

یادداشت تحقیقاتی

پیشنهاد چقرمگی شکست مود ترکیبی سنگ بالاست برای کنترل کیفیت مصالح بالاستی

رامین حیدری^{۱*}، شروان عطایی^۲، ایمان فرستاده^۳

۱- دانشجوی دکتری مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- استادیار مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

۳- دانشجوی دکتری مهندسی راه آهن، دانشگاه علم و صنعت ایران

r_heidary@rail.iust.ac.ir

تاریخ پذیرش: [۹۵/۰۸/۱۳]

تاریخ دریافت: [۹۵/۰۲/۰۵]

چکیده

دانه‌های بالاست دارای ترک‌های متعددی است که تحت بار ناوگان عبوری قرار دارد و از دیدگاه مکانیک شکست وقتی ضریب شدت تنش در نوک ترک به مقدار چقرمگی شکست مود ترکیبی برسد رشد ترک شروع، که باعث خرد شدن دانه‌های بالاست می‌شود. خرد شدن و سایش دانه‌های بالاست عمده‌ترین دلیل ایجاد آلودگی در بالاست است که مهمترین منشا ایجاد عیوب مختلف بویژه عیوب هندسی در خط ریلی است. بنابراین پیشنهاد می‌شود که تعیین چقرمگی شکست مود ترکیبی I و II با نمونه نیم دیسک تحت خمش سه نقطه ای به مجموعه آزمایش‌ها کنترل کیفیت بالاست در نشریه ۳۰۱ راه آهن اضافه شود. در نهایت چقرمگی شکست دو نمونه سنگ بالاست معدن گدوک و انجیلوند به کمک آزمایشگاهی و عددی محاسبه شده و با استفاده از معیارهای شکست مود ترکیبی، پوش گسیختگی مود I و II دو نمونه سنگ بالاست مقایسه شده است.

واژگان کلیدی: چقرمگی شکست سنگ، بالاست، نمونه نیم دایره تحت بار خمشی.

۱- مقدمه

تشکیل شده است و عملکرد سیستم خط آهن از اندرکنش اجزای سیستم در واکنش به بار قطار حاصل می‌شود. یکی از بخش‌های زیرسازی راه آهن لایه بالاست نام دارد که لایه‌ای ۳۰ سانتی‌متری از مصالح سنگی شکسته با قطر متوسط ۳۰ تا ۶۰ میلی‌متر است و مجموعه تراورس‌ها و ریل بر روی آن قرار می‌گیرد. از جمله وظایف بالاست انتقال بار قطار

از میان سیستم‌های حمل و نقل موجود، سیستم حمل و نقل ریلی دارای امتیازات ویژه‌ای از جمله ظرفیت زیاد جابه‌جایی بار و مسافر، ایمنی سیر، صرفه اقتصادی و ... است که به همین دلیل توجه خاصی به آن می‌شود. ساختار سازه‌ای خطوط راه آهن از دو بخش اصلی روسازی و زیرسازی

مود III سطوح ترک در جهتی موازی با لبه‌ی جلویی ترک نسبت به هم حرکت می‌کند (مود پارگی^۳) شکل (۱). این تغییرشکل‌ها می‌توانند در هر ترکیبی با هم رخ دهند که در این صورت مود ترکیبی نامیده می‌شود.

شکل ۱. مودهای پایه‌ی شکست. (۱) مود بازشدگی. (۲) مود

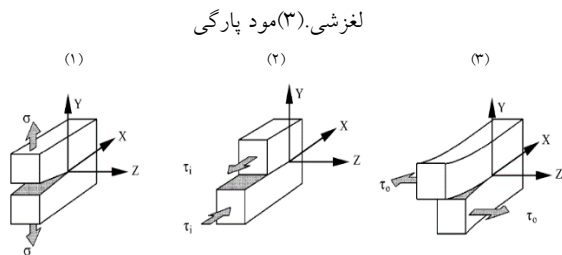


Fig. 1. Three modes. (1) opening mode. (2) shearing mode (3) tearing mode

برای تعیین چقرمگی شکست سنگ، مدل‌سازی‌های عددی و روش‌های آزمایشگاهی مختلفی توسط پژوهشگران انجام شده است که به بعضی از آنها در اینجا اشاره می‌شود. Xeidakis و همکاران رشد ترک در سنگ مرمر را با استفاده از نمونه‌های خمش سه نقطه غیرمستقران و تحت شرایط بارگذاری مود ترکیبی بررسی نمودند [3]. Lim و دیگران نیز از همین نمونه‌ها برای بررسی رشد ترک در نمونه‌های ماسه سنگ استفاده کردند [4]. Jia و دیگران از نمونه‌های دیسکی با ترک مرکزی^۴ (CCCD) سنگ هموزن استفاده نموده و مود II را در این نمونه‌ها مورد بررسی قرار دادند [5]. علیها و دیگران با استفاده از نمونه‌های دیسک نیم دایره^۵ (SCB) به بررسی مودهای شکست I و II و مود ترکیبی سنگ مرمر، آسفالت و پلیمر پرداخته‌اند [6-8]. علیها و آیت‌اللهی چقرمگی شکست سنگ مرمر سفید را با استفاده از نمونه‌های دیسک برزیلی با شکاف چورون^۶ در مودهای شکست I و II تعیین نمودند [9].

در این مقاله ابتدا به اهمیت پارامتر چقرمگی شکست در بحث استخراج، خردایش و بهره‌برداری سنگ بالاست پرداخته شده سپس با استفاده از روش آزمایشگاهی و عددی در نرم افزار

به لایه‌های تحتانی، استهلاک ضربات و ارتعاشات حاصل از وسیله نقلیه، زهکشی آبهای سطحی و ... است. کیفیت بالاست بستگی به جنس مصالح به کار رفته و تراکم آنها دارد. مصالح بالاست برای انجام وظایف خود باید دارای ویژگی‌های از جمله مقاومت در برابر خرد شدگی، سایش و هوازگی و ... باشد [1]. برای کنترل کیفیت بالاست در نشریه ۳۰۱ راه‌آهن آزمایش‌هایی پیشنهاد شده است که بعد از انجام این آزمایش‌ها روی بالاست، نتایج به دست آمده با مقادیر مجاز مقایسه می‌شود و کیفیت بالاست کنترل می‌شود.

