

# MODELING AND CLASSIFICATION OF ROOF BEHAVIOR IN COAL MINES

M. Javanshir

Ph.D Student of Faculty of Mining Engineering and Geophysics, Shahrood University of Technology

M. Ataei

Associated professor of Faculty of Mining Engineering and Geophysics, Shahrood University of Technology

S. R. Torabi

Associated professor of Faculty of Mining Engineering and Geophysics, Shahrood University of Technology

**Abstract:** Many researches have been carried out in field of "Roof rock behavior in coal mines", most of them concentrated on mines development networks; but a less attention have been paid to assessment and classification of roof strata behavior over longwall coal mining panels. However various parameters influence on the deformability behavior of the stratified rock mass. This paper discusses the most effective parameters and the degree of influence of each of them on the stability behavior of coal mines roof rock. Based on the assessment, six parameters were recognized witch relevant to rock mass including uniaxial compressive strength (UCS), tensile strength, moisture sensitivity, joints, bedding thickness and orientation and dips of discontinuities relevant to face and surface of working area. In the proposed system, the roof rock over a longwall panel is assigned a rating from 15.5 to 100, with a higher rating corresponding more stable roof. Based on this rating system, a roof maybe classified into five modes: extremely unstable, highly unstable, Medium stable, good stable, highly stable.

## ارائه یک سیستم رده بندی جدید به منظور بررسی رفتار سنگ سقف در معادن زغال سنگ

محمد جوانشیر، محمد عطائی و سیدرحمان ترابی

**چکیده:** موضوع رفتار سنگ سقف در معادن زغال توسط محققین زیادی مورد بررسی قرار گرفته است؛ اما این تحقیقات بیشتر در پیشرویها و تونلهای معادن زغال بوده، و به موضوع رفتار سنگ سقف در کارگاههای استخراج کمتر توجه شده است. عوامل مختلفی در رفتار سنگ سقف در معادن زغال اثرگذار می باشند. به طور کلی می توان این عوامل را به دو گروه تقسیم بندی کرد. پارامترهای مربوط به ماده سنگ و پارامترهای مربوط به توده سنگ. در این تحقیق سیستم رده بندی جدیدی برای رده بندی سنگ سقف در کارگاههای جبهه کار طولانی ارائه شده است. بدین منظور ۶ پارامتر مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی، تاثیر رطوبت، درزه داری، ضخامت لایه بندی و توجیه فضایی درزه ها و کارگاه مورد بررسی قرار گرفته اند. در این رده بندی سنگ سقف یک کارگاه جبهه کار طولانی می تواند امتیازی بین ۱۵/۵ تا ۱۰۰ کسب کند و بر این اساس می تواند در یکی از رده های بسیار نامقاوم، نامقاوم، متوسط، پایدار و خیلی پایدار

تاریخ وصول: ۸۶/۴/۱۰

تاریخ تصویب: ۸۷/۹/۱

محمد جوانشیر، دانشجوی دکتری معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دکتر محمد عطائی، دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود. ataei@shahroodut.ac.ir

دکتر سید رحمان ترابی، دانشیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

قرار گیرد. هر قدر امتیاز مربوط به تشکیلات سنگی یک سقف بیشتر باشد، از پایداری بیشتری برخوردار خواهد بود.

### واژه های کلیدی: رفتار سنگ سقف، معادن زغال، جبهه کار طولانی، رده بندی سقف

#### ۱. مقدمه

طی دهه های اخیر استخراج زیرزمینی زغال سنگ با روش جبهه کار طولانی بسیار متداول شده است. پیش بینی رفتار سنگ سقف و قابلیت تخریب آن در اجرای موفق این روش و کاهش خطرات، نقش مهمی بر عهده دارد. بررسی آمار حوادث در معادن زغال سنگ نشان می دهد که ریزش سقف یکی از خطرات عمده ای است که کارگران معادن زیرزمینی زغال سنگ با آن مواجه می باشند [۱]. دلیل این امر آن است که زغال سنگ در بین طبقات رسوبی شامل تناوبی از سنگ های مختلف مثل ماسه سنگ، سیلت استون و شیل قرار دارد که این طبقات در مقابل نیروی های کششی و برشی اعمال شده مقاومت چندانی ندارند. پیشگیری از حوادث ناشی از ناپایداری سقف در کارگاه های استخراج معادن زغال سنگ از مباحثی است که همیشه فکر دست اندرکاران را به خود معطوف داشته ولی با توجه پیچیدگی های آن کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. در کشور ما، معدن کاری به صورت سنتی انجام و کنترل سقف معادن کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به تفاوت های ماهوی در شرایط کاری معادن ایران و سایر کشورها به ویژه از نظر شیب و عمق طبقات، سرعت پیشروی جبهه کار و نوع وسایل نگهداری کارگاه های استخراج، ارائه نوعی رده بندی که منطبق بر خصوصیات و رفتار لایه های سنگی موجود در سقف بلاواسطه و شرایط خاص منطقه باشد، ضروری است. در این تحقیق سعی بر آن است که یک سیستم رده بندی منطبق بر شرایط منطقه توسعه داده شود تا بتوان قبل از احداث یک کارگاه استخراج، رفتار سنگ سقف و امکان ریزش را بررسی و نگهداری مناسب را پیش بینی کرد. این رده بندی به طراحان معادن کمک خواهد کرد تا قبل از مرحله شروع عملیات استخراج یک پهنه جبهه کار طولانی بتوانند شرایط مناسب کار از جمله ابعاد کارگاه استخراج شامل طول جبهه کار، عرض ایمن و مجاز مقابل منطقه عملیاتی، ابعاد پایه ها و لنگه های حفاظتی، احتمال بروز پدیده ضربه سقف و همچنین گام پیشروی و تخریب را تعیین و در نتیجه سیستم نگهداری مناسب را پیش بینی کنند.

#### ۲. روش های ارزیابی پایداری سقف معادن زغال

طی سالیان گذشته به منظور ارزیابی پایداری سقف معادن زغال و انتخاب سیستم نگهداری لازم، روش های مختلفی ارائه شده است

که این روش ها را می توان به چهار دسته روش های تحلیلی، روش های زمین شناسی، روش های مشاهده ای و روش های تجربی طبقه بندی کرد [۲]. روش های تحلیلی معمولاً از مفاهیم پایه مقاومت مصالح، مکانیک جامدات، تحلیل ساختاری و مدل سازی عددی استفاده می کنند. در روش های زمین شناسی اساساً سعی بر کمی کردن ساختارهای زمین شناسی و سایر خصوصیات موثر بر پایداری سقف می باشد. روش های زمین شناسی مختلفی از جمله استفاده از مغزه های حفاری (core drilling)، تهیه نقشه های زمین شناسی (geological mapping) و تهیه نقشه ریزش های سقف (roof fall mapping) برای تعیین چنین ساختارهایی ارائه شده اند. روش های مشاهده ای متکی بر ابزار بندی و اندازه گیری جابجایی ها و نمایش ناپایداری های عمده در معادن هستند. نتایج حاصل از این روش کنترل کننده نتایج و پیش بینی های به دست آمده از دیگر روش ها می باشد. روش های تجربی برای ارزیابی پایداری سقف معادن زغال از سیستم های رده بندی توده سنگ استفاده می کنند. در جدول ۱ مهم ترین روش های تجربی درج شده است.

