

بررسی اثر ابعاد هندسی قطعه، بر روی چقرمگی شکست سنگ مرمر هر سین

مجیدرضا آیت‌اللهی*^۱ حامد ثقفی^۲ محمدرضا محمدعلیها^۳

پذیرش مقاله: ۸۸/۶/۴

دریافت مقاله: ۸۷/۷/۲

چکیده:

برای تعیین چقرمگی شکست یک ماده سنگی نیاز به یک قطعه استاندارد با ابعاد هندسی مشخص است. اگر ابعاد هندسی قطعه از مقادیر مشخصی کمتر باشد، چقرمگی شکست محاسبه شده از دقت لازم برخوردار نمی‌باشد. به منظور محاسبه صحیح چقرمگی شکست مواد سنگی معیارهای مختلفی برای تعیین حداقل ابعاد هندسی قطعه ارائه شده است. در این تحقیق، با انجام آزمایش روی قطعه نیم دیسک با ترک لبه‌ای که تحت خمش سه نقطه‌ای قرار دارد، معیارهای ارائه شده برای حداقل طول ترک و ضخامت مورد نیاز برای تعیین چقرمگی شکست، مورد بررسی قرار می‌گیرد. قطعات تهیه شده، از جنس سنگ مرمر هر سین است. نتایج آزمایش‌های شکست انجام شده بر روی این سنگ نشان می‌دهد که معیارهای ارائه شده جامعیت لازم را برای تخمین این دو پارامتر در ماده سنگی آزمایش شده نداشته و لذا در این مقاله با در نظر گرفتن ضرایب تصحیح برای روابط مربوط به محاسبه حداقل طول ترک و ضخامت قطعه، معیارهای مربوطه به نحوی اصلاح می‌شوند که بتوانند نتایج حاصل از آزمایش شکست انجام شده بر روی سنگ مرمر هر سین را پیش‌بینی نمایند.

کلید واژه‌ها: مواد سنگی، چقرمگی شکست، قطعه SCB، طول ترک، ضخامت، سنگ مرمر هر سین

مقدمه

از منظر زمین شناسی سنگ‌ها دارای خواص فیزیکی، مکانیکی، شیمیایی و هیدرولیکی متنوعی هستند که در طی فرآیندهای متوالی زمین‌شناختی بوجود آمده‌اند. وجود انفصالات و ناپیوستگی‌های ذاتی در توده‌های سنگی از جمله ویژگی‌های ذاتی این گونه مواد می‌باشد. انفصال‌های زمین‌شناختی به سه دسته ریزترک‌ها (با عرض حدود ۱ میکرومتر)، شکستگی‌های ریز (با عرض حدود ۱/۰ میلی‌متر یا کمتر) و شکستگی‌های بزرگ (عریض‌تر از ۱/۰ میلی‌متر) تقسیم می‌شوند (فاروق حسینی، ۱۳۷۸). اصطلاح ناپیوستگی که در مباحث زمین‌شناسی به صورت وسیعی کاربرد دارد عموماً ناظر به شکستگی‌های بزرگ می‌باشد. طول این شکستگی‌ها در برخی موارد حدود چندین متر می‌باشد. بسیاری از درزه‌ها، شکاف‌ها، صفحات ضعیف لایه‌بندی و صفحات ضعیف شیستوزیته جزو این نوع شکستگی‌ها به شمار می‌آید. وجود این عوامل در توده‌های سنگی، باعث کاهش شدید مقاومت کششی و سایر خواص استحکامی توده‌های سنگ می‌گردد.

بنابراین، برای بررسی دقیق خواص مهندسی توده‌های سنگی در پروژه‌های عمرانی و معدنی در نظر گرفتن تأثیر این ناپیوستگی‌ها بسیار مهم است. در عملیات حفاری و برش سنگ‌ها که اصولاً بر مبنای یک مکانیزم رشد ترک در توده‌های سنگی استوار است، خواص مکانیکی بستر حفاری و از جمله رفتار رشد ترک و شکست لایه‌ها و توده‌های مختلف سنگ‌ها، نقش تعیین‌کننده‌ای در برنامه‌ریزی و اجرای این عملیات دارد. به عنوان مثال ماشین‌آلات حفاری را بر اساس جنس و نوع سنگ‌های موجود در منطقه حفاری انتخاب می‌کنند. ماشین‌آلاتی که برای حفاری در بسترهای سخت و محکم استفاده می‌شوند دارای مشخصات خاصی هستند که ماشین‌آلات مورد استفاده در مکان‌های دیگر نیازمند داشتن آن خصوصیات نمی‌باشند. بنابراین، مطالعه بر روی رفتار رشد ترک‌ها در سنگ‌ها از اهمیت زیادی برخوردار است. یکی از این پارامترهای مهم که اهمیت به‌سزایی در مکانیک شکست سنگ‌ها دارد، چقرمگی شکست سنگ می‌باشد. این پارامتر، مقاومت یک سنگ ترک‌دار را در مقابل رشد ترک نشان

می‌دهد و وابسته به جنس سنگ می‌باشد. با استفاده از این پارامتر می‌توان سنگ‌ها را دسته‌بندی نمود و به وسیله این دسته‌بندی و خصوصیات مربوط به آن، ماشین‌آلات حفاری را طراحی و انتخاب کرد.