آلودگی بالاست مهمترین منشا ایجاد عیوب مختلف به ویژه عیوب هندسی در خط ریلی است. منظور از آلودگی، تجمع ذرات ریزدانه در لایه بالاست است که این مساله به کارایی بالاست لطمه می‌زند. خرد شدن بالاست عمده‌ترین دلیل ایجاد آلودگی در بالاست است. توده‌های سنگی مورد استفاده در تهیه بالاست دارای درزه و شکستگی است و هنگامی که بالاست تحت بارهای وارد از طرف ناوگان عبوری قرار می‌گیرد احتمال رشد ترک از همین درزها و در نهایت شکست و خرد شدن دانه‌های بالاست را به همراه دارد.

سازکارهای رشد ترک از دیدگاه میکروسکوپی نشان می‌دهند که شکست ترد در اثر جدایش پیوندهای مولکولی نوک ترک بوجود می‌پیوندد. برای شکسته شدن پیوندها باید تنش‌های کششی نوک ترک بر اثر اعمال بارگذاری، به حد بحرانی برسد. مکانیک شکست بیان می‌کند که شکست ناپایدار زمانی رخ می‌دهد که یکی از ضرایب شدت تنش (K_I) یا مود ترکیبی از آنها، به مقدار بحرانی (K_{Ic}) برسد. این مقدار بحرانی، K_{Ic} چقرمگی شکست نامیده می‌شود و نشان دهنده توانایی ذاتی ماده برای تحمل میدان تنش معین در نوک ترک و جلوگیری از رشد ترک کششی است. ضریب شدت تنش بحرانی متناظر با سه مود پایه‌ی جابه‌جایی سطح ترک به ترتیب با K_{Ic} ، K_{IIc} و K_{IIIc} مشخص می‌شود [2].

در مود I سطوح ترک در جهت عمود بر صفحه ترک از هم جدا می‌شود (مود بازشدگی^۱)، در مود II سطوح ترک در جهتی عمود بر لبه‌ی جلویی ترک روی هم می‌لغزد (مود لغزشی^۲) و در

3 Tearing mode
4 Centre Cracked Circular Disc
5 Semi Circular Bend
6 Chevron Notched

1 Opening mode
2 Sliding mode

دست آورد [10].

Kim با انجام ۱۲ انفجار در ۴ معدن مختلف سنگ در نهایت رابطه‌ای تجربی برای تعیین انرژی ویژه انفجار سنگ با چقرمگی شکست پیشنهاد نموده است. در رابطه عنوان شده به وسیله Kim مقدار انرژی ویژه انفجار با توان چهارم چقرمگی شکست سنگ ارتباط مستقیم دارد. بنابراین با استفاده از رابطه بیان شده می‌توان در استخراج معادن بالاست با مصرف انرژی کمتری به بازدهی بالاتری در بحث استخراج سنگ رسید [11].

همان‌گونه که عنوان شد بعد از استخراج سنگ از معدن بالاست، برای استفاده باید آن را به ابعاد استاندارد مورد نیاز برای خطوط ریلی تبدیل کرد که برای رسیدن به این هدف از سنگ‌شکن‌های طراحی شده برای این منظور استفاده می‌شود. پارامترهای مختلفی از جمله انرژی مصرفی برای خردایش سنگ، تناژ ورودی، ابعاد مورد نیاز بعد از خردایش و ... برای طراحی سنگ شکن لازم است. یکی از مهمترین پارامترهای مورد نیاز برای طراحی سنگ شکن انرژی مصرفی برای خردایش سنگ است. پژوهش‌های مختلفی برای یافتن ارتباط بین چقرمگی شکست و انرژی مصرفی برای خردایش سنگ انجام شده است که نشان دهنده اهمیت این پارامتر بر انرژی مصرفی برای خردایش سنگ است.

هنگامی که تکه‌های سنگ تحت بار قرار می‌گیرند خواص ذاتی سنگ مانند چقرمگی شکست، شکست در سنگ را کنترل می‌کنند [12]. از آنجایی که مقدار انرژی لازم برای خردایش به نوع بارگذاری و الگو ترکها مرتبط است بنابراین باید رابطه‌ای بین این پارامترها و چقرمگی شکست وجود داشته باشد. Donovan رابطه بین چقرمگی شکست و انرژی مصرفی برای خردایش سنگ پیشنهاد کرده که با مقادیر واقعی به دست آمده از آزمایش‌ها همخوانی خوبی را نشان می‌دهد. همچنین Donovan نشان داد که چقرمگی شکست نسبت به پارامترهای دیگر سنگ، مانند مقاومت تک محوره، مدول یانگ، ارتباط قوی‌تری با انرژی مصرفی برای خردایش سنگ دارد [13].

Korman در مطالعه خود ابتدا ویژگی‌های مکانیکی

آبکوس چقرمگی شکست دو نوع سنگ بالاست مورد استفاده در خطوط راه آهن ایران با استفاده از نمونه‌های SCB تعیین شده است. در شکل (۲) روند انجام پژوهش نشان داده شده است.

شکل ۲. فلوچارت روند پژوهش

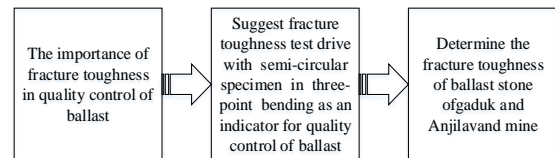


Fig. 2. Research process flowchart

۲- اهمیت چقرمگی شکست بالاست به عنوان پارامتر کنترل کیفی

برای تهیه بالاست مورد استفاد در راه آهن ابتدا بالاست از معدن استخراج شده سپس به وسیله سنگ شکن آن را خرد کرده و به ابعاد استاندارد برای خطوط ریلی در آورده و در نهایت برای استفاده در خط به مکان مورد نظر انتقال داده می‌شود.

از آنجایی که سنگ بالاست معمولاً دارای مقاومت بالا است استخراج آن از معدن به صورت چالزنی و انفجار انجام می‌شود. خردایش سنگ توسط انفجار تاثیر به سزایی در هزینه های چالزنی، بارگیری، و سنگ شکنی دارد. خردایش سنگ به فاکتورهای زیادی از جمله ویژگی‌های توده سنگ، پارامترهای هندسی چال و نوع ماده منفجره بستگی دارد. مدل‌های ریاضی و تجربی متعددی برای تعیین فاصله چال‌ها و انرژی ویژه انفجار برای سنگ‌ها برحسب چقرمگی شکست سنگ پیشنهاد شده است که از آن جمله می‌توان به رابطه پیشنهاد شده به وسیله ارشدنژاد اشاره کرد.

