم شدند. همانطور که پیشتر ذکر شد، آزمایش های شکست انجام شده توسط ایشان بر روی نمونه های گرافیتی مستطیل شکل دارای شیار کلیدی شکل، تحت بارگذاری مد I خالص و مد ترکیبی I/II بوده است. آزمایش ها به ازای مقادیر مختلف شعاع نوک شیار برابر ۰.۲۵، ۰.۵، ۱، ۲ و ۴ میلیمتر انجام شده و بارگذاری در زوایای مختلف ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه (زاویه بین راستای بارگذاری و راستای شیار) انجام گرفته است (شکل های ۳ تا ۵ را ببینید). خواص مکانیکی گرافیت مورد مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است [۶]. نحوه اعمال بار به صفحات گرافیتی دارای شیار کلیدی شکل به صورت کششی بوده و بار شکست حاصل از نمونه ها ثبت شده است (شکل ۵ را ببینید). توجه به این نکته مهم ضروری است که به ازای زاویه β برابر با صفر (شکل ۵)، شرایط شکست مد I خالص حاکم بوده و با افزایش

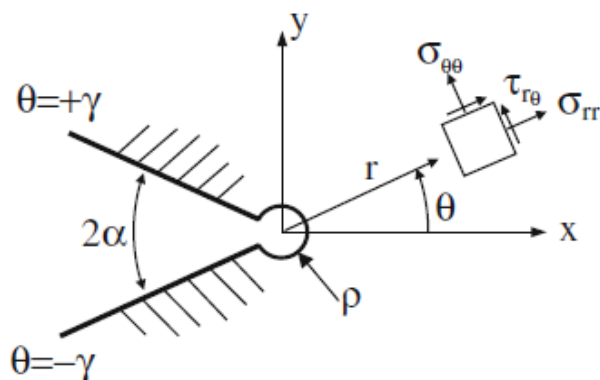
نتیجه گیری

۱- مقایسه کلی بین نتایج تئوری و تجربی، به خوبی بیانگر این واقعیت می باشد که هر دو معیار حداکثر تنش محیطی و تنش متوسط شیار، برای قطعات گرافیتی دارای شیار کلیدی شکل تحت بارگذاری ترکیبی I/II ، پیش بینی خوبی ارائه می دهند.

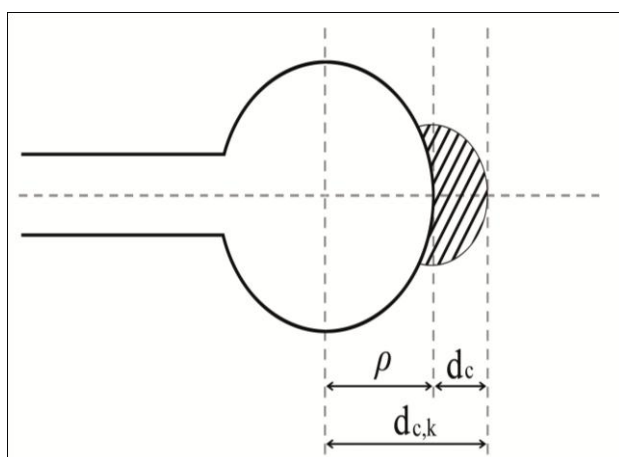
۲- با افزایش شعاع نوک شیار و بزرگ شدن دایره نوک شیار کلیدی شکل، اثر هندسه دایره بر اثر هندسه قسمت لوبیایی شکل غلبه کرده و لذا، نتایج تجربی از نتایج معیار حداکثر تنش محیطی شیار فاصله می گیرد.

۳- در مورد شیارهای کلیدی شکل، به ازای شعاع های نوک شیار کوچک، استفاده از معیار حداکثر تنش محیطی شیار و برای شعاع های بزرگ، استفاده از معیار تنش متوسط شیار توصیه می گردد.

