



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک
مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی

پایان نامه کارشناسی ارشد

تحلیل پایداری پایه‌های تاج و کارگاهی در کارگاه‌های استخراج معدن رومرمر

نگارنده:

مهدی حیدرمجنی

استاد راهنما:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

استاد مشاور:

دکتر محمد محمدخانی

مهر ۱۳۹۹

تقدیم به:

جامعه معدنی و کلیه سخت کوشان عرصه ی تولید، صنعت و تجارت

■ ■ ■

سپاسگزاری:

از کلیه افرادی که نقش اصلی را در انجام این پایان نامه ایفا کردند از جمله:
دکتر سید محمد اسماعیل جلالی، دکتر محمد محمدخانی، دکتر مهدی نوروزی
و مهندس قریب بلوک و مهندس رضایی نهایت تشکر و قدردانی را دارم.
امیدوارم به نهایت ارزش وجودی خود دست یابند.

....

تعهدنامه

اینجانب مهدی حیدرمجنی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته تونل و فضاهای زیرزمینی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع **تحلیل پایداری پایه‌های تاج و کارگاهی در کارگاه‌های استخراج معدن رومرر** تحت راهنمایی دکتر سید محمد اسماعیل جلالی متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش‌های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارایه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد و مقالات مستخرج با نام **دانشگاه صنعتی شاهرود** و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان‌نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت‌های آن‌ها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ:

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات، مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم‌افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

با توجه به اهمیت پایداری کارگاه‌های استخراج در معادن از لحاظ ایمنی و هزینه‌های معدن‌کاری، در این تحقیق تحلیل پایداری پایه‌های تاج و کارگاهی در کارگاه‌های استخراج معدن رومرمر با نگاه کل‌گرا انجام شده است. برخلاف روش‌های جزگرا که در آنها تحلیل پایه‌ها به صورت منفرد انجام می‌شود، در نگاه کل‌گرا پایداری مجموعه‌ی پایه‌ها و فضاهای استخراجی به صورت یک‌پارچه انجام می‌شود. بدین منظور ابتدا داده‌ها و اطلاعات مهم از منطقه مورد نظر که به طور کلی از آهک و دولومیت و کانی‌های اصلی، سرب و روی تشکیل شده، جمع‌آوری شده و سپس، برای استخراج، حالت‌های مختلف نسبت تنش افقی به عمودی (K) و در پهنه‌های متفاوت ژئومکانیکی، سناریوهای مختلف ابعاد پایه و ابعاد فضاهای استخراجی، طراحی شده و بر روی آنها روش‌های تجربی و عددی پیاده‌سازی شده است. نتایج حاصل از طراحی تجربی نشان می‌دهد که برداشت پایه‌های امتدادی بهتر از برداشت پایه‌های شیبی است.

خروجی‌های تحلیل عددی حاکی از این است که افزایش طول کارگاه (در مقایسه با افزایش عرض آن) عامل اصلی افزایش تنش‌های فشاری وارد بر سقف کارگاه و پایه‌ها و به تبع آن افزایش جابجایی‌ها و ناپایداری‌ها است و این نکته در تمامی سناریوها مشهود است. در اکثر سناریوها، پایداری سقف کارگاه‌ها تضمین شده است.

از آن‌جا که در روش عددی، تحلیل پایداری سقف و پایه به صورت توأمان بررسی شده است، نتایج آن نسبت به روش تجربی که پایداری سقف و پایه به صورت جداگانه تحلیل می‌شود، محافظه‌کارانه‌تر است. در نهایت با بررسی نتایج حاصل از تحلیل تجربی و عددی، می‌توان برای حالت استخراج یک رگه، کارگاه با طول ۱۴ متر و ارتفاع‌های ۳۴، ۲۴ و ۱۴ متر و برای حالت دو رگه، کارگاه با طول ۱۴ متر و ارتفاع ۱۴ متر، را برای طراحی مناسب دانست.

کلمات کلیدی: تحلیل پایداری، کارگاه و پایه، تخریب و پایداری، $FLAC^{3D}$

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

...

فهرست

- فصل اول - کلیات ۱
- ۱-۱- مقدمه ۲
- ۲-۱- بیان مساله ۲
- ۳-۱- ضرورت انجام تحقیق ۳
- ۴-۱- روش تحقیق ۴
- ۵-۱- ساختار پایان نامه ۵
- فصل دوم - پیشینه مطالعات ۷
- ۱-۲- مقدمه ۸
- ۲-۲- هندسه ی پایه ۸
- ۳-۲- نسبت عرض به ارتفاع پایه ۱۰
- ۴-۲- درزه داری ۱۱
- ۵-۲- مقاومت ذاتی سنگ ۱۲
- ۶-۲- شیب لایه ها ۱۳
- فصل سوم - معرفی معدن کارگاه و پایه رومرمر ۱۵
- ۱-۳- مقدمه ۱۶
- ۲-۳- شرایط عمومی منطقه معدنی ۱۷
- ۳-۳- موقعیت معدن رومرمر ۱۷

- ۳-۴-زمین‌شناسی عمومی و مهندسی ۱۹
- ۳-۵-سنگ درون‌گیر ۱۹
- ۳-۶-مشخصات هندسی کانسار ۲۰
- ۳-۷-مشخصات عیاری کانسار ۲۰
- ۳-۸-درزه‌داری منطقه ۲۰
- ۳-۹-سامانه‌های بازکننده معدن رومرمر ۲۱
- ۳-۱۰-شبکه‌های آماده سازی در معدن رومرمر ۲۲
- ۳-۱۱-روش‌های استخراج فعلی معدن ۲۳
- ۳-۱۲-بررسی میدان تنش برجا ۲۴
- ۳-۱۳-جمع‌بندی ۲۸
- فصل چهارم- برآورد ویژگی‌های ژئومکانیکی ۲۹
- ۴-۱-مقدمه ۳۰
- ۴-۲-ویژگی‌های ناپیوستگی‌های توده‌سنگ ۳۱
- ۴-۱-۲-جهت‌داری ناپیوستگی‌ها ۳۱
- ۴-۲-۲-فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها ۳۲
- ۴-۲-۳-اندازه (پایایی) ناپیوستگی‌ها ۳۳
- ۴-۲-۴-چگالی و شدت ناپیوستگی ۳۴
- ۴-۲-۵-بازشدگی ناپیوستگی ۳۵
- ۴-۲-۶-زبری ۳۶

- ۳-۴- عوامل مربوط به خصوصیات مکانیکی توده سنگ ۳۷
- ۱-۳-۴- چگالی سنگ ۳۷
- ۲-۳-۴- مقاومت فشاری تک محوری ۳۹
- ۳-۳-۴- مقاومت کششی ۴۴
- ۴-۳-۴- مدول الاستیسیته ۴۵
- ۵-۳-۴- نسبت پواسون ۴۶
- ۴-۴- جمع بندی ۴۸
- فصل پنجم- طراحی پایه های معدن رومرمر به روش تجربی ۵۱
- ۱-۵- مقدمه ۵۲
- ۲-۵- طراحی ابعاد مناسب پایه ها ۵۴
- ۱-۲-۵- برآورد بار وارد بر پایه با استفاده از روش های تجربی مناسب ۵۴
- ۱-۱-۲-۵- تئوری سطح تاثیر ۵۵
- ۲-۲-۵- برآورد مقاومت پایه ۵۷
- ۱-۲-۲-۵- روش های تجربی برای برآورد مقاومت پایه ۵۷
- ۳-۲-۵- انتخاب ضریب ایمنی مناسب ۵۸
- ۳-۵- برآورد بار وارد بر پایه های معدن رومرمر ۵۸
- ۴-۵- برآورد مقاومت پایه ها در معدن رومرمر ۵۹
- ۵-۵- روش های تجربی موجود برای بررسی پایداری سقف ۶۲
- ۱-۵-۵- روش نمودار پایداری ماتیوس ۶۴

- ۶۷-۵-۲- روش نمودار توسعه یافته ماتیوس
- ۶۸-۵-۳- نمودار پایداری استوارت و فورسیت
- ۷۰-۵-۶- برآورد پایداری محدوده معدن رومرمر با روش نمودار توسعه یافته ماتیوس
- ۷۳-۵-۷- برآورد پایداری محدوده معدن رومرمر با روش استوارت و فورسیت
- ۸-۵- تعیین ابعاد کارگاه‌ها و پایه‌های معدن رومرمر با هدف دستیابی به نسبت استخراج
بیشینه ۷۵
- ۷۶-۵-۱-۸- سناریوی اول (ارتفاع کارگاه ۴۴ متر و طول کارگاه ۳۴ متر).....
- ۸۰-۵-۲-۸- سناریوی دوم (ارتفاع کارگاه ۴۴ متر و طول کارگاه ۲۴ متر).....
- ۸۳-۵-۹- جمع‌بندی
- ۸۷- فصل ششم- طراحی پایه‌ها با استفاده از تحلیل عددی
- ۸۸-۶-۱- مقدمه
- ۸۹-۶-۲- جانمایی پایه‌ها و کارگاه‌های استخراج معدن رومرمر
- ۹۱-۶-۳- ساخت مدل هندسی معدن رومرمر
- ۹۵-۶-۴- چگونگی تحلیل مدل عددی
- ۹۶-۶-۵- سناریوهای طراحی معدن رومرمر
- ۹۹-۶-۱-۵- سناریوی اول (ارتفاع کارگاه ۴۴ متری و طول کارگاه ۳۴ متری).....
- ۱۰۸-۶-۲-۵- سناریوی دوم (ارتفاع کارگاه ۴۴ متری و طول کارگاه ۲۴ متری).....
- ۱۰۹-۶-۳-۵- سناریوی سوم (ارتفاع کارگاه ۴۴ متری و طول کارگاه ۱۴ متری).....
- ۱۰۹-۶-۴-۵- سناریوی چهارم (ارتفاع کارگاه ۳۴ متری و طول کارگاه ۳۴ متری).....

