

کمی سازی عدم قطعیت در پیش بینی گام تخریب اول در استخراج جبهه کار طولانی با روش های تحلیل قابلیت اعتماد

محمد عطایی^{۱*}؛ سجاد محمدی^۲

۱- استاد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- دکتری استخراج معدن، مجتمع معادن زغال سنگ طبس

پذیرش: ۱۴۰۰/۰۵/۰۱

دریافت: ۱۳۹۹/۰۸/۰۱

چکیده

هدف این مقاله تحلیل قابلیت اعتماد روش های تجربی و تحلیلی پیش بینی گام تخریب اول به منظور کمی سازی عدم قطعیت مدل ها و پارامترها است. برای این منظور پروژه استخراج جبهه کار طولانی مکانیزه در معدن بلوک ۳ پروژه ۴ انتخاب شده است. در این راستا با استفاده از دو روش ممان دوم مرتبه اول (*FOSM*) و شبیه سازی مونت کارلو (*MCS*) قابلیت اعتماد دو روش تجربی *RQI* و *CMRI* و مدل تحلیلی مبتنی بر مکانیک تیر با تعیین شاخص قابلیت اعتماد (β) تحلیل شده است. یافته ها نشان داد که نتایج دو روش *FOSM* و *MCS* نزدیک به هم است. همچنین شاخص قابلیت اعتماد مدل *RQI* (میانگین ۲۳/۹۲) بیش از دو روش دیگر است و پس از آن به ترتیب مدل تحلیلی (میانگین ۲۱/۱۷) و مدل *CMRI* (میانگین ۹/۷۱) قرار می گیرند. تحلیل این نتایج نشان می دهد که اختلاف کم شاخص قابلیت اعتماد روش *RQI* و مدل تحلیلی با در نظر گرفتن تعداد پارامترهای دخیل بیشتر در مدل تحلیلی قابل توجیه است. از سویی دیگر مقدار متوسط گام تخریب پیش بینی شده دو روش تحلیلی (میانگین ۲۰/۰۳) و *CMRI* (میانگین ۱۹/۱۷) نزدیک به هم بوده و بر اساس تجارب گذشته ناحیه پروژه قابل قبول است. بر اساس این دو موضوع، مدل تحلیلی به عنوان مدل با قابلیت اعتماد بیشتر برای پیش بینی گام تخریب اول در معدن بلوک ۳ پروژه ۴ معرفی شده است.

واژگان کلیدی

عدم قطعیت، تحلیل قابلیت اعتماد، شاخص قابلیت اعتماد، گام تخریب اول، معدن بلوک ۳ پروژه ۴

۱- مقدمه

مرحله حداکثر فشار به جبهه کار و وسایل نگهداری وارد می شود. از این رو تخمین گام تخریب اول رویکردی اساسی در برآورد بیشینه تنش های وارده بر سیستم نگهداری در طی فرآیند استخراجی و متعاقب آن تخریب تدریجی لایه های سقف بلاواسطه است. به منظور پیش بینی گام تخریب اول روش های مختلف تجربی، تحلیلی و مدل سازی عددی قابل کاربرد است [1].

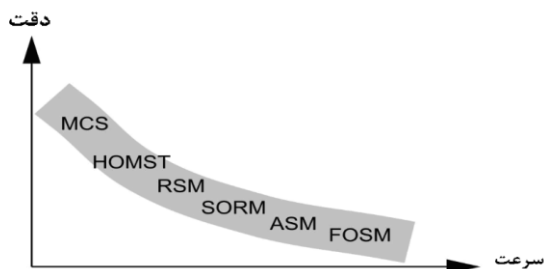
از آنجایی که مدل سازی عددی مستلزم پارامترهای

تخریب سقف که به طور معمول از پایین ترین لایه سقف بلاواسطه آغاز شده و به سمت بالا گسترش پیدا می کند یک فرآیند دینامیکی پیچیده شامل شکستگی، از دست دادن ساختار و حرکت سنگ است؛ بنابراین رویداد اولین تخریب در یک پهنه شامل فرآیندهای خمش، جدایش، ایجاد شکستگی و نهایتاً ریزش تیرهای سنگی است. طی این

*نویسنده مسئول: استاد دانشگاه صنعتی شاهرود

پست الکترونیک: ataei@shahroodut.ac.ir

ژئوتکنیک و مکانیک سنگ، روش‌های سطح ۲ و سه دارای کاربرد بیشتری هستند. در روش‌های سطح ۲ تمام خصوصیات احتمالاتی متغیرهای تصادفی را در نظر می‌گیرد، البته با تقریب‌هایی که در بعضی موارد کاربرد آن‌ها را محدود می‌کند. این سطح شامل روش‌هایی مانند قابلیت اعتماد مرتبه اول (*First Order Reliability Method*) (*FORM*) (شامل روش‌های ممان دوم مرتبه اول (*First Order Second Moment (FOSM)*)، پیشرفته ممان دوم مرتبه دوم (*Advanced second moment (ASM)*)، قابلیت اعتماد مرتبه دوم (*Second Order Reliability Method*) (*SORM*)، روش تخمین نقطه‌ای (*Point Estimate Method*) است. روش‌های سطح ۳ به‌عنوان روش‌های کاملاً احتمالاتی و دقیق (به این مفهوم که هیچ ساده‌سازی و تقریبی صورت نگرفته) شناخته می‌شوند. مهم‌ترین روش در این قسمت شبیه‌سازی مونت کارلو (*Monte Carlo simulation (MCS)*) است. هریک از این روش‌ها دارای محدودیت‌ها، مزایا و معایب مختلفی هستند. از مهم‌ترین معیارهای برای انتخاب از میان آن‌ها می‌توان به دقت و سرعت آن‌ها اشاره کرد. در شکل ۱ مقایسه بین این روش‌ها از این دو منظر انجام شده است [2].



شکل ۱- مقایسه روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد [4]

با توجه به حوزه کاربرد هریک از روش‌ها و همچنین بر اساس شکل میزان دقت و سرعت هریک از آن‌ها روش *FOSM* به‌عنوان سریع‌ترین و روش مونت کارلو به‌عنوان دقیق‌ترین روش‌ها در این مجموعه‌ها برای این مقاله انتخاب شده‌اند.

