

بررسی عددی و آزمایشگاهی قطعه ترکدار کششی- برشی برای آزمایش چقرمگی شکست مود ترکیبی در مواد سنگی

غلامرضا حسین پور*
ایران و دانشگاه علم و صنعت ایران
rz_mec2005@yahoo.com

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

محمدرضا محمد علیها
ایران و دانشگاه علم و صنعت ایران
mrm_aliha@iust.ac.ir

خلاصه مقاله

شکست مود ترکیبی کششی- برشی یکی از موده‌های شایع و اماندگی و تخریب در توده های سنگی، تونلها و معادن می باشد. رفتار شکست مواد سنگی در چنین حالت بارگذاری با استفاده از روشها و قطعات مناسب آزمایشگاهی بررسی می گردد. در این مقاله، یک قطعه جدید آزمایشگاهی برای بررسی شکست مود ترکیبی کششی- برشی (مود I/II) در مواد سنگی پیشنهاد می گردد. این قطعه، نمونه مثلثی شکل با ترک لبه ای زاویه دار و تحت بارگذاری خمش سه نقطه ای می باشد. هندسه ساده، تهیه و آماده سازی آسان قطعه پیشنهادی، امکان آزمایش با فیکسچرهای متداول موجود، اعمال بار فشاری به جای کششی که برای آزمایش مواد سنگی مناسبتر است، از جمله مزایای اولیه این قطعه می باشد. برای این قطعه ضرایب شدت تنش K_I و K_{II} با استفاده از تعداد زیادی تحلیل اجزاء محدود برای محدوده متنوعی از شرایط بارگذاری محاسبه گردید. براساس تحلیلهای اجزاء محدود انجام شده، با چرخش زاویه ترک نسبت به راستای بار اعمالی، حالت‌های مختلفی از کشش و برش شامل مود I خالص، مود II خالص و ترکیب‌های مختلفی از مود ترکیبی I/II در این قطعه ایجاد می گردد. همچنین نتایج آزمایش های چقرمگی شکست مود ترکیبی انجام شده با استفاده از این نمونه بر روی یک نوع ماده سنگی نشان می دهد که این قطعه از نظر عملی نیز قابلیت مناسبی جهت انجام تستهای شکست و بررسی تجربی رفتار شکست مود ترکیبی کششی- برشی در مواد سنگی دارد. بنابراین قطعه پیشنهادی قطعه مناسبی برای بررسی عددی، تجربی و تئوری شکست در سنگهای دارای ترک و تحت بارگذاری مرکب کششی- برشی می باشد.

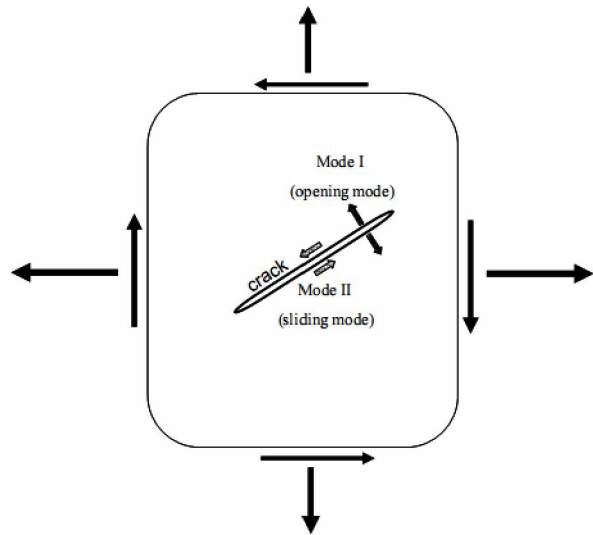
ABSTRACT

Mixed mode tensile-shear fracture is the main cause of brittle fracture and the overall failure in rock masses and rock structures such as tunnels and mines. Mixed mode fracture behavior of rock materials is usually investigated using appropriate test methods and laboratory specimens. In this paper, a new test configuration called the edge crack triangular specimen subjected to three-point bend loading was suggested for investigating the mixed mode fracture toughness of rocks. Simple geometry, convenience of test specimen preparation, easy test set up with common available loading fixtures and application of compressive loads (rather than the tensile loads) which are more suitable for rock materials are some of the primary advantages of this specimen. The stress intensity factors K_I and K_{II} for different loading conditions in this specimen were computed numerically using various finite element analyses. The obtained numerical results showed that by changing the crack inclination angle relative to the loading direction in the suggested configuration, the complete range of mixed mode I/II conditions from pure mode I to pure mode II could be achieved. Also the results of mixed mode fracture toughness experiments conducted on a rock material and using this specimen showed the practical applicability of the suggested specimen for mixed mode tensile-shear fracture studies. Therefore, it can be concluded that the suggested tests sample is a suitable specimen for numerical, experimental and theoretical crack growth study in rock materials.