- ۱۱۰-۵-۶- سناریوی پنجم (ارتفاع کارگاه ۳۴ متری و طول کارگاه ۲۴ متری).....
- ۱۱۰-۶-۵- سناریوی ششم (ارتفاع کارگاه ۳۴ متری و طول کارگاه ۱۴ متری).....
- ۱۱۱-۷-۵- سناریوی هفتم (ارتفاع کارگاه ۲۴ متری و طول کارگاه ۳۴ متری).....
- ۱۱۱-۸-۵- سناریوی هشتم (ارتفاع کارگاه ۲۴ متری و طول کارگاه ۲۴ متری).....
- ۱۱۲-۹-۵- سناریوی نهم (ارتفاع کارگاه ۲۴ متری و طول کارگاه ۱۴ متری).....
- ۱۱۲-۱۰-۵- سناریوی دهم (ارتفاع کارگاه ۱۴ متری و طول کارگاه ۳۴ متری).....
- ۱۱۳-۱۱-۵- سناریوی یازدهم (ارتفاع کارگاه ۱۴ متری و طول کارگاه ۲۴ متری).....
- ۱۱۳-۱۲-۵- سناریوی دوازدهم (ارتفاع کارگاه ۱۴ متری و طول کارگاه ۱۴ متری).....
- ۱۱۴-۶-۶- جمع‌بندی.....
- ۱۱۷- فصل هفتم- نتیجه‌گیری و پیشنهادها.....
- ۱۱۸-۱-۷- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری.....
- ۱۲۰-۲-۷- پیشنهادها.....
- ۱۲۱- منابع.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: رابطه بین مقاومت پایه با نسبت عرض به ارتفاع در روش‌های پایه رایج ۱۰
- شکل ۱-۳: محدوده معدن رومرمر ۱۸
- شکل ۲-۳: نقشه توپوگرافی منطقه، تونل‌ها و رمپ‌های بازکننده در معدن رومرمر ۲۱
- شکل ۳-۳: نقشه حفاریات آماده‌سازی در طبقات مختلف معدن ۲۳
- شکل ۴-۳: تصویری از حفاری‌های در امتداد و عمود بر امتداد رگه در تراز ۱۶۶۵ ۲۴
- شکل ۵-۳: نقشه جهانی تنش ۲۶
- شکل ۶-۳: شرایط میدان تنش در ایران و منطقه ایرانکوه ۲۷
- شکل ۱-۴: تعاریف بازشدگی ناپیوستگی‌های باز و بسته ۳۵
- شکل ۲-۴: پروفیل‌های نمونه‌ی زبری و اصطلاحات پیشنهادی ۳۷
- شکل ۳-۴: نمودار همبستگی بین عدد چکش اشمیت نوع L، چگالی و مقاومت فشاری تک محور ۴۱
- شکل ۱-۵: طرح مفهومی استخراج معدن رومرمر برای یک رگه و عناصر تشکیل دهنده آن ۵۳
- شکل ۲-۵: تعیین تنش متوسط وارد بر پایه با استفاده از تئوری سطح تاثیر ۵۵
- شکل ۳-۵: پهنه‌بندی توده‌سنگ بر اساس کیفیت توده‌سنگ (کمربالا، مرکز و کمربالین ماده معدنی ۶۱
- شکل ۴-۵: نمودار پایداری ماتیوس ۶۵
- شکل ۵-۵: ضرایب تعدیل نمودار پایداری ماتیوس ۶۶
- شکل ۶-۵: نمودار تعمیم یافته‌ی پایداری ماتیوس با استفاده از رگرسیون آماری ۶۸
- شکل ۷-۵: نمودار اصلاح شده‌ی پایداری ماتیوس توسط استوارت و فورسیت ۶۹
- شکل ۸-۵: بررسی شعاع هیدرولیکی پایدار محدوده‌ی رومرمر با استفاده از نمودار تعمیم یافته ماتیوس ۷۲

- شکل ۵-۹: بررسی شعاع هیدرولیکی پایدار محدوده‌ی رومرمر با استفاده از نمودار استوارت و فورسیت ۷۴
- شکل ۵-۱۰: بررسی پایداری سقف محدوده‌ی رومرمر برای سناریوی اول با استفاده از نمودار توسعه‌یافته ماتئوس ۷۷
- شکل ۵-۱۱: بررسی پایداری سقف محدوده‌ی رومرمر برای سناریوی اول با استفاده از نمودار استوارت و فورسیت ۷۸
- شکل ۶-۱: نحوه قرارگیری رگه‌ها، تونل‌ها و کارگاه‌های استخراج در ترازهای مختلف معدن رومرمر ۹۰
- شکل ۶-۲: نمایی از مدل بلوکی و رگه‌ی ماده معدنی ۹۱
- شکل ۶-۳: جانمایی تونل‌ها و پایه‌ها در رگه‌های ۷۴ و ۷۴+ در مدل عددی ۹۲
- شکل ۶-۴: جانمایی تونل‌ها و پایه‌ها در رگه‌ی ۷۴ در مدل عددی ۹۳
- شکل ۶-۵: چگونگی جابجایی‌های ایجاد شده در سقف کارگاه ۹۵
- شکل ۶-۶: نمایی از پایه‌ها و طبقات معدن در رگه‌های ۷۴ و ۷۴+ ۹۷
- شکل ۶-۷: نمایی از پایه‌ها و طبقات معدن در رگه‌ی ۷۴ ۹۸
- شکل ۶-۸: نمایی از کارگاه‌های استخراج پس از بازیابی ماده معدنی در رگه‌های ۷۴ و ۷۴+ ۹۸
- شکل ۶-۹: نمایی از کارگاه‌های استخراج پس از بازیابی ماده معدنی در رگه‌ی ۷۴ ۹۹
-
- شکل ۶-۱۰: وضعیت تنش‌های قائم در سقف کارگاه‌های استخراج رگه‌های ۷۴ و ۷۴+ به ازای $K=2$ در سناریوی یک ۱۰۰
-
- شکل ۶-۱۱: وضعیت پلاستیک‌شدگی توده‌سنگ در محدوده سقف کارگاه استخراج رگه‌های ۷۴ و ۷۴+ به ازای $k=2$ در سناریوی یک ۱۰۰

- شکل ۶-۱۲: وضعیت تنش‌های قائم در سقف کارگاه‌های استخراج رگه‌های V_4 و V_4+ به ازای $K=1/5$ در سناریوی یک..... ۱۰۱
- شکل ۶-۱۳: وضعیت پلاستیک‌شدگی توده‌سنگ در محدوده سقف کارگاه استخراج رگه‌های V_4 و V_4+ در سناریوی یک..... ۱۰۱
- شکل ۶-۱۴: وضعیت تنش‌های قائم در سقف کارگاه‌های استخراج رگه‌های V_4 و V_4+ به ازای $K=1$ در سناریوی یک..... ۱۰۲
- شکل ۶-۱۵: وضعیت پلاستیک‌شدگی توده‌سنگ در محدوده سقف کارگاه استخراج رگه‌های V_4 و V_4+ به ازای $k=1$ در سناریوی یک..... ۱۰۲
- شکل ۶-۱۶: وضعیت تنش‌های قائم در سقف کارگاه‌های استخراج رگه‌های V_4 به ازای $K=2$ در سناریوی یک..... ۱۰۳
- شکل ۶-۱۷: وضعیت پلاستیک‌شدگی توده‌سنگ در محدوده سقف کارگاه استخراج رگه‌های V_4 به ازای $k=2$ در سناریوی یک..... ۱۰۳
- شکل ۶-۱۸: وضعیت تنش‌های قائم در سقف کارگاه‌های استخراج رگه‌های V_4 به ازای $K=1/5$ در سناریوی یک..... ۱۰۴
- شکل ۶-۱۹: وضعیت پلاستیک‌شدگی توده‌سنگ در محدوده سقف کارگاه استخراج رگه‌های V_4 به ازای $k=1/5$ در سناریوی یک..... ۱۰۴
- شکل ۶-۲۰: وضعیت تنش‌های قائم در سقف کارگاه‌های استخراج رگه‌های V_4 به ازای $K=1$ در سناریوی یک..... ۱۰۵
- شکل ۶-۲۱: وضعیت پلاستیک‌شدگی توده‌سنگ در محدوده سقف کارگاه استخراج رگه‌های V_4 به ازای $k=1$ در سناریوی یک..... ۱۰۵
- شکل ۶-۲۲: نمایی از محدوده‌ی مخروطی شکل و گسترش مناطق پلاستیک در بالای سقف کارگاه رگه‌های V_4 و V_4+ در سناریوی یک..... ۱۰۶

فهرست جداول

- جدول ۱-۳: اطلاعات شیب، جهت شیب و فاصله‌داری محاسبه شده برای دسته درزه‌های معدن رومرمر ۲۰
- جدول ۲-۳: نحوه آماده‌سازی در طبقات مختلف معدن ۲۲
- جدول ۱-۴: مقادیر نمونه‌ی چگالی سنگ بکر (Lama and Vutukuri, 1978) ۳۸
- جدول ۲-۴: محدوده‌ی مقادیر نمونه‌ی مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر (AASHTO, 1989) ۴۰
- جدول ۳-۴: روابط بین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر و عدد چکش اشمیت ۴۲
- جدول ۴-۴: رابطه‌ی بین مدول الاستیک E و عدد چکش اشمیت Rn ۴۵
- جدول ۵-۴: مقادیر نمونه‌ی مدول الاستیک سنگ‌های بکر (AASHTO, 1989) ۴۶
- جدول ۶-۴: مقادیر نمونه ضریب پواسون سنگ‌های بکر (AASHTO, 1989) ۴۷
- جدول ۷-۴: خلاصه ویژگی‌های مکانیکی و هندسی توده‌سنگ معدن رومرمر ۴۹
- جدول ۱-۵: تنش متوسط در انواع پایه‌ها با استفاده از تئوری سطح تاثیر (عطایی، ۱۳۹۰) ۵۷
- جدول ۲-۵: مدل تجربی برای طراحی پایه‌ها ۵۷
- جدول ۳-۵: مقدار تنش وارد بر پایه بر اساس تئوری سطح تاثیر با توجه به مقادیر مختلف K ۵۹
- جدول ۴-۵: تعیین مقاومت پایه برای حالت استخراج یک رگه تنها بر اساس روابط تجربی مختلف ۶۰
- جدول ۵-۵: محاسبه عدد پایداری برای محدوده معدن رومرمر ۷۱
- جدول ۶-۵: پارامترهای طراحی و وضعیت پایه در سناریوی اول (ارتفاع کارگاه ۴۴ متر و طول کارگاه ۳۴ متر) ۷۶

- جدول ۵-۷: وضعیت پایداری سقف محدوده‌ی رومرمر برای سناریوی اول ۸۰
- جدول ۵-۸: پارامترهای طراحی و وضعیت پایه در سناریوی دوم (ارتفاع کارگاه ۴۴ متری و طول کارگاه ۲۴ متری) ۸۱
- جدول ۵-۹: وضعیت پایداری سقف محدوده‌ی رومرمر برای سناریوی دوم ۸۱
- جدول ۵-۱۰: شعاع هیدرولیکی سناریوهای سه تا دوازده ۸۲
- جدول ۵-۱۱: وضعیت پایداری پایه‌ها و سقف معدن رومرمر در حالت‌های مختلف بر اساس طراحی تجربی ۸۴
- جدول ۶-۱: ویژگی‌های مکانیکی سنگ سالم ۹۴
- جدول ۶-۲: ویژگی‌های مکانیکی ناپیوستگی‌ها ۹۴
- جدول ۶-۳: مقادیر مقاومت فشاری و مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ معادل ۹۴
- جدول ۶-۴: مشخصات ژئومکانیکی توده‌سنگ معدن رومرمر در پهنه‌های A، B و C ۹۴
- جدول ۶-۵: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره یک، به ازای مقادیر مختلف K ۱۰۸
- جدول ۶-۶: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره دو، به ازای مقادیر مختلف K ۱۰۸
- جدول ۶-۷: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره سه، به ازای مقادیر مختلف K ۱۰۹
- جدول ۶-۸: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره چهار، به ازای مقادیر مختلف K ۱۰۹
- جدول ۶-۹: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره پنج، به ازای مقادیر مختلف K ۱۱۰

- جدول ۶-۱۰: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره شش، به ازای مقادیر مختلف K ۱۱۰.....
- جدول ۶-۱۱: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره هفت، به ازای مقادیر مختلف K ۱۱۱.....
- جدول ۶-۱۲: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره هشت، به ازای مقادیر مختلف K ۱۱۱.....
- جدول ۶-۱۳: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره نه، به ازای مقادیر مختلف K ۱۱۲.....
- جدول ۶-۱۴: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره ده، به ازای مقادیر مختلف K ۱۱۲.....
- جدول ۶-۱۵: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره یازده، به ازای مقادیر مختلف K ۱۱۳.....
- جدول ۶-۱۶: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره دوازده، به ازای مقادیر مختلف K ۱۱۳.....
- جدول ۶-۱۷: وضعیت پایداری پایه‌ها و سقف کارگاه‌های معدن رومرمر در حالت‌های مختلف بر اساس طراحی عددی ۱۱۴.....