از دیگر کاربردهای چقرمگی شکست سنگ‌ها می‌توان به کاربرد آن در حفاری تونل‌ها اشاره نمود. هنگام عملیات حفاری در تونل‌ها بعضاً شاهد ترک‌های بسیاری در سقف تونل می‌باشیم. چنان‌چه برای انجام حفاری، چقرمگی شکست مربوط به سنگ‌های موجود در مسیر حفاری تونل محاسبه نشده باشد و حفاری بدون در نظر گرفتن آن صورت پذیرد امکان ریزش تونل بر اثر بار موجود بر روی سقف آن وجود دارد که خسارت‌های جبران‌ناپذیری را می‌تواند به دنبال داشته باشد.

در کاربردهای عملی فوق‌الذکر، بررسی رفتاری توده‌های سنگی دارای ترک با استفاده از مبانی علم مکانیک شکست امکان‌پذیر است. بر این اساس، هنگامی که یک قطعه ترک‌دار در معرض بار خارجی قرار می‌گیرد، تمرکز تنش بسیار زیادی در اطراف نوک ترک ایجاد می‌شود. هرگاه این تنش متمرکز شده به مقدار بحرانی برسد، باعث شکست قطعه می‌شود. مقدار ضریب شدت تنشی را که به ازای این تنش بحرانی محاسبه می‌گردد، "چقرمگی شکست ظاهری" (K_{Ic}) می‌نامند (Sun & Singh, 1994). این پارامتر تابعی از جنس قطعه و ابعاد هندسی آن می‌باشد. تحقیقات انجام شده روی مواد فلزی نشان داده است، چنان‌چه نسبت ابعاد هندسی قطعه از مقادیر خاصی بیشتر باشد این پارامتر تنها تابعی از جنس قطعه می‌باشد که در این حالت آن را "چقرمگی شکست" می‌نامند. با توجه به نحوه اعمال بار خارجی، رشد ترک تحت سه مود اساسی شکست اتفاق می‌افتد (Soo-Ho Chang, 2002). مود I، مود بازشدگی ترک است که در آن وجوه ترک در راستای عمود بر صفحه ترک از هم جدا می‌شوند. مود II، مود برشی است که در آن وجوه ترک در صفحه داخلی ترک و در راستای عمود بر جبهه نوک ترک می‌لغزند. مود III، مود پارگی می‌باشد که در آن وجوه ترک به صورت خارج صفحه‌ای و موازی با جبهه ترک می‌لغزند شکل ۱.

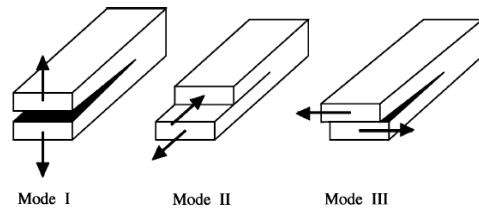
جدول ۱- مقایسه بین ضریب موجود در معیار معادله (۱) برای

سنگ‌های مختلف

نوع سنگ	$\frac{a_c}{\left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t}\right)^2}$	مرجع
Westerly granite	1.28	[Schmidt & Lutz, 1979], [Sun & Ouchterlony, 1986]
Colorado oil shale	<1.89	[Chong et al, 1987]
Indiana limestone	1.54	[Sun & Ouchterlony, 1986] [Ingraffea & Schmidt, 1979]
Welsh limestone	2.5	[Sun & Singh, 1994]
Fine grained sandstone	<0.22	[Fowell & Chen, 1990]
Coarse grained sandstone	0.57	[Singh & Sun, 1990]

اطراف نوک ترک است که در هنگام بارگذاری بر روی قطعه سنگی، میکروتُرک‌هایی در آن ناحیه ایجاد می‌گردد و در شرایط بحرانی پس از به هم پیوستن آن میکروتُرک‌ها باعث ایجاد یک ترک اصلی و نهایتاً شروع شکست می‌گردد. ناحیه FPZ در قطعات سنگی مشابه ناحیه پلاستیکی است که در اطراف نوک ترک قطعات فلزی ایجاد می‌شود، اگرچه تفاوت‌هایی بین این دو ناحیه وجود دارد.

در میان روش‌های تست متعددی که برای تعیین چقرمگی شکست مود I سنگ‌ها ارائه گردیده است، انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) قطعات میله استوانه‌ای با ترک لبه‌ای تحت خمش سه نقطه‌ای (CB)، میله کوتاه ترک‌دار تحت نیروی کششی (SR) و دیسک برزیلی با شکاف مرکزی تحت نیروی فشاری (CCNBD) را پیشنهاد کرده است. ولی هنوز تحقیقات فراوانی بر روی سایر قطعات صورت می‌گیرد که از آن جمله می‌توان به قطعه نیم دیسک با ترک لبه‌ای تحت خمش سه نقطه‌ای (SCB) اشاره نمود. این قطعه به خاطر سادگی ساخت، فیکسچرهای ساده و روش تست آسان، از مزایای خاصی برخوردار است. بنابراین تحقیقات بر روی این قطعه هم‌چنان ادامه دارد (Khan & Al-Shayea, 2000).