نکته قابل توجه این است که این مجموعه روش‌ها عموماً برای تعیین پایداری و شکست سیستم‌ها (شیروانی‌ها، پایه‌های معدنی، پایه‌های پل و ...) استفاده می‌شود

دقیق زیادی است، کاربرد روش‌های تجربی و تحلیلی به‌ویژه در فازهای اولیه طراحی بسیار گسترده است. در تعیین گام تخریب اول با استفاده از این مدل‌ها دو چالش اساسی وجود دارد:

۱. عدم قطعیت مدل‌ها: مدل‌های تجربی ارائه شده عموماً بر اساس داده‌های محدود از یک یا چند معدن توسعه یافته‌اند و از این‌رو برای استفاده در شرایط دیگر باید این موضوع را مدنظر قرار داد. روابط تحلیلی نیز اگرچه دارای بنیانی ریاضیاتی و مکانیکی هستند اما دارای ساده‌سازی می‌باشند که کاربرد آن‌ها را در شرایط پیچیده ژئومکانیکی و ژئوتکنیکی زمین با چالش‌هایی مواجه می‌کنند.

۲. عدم قطعیت در داده‌های ورودی: خاک و سنگ از جمله محیط‌های غیر همگن و ناهمسانگرد هستند که معمولاً توسط یکسری پارامترهای هندسی، مکانیکی و مقاومتی تعریف می‌شوند. این پارامترها در دو نقطه مختلف می‌توانند مقادیر متفاوتی را نشان دهند، لذا تعریف آن‌ها به‌طور دقیق ممکن نیست، مگر با اندازه‌گیری در هر نقطه که چنین امری مسلماً امکان‌پذیر نیست. به‌عبارت‌دیگر پارامترها، مقادیری را کسب می‌کنند که شناخت دقیق آن‌ها برای ما ممکن نیست. درواقع به یک نقطه در فضا ممکن است مقداری از منحنی تغییرات آن پارامتر اختصاص داده می‌شود، لذا برای فائق آمدن بر خصوصیت ذاتی عدم قطعیت پارامترها در مهندسی سنگ، نیاز به تعریف آن‌ها توسط یک فرآیند آماری است [2].

با توجه به این دو چالش اساسی به روش‌هایی نیاز است که نقش عدم قطعیت مقادیر پارامترها را در مدل‌ها مدنظر قرار دهد و از سویی دیگر قابلیت اعتماد به نتایج مدل‌ها را به‌صورت کمی تعیین کند. تحلیل قابلیت اعتماد شامل یک مجموعه روش‌هایی است که عدم قطعیت‌ها را با استفاده از توزیع احتمالاتی تابع پایه، مدیریت می‌کنند. در حقیقت روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد، عدم قطعیت‌های پارامترهای ورودی را به مقدار خروجی تابع انتقال می‌دهند و یا به عبارتی تأثیر عدم قطعیت‌های پارامترهای ورودی بر مقدار خروجی اعمال خواهد شد. مجموعه روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد به سه سطح شامل سطح ۱ (نیمه احتمالاتی)، سطح ۲ (کاملاً احتمالاتی با تقریب) و سطح ۳ (کاملاً احتمالاتی) تقسیم‌بندی می‌شوند [2] و [3]. در مهندسی

نظر گرفت. بر این اساس رابطه نهایی تعیین گام تخریب اول به صورت رابطه ۴ است:

$$L = \sqrt{\frac{2\sigma_1 t}{\gamma}} \quad (4)$$

γ_e وزن مخصوص مؤثر سقف بلاواسطه (N/m^3) به صورت رابطه ۵ است.

$$\gamma_e = \frac{E_1 t_1^2 \sum_{i=1}^n \gamma_i t_i}{\sum_{i=1}^n E_i t_i^3} \quad (5)$$

۲-۲-۲ روش‌های قابلیت اعتماد

۱-۲-۲ روش ممان دوم مرتبه اول

در روش *FOSM* منحنی تابع پایه (تابع متغیرهای تصادفی ورودی) توسط چندجمله‌ای تیلور معادل‌سازی می‌شود، به عبارت دیگر این منحنی توسط بسط سری تیلور در اطراف نقطه هدف به صورت خطی تقریب زده خواهد شد. در این روش تنها از جمله اول بسط سری تیلور استفاده می‌شود و از بقیه جملات صرف نظر خواهد شد [9]. به این ترتیب امید ریاضی (میانگین) (μ_g یا $E[g]$) و انحراف معیار (σ_g) تابع پایه بر اساس متوسط و انحراف معیار متغیرها به سادگی محاسبه می‌شوند.

اگر تابع پایه (مدل) مدنظر به صورت $g(X_i)$ باشد که در آن X_i متغیرهای تصادفی هستند (معمولاً تابع ترکیبی از متغیرهای ورودی ثابت و تصادفی است)، میانگین و انحراف از معیار آن در حالت غیرهمبسته بودن متغیرهای ورودی به ترتیب با استفاده از روابط ۶ و ۷ محاسبه می‌شود.

$$\mu_g = g(\mu_{X_i}) \quad (6)$$

$$\sigma_g \approx \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial g}{\partial X_i} \right)_{\mu_{X_i}} \sigma[X_i]^2} \quad (7)$$

فرض مستقل (غیرهمبسته) بودن خواص اصلی فیزیکی و مقاومتی سنگ و خاک، به وسیله محققان مختلفی گزارش شده است [10].

۲-۲-۲ شبیه‌سازی مونت کارلو

روش مونت کارلو عمومی‌ترین روش تقریب احتمالاتی حالت-های یک مدل از طریق نمونه‌های آزمایشی است. هدف از این روش ایجاد یک توزیع احتمالی از خروجی یک مدل بر اساس متغیرهای دخیل در آن است. بر این اساس با تولید

درحالی‌که در این مقاله هدف پیش‌بینی احتمالاتی گام تخریب اول و ارزیابی قابلیت اعتماد نتایج حاصل از روش‌های تجربی و تحلیلی است. برای این منظور معدن زغال سنگ بلوک ۳ پرورده ۴ طبس مدنظر قرار گرفته است.