فصل اول

کلیات

برای استخراج کانسارهایی که در عمق قرار گرفته‌اند، معمولاً از روش‌های مختلف معدن‌کاری زیرزمینی استفاده می‌شود. هریک از این روش‌ها دستورالعمل‌های خاص خود را دارند که باید در حین اجرا رعایت شوند. روش‌های موجود در سه دسته‌ی کلی قرار می‌گیرند که شامل روش‌های با نگهداری، روش‌های بدون نگهداری^۲ و روش‌های تخریبی^۳ هستند. روش‌های بدون نگهداری که بیش‌ترین کاربرد را در معادن زیرزمینی دارند، به روش‌هایی گفته می‌شوند که در آنها کارگاه استخراج خود نگهدار است و نیازی به سیستم نگهداری مصنوعی ندارند. در حالت کلی این روش‌های استخراج در هر نوع کانساری (به جز کانساره‌های پلاسری) از طریق تغییر دادن نسبت اندازه فضای خالی به عرض پایه برای به انجام رساندن کار در عمر مطلوب پیش‌بینی شده معدن می‌تواند استفاده شود (هارتمن، ۱۹۸۷). در عمل روش‌های بدون نگهداری به طور عمومی قابل کاربرد نیستند و در کانساره‌های با کیفیت خوب و مقاوم مورد استفاده قرار می‌گیرند. روش‌های اتاق و پایه، کارگاه و پایه، انباره‌ای، استخراج از طبقات فرعی و روش VCR نمونه‌ای از این دسته روش‌ها هستند. معدن زیرزمینی رومرمر یکی از معادن سرب و روی منطقه ایرانکوه، متعلق به شرکت باماً^۴ است که در ترازهای مختلف با روش‌های بدون نگهداری از قبیل: کارگاه و پایه و استخراج از طبقات فرعی، استخراج می‌گردد. در این پایان‌نامه با استفاده از روش‌های مختلف تجربی و روش عددی تفاضل محدود، پایه‌های تاج و کارگاهی در کارگاه‌های استخراج معدن رومرمر به صورت توامان با بررسی پایداری سقف فضا‌های استخراجی، بررسی شده است.

۱-۲- بیان مساله

روش استخراج کارگاه و پایه و استخراج از طبقات فرعی کاربرد گسترده‌ای در استخراج کانساره‌های غیرفلزی و فلزی دارند و از معمول‌ترین روش‌های استخراج زیرزمینی کانساره‌های غیرزغالی هستند. این

^۱ Supported Methods

^۲ Unsupported Methods

^۳ Caving Methods

^۴ Bama

روش‌ها، روش‌های استخراج بدون نگهداری هستند. در روش استخراج کارگاه و پایه، فضاهای استخراجی با الگویی منظم یا غیرمنظم حفر می‌شوند و برای نگهداری سقف، قسمتی از ماده معدنی به صورت پایه باقی می‌ماند. در روش استخراج از طبقات فرعی نیز با بجا گذاشتن مقداری از مواد معدنی به‌عنوان پایه‌های تاج، نگهداری فضای کارگاه استخراج در زمان انجام عملیات و پس از خاتمه عملیات تامین می‌شود. در این روش‌های استخراج، دستیابی به سود بیشتر از طریق بازیابی هرچه بیشتر کانسنگ از مهم‌ترین اهداف اقتصادی معدنکاری است. از این رو، در طراحی روش‌های استخراج، مناسب است که با در نظر گرفتن شرایط فنی و تامین ایمنی، بتوان مقدار بیشتری از ماده معدنی را استخراج کرد. یکی از عوامل اصلی در طراحی معادن به روش کارگاه و پایه و استخراج از طبقات فرعی، طراحی صحیح ابعاد پایه‌ها است. طراحی صحیح و بهینه‌ی ابعاد پایه‌ها بر اقتصادی‌بودن طرح، حفظ ایمنی کارگاه‌ها و عملیات معدنکاری و بازیابی پایه‌ها اثرگذار است. بدیهی است که باقی‌گذارن بیش از اندازه‌ی ماده‌ی معدنی، اقتصادی‌بودن طرح معدنکاری را زیر سوال برده و استخراج بیش از اندازه‌ی آن نیز مشکلات نگهداری را در پی خواهد داشت. در این پایان‌نامه، هدف اصلی طراحی و تحلیل پایداری پایه‌های تاج در روش استخراج از طبقات فرعی و پایداری پایه‌های کناری و کارگاهی در روش استخراج کارگاه و پایه در معدن رومرمر از مجموعه معادن شرکت باما است.

۱-۳- ضرورت انجام تحقیق

پایداری کارگاه‌های استخراج اهمیت زیادی در معادن از لحاظ ایمنی و هزینه‌های معدنکاری دارد. ناپایداری در کارگاه‌های استخراج باعث اتلاف ماده معدنی، تخریب فضاهای داخلی، ایجاد ترسیق در ماده معدنی و از بین رفتن امنیت سرمایه‌گذاری خواهد شد. در روش‌های استخراج اتاق و پایه و طبقات فرعی با استخراج ماده معدنی و افزایش ابعاد کارگاه‌های استخراج در اطراف پایه‌های باقیمانده، بار وارد بر پایه افزایش می‌یابد و این افزایش بار تا زمان رسیدن پایه به مقاومت نهایی پیش می‌رود و ممکن است در نهایت منجر به شکست پایه شود. در این روش‌های استخراج، طراحی پایه‌های باقیمانده با توجه به مقاومت پایه، مقدار و چگونگی توزیع بار وارد بر پایه انجام می‌شود. ابعاد این پایه‌ها بستگی به شدت تنش‌های موثر در

منطقه، مقاومت پایه و عرض فضای استخراجی مجاور آن دارد. بار وارده بر پایه با روش‌های تحلیلی، تجربی، عددی و در بعضی مواقع با انجام آزمایش‌های برجا برآورد می‌شود. مشکل اصلی برای طراحی پایه، برآورد مقاومت پایه است. تاکنون روش‌های تحلیلی و تجربی زیادی برای برآورد مقاومت پایه ارائه شده است. اما این روش‌ها در عین سادگی معایبی دارند که موجب شده تمایل طراحان به استفاده از روش‌های عددی برای برآورد مقاومت پایه افزایش یابد. روش‌های عددی امکانات مناسبی را در اختیار طراح قرار می‌دهد که با استفاده از آن‌ها می‌توان شرایط مرزی مساله، خصوصیات رفتاری پایه و نیز کمر بالا و کمر پایین آن و چگونگی توزیع بار وارد بر پایه را در طراحی پایه منظور کرد. در این پایان‌نامه نیز از روش‌های عددی برای طراحی بهینه و تحلیل پایداری پایه‌ها استفاده خواهد شد. طراحی بهینه پایه در بهینه‌سازی عملیات معدنکاری مهم است و برای رسیدن به یک طرح ایمن و اقتصادی باید مطالعات دقیق رفتار سنگ و تحلیل پایداری فضای استخراجی انجام شود. در مبحث طراحی بهینه ابعاد پایه، هدف نهایی، تعیین کم‌ترین ابعاد پایه به نحوی است که ایمن بودن و اقتصادی بودن طرح را تامین کند.

۱-۴- روش تحقیق

به‌طور کلی طراحی پایه با توجه به مقدار و چگونگی توزیع بار وارد بر پایه و برآورد مقاومت پایه با کمک روش‌های تحلیلی، تجربی و عددی انجام می‌شود. در این تحقیق ابتدا بار وارد بر پایه و چگونگی توزیع آن برآورد می‌شود و از نظریه‌های مختلفی برای تنش وارد بر پایه‌ها استفاده می‌گردد. به منظور اعتبارسنجی و تعیین ابعاد بهینه پایه از روش‌های تجربی برای تعیین مقاومت و ابعاد پایه‌ها استفاده شده و سپس با توجه به محدودیت‌هایی که در روش‌های تجربی وجود دارد از طریق تحلیل عددی و نرم افزار $FLAC^{3D}$ که بر مبنای روش تفاضل محدود کار می‌کند، نسبت به طراحی و مدل‌سازی پایه‌ها با توجه به هندسه پایه‌های معدن اقدام می‌شود و بار وارد و ابعاد بهینه پایه‌ها تعیین می‌گردد. در نهایت، نتایج بدست آمده از روش تحلیل عددی و روش‌های تجربی با یکدیگر مقایسه شده و تصمیم‌گیری‌های لازم برای تعیین ابعاد بهینه پایه‌ها اتخاذ می‌گردد. روش‌های عددی با لحاظ کردن خواص ژئومکانیکی زمین، شرایط مرزی مساله مورد مطالعه و با داشتن قابلیت شبیه‌سازی هندسه‌های مختلف برخلاف روش‌های تحلیلی و تجربی منجر به

جواب‌های نزدیک به واقعیت می‌شود. با مدل‌سازی‌های عددی متعدد و تعیین یک یا چند مدل استاندارد که معرف ویژگی‌های نمونه واقعی است، این امر محقق خواهد شد.

بر این اساس ابتدا، مطالعات پایه در معدن شامل: گردآوری و جمع‌بندی اطلاعات پایه معدن و نیز برآورد پارامترهای ژئومکانیکی مورد نیاز و موثر انجام می‌شود. سپس با استفاده از روش‌های تجربی و عددی، طراحی پایه‌ها که شامل برآورد بار وارد بر پایه‌ها، برآورد مقاومت پایه، طراحی ابعاد مناسب پایه‌ها و تحلیل آن‌ها است، انجام می‌شود.

۱-۵- ساختار پایان‌نامه

همانطور که ذکر شد در فصل اول پایان‌نامه به کلیات موضوع به ویژه تعریف مساله، ضرورت انجام تحقیق و ابزار انجام آن پرداخته شده است. در فصل دوم به مبانی نظری پرداخته شده است. تحقیقاتی که محققین و دانشمندان در گذشته راجع به طراحی و تحلیل پایداری فضاها و زیرزمینی انجام داده‌اند به همراه نتایج آنها در این فصل گنجانده شده است.

در فصل سوم، اطلاعات پایه معدن شامل: شرایط عمومی منطقه معدنی، زمین‌شناسی عمومی و مهندسی، مطالعات آب‌شناسی، ویژگی‌های مکانیکی، فیزیکی کانسار و سنگ‌های درون‌گیر آن، میدان تنش و... گردآوری و جمع‌بندی شده است.

در فصل چهارم، به منظور طراحی و تحلیل دقیق تجربی و عددی، به برآورد پارامترهای ژئومکانیکی مورد نیاز و موثر پرداخته شده است.

فصل پنجم از این پایان‌نامه، اختصاص به طراحی تجربی پایه‌ها دارد. در این فصل با بکارگیری روش‌های مختلف تجربی از جمله، تئوری سطح تاثیر و نمودار پایداری، ابعاد مناسب پایه‌ها، بار وارد بر پایه‌ها و مقاومت پایه با ضریب ایمنی مناسب، طراحی و تعیین شده است.

در فصل ششم، ابتدا با طراحی و تحلیل استاتیکی، بر اساس روش‌های عددی، ابعاد مناسب پایه‌ها تعیین و در فصل هفتم نیز به جمع‌بندی موضوع، بیان نتایج و ارائه پیشنهادها پرداخته شده است.