شکل ۱- مودهای اصلی شکست (Soo-Ho Chang, 2002)

برای تعیین صحیح چقرمگی شکست، ابعاد قطعه باید به گونه‌ای انتخاب شوند که این پارامتر به ابعاد قطعه وابسته نباشد. دو عامل از مهم‌ترین عوامل هندسی، ضخامت قطعه و طول ترک می‌باشد. حداقل مقدار ضخامت و طول ترکی که به ازای آنها می‌توان چقرمگی شکست را محاسبه نمود، طول ترک بحرانی (a_c) و ضخامت بحرانی (t_c) نامیده می‌شود. برای آنکه بتوان تست قطعات این مقادیر بحرانی را محاسبه کرد، محققین دو معیار برای تعیین آنها ارائه نمودند. معیار ارائه شده برای طول ترک، معیاری است که نخستین بار توسط اشمیت برای سنگ‌ها ارائه شد (Schmidt, 1976):

$$a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2 \quad (1)$$

که در آن K_{IC} چقرمگی شکست مود I و σ_t استحکام کششی سنگ می‌باشد. اگرچه رابطه ۱ برای فلزات وقتی به جای σ_t از σ_y استفاده شود به خوبی پذیرفته شده است، در مورد سنگ‌ها نتایج خوبی را ارائه نکرده و در بسیاری از موارد ضریب ۲/۵ موجود در این معیار بسیار محافظه کارانه است (Sun and Ouchterlony, 1986). بنابراین محققین بدین نتیجه رسیدند که ضریب به کار رفته در رابطه ۱ برای هر سنگی متفاوت است. نمونه‌ای از ضرایب به دست آمده در مقالات مختلف در جدول ۱ مشاهده می‌شود.

معیار ارائه شده برای تعیین ضخامت بحرانی قطعه سنگی توسط بارتن ارائه گردیده است (Barton, 1983):

$$t \geq r_{mc} = 0.269 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2 \quad (2)$$

که در آن r_{mc} شعاع بحرانی ناحیه فرآیند شکست FPZ (Fracture Process Zone) می‌باشد. ناحیه FPZ ناحیه‌ای در

ترم‌های بالاتر بسط سری سینگولار نبوده و معمولاً از آنها صرف نظر می‌شود.

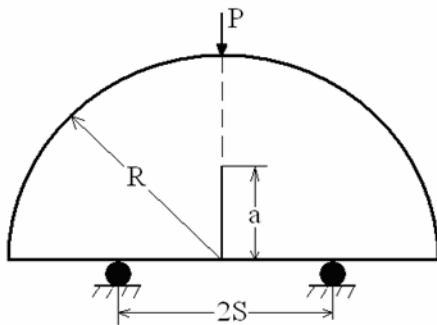
ضریب شدت تنش مود I معمولاً به صورت معادله ۴ ارائه می‌گردد:

$$K_I = Y_I \sigma \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

که در آن a طول ترک، σ معرف تنش دور دست اعمالی و Y_I یک ضریب هندسی است که تابعی از طول ترک و پارامترهای هندسی دیگر (با توجه به نوع قطعه) می‌باشد. سه روش اصلی تعیین K_I روش‌های عددی، تجربی و تحلیلی است. برای هندسه و بارگذاری‌های پیچیده تکنیک المان محدود، روش قابل اعتماد و مناسبی برای تعیین K_I است.

معرفی قطعه نیم دیسک با ترک لبه‌ای

قطعه نیم دیسک با ترک لبه‌ای (شکل ۳) اولین بار توسط چانگ و کروپا (Chong & Kuruppu, 1984) برای قطعات سنگی ارائه گردید. این قطعه می‌تواند برای تعیین چقرمگی شکست مود I مورد استفاده قرار گیرد و نتایج به دست آمده از آن با نتایج سایر روشها قابل مقایسه است (Lim et al, 1994).



شکل ۳- شکل شماتیک قطعه نیم دیسک با ترک لبه‌ای (SCB) تحت خمش سه نقطه‌ای

تشریح آزمایش‌های انجام شده

در این تحقیق برای محاسبه چقرمگی شکست سنگ مرمر، استوانه‌های بلندی از این سنگ را تهیه کرده و سپس با توجه به ضخامت‌های مورد نیاز، آن را برش زده تا قطعه‌های دیسکی شکلی ایجاد گردد. این دیسک‌ها را به دو نیم تقسیم

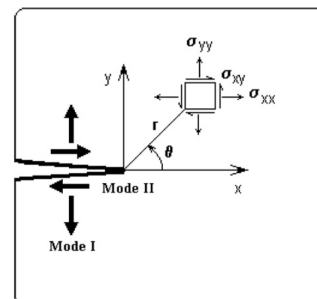
در این تحقیق، با استفاده از قطعه SCB که جنس آن از سنگ مرمر هرسین می‌باشد، معیارهای ارائه شده برای ضخامت و طول ترک بحرانی مورد بررسی قرار می‌گیرند. برای انجام این کار، ابتدا قطعات نیم دیسک با ترک لبه‌ای ساخته شده و سپس تحت خمش سه نقطه‌ای قرار می‌گیرند. با انجام این تست‌ها و به دست آوردن بار شکست، می‌توان مقادیر چقرمگی شکست را با به کارگیری تحلیل‌های مناسب المان محدود محاسبه نموده سپس با استفاده از این نتایج می‌توان معیارهای فوق را مورد بررسی قرار داد.