#### ۳. پارامترهای موثر در رفتار سقف معادن زغال سنگ

یکی از موضوعات مهم در رده بندی توده سنگ، انتخاب پارامترهایی است که عملاً بیشترین اثر را در طراحی های مهندسی دارا باشند. واضح است که هیچ یک از پارامترها یا شاخص ها به تنهایی نمی توانند معرف یک توده سنگ در زده دار باشند. پارامترهای مختلف تاثیر متفاوتی داشته و فقط هنگامی که با هم ترکیب شوند، به طرز رضایت بخشی معرف رفتار توده سنگ خواهند بود [۱۵]. به عقیده وتوکوری خواص مهندسی توده سنگ بیش تر از آن که تابع مقاومت آن باشد، به سیستم ناپیوستگی های موجود در آن بستگی دارد. علاوه بر این مقاومت توده سنگ غالباً از سطوح مشترک و در هم قفل شده المان های مجزا که توده سنگ را تشکیل می دهند، تاثیر می پذیرد. از دیدگاه مهندسی، آگاه بودن از نوع و فرکانس ناپیوستگی ها ممکن است مهم تر از دانستن نوع و جنس سنگ باشد. وتوکوری اظهار می کند که از آنجا که رفتار مهندسی توده سنگ به مشخصات سنگ سالم و ناپیوستگی ها و وضعیت آب زیر زمینی بستگی دارد، بدون شک حضور حداقل سه پارامتر زیر به منظور طبقه بندی توده سنگ لازم است: یک پارامتر به عنوان معرف مشخصه های سنگ سالم، یک پارامتر به عنوان معرف ناپیوستگی ها و بالاخره پارامتر دیگری که شریط آب زیرزمینی را توصیف می کند

درزه، الگوی درزه‌ها یا شکل بلوک‌های سنگی، گسل‌ها و مناطق ضعیف و خرد شده و نوع و ویژگی‌های فضای زیرزمینی (ابعاد، جهت و غیره) به طور مکرر در رده‌بندی‌های مذکور استفاده شده‌اند. ویتلز و همکاران به منظور شناسایی موثرترین پارامترها در رفتار توده‌سنگ لایه‌ای، معادن زغال کشور انگلیس را مورد مطالعه قرار داد. آنها با بررسی دقیق ۲۵۷ مقاله منتشر شده مربوط به این موضوع، لیست جامعی از پارامترهای موثر در رفتار توده‌سنگ ارائه دادند.

[۱۶]. با توجه به این که تعیین خصوصیات تعداد زیادی پارامتر در توده‌سنگ مشکل و حتی غیر ممکن است، می‌بایست روش‌ها و یا مدل‌هایی توسعه یابند که بتوانند واقعیت پیچیده توده‌سنگ را تا حد ممکن و با منظور کردن تعداد معین و محدودی پارامتر که نشان دهنده خصوصیات واقعی توده‌سنگ باشند، ساده کنند [۲]. طی سالیان گذشته سیستم‌های رده‌بندی متعددی برای توده‌سنگ پیشنهاد و تکمیل شده است. پارامترهایی همچون ماده سنگ (نوع سنگ، اسم زمین‌شناسی، هوازگی و مقاومت)، میزان درزه‌داری سنگ، تنش‌های برجا، جهت ناپیوستگی یا دسته درزه اصلی، شرایط

### جدول ۱. مهم‌ترین روش‌های تجربی رده‌بندی سقف معادن زغال

ردیف	عنوان رده‌بندی	کشور	پارامترهای مورد استفاده	هدف و کاربرد	منبع
۱	استفاده عملی از تحقیقات معدنی	آلمان	اندازه‌گیری مساحت ریزش سنگ سقف در کارگاه استخراج	محاسبه عرض مسیر مقابل جبهه‌کار	[۳]
۲	رده‌بندی قابلیت تخریب سنگ سقف در منطقه زغالی Silesia	لهستان	اندیس سقف (L)، مقاومت فشاری سنگ، ضخامت متوسط لایه‌ها	توصیف وضعیت طبقات سقف، پیش‌بینی ریزش سقف بلاواسطه و زمان پایداری سقف	[۴]
۳	اهمیت روش‌های رده‌بندی ژئومکانیکی توده‌سنگ درزه‌دار	آفریقای جنوبی	مقاومت فشاری تک‌محوره، RQD، شرایط درزه‌ها و آب زیرزمینی	طراحی سیستم نگهداری در معادن	[۵]
۴	ارتباط کیفیت طبقات سقف و اعداد انعکاسی چکش اشمیت	لهستان	اعداد انعکاسی چکش اشمیت	رده‌بندی سقف، محاسبه حد اکثر مساحت فضای بدون نگهداری در مقابل جبهه‌کار	[۶]
۵	تاثیر پارامترهای اصلی کنترل‌کننده سقف	لهستان	اندیس کیفیت سقف (RQI)	رده‌بندی سنگ سقف، مساحت مجاز سقف بدون نگهداری	[۷]
۶	اصلاح رده‌بندی‌های ژئومکانیکی برای طراحی تونل در معادن زیرزمینی زغال‌سنگ	آمریکا	مقاومت سنگ، لایه‌بندی، کانال‌های ماسه‌سنگی، حساسیت در رطوبت، آب زیرزمینی و درزه‌ها	پیشنهاد سیستم نگهداری مناسب برای تونل‌های معادن زغال	[۸]
۷	امتیاز سقف معادن زغال (CMRR)	آمریکا	مقاومت فشاری، درزه‌داری، مقاومت برشی و تاثیر رطوبت بر سنگ	انتخاب سیستم نگهداری در معادن زغال آمریکا، ارزیابی خطرات، طراحی ابعاد پایه‌ها	[۹]
۹	رده‌بندی توده‌سنگ در معادن زغال و انتخاب سیستم نگهداری در جبهه‌کار	چین	مقاومت فشاری، کششی و ضخامت سقف بلاواسطه	پیش‌بینی اولین گام تخریب سقف بلاواسطه	[۱۰]
۱۰	مشاهدات و رده‌بندی رفتار طبقات سقف بالای کارگاه جبهه‌کار طولانی در معادن هند	هند	تحلیل رفتار طبقات سقف، ریزش توده‌سنگ، مقاومت فشاری تک‌محوری، RQD	رده‌بندی سنگ سقف بر اساس پایداری، قابلیت تخریب سقف، پیشنهاد سیستم نگهداری مناسب برای هر رده	[۱۱]
۱۱	استفاده از آزمایش بار نقطه‌ای در تعیین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌های حاوی زغال	آمریکا	اندازه‌گیری اندیس بار نقطه‌ای و محاسبه مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ	محاسبه امتیاز مربوط به مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ و استفاده از آن برای تعیین امتیاز توده‌سنگ در روش CMRR	[۱۲]
۱۲	پیشرفت‌های جدید در روش تعیین امتیاز سنگ سقف در معادن زغال‌سنگ	آمریکا	فاصله داری، شکستگی‌ها، مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ و آزمایش بار نقطه‌ای به روش قطری	طراحی پایه‌ها در تونل‌های پایین جبهه‌کار طولانی در استرالیا، انتخاب پیچ سقف، ارزیابی ریزش سقف در آفریقا	[۱۳]
۱۳	رده‌بندی سنگ‌های حاوی زغال و استفاده از آن برای پیش‌بینی پارامترهای ژئومکانیکی (مدول یانگ و تغییر شکل)	انگلیس	مقاومت فشاری تک‌محوری، عدد دسته درزه، فاصله‌داری و مقاومت سطوح لایه‌بندی، حساسیت نسبت به رطوبت و جریان آب زیر زمینی	تعیین مدول تغییر شکل و مقاومت برای توده‌سنگ	[۱۴]