فصل دوم

پیشینه مطالعات

۲-۱-مقدمه

طراحی بهینه پایه‌ها به خاطر نقش اساسی که در نگهداری و پایداری فضای زیرزمینی و دستیابی به اقتصادی بودن طرح دارد، یک موضوع حساس و حیاتی است. رفتار پایه‌ها پیچیده، و عواملی که بر پایه تاثیر می‌گذارند، پر تعداد هستند. بنابراین تا به حال راه حل دقیق برای طراحی پایه ارائه نشده است. اگر چه روش‌های موجود فهم ما را بهبود بخشیده‌اند، اما هر کدام از روش‌های طراحی موجود دارای محدودیت‌هایی هستند که باید در حین طراحی اعمال شوند. در گذشته، بیشتر برای طراحی و تحلیل پایداری پایه‌ها، استفاده از روش‌های تجربی، متداول بوده و خیلی کمتر به روش‌های سازه‌ای و مکانیک‌سنگی و روش‌های عددی در طراحی و تحلیل پایداری پایه‌ها پرداخته شده است. اکثراً به جای اینکه رفتار مکانیکی پایه تحلیل شود به استفاده از فرمول‌های تجربی مبتنی بر مطالعات آماری روی آورده شده است. با گذشت زمان و پیشرفت علم به مرور روش‌های جدید و کارآمدتری که پاسخگوی نیاز مساله باشد در حل مسایل این‌چنینی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. بدیهی است علاوه بر این، بررسی مطالعات انجام شده، نشان‌دهنده کاربرد روش‌های واگرا برای طراحی پایه است. به ویژه آن‌که روش‌های تجربی به صورت ذاتی در گروه روش‌های واگرا قرار می‌گیرند. با مطالعه کارهای صورت گرفته توسط محققین و دانشمندان در گذشته و استفاده از نتایج و تجربیات آنها می‌توان در حل راحت‌تر و دقیق‌تر مساله قدم برداشت.

۲-۲-هندسه‌ی پایه

طراحی پایه‌ها، از شکل آن‌ها اثرپذیر است. ارتباط بین شکل پایه و مقاومت آن توسط پژوهشگران زیادی مورد بحث قرار گرفته است. نتایج پژوهش‌های انجام شده در دانشکده معدن و زمین‌شناسی توزلا^۵ یوگسلاوی روی پایه‌های مربعی، مستطیلی و استوانه‌ای نشان داده است که مقاومت پایه‌ی استوانه‌ای ۱/۷ برابر پایه‌ی مکعبی و ۳/۳ برابر پایه‌ی مستطیلی شکل با سطح مقطع برابر است. از این‌رو، نتایج این پژوهش‌ها نشان داد که پایه‌های استوانه‌ای، بیشینه‌ی مقاومت را دارند (Jeremic, 1987).

⁵Tuzla

تأثیر هندسه‌ی پایه بر مقاومت آن در معادن زیرزمینی توسط سوچاکو^۶ مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، در معدن مس جزکازگانس^۷ چندین اتاق با پایه‌های استوانه‌ای، مکعبی و منشور متوازی‌السطوح با ارتفاع و سطح مقطع یکسان به ترتیب برابر با ۴ متر و ۱۶ متر مربع حفر شد. نتایج حاصل از این پژوهش، بیانگر این بود که ظرفیت باربری پایه‌های استوانه‌ای، کمی بیشتر از پایه‌های مکعبی و خیلی بیشتر از پایه‌های منشور متوازی‌السطوح با ابعاد ۱×۱۶ متر مربع است. همچنین با افزایش مساحت کل پایه، ظرفیت باربری پایه‌های استوانه‌ای و مکعبی افزایش بیشتری نسبت به پایه‌های مستطیلی می‌یابد (Jeremic, 1987).

هادسون^۸ و همکاران در سال ۱۹۷۲، منحنی کامل تنش - کرنش را برای شکل و اندازه‌های مختلف از نمونه‌های اخذ شده از سنگ مطالعه کردند. در انجام این آزمایش‌ها، نمونه‌های آزمایشگاهی با قطرهای ۲۰، ۵۰، ۱۰۰ میلی‌متر با نسبت ارتفاع به قطرهای ۱، ۱/۲، ۱/۳، ۲ و ۳ مورد استفاده قرار گرفت. نتایج حاصل از این آزمایش‌ها نشان داد که:

الف: نمونه‌هایی با نسبت ارتفاع به قطر یکسان اما با قطرهای مختلف، مقاومت یکسانی دارند. به عبارت دیگر مقاومت نمونه‌های با قطر ثابت و ارتفاع مختلف متفاوت است. بنابراین نسبت ارتفاع به قطر مختلف، تأثیر معنی‌دار و مهمی روی منحنی تنش - کرنش و ظرفیت باربری نمونه سنگ دارد.

ب: نمونه‌های با نسبت طول به قطر کوچکتر، مقاومت فشاری بالاتری دارند (Maybee, ۱۹۹۲).

واضح است که مقاومت پایه‌های استوانه‌ای بیشتر از مربعی و مستطیلی است و این امر توسط محققین مختلف به اثبات رسیده است. نکته‌ی قابل توجه، این است که در پژوهش‌های پیشین کمتر بر روی پایه‌های استوانه‌ای، تأثیر کاهش و افزایش قطر میانی و بالایی پایه در مقاومت آن و در نتیجه شکل بهینه‌ی پایه، مطالعه صورت گرفته است از جمله مواردی که در این زمینه تحقیق انجام داده‌اند می‌توان به مطالعات

⁶ Sevjakov

⁷ Djezkazgans

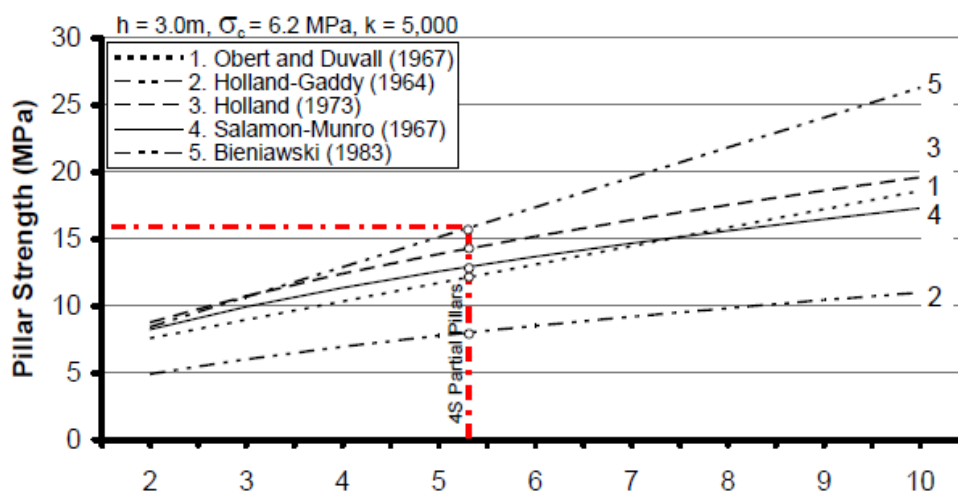
⁸ Hudson

جلالی^۹ و همکارانش در سال ۱۳۹۰ اشاره کرد. در این پژوهش، با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$ و انتخاب مدل کرنش نرمی برای رفتار پایه، شکل پایه‌های طراحی شده برای معدن کرومیت فاریاب بهبود داده شده و مناسب‌ترین پایه به شکل استوانه هذلولوی با قطر میانی $۶/۸$ متر و قطر بالایی و پایینی $۸/۸$ متر تعیین شده است.

۲-۳- نسبت عرض به ارتفاع پایه

روابط تجربی موجود برای محاسبه‌ی مقاومت انواع پایه‌های غیر زغالی توسط محققین مختلف بیانگر این است که با افزایش نسبت عرض به ارتفاع، مقاومت پایه افزایش می‌یابد.

شکل ۱-۲، مقایسه‌ای بین پنج روش تجربی رایج در اندازه‌گیری مقاومت پایه انجام داده است. این مقایسه نیز افزایش مقاومت پایه را به ازای افزایش نسبت عرض به ارتفاع، نشان می‌دهد.



شکل ۱-۲: رابطه بین مقاومت پایه با نسبت عرض به ارتفاع در روش‌های پایه رایج

نتایج مطالعات عددی نشان می‌دهد، هنگامی که بار اعمالی وارد بر پایه از مقاومت آن تجاوز کند، شکست در پایه حادث می‌شود. شکست پایه از لبه‌های آن آغاز شده و به سمت مرکز پایه پیشروی می‌کند. از این رو با کاهش عرض پایه با ثابت ماندن بار وارده بر پایه، تنش وارده بر پایه افزایش پیدا می‌کند. با افزایش بار وارد بر پایه، نقاطی از پایه که دچار تسلیم می‌شوند، به صورت نقاطی با تنش کمتر نسبت به

⁹ Jalali

سایر نقاط دیده می‌شوند (Mortazavi et al, 2008). از این اصل برای بیان شکست در پایه استفاده می‌شود. جلالی و همکاران با مطالعه بر روی پایه‌های معدن کرومیت فاریاب به منظور تعیین ابعاد بهینه پایه‌ها نتایج مشابهی را ارائه کردند. در این مطالعه با استفاده از مدلسازی عددی پایه‌هایی با نسبت‌های عرض به ارتفاع مختلف طراحی کردند. سپس مقادیر تنش‌های قائم و افقی وارد بر هر یک از پایه‌ها را استخراج کردند و نتیجه گرفتند که احتمال شکست پایه‌هایی با عرض بیشتر، کمتر از پایه‌هایی با عرض کمتر است. از طرفی مقادیر تنش‌های افقی وارد بر پایه به درستی تاثیر به‌سزای محصورکنندگی پایه‌های عریض در مقایسه پایه‌ها با عرض کمتر را در افزایش مقاومت نشان می‌دهد (جلالی و همکاران، ۱۳۹۱).

نتایج تحلیل عددی نشان داده است که با افزایش نسبت عرض به ارتفاع پایه، مقدار تنش افقی در بخش‌های میانی پایه افزایش می‌یابد و از این رو، مقاومت پایه افزایش خواهد یافت. این افزایش مقاومت در سنگ‌های سخت برای نسبت‌های کمتر از یک کندتر است. با وجود آن که بیشترین مقدار بار وارد بر پایه به قسمت میانی پایه وارد می‌شود، اما همواره شکست پایه از نقاط واقع بر لبه‌های پایه آغاز و توسعه می‌یابد. در نظر گرفتن مدل کرنش نرمی برای پایه‌ها با نسبت عرض به ارتفاع کوچک که خاصیت نرم شوندگی زیادی از خود نشان می‌دهند، باعث می‌شود که با مطالعه رفتار پایه بعد از نقطه حداکثر مقاومت بتوان به راحتی به نحوه شکست پایه پی برد. با مطالعه بر روی مدل‌های ساخته شده در این تحقیق مشخص شده است که در محدوده‌ای که ارتفاع کارگاه در حدود ۱۲ متر است عرض پایه ۸ متر مناسب برای طراحی پایه در معدن کرومیت فاریاب است. (جلالی و همکاران، ۱۳۹۱)

۲-۴- درزه‌داری

به علت عدم وجود مطالعات میدانی و آزمایشگاهی در مورد اثر درزه‌داری توده‌سنگ در مقاومت پایه‌ها تا به حال به غیر از روش تجربی یورک^{۱۰} و همکاران (York et al, 2000)، روش قابل قبول دیگری برای بررسی رفتار پایه‌های درزه‌دار ارائه نشده است. شعبانی^{۱۱} و همکاران در سال ۱۳۸۴ برای بررسی رفتار

¹⁰ York

¹¹Shabani

پایه‌هایی با توده‌سنگ درزه‌دار، با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدود $FLAC^{2D}$ مطالعاتی را انجام دادند و به این نتیجه رسیدند که مقاومت پایه‌ها نسبت به زاویه شیب‌داری درزه‌ها ناهمسان است. زاویه شیب‌داری درزه‌ای که پایه با نسبت عرض به ارتفاع ۱، ۲ و ۳ به ازای آن کمترین مقاومت را دارد به ترتیب ۴۵، ۳۵ و ۳۰ درجه است. با افزایش نسبت عرض به ارتفاع پایه زاویه شیب‌داری درزه که پایه به ازای آن کمترین مقاومت را دارد، کاهش می‌یابد. در حالت کلی با افزایش مقاومت برشی درزه‌ها و افزایش نسبت عرض به ارتفاع پایه‌ها از تاثیر درزه‌داری توده‌سنگ در مقاومت پایه‌ها کاسته می‌شود. (شعبانی و همکاران، ۱۳۸۴)

