

تعیین چقرمگی شکست یک نوع سنگ مرمریت با استفاده از یک قطعه آزمایشگاهی اصلاح شده

حامد تقفی*

ایران و دانشگاه علم و صنعت ایران
h_saghafi@mecheng.iust.ac.ir

مجید رضا آیت اللهی

ایران و دانشگاه علم و صنعت ایران
m.ayat@iust.ac.ir

خلاصه مقاله

در این مقاله روش تست جدیدی برای تعیین چقرمگی شکست مواد سنگی در مود II خالص و مود ترکیبی I/II ارائه می گردد. این روش که با عنوان ASCB شناخته می شود روش اصلاح شده ای از روش تست با قطعه SCB است که مزایای بیشتری نسبت به آن دارا می باشد. برای بررسی عملکرد این روش اصلاح شده، چقرمگی شکست سنگ مرمر نیریز در مود های مختلف شکست توسط آن تعیین می گردد. سپس نتایج بدست آمده از طریق آزمایشگاهی با نتایج پیش بینی شده به وسیله معیار MTS مقایسه می شود. مشاهدات نشان می دهد که نتایج حاصل از این دو روش مطابقت خوبی با هم ندارند. که جهت رفع این اختلاف پیشنهاد می شود که مدل ریاضی دقیق تری از معیار MTS به کار گرفته شود.

ABSTRACT

In this research, a new test specimen is introduced for determining the mode II, and mixed I/II fracture toughness of rocks. This specimen is named asymmetrically loaded semi-circle (ASCB) which is a modified version of the classical semi-circular bend (SCB) specimen and has practically its own advantages relative to SCB. To evaluate this new modified specimen, the fracture toughness of "Neiriz" marble is obtained for different mode mixities. Then, the results obtained from the experimental tests are compared with what anticipated by the MTS criterion. Observations show that the results obtained from these methods are not in good agreement. It is suggested to use a more accurate mathematical model of the MTS criterion for improving the theoretical results.

کلمات کلیدی: شکست ترد، مواد سنگی، قطعه تست، مود II خالص، معیار MTS.

مقدمه

از منظر زمین شناسی سنگها دارای خواص فیزیکی، مکانیکی و شیمیایی متنوعی هستند که در فرآیندهای متوالی زمین شناسی بوجود آمده اند. وجود در نظر گرفتن تاثیر این ناپیوستگی ها بسیار مهم است. در عملیات حفاری و برش سنگها که اصولا بر مبنای یک مکانیزم رشد ترک در توده های سنگی استوار است، خواص مکانیکی بستر حفاری و از جمله رفتار رشد ترک و شکست لایه ها و توده های مختلف سنگها، نقش تعیین کننده ای در برنامه ریزی و اجرای این عملیات دارد. به عنوان مثال ماشین آلات حفاری را بر اساس جنس و نوع سنگ های موجود در منطقه حفاری انتخاب می کنند. ماشین آلاتی که برای حفاری در بستر های سخت و محکم استفاده می شوند دارای مشخصات خاصی هستند که ماشین آلات مورد استفاده در مکان های دیگر نیازمند داشتن آن خصوصیات نمی باشند. بنابراین، مطالعه بر روی رفتار رشد ترک در سنگ ها از اهمیت زیادی برخوردار است.

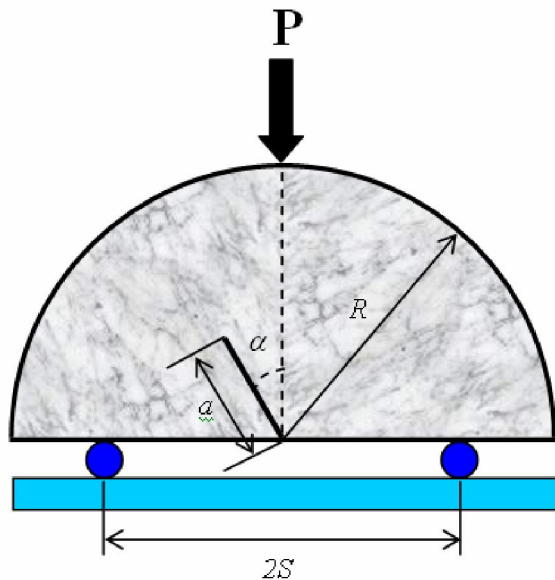
یکی از این پارامترهای مهم که اهمیت بسزایی در مکانیک شکست سنگ ها دارد، چقرمگی شکست سنگ می باشد که مقاومت یک سنگ در برابر رشد ترک را نشان