شکل ها و نمودارها



شکل ۱- شیار V شکل حفره دار به همراه دستگاه مختصات قطبی



شکل ۲- فواصل بحرانی از نوک شیار

مربوط به دقت معیارها در بخش بعد به صورت کمی ارائه می شود). نکته قابل توجه دیگر، تمایل مقادیر آزمایشگاهی به دو معیار حداکثر تنش محیطی و تنش متوسط شیار، در شعاع های مختلف نوک شیار می باشد. بدین معنی که در مقادیر شعاع نوک شیار ۰.۲۵ و ۰.۵ میلیمتر، مقادیر تجربی بیشتر به معیار حداکثر تنش محیطی شیار نزدیک می باشند، ولی با افزایش شعاع نوک شیار، مقادیر تجربی به تدریج از معیار حداکثر تنش محیطی شیار فاصله گرفته و به معیار تنش متوسط شیار میل پیدا می کنند. دلیل این پدیده را می توان بدین صورت تفسیر نمود که در شعاع های نوک شیار کوچک، رفتار شکست قطعه شیاردار تحت تاثیر قسمت لوبیایی شکل شیار می باشد. در این حالت، می توان شیار کلیدی شکل را با دقت خوبی با یک شیار U شکل تقریب زد. بیشتر در مرجع [۹]، دقت بالای معیار حداکثر تنش محیطی شیار برای شیارهای U شکل نشان داده شده است. با افزایش شعاع نوک شیار و بزرگ شدن دایره نوک شیار کلیدی شکل، اثر هندسه دایره بر اثر قسمت لوبیایی شکل غلبه کرده و لذا، انتظار می رود که نتایج تجربی از نتایج معیار حداکثر تنش محیطی شیار فاصله بگیرد.

نتایج و بحث

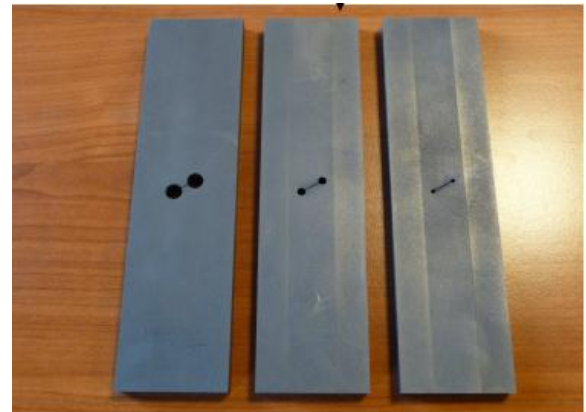
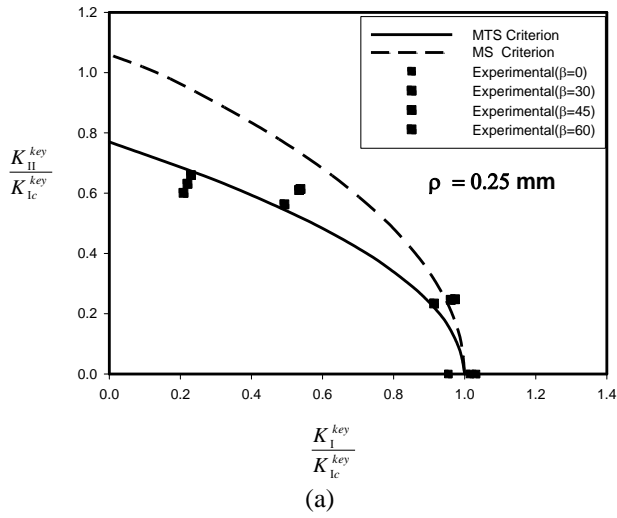
در این بخش، نیاز است که علاوه بر تحلیل کیفی نمودارها، از لحاظ عددی نیز، هر دو معیار حداکثر تنش محیطی و معیار تنش متوسط شیار ارزیابی شوند. این ارزیابی به منظور استفاده هر چه بهتر طراحان و مهندسين، در کاربردهای مهندسی مورد نیاز می باشد.

جدول ۳ به عنوان میانگین کلی از خطاهای هر کدام از دو معیار مورد مطالعه، در زوایای بارگذاری متفاوت (صفر، ۳۰، ۴۵ و ۶۰) و در شعاع های مختلف نوک شیار کلیدی شکل، ارائه می شود.