۲-۵- مقاومت ذاتی سنگ

مرتضوی^{۱۲} و همکاران در سال ۱۳۸۵ مطالعاتی را بر روی مقاومت پایه‌های سنگی در سه گروه سنگ ضعیف، متوسط و سخت با استفاده از مدلسازی عددی و پارامترهای تغییر یافته معیار هوک و براون انجام دادند. نتایج تحلیل عددی نشان داد که استفاده از پارامترهای شکننده هوک و براون در پایه‌هایی از جنس سنگ‌های سخت برای نسبت عرض به ارتفاع کوچک‌تر و یا مساوی ۲، جواب قابل قبولی را ارائه می‌کند. هم‌چنین در پایه‌هایی از جنس سنگ‌های ضعیف تا متوسط با نسبت عرض به ارتفاع کمتر از ۲/۵، استفاده از پارامترهای دست خورده هوک و براون در تحلیل‌های عددی جواب‌های قابل قبولی را به دست می‌دهد. پوش مقاومت حاصل از تحلیل عددی در هر سه نوع سنگ تقریباً در محدوده نسبت عرض به ارتفاع بیشتر از ۲/۵، مقدار بیشتری را نسبت به فرمول‌های تجربی نشان می‌دهند. اکثر فرمول‌های تجربی محدود به مقادیری از نسبت عرض به ارتفاع می‌شوند که بعد از آن افزایش مقدار نسبت عرض به ارتفاع باعث افزایش مقاومت پایه نمی‌شود بلکه مقاومت پایه ثابت باقی می‌ماند ولی با توجه به نتایج حاصل از تحلیل عددی با افزایش نسبت عرض به ارتفاع مقاومت پایه افزایش می‌یابد و بعد از نسبت خاصی از عرض به ارتفاع پایه (وابسته به مقاومت توده سنگ پایه است) این افزایش روند صعودی‌تری به خود می‌گیرد.

بدیهی است کاربرد روش‌های تجربی برآورد مقاومت پایه فقط در محدوده‌هایی میسر است که داده

تجربی کافی برای اطمینان از صحت نتایج وجود داشته باشد.

¹² Mortazavi

۲-۶- شیب لایه‌ها

تاکنون بیشتر مطالعات انجام شده در مورد مدلسازی عددی پایه‌ها در لایه‌های افقی بوده است و مطالعات کمتری بر روی مدلسازی عددی پایه در لایه‌های شیب‌دار انجام شده است. با این حال از تحقیقاتی که به نحوی در ارتباط با لایه‌های شیب‌دار است می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: دباغ^{۱۳} و همکاران با استفاده از روش ناپیوستگی جابه‌جایی مرتبه بالا و روش تفاضل محدود به بررسی میزان نشست زمین و کرنش‌های متناظر در اثر استخراج لایه‌های شیب‌دار به روش جبهه‌کار بلند پرداخته‌اند. در تحقیق مذکور تنش وارد بر پایه‌ها بررسی نشده است (Dabagh et al., 2009). ایکسیو^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۴) به تحلیل پایداری پایه‌های زغالی در لایه‌های شیب‌دار که به منظور جلوگیری از نفوذ آب به داخل کارگاه استخراج برجای گذاشته می‌شوند با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی پرداخته‌اند. بررسی‌های آن‌ها نشان داده است که روش تجربی ستون آب ارایه شده برای طراحی پایه‌های مذکور هم‌خوانی خوبی با روش‌های عددی دارد (Xu et al., 2014). ژون دی^{۱۵} و همکاران (۲۰۱۴) به مدلسازی عددی ابعاد بهینه پایه برجای گذاشته شده در لایه زغال سنگ با شیب ۱۷ درجه پرداخته‌اند. نتایج بررسی‌های انجام شده توسط ژون دی و همکاران بر روی ۶ مدل عددی بر روی پایه‌هایی با عرض ۳ تا ۱۰ متر نشان داده است که با افزایش عرض پایه احتمال شکست پایه کاهش می‌یابد و شکست پایه در پایه‌هایی با عرض ۳ متر بیشتر از سایرین است. نتایج بررسی‌های وی نشان داده است که پایه با عرض ۵ متر برای طراحی مناسب است (Jun De et al., 2014).

نجفی و همکاران در سال ۱۳۹۴ با هدف بررسی پایداری پایه‌های زغالی در شیب‌های مختلف (شیب لایه متغیر، عرض پایه متغیر) تحقیقاتی را انجام دادند و به نتایج زیر دست یافتند:

- با افزایش شیب لایه، افزایش عرض پایه نمی‌تواند پایداری مناسب‌تری را ایفا نماید. این در حالی است که در شیب‌های کمتر با افزایش عرض پایه می‌توان از ناپایداری پایه جلوگیری نمود.
- پایه در لایه‌های شیب‌دار تحت اثر تنش‌های برشی قرار دارد. افزایش عرض پایه سبب می‌شود که از

¹³ Dabagh

¹⁴ Xu

¹⁵ Jun De

اثر شیب لایه بر افزایش میزان تنش‌های برشی جلوگیری شود. تنش برشی در پایه بیشتر به گوشه‌های پایه وارد می‌شود و اثر چندانی بر نقاط مرکزی پایه ندارد.

- با افزایش عرض پایه می‌توان از اثر شیب لایه بر کاهش مقاومت پایه جلوگیری نمود.

در سال ۱۳۹۲، تحلیل پایداری کارگاه استخراج اتاق و پایه در معدن سنگ مرمریت دهبید توسط غلام‌نژاد و پوزش مورد بررسی قرار گرفت. به منظور تحلیل پایداری کارگاه استخراج، نرم افزار تحلیل عددی *Phase2* بکار برده شد و با توجه به مشخصات فیزیکی و مکانیکی سنگ دهبید، که با نمونه‌گیری، تست‌های آزمایشگاهی و برداشت‌های صحرایی به دست آمد، ابعاد بهینه‌ی اتاق‌های استخراجی $۱۳/۵ * ۱۵$ متر، ابعاد بهینه‌ی پایه‌ها $۱۳/۵ * ۱۵$ متر، ارتفاع کارگاه استخراجی ۱۴ متر و حداقل فاکتور ایمنی برای پایه‌های طراحی شده $۱/۵۷$ و برای سقف کارگاه $۲/۳۵$ تعیین شد.

در سال ۱۳۹۳، تحلیل پایداری کارگاه‌های استخراج زیرزمینی معدن سرب و روی انگوران با ابعاد مختلف و با استفاده از روش نمودار پایداری توسط محمود زنگویی مورد بررسی قرار گرفت. با استفاده از نمودار پایداری، احتمال شکست در کارگاه‌های استخراج با ارتفاع و عرض‌های متفاوت به دست آمد. در نهایت کارگاه‌های با ارتفاع ۱۰ و عرض ۷ متر برای طبقات فرعی معدن سرب و روی انگوران انتخاب شدند.

در سال ۱۳۸۳، مجید نوریان بیدگلی و غلامرضا شمسی، تحلیل پایداری پایه‌ی تاج بین کارگاه‌های استخراج معدن کوشک را توسط نرم افزار *FLAC* مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق ملاک تعیین ضخامت بهینه‌ی پایه‌ی تاج علاوه بر مسایل اقتصادی، میزان جابه‌جایی کم در مدل و فاکتور ایمنی مناسب بوده که با این شرایط در نهایت بهینه‌ترین میزان پایه در تحلیل عددی برابر با ۷ متر تعیین شده است. در این حالت فاکتور ایمنی برای مدل عددی بین ۱۰-۸ می‌باشد که مقداری مناسب برای پایداری یک فضای زیرزمینی است. مسلماً افزایش یا کاهش این میزان ضخامت به ترتیب باعث غیراقتصادی شدن طرح و عدم پایداری مطلوب برای پایه خواهد شد

فصل سوم

معرفی معدن کارگاه و پایه

رومر

طراحی و تحلیل پایداری یک فضای زیرزمینی به روش‌های مختلف از جمله تجربی و عددی صورت می‌گیرد. در هر کدام از این روش‌ها به یکسری داده‌ها و اطلاعات به منظور طراحی و تحلیل پایداری فضای زیرزمینی نیاز است.

پیش از گردآوری داده‌ها باید طرح مشخص برای این کاردر نظر گرفت. پاسخ به سوالات زیر می‌تواند راه گشا باشد.

* داده‌ها چگونه توصیف و تفسیر می‌شوند؟

* چه مقدار هزینه برای گردآوری داده‌ها و تفسیر آنها لازم است؟

* داده‌ها چگونه گزارش می‌شوند؟

به هر حال موضوع حایز اهمیت در طراحی و تحلیل فضاهای زیرزمینی جمع‌آوری و دسته‌بندی داده‌ها و دسترسی به یکسری اطلاعات مهم از فضا و منطقه مورد نظر است. برای رسیدن به نتیجه مطلوب و نزدیک به واقعیت، صحت و دقت این داده‌ها و آگاهی از ویژگی‌ها و شرایط مختلف منطقه اهمیت پیدا می‌کند. توجه به این مقوله در ابتدای کار به منظور رسیدن به هدف اصلی از اهمیت بالایی برخوردار است. انجام این مرحله از کار مستلزم شناخت نیازها و هدف پروژه است. انجام مطالعات پایه و ارزیابی درست از اطلاعات باید در مسیری پیش رود که نیازهای پروژه را در مراحل بعدی پروژه برآورده کند و همچنین در شرایط متفاوتی از تعریف مساله این داده‌ها و اطلاعات تا حدودی پاسخگوی نیاز مساله باشد. توجه به هزینه، زمان و هدف مساله، اهمیت و اولویت بندی اطلاعات و داده‌ها را مشخص می‌کند. به طور کلی اطلاعاتی که مورد نیاز است شامل اطلاعات عمومی منطقه، داده‌های مربوط به پارامترهای مهم ژئومکانیکی، اکتشافی، اطلاعات مربوط به زمین‌شناسی، بررسی ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی و شرایط تنش منطقه و غیره است. داده‌ها و اطلاعات مربوط به هر مرحله از این مطالعات باید به نحوی کیفی و کمی سازی شوند که به منظور استفاده در مراحل بعدی پروژه به طور دقیق و آسان در دسترس قرار گیرند و بتوان برای پاسخگویی به نیازهای طرح و حل مساله از آنها استفاده نمود. بسته به این که طراحی دارای چه میزان اهمیت باشد،

میزان حجم اطلاعات و داده‌هایی که در هر بخش جمع‌آوری می‌شود را می‌توان تعیین کرد. فازهای مختلف طرح هر کدام نیازمند اطلاعات جداگانه و بعضاً مرتبط با هم هستند که شناخت روی بخش‌های مختلف طرح و پروژه می‌تواند کار را در جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات، آسان‌تر کند. به طور مثال، در تحلیل پایداری یک فضای زیرزمینی به روش‌های تجربی و عددی، دسترسی به یکسری از داده‌ها از جمله پارامترهای مربوط به ویژگی‌های ژئومکانیکی و هندسی فضای مورد نظر بسیار حایز اهمیت است. طبیعتاً شناخت روی این موضوع نیز می‌تواند در جمع‌آوری داده‌ها و اطلاعات موثر باشد.