۲- روش‌شناسی

۱-۲-۱ روش‌های تجربی و تحلیلی در پیش‌بینی گام

تخریب اول

۱-۱-۲ روش تجربی شاخص کیفیت سنگ (Rock

Quality Index (RQI)

در سال ۱۹۶۷ پاولوویچ لهستانی، شاخص کیفیت سنگ را برای ارزیابی رفتار تخریب لایه‌های سقف بلاواسطه پیشنهاد کرد [5]. پس از آن بیلینسکی و کونوپکو در سال ۱۹۷۳ *RQI* را بر اساس مطالعات آزمایشگاهی اصلاح کردند و در نهایت رابطه زیر را برای تعیین گام تخریب اول ارائه دادند [6]:

$$L = 4.47 (0.0064 K_1 K_2 K_3)^{0.4} \sigma_c^{0.68} \quad (1)$$

۱-۲-۲ روش تجربی CMRI

در سال ۱۹۹۸، انستیتوی مرکزی تحقیقات معدنی و سوخت هندوستان (*CMRI*) روشی آماری و تجربی را برای ارزیابی قابلیت تخریب لایه‌ها ارائه کرد. بر این اساس گام تخریب اول به صورت زیر محاسبه می‌شود [7]:

$$L = 0.72 \left(\frac{\sigma_c \left(\frac{RQD - 26.75}{3.03} \right)^n t_b^{0.5}}{5} \right)^{0.51} \quad (2)$$

که مقدار n از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$n = \begin{cases} 1 & RQD < 33.3 \\ 1.1 & 33.3 < RQD < 66.6 \\ 1.2 & 66.6 < RQD \end{cases} \quad (3)$$

۱-۲-۳ روش تحلیلی

به منظور پیش‌بینی و تعیین گام تخریب اول مبتنی بر روش تحلیلی، از تحلیل استاتیکی تیر دوسرگردار استفاده شده است [8]. در این مدل می‌توان سقف کارگاه را به صورت تیرهای موازی دوسرگردار که یکسر آن بر جبهه کار و سر دیگر آن بر پایه زغالی مرزهای پهنه‌ای تکیه دارد (از اثرات متقابل جانبی تیرها نسبت به هم صرف نظر شده است) در

غیرمنظم و با وسعت ۸/۹ کیلومتر مربع (ناحیه مشخص شده در شکل ۲) واقع شده است [14].

بر اساس اطلاعات اکتشافی، این معدن دارای ذخایری مطابق با جدول ۱ است که به عنوان هدف استخراج جبهه کار طولانی مکانیزه پس رو به ترتیب لایه های CI و B2 مدنظر قرار گرفته است. مقادیر ذکر شده بر اساس اطلاعات ۵۸ گمانه اکتشافی در ۱۰ پروفیل در محدوده معدن است. فاز اول این معدن شامل استخراج لایه CI تا افق ۷۱۰+ متر است که نسبت به سطح زمین در عمق کمتر از ۲۰۰ متر قرار می گیرد. ارتفاع طراحی شده کارگاه استخراج ۱/۲۵-۰/۹ متر و به طور میانگین ۱ متر است که با تغییرات مربوط به ضخامت لایه ها سازگاری دارد [14]. طراحی این معدن برای استخراج جبهه کار طولانی تمام مکانیزه با ظرفیت تولید زغال سنگ سالانه ۷۵۰ هزار تن انجام شده است.

با توجه به اینکه طراحی، آماده سازی و تجهیز این معدن در مرحله طراحی پایه قرار دارد، لذا اطلاعات ژئومکانیکی کاملی از ناحیه تهیه نشده است. از این رو به دلیل شباهت های کلی این معدن با دیگر نواحی پروده، اطلاعات محدوده های دیگر پروده نیز جمع آوری و پس از پردازش با اطلاعات موجود در این معدن ترکیب شده است. برای این هدف ارتفاع کارگاه استخراج طراحی شده برابر با ۱ متر [14]، مقدار c (نسبت شکم دادگی لایه قبل از شکسته شدن) برابر با ۰/۵ و مقدار ضریب انبساط حجمی برابر با ۱/۲۵ در نظر گرفته شده است [0]. بر این اساس ارتفاع سقف بلاواسطه برابر با ۲ متر حاصل می شود؛ بنابراین در جدول ۲ اطلاعات آماری متغیرهای سقف بلاواسطه (کاملاً از جنس سیلتستون) ارائه شده است. قابل ذکر اینکه از آنجایی که اطلاعات ژئومکانیکی معدن مورد نظر به طور کامل تعیین و جمع آوری نشده است، لذا بر اساس نظر بسیاری از پژوهشگران برای متغیرهای بکار رفته در این قسمت، توزیع نرمال در نظر گرفته شده است.

اعداد تصادفی یا شبه تصادفی، از توزیع چگالی مربوط به هریک از متغیرهای تصادفی مستقل نمونه گیری کرده و با قرار دادن این نمونه ها در رابطه مدل، توزیع خروجی مدل حاصل می شود. این روش برای هر نوع توزیع ورودی و خروجی قابل استفاده است. از جمله مهم ترین ویژگی های این روش می توان به انعطاف پذیری بالا و عدم وابستگی به ابعاد سیستم اشاره نمود [11] و [12]. گام های اجرای شبیه سازی مونت کارلو به شرح زیر است [13]:

گام اول) تعریف تابع توزیع احتمال برای هر یک از متغیرهای ورودی با استفاده از داده های تجربی
گام دوم) نمونه گیری تصادفی از توزیع احتمال هر متغیر ورودی

گام سوم) استفاده از مقادیر انتخاب شده به عنوان پارامترهای ورودی و محاسبه خروجی

گام چهارم) تکرار گام های (۲) و (۳) تا جایی که یک توزیع احتمال پایدار برای خروجی حاصل شود
گام پنجم) محاسبه احتمال رخداد خروجی با مقدار دلخواه با استفاده از هیستوگرام به دست آمده.