مقاومت فشاری تک‌محوره ماده‌سنگ، لایه‌بندی، خواص درزه‌ای، میزان قابلیت شکاف‌برداری (Fissility) یا قابلیت جدایش لایه‌ها (Bed separation)، حساسیت در مقابل رطوبت و جریان آب زیرزمینی به عنوان موثرترین پارامترها در رفتار توده‌سنگ لایه‌ای معرفی کردند [۱۴].

هیچکدام از محققین تاکنون هندسه و توجیه فضایی کارگاه و درزه‌ها را مورد بررسی قرار نداده‌اند که این موضوع در رفتار سقف به خصوص در معادن زغال‌سنگ ایران اهمیت زیادی دارد. از طرف

در مجموع ۵۰ پارامتر مختلف طی این مرحله مشخص شد. به منظور تعیین پارامترهایی که دارای بیش‌ترین میزان تاثیر بر تغییر شکل توده‌سنگ می‌باشند، این محققین ۲۰ مدل فرضی را برای بررسی مکانیسم تغییر شکل توده‌سنگ در نظر گرفتند. سپس اهمیت هر پارامتر برای هر مکانیسم شکست و تغییر شکل از ۱ تا ۶ امتیاز داده شد. پارامترهای خیلی موثر در کلاس ۱ و پارامترهای بی‌تاثیر در کلاس ۶ منظور شدند. در نهایت تعداد ۲۸ پارامتر در کلاس ۱ قرار گرفتند. سپس با حذف پارامترهای موازی، ۶ پارامتر

کارگاه و درزه‌ها به عنوان موثرترین پارامترها در رده‌بندی انتخاب شدند. بر اساس تحلیل آماری انجام شده بر روی داده‌ها مقادیر تقریبی اهمیت هر پارامتر تعیین گردید. پس از این مرحله با در نظر گرفتن امتیاز هر پارامتر در رده‌بندی‌های قبلی، مشاهدات عینی رفتار سقف و قضاوت مهندسی، امتیاز بعضی از پارامترها در حد کمی تعدیل و در نهایت امتیاز نهایی مربوط به هر پارامتر مشخص شد. جدول ۳ امتیاز مربوط به پارامترهای مختلف موثر در رده‌بندی را نشان می‌دهد

جدول ۳. امتیاز پارامترهای موثر در رده‌بندی سقف

پارامتر	امتیاز
مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر	۲۵
مقاومت کششی سنگ بکر	۵
حساسیت در برابر رطوبت	۱۰
تعداد دسته درزه	۶
فاصله‌داری و تداوم درزه‌ها	۱۲
زبری سطح درزه	۶
ضخامت لایه‌بندی	۱۰
توجیه فضایی کارگاه و درزه‌ها	۲۶
جمع	۱۰۰

جزئیات اندازه‌گیری و نحوه امتیازدهی پارامترها در بازه‌های مختلف به شرح ذیل است:

#### ۴-۱. مقاومت فشاری تک محوره

مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ‌ها در کلیه پروژه‌های مهندسی سنگ اهمیت ویژه‌ای داشته و به عنوان معیاری تعیین کننده در ارزیابی استحکام سازه‌های سنگی کاربرد دارد. در تئوری، تعیین مقاومت فشاری تک محوره سنگ‌ها ساده می‌باشد ولی در اجرا جزو آزمایش‌های نسبتاً پرهزینه و زمان‌بر است. این آزمایش مستلزم تهیه و حمل نمونه به آزمایشگاه، تهیه مغزه استوانه‌ای شکل مطابق استاندارد مربوطه و استفاده از دستگاه چک فشاری برای انجام آزمایش به تعداد دفعات کافی برای رسیدن به میانگین قابل قبول بر اساس استانداردهای موجود است. عکس‌العمل سنگ‌ها در آزمایش تعیین مقاومت فشاری تک محوره، از یک طرف به شرایط و عوامل مختلف مربوط به خود سنگ از قبیل کیفیت مکانیکی و فیزیکی و ترکیبات مینرالوژیکی و از طرفی به نحوه تهیه نمونه و انجام آزمایش و برخی شرایط محیطی نظیر رطوبت و حرارت بستگی دارد. از سوی دیگر برداشت نمونه و انتقال آن به آزمایشگاه باعث تغییر در خواص نمونه شده و خطای اندازه‌گیری را به دنبال خواهد داشت. در این شرایط استفاده از روش‌های میدانی ساده و کم هزینه و در عین حال با دقت قابل قبول که بتواند نتایج نزدیک به واقعیت از مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر را ارائه دهد، از اهمیت خاصی برخوردار خواهد بود. از جمله روش‌هایی که هم می‌تواند به صورت آزمایشگاهی و هم به صورت میدانی به کار

دیگر کلیه رده‌بندی‌های مذکور کاربرد محلی داشته و فقط برای آن محل‌ها معتبرند. اکثر رده‌بندی‌های ارائه شده برای کارگاه‌های جبهه‌کار طولانی و مکانیزه وضع شده‌اند در حالی که روش استخراج در معادن منطقه مورد مطالعه سنتی بوده و سرعت پیشروی کمی دارند. لذا رطوبت، هوازگی و مقاومت کششی تاثیر به سزایی در رفتار سقف این معادن دارند. بنابراین با توجه به سیستم‌های موجود طبقه‌بندی سنگ سقف به‌کار گرفته شده در سایر کشورها و در نظر گرفتن شرایط خاص زمین‌شناسی منطقه و روش استخراج، تعداد ۱۵ پارامتر مندرج در جدول ۲ به عنوان اثرگذارترین پارامترها در رفتار سنگ سقف معادن منطقه البرز شرقی انتخاب شدند.