معرفی پارامترهای شکست

مطابق با آنچه ویلیامز ارائه کرده است (Williams, 1957)، ناحیه تنش الاستیک اطراف نوک ترک به صورت عبارت‌های یک سری نامتناهی بیان می‌گردد. ترم اول این بسط سری، سینگولار (تکین) بوده و به صورت رابطه ۳ نوشته می‌شود:

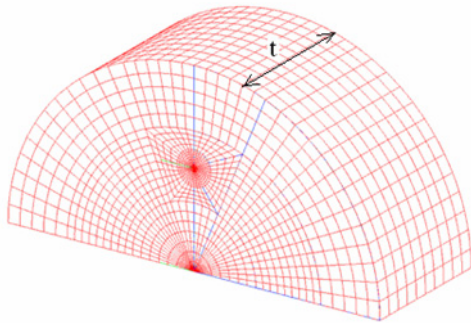
$$\begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \begin{Bmatrix} \left(\cos \frac{\theta}{2} - \frac{1}{2} \sin \theta \sin \frac{3\theta}{2}\right) \\ \left(\cos \frac{\theta}{2} + \frac{1}{2} \sin \theta \sin \frac{3\theta}{2}\right) \\ \left(\frac{1}{2}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

که در آن r و θ مؤلفه‌های مختصات نوک ترک در سیستم قطبی بوده و σ_{xx} , σ_{yy} , σ_y و σ_{xy} مؤلفه‌های تنش در سیستم مختصات کارتزین می‌باشند (شکل ۲). عبارت سمت راست معادله ۳ وابسته به ضرایب شدت تنش K_I, K_{II} (مربوط به مود I و مود II) می‌باشد.



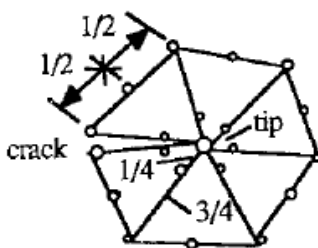
شکل ۲- تنش الاستیک اطراف نوک ترک در سیستم مختصات کارتزین

لازم است مقدار ضریب شدت تنش K_I متناظر با بار شکست حاصل از آزمایش معین گردد. در این تحقیق جهت تعیین ضریب شدت تنش از روش اجزای محدود استفاده شده است. تحلیل اجزای محدود قطعه SCB در نرم افزار ABAQUS انجام شده و نتایج از مدل سازی سه بعدی این قطعه به دست آمده است.



شکل ۶- مدل اجزای محدود قطعه SCB در حالت سه بعدی

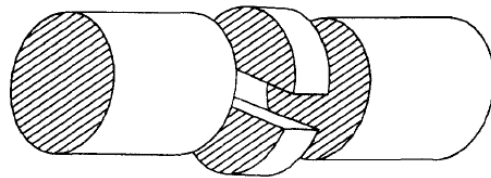
در شکل ۶ یک نمونه از شبکه بندی سه بعدی قطعه SCB در حالت مود I بارگذاری نشان داده شده است. در این مدل سه بعدی از المان ۲۰ گره ای استفاده گردیده است. در اطراف نوک ترک نیز المان های سینگولار به کار رفته که گره میانی آنها در فاصله $\frac{1}{4}$ طول المان از نوک ترک قرار دارد (شکل ۷).



شکل ۷- المان های سینگولار در اطراف نوک ترک

در همه مدل ها شعاع قطعه $R = 55mm$ و فاصله تکیه گاه تا محل ترک $S = 27.5mm$ می باشد. ضریب یانگ و نسبت پواسون ماده به کار رفته نیز به ترتیب 70 GPa و 0.28 می باشد. تعداد ۹۳۶۰ المان در مدل سه بعدی ایجاد شده است. برای محاسبه چقرمگی شکست ظاهری، کاپیست باری را که منجر به شکست قطعه شده و از تست قطعه بدست

کرده تا قطعات نیم دیسک مورد نیاز تهیه شود. مراحل این کار در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- مراحل تولید قطعه SCB

سپس با استفاده از تیغه اره ای با ضخامت 0.6 میلی متر ترکی با طول مورد نظر در آن ایجاد می گردد. برای آنکه ترک ایجاد شده به شرایط ترک واقعی نزدیک شود، نوک ترک با تیغه اره ای به ضخامت 0.2 میلی متر تیز می شود. پس از ایجاد ترک، قطعات با استفاده از فیکسچر خمش سه نقطه ای تحت بارگذاری مود I قرار می گیرند. شکل ۵ نمونه ای از قطعات SCB تست شده را نشان می دهد. قطعات تست شده دارای ضخامت ۴۰، ۳۰، ۲۰، ۱۰ میلی متر و نسبت طول ترک به شعاع قطعه $a/R = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$ می باشد که شعاع قطعه ۵۵ میلی متر در نظر گرفته شده است. همچنین تست ها به ازای $S/R = 0.5$ انجام شده است ($2S$ فاصله بین دو تکیه گاه پایینی می باشد). با اعمال بار به هریک از قطعات و افزایش تدریجی آن، مقدار بار متناظر با لحظه شکست در هر یک از آزمایش ها ثبت گردید تا به کمک روش اجزای محدود چقرمگی شکست ظاهری در هر حالت مشخص گردد.

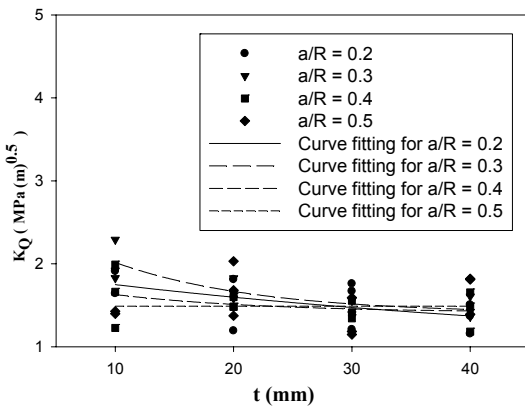


شکل ۵- نمونه ای از قطعات که تحت مود I بارگذاری تست شده اند

مدل سازی المان محدود

به منظور تعیین چقرمگی شکست از طریق تست قطعه SCB،

در شکل ۹ تغییرات چقرمگی شکست ظاهری با ضخامت نشان داده شده است. همان طور که منحنی‌ها نشان می‌دهند، با افزایش ضخامت، مقدار چقرمگی شکست ظاهری کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌گردد، تقریباً با افزایش طول ترک اثر ضخامت بر چقرمگی شکست ظاهری کمتر می‌شود. در شکل ۱۰ تمامی منحنی‌ها و داده‌های آزمایشگاهی در یک نمودار ترسیم شده‌اند تا مقایسه بین آنها با سهولت بیشتری انجام شود.



