

علمی - تخصصی

بررسی روش‌های استخراج معدن بایچه‌باغ و انتخاب روش بهینه همراه با تحلیل پایداری تونل‌ها

محمد نعلبندان^{۱*}، عمار گلین مقدم

^۱ کارشناسی ارشد، هلدینگ تخصصی صنعت و معدن، مؤسسه معدن

^۲ کارشناسی ارشد، هلدینگ تخصصی صنعت و معدن، مؤسسه معدن

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۰۳، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۲۱)

چکیده

یکی از معادن متروکه که اخیراً فعال شده است، معدن بایچه‌باغ است. معدن بایچه‌باغ در ۱۴۴ کیلومتری غرب زنجان و ۱۲۵ کیلومتری جنوب غرب میانه، در گذشته به‌عنوان یکی از معادن مهم منطقه به‌شمار می‌رفته و تأسیسات ایجاد شده در آن مؤید این مطلب است. این معدن دارای ۴ منطقه به نام‌های طلعت، تایدیان، خوشنودی و دره می‌باشد که در حال حاضر تنها ذخایر منطقه تایدیان و بخشی از طلعت باقی‌مانده است. مسئله اصلی در این معدن فقدان وجود روش استخراج زیرزمینی بهینه از نظر فنی و اقتصادی است. در این تحقیق با استفاده از مدل‌های کیفی و کمی انتخاب روش استخراج، روش‌های استخراج دارای اولویت اولیه انتخاب شدند. روش‌های استخراج انتخاب شده توسط الگوهای کمی و کیفی، از نظر معیارهای فنی مانند شرایط هندسی و ژئومکانیکی کانسار، خواص جانبی کانسار و ... مقایسه شدند و در نهایت ۶ روش استخراج به مرحله مقایسه اقتصادی راه یافتند. روش‌های استخراج انتخاب شده در مرحله مقایسه اقتصادی، با تحلیل هزینه‌ها و درآمدهای مستقیم استخراج کانسار با یکدیگر مقایسه شدند و در نهایت روش استخراج انبارهای از نظر فنی و اقتصادی به‌عنوان گزینه مناسب انتخاب شد. به‌منظور تحلیل پایداری کارگاه استخراج و تونل ۶۰ در روش استخراج انبارهای معدن بایچه‌باغ، لنگه بالای تونل ۶۰ با ارتفاع ۳، ۲ و ۱ متری با یکدیگر مقایسه شدند و پس از مدل‌سازی عددی هر یک از لنگه‌های یاد شده و حفاری و پرشدن کارگاه استخراج با ماده معدنی و مقایسه با روابط تجربی، لنگه ۱ متری به‌عنوان ارتفاع لنگه بهینه بالای تونل ۶۰ انتخاب شد.

کلید واژه‌ها: الگوهای کمی و کیفی انتخاب روش استخراج، روش عددی، FLAC 3D

۱. مقدمه

یکی از معادن متروکه که اخیراً فعال شده است، معدن بایچه‌باغ است. این معدن در ۱۴۴ کیلومتری غرب زنجان و ۱۲۵ کیلومتری جنوب غرب میانه، در گذشته به‌عنوان یکی از معادن مهم منطقه به‌شمار می‌رفته و تأسیسات ایجاد شده در آن (ساختمان‌های مسکونی، اداری و خدماتی، تأسیسات کانه‌آرایی و کوره ذوب) به همراه مدارک و اسناد قدیمی، مؤید این مطلب است [۱]. برخی از معادن متروکه به دلیل افزایش قیمت مواد معدنی مجدداً فعال شده‌اند. یکی از معادن متروکه که اخیراً فعال شده است، معدن بایچه‌باغ است. قبل از شروع به معدنکاری لازم است ابتدا روش استخراج بهینه از نظر فنی و اقتصادی انتخاب شود تا علاوه بر کاهش هزینه‌های معدنکاری و افزایش درآمد حاصل از استخراج ماده معدنی، پایداری و ایمنی معدن زیرزمینی و کارکنان آن فراهم شود. از بین رگه‌های موجود در مناطق طلعت

و تایدیان (بایچه‌باغ ۱، آپربایچه‌باغ ۱، بایچه‌باغ ۲، آپربایچه‌باغ ۲، تایدیان ۱ و تایدیان ۲) و ترازهای موجود (۱۷، ۱۸، ۶۰، ۱۰۰) بر اساس ارتفاع از سطح رودخانه واقع شده در معدن، رگه آپربایچه‌باغ ۲ در تراز ۶۰ تا ۱۰۰ دارای اولویت است. یکی از نکات مهم آن است که بر اساس اطلاعات زمین‌شناسی، ژئوتکنیکی، جغرافیایی، اقتصادی و ... روش مناسب بهره‌برداری از ماده معدنی موجود، بررسی و انتخاب شود. در همین راستا می‌توان از روش‌های کمی و کیفی انتخاب روش استخراج مناسب برای انتخاب روش استخراج بهینه استفاده کرد. پس از انتخاب روش استخراج بهینه از نظر فنی و اقتصادی، پایداری روش استخراج انتخاب شده بررسی شده و در صورت لزوم، راهکاری برای پایداری ایمن کمرها و تونل اصلی باربری ارائه می‌شود. به دلیل اینکه تحلیل پایداری نیاز به مدل‌سازی واقعی دارد، از نرم‌افزار FLAC 3D جهت مدل‌سازی عددی استفاده شده است و در نهایت نتایج

مدل‌سازی عددی با روابط تجربی سایر محققین اعتبار سنجی شده‌است.

۲. معدن زیرزمینی بایچه‌باغ

معدن بایچه‌باغ در ۱۴۴ کیلومتری غرب زنجان و ۱۲۵ کیلومتری جنوب غرب میانه واقع شده و از نظر تقسیمات کشوری جزء استان زنجان محسوب می‌شود. محدوده معدن براساس نقشه زمین‌شناسی ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ تخت سلیمان مطابق مختصات ارائه شده در جدول (۱) می‌باشد. روستای قلعه ارزه‌خوران و روستای متروکه احمدآباد دو روستای واقع در محدوده اکتشافی می‌باشند [۱]. در شکل (۱)، موقعیت جغرافیایی معدن بایچه‌باغ نشان داده شده است.

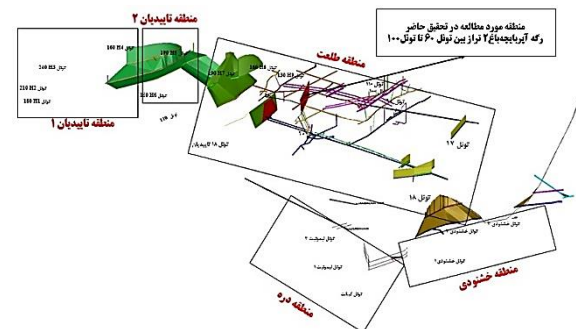


شکل (۱). موقعیت جغرافیایی معدن بایچه‌باغ

جدول (۱). مختصات محدوده معدن بایچه‌باغ (UTM)

عرض جغرافیایی (تا)	عرض جغرافیایی (از)	طول جغرافیایی (تا)	طول جغرافیایی (از)
۴۰۸۹۵۱۶	۴۰۸۳۵۳۱	۱۷۳۷۸۹	۱۶۷۲۵۵

معدن بایچه‌باغ مطابق شکل (۲) شامل ۴ منطقه با اسامی، طلعت، تایدیان، خسنودی و دره می‌باشد. در شکل (۲)، نقشه تونل‌ها و مناطق مختلف معدن بایچه‌باغ نشان داده شده است.