ارشدنژاد سه مدل ریاضی براساس تحلیل تنش و مکانیک شکست برای تعیین فاصله چال‌ها در آتشکاری معادن را مورد بررسی قرار داد. با توجه به نتایج به دست آمده تعیین فاصله چال‌ها به وسیله چقرمگی شکست سنگ همخوانی خوبی با مقادیر تعیین شده به وسیله روش‌های دیگر دارد و نگارنده پیشنهاد می‌کند در نظر گرفتن چقرمگی شکست سنگ در بحث چالزنی و انفجار مفید بوده و با انجام پژوهش‌ها در این زمینه می‌تواند نتایج دقیقتری به

تعیین کیفیت بالاست که در نشریه ۳۰۱ عنوان شده است اضافه شود. چرا که این پارامتر می‌تواند به عنوان معیاری برای کیفیت بالاست در زمان بهره‌برداری و همچنین پارامتری مهم در بحث استخراج و خردایش بالاست باشد.

۳- تعیین چقرمگی شکست نمونه سنگ بالاست

۳-۱- نمونه‌های SCB

انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1988) سه روش برای تعیین چقرمگی شکست سنگ با استفاده از نمونه‌های مبتنی بر مغزه پیشنهاد داده که عبارتند از [16]:

- میله‌ی کوتاه^۱ (SR)
- خمش چورون^۲ (CB)
- دیسک برزیلی با شکاف چورون^۳ (CCNBD)

هر کدام از روش‌های عنوان شده محدودیت‌هایی دارند که از آن جمله می‌توان به تجهیزات پیچیده برای تنظیم و بارگذاری نمونه، روش پیچیده‌ی آماده‌سازی نمونه برای این روش‌ها و ... اشاره کرد. به همین دلیل، اغلب تحقیقات برای چقرمگی شکست سنگ، به سمت روش‌های که به مراتب، آماده‌سازی نمونه آسان‌تر است سوق پیدا کرده است.

نمونه SCB توسط Lim و همکارانش برای تعیین چقرمگی شکست مود I نمونه‌های سنگ رس در سال ۱۹۹۴ مورد استفاده قرار گرفت. سپس همین محقق از نمونه‌های مشابه برای تعیین چقرمگی شکست مود II استفاده نمود. از دلایل پیشنهاد این نمونه می‌توان به راحتی ساخت نمونه و دستگاه آزمایشگاهی نسبتاً ساده برای انجام آزمایش اشاره نمود.

شکل ۳. شمایی از روند تهیه نمونه SCB [4]

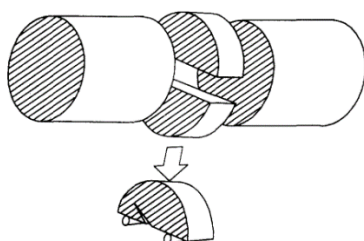


Fig. 3. Schematic of process sample preparation[4]

1 Short Rod

2 Chevron Bend

3 Cracked Chevron Notched Brazilian Disc

مقاومت فشاری، مقاومت کششی، سختی، مدول بالک و چقرمگی شکست چند نمونه سنگ را تعیین کرده سپس انرژی لازم برای خردایش آنها را اندازه‌گیری کرده است. در نهایت وابستگی انرژی مصرفی به هر یک از پارامترها تعیین شده است. طبق نتایج به دست آمده بعد از مقاومت فشاری نمونه‌های سنگ، چقرمگی شکست بیشترین تاثیر را روی میزان انرژی مصرفی برای خردایش سنگ دارد [14].

بعد از کنترل کیفیت بالاست با توجه به استانداردهای موجود، در زیرسازی خطوط بالاستی از آن استفاده می‌شود. با عبور ترافیک از خطوط بالاستی و نیروهای اعمالی، ابعاد ذرات بالاست در اثر سایش و خردشدگی تغییر می‌کند و با افزایش میزان ریزدانه‌ها آلودگی بالاست افزایش می‌یابد. این امر باعث کاهش خاصیت ارتجاعی خط و نشست‌های قابل توجه‌ای در طول خط می‌شود. این عیوب موجب کاهش کیفیت عبور، افزایش نیروهای دینامیکی، افزایش مشکلات محیطی، زوال سریعتر اجزا خط و ... می‌شود. بنابراین تعمیر و نگهداری این لایه از اهمیت بالایی برخوردار است. آمار فعالیت‌های نگهداری در کشور نشان می‌دهد حدود ۶۰ درصد کل فعالیت‌های تعمیر و نگهداری مربوط به لایه بالاست است [15]. از آنجایی که تعمیر و نگهداری بالاست نیازمند صرف هزینه و زمان زیاد است بنابراین بررسی مقاومت بالاست در برابر خردشدگی، که یکی از دلایل اصلی آلودگی بالاست است، از اهمیت زیادی برخوردار است. قطعات سنگی و بتنی در کشش ضعیف بوده و در بیشتر موارد شکست قطعات سنگی و بتنی به واسطه اعمال بارهای کششی و یا مود بازشونده ترک به وقوع می‌پیوندد بنابراین برای بررسی استحکام شکست دانه‌های بالاست لازم است چقرمگی شکست آن در مود I و II یا مود ترکیبی این دو مورد بررسی قرار گیرد.

با توجه به کاربردهای اساسی چقرمگی شکست در بحث استخراج، خردایش و بهره‌برداری که توضیح داده شد در نظر گرفتن این پارامتر به عنوان معیاری برای سنجش کیفیت بالاست امر مهمی است. پس پیشنهاد می‌شود چقرمگی شکست سنگ بالاست نیز به لیست آزمایش‌های