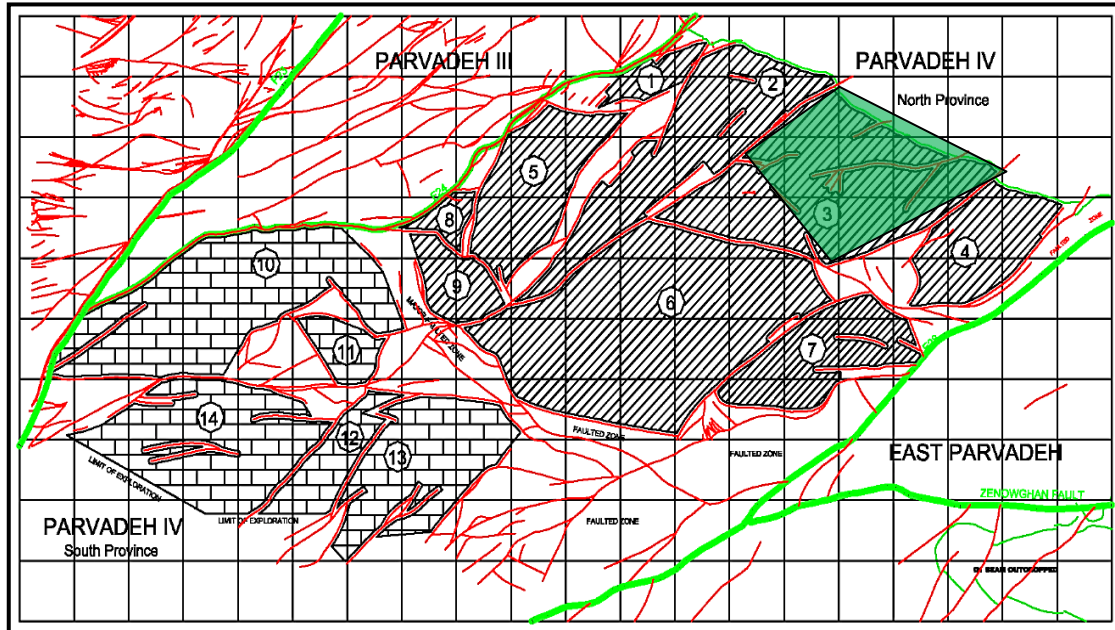
۲-۲-۳- اندیس قابلیت اعتماد (β)

اندیس قابلیت اعتماد، کمیتی است که اجازه می دهد قضاوت ها با شناخت عدم قطعیت های پارامترهای ورودی انجام پذیرد. این اندیس برای تهیه یک مبنای مقایسه ای قابلیت اعتماد، توسعه یافته است و جهت بیان درجه عدم قطعیت محاسبه شده به کار می رود؛ یعنی بدون شناخت کامل تابع توزیع احتمالاتی این پارامترها و تنها با توجه به بعضی از مشخصه های آماری آن ها (میانگین و انحراف معیار) این مهم صورت می گیرد. برای یک تابع پایه $g(X)$ ، اندیس قابلیت اعتماد بر اساس نسبت دو ممان اول آماری به صورت رابطه **Error! Reference source not found.** تعریف می شود.

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} \quad (8)$$

۳- معدن بلوک ۳ پروده ۴

معدن بلوک ۳ در قسمت شمالی ناحیه پروده ۴ با شکلی



شکل ۲- محدوده معدن بلوک ۳ در ناحیه پروژه ۴ [14]

جدول ۱- ذخایر لایه‌های زغال سنگ C1 و B2 در معدن بلوک ۳ پروژه ۴ [14]

نام لایه	مقدار ذخیره محاسبه شده (تن)
C1	۹,۶۸۸,۰۰۰
B2	۱۰,۳۴۰,۰۰۰
مجموع	۲۰,۰۲۸,۰۰۰

جدول ۲- اطلاعات آماری متغیرهای سقف بلاواسطه لایه C1

پارامتر	واحد	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار
مقاومت فشاری تک‌محوری	MPa	۲۶/۱۱	۳۷/۸۹	۳۲	۱/۹۶
مقاومت کششی	Kg/cm ²	۲۶۶/۴۳	۳۸۶/۶۳	۳۲۶/۵۳	۲۰/۰۳
وزن مخصوص	N/m ³	۲۳۰۰۳۰	۲۶۷۵۴	۲۴۸۹۲	۰/۲۳
RQD	ton/m ³	۲/۳۵	۲/۷۳	۲/۵۴	۰/۰۶
	%	۳۵	۵۳	۴۴	۳

۴- تحلیل قابلیت اعتماد

۴-۱- تحلیل قابلیت اعتماد با روش FOSM

۴-۱-۱- قابلیت اعتماد مدل RQI

تنها متغیر تصادفی رابطه ۱ مقاومت فشاری سقف (σ_c) است؛ بنابراین مقدار میانگین رابطه ۹ به‌عنوان تابع پایه با جایگذاری مقدار متوسط مقاومت فشاری سقف برابر با

۱۵/۲۸۸ متر خواهد بود. مشتق تابع پایه این رابطه به‌منظور

محاسبه انحراف معیار آن به‌صورت رابطه ۹ حاصل می‌شود.

$$\frac{\partial g_{RQI}}{\partial \sigma_c} = \frac{3.0396 (0.0064K_1K_2K_3)^{0.4}}{\sigma_c^{0.32}} \quad (9)$$

بر این اساس انحراف معیار تابع پایه برابر با ۰/۶۳۷۸

حاصل می‌شود. بر این اساس مقدار اندیس قابلیت اعتماد

این روش برابر با ۲۳/۹۶۹ است.

۴-۱-۲- قابلیت اعتماد مدل *CMRI*

مقدار متوسط تابع پایه مدل *CMRI* با استفاده از مقادیر جدول ۲ برابر با ۱۹/۲۰۸ به دست می آید. مشتق جزئی مدل *CMRI* نسبت به دو پارامتر تصادفی آن یعنی σ_c و *RQD* به ترتیب به صورت روابط ۱۰ و ۱۱ *Error! Reference source not found.*

$$\frac{\partial g_{CMRI}}{\partial \sigma_c} = \frac{459 * 2^{0.5} * \sigma_c * \left(\frac{100RQD}{303} - \frac{2675}{303} \right)^{1.1}}{6250 * \left(\frac{2^{0.5} * \sigma_c * \left(\frac{100RQD}{303} - \frac{2675}{303} \right)^{1.1}}{5} \right)^{0.49}} \quad (10)$$

$$\frac{\partial g_{CMRI}}{\partial RQD} = \frac{1683 * 2^{0.5} * \sigma_c * \left(\frac{100RQD}{303} - \frac{2675}{303} \right)^{0.1}}{63125 * \left(\frac{2^{0.5} * \sigma_c * \left(\frac{100RQD}{303} - \frac{2675}{303} \right)^{1.1}}{5} \right)^{0.49}} \quad (11)$$

با استفاده از روابط، مقدار انحراف معیار تابع پایه مدل *CMRI* برابر ۱/۹۶۸ حاصل می شود و بنابراین مقدار β مدل *CMRI* برابر با ۹/۷۶۰ حاصل می شود.