شکل (۲). نقشه تونل‌ها و مناطق مختلف معدن بایچه‌باغ

۳. الگوهای متداول انتخاب روش استخراج

برای انتخاب روش استخراج ذخایر معدنی الگوهای متفاوتی ارائه شده که در سه گروه به شرح ذیل طبقه‌بندی شده‌اند [۲]:

- الگوهای کیفی
- روش‌های امتیازدهی عددی
- مدل‌های تصمیم‌گیری

۱-۳. الگوهای کیفی

الگوهای اولیه انتخاب روش استخراج بیشتر بر مبنای استفاده از فلوجارت‌ها و یا جداول طبقه‌بندی روش‌های استخراج، پایه‌گذاری شده است.

در سال ۱۹۷۳ برای انتخاب روش زیرزمینی طبقه‌بندی کیفی ارائه شد [۲]. با استفاده از این طبقه‌بندی و معلوم بودن مشخصات کانسار از جمله شیب، ضخامت، مقاومت ماده معدنی و کمربالا و پایین، روش‌های مناسب استخراج به کار گرفته می‌شود. در سال ۱۹۷۶ الگویی برای انتخاب روش استخراج زیرزمینی بر اساس تأثیر پارامترهای ضخامت ماده معدنی، نوع نگهداری و انباشتگی انرژی کرنشی ارائه شد [۲]. در سال ۱۹۷۸، روش‌های استخراج زیرزمینی به هفت گروه اصلی شامل روش‌های کارگاهی بدون نگهداری، انبارهای، کارگاه‌های همراه، نگهداری، کندن و آکندن، تخریب سنگ (سقف)، روش‌هایی با تخریب کانسار و سنگ (سقف) و روش‌های ترکیبی تقسیم شد [۲]. در سال ۱۹۸۷ بر اساس شکل کانسار، مشخصات هندسی کانسار و مقاومت ماده معدنی الگویی مشابه طرح باشکوف و رایت پیشنهاد شد [۲].

۲-۳. الگوهای عددی

اولین الگوی امتیازدهی عددی در سال ۱۹۸۱ مطرح شد. در این الگو، ۱۰ روش استخراج با یکدیگر مقایسه می‌شوند [۱۰]. شاخص‌های در نظر گرفته شده برای انتخاب روش استخراج، شکل، ضخامت، شیب، نحوه توزیع عیار کانسار، نسبت مقاومت فشاری تک‌محوری به فشار سنگ‌های روباره، فاصله‌داری درزه‌ها و مقاومت برشی درزه‌ها است [۱۰]. در سال ۱۹۹۲ نیکلاس با اعمال ضریب اهمیت برای معیارهای مؤثر در روش پیشنهادی خود، این نقص را تا حدی جبران کرد [۱۰]. در سال ۱۹۸۱، الگوی امتیازدهی عددی برای انتخاب روش استخراج تخریبی و تعیین قابلیت تخریب ارائه شد [۲]. روش دانشگاه بریتیش کلمبیا یکی از روش‌های امتیازدهی عددی رایج برای انتخاب روش‌های استخراج است که در سال ۱۹۹۵ در دانشگاه بریتیش کلمبیا در کانادا ارائه شد. این روش اصلاحی بر امتیازهای نیکلاس بر اساس شرایط عملیاتی تجربی استخراج در کشور کانادا است [۲]. در جدول (۲)،

روش‌های استخراج پیشنهادشده توسط الگوهای کیفی و کمی ارائه شده با توجه به شرایط کانسار بایچه‌باغ معرفی شده‌اند.

جدول (۲). روش‌های استخراج پیشنهادشده توسط الگوهای کیفی و کمی با توجه به شرایط کانسار بایچه‌باغ

روش استخراج پیشنهادی	الگو
کندن و آکندن با باطله‌های کارگاه استخراج	باشکوف و رایب (۱۹۷۳)
استخراج انباره‌ای	هارتمن (۱۹۸۷)
به ترتیب روباز، کندن و آکندن، کرسی چینی، انباره‌ای، اتاق و پایه، استخراج از طبقات فرعی، تخریب در طبقات فرعی، برش از بالا، جبهه‌کاربلند، تخریب توده‌ای	نیکلاس (۱۹۸۱)
به ترتیب روباز، کندن و آکندن، کرسی چینی، انباره‌ای، اتاق و پایه، استخراج از طبقات فرعی، تخریب در طبقات فرعی، برش از بالا، جبهه‌کاربلند، تخریب توده‌ای	نیکلاس اصلاح‌شده (۱۹۹۲)
به ترتیب کرسی چینی، روباز، کندن و آکندن، انباره‌ای، برش از بالا، تخریب بلوکی، تخریب در طبقات فرعی، استخراج از طبقات فرعی، جبهه‌کار بلند، اتاق و پایه	دانشگاه بریتیش کلمبیا UBC (۱۹۹۵)
به ترتیب روباز، ستونی	الگوی جامع انتخاب روش استخراج ذخایر ایران (۲۰۱۳)
استخراج پلکانی	کارگاه‌های استخراج قدیمی معدن بایچه‌باغ

۴. مقایسه فنی روش‌های استخراج منتخب

روش‌های استخراج پیشنهادشده توسط الگوهای کیفی و کمی، با توجه به شرایط خاص معدن بایچه‌باغ، بازنگری شده و تعدادی از آنها در مرحله مقایسه فنی حذف می‌شوند و به مرحله مقایسه اقتصادی راه پیدا نمی‌کنند. در جدول (۳)، روش‌های استخراج حذف شده در مرحله مقایسه فنی و دلیل حذف هر یک بیان شده است.

جدول (۳). روش‌های استخراج حذف شده در مرحله مقایسه فنی و دلیل حذف هر یک

روش استخراج	دلیل حذف
روش استخراج روباز	توپوگرافی بسیار خشن منطقه، ضخامت بسیار کم ماده معدنی (۴۰ سانتیمتر)، نسبت باطله به ماده معدنی بسیار زیاد
روش استخراج اتاق و پایه	شیب زیاد کانسار بایچه‌باغ (۷۵ درجه)، ضخامت بسیار کم ماده معدنی (۴۰ سانتیمتر)، نسبت باطله به ماده معدنی بسیار زیاد
روش استخراج تخریب در طبقات فرعی	شیب زیاد کانسار بایچه‌باغ (۷۵ درجه)، ضخامت بسیار کم ماده معدنی (۴۰ سانتیمتر)، ماده معدنی و کمرها مقاوم و غیرقابل تخریب
روش استخراج کارگاه با پایه‌های تصادفی	ضخامت بسیار کم ماده معدنی مانع از برجای گذاشتن پایه
روش استخراج برش از بالا	شیب زیاد کانسار بایچه‌باغ (۷۵ درجه)، ضخامت بسیار کم ماده معدنی (۴۰ سانتیمتر)، ماده معدنی و کمرها مقاوم و غیرقابل تخریب
روش استخراج تخریب بلوکی	شیب زیاد کانسار بایچه‌باغ (۷۵ درجه)، ضخامت بسیار کم ماده معدنی (۴۰ سانتیمتر)، ماده معدنی و کمرها مقاوم و غیرقابل تخریب
روش استخراج کرسی چینی	شیب زیاد کانسار بایچه‌باغ (۷۵ درجه)، ضخامت بسیار کم ماده معدنی (۴۰ سانتیمتر)، ماده معدنی و کمرها مقاوم و غیرقابل تخریب
روش استخراج کارگاه‌های تونلی داخل ماده معدنی	ضخامت بسیار کم ماده معدنی (۴۰ سانتیمتر)
روش استخراج کندن و آکندن رو به پایین	میزان آماده‌سازی افق بالایی (تونل ۱۰۰) زیاد، افزایش هزینه‌ها با استفاده از پرکننده سیمانی

۵. مقایسه اقتصادی روش‌های استخراج منتخب

اقتصاد عامل تعیین‌کننده در موفقیت یا عدم موفقیت هر طرحی است. از دیدگاه سرمایه‌گذار معمولاً اولویت با روش استخراجی است که سریع‌تر به مرحله تولید برسد و زمان بازگشت سرمایه آن کوتاه باشد. برای مقایسه اقتصادی طرح‌ها و انتخاب

۲-۵. مقایسه اقتصادی دو روش کندن و آکندن با باطله کارگاه و انباره‌ای با استفاده از هزینه‌های جاری ماهیانه معدن بایچه‌باغ

دو روش استخراج انباره‌ای و کندن و آکندن در روش فهرست بها بیشترین سود خالص نسبی را کسب کردند و این در حالی است که این دو روش تنها ۲ درصد با هم اختلاف دارند بنابراین به منظور اطمینان از نتیجه حاصل، در جدول (۵)، هزینه‌های جاری ماهیانه در دو روش استخراج انباره‌ای و کندن و آکندن با باطله کارگاه استخراج تراز بین تونل ۶۰ تا تونل ۱۰۰ با یکدیگر مقایسه شده است.