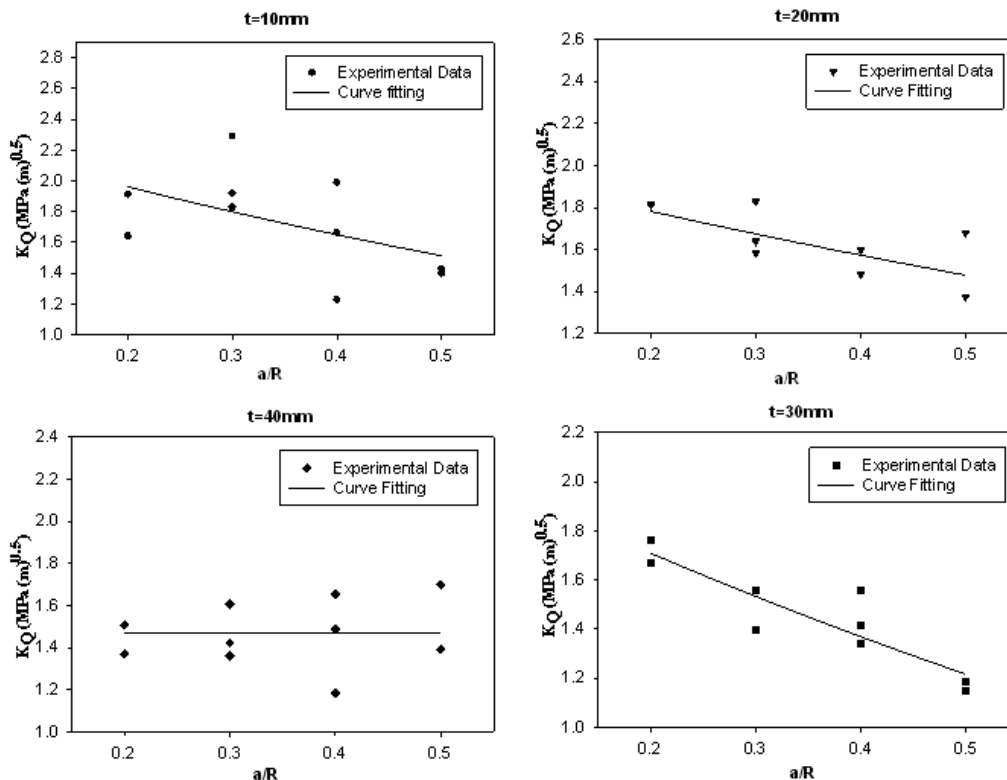
شکل ۱۰- تغییرات چقرمگی شکست ظاهری سنگ مرمر هر سین بر حسب ضخامت به ازای $a/R=0.2,0.3,0.4,0.5$

آمده است را بر مدل اجزای محدود وارد کرده تا بدین وسیله مقدار ضریب شدت تنش متناظر با آن بار توسط نرم افزار محاسبه گردد.