کلمات کلیدی: سنگ، قطعه جدید آزمایشگاهی، ترک، تحلیل اجزاء محدود، بارگذاری مود ترکیبی، آزمایش چقرمگی شکست.

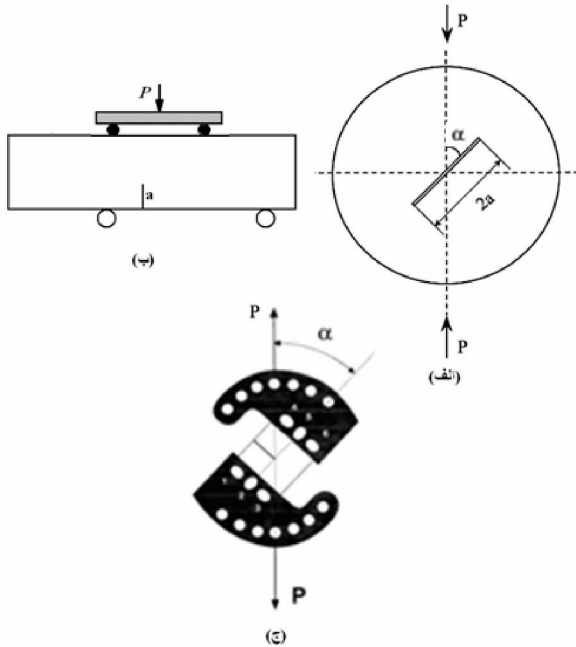
مقدمه

وجود ترک درزه و ناپیوستگی های فراوان از جمله مشخصات ذاتی سنگها به شمار می رود. در نتیجه هنگامی که این توده های سنگی در معرض بارهای مکانیکی یا عوامل محیطی دیگر قرار بگیرند احتمال وقوع شکست از محل همین ناپیوستگی ها وجود دارد. لذا در بسیاری از کاربردهای عملی نظیر تونل سازی و پروژه های معدنی چگونگی رفتار سنگ در برابر رشد ترک و شکست، توسط محققان و طراحان سازه های سنگی مورد توجه قرار می گیرد. با توجه به ماهیت پیچیده حالت بارگذاری بر روی این مواد در شرایط کاری و در طول عمر سرویس دهی و یا جهت قرارگیری ترکها و شکستگی های ایجاد شده در داخل آنها، عموماً شکست سازه به واسطه مشارکت همزمان بارهای کششی و برشی (شکست مود ترکیبی I/II) بوقوع می پیوندد. شکل (۱) این دو مود بارگذاری را نشان می دهد.



شکل ۱: بارگذاری مود ترکیبی I/II در یک قطعه ترکدار.

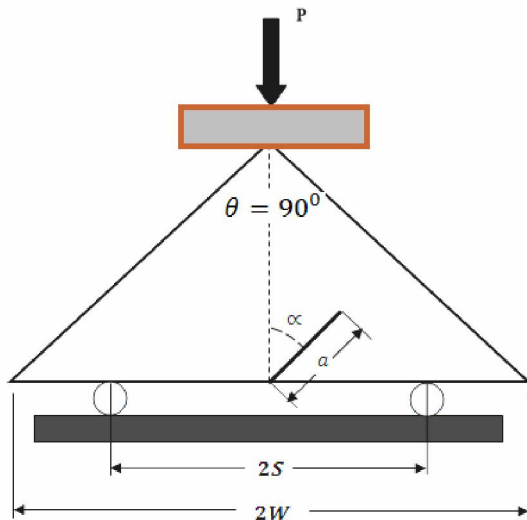
لازمه بررسی استحکام شکست این قطعات، مشخص بودن پارامتری به نام چقرمگی شکست می باشد. این پارامتر که از خواص ماده مورد بررسی است، میزان مقاومت آن را در برابر رشد و گسترش ترک مشخص می نماید. از آنجا که مطالعه تجربی شکست قطعات واقعی هزینه بر و دشوار می باشد، محققان ترجیح می دهند که مطالعات خود را با استفاده از قطعات آزمایشگاهی انجام دهند. البته قطعات مورد استفاده باید به گونه ای طراحی شده باشند که بتوانند بیان یکسانی از حوزه تنش ها و کرنش های ناحیه اطراف ترک در مقایسه با قطعات ترکدار در شرایط کاری واقعی ارائه نمایند. بنابراین مناسب ترین راه اندازه گیری چقرمگی شکست مواد، انجام آزمایش شکست توسط قطعات مناسب آزمایشگاهی است. تاکنون نمونه های مختلفی برای تعیین چقرمگی شکست مود ترکیبی سنگ ها مورد استفاده قرار گرفته است تعدادی از آنها در شکل (۲) نشان داده شده اند (Zipf et al 1986; Chang et al 2002; Ayatollahi et al 2006; Aliha et al 2006; Choi et al 2005). یک قطعه مناسب آزمایشگاهی باید دارای هندسه و بارگذاری ساده بوده و آزمایش آن با فیکسچرها و دستگاه های تست معمولی امکان پذیر باشد. علاوه بر این محدوده کاملی از بارگذاری مود ترکیبی (شامل مود I خالص، مود II خالص و ترکیبهای مختلفی از مود I و II) را ایجاد نماید. در این تحقیق، یک قطعه جدید آزمایشگاهی برای بررسی شکست مود ترکیبی ارائه می گردد. سپس با انجام تحلیلهای اجزاء محدود و نیز آزمایش شکست بر روی این قطعه، قابلیت و توانایی آن مورد بررسی قرار می گیرد. همچنین مزایای این قطعه جدید پیشنهادی نسبت به قطعات استفاده شده در سایر تحقیقات قبلی ذکر می گردد.