جدول (۵). مقایسه هزینه‌های جاری ماهیانه در دو روش استخراج انباره‌ای و کندن و آکندن با باطله کارگاه استخراج با استفاده از داده‌های معدن بایچه‌باغ

شرح هزینه	هزینه در روش استخراج کندن و آکندن با باطله کارگاه (ریال)	هزینه در روش استخراج انباره‌ای (ریال)
سوخت (گازوئیل و بنزین)	۱۸۷۵۰۰۰۰۰	۱۲۵۰۰۰۰۰۰
برق	۷۵۰۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰۰۰
غذا	۱۹۳۰۰۰۰۰۰	۱۰۵۰۰۰۰۰۰۰
نیروی انسانی	۱۰۶۶۰۰۰۰۰۰	۶۵۷۰۰۰۰۰۰۰
اجاره ماشین‌آلات	۲۹۵۰۰۰۰۰۰۰	۶۶۰۰۰۰۰۰۰۰
مشاوره و نظارت	۱۰۰۰۰۰۰۰۰۰	۱۰۰۰۰۰۰۰۰۰۰
مصالح مصرفی	۴۹۶۷۱۵۱۰۰۰	۳۵۱۵۲۰۶۴۷۰
جمع کل	۲۲۴۴۴۶۵۱۰۰۰	۱۳۰۲۰۲۰۶۴۷۰
هزینه تمام‌شده به ازای هر تن	۵۵۴۱۸۸۹۱	۹۶۴۴۵۹۷
درآمد حاصل از فروش هر تن ماده معدنی	۲۷۷۱۸۴۰۰	۱۰۱۰۴۸۹۴
سود حاصل از فروش ۱ تن ماده معدنی	-۲۷۷۰۰۴۹۱	۴۶۰۲۹۷

در نمودار شکل (۴)، هزینه تمام‌شده هر تن ماده معدنی و درآمد حاصل از فروش هر تن ماده معدنی در دو روش استخراج کندن و آکندن با باطله کارگاه و انباره‌ای بر مبنای داده‌های ماهیانه معدن بایچه‌باغ و جدول (۵) با یکدیگر مقایسه شده است. با توجه به نمودار شکل (۴)، هزینه‌های جاری ماهیانه حاکی از آن است که به دلیل تولید بیشتر و عیار کمتر ماده معدنی در روش استخراج انباره‌ای نسبت به روش استخراج کندن و آکندن با باطله کارگاه، روش استخراج انباره‌ای به دلیل فنی و اقتصادی گزینه مناسبی برای اجرا در معدن بایچه‌باغ، رگه آپربایچه‌باغ ۲ تراز بین تونل ۶۰ تا تونل ۱۰۰ خواهد بود.

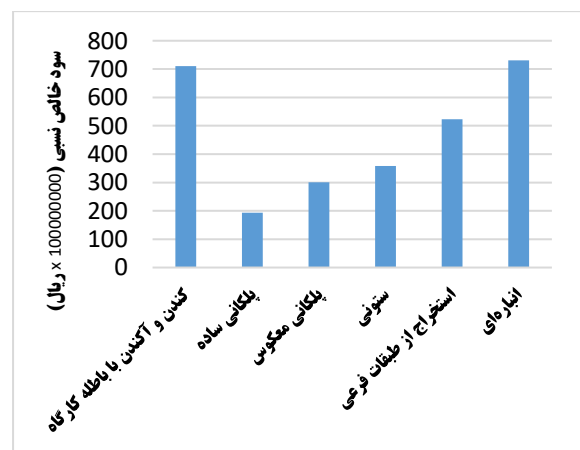
روش استخراج بهینه، بهترین روش، مقایسه ارزش خالص فعلی آن‌ها است.

۱-۵. مقایسه اقتصادی روش‌های استخراج منتخب با استفاده از فهرست‌بها

برای انتخاب اقتصادی‌ترین روش استخراج، فرایند آماده‌سازی، پیش‌روی و استخراج ماده معدنی برای هر روش در نظر گرفته می‌شود و جزئیات اجرایی هر روش با توجه به فهرست‌بهای راه، باند و راه‌آهن ۱۴۰۱ مورد ارزیابی اقتصادی قرار می‌گیرد. در جدول (۴)، مجموع هزینه‌های مستقیم، درآمد کلی و سود خالص کلی نسبی هر یک از روش‌های استخراج منتخب با استفاده از فهرست‌بهای راه، باند و راه‌آهن ۱۴۰۱ محاسبه شده است. در شکل (۳)، نمودار میله‌ای مقایسه اقتصادی روش‌های استخراج منتخب بر اساس جدول (۴) نمایش داده شده است.

جدول (۴). مجموع هزینه‌های مستقیم، درآمد کلی و سود خالص کلی نسبی هر یک از روش‌های استخراج منتخب در رگه آپربایچه‌باغ ۲ با استفاده از فهرست‌بهای راه، باند و راه‌آهن ۱۴۰۱

روش استخراج	هزینه مستقیم (میلیون ریال)	درآمد (میلیون ریال)	سود خالص نسبی (میلیون ریال)
کندن و آکندن با باطله کارگاه	۳۹۸۳۷	۱۱۰۸۷۳	۷۱۰۳۶
پلکانی ساده	۹۴۲۳۹	۱۱۳۶۱۱	۱۹۳۷۱
پلکانی معکوس	۸۳۵۱۵	۱۱۳۶۱۱	۳۰۰۹۵
ستونی	۶۲۲۲۵	۹۸۰۱۷	۳۵۷۹۱
استخراج از طبقات فرعی	۳۵۶۳۴	۸۷۹۱۲	۵۲۲۷۸
انباره‌ای	۲۴۹۶۵	۹۸۰۱۷	۷۳۰۵۱

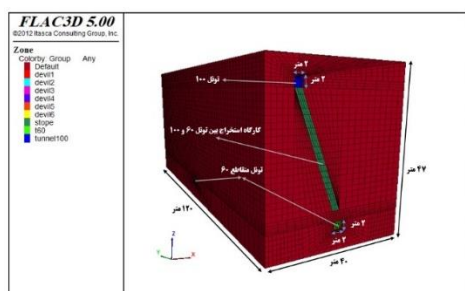


شکل (۳). نمودار میله‌ای مقایسه اقتصادی روش‌های استخراج منتخب بر اساس جدول (۴) در رگه آپربایچه‌باغ ۲

- (۱) ساخت هندسه مدل اولیه
- (۲) انتخاب مدل رفتاری و تعیین خصوصیات ماده
- (۳) اعمال شرایط مرزی و اولیه و به تعادل رسیدن مدل
- (۴) حفر تونل ۶۰
- (۵) حفر تونل ۱۰۰
- (۶) حفاری کارگاه استخراج بین تونل ۶۰ تا تونل ۱۰۰
- (۷) پرکردن کارگاه استخراج بین تونل ۶۰ تا تونل ۱۰۰ با ماده معدنی خردشده

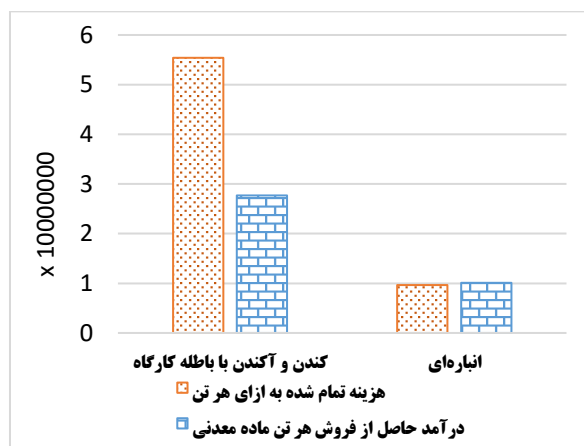
جهت دستیابی به ارتفاع لنگه بهینه، لنگه‌های ۱، ۲ و ۳ متری بالای تونل ۶۰، برجای گذاشته شده و با یکدیگر مقایسه می‌شوند.