شکل ۴. روند انجام کارهای آزمایشگاهی و مدلسازی نمونه SCB برای تعیین چقرمگی شکست

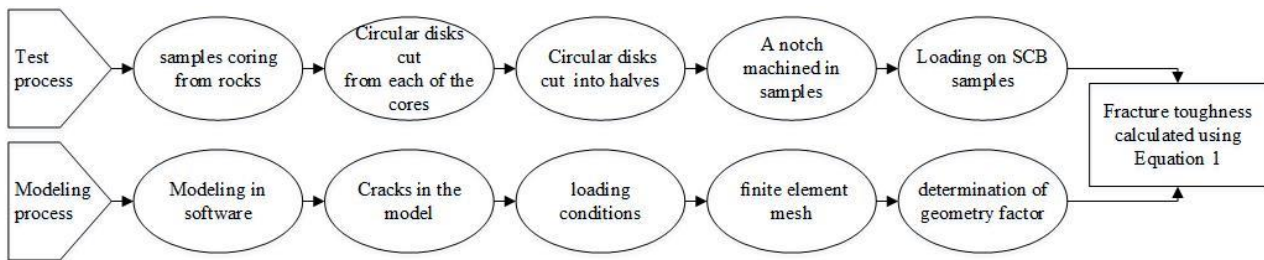


Fig. 4. Laboratory work and modeling process

$$K_I = \sigma_0 \sqrt{\pi a Y_I} \quad \beta = 0 \quad , \quad \sigma_0 = \frac{P}{2RB} \quad (1)$$

$$K_{II} = \sigma_0 \sqrt{\pi a Y_{II}} \quad \beta > 0$$

β جهت یابی ترک نسبت به راستای بارگذاری، Y_I, Y_{II} به

ترتیب ضریب شدت تنش نرمالیز شده مود I و مود II، K_I, K_{II} ضریب شدت تنش مود I و مود II و a طول ترک است. σ_0 نیز به صورت نشان داده شده تعیین می شود که در آن P بار شکست، R شعاع نمونه و B ضخامت نمونه است [16].

شکل ۶. نمونه های سنگ مورد آزمایش (الف) سنگ معدن گدوک

(ب) سنگ معدن انجیلواند

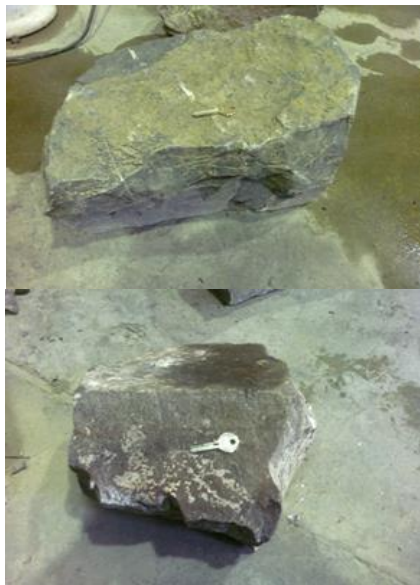


Fig. 6. Rock samples tested. (a)Gaduk mine. (b)Anjilavand mine

نمونه های استفاده شده برای تعیین چقرمگی شکست در این مقاله دو نمونه سنگ بالاست مورد استفاده در خطوط بالاستی راه آهن ایران است.

برای تهیه نمونه، از مغزه های گرفته شده از بلوک سنگی، دیسک های دایره ای با ضخامت مشخص استخراج می شود. برای اطمینان از ضخامت یکنواخت دیسکها، سطح آنها صیقل داده شده و سپس در امتداد قطر به دو نیمه ی برابر تقسیم می شود. یک خط شعاعی در مسیر مورد نیاز برای بارگذاری علامت گذاری شده و سپس یک شکاف با طول مورد نیاز در امتداد این خط به وسیله یک سیم برش ایجاد می شود.

همان گونه که در شکل (۴) نشان داده شده است برای تعیین چقرمگی شکست، ابتدا ضریب شدت تنش نرمالیز شده از طریق معادله ی ۱ با استفاده از مدلسازی عددی محاسبه می شود. بدین صورت که، یک مدل با هندسه بیان شده را تحت بار واحد قرار داده و K را با استفاده از مدل سازی عددی بدست آورده و سپس با قرار دادن در معادله ۱، ضریب شدت تنش نرمالیز شده محاسبه می شود.

شکل ۵. شمای بارگذاری نمونه SCB [4]

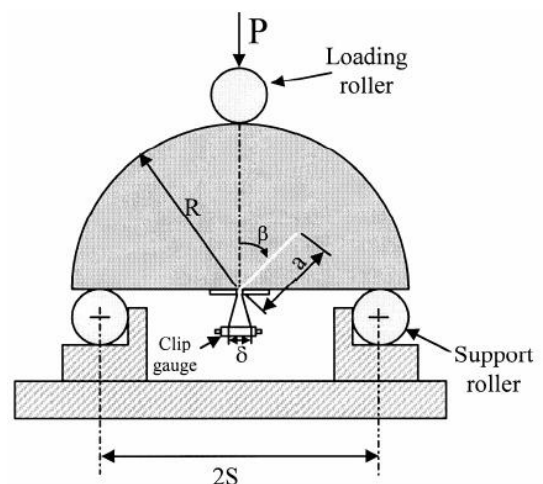


Fig. 5. Schematic of sample loading[4]

جدول ۱. مشخصات سنگ‌های مورد آزمایش

Rock types	Outward characteristics	Mineralogy characteristics	Mechanical properties					
			σ_c (kg / cm ²)		σ_t (kg / cm ²)	Water absorption	E (GPa)	ν
			Saturation	Dry				
Gaduk (Limestone)	Dark gray. Massive and dense. With veine the calcite	The fine particles of calcium carbonate with small amounts of clay minerals	824	1262	68	0.2	32	0.26
Anjilavand (Andesite)	Red, Massive and dense	Porphyritic texture with Plagioclase, and Amphibolite trapped	828	1372	79.3	0.5	40	0.28

Table 1. properties of rocks used for laboratory tests

ابتدا به وسیله دستگاه مغزه‌گیری از هر کدام از نمونه‌های سنگ مغزه‌هایی به قطر ۷ سانتی‌متر و به طول تقریباً ۳۰ سانتی-متر گرفته شد. طبق نتایج به دست آمده از Lim و دیگران [4] روی نمونه‌هایی با ضخامت ۱۸/۲ تا ۴۸/۳ میلی‌متر مشاهده شد که ضخامت نمونه تاثیر چندانی روی چقرمگی شکست سنگ ندارد که با نتایج به دست آمده به وسیله K. Khan و Shayea [17] که در شکل (۷) نشان داده شده است، نیز همخوانی دارد. بنابراین در این مقاله دیسک‌هایی با ضخامت ۳۰ میلی‌متر از مغزه‌ها تهیه شده است. با استفاده از دو گونیا عمود بر هم وسط پلاک‌ها مشخص شده سپس نمونه‌ها از محل تعیین شده به دو نیم دیسک تقسیم شد. بعد از ساخت نیم دیسک‌ها محل قرار گیری ترک در وسط نیم دیسک با خط‌کش مشخص شده سپس به وسیله تیغه‌ای با ضخامت ۱ میلی‌متر شکاف ترک در نمونه ایجاد شده است. در نهایت با استفاده از اره با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر انتهای شکاف تیز شده است.