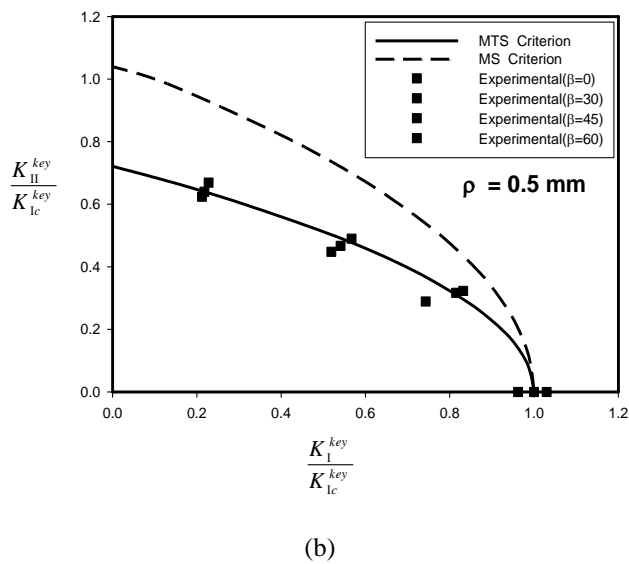
جدول ۳: میانگین کلی خطاهای دو معیار مورد مطالعه، در زوایای بارگذاری β متفاوت (صفر، ۳۰، ۴۵ و ۶۰) و شعاع های مختلف نوک شیار

Loading Angle (deg.)	0	30	45	60
Key-MTS Criterion Mean discrepancy (8.1%)	0%	7.8%	12.1%	12.6%
Key-MS Criterion Mean discrepancy (6.4%)	0%	4%	10.2%	11.5%

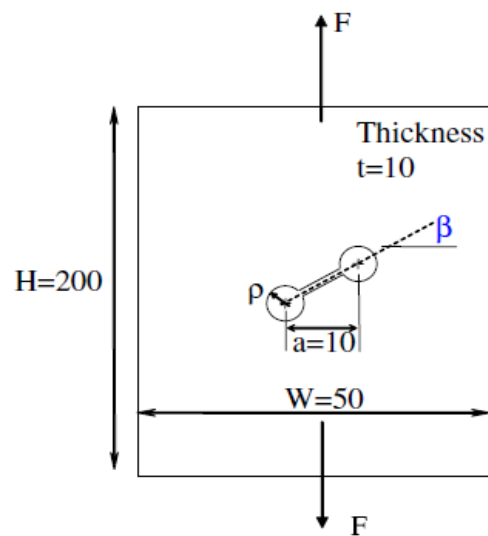
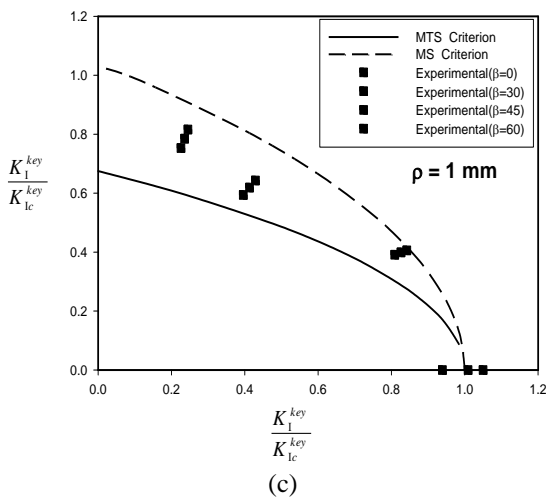
همانطور که ملاحظه می شود، درصد خطای هر دو معیار از دیدگاه مهندسی در حد بسیار مطلوبی بوده و نشان دهنده کارایی دو معیار مورد مطالعه، در مورد پیش بینی شکست ترد قطعات دارای شیار کلیدی شکل، تحت بارگذاری مرکب می باشد. در پایان می توان چنین توصیه نمود که در مورد شیارهای کلیدی شکل، به ازای شعاع های نوک شیار کوچک، استفاده از معیار حداکثر تنش محیطی شیار و برای شعاع های بزرگ، استفاده از معیار تنش متوسط شیار توصیه می گردد. البته، این توصیه در حد نتایج حاصل از این پژوهش برای گرافیت پلی کریستال انجام شده و برای سایر مواد مهندسی، می بایست مطالعات مشابهی انجام گیرد.