برای ساخت هندسه مدل اولیه از دستورات موجود در نرم‌افزار FLAC 3D version 5.00 استفاده شده است. ابعاد هندسه کلی مدل مطابق شکل (۵) می‌باشد.



شکل (۵). هندسه مدل اولیه جهت انتخاب لنگه

چنانچه در شکل (۵) نشان داده شده است، مدل عددی به اندازه کافی بزرگ انتخاب شده و مرزهای مدل از کانسار دور انتخاب شده است تا اثر مرزهای مدل بر فرآیند استخراج حداقل باشد. مش بندی مدل ساخته شده به گونه‌ای انتخاب شده است تا بیشترین انطباق را با یکدیگر داشته باشد؛ همچنین در اطراف تونل، کارگاه استخراج و دوپل‌های کانالیزه مش بندی کوچک‌تری نسبت به اطراف مدل انتخاب شده است تا نتایج دقیق‌تری به دست آید. با توجه به شیب‌دار بودن رگه ماده معدنی در تراز بین تونل ۶۰ تا تونل ۱۰۰، دوپل‌های کانالیزه به صورت دنباله‌رو و شیب‌دار با رگه ماده معدنی حفر می‌شوند و سپس اولین مرحله از حفاری کارگاه استخراج شروع می‌شود. در شکل (۶)، دوپل‌های ساخته شده به همراه تونل متقاطع ۶۰ و تونل ۱۰۰ و همچنین کارگاه استخراج بدون توده سنگ میزبان نشان داده شده است.



شکل (۴). نمودار میله‌ای مقایسه اقتصادی هزینه تمام شده هر تن ماده معدنی و درآمد حاصل از فروش هر تن ماده معدنی در دو روش استخراج کندن و آکندن با باطله کارگاه و انبارهای بر مبنای داده‌های ماهیانه معدن بایچه‌باغ

۶. انتخاب لنگه بهینه بالای تونل ۶۰ با استفاده از روش عددی و تجربی

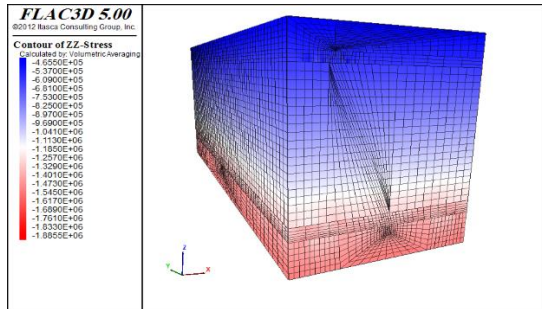
با توجه به انتخاب روش استخراج انبارهای از نظر فنی و اقتصادی برای رگه آپربایچه‌باغ ۲ در معدن بایچه‌باغ، پس از دسترسی به ماده معدنی، یک گالری در امتداد ماده معدنی حفر شده تا به عنوان تونل باربری و حمل و نقل افراد و تجهیزات مورد استفاده قرار گیرد. تونل باربری و حمل و نقل باید در بلندمدت پایدار بوده تا بتواند طی مدت استخراج ماده معدنی بالای خود، پایدار باقی بماند. از این رو در روش استخراج انبارهای، یک لنگه در بالای تونل باربری قرار می‌دهند تا علاوه بر حفر دوپل‌های کانالیزه در آن، به عنوان حفاظی در بالای تونل باربری قرار گیرد و از ریزش سقف جلوگیری نماید. بدیهی است که ارتفاع لنگه برجای گذاشته شده از اهمیت به سزایی برخوردار است. در این بخش ارتفاع مناسب لنگه برجای گذاشته شده تخمین زده می‌شود طوری که علاوه بر بازدهی ماده معدنی، ایمنی تونل باربری نیز تأمین گردد.

۶-۱. مدل سازی عددی رگه آپربایچه‌باغ ۲، تونل ۶۰، تونل ۱۰۰ و دوپل‌های کانالیزه

در این بخش به منظور بررسی میزان تنش‌های وارد شده بر تونل‌های اصلی و محاسبه ارتفاع لنگه کارگاه استخراج بین تونل ۶۰ تا تونل ۱۰۰، از روش عددی تفاضل محدود (Finite Difference) نرم‌افزار FLAC 3D استفاده شده است. بر این اساس مدل سازی عددی منطقه مورد مطالعه جهت رسیدن به هدف تحقیق به شرح ذیل انجام شده است:

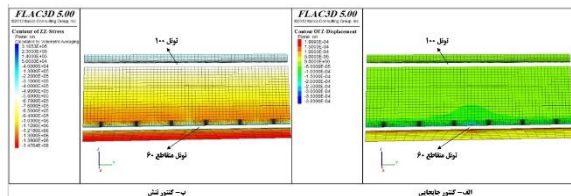
جدول (۷). سایر ویژگی‌های هندسی مدل عددی ساخته شده

شیب دوئل‌های کانه‌ریز	سطح مقطع تونل ۱۰۰	سطح مقطع کارگاه استخراج	سطح مقطع تونل ۶۰
۷۵ درجه	نعل اسبی	نعل اسبی	مستطیلی



شکل (۷). نمایی از مقدار تنش‌ها در راستای Z-Z در مدل به تعادل رسیده

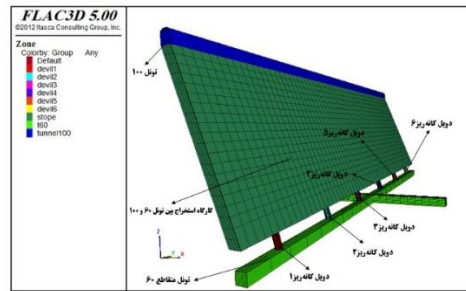
پس از تعادل مدل اولیه، تونل ۶۰ و تونل ۱۰۰ حفاری می‌شود. در شکل (۸)، نمایی از کنتور تنش و جابجایی در راستای Z-Z پس از حفاری تونل ۶۰ و ۱۰۰ مشاهده می‌گردد. با توجه به حفاری تونل ۶۰ و ۱۰۰، مقادیر بیشترین جابجایی‌ها و تنش‌ها در جدول (۸) مشاهده می‌گردد. ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ خردشده در کارگاه استخراج در روش استخراج انبارهای در رگه آپریاچه‌باغ ۲ تراز بین تونل ۶۰ تا ۱۰۰ مطابق جدول (۹) می‌باشد.