د انفصالات و ناپیوستگی های ذاتی در توده های سنگی از جمله ویژگی های خاص در اغلب این گونه مواد می باشد. انفصالیهای زمین شناسی به سه دسته ریزترکها (با عرض حدود ۱ میکرومتر)، شکستگی های ریز (با عرض حدود ۱/۰ میلیمتر یا کمتر) و شکستگی های بزرگ عریض تر از ۱/۰ میلیمتر که بعضی اوقات طولشان به چندین متر می رسد، تقسیم می شوند. اصطلاح ناپیوستگی که در مباحث زمین شناسی به صورت وسیعی کاربرد دارد عموماً ناظر به شکستگی های بزرگ می باشد. طول این شکستگی ها در برخی موارد حدود چندین متر می باشد. بسیاری از درزه ها، شکافها، صفحات ضعیف لایه بندی و صفحات ضعیف شیبستویته جزء این نوع شکستگی ها به شمار می آیند. وجود این عوامل در توده های سنگی، باعث کاهش شدید مقاومت کششی و سایر خواص استحکامی توده های سنگ می گردد. بنابراین، برای بررسی دقیق خواص مهندسی توده های سنگی در پروژه های عمرانی و معدنی

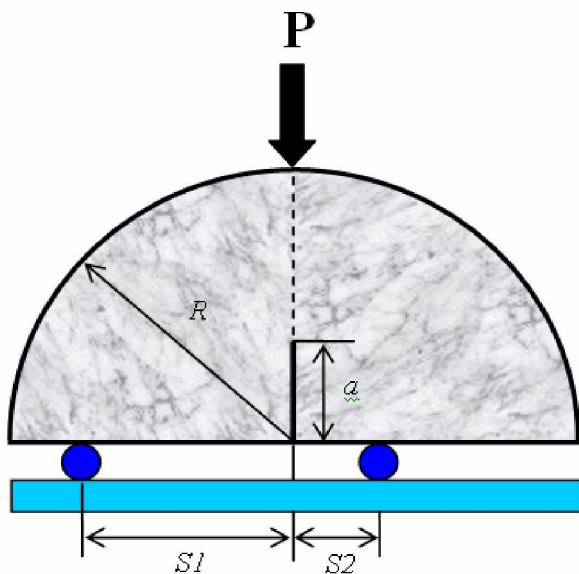
را در مودهای مختلف تعیین کرده و نتایج آن با مقادیر بدست آمده از معیار شکست MTS^3 مقایسه می گردد.

معرفی روش تست جدید

قطعه متداول SCB توسط چانگ و کروپا [Chong and Kuruppu, 1984] برای قطعات سنگی ارائه گردید (شکل ۲). این قطعه شامل نیم دیسکی با یک ترک لبه ای است که تحت خمش سه نقطه ای قرار می گیرد. از آنجایی که فاصله هر یک از تکیه گاه ها از محل ترک مساوی هستند، برای ایجاد مود I شکست کافی است خط ترک و نیروی وارده در یک راستا قرار گیرند ($\alpha=0^\circ$) و برای برقراری مود ترکیبی I/III باید بین این دو راستا، زاویه α ایجاد گردد.



شکل ۲ قطعه SCB (ترک زاویه دار - تکیه گاه ها متقارن).

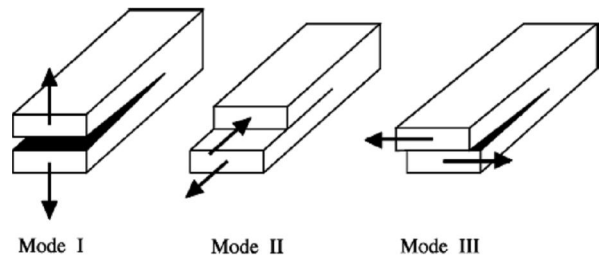


شکل ۳ قطعه ASCB (ترک مستقیم - تکیه گاه ها نامتقارن)