شکل ۲: شماتیکی از هندسه و بارگذاری چند قطعه آزمایشگاهی برای بررسی شکست مود ترکیبی الف) دیسک برزیلی ب) تیر با ترک لبه ای تحت خمش چهار نقطه ای ج) قطعه فشرده کششی-برشی

قطعه جدید آزمایشگاهی ترکدار

شکل (۳) تصویر شماتیکی از شرایط بارگذاری و هندسی قطعه جدید آزمایشگاهی پیشنهادی را که نمونه ای مثلی با ترک لبه ای و تحت بارگذاری خمش سه نقطه ای است نشان می دهد.



شکل ۳: قطعه مثلی با ترک لبه ای تحت بارگذاری خمش سه نقطه ای

این قطعه یک صفحه مثلثی متساوی الساقین و زاویه راس 90^0 به قاعده $2W$ و ضخامت t با ترک لبه ای به طول a می باشد که توسط نیروی متمرکز فشاری P تحت بارگذاری خمش سه نقطه ای قرار گرفته است. این قطعه را می توان به سادگی تهیه و تولید نمود و امکان آزمایش و بارگذاری آن نیز با استفاده از دستگاههای

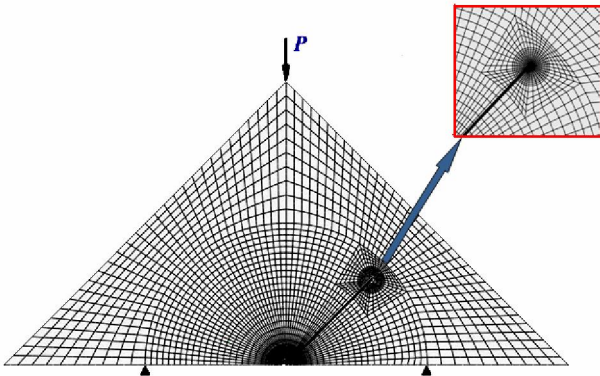
(۵)

$$K_{II} = \frac{P\sqrt{2\pi a}}{2wt} Y_{II} \left(\frac{a}{W}, \frac{S}{W}, \alpha \right)$$

که در آن Y_I و Y_{II} ضرایب هندسی مود I و II می باشند و تابعی از زاویه بارگذاری، فاصله تکیه گاهها و طول ترک می باشند. برای این قطعه ضرایب شدت تنش با استفاده از تحلیلهای اجزاء محدود محاسبه گردید. در بخش بعدی مدل اجزاء محدود و نتایج حاصله ارائه می گردد.

تحلیل اجزاء محدود قطعه پیشنهادی

برای انجام تحلیل های اجزاء محدود، مدل قطعه پیشنهادی در نرم افزار ABAQUS ساخته شده و مورد تحلیل قرار گرفت. نمونه ای از مدل المان محدود این قطعه در شکل (۵) نشان داده شده است. تعداد تقریبی ۳۰۰۰ المان صفحه ای ۸ گره ای برای ساخت این مدلها در نظر گرفته شده و در مدلسازی اطراف نوک ترک از المان های ریزتر و بیشتری استفاده گردیده است. همچنین برای در نظر گرفتن سینگولاریته حوزه تنش- کرنش در نوک ترک المان های سینگولار به کار گرفته شده است. در مدلهای تحلیل شده مقادیر زیر در نظر گرفته شده است: $a = 22.5$ ، $W = 75$ mm، $P = 100$ N و $S = 30$ mm، $t = 16$ mm، $\mu = 0.3$