جدول ۲. فرم نظرخواهی از مهندسین برای تعیین اهمیت پارامترها

پارامتر	میزان تاثیر پارامتر				
	خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	بسیار کم
مقاومت فشاری تک‌محوره					
جنس سنگ					
اندازه دانه‌ها					
ماتریکس سنگ					
فاصله‌دار سطوح لایه‌بندی					
زبری سطوح لایه‌بندی					
چسبندگی سطوح					
تعداد دسته‌درزه					
فاصله‌داری درزه‌ها					
زبری درزه‌ها					
چسبندگی درزه‌ها					
جهت درزه‌ها					
حساسیت به رطوبت					
تاثیر هوازگی					
تاثیر آب زیرزمینی					

#### ۴. تعیین امتیاز هر کدام از پارامترهای انتخاب شده

با توجه به ماهیت تجربی کار، به منظور تعیین اهمیت هر یک از پارامترها و امتیاز مربوط به آن‌ها، پرسش‌نامه‌هایی شامل موثرترین پارامترها مطابق جدول ۲ تنظیم و از ۳۰ نفر مهندس معدن یا زمین‌شناس که دارای سابقه کار اجرایی در معادن مختلف منطقه بودند، نظر خواهی شد. پس از دریافت پرسش‌نامه‌ها میزان تاثیرات به صورت کمی درآمد، بدین صورت که میزان اهمیت هر یک از پارامترها از ۱ تا ۵ مشخص شد که عدد ۱ نشان دهنده اهمیت بسیار کم و عدد ۵ نشان دهنده اهمیت خیلی زیاد بود. سپس به منظور کاهش پارامترها در حد متداول با سیستم‌های مرسوم، با ادغام پارامترهای وابسته (به عنوان مثال جنس سنگ، اندازه دانه‌ها و ماتریکس سنگ که مهم‌ترین عوامل تشکیل‌دهنده مقاومت فشاری تک‌محوره هستند) امتیاز پارامتر مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر به دست آمد. پس از ادغام پارامترهای وابسته در نهایت شش پارامتر مقاومت فشاری تک محوره، مقاومت کششی، حساسیت در مقابل رطوبت، خواص درزه‌ها، ضخامت لایه‌بندی و توجیه فضایی

## جدول ۵. تعیین امتیاز مقاومت کششی تک‌محوری

## سنگ

UTS (Mpa)	>۱۲	۶-۱۲	۳-۶	۱/۵-۳	<۱/۵
امتیاز	۵	۴	۳	۲	۱

## ۳-۴. حساسیت در برابر رطوبت (moisture sensitivity)

سقف اغلب معادن زغال‌سنگ از سنگ‌های با ترکیب شیلی تشکیل شده‌اند که ترکیبات شیلی در مقابل رطوبت حساس هستند. رطوبت باعث کاهش مقاومت سنگ، ایجاد فشار از طریق آماس کانی‌های رسی و ایجاد صدمه بر سیستم نگهداری می‌شود [۱]، بنابراین تعیین میزان حساسیت این سنگ‌ها در مقابل رطوبت در رفتار سقف و موضوع نگهداری بسیار حیاتی است. از طرفی برداشت نمونه و انتقال آن به آزمایشگاه برای تعیین میزان حساسیت سنگ‌ها، باعث تغییر در خواص آن‌ها و به دست آمدن نتایج غیرواقعی خواهد شد. بنابراین، تعیین اندیسی که بتواند به سادگی در محل کار قابل اندازه‌گیری و در عین حال از دقت قابل قبولی برخوردار باشد، دارای اهمیت زیادی است. هر چند آزمایش تعیین اندیس دوام و ارتگی (Slake Durability) نمونه برای ارزیابی حساسیت در برابر رطوبت، به طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است [۱۷]، اما در این تحقیق از روش ساده‌تری به نام آزمایش غوطه‌وری (Immersion) که توسط سیکلر در سال ۱۹۸۶ ارائه شده، استفاده شده است. مراحل انجام روش آزمایش غوطه‌وری به شرح زیر است [۱۸]:

- انتخاب نمونه (نمونه‌های دستی)

- انجام آزمایش به منظور تعیین قابلیت خردشوندگی نمونه با دست

- شستن نمونه جهت پاک کردن سطح آن از گرد و غبار

- غوطه‌ور کردن نمونه در آب برای یک ساعت

- مشاهده نمونه و تعیین امتیازات مربوط به زلالی آب، تشکیل

سنگ‌ریزه در ظرف و ایجاد ترک در نمونه

- جمع امتیاز مربوط به امتیاز غوطه‌وری (جدول ۶)

- آزمایش مجدد نمونه به منظور تعیین قابلیت خردشوندگی

(Breakability Index)

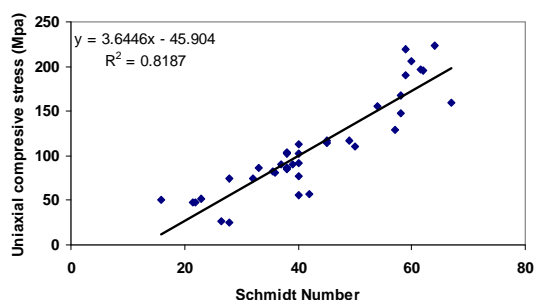
- تعیین امتیاز مربوط به قابلیت خردشدن نمونه بر اساس جدول ۶

- مقایسه امتیاز غوطه‌وری و امتیاز قابلیت خردشدن نمونه و انتخاب

مقدار کمتر به عنوان امتیاز نهایی

به منظور تعیین رابطه‌ی بین مقادیر حاصل از دو روش اندیس دوام و ارتگی و آزمایش غوطه‌وری، ۲۰ نمونه از سقف معادن منطقه البرز شرقی برداشت و با این دو روش مورد آزمایش قرار گرفتند. نمودار حاصل از نتایج دو آزمایش در شکل ۲ نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، میزان حساسیت سنگ در مقابل رطوبت با استفاده از این دو روش به نحو رضایت‌بخشی با همدیگر

رود، استفاده از چکش اشمیت می‌باشد. این وسیله قابل حمل به ویژه در عملیات صحرایی می‌تواند مقاومت سنگ را به خوبی برآورد کند. ارائه یک رابطه بین عدد اشمیت و مقاومت فشاری تک محوری برای کلیه سنگ‌ها از دقت قابل قبولی برخوردار نخواهد بود. در این تحقیق برای سنگ‌های کمربالای لایه‌های زغالی معادن البرز شرقی بر اساس آزمایشات بر جا یا میدانی مطابق شکل ۱ رابطه‌ای بین مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ سقف و عدد چکش اشمیت ارائه شد. امتیاز مربوط به این پارامتر با استفاده از جدول ۴ تعیین می‌شود.