می دهد. کاربردهای فراوان این پارامتر در زمینه های انفجار و ترکیدگی سنگ، پایداری و عدم فروپاشی معادن، شکست هیدرولیکی و مکانیک زلزله باعث شده تا تحقیقات فراوانی بر روی آن صورت پذیرد. از دیگر کاربردهای چقرمگی شکست سنگ ها می توان به کاربرد آن در حفاری تونل ها اشاره نمود. هنگام عملیات حفاری در تونل ها بعضاً شاهد ترک های بسیاری در سقف تونل می باشیم. چنانچه برای انجام حفاری، چقرمگی شکست مربوط به سنگ های موجود در مسیر حفاری تونل محاسبه نشده باشد و به علت عدم دقت کافی در محاسبات مهندسی امکان ریزش تونل بر اثر بار موجود بر روی سقف آن بیشتر شده که خسارت های جبران ناپذیری را می تواند به دنبال داشته باشد.

در کاربردهای عملی فوق الذکر، بررسی رفتار توده های سنگی دارای شکستگی و ترک با استفاده از مبانی علم مکانیک شکست امکان پذیر است. بر این اساس، هنگامی که یک قطعه ترک دار در معرض بار خارجی قرار می گیرد، تمرکز تنش بسیار زیادی در اطراف نوک ترک ایجاد می شود. هرگاه این تنش متمرکز شده به مقدار بحرانی برسد، باعث شکست قطعه می شود. مقدار ضریب شدت تنش را که به ازای این تنش بحرانی محاسبه می گردد، "چقرمگی شکست" (K_{IC}) می نامند.

با توجه به نحوه اعمال بار خارجی، رشد ترک تحت سه مود اساسی شکست اتفاق می افتد. مود I، مود باز شدگی ترک است که در آن وجوه ترک در راستای عمود بر صفحه ترک از هم جدا می شوند. مود II، مود برشی داخل صفحه ای است که در آن وجوه ترک در راستای عمود بر جبهه ترک حرکت می کنند. مود III، مود پارگی می باشد که در آن وجوه ترک به صورت خارج صفحه ای و موازی جبهه ترک حرکت می کنند (شکل ۱).



شکل ۱ مود های اصلی شکست

تاکنون قطعات متعددی برای تعیین چقرمگی شکست مواد سنگی در مود I و مود II و مود ترکیبی I/III ارائه گردیده است که از آن جمله می توان به دیسک برزیلی با ترک مرکزی (1BD) [Aliha et al, 2006; Awaji and Sato, 1978]، قطعه مستطیلی شکل با ترک لبه ای تحت بارگذاری چهار نقطه ای نامتقارن [Chang et al, 2002; Tikare and Choi, 1993; Fett et al, 1995; Choi et al, 2005]، قطعه نیم دیسک ترکدار تحت خمش سه نقطه ای (2SCB) [Lim et al, 2005]، قطعه نیم دیسک ترکدار تحت خمش سه نقطه ای [et al, 1994; Chong et al, 1987; Aliha, 2010] اشاره نمود. هر کدام از این قطعات و روش های تست دارای مزایا و معایبی هستند. به عنوان مثال هنگامی که از قطعه SCB برای تعیین چقرمگی شکست در مود II استفاده می گردد، در بعضی موارد نوک ترک در نزدیکی تکیه گاه قرار می گیرد که این امر روی نتایج آزمایشگاهی اثر گذار می باشد. در این مقاله، برای رفع این مشکل و همچنین برای سهولت انجام تست به وسیله قطعه نیم دیسک روش تست جدیدی ارائه می گردد. همچنین برای بررسی عملکرد این قطعه مقادیر چقرمگی شکست سنگ مرمر نیریز

¹ Brazilian Disk

² Semi-Circular Bend specimen

³ Maximum Tangential Stress (MTS) criterion

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \begin{Bmatrix} (\cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \sin \frac{3\theta}{2}) \\ (\cos \frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin \theta \sin \frac{3\theta}{2}) \\ (\frac{1}{2} \sin \theta \cos \frac{3\theta}{2}) \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} K_I \\ K_{II} \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} T \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix} + \dots$$