شکل ۵: مدل اجزاء محدود قطعه آزمایشگاهی پیشنهادی

زاویه ترک از حالت 0^0 با فواصل S^0 ، متغیر در نظر گرفته شد تا ترکیبهای مختلفی از مود I و مود II در قطعه بوجود آید. بدین ترتیب تعداد نسبتاً زیادی تحلیل اجزاء محدود با طول ترک و فاصله تکیه گاه های بارگذاری در نظر گرفته شده و با زوایای مختلف ترک نسبت به راستای بارگذاری انجام شد. شکلهای (۶) و (۷) نتایج حاصل از تحلیلهای اجزاء محدود انجام شده در حالت $a/W = 0.3$ و $S/W = 0.4$ را نشان می دهد. ضرایب شدت تنش با استفاده از روش انتگرال J که در نرم افزار ABAQUS تعریف شده است، به طور مستقیم از خروجی نرم افزار محاسبه گردید.

نتایج تحلیلهای نشان می دهد که با افزایش زاویه ترک از صفر (که متناظر با شرایط مود I خالص است، $K_I \neq 0, K_{II} = 0$)، مقدار K_I کاهش یافته و بر عکس مقدار K_{II} افزایش می یابد و در یک زاویه مشخص حالت مود II خالص ($K_I = 0, K_{II} \neq 0$) نیز بوجود می آید. به عنوان مثال برای شرایط در نظر گرفته شده در تحقیق حاضر ($a/W = 0.3, S/W = 0.4$) این زاویه از نتایج تحلیلهای برابر $\alpha = 52.5^0$ بدست می آید. همانطور که قبلاً نیز اشاره شد حالت $\alpha = 0^0$ نیز متناظر با حالت مود I خالص (کشش خالص) می باشد چراکه در این حالت مقدار ضریب شدت تنش مود II (K_{II}) برابر صفر می باشد. در حالیکه بیشترین مقدار K_I در مود I خالص ($\alpha = 0^0$) اتفاق می افتد بیشترین مقدار K_{II} در زاویه ای حدود $\alpha = 35^0$ ایجاد می گردد.

معمولی و متداول تست کشش- فشار میسر است. هنگامی که زاویه ترک نسبت به راستای عمودی (α) برابر صفر است، شرایط بارگذاری و هندسی نسبت به خط ترک متقارن بوده و بنابراین قطعه در معرض مود I خالص (مود باز شونده لبه های ترک) قرار می گیرد. اما با تغییر زاویه ترک نسبت به راستای بار اعمالی، مود II (مود برشی یا لغزش داخل صفحه لبه های ترک) نیز در تغییر شکل ترک بوجود می آید. لذا ترکیبهای مختلفی از کشش و برش (مود I و مود II) را می توان با تغییر زاویه ترک در نمونه پیشنهادی ایجاد نمود. بنابراین قطعه پیشنهادی برای بررسی رفتار شکست مود ترکیبی در مواد مهندسی دارای ترک، می تواند قطعه مناسبی باشد.

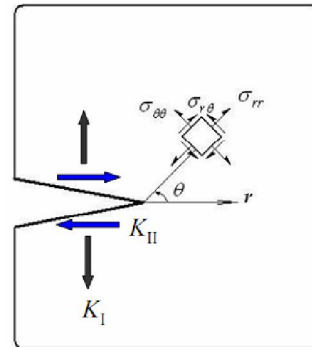
برای مطالعه رفتار شکست قطعات ترکدار بایستی حوزه تنش و کرنش در آنها و خصوصاً در نزدیکی نوک ترک مشخص باشد. در حالت کلی بارگذاری مود ترکیبی I/II، مولفه های تنش الاستیک در اطراف نوک ترک به صورت بسط سری بی نهایت جمله توسط Williams (1957) ارائه شده است. با وجود این در نزدیکی نوک ترک فقط جمله اول این سری ها از اهمیت ویژه ای برخوردارند؛ چرا که در نقاط نزدیک ترک -که تمرکز تنش بسیاری وجود دارد- اثرات سینگولاریته در حوزه تنش نوک ترک ظاهر شده و دیگر جملات، در مقایسه با جمله اول قابل صرف نظر کردن می باشند. از این رو مولفه های تنش در نزدیکی نوک ترک فقط با در نظر گرفتن جمله اول بسط سری ها در مختصات قطبی به شکل زیر خواهد بود.

$$\sigma_{rr} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I (1 + \sin^2 \frac{\theta}{2}) + K_{II} (\frac{3}{2} \sin \theta - 2 \tan \frac{\theta}{2})] + H.O.T \quad (1)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I \cos^2 \frac{\theta}{2} - \frac{3}{2} K_{II} \sin \theta] + H.O.T \quad (2)$$

$$\sigma_{r\theta} = \frac{1}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} [K_I \sin \theta + K_{II} (3 \cos \theta - 1)] + H.O.T \quad (3)$$

که در آن K_I و K_{II} به ترتیب ضرایب شدت تنش مود I و مود II بوده و مرتبط با جملات سینگولار در بسط سری تنش می باشند. همچنین r, θ بیانگر مختصات قطبی نقطه دلخواه مورد نظر از نوک ترک می باشد (شکل ۴). $H.O.T$ نیز نشان دهنده جملات مرتبه بالاتر و غیرتکین بسط سری تنش می باشد.