۳-۲- شرایط عمومی منطقه معدنی

منطقه ایرانکوه در فاصله‌ی ۲۱ کیلومتری جنوب‌غربی اصفهان بین طول جغرافیایی "۱۲° ۳۳' ۵۱" تا "۵۰° ۴۵' ۵۱" و عرض جغرافیایی "۰۹° ۳۴' ۳۳" تا "۰۸° ۲۵' ۳۲" قرار دارد. مجتمع ایرانکوه متعلق به شرکت باما (سهامی خاص) در رشته‌کوه ایرانکوه واقع شده است. در این رشته‌کوه تعداد زیادی کانسارهای سرب و روی وجود دارد. حداقل ارتفاع محدوده از سطح دریا حدود ۱۷۳۰ متر و حداکثر آن ۲۳۵۱ متر است. آب و هوای منطقه معتدل و میزان بارندگی به طور متوسط ۱۰۰ میلی‌متر در سال گزارش شده است. از نظر اقلیمی در همه‌ی فصول سال می‌توان در معدن فعالیت نمود. طی مدت فعالیت شرکت باما کانسارهای بزرگ و کوچک سرب و روی مانند کانسار کلاه‌دروازه، گوشفیل، تپه‌سرخ، رومرمر، گودزدان، گردنه و خانه‌گرگی شناسایی شده و بعضاً مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند (مهجرانی، ۱۳۹۴).

۳-۳- موقعیت معدن رومرمر

منطقه‌ی رومرمر در جنوب غرب معدن گوشفیل و جنوب شرق معدن تپه‌سرخ و در ارتفاعات منطقه معدنی قرار دارد. محدوده قرارگیری معدن رومرمر به همراه راه‌های دسترسی به این معدن در شکل ۱-۳، نشان داده شده است.



شکل ۱-۳: محدوده معدن رومرمر

۳-۴- زمین‌شناسی عمومی و مهندسی

کمربند معدنی ملایر - اصفهان که به عنوان یکی از گستره‌های معدنی سرب و روی ایران معرفی شده است، جزئی از پهنه سنندج - سیرجان محسوب می‌شود که دربرگیرنده بخش‌های عمده‌ای از استان‌های مرکزی، اصفهان و همدان است. این پهنه از نظر سرگذشت زمین‌شناسی، وضعیت رسوب‌گذاری و ساختاری شبیه پهنه ایران مرکزی است. منطقه‌ی ایرانکوه در جنوب شهر اصفهان واقع شده است که سنگ‌های آهکی-دولومیتی دوره کرتاسه زیرین بیش‌ترین رخنمون را در آن دارد (Momenzadeh M, 1976, Stocklin J, 1968).

نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه با مقیاس ۱:۲۰۰۰ تهیه و مشخص شده که رگه‌ی کانی‌سازی در معدن تپه‌سرخ به طرف شرق ادامه داشته و به تدریج به ارتفاعات رفته و وارد دولومیت‌های منطقه رومرمر شده است (مهاجرانی، ۱۳۹۴).

سنگ‌های اصلی این رشته‌کوه که شامل سنگ‌های کربناته مربوط به کرتاسه است به صورت دگر شیبی بر روی شیل‌های ژوراسیک زیرین قرار گرفته است. این رسوبات از نظر سنی مربوط به بارمین تا آلبین زیرین است. ضخامت این رسوبات در حدود ۸۰۰ متر می‌باشد که به طور کلی از آهک و دولومیت همراه با مقدار کمی شیل و مارن تشکیل شده است (مهاجرانی، ۱۳۹۴).

امتداد لایه‌های رسوبی در منطقه عموماً دارای جهت غرب - شمال غرب بوده و شیب عمومی آنها به سمت جنوب‌غربی است. شیب لایه‌ها از بسیار کم شیب تا حالت قائم تغییر می‌کند در مناطق مقاوم، ساختمان اصلی خود را با شکستگی‌ها، گسل‌ها و درزه‌ها نشان می‌دهد و پدیده‌ی هورست و گرابن و گسل خوردگی بلوکی در حاشیه‌ی ایران مرکزی نقش مهمی را در کنترل رسوب برجایا کرده است (مهاجرانی، ۱۳۹۴).

۳-۵- سنگ درون‌گیر

منطقه رومرمر پوشیده شده از سنگ دولومیت و پرشدگی‌هایی از جنس آهن - منیزیم، باریت، مواد - آلی،

پیریت، کلسیت، اسفالریت، گالن و کوارتز است که این روند تا تراز حدود ۱۴۷۰ ادامه دارد. نکته‌ی قابل توجه عدم وجود سنگ درون‌گیر دیگر به غیر از دولومیت در منطقه است.

۳-۶- مشخصات هندسی کانسار

شکل هندسی کانسار رومرمر به صورت رگه‌ای با گسترش زیاد است. این کانسار که شامل رگه‌های V1 تا V5 است، با ضخامت‌های مختلف روی یکدیگر قرار گرفته است. رگه‌ی V1 نسبتاً پر شیب ولی سایر رگه‌ها با زاویه شیب حدود ۳۵ درجه قرار گرفته‌اند.

۳-۷- مشخصات عیاری کانسار

کانی‌های اصلی تشکیل دهنده کانسار رومرمر، سرب و روی هستند. بررسی لاگ گمانه‌های محدوده رومرمر تغییرات عیاری زیادی را نشان می‌دهد. بیشینه و متوسط عیار برای ماده معدنی سرب، به ترتیب ۴۸ و ۳۲٪ درصد و برای ماده معدنی روی به ترتیب ۳۳ و ۵۵٪ درصد است.

۳-۸- درزه‌داری منطقه

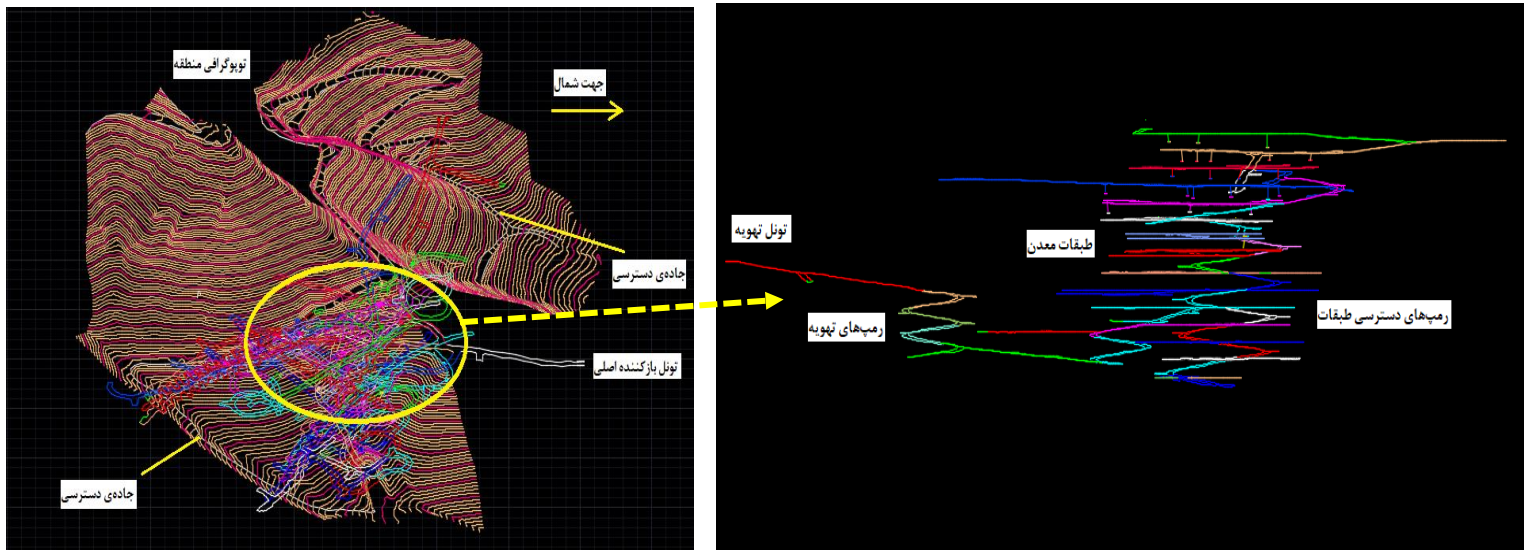
برداشت درزه‌های تونل‌های معدن رومرمر از ورودی تراز ۱۷۰۰ در سطح زمین تا اعماق پایین‌تر با فواصل تقریباً ۲۱ متری و به تعداد کلی ۴۵ ایستگاه انجام شده است. اطلاعات مربوط به دسته درزه‌های منطقه رومرمر در جدول ۳-۱، ارایه شده است.

جدول ۳-۱: اطلاعات شیب، جهت شیب و فاصله‌داری محاسبه شده برای دسته درزه‌های معدن رومرمر

| شماره دسته درزه | فاصله داری (متر) | شیب (درجه) | جهت شیب |
|-----------------|------------------|------------|---------|
| ۱ | ۰/۲ | ۷۵ | ۲۹۷ |
| ۲ | ۰/۲ | ۸۰ | ۲۱۲ |
| ۳ | ۰/۲ | ۴۵ | ۲۸ |
| ۴ | ۰/۲ | ۶۶ | ۳۳۷ |

۳-۹- سامانه‌های بازکننده معدن رومرمر

این معدن از قسمت شمالی در تراز ۱۷۱۰ متر به وسیله‌ی تونل افقی باز شده است. دسترسی به ترازهای مختلف معدن توسط رمپ انجام می‌شود. اختلاف ارتفاع کف به کف ترازها ۱۰ متر و دسترسی به ماده معدنی توسط تونل‌های دنبال رگه و عمود بر امتداد رگه انجام شده و تحت عملیات آماده‌سازی قرار می‌گیرند. در شکل ۲-۳، نقشه توپوگرافی منطقه رومرمر، تونل بازکننده و رمپ‌های دسترسی به طبقات مختلف معدن ارایه شده است. در بخش غربی از دهانه ورودی تونل در تراز ۱۶۱۵ متر رمپ تهویه قرار گرفته است این رمپ تا تراز ۱۶۵۵ بالا رفته و در غربی‌ترین قسمت معدن از طریق یک تونل به محدوده تپه سرخ یک در تراز ۱۶۷۰ متر منتهی می‌شود. این رمپ در حال حاضر فقط به منظور تهویه هوای معدن استفاده می‌شود ولی ممکن است در آینده کاربری متفاوت دیگری نیز داشته باشد.