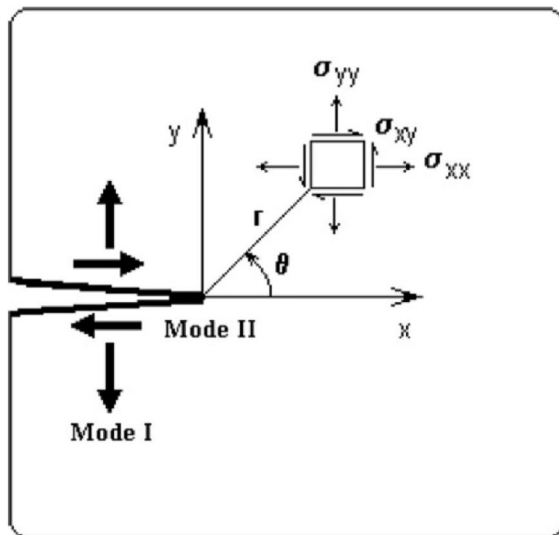
$$\begin{Bmatrix} (-2 \sin \frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin \theta \cos \frac{3\theta}{2}) \\ (\frac{1}{2} \sin \theta \cos \frac{3\theta}{2}) \\ (\cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \sin \frac{3\theta}{2}) \end{Bmatrix}$$

(۱)

که در آن r و θ مولفه های مختصات نوک ترک در سیستم قطبی بوده و σ_{xy} ، σ_{yy} ، σ_{xx} مولفه های تنش در سیستم مختصات کارتزین می باشند (شکل ۵). ضرایب K_I و K_{II} ضرایب شدت تنش می باشند و T یک ترم تنش ثابت می باشد که در راستای طول ترک اعمال می شود و با عنوان تنش T شناخته می شود. ضریب شدت تنش مود I و مود II معمولاً به صورت معادله (۲) ارائه می گردند:

$$K_I = \frac{P}{2Rt} Y_I \sqrt{\pi a} \quad (۲)$$

که در آن a طول ترک، P نیروی وارده بر قطعه و Y_I و Y_{II} ضرایب هستند که تابعی از طول ترک و پارامتر های هندسی دیگر (با توجه به نوع قطعه) می باشند. سه روش اصلی تعیین K_I روش های عددی، تجربی و تحلیلی می باشند که برای هندسه و بارگذاری های پیچیده تکنیک المان محدود، روش قابل اعتماد و مناسبی است.



شکل ۵ تنش الاستیک اطراف نوک ترک در سیستم مختصات کارتزین

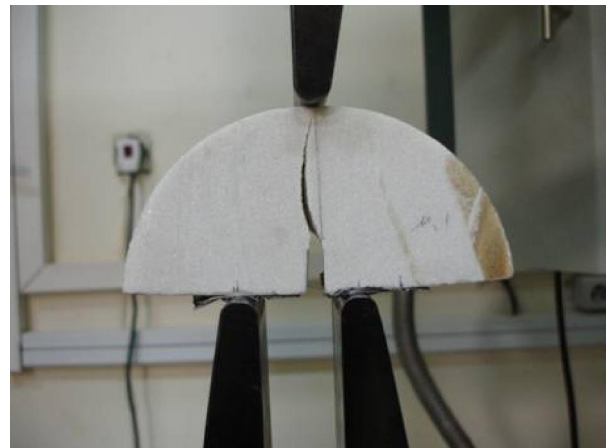
مدل سازی المان محدود

همان طور که در معادله (۲) مشاهده می گردد برای تعیین ضریب شدت نیاز به محاسبه ضرایب Y_I و Y_{II} می باشد. برای محاسبه این ضرایب از روش المان محدود و نرم افزار **ABAQUS** استفاده شده است. در شکل ۶ مدل المان محدود ساخته شده در این نرم افزار نشان داده شده است. در این مدل از حدود ۸۵۰ المان ۶ گره ای استفاده شده است. در اطراف نوک ترک المان های سینگولار به کار رفته که گره میانی آنها در فاصله ۰/۲۵ طول المان از نوک ترک قرار دارد (شکل ۷). ابعاد هندسی