شکل ۴: مولفه های تنش اطراف نوک ترک در مختصات قطبی و تحت اثر مدهای کششی KI و برشی KII.

بر اساس مطالعات انجام شده توسط محققان مختلف دو پارامتر K_I و K_{II} پارامترهای مهمی هستند که رفتار شکست ترد در بارگذاری مود ترکیبی را کنترل می نمایند (Williams et al. 1972; Finnie et al. 1973; Smith et al. 2001). بنابراین برای بررسی شرایط شکست و تخمین بار بحرانی و چقرمگی شکست قطعات آزمایشگاهی ابتدا لازم است که پارامترهای مذکور در حالت های مختلف مود ترکیبی محاسبه گردد. لذا برای تعیین مقدار کشش و برش در هر حالت بارگذاری (هر زاویه α) بایستی مقادیر ضرایب شدت تنش قطعه مشخص باشد. ضرایب شدت تنش مود I و II (K_I و K_{II}) برای این قطعه از روابط ۴ و ۵ تعیین می گردد.

(۴)

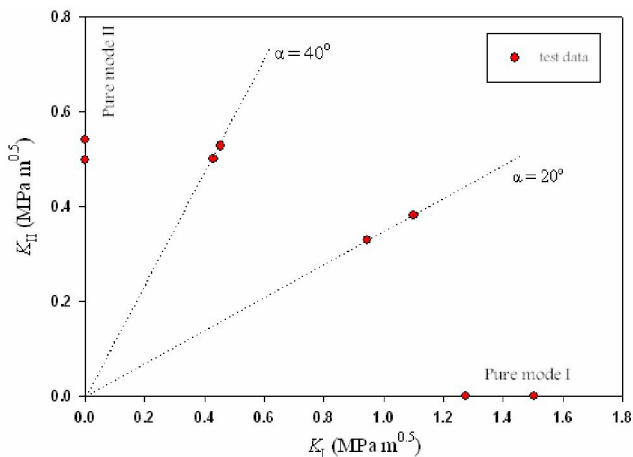
$$K_I = \frac{P\sqrt{2\pi a}}{2wt} Y_I \left(\frac{a}{W}, \frac{S}{W}, \alpha \right)$$

دستگاه با سرعت ثابت 1 mm/min تا شکست کامل توسط دستگاه مورد بارگذاری قرار گرفتند. در حین تست منحنی بار بر حسب جایجایی نمونه ها توسط پردازشگر کامپیوتری دستگاه ثبت گردید شکست تمامی قطعات به صورت ناگهانی از نوک ترک اتفاق افتاد. این منحنی ها تا لحظه شکست کاملاً خطی بوده که نشان دهنده رفتار ترد ماده سنگی نی ریز می باشد. با استفاده از بار شکست بدست آمده برای هر قطعه ضرایب شدت تنش بحرانی K_I و K_{II} به کمک روابط ۴ و ۵ محاسبه گردید. نتایج هر تست شامل زاویه اولیه ترک، بارشکست و ضرایب شدت تنش محاسبه شده، در جدول زیر آورده شده است.

Test No.	Specimen	P_{cr} (kN)	$K_I (MPa\sqrt{m})$	$K_{II} (MPa\sqrt{m})$
1	Pure Mode I	3.63	1.28	0
2	Pure Mode I	4.2	1.5	0
3	Mixed-Mode Loading ($\alpha=20$)	3.4	0.95	0.33
4	Mixed-Mode Loading ($\alpha=20$)	3.9	1.1	0.38
5	Mixed-Mode Loading ($\alpha=40$)	4	0.43	0.5
6	Mixed-Mode Loading ($\alpha=40$)	4.2	0.45	0.53
7	Pure Mode II	5.67	0	0.54
8	Pure Mode II	5.23	0	0.5

جدول ۱: داده های بدست آمده از آزمایش شکست قطعه پیشنهادی ساخته شده از سنگ مرمر نی ریز