شکل (۸). نمایی از کنتور تنش و جابجایی در راستای Z-Z پس از حفاری تونل ۶۰ و ۱۰۰

جدول (۸). مقادیر بیشترین جابجایی‌ها و تنش‌ها پس از حفاری تونل ۶۰ و ۱۰۰

نام تونل	جابجایی بیشینه (mm)	تنش فشاری بیشینه (MPa)	تنش کششی بیشینه (MPa)
۶۰	۰/۴	۲/۳	۰/۳۵
۱۰۰	۰/۰۵	۱	۰/۰۸۵



شکل (۶). دوئل‌های کانه‌ریز به همراه تونل متقاطع ۶۰ و تونل ۱۰۰ و همچنین کارگاه استخراج بدون توده‌سنگ میزبان

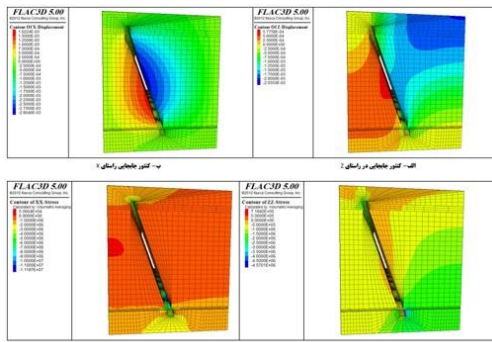
فاصله دوئل‌های کانه‌ریز در راستای محور Y از یکدیگر ۲۰ متر می‌باشد. مقدار روباره در بالای تونل ۶۰ در بیشترین مقدار، ۱۰۰ متر برآورد شده است که برای جلوگیری از محاسبات وقت‌گیر، ۴۰ متر از روباره در مدل ساخته شده، در نظر گرفته شده است و ۶۰ متر به صورت بار خارجی به بالای مدل اعمال شده است. بعد از ساخت هندسه مدل، خصوصیات مواد به مدل اعمال می‌شود. در این تحقیق به منظور تحلیل مدل عددی، از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده است. ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ میزبان مطابق جدول (۶) به مدل اعمال شده است؛ لازم به ذکر است که مقادیر یادشده برای ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ میزبان، پس از انجام آزمون‌های مکانیک‌سنگ ارائه شده است. همچنین در مدل ساخته شده فرضیات ذیل در نظر گرفته شده است:

- ❖ محیط توده‌سنگ میزبان به صورت همگن فرض می‌شود.
- ❖ نادیده گرفتن اثر بارهای دینامیکی و حل مسئله به صورت استاتیکی
- ❖ محیط میزبان به صورت پیوسته لحاظ می‌شود.

در جدول (۷) سایر ویژگی‌های هندسی مدل عددی ساخته شده نشان داده شده است. در شکل (۷) نمایی از مقدار تنش‌ها در راستای Z-Z در مدل به تعادل رسیده مشاهده می‌شود.

جدول (۶). ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ میزبان

مدول مدول	مدول بالک	مدول الاستیک	ضریب پواسون	نسبت تنش افقی به قائم
(GPa)	(GPa)	(GPa)		
۴/۹۵	۶/۷۴	۱۱/۹۴	۰/۲۰۵	۰/۹
چسبندگی (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	وزن مخصوص (m^3)	
۱۱/۴۷	۵/۰۷	۳۵/۰۶	۲۲/۵۶	



شکل (۱۱). نمایی از جابجایی و تنش ایجاد شده در راستای Z-Z و X-X پس از حفاری کارگاه استخراج با لنگه ۱ متری

با توجه به شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱)، مقادیر بیشترین جابجایی‌ها و تنش‌ها در راستای Z-Z و X-X در کمر بالای ماده معدنی پس از حفاری کارگاه استخراج با لنگه‌های به ترتیب ۳، ۲ و ۱ متری در جدول (۱۰) مشاهده می‌گردد.

جدول (۱۰). مقادیر بیشترین جابجایی‌ها و تنش‌ها در راستای Z-Z و X-X در کمر بالای ماده معدنی پس از حفاری کارگاه استخراج با لنگه‌های به ترتیب ۳، ۲ و ۱ متری

لنگه ۳ متری					
جابجایی بیشینه (mm)		تنش فشاری بیشینه (MPa)		تنش کششی بیشینه (MPa)	
راستای X-X	راستای Z-Z	راستای X-X	راستای Z-Z	راستای X-X	راستای Z-Z
۲/۷۵	۱/۸۷	۱/۵	۲/۵	۰/۵۳	۰/۲۳
لنگه ۲ متری					
جابجایی بیشینه (mm)		تنش فشاری بیشینه (MPa)		تنش کششی بیشینه (MPa)	
راستای X-X	راستای Z-Z	راستای X-X	راستای Z-Z	راستای X-X	راستای Z-Z
۲/۸	۱/۹۵	۱/۵	۲/۸	۱/۹۵	۱/۵
لنگه ۱ متری					
جابجایی بیشینه (mm)		تنش فشاری بیشینه (MPa)		تنش کششی بیشینه (MPa)	
راستای X-X	راستای Z-Z	راستای X-X	راستای Z-Z	راستای X-X	راستای Z-Z
۲/۸۷	۲/۰۴	۲	۲/۸۷	۲/۰۴	۲

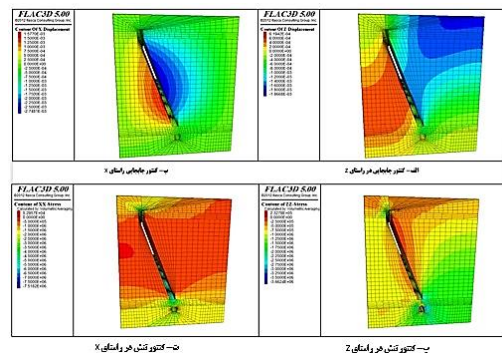
در شکل (۱۲)، کنتور جابجایی و تنش در راستای Z-Z پس از پر شدن کارگاه استخراج از ماده معدنی خرد شده بالای لنگه‌های ۳، ۲ و ۱ متری نشان داده شده است. در جدول (۱۱)، مقادیر جابجایی و تنش بیشینه در راستای Z-Z در سقف تونل ۶۰ پس از پر شدن کارگاه استخراج از ماده معدنی خرد شده بالای لنگه‌های ۳، ۲ و ۱ متری ارائه شده است.

جدول (۹). ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ خرد شده در کارگاه استخراج در روش استخراج انبارهای در رگه آپربایچه‌باغ ۲ تراز بین تونل ۶۰ تا ۱۰۰

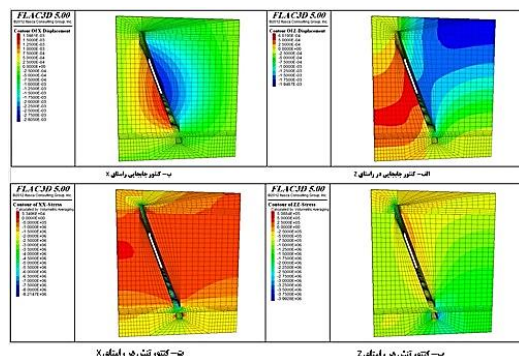
مدول برشی (GPa)	مدول پالک (GPa)	مدول الاستیک (GPa)	ضریب پواسون
۵/۲۵	۷/۱۵	۱۲/۶۷	۰/۲۰۵
چسبندگی (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	وزن مخصوص ($\frac{KN}{m^3}$)
۰/۷۱	۰/۴۵	۳۹	۱۹

۲-۶. مدل‌سازی عددی لنگه‌های ۳، ۲ و ۱ متری

پس از حفاری تونل‌های ۶۰ و ۱۰۰، دوپل‌های کانرئیز با طول ۳ متر در جهت شیب رگه آپربایچه‌باغ ۲ حفاری شده و سپس کارگاه استخراج از بالای دوپل‌های کانرئیز و لنگه‌های ۳، ۲ و ۱ متری تا تونل ۱۰۰ حفاری می‌گردد. در شکل‌های (۹)، (۱۰) و (۱۱) نمایی از جابجایی و تنش ایجاد شده در راستای Z-Z و X-X پس از حفاری کارگاه استخراج با لنگه‌های به ترتیب ۳، ۲ و ۱ متری مشاهده می‌گردد.