همان طور که در شکل (۳) مشاهده می گردد، در روش جدید ارائه شده همیشه خط ترک و نیروی فشاری وارده در یک راستا هستند و عدم تقارن محل تکیه گاه ها نسبت به محل ترک باعث ایجاد مود ترکیبی I/II و مود II خالص می شود. مزیت اصلی این روش تست ایجاد سهولت بیشتر برای تهیه قطعات و انجام تست شکست روی آنها می باشد. از آنجایی که در این تست راستای ترک همیشه ثابت است، می توان قطعات را به صورت سری ایجاد نمود و با توجه به مود بارگذاری مورد نظر، محل تکیه گاه ها را تنظیم نمود. مزیت دیگر این روش در مواقعی دیده می شود که گاهی برای انجام تست شکست با استفاده از قطعه SCB در مود II خالص نوک ترک به محل تکیه گاه خیلی نزدیک می شود. در این موارد امکان شکست قطعه از محل تکیه گاه بسیار بالاست و همچنین نتایج بدست آمده دچار مشکل می شوند. از آنجایی که در این روش از تکیه گاه های نامتقارن استفاده شده این روش با عنوان ¹ASCB نامگذاری شده است.

تشریح تست های آزمایشگاهی

برای بررسی عملکرد روش ASCB، مقادیر چقرمگی شکست در مود I خالص، مود II خالص و چند مود ترکیبی I/II با استفاده از این روش تعیین می گردد. برای این منظور ۱۱ عدد نیم دیسک از جنس سنگ مرمر نیریز با شعاع $R=50\text{mm}$ ، ضخامت $t=20\text{mm}$ و طول ترک $a=20\text{mm}$ آماده گردید. برای ایجاد ترک ها ابتدا با تیغه هایی به ضخامت ۱ میلیمتر شکاف هایی را تولید کرده و سپس با استفاده از تیغه های بسیار نازکی با ضخامت ۰/۲ میلیمتر نوک این شکاف ها را تیز نموده تا به ترک های واقعی خیلی نزدیک گردد. برای ایجاد مودهای مختلف شکست محل یکی از تکیه گاه ها به صورت $S1/R=0.4$ ثابت گردید و تکیه گاه دوم به صورت $\{0.4, 0.26, 0.2, 0.12\}$ $S2/R=$ تغییر می کند. در شکل ۴ نحوه انجام تست نشان داده شده است.



شکل ۴ نحوه انجام تست با استفاده از روش ASCB

معرفی پارامترهای نوک ترک

مطابق با آنچه ویلیامز ارائه کرده است [Williams, 1957] ناحیه تنش الاستیک اطراف نوک ترک به صورت عبارت های یک سری نامتناهی به صورت معادله ۱ بیان می گردد.

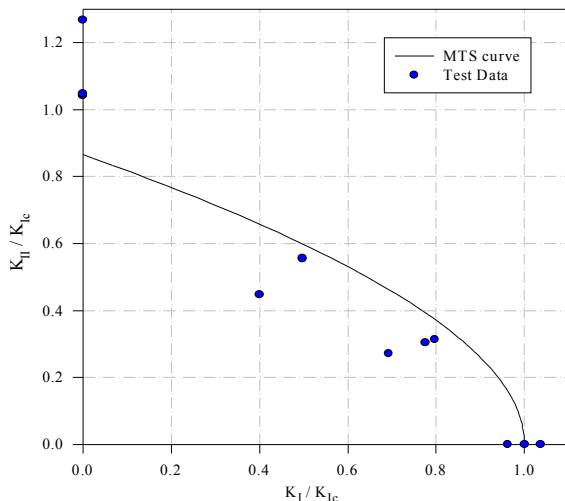
¹ Asymmetrically Semi-Circular Bend specimen (ASCB)

بحث روی نتایج

برای تعیین چقرمگی شکست با استفاده روش ASCB، کفایت بار P بدست آمده از تست که منجر به شکست قطعه شده است را در معادله (۲) قرار داده تا مقادیر چقرمگی شکست محاسبه گردد. در جدول (۲) نتایج حاصل از تست و مقادیر چقرمگی شکست نشان داده شده است. در این جدول P_{cr} نیروی وارده در لحظه شکست و θ_0^0 زاویه شروع شکست می باشد. با میانگین گرفتن از مقادیر K_{II} در مود I خالص مقدار چقرمگی شکست در مود I (K_{IC}) برابر $1.528 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ می گردد.