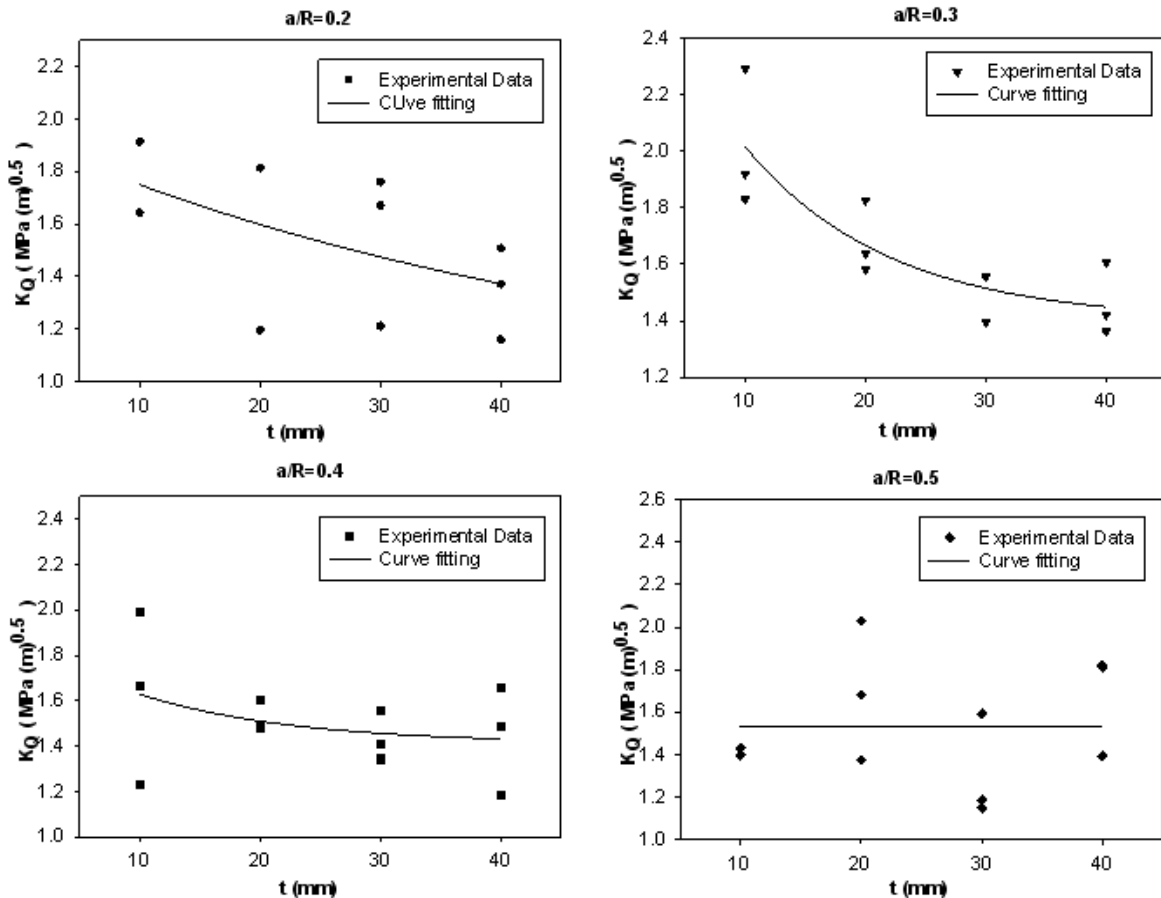
نتایج

در شکل ۸ تغییرات چقرمگی شکست ظاهری سنگ مرمر هر سین بر حسب طول ترک به ازای ضخامت‌های مختلف ارائه شده است. برای بررسی بهتر داده‌های آزمایشگاهی، مطابق روش‌های محاسباتی انطباق منحنی، یک منحنی از میان این داده‌ها عبور داده شده، به گونه‌ای که خطای بین داده‌ها و منحنی حداقل شده باشد. در این مقاله منحنی‌ها برای کلیه داده‌های موجود به صورت توابع نمایی ae^{-bx} در نظر گرفته شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌گردد، با افزایش طول ترک مقدار چقرمگی شکست ظاهری کاهش می‌یابد و یا ثابت می‌ماند. همچنین دیده می‌شود که تقریباً با افزایش ضخامت اثر طول ترک بر چقرمگی شکست ظاهری کاهش می‌یابد.



شکل ۸- تغییرات چقرمگی شکست ظاهری سنگ مرمر هر سین بر حسب طول ترک به ازای $t=10,20,30,40$ mm



شکل ۹- تغییرات چقرمگی شکست ظاهری سنگ مرمر هرسین بر حسب ضخامت قطعه به ازای $a/R = 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$

(۶)

$$r_{mc} = \frac{27}{32\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2$$

$$= 0.269 \left(\frac{1.48 \times \sqrt{1000}}{7.08} \right)^2 = 11.75 \text{ mm}$$

جدول ۲- مقادیر چقرمگی شکست ظاهری در ضخامت‌ها و طول ترک‌های مختلف و مقدار میانگین آنها برای سنگ آزمایش شده

		$t = 25$ (mm)	$t = 30$ (mm)	$t = 40$ (mm)	K_{IC} ($\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$)
K_{IQ}	$a/R=0.2$	۱/۵۶	۱/۵۲	۱/۴۹	۱/۴۸
	$a/R=0.3$	۱/۵۳	۱/۴۹	۱/۴۵	
	$a/R=0.4$	۱/۴۹	۱/۴۸	۱/۴۳	
	$a/R=0.5$	۱/۴۸	۱/۴۶	۱/۳۸	

آیت‌اللهی و همکاران (۱۳۸۶) مقدار استحکام کششی سنگ مرمر هرسین را تعیین کرده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌گردد، ضخامت بحرانی که توسط این معیار محاسبه شد نسبت به

با توجه به شکل ۱۰ مشاهده می‌گردد که با افزایش ضخامت، منحنی‌ها همگرا می‌شوند. از ضخامت ۲۵ میلی‌متر، تقریباً منحنی‌ها بسیار به هم نزدیک هستند و چقرمگی شکست ظاهری تقریباً مستقل از ضخامت می‌باشد. بنابراین می‌توان این مقدار از ضخامت را به عنوان ضخامت بحرانی معرفی نمود. برای محاسبه چقرمگی شکست این سنگ، مقادیر چقرمگی شکست ظاهری را از روی این چهار منحنی و در ضخامت‌های ۲۵، ۳۰ و ۴۰ میلی‌متر خوانده و میانگین آنها، به عنوان چقرمگی شکست در نظر گرفته می‌شود. مقادیر به‌دست آمده و مقدار میانگین آنها در جدول ۲ آورده شده است.

حال می‌توان با استفاده از نتایج بدست آمده، معیار ارائه شده برای تعیین ضخامت بحرانی را مورد بررسی قرار داد:

$$t \geq r_{mc} = \frac{27}{32\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2 = 0.269 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2 \quad (۵)$$

با توجه به معادله ۵ مقدار، r_{mc} برای سنگ مرمر هرسین به صورت معادله ۶ محاسبه می‌گردد:

آنچه توسط نتایج آزمایشگاهی به دست آمد اختلاف نسبتاً زیادی دارد. البته این اختلاف توسط برخی محققین دیگر نیز گزارش شده است. به عنوان مثال (Whittaker et al, 1992) معیار دیگری را ارائه نموده است که بر اساس آن مقدار ضخامت بحرانی به اندازه دو برابر Γ_{mc} می باشد. این معیار دوم هماهنگی خوبی با نتایج به دست آمده در این مقاله دارد.