شکل (۹). نمایی از جابجایی و تنش ایجاد شده در راستای Z-Z و X-X پس از حفاری کارگاه استخراج با لنگه ۳ متری



شکل (۱۰). نمایی از جابجایی و تنش ایجاد شده در راستای Z-Z و X-X پس از حفاری کارگاه استخراج با لنگه ۲ متری

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E} \quad \text{رابطه (۱)}$$

در رابطه (۱) پارامترها به صورت ذیل تعریف می‌شوند:

σ_c مقاومت فشاری تک‌محوری توده‌سنگ (MPa)

E مدول یانگ توده‌سنگ (MPa)

ε_c کرنش بحرانی برحسب درصد

ساکورایی (۱۹۹۷) با ارتباط دادن نتایج آزمایشگاهی و داده‌های صحرایی، رابطه بین کرنش بحرانی و مقاومت فشاری و مدول یانگ را به دست آورد و سه تراز هشدار خطر به صورت ذیل ارائه داد [۱۸].

تراز هشدار خطر I

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 \quad \text{رابطه (۲)}$$

(۲)

تراز هشدار خطر II

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 \quad \text{رابطه (۳)}$$

(۳)

تراز هشدار خطر III

$$\log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.59 \quad \text{رابطه (۴)}$$

(۴)

در روابط (۲) تا (۴) E مدول یانگ برحسب MPa می‌باشد.

ساکورایی (۱۹۹۷) تراز هشدار خطر II را به عنوان مبنای طراحی تونل پیشنهاد کرده است و ترازهای هشدار خطر I و III به عنوان دو حد بالایی و پایینی برای پایداری تونل‌ها بر اساس کرنش مجاز می‌باشند [۱۸]. در این تحقیق از تراز هشدار خطر II جهت تحلیل پایداری استفاده شده است. با تعیین کرنش بحرانی و با استفاده از رابطه (۵)، جابجایی مجاز تونل ۶۰ به دست خواهد آمد.

$$\varepsilon_u = \frac{u_{max}}{a} \quad \text{رابطه (۵)}$$

در رابطه (۵) پارامترها به صورت ذیل تعریف می‌شوند:

a شعاع معادل تونل یا حفریه

u_{max} حداکثر جابجایی سقف یا دیواره

مقادیر جابجایی‌های مجاز که بر اساس تراز هشدار خطر II و

رابطه (۱) و (۵) برای تونل ۶۰ به دست آمد، در جدول (۱۲)

ارائه شده است.

جدول (۱۲). مقادیر به دست آمده برای کرنش مجاز و کرنش مدل

عددی در تونل ۶۰ با لنگه ۳، ۲ و ۱ متری

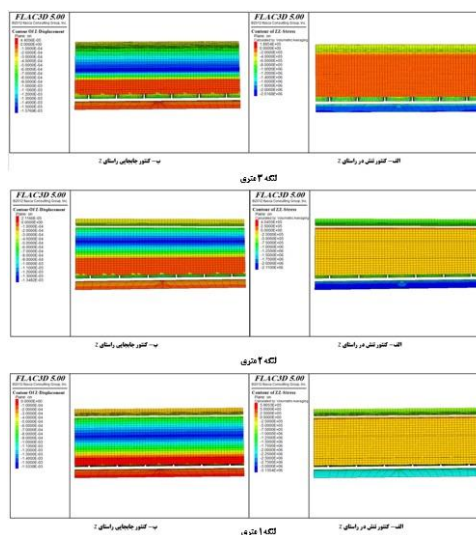
لنگه ۳ متری				
نتیجه	ضریب ایمنی	کرنش مدول عددی (ε_u)	کرنش مجاز معیار ساکورایی (ε_c)	کرنش مجاز معیار ساکورایی (ε_c)
پایدار	۲/۷	۰/۰۰۱۴	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۵۷

جدول (۱۱). مقادیر جابجایی و تنش بیشینه در راستای Z-Z در سقف

تونل ۶۰ پس از پر شدن کارگاه استخراج از ماده معدنی خردشده بالای

لنگه ۳، ۲ و ۱ متری

لنگه ۳ متری		
جابجایی بیشینه (mm)	تنش فشاری بیشینه (MPa)	تنش کششی بیشینه (MPa)
۱/۴	۳/۷	۰/۲۴
لنگه ۲ متری		
جابجایی بیشینه (mm)	تنش فشاری بیشینه (MPa)	تنش کششی بیشینه (MPa)
۱/۵	۴	۰/۵۲
لنگه ۱ متری		
جابجایی بیشینه (mm)	تنش فشاری بیشینه (MPa)	تنش کششی بیشینه (MPa)
۱/۶	۴/۶	۰/۷۳



شکل (۱۲). کنتور جابجایی و تنش در راستای Z-Z پس از پر

شدن کارگاه استخراج از ماده معدنی خردشده بالای لنگه ۳، ۲ و ۱

متری

۳-۶. تحلیل پایداری با معیار ساکورایی

پس از تعیین میزان جابجایی و تنش در تونل ۶۰ پس از پر شدن کارگاه استخراج از ماده معدنی در روش استخراج انبارهای، وضعیت پایداری تونل ۶۰ با استفاده از ترازهای هشدار خطر مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این روش برای بررسی پایداری سازه، مقدار تراز هشدار خطر تعیین و با مقادیر به دست آمده از نرم افزار عددی مقایسه می‌گردد. اگر مقدار تعیین شده، از سطح هشدار خطر کمتر باشد، سازه پایدار است. استفاده از کرنش بحرانی (مجاز) یکی از روش‌هایی است که با آن جابجایی اندازه‌گیری شده در تونل‌ها مثل نشست تاج و همگرایی را می‌توان بررسی کرد. کرنش بحرانی همواره از کرنش گسیختگی کمتر است. کرنش بحرانی با استفاده از رابطه (۱) به دست می‌آید [۱۸].

Tunnel 60				
Parameter of RMR	Poorest value (10%)	Most typical value (60%)	Maximum value (30%)	Weighted average
Rating of compressive strength	4	4	4	4
Rating of RQD	13	17	17	17
Rating of spacing	8	10	15	11
Rating of discontinuity length	0	1	2	1
Rating of separation (aperture)	0	4	4	4
Rating of roughness of discontinuity surface	1	1	3	2
Rating of infilling	0	2	2	2
Rating of weathering discontinuity surface	1	3	3	3
Rating of underground water	7	15	15	14
Rating of discontinuity orientation	-12	-10	-8	-10
Final RMR	48			

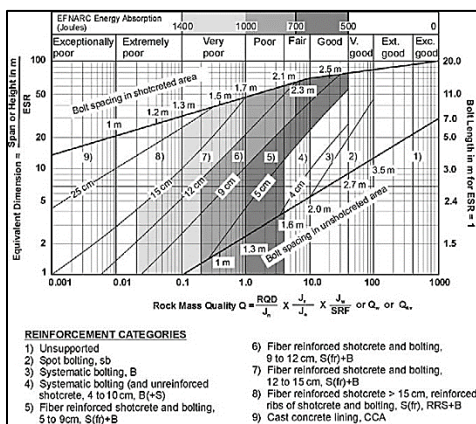
لنگه ۲ متری				
نتیجه	ضریب ایمنی	کرنش مجاز مدلی عددی (ϵ_u)	کرنش مجاز معیاری ساکورایی (ϵ_c)	کرنش مجاز معیاری ساکورایی (ϵ_c) هشدار (II)
پایدار	۲/۵	۰/۰۰۱۵	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۵۷
لنگه ۱ متری				
نتیجه	ضریب ایمنی	کرنش مجاز مدلی عددی (ϵ_u)	کرنش مجاز معیاری ساکورایی (ϵ_c)	کرنش مجاز معیاری ساکورایی (ϵ_c) هشدار (II)
پایدار	۲/۳	۰/۰۰۱۶	۰/۰۰۳۸	۰/۰۰۵۷

با توجه به جدول (۱۲) می‌توان نتیجه گرفت که در لنگه‌های ۱، ۲، ۳ متری بالای تونل ۶۰ رگه آپریاچه‌باغ ۲، با کاهش ارتفاع لنگه، ضریب ایمنی در سقف تونل ۶۰ کاهش پیدا می‌کند ولی کاهش ضریب ایمنی بسیار زیاد نبوده و در تمامی حالات بالای ۲ می‌باشد. از این رو می‌توان از لنگه با ارتفاع کمتری استفاده کرد تا بازیابی ماده معدنی در کارگاه استخراج افزایش یابد.