شکل ۱. رابطه بین عدد چکش اشمیت و مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ سقف معادن زغال منطقه البرز شرقی

## جدول ۴. تعیین امتیاز مقاومت فشاری تک‌محوری

## سنگ

UCS (Mpa)	>۲۰۰	۱۰۰-۲۰۰	۵۰-۱۰۰	۲۵-۵۰	۰-۲۵
امتیاز	۲۵	۱۸	۱۲	۶	۲/۵

## ۲-۴. مقاومت کششی

سنگ‌ها معمولاً در مقابل کشش ضعیف‌اند و بنا بر این وجود تنش کششی در ساختمان سنگ به شکست آن کمک می‌کند. بهترین روش اندازه‌گیری مقاومت کششی سنگ، کشیدن مستقیم آن است از طرفی چون اندازه‌گیری مستقیم مقاومت کششی نمونه‌های سنگی به لحاظ آماده‌سازی نمونه‌ها، آزمایشی با دقت بالا، وقت گیر و با هزینه زیاد می‌باشد، و از آنجا که فقط دانستن اندازه تقریبی مقاومت کششی در بسیاری از موارد کفایت می‌کند. اندازه‌گیری این پارامتر به کمک روش‌های جایگزین که ساده و در عین حال از دقت قابل قبولی برخوردار باشند، انجام می‌شود [۱۶].

یکی از این روش‌های جایگزین که هم به صورت آزمایشگاهی و هم به روش صحرایی قابل اجرا بوده و بیشتر از ۳۰ سال است که در مجامع بین‌المللی مکانیک سنگ پذیرفته شده است، استفاده از آزمایش برزیلی است. لذا برای تعیین مقاومت کششی از این آزمایش و برای تعیین امتیاز مربوط به این پارامتر از جدول ۵ استفاده شده است.

می‌توان با استفاده از جدول ۷ امتیاز مربوط به حساسیت در برابر رطوبت را به دست آورد.

قابل انطباق هستند. در نتیجه می‌توان با آزمایش غوطه‌وری و استفاده از شکل ۲ اندیس دوام نمونه را به دست آورد. سپس

### جدول ۶. تعیین امتیاز نمونه‌های سنگی با آزمایش غوطه‌وری

قابلیت خردشدن نمونه با دست نمونه قبل از آزمایش		امتیاز غوطه‌وری	
امتیاز	مشاهده	امتیاز	مشاهدات
	بدون تغییر = ۴ تغییر کم = ۳ تغییر زیاد = صفر		زلال = ۲ غیر زلال = ۱ گل‌آلود = صفر
توضیح: از میان امتیازات مربوط به جمع امتیاز غوطه‌وری و امتیاز قابلیت خردشدن نمونه با دست هر کدام کوچک‌تر باشد، به عنوان امتیاز نهایی نمونه مورد آزمایش منظور خواهد شد.			نیست = ۲ کم = ۱ زیاد = صفر
			بدون ترک = ۶ ترک کم/تصادفی = ۲ ترک زیاد/جهت یافته = ۱ خرد شدن کامل نمونه = صفر
			جمع امتیاز مربوط به امتیاز غوطه‌وری
شاخص خردشدگی نمونه با دست بعد از آزمایش			

فاصله‌داری و تداوم درزه‌ها تعریف می‌شود. تداوم ناپیوستگی یا درزه در محل کار به آسانی قابل اندازه‌گیری است. برای اندازه‌گیری فاصله‌داری نیز معمولاً از شاخص اندیس کیفی سنگ (RQD) و یا روش خط برداشت (Sampling Line) استفاده می‌شود. پس از مطالعات درزه‌نگاری (Joint study) امتیاز مربوط به عدد دسته درزه، فاصله‌داری و تداوم دسته درزه تواما و با استفاده از جداول ۸ و ۹ تعیین می‌شود.

### جدول ۸. تعیین امتیاز عدد دسته درزه

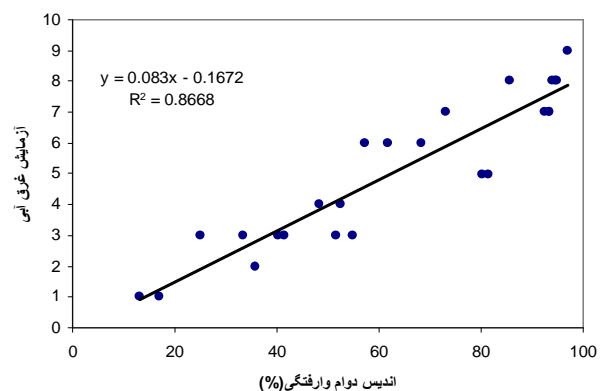
عدد درزه	۰	۱	۲	۳
امتیاز	۶	۴	۲	۱

### جدول ۹. تعیین امتیاز فاصله‌داری و تداوم دسته درزه

فاصله‌داری درزه (متر)	> ۱/۸	۱/۸ - ۰/۶	۰/۶ - ۰/۲	۰/۲ - ۰/۰۶	< ۰/۰۶
تداوم درزه (متر)	> ۱۲	۱۰ - ۱۲	۸ - ۱۰	۶ - ۸	۴ - ۶
۰ - ۱	۱۲	۱۰	۸	۶	۴
۱ - ۳	۱۱	۹	۷	۵	۳
> ۳	۱۰	۸	۷	۴	۳

### ۴-۵. زبری سطح درزه

زبری سطح یک درزه نیز در رفتار برشی سنگ‌های درزه‌دار تشکیل دهنده سقف معادن زغال از اهمیت به سزایی برخوردار است. این اهمیت به دلیل تأثیر فوق‌العاده زبری در به وجود آمدن اتساع یا جابجایی عمودی و به تبع آن در مقاومت ناپیوستگی طی جابجایی افقی می‌باشد. برای اندازه‌گیری زبری سطح یک درزه می‌توان به