شکل ۸. نمونه های SCB تهیه شده از دو نمونه سنگ



Fig. 8. SCB specimens for laboratory tests

نمونه اول سنگ بالاست معدن گدوک است که در استان تهران و ۱۰ کیلومتری جاده فیروزکوه قرار گرفته و جنس آن از نوع سنگ آهک و کانی غالب تشکیل دهنده آن کلسیت است. نمونه دوم سنگ بالاست معدن انجیل‌آوند است که در ۲۵ کیلومتری شهرستان ساوه قرار گرفته و جنس سنگ آندزیت و کانی‌های عمده تشکیل دهنده آن پلاژیوکلاز، آمفیبولیت است. مشخصات مکانیکی، کانی شناسی و ظاهری هر کدام از نمونه‌ها در جدول (۱) آمده است. در این جدول، σ_c مقاومت فشاری، σ_t مقاومت کششی، E مدول الاستیسیته و ν ضریب پواسون نمونه‌ها است. در شکل (۶) نمونه‌های اولیه برای گرفتن مغزه نشان داده شده‌اند.

شکل ۷. تاثیر ضخامت نمونه بر چقرمگی شکست [17]

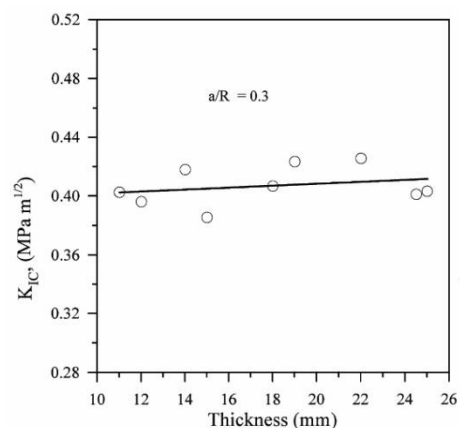


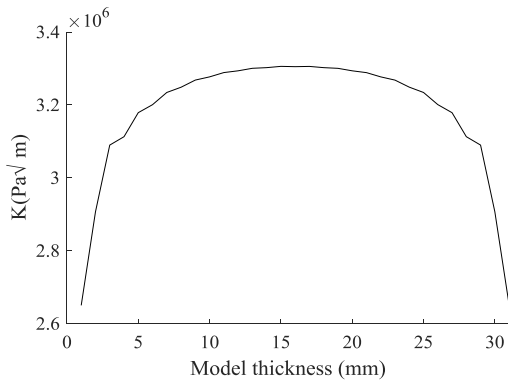
Fig. 7. Effect of specimen thickness on fracture toughness [17]

۲-۳- مدل‌سازی عددی

تقریباً ثابت می‌رسد به عنوان ضریب شدت تنش نمونه منظور شده است.

همان‌گونه که در قسمت قبل بیان شد برای به دست آوردن ضریب شدت تنش نیاز به ضریب شکل Y هم در مود I هم در مود II است. در این مقاله با استفاده از نرم افزار المان محدود آباکوس نسخه ۱۴،۶-۱ این ضرایب شکل در زوایای مختلف ترک نسبت به راستای بارگذاری تعیین شده است. با توجه به اینکه ضریب شکل مستقل از جنس ماده است و تنها به هندسه و شرایط بارگذاری بستگی دارد مقادیر Y_I و Y_{II} تنها برای یکی از سنگ‌های بالاست محاسبه شده است. شکل (۹) هندسه مدل‌سازی شده در نرم افزار آباکوس را نشان می‌دهد. در این شکل راستای ترک عمودی است به عبارت دیگر $\alpha = 0$ است. مدل‌هایی مشابه برای ترک‌های با زاویه ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۵ درجه نیز در نرم افزار مدل‌سازی شد. در مجموع برای مش‌بندی تعداد ۲۳۹۰۹۶ گره و ۵۶۷۳۰ المان به کار رفته است.

شکل ۱۰. تغییر مقدار ضریب شدت تنش در امتداد ضخامت



10. Variation of stress intensity factor along the specimen thickness

همین روند مدل‌سازی و تعیین مقدار K برای نمونه‌ها با ترک‌های با زاویه ۱۰، ۲۰، ۳۰، ۴۰ و ۵۵ درجه نیز انجام شده است. شکل (۱۱) بازشدگی ترک پس از اعمال نیرو را در زاویه صفر درجه نشان می‌دهد.

شکل ۹. مش بندی انجام شده در نرم افزار آباکوس

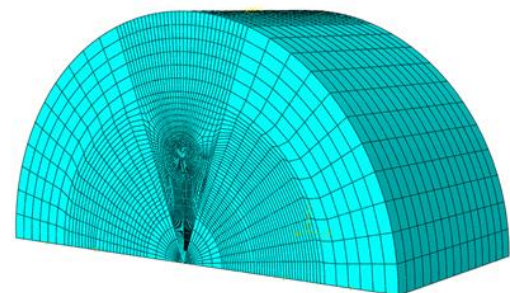


Fig. 9. Typical finite element mesh used for Simulating

شکل ۱۱. بازشدگی ترک قائم بعد از اعمال نیرو



Fig. 11. Fracture path for crack after loading

با اعمال نیروی ۱۰kN به هندسه مورد نظر مقادیر ضریب شدت تنش برای زوایای مختلف ترک محاسبه شده است. برای افزایش دقت در محاسبات در هر المان نوک ترک ده کانتور تنش در نظر گرفته شده و نهایتاً میانگین این ده مقدار به عنوان ضریب شدت تنش K برای المان مورد نظر ثبت شده است. همان‌گونه که در شکل دیده می‌شود از آنجایی که المان‌های نزدیک به سطح در شرایط تنش مسطح هستند مقدار K در المان‌ها در راستای ضخامت نمونه متفاوت خواهد بود. بنابراین مقادیر K مربوط به المان‌ها در راستای ضخامت رسم شده و نهایتاً ناحیه‌ای که نمودار افقی شده و مقدار K به یک مقدار