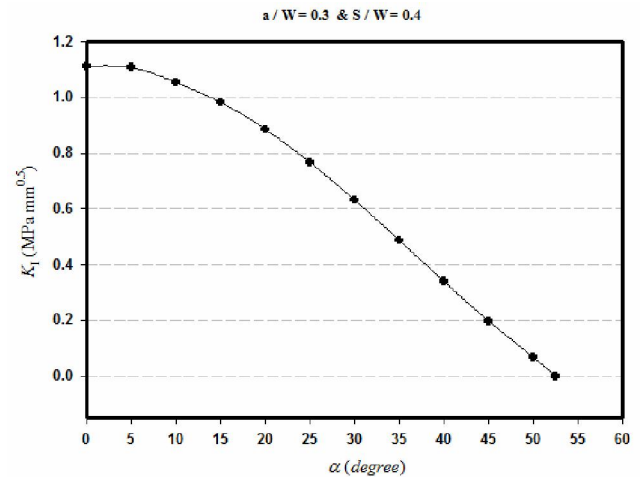
همچنین نتایج حاصل از آزمایش های چقرمگی شکست مود ترکیبی انجام شده در شکل (۸) به صورت منحنی K_{II} بر حسب K_I نشان داده شده است.



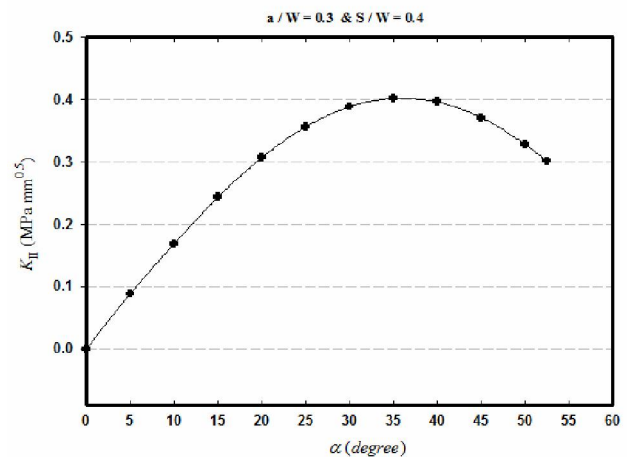
شکل ۸- نتایج حاصل از آزمایش های شکست مود ترکیبی I/II با استفاده از قطعه پیشنهادی و بر روی ماده سنگی نی ریز.

بحث و نتیجه گیری

به عنوان مثال قطعه فشرده کششی- برشی (قطعه ج) در شکل ۱) که توسط محققینی چون Richard (1983) و Arcan (1978) استفاده شده است، برای انجام آزمایش شکست به فیکسچرهای پیچیده بارگذاری نیاز دارد. در این فیکسچرها تعدادی سوراخ تعبیه شده است که می توان قطعه ترکدار را پس از متصل کردن به آن، کشید و بارگذاری نمود. وجود این فیکسچرها باعث بالا رفتن هزینه تستها می گردد. همچنین در صورت وجود عدم دقت کافی در ساخت آنها نتایج تستها نیز با خطای قابل ملاحظه ای همراه خواهد بود. این در حالیست که قطعه ورق مثلثی شکل پیشنهاد شده در این مقاله نیاز به فیکسچرهای پیچیده بارگذاری نداشته و به سادگی با استفاده از دستگاههای معمولی تست فشار قابلیت آزمایش را دارد. نقطه



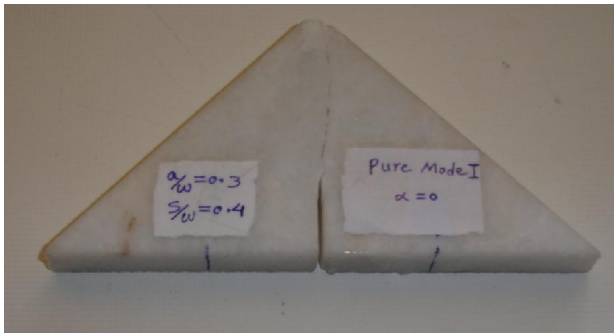
شکل (۶): تغییرات ضریب شدت تنش مود I (K_I) با زاویه ترک α در قطعه جدید پیشنهادی.



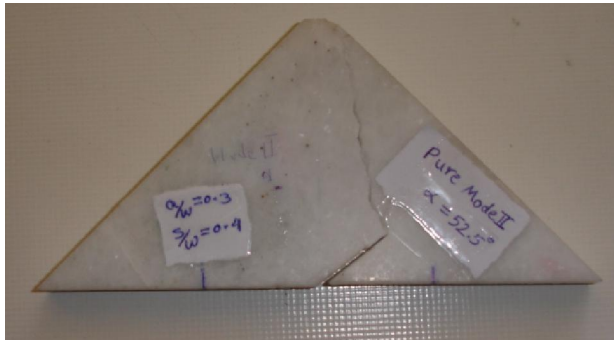
شکل (۷): تغییرات ضریب شدت تنش مود II (K_{II}) با زاویه ترک α در قطعه جدید پیشنهادی.