حال برای بررسی نتایج آزمایشگاهی مقادیر چقرمگی شکست بدست آمده در مود های مختلف با نتایج بدست آمده از معیار MTS مقایسه می گردد. معیار MTS معیاری است که بر اساس ماکزیمم تنش مماسی مقادیر چقرمگی شکست در مودهای ترکیبی و مود II خالص را پیش بینی می کند. به عبارت دقیق تر این معیار فرض می کند که شکست در قطعه در زاویه ای اتفاق می افتد که در آن راستا تنش مماسی ماکزیمم است. به عنوان مثال با حل یکسری معادلات این معیار پیش بینی می کند که زاویه شکست در مود II خالص $70/5$ درجه و مقدار $K_{IIc}/K_{Ic}=0.87$ می باشد. جزئیات بیشتر در مورد این معیار در مرجع [Erdogan and Sih, 1963] موجود است که جهت اختصار از ذکر آن در اینجا پرهیز می شود. در شکل ۸ مقادیر چقرمگی شکست حاصل از تست با نتایج پیش بینی شده به وسیله معیار MTS با هم مقایسه شده اند.

همان طور که مشاهده می گردد نتایج حاصل از تست با نتایج حاصل از معیار MTS مطابقت خوبی ندارد. علت این اختلاف را می توان در عدم دقت لازم در معیار MTS دانست. زیرا همان طور که گفته شد معادلات تنش حول ترک، بسط یک سری بی نهایت می باشد. حال از آنجا که در معیار MTS فقط از جمله اول این بسط در معادله تنش مماسی استفاده شده است و از سایر جملات صرف نظر گردیده بنابراین این معیار دقت کافی را ندارد [Ayatollahi et al, 2006]. چنانچه از ترم های بالاتر در این معیار استفاده شود می توان انتظار داشت که نتایج بهتری حاصل گردد [Saghafi et al, 2010].



شکل ۸ مقایسه نتایج چقرمگی شکست حاصل از تست آزمایشگاهی و معیار MTS در مود های مختلف

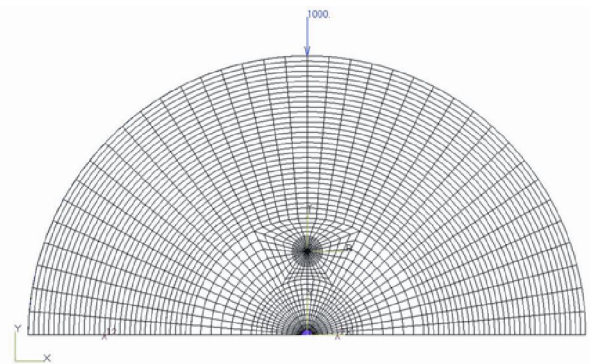
قطعه و محل تکیه گاه ها دقیقاً مطابق با آنچه در بخش تست آزمایشگاهی تشریح شد می باشد. ضریب یانگ و نسبت پواسون ماده به کار رفته نیز به ترتیب 70 GPa و 0.28 می باشد. روش تعیین ضرایب شکل بدین صورت می باشد که ابتدا مقادیر ضرایب شدت تنش را به وسیله بار فرضی 1000 نیوتن که بر قطعه وارد می شود محاسبه کرده و با جایگذاری مقادیر هندسی لازم، بار و ضرایب شدت تنش محاسبه شده در معادله (۲) مقادیر Y_I و Y_{II} محاسبه می گردد. این مقادیر در جدول ۱ نشان داده شده است.

پارامتر M^e که در جدول مشاهده می گردد به عنوان یک پارامتر ترکیبی شناخته می شود که بین صفر و ۱ تغییر می کند:

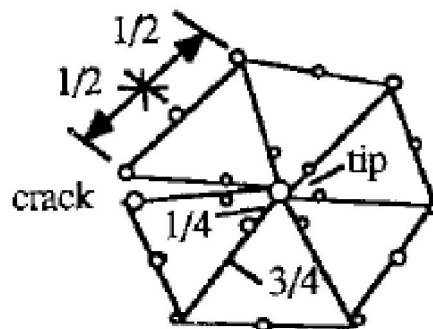
$$M^e = \frac{2}{\pi} \tan^{-1} \frac{K_I}{K_{II}} \quad (3)$$

M^e	Y_I	Y_{II}
1	1.567	0
0.76	0.096	0.037
0.46	0.059	0.066
0	0	1.225

جدول ۱ مقادیر Y_I و Y_{II} در قطعه ASCB برای مود های مختلف شکست



شکل ۶ مدل اجزاء محدود قطعه SCB در حالت دو بعدی



شکل ۷ المان های سینگولار در اطراف نوک ترک

نتیجه گیری

۱. روش تست جدیدی برای تعیین چقرمگی شکست مواد سنگی در مود II و مود ترکیبی I/II ارائه گردید.
۲. مزیت این روش در سادگی انجام تست و آماده ساختن قطعات می باشد.
۳. چقرمگی شکست بدست آمده از نتایج آزمایشگاهی مطابقت خوبی با نتایج پیش بینی شده به وسیله معیار MTS را ندارد. دلیل این اختلاف می تواند در این نکته باشد که معیار MTS فقط از جمله اول معادله تنش مماسی در اطراف نوک ترک استفاده می کند که از دقت کافی بر خوردار نمی باشد.