شکل ۱۲. تغییرات مقادیر ضریب شکل Y_I و Y_{II} با α

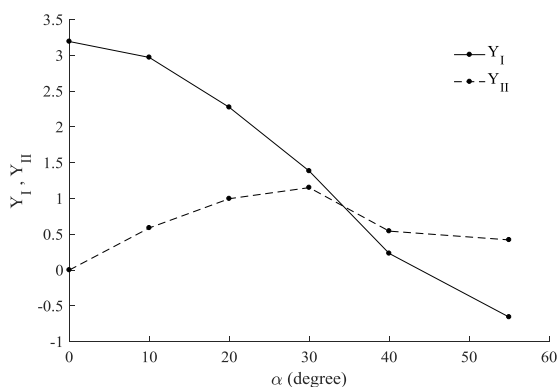


Fig. 12. Variations of geometry factors Y_I, Y_{II} with α

شکل ۱۴. قرار گرفتن نمونه بر روی فیکسچر و اعمال بار



Fig. 14. Loading setup for one of the tested specimens

Lim و دیگران با انجام آزمایش با نرخ بارگذاری $0.01 - 0.5 \text{ mm}/\text{min}$ تاثیر آن را بر نتایج آزمایشها مورد بررسی قرار دادند [4]. نتایج در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود برای نرخ بارگذاری بیشتر از $0.7 \text{ mm}/\text{min}$ این پارامتر می تواند بر چقرمگی شکست تاثیرگذار باشد ولی برای مقادیر کمتر از $0.7 \text{ mm}/\text{min}$ نرخ بارگذاری تاثیری بر چقرمگی شکست ندارد. بنابراین در این مقاله نرخ بارگذاری برابر با $0.2 \text{ mm}/\text{min}$ در نظر گرفته شده است. قابل ذکر است علیها و آیت الهی نرخ بارگذاری $0.5 \text{ mm}/\text{min}$ را برای انجام آزمایشات نمونه SCB برای بررسی مود ترکیبی سنگ مرمر استفاده نموده اند [6].

با افزایش بارگذاری مقدار جابه جایی محل اعمال بار اندازه گیری شده که در شکل (۱۵) نمونه ای از تغییرات نیرو بر حسب جابه جایی آورده شده است. اعداد منفی به دلیل جهت بارگذاری فشاری است. برای تمامی نمونه ها تغییرات نیرو-جابه جایی خطی است و نمونه ها به صورت ناگهانی از نوک ترک شکسته می شوند که نشان دهنده رفتار الاستیک خطی و شکست ترد در نمونه ها است. در نهایت برای تعیین مقدار بار بحرانی (بار شکست) از سه مقدار به دست آمده میانگین گیری شده است. شکل (۱۵) تغییرات نیرو-جابه جایی را برای سه نمونه سنگ معدن انجیلانند را نشان می دهد. در جدول (۳) میانگین مقادیر به دست آمده برای بار شکست نمونه ها نشان

نهایتا پس از مشخص شدن مقدار K ، می توان مقادیر Y_I و Y_{II} را به توجه به رابطه ۱ تعیین نمود. پس از انجام مدلسازیها در زوایه های مختلف، نمودار زیر به عنوان تغییرات ضریب شکل با توجه به تغییر زاویه ترک نسبت به راستای عمود، برای

$$\frac{a}{R} = 0.5 \text{ و } \frac{s}{R} = 0.43 \text{ به دست آمده است.}$$

۳-۳- روند آزمایشگاهی

در این پژوهش ۶ عدد نمونه SCB (۳ نمونه برای سنگ آندزیت و ۳ نمونه برای سنگ آهک) تهیه شده که در جدول (۲) خلاصه مشخصات و تعداد نمونه های ساخته شده نشان داده شده است.

جدول ۲. مشخصات نمونه های ساخته شده آزمایشگاهی

Sample	$\left(\frac{a}{R}\right)$	$\left(\frac{s}{R}\right)$	Thickness (cm)	Diameter (cm)
Andesite	0.43	0.5	3	3.5
Limestone	0.43	0.5	3	3.5

Table 2. Specimen characteristics for laboratory tests

شکل ۱۳. تغییرات چقرمگی شکست با نرخ بارگذاری [4]

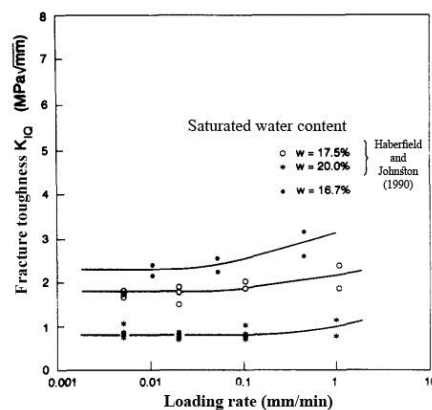


Fig. 13. Variation of fracture toughness with loading rate [4]

در نهایت نمونه های تهیه شده با توجه به نسبت s/R بر روی تکیه گاهها قرار گرفته و به وسیله دستگاه بارگذاری تحت بار فشاری قرار داده شده اند تا در نهایت ترک گسترش پیدا کرده و نمونه شکسته شود.

ترک بیشتر از سنگ معدن گدوک است که این امر نشان می-دهد از نظر بهره برداری سنگ معدن انجیلاوند نسبت به سنگ معدن گدوک برتری دارد.

نتایج به دست آمده برای مود ترکیبی مواد ترد و شکننده به صورت نمودار نرمالیزه شده $\frac{K_I}{K_{Ic}}$ و $\frac{K_{II}}{K_{Ic}}$ نشان داده می شود که K_{Ic} مشخصه ماده است و چقرمگی شکست مصالح است. در این مقاله نمودار $\frac{K_I}{K_{Ic}} - \frac{K_{II}}{K_{Ic}}$ برای دو نمونه سنگ بالاست مورد بحث با استفاده از دو معیار بیشینه تنش مماسی^۱ MTS [18] و بیشینه تنش مماسی اصلاح شده^۲ GMTS [19] ترسیم شده است.

با توجه به معیار GMTS برای رسم نمودار بیان شده باید مقدار بی بعد تنش T^* مشخص باشد. برای این امر در مدل سازی-های انجام شده در نرم افزار عددی مقدار T^* در زوایای مختلف ترک تعیین شده است که در شکل (۱۶) تغییرات T^* نسبت به زاویه ترک نشان داده شده است.