۴-۶. اعتبارسنجی نتایج با داده‌های تجربی

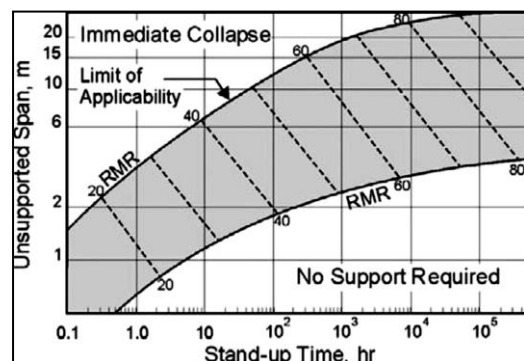
با توجه به نمودار شکل (۱۳) و مقدار RMR توده‌سنگ میزبان در رگه آپریاچه‌باغ ۲ در جدول (۱۳)، فضای زیرزمینی با عرض دهانه ۲ متر نیازی به سیستم نگهداری ندارد. این نتیجه با نتایج مدل‌سازی عددی مطابقت دارد؛ چرا که جابجایی‌های مشاهده‌شده در سقف تونل ۶۰ پس از حفاری و پرکردن کارگاه استخراج، در هر یک از لنگه‌های ۱، ۲، ۳ متری بسیار کم و نامحسوس است و نیازی به سیستم نگهداری ندارد.

با توجه به نمودار شکل (۱۴) و جدول (۱۳) و مقدار Q توده‌سنگ میزبان در رگه آپریاچه‌باغ ۲ در جدول (۱۵)، فضای زیرزمینی با عرض دهانه ۲ متر نیازی به سیستم نگهداری ندارد.



شکل (۱۴). نمودار طراحی سیستم نگهداری شامل ظرفیت جذب

انرژی لازم [۲۰]



شکل (۱۳). استفاده از RMR توده‌سنگ و زمان خودپایداری در تعیین

اندازه دهانه خودنگهدار [۲۰]

جدول (۱۳). برآورد پارامترهای RMR و GSI با مشاهدات میدانی در

گالری ۶۰

عرض و ارتفاع تونل ۶۰ نزدیک می‌باشد و با آن مطابقت دارد. بارتون و همکاران (۱۹۷۴) رابطه (۸) را برای حداکثر دهانه معادل خودنگهدار تونل با استفاده از سیستم طبقه‌بندی Q پیشنهاد دادند. عبارات $span$, $Diameter$ بیشتر برای تحلیل پایداری سقف و $Height$ بیشتر برای تحلیل پایداری دیواره‌ها کاربرد دارد.

رابطه (۸) $D_e'(m) = 2 Q^{0.4} = \frac{span, Diameter, Height (m)}{ESR}$

در رابطه (۸) ESR ضریب پایداری حفاری می‌باشد که از جدول (۱۴) می‌توان مقادیر آن را به دست آورد.

۴-۶. اعتبارسنجی نتایج با معیارهای شکست

در این بخش نتایج مدل‌سازی عددی با روابط معیارهای شکست توده‌سنگ مقایسه شده است تا میزان مطابقت آن‌ها با یکدیگر مورد بررسی قرار گیرد. در جدول (۱۶) نتایج حاصل از معیارهای شکست توده‌سنگ در تونل ۶۰ واقع در رگه آپربایچه‌باغ ۲ محاسبه شده و نتیجه پایداری یا عدم پایداری توده‌سنگ میزبان در تونل ۶۰ ارائه شده است.

جدول (۱۶). نتایج حاصل از معیارهای شکست توده‌سنگ در تونل ۶۰ واقع در رگه آپربایچه‌باغ ۲

معیار شکست	تنش قائم مجاز (MPa)	تنش قائم سقف تونل ۶۰ (MPa)	نتیجه
هوک و براون (۱۹۹۵)	۱۷/۶۵	۱/۳۷	پایدار
بینیاوسکی و یادهبیر (۱۹۸۳)	۹/۳۷	۱/۳۷	پایدار
جانستون (۱۹۸۵)	۴/۳۸	۱/۳۷	پایدار
رامامورتی (۱۹۹۳)	۲/۳	۱/۳۷	پایدار
هوک، کارانزاتورس و کورکوم (۲۰۰۲)	۷/۸۵	۱/۳۷	پایدار
موهر-کولمب	۴۸/۶۱	۱/۳۷	پایدار

۷. نتیجه‌گیری

تحقیق حاضر تلاش کرد تا با توجه به شرایط هندسی و ژئومکانیکی کانسار بایچه‌باغ و توده‌سنگ میزبان در رگه آپربایچه‌باغ ۲ و هزینه‌ها و درآمد حاصل از استخراج ماده معدنی، بهترین روش استخراج زیرزمینی را برای استخراج ماده معدنی رگه آپربایچه‌باغ ۲ پیش‌بینی کرده و پایداری روش استخراج پیش‌بینی شده را از نظر ژئومکانیکی بررسی کند تا مقدار بازیابی

جدول (۱۴). مقادیر ESR [۲۰]

Type of excavation	ESR
A Temporary mine openings, etc.	2-5
B Permanent mine openings, water tunnels for hydro power (excluding high pressure penstocks), pilot tunnels, drifts and headings for large openings, surge chambers	1.6-2
C Storage caverns, water treatment plants, minor road and railway tunnels, access tunnels	1.2-1.3
D Power stations, major road and railway tunnels, civil defense chambers, portals, intersections	0.9-1.1
E Underground nuclear power stations, railway stations, sports and public facilities, factories, major gas pipeline tunnels	0.5-0.8

جدول (۱۵). برآورد پارامتر Q با مشاهدات میدانی در گالری ۶۰

Tunnel 60				
Parameter of Q	Poorest value (10%)	Most typical value (60%)	Maximum value (30%)	Weighted average
RQD	55	75	75	73.00
Jn	4	6	6	5.80
Jr	1	1.5	2	1.60
Ja	4	8	13	9.10
Jw	1	1	1	1.00
SRF	2.5	2.5	2.5	2.50
Q	0.88518			

با توجه به روابط (۶) و (۷) و مقدار Q توده‌سنگ میزبان در رگه آپربایچه‌باغ ۲ در جدول (۱۵)، مقدار تغییرشکل سقف و دیواره تونل با عرض و ارتفاع ۲ متر به ترتیب ۴/۱ و ۳/۸ میلیمتر به دست می‌آید که با نتایج به دست آمده از مدل‌سازی عددی در سقف و دیواره تونل ۶۰ پس از حفاری و پرشدن کارگاه استخراج مطابقت دارد.

$$\Delta_v = \frac{span}{100Q} \sqrt{\frac{\sigma_v}{q_c}} \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\Delta_h = \frac{height}{100Q} \sqrt{\frac{\sigma_h}{q_c}} \quad \text{رابطه (۷)}$$

در رابطه (۶) و (۷) پارامترها به صورت ذیل تعریف می‌شوند:

Δ_v جابجایی عمودی سقف، σ_v تنش عمودی، Δ_h جابجایی افقی دیواره، σ_h تنش افقی، $span$ عرض تونل، $height$ ارتفاع تونل، q_c مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ

با توجه به رابطه (۸) و مقدار Q توده‌سنگ میزبان در رگه آپربایچه‌باغ ۲ در جدول (۱۵)، حداکثر عرض دهانه بدون نگهداری برابر ۱/۸۷ متر به دست آمده است. عدد به دست آمده به مقدار