۴-۱-۳- قابلیت اعتماد مدل تحلیلی

بر اساس رابطه ۴ مقدار متوسط تابع پایه مدل تحلیلی برابر با ۲۰/۰۴۳ به دست می آید. مشتق جزئی ۵ نسبت به دو متغیر σ_t و γ_e به ترتیب برابر با روابط ۱۲ و ۱۳ است.

$$\frac{\partial g_{Analytical}}{\partial \sigma_t} = \frac{1}{\gamma_e \sqrt{\frac{\sigma_t}{\gamma_e}}} \quad (12)$$

$$\frac{\partial g_{Analytical}}{\partial \gamma_e} = - \frac{\sigma_t}{\gamma_e^2 \sqrt{\frac{\sigma_t}{\gamma_e}}} \quad (13)$$

بر این اساس مقدار انحراف معیار تابع پایه مدل تحلیلی برابر با ۰/۲۴۹ و مقدار اندیس قابلیت اعتماد برابر با ۲۱/۲۶۹ حاصل می شود.

۴-۲-۲- تحلیل قابلیت اعتماد با روش *MCS*

به منظور تحلیل قابلیت اعتماد روش های عنوان شده از طریق شبیه سازی مونت کارلو، تعداد دوره های شبیه سازی در نرم افزار *Crystal Ball* برابر با ۵۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است. بر این اساس نتایج حاصل از شبیه سازی در ادامه ارائه شده است. $L = 4.47 (0.0064 K_1 K_2 K_3)^{0.4} \sigma_c^{0.68}$

۴-۲-۱- شبیه سازی مونت کارلو مدل *RQI*

بر اساس رابطه (۱) با توجه به جنس سقف بلاواسطه که سیلستون بوده و اینکه مقدار آب در سقف بسیار کم است، بنابراین مقادیر ضرایب *K1*، *K2* و *K3* به ترتیب برابر با ۰/۵، ۰/۶ و ۰/۶ در محاسبات در اعمال شده است. با استفاده از روش شبیه سازی مونت کارلو گام تخریب، مشخصات آماری و شاخص قابلیت اعتماد در جدول ۳ و نمودارهای توزیع فراوانی و فراوانی تجمعی پیش بینی شده در شکل ۳ ارائه شده است.

۴-۲-۲- شبیه سازی مونت کارلو مدل *CMRI*

جدول ۴ و شکل ۴ نتایج شبیه سازی مونت کارلو گام تخریب اول با استفاده از روش *CMRI* را نمایش می دهند.

۴-۲-۳- شبیه سازی مونت کارلو مدل تحلیلی

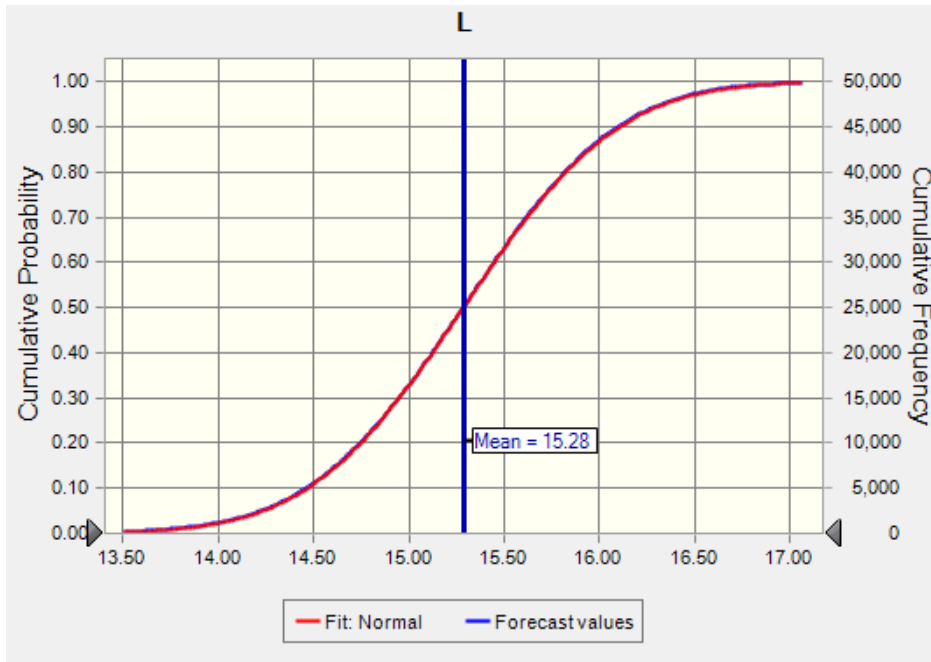
با استفاده از رابطه *Error! Reference source not found.* نتایج حاصل از شبیه سازی در جدول ۵ و شکل ۵

$$L = 4.47 (0.0064 K_1 K_2 K_3)^{0.4} \sigma_c^{0.68}$$

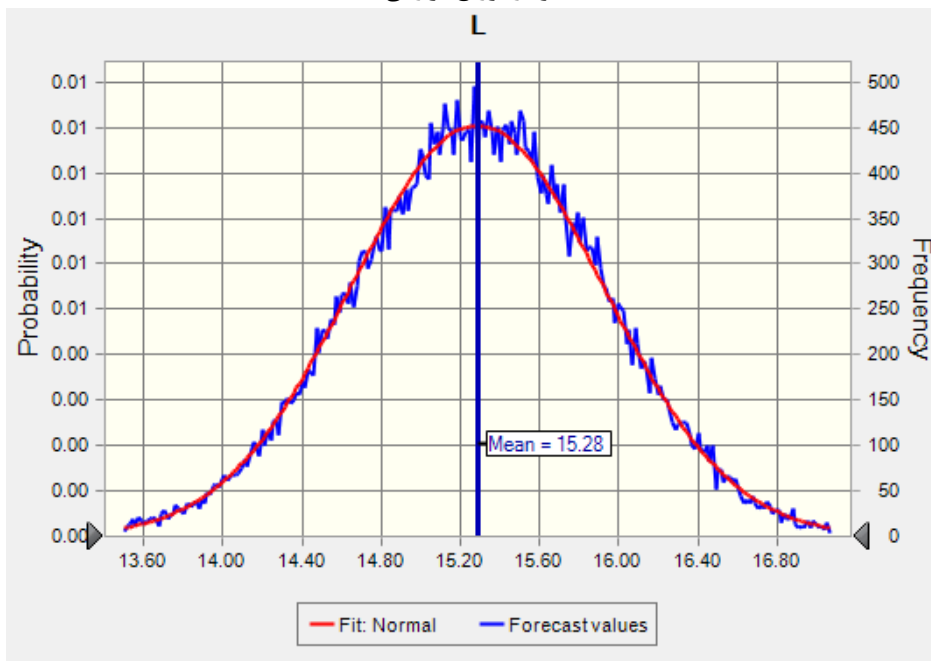
$$L = 4.47 (0.0064 K_1 K_2 K_3)^{0.4} \sigma_c^{0.68}$$