شکل ۱۶. تغییرات مقدار نرمالیزه شده ترم تنش T^* با زاویه ترک

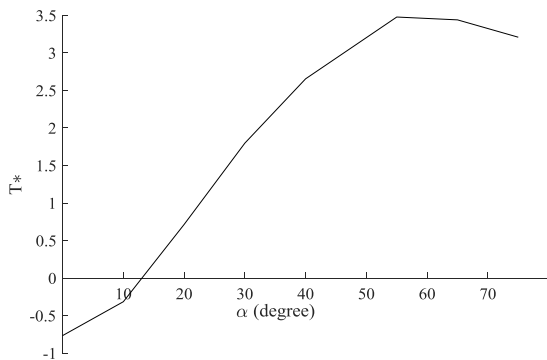


Fig. 16. Variations of normalized T-stress with α

همان گونه که در شکل (۱۶) دیده می شود مقدار T^* برای زوایای کمتر از ۱۵ درجه منفی و برای زوایای بیشتر از ۱۵ درجه مقدار مثبتی را نشان می دهد. با توجه به نتایج به دست آمده در جدول (۴) و روابط مربوط به معیارهای MTS و GMTS، منحنی شکست سنگ معدن انجیلاوند و گدوک در شکل (۱۷) رسم شده اند.

1 Maximum Tangential Stress

2 Generalized Maximum Tangential Stress

داده شده است.

شکل ۱۵. تغییرات نیرو-جابجایی برای نمونه سنگ انجیلاوند

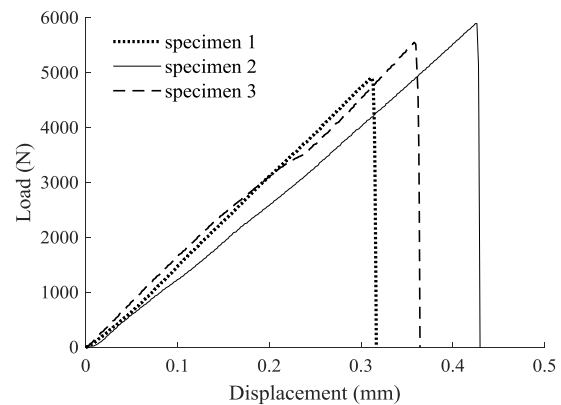


Fig. 15. Load-displacement for Anjilavand mine specimens

جدول ۳. میانگین بار شکست نمونه های آزمایشگاهی

Sample	P _{critical} (kN)			average
	Test 1	Test 2	Test 3	
Gaduk (Limestone)	4.312	3.594	3.597	3.83
Anjilavand (Andesite)	4.903	5.892	5.55	5.45

Table 3. Average failure load of specimens

با توجه به شکل (۱۲) و P_{crit} به دست آمده از نمونه های آزمایشگاهی نهایتاً ضریب شدت تنش بحرانی K_{Ic} با توجه به رابطه ۱ برای دو جنس مختلف مورد بررسی به دست آمده است. نتایج در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ۴. چقرمگی شکست نمونه های سنگ بالاست

Sample	P _{critical} (kN)	Y _I	K _{IC} (MPa√m)
Gaduk (limestone)	3.83	3.19	1.266
Anjilavand (Andesite)	5.45	3.19	1.797

Table 4. Fracture toughness of ballast specimens

۴- بحث و بررسی نتایج

همان گونه که در جدول (۴) مشاهده می شود مقدار چقرمگی شکست سنگ معدن انجیلاوند بیشتر از سنگ معدن گدوک است بنابراین مقاومت سنگ معدن انجیلاوند در برابر رشد

- با توجه به نکات بیان شده در این مقاله و اهمیت چقرمگی شکست سنگ در بحث استخراج، خردایش و بهره‌برداری پیشنهاد می‌شود در کنار آزمایش‌های عنوان شده برای بررسی کیفیت بالاست در نشریه ۳۰۱ راه آهن، آزمایش تعیین چقرمگی شکست آن نیز به عنوان یکی از آزمایش‌های بررسی کیفیت بالاست به لیست آزمایش‌ها اضافه شود.

- مقدار چقرمگی شکست مود ترکیبی I و II به دست آمده با استفاده از معیارهای MTS و GMTS برای سنگ معدن انجیلاوند بیشتر از سنگ معدن گدوک بوده بنابراین سنگ معدن انجیلاوند نسبت به سنگ معدن گدوک از نظر بهره‌برداری از کیفیت بهتری برای استفاده در خطوط راه آهن برخوردار است.

References

- [1] *Basic technical specifications and railway superstructure (Publication 301)*. 2005, Management and Planning Organization of Iran.
- [2] Kundu Tribikram, 2008. *Fundamentals of Fracture Mechanics*, CRC Press, London.
- [3] Xeidakis.GS, Samaras.IS, Zacharopoulos.DA & Papakaliatakis.GE. 1997. Trajectories of unstably growing cracks in mixed mode I-II loading of marble beams. *Rock Mechanics Rock Engineering* 19-33.
- [4] Lim.L,Johnston.W, Choi.K & Boland.N,1994. Fracture Testing of a Soft Rock with Semi-circular Specimens Under Three-point Bending-Part I -Mode I. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **31**, 185-197.
- [5] Jia.Z, Castro-Montero.A & Shah.SP. 1996. Observation of mixed mode fracture with center notched disk specimens. *Cement Concr Res*, **26**(1),125-37.
- [6] Aliha.MRM & Ayatollahi.MR, 2011. Mixed mode I/II brittle fracture evaluation of marble using SCB specimen. *Procedia Engineering* 10, 311-318.
- [7] Ameri.M, Mansourian.A, Pirmohammad.S & Aliha.MRM, 2012. Mixed mode fracture resistance of asphalt concrete mixtures. *Engineering Fracture Mechanics* **93**,153-167.
- [8] Ayatollahi.M.R, Aliha.M.R.M & Saghafi H 2011. An improved semi-circular bend specimen for investigating mixed mode brittle fracture. *Engineering Fracture Mechanics*, **78**, 110-123.
- [9] 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*, **77**, 2200-2212.
- [10] Arshdnezhad.Sh, 2011 *Application of stress*

شکل ۱۷. منحنی شکست مود ترکیبی دو نمونه سنگ بالاست با استفاده از دو معیار MTS و GMTS

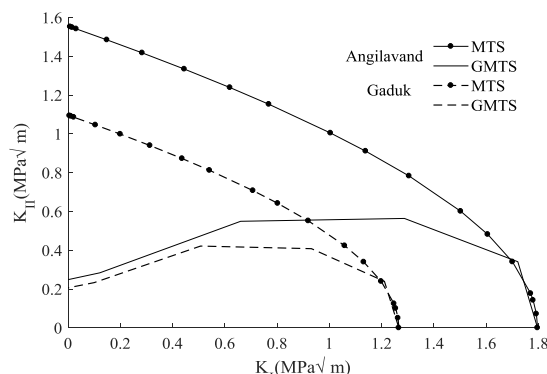


Fig. 17. Fracture curves based on the MTS and GMTS criterion for tested specimens

در شکل (۱۷) برای هر کدام از نمونه‌ها، زیر نمودار شرایط پایدار و بالای نمودار شرایط ناپایدار برای ترک را نشان می‌دهد. همان‌گونه که نشان داده شده است منحنی شکست به دست آمده از هر دو معیار برای نمونه انجیلاوند بالاتر از نمونه گدوک قرار گرفته است که این مسئله در شرایط بهره‌برداری باید در نظر گرفته شود.