[2] Ministry of Samt, Deputy Minister of Mines and Mining Industries, Program for Preparation of Mining Rules and Criteria, Deputy President of Planning and Strategic Supervision, Publications of Iran Mining Engineering Organization, "Guide for choosing the method of extracting mineral reserves," No. 623, 1392. (In Persian)

[3] M. Aslanzadeh, M. Hosseini, "Prediction of the modulus of deformation of southwestern Iran rock masses using multivariate linear regression," Scientific-Research Journal of Iran Rock Mechanics, pp. 89-96, 2017. (In Persian)

[4] M. Hosseini and S. Maleki, "Investigation of Hook and Brown, Binyavski and Johnston's failure criteria regarding the proper estimation of rock mass strength," 3rd national conference on the central development of civil engineering, architecture, electricity and mechanics in Iran, 2015. (In Persian)

[5] N. Ghasempour, B. Panahbar, "stability analysis of underground spaces using FLAC3D software," Jahad Academic Publications, Amirkabir Industrial Unit, 2016. (In Persian)

[6] F. Khodabandeh, D. Bahadur Beigi, "FLAC software," Academic Jahad of Amirkabir Industrial Unit, third edition, 2018. (In Persian)

[7] "Guidelines for field investigation of rock fractures in engineering and dam construction works," Program and Budget Organization - Ministry of Energy, publication No. 189, Vice-Chancellor of Technical Affairs, Bureau of Technical Affairs and Standards Development, 1378. (In Persian)

[8] M. Atai, "Underground Mining," vol. 1 and 2, Shahrood University of Technology, 2014. (In Persian)

[9] "Price list of the basic unit of road, runway and railway," road and transportation, No. 705015/1400, year 1401. (In Persian)

[10] D. E. Nicholas, "Selection Procedure, SME Mining Engineering Handbook," Society for Mining Engineering, Metallurgy and Exploration, 1992.

[11] J. A. Franklin, "Suggest methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties," Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, vol. 16 pp. 141-156, 1979.

[12] Z. T. Bieniawski, I. Hawkes, "Suggested methods for determining tensile strength of rock materials," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 15 pp. 99-103, 1978.

[13] Z. T. Bieniawski, M. J. Bernede, "Suggested methods for determining the uniaxial compressive strength and deformability of rock materials: Part 1. Suggested method for determining deformability of rock materials in uniaxial compression," In International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, vol. 16 pp. 138-140, 1979.

[14] K. Kovari Tisa, A. Einstein, J. A. Franklin, "Suggested methods for determining the strength of rock materials in triaxial compression: revised version," Intl J of Rock Mech & Mining Sci & Geomechanic Abs, vol. 20, 1983.

[15] J. Yu, X. Chen, H. Li, J. W. Zhou, Y. Y. Cai, "Effect of freeze-thaw cycles on mechanical properties and permeability of red sandstone under triaxial compression," Journal of Mountain Science, vol. 12 pp. 218-231, 2015.

[16] S. Lelovic, D. Vasovic, "Determination of Mohr-coulomb parameters for modelling of concrete Crystals," vol. 10 pp 808, 2020.

[17] F. P. Hassani, "Economic and technical feasibility for backfill design in Quebec underground mines," Canada-Quebec Mineral Development Agreement, Research & Development in Quebec Mines, Final report 1/2, na, 1989.

ماده معدنی به حداکثر برسد. در این تحقیق با استفاده از مدل‌های کیفی انتخاب روش استخراج مناسب مانند الگوی پیل، الگوی باشکوف و رایت، الگوی موریسون و الگوی هارتمن و مدل‌های کمی انتخاب روش استخراج مناسب مانند الگوی نیکلاس و نیکلاس اصلاح‌شده، الگوی لایشر، الگوی دانشگاه بریتیش کلمبیا (UBC) و الگوی جامع انتخاب روش استخراج، روش‌های استخراج دارای اولویت اولیه انتخاب شدند. روش‌های استخراج انتخاب‌شده توسط الگوهای کمی و کیفی انتخاب روش استخراج مناسب، از نظر معیارهای فنی مانند شرایط هندسی و ژئومکانیکی کانسار، خواص جانبی کانسار، نرخ تولید، توان تولید، نرخ آماده‌سازی، قابلیت استخراج انتخابی، بازیابی، اختلاط، انعطاف‌پذیری، نشست زمین، ایمنی و بهداشت و امکان مکانیزاسیون، با یکدیگر مقایسه شدند و در نهایت ۶ روش استخراج (کندن و پرکردن با باطله کارگاه، پلکانی ساده، پلکانی معکوس، ستونی، استخراج از طبقات فرعی و انبارهای) به مرحله مقایسه اقتصادی راه یافتند. روش‌های استخراج انتخاب‌شده در مرحله مقایسه فنی، با تحلیل هزینه‌ها و درآمدهای مستقیم استخراج کانسار، با استفاده از ۲ روش فهرست‌بهای راه، باند و راه‌آهن ۱۴۰۱ و هزینه‌های مستقیم ماهیانه معدن بایچه‌باغ با یکدیگر مقایسه شدند و در نهایت روش استخراج انبارهای از نظر فنی و اقتصادی به‌عنوان گزینه مناسب انتخاب شد. به‌منظور تحلیل پایداری کارگاه استخراج و تونل ۶۰ در روش استخراج انبارهای معدن بایچه‌باغ، لنگه بالای تونل ۶۰ با ارتفاع ۳، ۲ و ۱ متری انتخاب شدند و پس از مدل‌سازی عددی هر یک از لنگه‌های یادشده و حفاری و پرشدن کارگاه استخراج با ماده معدنی، با کاهش ارتفاع لنگه بالای تونل ۶۰، تغییر محسوسی در جابجایی و تنش در راستای Z-Z و X-X سقف و دیواره‌های تونل ۶۰ مشاهده نشد. نتایج مدل‌سازی عددی با معیار ساکورایی، روابط تجربی سایر محققین در سالیان گذشته و معیارهای شکست توده‌سنگ مقایسه شد که مطابقت قابل قبولی با نتایج معیارهای تجربی داشت. با توجه به عدم کاهش محسوس در مقادیر جابجایی و تنش در سقف و دیواره تونل ۶۰ با کاهش ارتفاع لنگه، لنگه ۱ متری به‌عنوان ارتفاع لنگه بالای تونل ۶۰ انتخاب شد تا حداکثر بازیابی ماده معدنی در رگه آپربایچه‌باغ ۲ انجام شود.

۸. مراجع

[1] "Exploratory and operational operations in the Baichebagh area," specialized parent company of raw materials and nuclear fuel of Iran, Khatam-ul-Anbia construction site (peace be upon him and his family), specialized industry and mining holding, mining institute, technical and engineering deputy of Baichebagh mine, 1401. (In Persian)

- [18] S. Sakurai, "Lessons learned from field measurements in tunneling," *Tunnelling and underground space technology*, vol. 12 pp. 453-460, 1997.
- [19] J. Zuo, J. Shen, "The Hoek-Brown Failure Criterion--From Theory to Application," Singapore, Springer, 2020.
- [20] N. Barton, "Rock quality, seismic velocity, attenuation and anisotropy," CRC press, 2006.
- [21] B. Singh, R. K. Goel, "Engineering rock mass classification," Boston, Butterworth-Heinemann, pp. 1755-1315, 2011.
- [22] L. Zhang, "Engineering properties of rocks," Butterworth-Heinemann, 2016.
- [23] F. ITASCA, "Fast Lagrangian Analysis of Continua, User's Guide, Version 5.00," ITASCA, Minnesota, USA, pp. 999-100, 2002.
- [24] M. Masniyom, "Systematic Selection and Application of Backfill in Underground Mines," Ph.D. Thesis, 2009.