مراجع

- Choi, S.R., Zhu, D., Miller, R.A., 2005, Fracture behavior under mixed-mode loading of ceramic plasma-sprayed thermal barrier coatings at ambient and elevated temperatures. *Journal of Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 72, No.13 (2144-2158).
- Chong, K.P., Kuruppu M.D., 1984, New specimen for fracture toughness determination for rock and other Materials. *International Journal of Fracture*, Vol. 26, (59-62).
- Chong, K.P., Kuruppu, M.D., Kuszmaul, J.S., 1987, Fracture toughness determination of layered materials. *Journal of Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 28, No. 1 (43-54).
- Erdogan F., Sih G.C., 1963, On the crack extension in plates under plane loading and transverse shear. *Journal of Basic Engineering Transactions of ASME*, Vol. 85, (519-525).
- Fett, T., Gerteisen, G., Hahnenberger, S., Martin, G., Munz, D., 1995, Fracture tests for ceramics under mode-I, mode-II and mixed-mode loading. *Journal of the European Ceramic Society*, Vol.15, (307-312).
- Lim, I.L., Johnston, I.W., Choi, S.K., Boland, J.N., 1994, Fracture testing of a soft rock with semi-circular specimens under three-point bending, part 2 – mixed mode. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, Vol. 31, No. 3 (199-212).
- Saghafi, H., Ayatollahi, M.R., Sistaninia, M., 2010, A modified MTS criterion (MMTS) for mixed-mode fracture toughness assessment of brittle materials. *Journal of Materials Science and Engineering A* (in press).
- Tikare, V., Choi, S.R., 1993, Combined mode I and mode II fracture of monolithic ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 76, No. 9 (2265-2272).
- Williams, M.L., 1957, On the stress distribution at the base of a stationary crack. *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 24, (109-114).
- Aliha, M.R.M., Ayatollahi, M.R., Ashtari, R., 2006, Mode I and mode II fracture toughness testing for a coarse grain marble. *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 5-6, (181-188).
- Aliha, M.R.M., Ayatollahi, M.R., Smith, D.J., Pavier, M.J., 2010, Geometry and size effects on fracture trajectory in a limestone rock under mixed mode loading. *Engineering Fracture Mechanics* (in Press)
- Awaji, H., Sato, S., 1978, Combined mode fracture toughness measurement by the disc test. *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 100, (175-182).
- Ayatollahi, M.R., Aliha, M.R.M., Hasani, M.M., 2006, Mixed mode brittle fracture in PMMA – an experimental study using SCB specimens. *Journal of Materials Science and Engineering A*, Vol. 417, No. 1-2 (348-356).
- Chang, S.H., Lee, C.I., Jeon, S., 2002, Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed-mode conditions by using disc-type specimen. *Engineering Geology*, Vol. 66, (79-97).

شماره قطعه	M°	S2 (mm)	P_{cr} (kN)	θ_0°	K_I (MPa \sqrt{m})	K_{II} (MPa \sqrt{m})
1	1	40	7.488	0	1.47	0
2	1	40	8.066	0	1.585	0
3	1	40	7.779	0	1.529	0
4	0.76	13	8.819	16	1.058	0.414
5	0.76	13	9.88	19	1.185	0.465
6	0.76	13	10.157	15	1.218	0.478
7	0.46	10	10.218	17	0.76	0.848
8	0.46	10	7.8	14	0.611	0.682
9	0	6	12.607	11	0	1.936
10	0	6	10.4	9	0	1.59
11	0	6	10.41	10	0	1.6

جدول ۲ نتایج بدست آمده از تست های آزمایشگاهی با استفاده از قطعه ASCB و از جنس سنگ مرمر نیریز