برای تعیین طول ترک بحرانی، رابطه کلی γ معرفی و پیشنهاد می گردد که باید در آن مقدار مناسب β را با توجه به نتایج تجربی تعیین نمود:

$$a_c = \beta \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_t} \right)^2 \quad (7)$$

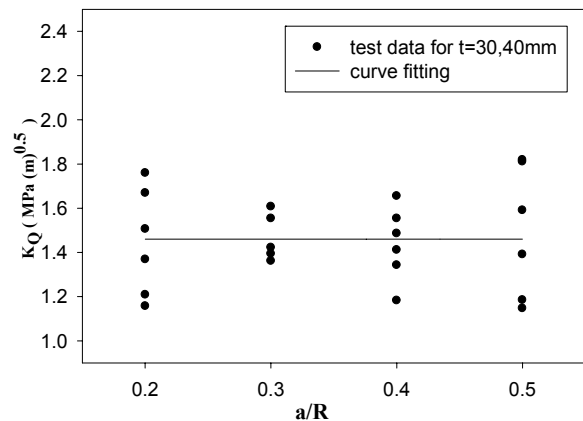
در معیار رابطه ۱ مقدار β برابر $2/5$ بود. حال این ضریب برای سنگ مرمر هرسین آزمایش شده در این تحقیق محاسبه می گردد. برای آنکه مقداری تقریبی برای β محاسبه شود این پارامتر برای حالت $a/R = 0.2$ محاسبه می گردد:

$$\beta = a_c \left(\frac{\sigma_t}{K_{IC}} \right)^2 = 11 \left(\frac{7.08}{1.48 \times \sqrt{1000}} \right)^2 = 0.133 \quad (8)$$

این مقدار $\beta = 0.133$ برای سنگ مرمر هرسین آزمایش شده نشان می دهد که رابطه ۱ (با ضریب $\beta = 2/5$) که اساساً در ابتدا برای محاسبه حداقل طول ترک برای فلزات ارائه شده است، قابلیت استفاده برای سنگ مورد نظر را نداشته و پیش بینی بسیار محافظه کارانه ای از کمترین طول ترک مجاز برای رسیدن به یک مقدار چقرمگی شکست مناسب از سنگ هرسین ارائه می دهد. نتایج تحقیقات انجام شده برای سایر مواد سنگی در جدول ۱ نیز نشان می دهد که مقدار ضریب β برای سنگ های مختلف که با قطعات متنوعی آزمایش شده اند، بسیار کوچک تر از $\beta = 2/5$ می باشد. به عبارت دیگر، استفاده از معادله ۱ در مواد سنگی مستلزم به کارگیری قطعات سنگی بسیار بزرگ برای انجام آزمایش های شکست می باشد. این در حالیست که به سبب وجود عواملی نظیر رگه، لایه بندی، ناهمگونی و ناهمسان گردی در مواد سنگی، استفاده از قطعات بزرگ تر سنگی برای آزمایش، احتمال ایجاد خطا و پراکندگی بالا در داده های حاصله را به واسطه تأثیر این عوامل افزایش می دهد. هم چنین در پاره ای از موارد به سبب محدودیت های تکنیکی موجود و هزینه بالا در تهیه نمونه های سنگی از مغزه های گرفته شده از توده های سنگی در اعماق زیاد، امکان تهیه قطعات آزمایشگاهی با ابعاد بزرگ، وجود ندارد. با وجود

آنچه توسط نتایج آزمایشگاهی به دست آمد اختلاف نسبتاً زیادی دارد. البته این اختلاف توسط برخی محققین دیگر نیز گزارش شده است. به عنوان مثال (Whittaker et al, 1992) معیار دیگری را ارائه نموده است که بر اساس آن مقدار ضخامت بحرانی به اندازه دو برابر Γ_{mc} می باشد. این معیار دوم هماهنگی خوبی با نتایج به دست آمده در این مقاله دارد.

برای محاسبه طول ترک بحرانی از داده های آزمایشگاهی مربوط به ضخامت $t = 30, 40 \text{ mm}$ استفاده می گردد. زیرا نشان داده شد که ضخامت بحرانی ۲۵ میلی متر است بنابراین برای تعیین چقرمگی شکست باید از ضخامت هایی استفاده گردد که از این مقدار بیشتر باشند. حال برای تعیین طول ترک بحرانی، نمودار چقرمگی شکست ظاهری بر حسب طول ترک به ازای ضخامت های ۳۰ و ۴۰ میلی متر رسم می گردد (شکل ۱۱) و طول ترکی که از آن به بعد چقرمگی شکست ظاهری به طول ترک بستگی ندارد به عنوان طول ترک بحرانی معرفی می گردد.



شکل ۱۱- تغییرات چقرمگی شکست ظاهری سنگ مرمر هرسین بر حسب طول ترک به ازای $t = 30, 40 \text{ mm}$

همان طور که در شکل ۱۱ مشاهده می شود، می توان با استفاده از تمامی طول ترک های بیش از ۱۱ mm ($a/R > 0.2$) چقرمگی شکست را محاسبه کرد. ضمناً با استفاده از نمودار شکل (۱۱)، مقدار چقرمگی شکست سنگ مرمر هرسین $K_{IC} = 1.465 \text{ MPa m}^{0.5}$ به دست می آید که مطابقت خوبی با

(1992) ارائه شده بود همخوانی خوبی با نتایج این تحقیق داشت.