شکل ۲. رابطه بین اندیس دوام و امتیاز آزمایش غوطه‌وری

### جدول ۷. تعیین امتیاز حساسیت سنگ‌ها در مقابل رطوبت

SDT	۹۸ - ۱۰۰	۹۰ - ۹۸	۶۰ - ۹۰	۳۰ - ۶۰	< ۳۰
امتیاز	۱۰	۸	۵	۲	۱

### ۴-۴. درزه‌داری

از دیدگاه مهندسی، آگاهی از نوع و تواتر ناپیوستگی‌های موجود در سنگ، ممکن است بیشتر از جنس و نوع سنگ در رفتار آن اثرگذار باشد. بر اساس نظر وتوکوری، خواص مهندسی توده‌سنگ بیشتر تابع سیستم ناپیوستگی‌های موجود در آن است، تا مقاومت ماده سنگ [۱۶]. بنابراین شرح خصوصیات یک سیستم ناپیوستگی به طوری که قابلیت تغییر پارامترهای هندسی آن سیستم را شرح دهد، یک گام اساسی در مورد مسائل مربوط به پایداری توده‌سنگ ناپیوسته است. خصوصیات یک سیستم درزه به وسیله دو پارامتر

مهمی بر پایداری سقف کارگاه دارد. بنابراین لازم است این عوامل به نحو رضایت بخشی بررسی شوند.

در این رده‌بندی، جهت درزه‌ها نسبت به امتداد کارگاه استخراج که در جهت شیب لایه زغال می‌باشد، سنجیده شده و به چهار حالت مندرج در ردیف اول جدول ۱۱ تقسیم شده‌اند. علاوه بر این شیب درزه‌ها نسبت به شیب کارگاه استخراج (شیب لایه) سنجیده شده و در ستون اول این جدول آورده شده‌اند. در نتیجه می‌توان پس از اندازه‌گیری شیب و امتداد درزه و با مراجعه به جدول ۱۱ امتیاز مربوط به این پارامتر را پیدا کرد.

#### جدول ۱۲. تعیین امتیاز توجیه فضایی کارگاه و درزه‌ها

امتداد درزه (درجه)				شیب درزه
۰ - ۱۰	۱۰ - ۳۰	۳۰ - ۶۰	۶۰ - ۹۰	
۴	۳	۷	۱۳	در جهت شیب کارگاه
۵	۴	۱۰	۲۰	عمود بر سطح
۸	۶	۱۴	۲۶	در خلاف شیب

#### ۵. رده‌بندی سقف معادن زغال

به منظور رده‌بندی سقف در معادن زغال‌سنگ مورد مطالعه، فرم‌هایی مطابق فرم پیوست مقاله تهیه و از کارگاه‌های استخراج مختلف بازدید به عمل آمد و نمونه‌گیری‌های لازم انجام شد. بر اساس مشاهدات رفتار سقف در کارگاه‌ها، برداشت‌های صورت گرفته و نتایج آزمایش‌های انجام شده، فرم‌های مربوطه تکمیل و امتیاز سقف هر یک از کارگاه‌ها طبق جدول ۱۲ تعیین شده است.

بر اساس امتیاز هر یک از کارگاه‌ها و مشاهدات انجام شده می‌توان سقف معادن زغال‌سنگ در این منطقه را به ۵ رده مطابق جدول ۱۳ رده‌بندی کرد. بر اساس این رده‌بندی می‌توان رفتار سقف را پیش‌بینی و روش استخراج و الگوی مناسب سیستم نگهداری چوبی را برای آن اجرا کرد.

صورت مشاهده‌ای، از مقیاس زبری بارتون استفاده کرد. جدول ۱۰ امتیاز مربوط به زبری درزه را در بازه‌های مختلف نشان می‌دهد.

#### جدول ۱۰. تعیین امتیاز زبری سطح دسته‌درزه

زبری درزه	۱۴ - ۲۰	۱۰ - ۱۴	۴ - ۱۰	۰ - ۴
امتیاز	۶	۴	۲	۱

#### ۴-۶. ضخامت لایه‌بندی

لایه‌بندی یکی از مسائلی است که باعث به وجود آمدن مشکلاتی در رفتار سنگ سقف در معادن زغال شده و در اکثر رده‌بندی‌های قبلی نیز به آن توجه شده است. معمول‌ترین موارد تاثیر این عامل، حضور تورق ضعیف در شیل، و ماسه‌سنگ میان لایه‌های کم ضخامت در شیل (Stackrock) است. در دو مثال فوق نه تنها فاصله‌داری کم صفحات بلکه سطوح لایه‌بندی سبب تضعیف سنگ می‌شوند. بعضی از محققین بر این عقیده هستند که شیل توده‌ای یکی از پایدارترین انواع سنگ‌هاست [۱۹]. ردیف شدگی کانی‌ها در مبحث لایه‌بندی از پیچیدگی بیشتری برخوردار است، زیرا بعضی از شیل‌ها ممکن است در نظر افراد بی‌تجربه فاقد لایه‌بندی به نظر آیند در حالی که عملاً خیلی متورق باشند. بنا بر این انجام آزمایش‌های مربوط به تعیین مقاومت لایه‌بندی، خصوصاً هنگامی که پدیده لایه‌بندی مشهود نباشد، اهمیت زیادی دارد [۱]. ضخامت لایه‌بندی را در صورت در اختیار داشتن مغزه، می‌توان با استفاده از مغزه‌های حفاری و در غیر این صورت با اندازه‌گیری مستقیم به دست آورد و سپس با استفاده از جدول ۱۱ امتیاز مربوط به آن را محاسبه کرد.

#### جدول ۱۱. تعیین امتیاز ضخامت لایه‌بندی

ضخامت لایه	> ۱/۸ (متر)	۰/۶ - ۱/۸ (متر)	۰/۲ - ۰/۶ (متر)	۶۰ - ۲۰۰ (میلی‌متر)	< ۶۰ (میلی‌متر)
امتیاز	۱۰	۸	۶	۴	۳

#### ۴-۷. توجیه فضایی کارگاه و درزه‌ها

شکل، اندازه و جهت هر فضای زیرزمینی و از جمله کارگاه استخراج نقش مهمی در رفتار توده‌سنگ دارد. وضعیت درزه‌ها، نیز تاثیر