جدول ۳- نتایج آماری شبیه سازی مونت کارلو گام تخریب با استفاده از مدل *RQI*

پارامتر	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	β
مقدار (متر)	۱۱/۹۲	۱۸/۰۱	۱۵/۲۸	۰/۶۴	۲۳/۸۸



الف - نمودار توزیع فراوانی

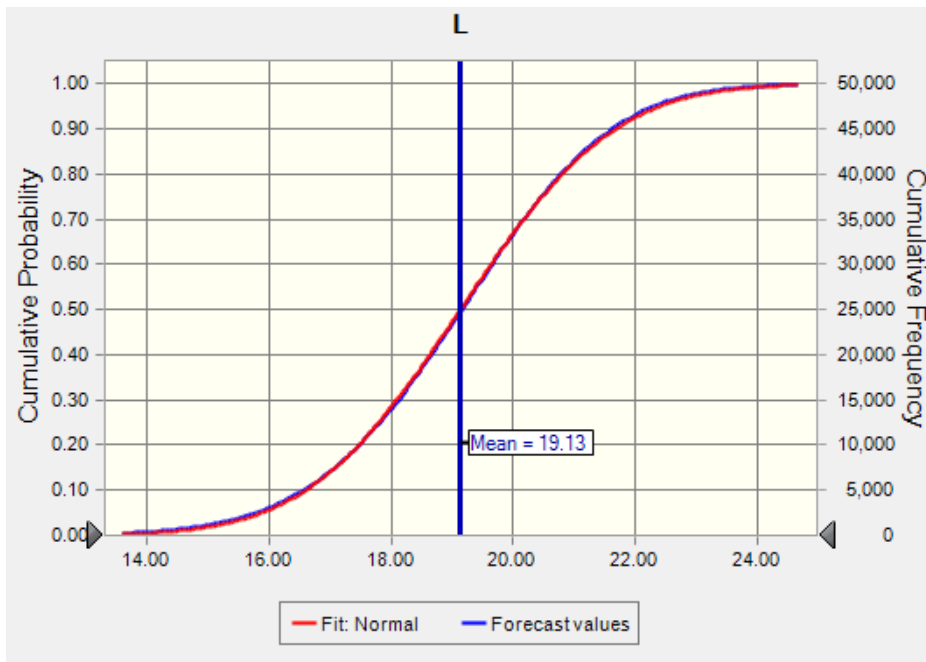


ب - نمودار توزیع فراوانی تجمعی

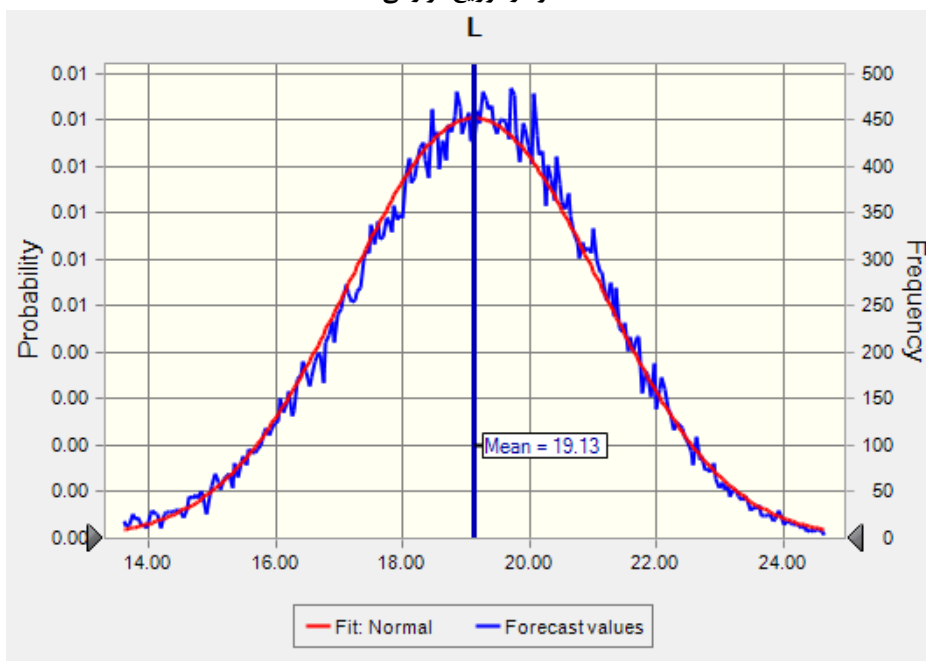
شکل ۳- شبیه سازی مونت کارلو گام تخریب اول با استفاده از شاخص RQI

جدول ۴- نتایج آماری شبیه سازی مونت کارلو گام تخریب با استفاده از مدل $CMRI$

پارامتر	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	β
مقدار (متر)	۸/۵	۲۶/۷۷	۱۹/۱۳	۱/۹۸	۹/۶۶