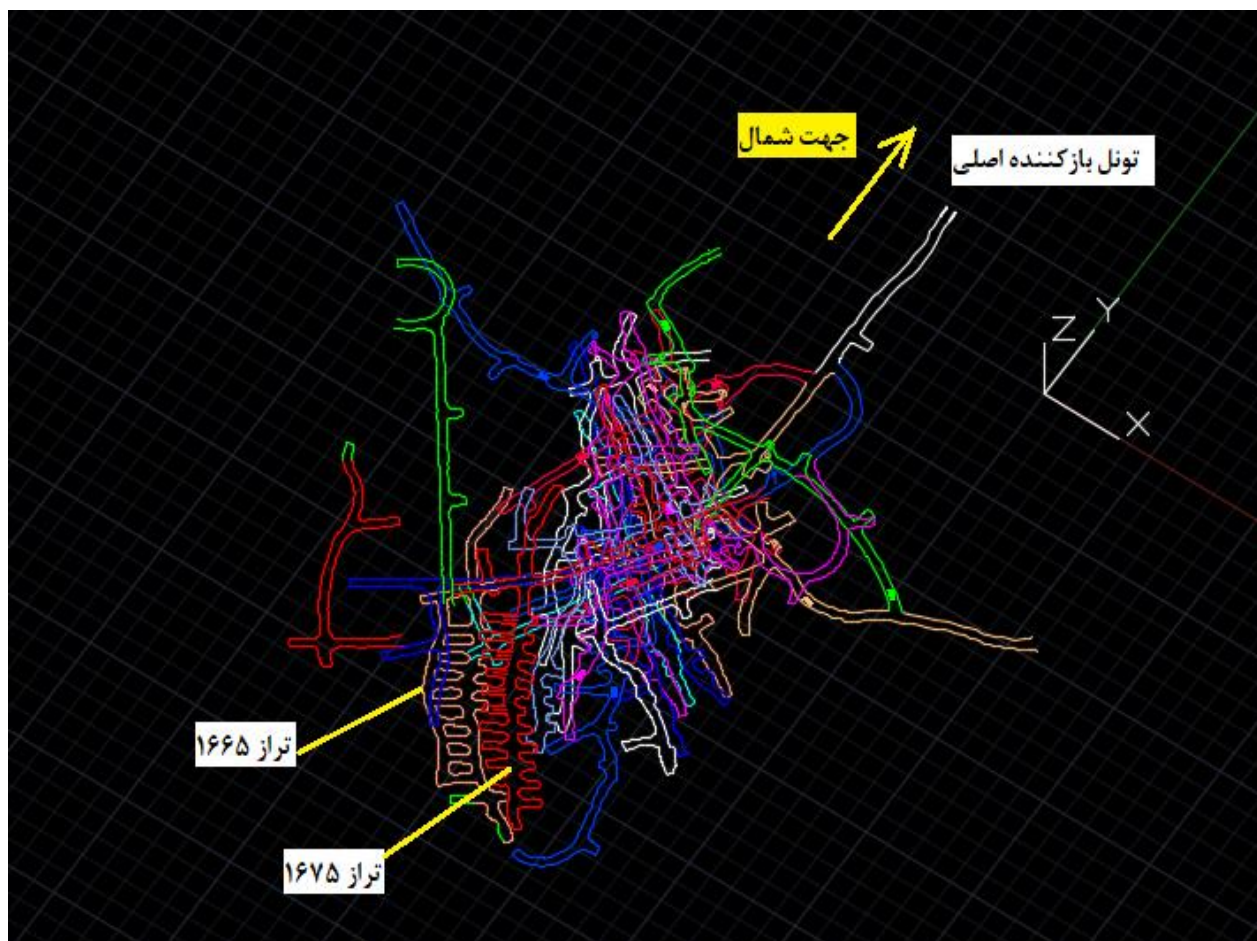
شکل ۲-۳: نقشه توپوگرافی منطقه، تونل‌ها و رمپ‌های بازکننده در معدن رومرمر

۳-۱۰- شبکه‌های آماده سازی در معدن رومرمر

پس از دسترسی به کانسار توسط تونل‌های بازکننده و رمپ‌ها که ترازهای مختلف معدن را به یکدیگر متصل می‌کند، آماده‌سازی برای استخراج رگه‌ها در ترازهای مختلف توسط حفر تونل‌های دنباله رگه انجام می‌شوند. به منظور آماده‌سازی در تراز ۱۶۶۵ متر علاوه بر حفر تونل‌های دنباله رگه، تونل‌ها و دستک‌های عمود بر امتداد رگه نیز حفر شده است. نحوه آماده‌سازی در طبقات معدن در جدول ۳-۲، ارایه شده است. همچنین در شکل ۳-۳، نحوه آماده‌سازی‌های صورت گرفته و حفاریات دنباله رگه و عمود بر امتداد رگه نشان داده شده است.

جدول ۳-۲: نحوه آماده‌سازی در طبقات مختلف معدن

| آماده‌سازی | تراز طبقه |
|------------------------------------|-----------|
| تونل دنباله رگه | ۱۷۴۵ |
| تونل دنباله رگه | ۱۷۳۵ |
| تونل دنباله رگه | ۱۷۲۵ |
| تونل دنباله رگه | ۱۷۱۵ |
| تونل دنباله رگه | ۱۷۰۵ |
| تونل دنباله رگه | ۱۶۹۵ |
| تونل دنباله رگه | ۱۶۸۵ |
| تونل دنباله رگه | ۱۶۷۵ |
| تونل دنباله رگه + تونل عمود بر رگه | ۱۶۶۵ |
| تونل دنباله رگه | ۱۶۵۵ |
| تونل دنباله رگه | ۱۶۴۵ |
| تونل دنباله رگه | ۱۶۳۵ |
| تونل دنباله رگه | ۱۶۲۵ |



شکل ۳-۳: نقشه حفریات آماده‌سازی در طبقات مختلف معدن

۳-۱۱- روش‌های استخراج فعلی معدن

معدن رومرمر در حال حاضر برای سه رگه ۷۱، ۷۴ و ۷۴+ عملیات استخراج انجام می‌شود. رگه ۷۱ به ضخامت تقریبی ۱/۵ تا ۲ متر و شیب تقریبی ۶۵ درجه، رگه ۷۴ به ضخامت تقریبی ۵ تا ۸ متر و شیب تقریبی ۴۰ درجه، به ترتیب با روش‌های استخراج از طبقات فرعی و روش کارگاه و پایه شیب‌دار در حال استخراج می‌باشند. استخراج تونل‌های پیشروی رگه ۷۱ به اتمام رسیده و استخراج سقف‌ها در قسمت شرقی معدن با استفاده از روش استخراج از طبقات فرعی در حال اجراست و تونل‌های پیشروی رگه ۷۴ در برخی از ترازها به اتمام رسیده و در برخی دیگر در حال استخراج است. در تراز ۱۶۶۵ رگه‌های ۷۴ و ۷۴+ در مجاورت یکدیگر قرار گرفته‌اند. در حال حاضر عملیات استخراج به روش کارگاه و پایه در این تراز در حال انجام است. در شکل ۳-۴،

تونل و کارگاه‌های حفر شده و پایه‌های باقی‌مانده پس از استخراج در این تراز ارایه شده است.



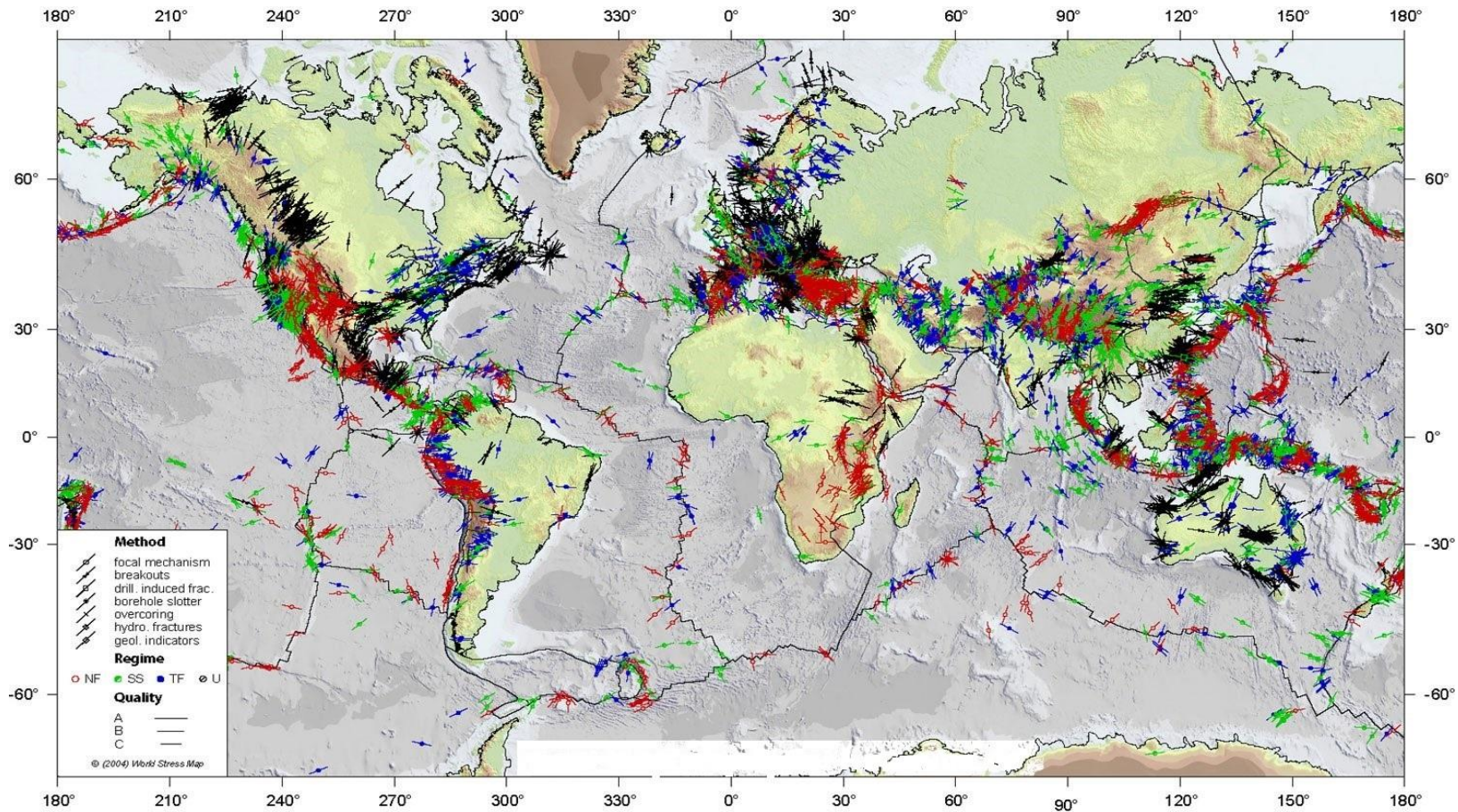
شکل ۳-۴: تصویری از حفاری‌های در امتداد و عمود بر امتداد رگه در تراز ۱۶۶۵

۱۲-۳- بررسی میدان تنش برجا

شناخت شرایط تکتونیکی و میدان تنش منطقه در طراحی و تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی از اهمیت بالایی برخوردار است عدم شناخت کافی از میزان و جهت میدان تنش‌های منطقه و نادیده گرفتن این پارامتر در طراحی، اختلاف فاحشی بین نتایج بدست آمده و آنچه در واقعیت رخ می‌دهد، ایجاد می‌کند.

در این شرایط، ممکن است پایداری فضای زیرزمینی به خطر افتاده و خسارات جبران‌ناپذیری به وجود آید. با بررسی‌های صورت گرفته بر روی میدان تنش افقی در منطقه عمومی معادن شرکت باما می‌توان به طور توصیفی شرایط تکتونیکی را تحلیل نمود. در این منطقه انتظار می‌رود امتداد تنش افقی بزرگ‌تر در راستای عمود بر امتداد عمومی بلندی‌های منطقه باشد. با توجه به بررسی‌های گذشته و مطالعات صورت گرفته در مورد محدوده‌ی معدن تپه سرخ ۳ مشخص شده است، امتداد تنش افقی بزرگ‌تر در راستای تقریبی شمالی-جنوبی و امتداد تنش افقی کوچک‌تر در راستای تقریبی شرقی-غربی است. با توجه به همجواری محدوده معدن رومرمر و معدن تپه سرخ، انتظار می‌رود از لحاظ وضعیت میدان تنش‌های برجا تفاوت چندانی در جهت‌های تنش افقی بزرگ‌تر و تنش افقی کوچک‌تر وجود نداشته باشد. از سوی دیگر در منطقه مورد نظر و در نزدیکی سطح زمین باید نسبت تنش افقی به قائم بیش (خیلی بیشتر) از یک باشد، بنابراین پیش‌بینی می‌شود مقدار تنش افقی بزرگ‌تر در محدوده عمومی معدن، قابل توجه باشد. چنین تنش افقی در منطقه با راستای شمالی-جنوبی می‌تواند در سنگ‌های نزدیک به سطح زمین پیش‌تنیدگی نسبی قابل ملاحظه‌ای ایجاد نماید.