#### جدول ۱۳. امتیاز سقف کارگاه‌های مختلف

امتیاز پارامتر									
کارگاه	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	رطوبت	عدد دسته درزه	فاصله‌داری و تداوم درزه‌ها	زبری سطح درزه	ضخامت لایه‌بندی	هندسه کارگاه	جمع امتیاز
قشلاق K <sub>5</sub>	۱۲	۴	۵	۲	۷	۲	۴	۱۳	۴۹
قشلاق K <sub>3</sub>	۱۸	۵	۸	۲	۹	۶	۸	۲۶	۸۲
قشلاق K <sub>60</sub>	۱۲	۳	۵	۲	۷	۴	۶	۶	۴۵
قشلاق K <sub>67</sub>	۱۲	۴	۱	۲	۵	۴	۳	۷	۳۸
رضی K <sub>30</sub>	۱۸	۵	۱۰	۲	۱۰	۶	۸	۲۶	۸۴
رضی K <sub>31</sub>	۱۲	۴	۵	۲	۸	۴	۳	۱۰	۴۸
ملج آرام K <sub>13</sub>	۶	۱	۲	۱	۳	۱	۳	۳	۲۰

## ادامه جدول ۱۳. امتیاز سقف کارگاه‌های مختلف

امتیاز پارامتر									
کارگاه	مقاومت فشاری	مقاومت کششی	رطوبت	عدد دسته درزه	فاصله داری و تداوم درزه‌ها	زبری سطح درزه	ضخامت لایه‌بندی	هندسه کارگاه	جمع امتیاز
تخت $K_{19}$	۲/۵	۱	۱	۱	۵	۱	۳	۴	۱۸/۵
تخت $K_{19}$	۱۲	۳	۵	۲	۸	۶	۳	۴	۴۳
کلاریز $K_{10}$	۱۸	۳	۸	۲	۹	۶	۸	۲۰	۷۸
کلاریز $P_{10}$	۱۲	۴	۸	۲	۱۱	۴	۸	۱۰	۵۹
طرزه $K_{19}$	۶	۲	۲	۲	۸	۲	۳	۱۰	۳۵
طرزه $P_{10}$	۱۲	۴	۵	۲	۸	۴	۸	۵	۴۸
رزمجا $K_{10}$	۱۸	۴	۱۰	۲	۱۱	۶	۸	۱۰	۶۹
رزمجا $P_{15}$	۱۲	۳	۵	۲	۸	۴	۶	۱۳	۵۳

## جدول ۱۴. نتیجه مطالعات مربوط به رفتار سقف بلاواسطه و رده‌بندی سنگ سقف در معادن منطقه البرز شرقی

امتیاز	توصیف
<۲۰	جنس این سقف شیل کربونیزه نرم و ضعیف، ماسه سنگ آرزلیتی همراه با ورقه‌های شیل، میان لایه‌های نرم و شکسته، شیل خردشده. ابعاد قطعات تخریب شده کوچک هستند. گام تخریب اولیه ۲ و گام تخریب دوره‌ای به ۱ متر می‌رسد. پس از گرفتن زغال، سقف درمندی کم‌تر از یک ساعت ریزش می‌کند، بنابراین می‌بایست بلافاصله سیستم نگهداری در زیر این سقف نصب شود، در این شرایط علاوه بر سرراه‌های مرسوم که در جهت شیب کارگاه نصب می‌شوند، می‌باید در جهت عمود بر امتداد کارگاه نیز سرراه‌هایی با طول ۱ متر نصب شوند.
۲۱-۴۰	جنس این سقف ممکن است شیل ماسه‌ای، شیل کربونیزه نرم و ضعیف، میان لایه‌های زغالی نرم و شکسته، سنگ‌های با قابلیت جدایش بالا. مواد تخریب شده دارای ابعاد بزرگ‌تری (۲×۰/۱×۰/۰۵ متر) نسبت به حالت قبل هستند. گام تخریب اولیه ۶ و گام تخریب دوره‌ای به ۳-۲ متر می‌رسد. پس از گرفتن زغال، معمولاً سقف به مدت یک شیفت کاری، دچار ریزش عمده‌ای نمی‌شود. سیستم نگهداری چوبی شامل ستون، سرلا و جرز می‌بایست در پایان هر شیفت کاری در زیر این سقف نصب شود.
۴۱-۶۰	سقف از جنس انواع شیل‌های مختلف، ماسه‌سنگ ریز دانه و ضعیف، لایه‌های متناوبی از انواع سنگ‌های رسوبی، میان لایه‌های ماسه‌سنگ و شیل. قطعات حاصل از تخریب آن ابعاد نسبتاً بزرگی دارند (حدود ۰/۵×۰/۵×۰/۳ متر)، گام تخریب اولیه ۱۸ و گام تخریب دوره‌ای به ۸ متر می‌رسد. این سقف پس از استخراج، به مدت ۳ تا ۴ روز پایدار بوده و مناسب‌ترین شرایط را برای جبهه کار طولانی دارد. در این نوع سقف پدیده ضربه سقف دیده نمی‌شود. نصب سیستم نگهداری با تاخیر تا ۲ روز مشکلی ایجاد نمی‌کند.
۶۱-۸۰	سقف بلاواسطه از جنس ماسه‌سنگ متوسط و مقاوم، شیل سخت. ابعاد قطعات فضای تخریب ۰/۱×۰/۱۵×۰/۳ متر، گام تخریب اولیه ۲۴ و گام تخریب دوره‌ای به ۱۲ متر می‌رسد. این نوع سقف می‌تواند در یک ناحیه وسیع و در مدت زمان طولانی (۳ تا ۴ ماه) به صورت معلق باقی بماند. این سقف‌ها در هنگام تخریب بار ضربه‌ای شدیدی تولید می‌کنند و صدمه زیادی به سیستم نگهداری وارد می‌کنند. پرکردن قسمت‌های بالای کارگاه یعنی زیر لنگه فوقانی، خصوصاً در کارگاه‌های با شیب بیش‌تر از ۴۵ درجه که به علت شیب زیاد و غلظت سنگ به پایین، کارگاه خالی مانده است، توصیه می‌شود. روش مناسب کار پلکانی معکوس و ترکیبی از روش تخریبی و پرکردن موضعی است. به منظور تخریب منظم سقف و جلوگیری از ایجاد فضای وسیع در زیر زمین و در نتیجه ضربه سقف، می‌بایست روش‌های مصنوعی القایی شکستن سقف مانند آتشیاری سقف پس از ۱۰ متر پیشروی جبهه کار ترتیب داده شود.
۸۱-۱۰۰	سقف بلاواسطه از جنس شیل ماسه‌ای خیلی مقاوم، ماسه‌سنگ ریزدانه مقاوم با ورقه‌های شیل، ماسه‌سنگ توده‌ای ضخیم لایه. ابعاد قطعات فضای تخریب ۰/۱×۰/۲×۰/۴ متر، گام تخریب اولیه تا ۳۰ و گام تخریب دوره‌ای تا ۱۸ متر می‌رسد. این نوع سقف می‌تواند مدت بسیار طولانی معلق بماند. با توجه به این که بار زیادی از طرف سقف به سیستم نگهداری وارد می‌شود، استخراج می‌باید به صورت پلکانی معکوس و کندن و آکندن باشد، و به دلیل مسائل ایمنی پس از ۱۰ متر پیشروی می‌بایست در فاصله تقریبی یک متر مانده به جبهه کار تخته کوبی و فضای خالی پر شود.