الف- نمودار توزیع فراوانی

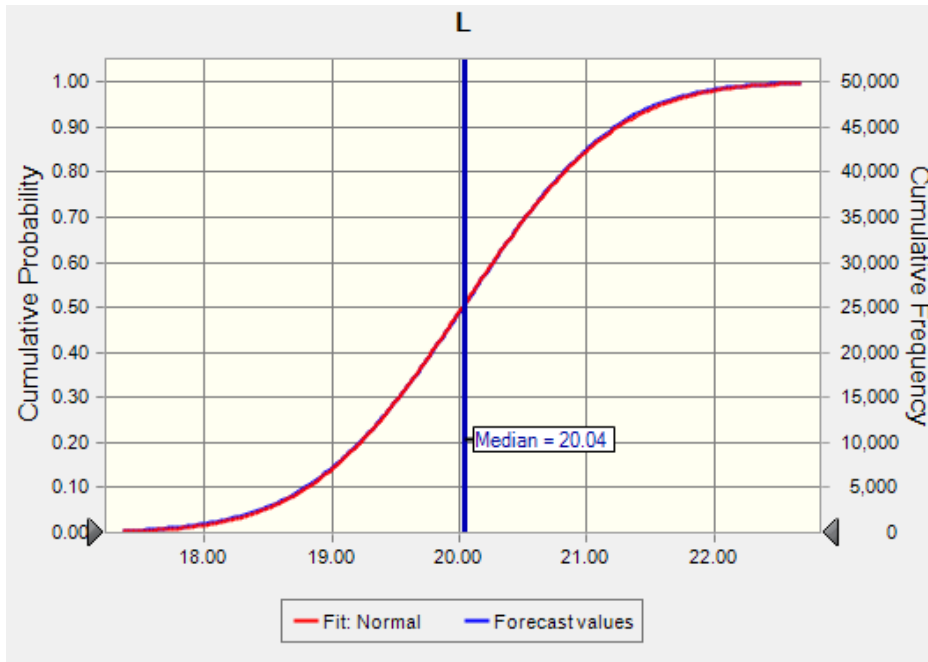


ب- نمودار توزیع فراوانی تجمعی

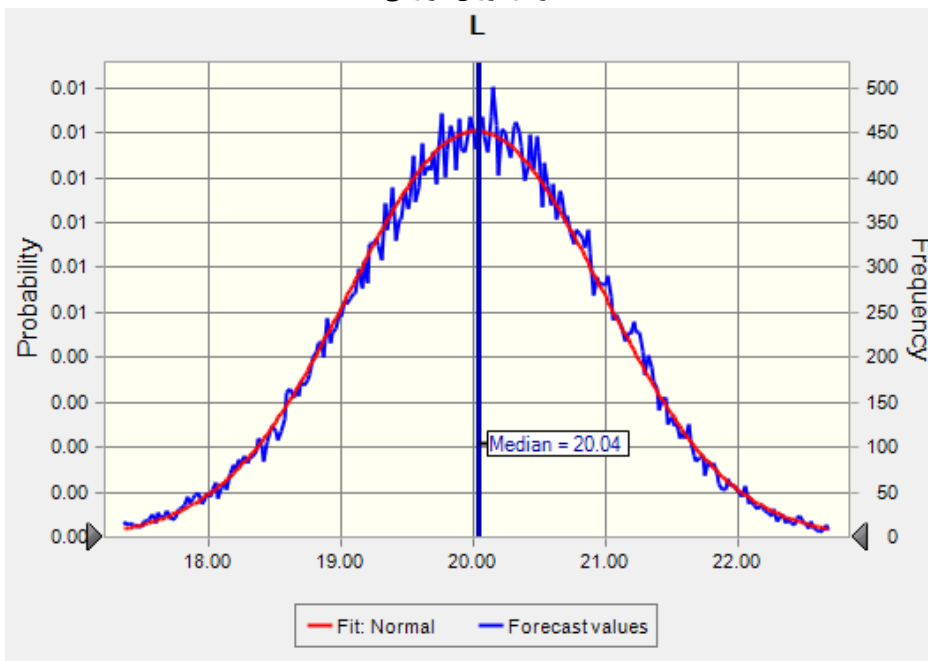
شکل ۴- شبیه سازی مونت کارلو گام تخریب با روش CMRI

جدول ۵- نتایج آماری شبیه سازی مونت کارلو گام تخریب با استفاده از مدل تحلیلی

پارامتر	کمینه	بیشینه	میانگین	انحراف معیار	β
مقدار (متر)	۱۵/۹۰	۲۳/۵۵	۲۰/۰۲	۰/۹۵	۲۱/۰۷



الف- نمودار توزیع فراوانی



ب- نمودار توزیع فراوانی تجمعی

شکل ۵- شبیه‌سازی مونت کارلو گام تخریب با روش تحلیلی

جدول ۶- خلاصه نتایج ارزیابی قابلیت اعتماد روش‌ها تجربی و تحلیلی پیش‌بینی گام تخریب

مدل تحلیلی		مدل CMRI			مدل RQI			روش	
β	σ	μ	β	σ	μ	β	σ	μ	
۲۱/۲۷	۰/۹۴	۲۰/۰۴	۹/۷۶	۱/۹۷	۱۹/۲۱	۲۳/۹۷	۰/۶۴	۱۵/۲۹	FOSM
۲۱/۰۷	۰/۹۵	۲۰/۰۲	۹/۶۶	۱/۹۸	۱۹/۱۳	۲۳/۸۸	۰/۶۴	۱۵/۲۸	MCS

۵- بحث

جدول ۶ خلاصه نتایج حاصل از دو روش *FOSM* و *MCS* را ارائه می دهد. همان طور که در جدول ۳-۴ مشاهده می شود نتایج دو روش ممان دوم مرتبه اول و شبیه سازی مونت کارلو بسیار نزدیک به هم است. بر اساس نتایج حاصل شده مدل *RQI* دارای بیشترین اندیس قابلیت اعتماد است و پس از آن به ترتیب مدل های تحلیلی و مدل *CMRI* قرار می گیرند. دلیل این موضوع را باید در تعداد پارامترهای متغیر در هر یک از روش ها جستجو کرد. روش *RQI* تنها دارای یک متغیر تصادفی است در حالی که دو روش دیگر دارای دو متغیر تصادفی هستند و از این رو مقدار قابلیت اعتماد مدل *RQI* بیش تر از دو روش دیگر به دست آمده است. نکته قابل توجه مقدار میانگین حاصل از روش هاست که بر این اساس مقادیر دو مدل تحلیلی و *CMRI* نزدیک به هم هستند در حالی که مدل *RQI* میانگین گام تخریب اول بسیار متفاوتی را نسبت به دو مدل دیگر ارائه کرده است؛ بنابراین نتایج این طرح نشان می دهد روش تحلیلی با اینکه دارای دو متغیر تصادفی است ولی شاخص قابلیت اعتمادی تنها دو واحد کمتر از روش *RQI* دارد. از سوی دیگر با توجه به اینکه بررسی های میدانی و تجارب پیشین در ناحیه پروژه نشان می دهد گام تخریب اول بلوک ۳ پروژه ۴ باید بیش از مقدار آن در معدن مکانیزه پروژه ۱ (بین ۱۴ تا ۱۶ متر) باشد، بنابراین نتایج دو روش تحلیلی و *CMRI* قابل قبول هستند؛ بنابراین روش تحلیلی بر اساس مقدار شاخص قابلیت اعتماد (مقدار متوسط ۲۱/۱۷) و همچنین مقدار متوسط گام تخریب اول پیش بینی کرده (۲۰ متر) بهترین مدل برای معدن بلوک ۳ پروژه ۴ است.