همان‌گونه که در شکل (۱۷) دیده می‌شود نتایج حاصل از دو معیار برای هر دو نمونه سنگ تفاوت قابل ملاحظه‌ای دارد که این امر به وجود ترم تنش T در معیار GMTS برمی‌گردد.

۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله ابتدا به اهمیت چقرمگی شکست بالاست در تعیین الگو آتشیاری و انرژی مصرفی برای خردایش و همچنین آلودگی بالاست پرداخته شد. با بررسی نشریه ۳۰۱ راه آهن، آزمایشی که این پارامتر را در نظر بگیرد یافت نشد بنابراین با توجه به اهمیت این پارامتر، اضافه شدن آزمایش تعیین چقرمگی شکست سنگ بالاست به وسیله نمونه‌های نیم دیسک تحت بار خمشی به مجموعه آزمایش‌های کنترل کیفیت بالاست در نشریه ۳۰۱ پیشنهاد شد. سپس چقرمگی شکست دو نمونه سنگ مورد استفاده به عنوان بالاست در خطوط راه آهن ایران تعیین شد. نتایج به دست آمده از این پژوهش را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود.

- [15] Nasr Azadani.M & Fathali.M, 2011 *Ballast materials and its impact on the maintenance of railway lines*. R & D Railway Services & Technical Construction Engineering Co. (in Persian)
- [16] Ulusay.R & Hudson.J.A, 2006. *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring*, Springer.
- [17] Khan.K & Al-Shayea.N. A, 2000. Effect of Specimen Geometry and Testing Method on Mixed Mode I&II Fracture Toughness of a Limestone Rock from Saudi Arabia. *Rock Mechanics and Rock Engineering* **33**, 179-206.
- [18] Erdogan.F & Sih.G. C, 1963. On the crack extension in Constraint Effects in Fracture. Theory and Applications (Edited by plates under plane loading and transverse shear. *ASME* **85**, 525-527.
- [19] Smith.D.J, Ayatollahi.M.R & Pavier M.J, 2000. 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**, 137-150.
- [11] Kim.Kwangmin, 2006. *Blasting Design Using Fracture Toughness and Image Analysis of the Bench Face and Muckpile*. MSc Thesis-Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [12] Bearman.R.A, Briggs.C.A & Kojovic.T, 1997. The Application of Rock Mechanics Parameters to the Prediction of Comminution Behavior. *Minerals Engineering*,**10**, 255-264.
- [13] Donovan.James.G, 2003. *Fracture Toughness Based Models For The Prediction Of Power Consumption, Product Size, And Capacity Of Jaw Crushers* , PhD thesis-Virginia Polytechnic Institute and State University,USA.
- [14] Korman.T, Bedekovic.G, Kujundzic.T & Kuhinek.D, 2015. Impact Of Physical And Mechanical Properties Of Rocks On Energy Consumption Of Jaw Crusher. *Physicochemical Problems of Mineral Processing* **51**, 475-461.

Suggestion of fracture toughness for controlling the ballast materials quality.

R. Heidary^{1*}, Sh. Ataei², I. Ferestade³

1- Ph.D Candidate of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology

2- Assistant Professor, Iran University of Science and Technology

3- Ph.D Candidate of Railway Engineering, Iran University of Science and Technology

r_heidary@rail.iust.ac.ir

Abstract:

Ballast is a layer between sleeper and sub-ballast that is composed of broken stones. Since ballast bears heavy loads, its high quality is important. If the ballast is gradually crushed and fines are generated, stone permeability and drainage property will be damaged and finally, instability will be resulted. If the above problems occur at ballast, its substitution is necessary that has high costs. For Ballast quality control several tests has been suggested in 301 railway magazine that after the test on Ballast, the results are compared with allowable values and Ballast quality was controlled. Ballast grains subjected to train loads, contain numerous cracks. From the fracture mechanic point of view, when stress intensity factor at the crack tip reaches the mixed-mode fracture toughness, crack growth begins and Ballast grains crush. Ballast crushing and abrasion are the main reasons for ballast contamination which is the main source of various defects, particularly geometric defects in the railway. Since disc-type specimens are among favorite test samples for determining mode I and mixed mode fracture toughness in brittle materials like rocks, Therefore it is suggested to add the determination of the mixed-mode fracture toughness I and II with the semi-circular bend specimens subjected to three-point-bend loading to the ballast quality control in 301 railway magazine. In this research, discussed the importance of fracture toughness in extraction, crushing and operation of Ballast, then the finite element method and experimental is used to analyze a semi- circular disc specimens under bending load and the fracture toughness of two Ballast mine, Anjilavand and Gaduk was determined. Anjilavand and Gaduk mine is two Ballast mines in Iran that using them for Ballast layers in railway substructure. The crack parameters K_I , K_{II} and T are calculated for different mixed-mode from pure mode I to pure mode II. Y_I , Y_{II} , and T^* are the non-dimensional forms of K_I , K_{II} , and T , respectively. These parameters are functions of the crack length ratio, the crack angle and also the location of loading supports in the semi-circular bend specimen. The curves of Y_I , Y_{II} , and T^* extracted for various combinations of modes I and II. Since the results for mixed mode fracture resistance of brittle materials are usually presented in a normalized form as K_{II}/K_{Ic} versus K_I/K_{Ic} , where K_{Ic} is a material constant called the pure mode I fracture toughness, using the mixed-mode fracture criteria, capped failure modes I and II for both ballast rocks were extracted and compared. Fracture toughness of Anjilavand specimen is greater than Gaduk specimen that shows the Anjilavand Ballast for operation in railway is better than Gaduk Ballast

Keywords: Fracture toughness, Ballast, Semi-circular bend specimen.