آزمایش های شکست مود ترکیبی

برای بررسی قابلیت عملی قطعه پیشنهادی تعدادی تست شکست مود ترکیبی در زاویه های مختلف بارگذاری بر روی سنگ مرمر نی ریز انجام شد. ابعاد نمونه های آزمایش و طول ترک مشابه ابعاد در نظر گرفته شده در تحلیلهای اجزاء محدود می باشد. برای ساخت نمونه های آزمایش ابتدا تعدادی نمونه صفحه مثلثی شکل با طول وتر ۱۵ سانتیمتر از یک صفحه نی ریز به ضخامت ۱۶ میلیمتر بریده شد. سپس با استفاده از واتر جت ترک هایی به طول ۱۶ میلیمتر در وسط لبه وتر مثلث ها ایجاد گردید، عرض شکاف ایجاد شده توسط واتر جت برابر ۲ میلیمتر بوده و در نهایت با استفاده از تیغه نازک اهر مویی به ضخامت ۰.۵ میلیمتر نوک شیارهای موجود تیز شد تا طول ترک نهایی ۲۲.۵ میلیمتر گردد. برای بارگذاری قطعات نیز با استفاده از یک صفحه دیسکی و دو تکیه گاه نقطه ای قطعات تحت فشار قرار گرفته و تا مرز شکست تحت بارگذاری خمش سه نقطه ای قرار گرفتند. برای بررسی حالت های مختلف مود ترکیبی زاویه ترک نسبت به راستای بارگذاری برابر 0° (مود I خالص)، 20° ، 40° ، 52.5° (مود II خالص)، در نظر گرفته شد. تستهای شکست با استفاده از دستگاه تست کشش فشار Amsler/Zweck به ظرفیت 500 KN انجام شد. نمونه ها پس از قرار گرفتن داخل فیکسچر خمش سه نقطه ای با فاصله تکیه گاههای



(الف)



(ب)

شکل ۹ - مسیر شکست قطعه پیشنهادی در حالت (الف) مود I و (ب) مود II.

بنابراین می توان چنین نتیجه گیری کرد که قطعه پیشنهاد شده در این مقاله به سبب دارا بودن مزایایی از قبیل هندسه ساده، تولید و ساخت آسان، امکان بارگذاری و آزمایش با دستگاههای متداول تست، نحوه شکست مناسب نمونه ها و توانایی ایجاد تمامی حالت های بین مود I خالص و مود II خالص قطعه مناسبی برای بررسی شکست مود ترکیبی در مواد ترکدار می باشد.

نتایج

۱. در این مقاله یک قطعه جدید آزمایشگاهی برای بررسی رفتار شکست قطعات ترکدار در حالت بارگذاری مود ترکیبی I/II معرفی گردید.
۲. ساخت و آماده سازی آسان نمونه پیشنهادی برای انجام تست، توانایی ایجاد تمام ترکیب های بارگذاری مود I و مود II و امکان بارگذاری و آزمایش آن با فیکسچرها و دستگاه های معمولی تست فشار از جمله مزایای این قطعه جدید به شمار می روند.
۳. نتایج آزمایش های شکست انجام شده با استفاده از این نمونه، قابلیت عملی این قطعه برای بررسی رفتار شکست مواد ترکدار را نشان داد.

مراجع

Aliha, M.R.M., Ayatollahi, M.R., and Ashtari, R., 2006, Mode I and mode II fracture toughness testing for a coarse grain marble, *Applied Mechanics and Materials*, 5-6, 181-188.

Arcan, M., Hashin, Z., and Volosnin, A., 1978, A method to produce uniform plane-stress states with application to fibre-reinforced materials, *Experimental Mechanics*, 18, 141-146.