شکل ۳- صفحات گرافیتی دارای شیار کلیدی شکل (زاویه ۳۰ درجه) [۶]



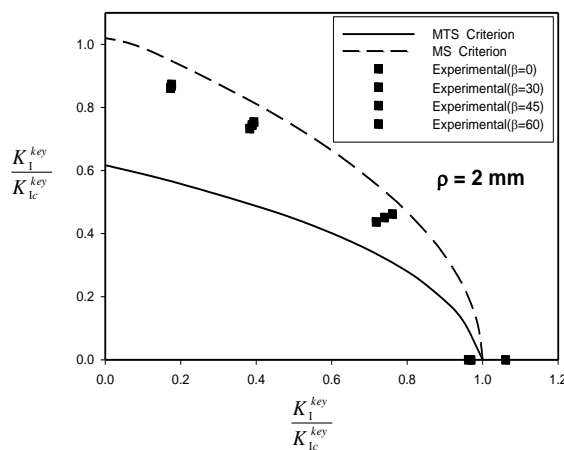
شکل ۴- صفحات گرافیتی دارای شیار کلیدی شکل (زاویه ۶۰ درجه) [۶]



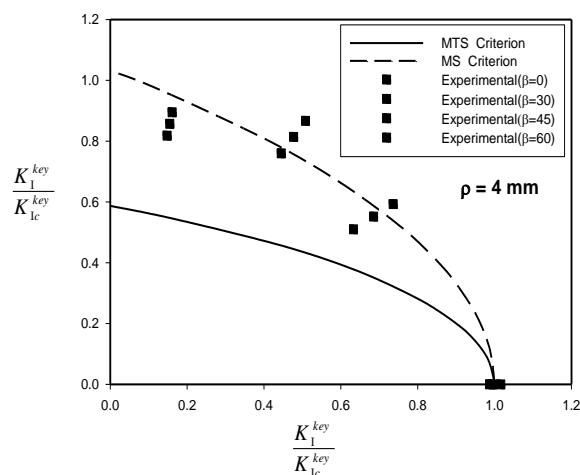
شکل ۵- نحوه اعمال بار به صفحات گرافیتی به همراه هندسه صفحه و شیار [۶]

shaped notch. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 111, 2013, pp. 77–85.

- [6] Lazzarin P., Berto F. and Ayatollahi M.R., Brittle Fracture of inclined key-hole notches in isostatic graphite under in-plane mixed mode loading. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, v. 36, no. 9, 2013, pp. 942–955.
- [7] Filippi S., Lazzarin P. and Tovo R., Developments of some explicit formulas useful to describe elastic stress fields ahead of notches in plates. *International Journal of Solids and Structures*, v. 39, 2002, pp. 4543–4565.
- [8] Zappalorto M. and Lazzarin P., In-plane and out-of-plane stress field solutions for V-notches with end holes. *International Journal of Fracture*, v. 168, 2011, pp. 167–180.
- [9] Ayatollahi M.R. and Torabi A.R., A criterion for brittle fracture in U-notched components under mixed mode loading. *Engineering Fracture Mechanics*, v. 76, 2009, pp. 1883–1896.



(d)



(e)

شکل ۶- منحنی های شکست مربوط به دو معیار تئوری حداکثر تنش محیطی شیار و تنش متوسط شیار به همراه داده های تجربی برداشت شده از مرجع [۶]

مراجع

- [1] Torabi A.R., Brittle fracture in V and U-shaped notches under mixed mode I/II loading. Ph.D. Thesis, 2009, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
- [2] Ayatollahi M.R. and Torabi A.R., Tensile fracture in notched polycrystalline graphite specimens. *Carbon*, v. 48, 2010, pp. 2255–2265.
- [3] Ayatollahi M.R. and Torabi A.R., Failure assessment of notched polycrystalline graphite under tensile-shear loading. *Materials Science and Engineering A*, v. 528, 2011, pp. 5685–5695.
- [4] Ayatollahi M.R., Berto F. and Lazzarin P., Mixed mode brittle fracture of sharp and blunt V-notches in polycrystalline graphite. *Carbon*, v. 49, 2011, pp. 2465–2474.
- [5] Torabi A.R., Fakoor M. and Pirhadi E., Tensile fracture in coarse-grained polycrystalline graphite weakened by a U-