۳- با اعمال یک ضریب تصحیح $\beta = 0.133$ در رابطه مربوط به محاسبه طول ترک بحرانی (رابطه ۷) که از طریق تجربی برای سنگ مرمر آزمایش شده در این تحقیق به دست می آید، نشان داده شد که اولاً معیار موجود در این خصوص (رابطه ۱)، کارآیی لازم را نداشته و ابعاد بسیار بزرگی را برای نمونه‌های سنگی پیشنهاد می‌نماید. با وجود این، با در نظر گرفتن ضریب تصحیح ($\beta = 0.133$) می‌توان با استفاده از قطعات کوچک‌تری از جنس سنگ مرمر هرسین به طور مناسبی یک مقدار معتبر و قابل قبول از چقرمگی شکست به دست آورد.

این، با تصحیح انجام شده در ملزومات ابعادی سنگ آزمایش شده نشان داده شد که ابعاد مورد نیاز برای تهیه نمونه آزمایش بسیار کوچک‌تر از ابعاد پیشنهاد شده توسط رابطه ۱ می‌باشد و بنابراین می‌توان با استفاده از قطعات کوچک‌تر سنگی نیز به طور مناسبی یک مقدار معتبر و قابل قبول از چقرمگی شکست سنگ مرمر هرسین به دست آورد.

جمع بندی

۱- قطعه SCB می‌تواند جهت تعیین چقرمگی شکست مواد سنگی مورد استفاده قرار گیرد. با این وجود میزان پراکندگی نتایج آزمایش کمی بیش از حالت‌های معمول می‌باشد.
۲- معیار ارائه شده توسط Barton (1983) برای تعیین ضخامت بحرانی با آنچه در این تحقیق به دست آمده است همخوانی خوبی ندارد ولی معیاری که توسط Whittaker

منابع

آیت‌اللهی مجیدرضا، محمدرضا محمدعلیها، سعید خادمی، "تعیین استحکام کششی مواد سنگی به کمک قطعات دایره‌ای شکل"، پانزدهمین کنفرانس سالانه (بین‌المللی) مهندسی مکانیک ISME2007، ۱۳۸۶.

فاروق حسینی محمد، "درآمدی بر مکانیک سنگ"، انتشارات نشر کتاب دانشگاهی، تهران، ایران، ۱۳۷۸، صفحه ۱۶

- Barton C. C., "Variables in fracture energy and toughness of Rock", Proc. 24th Us Symp. on Rock Mech., The Univ. of California, Berkeley, California, R.E. Goodman & F.E. Heuze (Eds.), 1983, pp. 449-462.
- Chong K. P., Kuruppu M. D., Kuszmaul J. S., "Fracture toughness determination of layered materials", Engng Fract. Mech. 28, 1987, pp. 43-54.
- Chong K. P. and Kuruppu M. D., "New specimen for fracture toughness determination for rock and other Materials", International Journal of Fracture, 26, 1984, pp. 59-62.
- Fowell R. J., Chen J. F., "The third chevron-notch rock fracture specimen-the cracked chevron-notched Brazilian disk", Proc. 31st U.S. Symp. On Rock Mechanics, 1990, pp. 295-302.
- Ingraffea A. R., Schmidt R. A., "Experimental verification of a fracture mechanics model for tensile strength prediction of Indiana limestone. Proc. 19th U.S. Svmp. on Rock Mechanics, 1979, pp. 247-253.
- Khan K., Al-Shayea N. A., "Effect of specimen geometry and testing method on mixed I-II fracture toughness of a limestone rock from Saudi Arabia". Rock Mech. and Rock Eng., 33, 2000, pp.179-206.
- Lim I. L., Johnston I. W., Choi S. K., Boland J. N., "Fracture testing of a soft rock with semi-circular specimens under three-point bending. Part 1 – mode I", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 31, 1994, pp.199-212.
- Schmidt R. A., "Fracture-toughness testing of limestone", Exp. Mech. 16, 1976, pp. 161-167.
- Schmidt R. A., Lutz T. J., "K_{IC} and J_{IC} of Westerly granite-effects of thickness and in-plane dimensions", ASTM STP 678, 1979, pp. 166-182.
- Singh R. N. and Sun G. X., "An investigation into factors affecting fracture toughness of coal measures sandstone", J. Mines, Metals & Fuels, 1990, pp. 111-118.
- Soo-Ho Chang, Chung-In Lee, Seokwon Jeon., "Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed-mode conditions by using disc-type specimens", Engineering Geology, 66, 2002, pp.79-97.

- Sun Z., Ouchterlony F., "Fracture toughness of Stripa granite cores", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 23, 1986, pp. 399-409.
- Sun G., Singh R.N., "A numerical and experimental investigation for determining fracture toughness of Welsh limestone", Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., 31, 1994, pp. 199-212.
- Whittaker B. N., Singh R. N., Sun G. "Rock Fracture Mechanics, Principles, Design and Applications", Developments in Geotechnical Engineering, 71. Elsevier, Amsterdam, 1992.
- Williams M. L., "On the stress distribution at the base of a stationary crack", Journal of Applied Mechanics, 24, 1957, pp. 109-114.