Ayatollahi, M.R., Aliha M.R.M., 2007, Wide range data for

ضعف دیگری که در مورد برخی از قطعات آزمایشگاهی وجود دارد این است که بعضی از قطعات نظیر قطعه تیر ترکدار تحت بارگذاری خمش چهار نقطه ای (قطعه (ب) در شکل ۱) تنها برای ایجاد حالتها و ترکیب های خاصی از مود I/II کار آیی داشته و مثلا قادر به ایجاد حالت مود II خالص (برش خالص) نمی باشد. اما تحلیلهای اجزاء محدود انجام شده در این تحقیق نشان داد که با چرخش زاویه ترک از صفر تا حدود ۵۲/۵ درجه، تمام حالت های مختلف مود ترکیبی (از مود I خالص تا $K_{II} = 0$ تا مود II خالص $K_I = 0$) در قطعه ورق مثلثی ترکدار با ترک لبه ای و تحت بارگذاری فشاری بوجود می آید. بنابراین قطعه پیشنهادی می تواند قطعه مناسبی برای آزمایش های شکست مود ترکیبی در کل ناحیه مود I تا مود II باشد. از جمله دیگر مزایای این قطعه حساسیت کمتر آن به زاویه بارگذاری (α) می باشد. در این قطعه فاصله میان مود I خالص (کشش خالص) تا مود II خالص (برش خالص) از زاویه $\alpha = 0^\circ$ تا $\alpha > 50^\circ$ متغیر می باشد. اما در قطعاتی چون دیسک با ترک مرکزی (قطعه (الف) در شکل ۱)، زاویه بین مود I خالص تا مود II خالص حدودا برابر $\alpha = 25^\circ$ (Ayatollahi et al., 2007) می باشد. بنابراین عدم تنظیم دقیق احتمالی در زاویه بارگذاری در قطعه جدید پیشنهادی تاثیر کمتری بر نتایج حاصل از آزمایشات شکست خواهد داشت.

مقدار متوسط چقرمگی شکست مود I ماده سنگی نی ریز حاصل از تستهای انجام شده در حدود $1.39 \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ بدست آمد که این مقدار در محدوده گزارش شده برای چقرمگی شکست نی ریز می باشد (Saghafi et al., 2010). همانطور که از شکل (۸) مشاهده می گردد برای حالت های مختلف مود ترکیبی، داده های آزمایشگاهی حاصل از تستهای شکست نزدیکی خوبی به هم داشته که این موضوع قابلیت تکرار پذیری آزمایشات چقرمگی شکست را با استفاده از قطعه پیشنهاد شده نشان می دهد.

در هنگام تستها مشاهده گردید که در شرایط بار حدی، شروع شکست از نوک ترک و بسته به زاویه بارگذاری شکست در قطعه به صورت ناگهانی و در مسیری خاص ایجاد می شود. در حالی که در مود I بارگذاری شکست در امتداد راستای ترک اولیه اتفاق می افتد در حالت بارگذاری مود ترکیبی و مود II خالص، مسیر شکست از راستای اولیه منحرف و در امتداد یک مسیر منحنی شکل ادامه می یابد. به عنوان مثال مسیر شکست قطعه در دو حالت مود I خالص و مود II خالص در شکل (۹) نمایش داده شده است. نحوه صحیح شکست نمونه ها از محل نوک ترک و نه از نقاطی نظیر محل اعمال بار یا تکیه گاهها نیز نشان داد که این قطعه پیشنهادی در عمل می تواند برای انجام آزمایش های شکست مود ترکیبی مورد استفاده قرار گیرد.

Richard H.A., and Benitz, K., 1983, A Loading Device for the Creation of Mixed Mode in Fracture Mechanics, *International Journal of Fracture*, 22, R55-R58.

Saghafi, H., Ayatollahi, M.R., Sistaninia, M., 2010, A modified MTS criterion (MMTS) for mixed-mode fracture toughness assessment of brittle materials *Materials Science and Engineering: A*, In Press, Corrected Proof.

Williams, M.L., 1957, On the stress distribution at the base of a stationary crack, *Journal of Applied Mechanics*, 24,109-114.

Williams, J.G., Ewing P.D. 1972. Fracture under complex stress - the angled crack problem. *International Journal of Fracture*; 8. pp. 441-446.

Zipf, R.K., and Bieniawski, Z.T., 1986, Mixed mode testing for fracture testing of coal based on critical energy density, *Proceedings of 27th US symposium On Rock. Mechanics*, 16-

Smith, D.J., Ayatollahi, M.R. and Pavier, M.J. 2001. The role of T-stress in brittle fracture for linear elastic materials under mixed mode loading. *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, 24: pp.137-150.

crack tip parameters in two disc-type specimens under mixed mode loading *Computational Materials Science*, 38, 660-670.

Ayatollahi, M.R., Aliha, M.R.M. and Hasani, M.M., 2006, Mixed mode brittle fracture in PMMA - An experimental study using SCB specimens, *Materials Science and Engineering A*, 417 (1-2), 348-356

Chang, S.H., Lee, C.I., and Jeon, S., 2002, Measurement of rock fracture toughness under modes I and II and mixed-mode conditions by using disc- type specimen, *Engineering Geology*, 66, 79-97.

Choi, S.R., Zhu, D., and Miller, R.A., 2005, Fracture behavior under mixed-mode loading of ceramic plasma-sprayed thermal barrier coatings at ambient and elevated temperatures, *Engineering Fracture Mechanics*, 72(13), 2144-2158.

Finnie, I., Saith, A. (1973). A note on the angled crack problem and the directional stability of cracks. *International Journal of Fracture*; 9: 484-486.