## ۵. بحث و نتیجه‌گیری

نبوده و نتایج حاصل از آن‌ها با همدیگر و با مشاهدات واقعی محیط کار منطبق نمی‌باشد.

بنابراین با مطالعه دقیق گزارش‌های زمین‌شناسی، تحلیل نتایج گمانه‌های اکتشافی و انجام عملیات میدانی شامل اندازه‌گیری مقاومت فشاری و کششی سنگ سقف، حساسیت در برابر رطوبت، مشاهدات عینی و تجربیات کاری مهندسی شاغل در معادن منطقه، یک روش رده‌بندی منطبق بر شرایط منطقه البرز شرقی پیشنهاد شد. با استفاده از این روش رده‌بندی می‌توان پارامترهای گام تخریب اولیه و دوره‌ای، زمان پایداری و مساحت آزاد سقف،

پدیده ریزش سقف یکی از خطرات عمده‌ای است که کارگران معادن زیرزمینی زغال‌سنگ با آن مواجه هستند. به منظور ارزیابی رفتار سقف و کاهش خطرات ناشی از آن طی سالیان گذشته روش‌های تجربی زیادی در نقاط مختلف جهان پیشنهاد شده‌اند. از آنجا که شرایط کاری منطقه البرز شرقی به ویژه شیب، عمق، سرعت پیشروی و نوع وسایل نگهداری کارگاه‌های استخراج، با شرایط کاری مناطقی که روش‌های قبلی ارائه شده‌اند، متفاوت است، هیچ کدام از این روش‌ها به تنهایی در معادن منطقه البرز شرقی پاسخگو



- [12] Rusnak, J., Mark, C., "Using the Point Load Test to Determine the Uniaxial Compressive Strength of Coal Measure Rock". In Peng, S.S., Mark, C. (Eds.), Final Proc. 19<sup>th</sup> International Conference on Ground Control in Mining Morgantoen, WV, 2000, pp. 362-371.
- [13] Mark, C., Molinda, G.M., Barton, "New Developments with the Coal Mine Roof Rating". Final Proc. 21<sup>st</sup> Intl. Conf. on Ground Control in Mining. West Virginia University, Morgantoen, WV, 2002, pp. 294 - 301.
- [14] Whittles, D.N., Reddish, D.J., Lowndes, I.S., "The Development of a Coal Measure Classification (CMC) and its Use for Prediction of Geomechanical parameters" International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 2006.
- [15] Bieniawski, Z. T., "Rock Mechanics Design In Mining and Tunneling" A.A Balkema, Rotterdam, 1984.
- [16] Vutukuri, V.S., "Introduction to Rock Mechanics" Publisher: Industrial Publishing and Consulting, Inc, 1994.
- [17] Hoek, E., "Rock Mechanics Laboratory Testing In the Context of a Consulting Engineering Organization", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 22, 1977, pp. 93-101
- [18] Sickler, R.A., "Engineering Classification of Shales", Final Proc. Fifth Conf. on Ground Control in Mining, Morgantoen, WV, 1985, pp. 221-233.
- [19] Moebs, N.N., Stateham, R.M., "The Diagnosis and Reduction of Mine Roof Failure", Coal Mining, 1985, 9P.

امکان بروز پدیده ضربه سقف و الگوی مناسب سیستم نگهداری را برای کارگاه‌های استخراج معادن مختلف این منطقه پیش‌بینی کرد. استفاده از این روش رده‌بندی به طراحان استخراج کمک خواهد کرد که با استفاده از اطلاعات به دست آمده در مراحل زمین‌شناسی و اکتشافی و نیز اطلاعات حاصل از کارگاه‌های استخراج معادن هم‌جوار، قبل از اقدام به بازگشایی یک جبهه‌کار از رفتار سقف اطلاع حاصل کنند. اطلاع قبلی از رفتار سنگ سقف به معنی برنامه ریزی بهتر عملیات معدنی و کاهش خطرات ناخواسته می باشد.

### مراجع

- [1] Mark, C., Molinda, G.M., "The Coal Mine Roof Rating (CMRR) – A decade of experience, " International Journal of Coal Geology 64, 2005, pp. 85-103.
- [2] Canbulat, Dlokweni, "Rating System for Coal Mine Roofs, " Draft Final Report, Project No: COL 812 Safety in Mines Research Advisory Committee, 2002.
- [3] Krippner, E., "Utilization of Mining Research in Practice-Geomechanical Example," in German, Gluckauf, 24, 1964.
- [4] Pawlowicz, K., "Classification of Rock Caveability of Coalmeasure Strata in Upper Silesia Coalfield," in Polish, Prace GIG, Komunikat, No. 429, Katowice, 1967.
- [5] Laubscher, D.H., Taylor, H.W., "The Importance of Geomechanics Classification of Jointed Rock Masses in Mining Operations". Exploration for rock engineering, ed. Z.T. Bieniawski, A.A Balkema, Rotterdam, Vol. 1, 1976, pp. 119-128.
- [6] Kidybinski, A., "Roof Rock Stability Tests and Powerd Support Selection Systems for Longwalls; State-of-the-Art Report," USDI/CMI Joint Research Project No. 14 - 01-0001-1450, Rep. No. 2, 1977.
- [7] Unrug, K., Szwilski, A., "Influence of Strata Control Parameters on Longwall Mining Design," Proceedings of the 21<sup>st</sup> U.S. Symposium on Rock Mechanics, 1980, Rolla, Mo., 1980, pp. 720-728.
- [8] Newman, D.A., Bieniawski, Z.T., "Modified version of the Geomechanics Classification for Entry Design in Underground Coal Mines, " Transactions of Society of Mining Engineering AIME 280, 1986, pp. 2134-2138.
- [9] Molinda, G., Mark, C., "The Coal Mine Roof Rating (CMRR)- A Practical Rock Mass Classification for coal mines". USBM IC 9387. 1994, 83pp.
- [10] Yuanwei, S., Yu, N., Baohong, S., "The new Classification of Surrounding Rock Mass and Selection of Powered Supports at Coalface, " Second National Conference on Ground Control in Mining, 14-15 October, 1996, Calcutta, India, 1996.
- [11] Das, S.K., "Observation and Classification of Roof Strata Behaviour Over Longwall Coal Mining Panels in India", International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 37, 2000, pp. 585 - 597.