۶- نتیجه گیری

در این طرح مقاله قابلیت اعتماد مدل های مختلف تجربی (*RQI* و *CMRI*) و تحلیلی پیش بینی گام تخریب اول در معدن بلوک ۳ پروژه ۴ با استفاده از دو روش ممان دوم مرتبه اول (*FOSM*) و شبیه سازی مونت کارلو (*MCS*) بررسی شد. مهم ترین نتایج حاصل از مطالعه به صورت زیر است:

۱. نتایج روش *FOSM* نشان داد مقدار متوسط،

انحراف معیار و اندیس قابلیت اعتماد مدل *RQI* به ترتیب برابر با ۱۵/۲۹، ۰/۶۴ و ۲۳/۹۷ است. این مقادیر برای مدل تجربی *CMRI* به ترتیب برابر با ۱۹/۲۱، ۱/۹۷ و ۹/۷۶ به دست آمد. نتایج این روش برای مدل تحلیلی نیز به ترتیب مقادیر ۲۰/۰۴، ۰/۹۴ و ۲۱/۲۷ را حاصل کرد.

۲. شبیه سازی احتمالاتی با روش مونت کارلو نشان داد که مقادیر متوسط، انحراف معیار و اندیس قابلیت اعتماد مدل *RQI* به ترتیب برابر با ۱۵/۲۸، ۰/۶۴ و ۲۳/۸۸ است. این مقادیر برای مدل *CMRI* به ترتیب برابر با ۱۹/۱۳، ۱/۹۸ و ۹/۶۶ است در حالی که برای مدل تحلیلی برابر با ۲۰/۰۲، ۰/۹۵ و ۲۱/۰۷ به دست می آید.

۳. نتایج نشان می دهد که روش *RQI* دارای بیشترین قابلیت اعتماد است و پس از آن مدل های *CMRI* و تحلیلی قرار می گیرند.

۴. تحلیل نتایج نشان می دهد که روش تحلیلی بر اساس مقدار شاخص قابلیت اعتماد و همچنین مقدار متوسط گام تخریب پیش بینی شده قابل اطمینان ترین روش برای پیش بینی گام تخریب اول در معدن زغال سنگ پروژه ۴ (هدف پروژه جبهه کار طولانی مکانیزه) است.

۷- سپاس گذاری

نویسندگان مقاله از دانشگاه صنعتی شاهرود برای حمایت مالی از انجام این تحقیق در قالب طرح پژوهشی با کد ۱۱۰۴۳ قدردانی می نمایند. همچنین از مدیریت و تمامی کارشناسان دفتر فنی مجتمع معادن زغال سنگ طبس برای همکاری صمیمانه در انجام این پژوهش سپاسگزاری می شود.

Komunikat, 429.

- [6] Bilinski, A., & Konopko, W. (1973, January). Criteria of Choice and use of Powered Supports. In *ISRM International Symposium*. International Society for Rock Mechanics and Rock Engineering.
- [7] Sarkar, S. K. (1998). Mechanised longwall mining: the Indian experiences. Oxford & IBH Publ..
- [8] Obert, L., & Duvall, W. I. (1967). *Rock mechanics and the design of structures in rock* (No. BOOK). J. Wiley.
- [9] Liang, R. Y., Nusier, B. O., & Malkawi, A. H. (1999). A reliability based approach for evaluating the slope stability of embankment dams. *Engineering geology*, 54(3-4), 271-285.
- [10] Malkawi, A. I. H., Hassan, W. F., & Abdulla, F. A. (2000). Uncertainty and reliability analysis applied to slope stability. *Structural safety*, 22(2), 161-187.
- [11] Rubinstein, R. Y., & Kroese, D. P. (2016). *Simulation and the Monte Carlo method* (Vol. 10). John Wiley & Sons.
- [12] Faulin, J., Juan, A. A., Alsina, S. S. M., & Ramirez-Marquez, J. E. (Eds.). (2010). *Simulation methods for reliability and availability of complex systems*. Springer Science & Business Media.
- [13] Mohammadi, S., Ataei, M., Mirzaghobanali, A., & Aziz, N. (2021). *Application of Monte Carlo simulation to quantify uncertainties of first weighting interval estimation*. Resource Operators Conference (ROC), 341-348.
- [14] CMC. (2018). *Parvadeh Mine No.4 (FMM), Basic Design*. Tabas Coal Mines Complex (TCMC), Unpublished.
- Hosseini, N., Goshtasbi, K., Oraee-Mirzamani, B., & Gholinejad, M. (2014). Calculation of periodic roof weighting interval in longwall mining using finite element method. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(5), 1951-1956.

۸- فهرست نمادها

شرح	واحد	نماد
گام تخریب	m	L
سنگ بکر سقف در حالت خشک UCS	kg/cm^2	σ_c
ضریب مقاومت برجا	-	K_1
ضریب خزش	-	K_2
ضریب آب محتوی یا ضریب رطوبت	-	K_3
ضخامت لایه	m	t_b
شاخص کیفیت توده سنگ	-	RQD
مقاومت کششی سنگ سقف	MPa	σ_t
ضخامت تیر سنگی (سقف بلاواسطه)	m	t
وزن مخصوص مؤثر سقف بلاواسطه	N/m^3	γ_e
مدول یانگ سنگ لایه نام	GPa	E_i
وزن مخصوص سنگ لایه نام	N/m^3	γ_i
ضخامت لایه نام سقف	m	t_i

۹- منابعها

- [1] Mohammadi, S., Ataei, M., Kakaie, R., & Mirzaghobanali, A. (2019). Estimation of first roof weighting interval incorporating roof strata cavability concept. *Iranian Journal of Mining Engineering-IRJME Vol, 14*(43).
- [2] Bafghi, A. Y., & Verdel, T. (2005). Sarma-based key-group method for rock slope reliability analyses. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 29(10), 1019-1043.
- [3] Hasheminasab Zavare, F., Bagherpour, R., Baghbanan, A., Monjezi, M. (2018). First-Order-Second-Moment Analysis of Reliability in Predicting the Rate of Penetration. *Journal of Analytical and Numerical Methods in Mining Engineering*, 7(14), 13-21. doi: 10.29252/anm.7.14.13
- [4] Baecher, G. B., & Christian, J. T. (2002). The concept of uncertainty in geotechnical reliability. Electronic Paper (*Not published*).
- [5] Pawlowicz, K. (1967). Classification of rock cavability of coal measure strata in upper Silesia coalfield. *Prace GIG*,