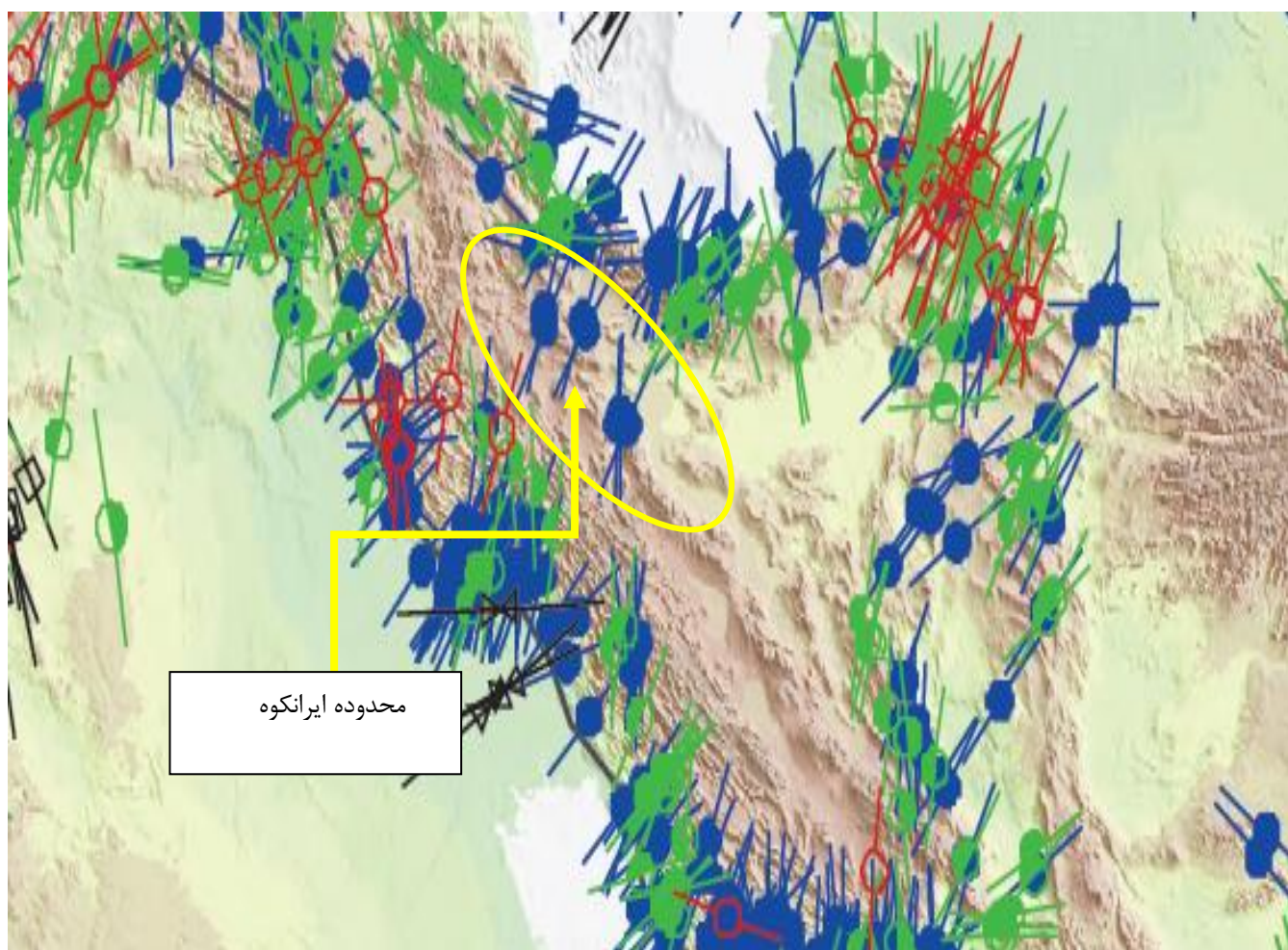
در شکل ۳-۵، نقشه جهانی تنش و شرایط میدان تنش و گسل‌ها نشان داده شده است. در این نقشه، NF بیانگر شرایط گسل نرمال است که با رنگ قرمز، SS بیانگر گسل امتداد لغز است که با رنگ سبز نیمه پر و TF بیانگر گسل رانشی است که با رنگ آبی تو پر نمایش داده شده است.



شکل ۳-۵: نقشه جهانی تنش

با توجه به شکل ۳-۶ که نقشه جهانی تنش در محدوده ایران را نشان می‌دهد، منطقه معادن ایرانکوه و پهنه سنج - سیرجان دارای گسل‌های نرمال و میدان تنش‌هایی در امتداد شمال شرق - جنوب غرب می‌باشد.

از نظر تکتونیکی منطقه‌ی اصفهان و رشته‌کوه ایرانکوه را می‌توان جزو منطقه‌ی تکتونیکی غرب ایران مرکزی که به نام منطقه‌ی تکتونیک اسفندقه - مریوان نامیده می‌شود، دانست. این واحد تکتونیکی در بین دو واحد قرار گرفته و نسبت به بقیه‌ی قسمت‌های ایران مرکزی، «مناطق تکتونیکی ایران مرکزی» و «زاگرس» از لحاظ تکتونیکی فعال‌تر است.



شکل ۳-۶: شرایط میدان تنش در ایران و منطقه ایرانکوه

۳-۱۳- جمع‌بندی

به منظور طراحی و تحلیل پایداری معدن رومرمر، نیاز به یکسری اطلاعات مهم از منطقه مورد نظر است که در این فصل گزارش، جمع‌آوری و دسته‌بندی داده‌ها ارائه شده است.

معدن رومرمر از قسمت شمالی در تراز ۱۷۱۰ متر به وسیله‌ی تونل افقی باز شده و دسترسی به ترازهای مختلف معدن، توسط رمپ انجام می‌شود. اختلاف ارتفاع کف به کف ترازها ۱۰ متر و دسترسی به ماده‌معدنی توسط تونل‌های دنبال رگه و عمود بر امتداد رگه انجام شده و تحت عملیات آماده‌سازی قرار می‌گیرند. سنگ درون‌گیر منطقه رومرمر، دولومیت و شکل هندسی کانسار رومرمر به صورت رگه‌ای با گسترش زیاد است که شامل رگه‌های ۷۱ تا ۷۵، با ضخامت‌های مختلف است. معدن رومرمر در حال حاضر برای سه رگه ۷۱، ۷۴ و ۷۴+ عملیات استخراج انجام می‌شود. رگه ۷۱ به ضخامت تقریبی ۱/۵ تا ۲ متر و شیب تقریبی ۶۵ درجه، رگه ۷۴ به ضخامت تقریبی ۵ تا ۸ متر و شیب تقریبی ۴۰ درجه، به ترتیب با روش‌های استخراج از طبقات فرعی و روش کارگاه و پایه شیب‌دار در حال استخراج هستند.

با توجه به بررسی‌های گذشته و مطالعات صورت گرفته در مورد محدوده‌ی معادن رومرمر از جمله تپه سرخ ۳ مشخص شده است، امتداد تنش افقی بزرگتر در راستای تقریبی شمالی-جنوبی و امتداد تنش افقی کوچکتر در راستای تقریبی شرقی-غربی است. با توجه به همجواری محدوده معدن رومرمر و معدن تپه سرخ، انتظار می‌رود از لحاظ وضعیت میدان تنش‌های برجا تفاوت چندانی در جهت‌های تنش افقی بزرگتر و تنش افقی کوچکتر وجود نداشته باشد.

فصل چهارم

برآورد ویژگی‌های

ژئومکانیکی

فهم درست از مقاومت و پایداری توده‌سنگ برای دستیابی به طراحی‌های ایمن و اقتصادی سازه‌های سنگی بسیار ضروری است. مقاومت و پایداری توده‌سنگ به عوامل مختلفی وابسته است که از آن جمله می‌توان به جنس توده‌سنگ، شبکه هندسی ناپیوستگی‌ها، ویژگی‌های مقاومتی ناپیوستگی‌ها، ویژگی‌های مکانیکی سنگ سالم، میدان تنش برجا و شرایط آب‌های زیرزمینی اشاره نمود. در بسیاری از کاربردهای مهندسی سنگ، ناپیوستگی‌ها عامل بحرانی در تعیین رفتار توده‌سنگ هستند (نوروزی، ۱۳۹۳).

شبکه ناپیوستگی‌های توده‌سنگ و ویژگی‌های هندسی آن از مهم‌ترین عوامل تاثیرگذار بر رفتار مقاومتی توده‌سنگ به حساب می‌آیند.

صفحات گسل، صفحات درزه، رسوبات ناپیوسته، صفحات لایه‌بندی، صفحات شکست، کلیواژ، صفحات شیب‌توزیته و سایر موارد همگی حالت‌های ویژه‌ای از ناپیوستگی‌ها هستند.

اهمیت خصوصیات هندسی درزه‌ها در برآورد پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ از سال‌ها پیش در میان محققان شناخته شده است. از مهم‌ترین خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها که تاثیر بسزایی در پایداری توده سنگ دارند، می‌توان به جهت‌داری^۱ (شیب و جهت شیب)، فاصله‌داری^۲، بازشدگی، پرشدگی و اندازه (پایایی^۳) آن اشاره نمود. پل‌های سنگی^۴ که در بین درزه‌های ناپایا واقع شده‌اند، اساساً باعث افزایش مقاومت می‌شوند. در توده‌سنگ‌هایی که در آن ناپیوستگی‌ها متقاطع نیستند و یا بلوک‌های مشخص را تشکیل نمی‌دهند، مقاومت پل‌های سنگی بین ناپیوستگی‌ها، تاثیر زیادی بر پایداری توده‌سنگ دارد (نوروزی، ۱۳۹۳).

تعریف دقیق ساختار توده‌سنگ نقطه شروع بهتری را برای مدل‌سازی (به ویژه عددی) و تحلیل پایداری توده‌سنگ فراهم می‌کند. برای مدل‌سازی دقیق توده‌سنگ، باید جانمایی ناپیوستگی‌ها در داخل مدل به گونه‌ای باشد که توزیع درزه‌ها تا حد امکان مشابه توزیع ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ واقعی باشد. از

¹ Orientation

² Spacing

³ Persistence

⁴ Rock bridge

آنجا که توده سنگ از مواد طبیعی ناهمگن^۱ و ناهمسانگرد^۲ تشکیل شده است، ممکن است ویژگی‌های هندسی ناپیوستگی‌ها از جمله جهت، پایایی و فاصله‌داری دارای مقادیری پراکنده در توده سنگ باشند. بنابراین لازم است ماهیتی تصادفی برای ویژگی‌های پیش گفته در نظر گرفته شود و در مدل سازی توده سنگ به کار رود (نوروزی، ۱۳۹۳).

پس از بررسی وضعیت درزه‌داری منطقه و شناخت عوامل ژئومکانیکی موثر بر مقاومت و پایداری توده-سنگ می‌توان در خصوص وضعیت پایداری پایه‌های طبیعی در معدن رومرمر بحث نمود.

۴-۲- ویژگی‌های ناپیوستگی‌های توده سنگ

همه‌ی سنگ‌ها در حالت طبیعی می‌توانند انواع مختلفی از صفحات ناپیوستگی را در خود داشته باشند. صفحات گسل، صفحات درزه، رسوبات ناپیوسته، صفحات لایه‌ای، صفحات شکست، کلیواژ، صفحات شیستوزیته و سایر موارد همگی حالت‌های ویژه‌ای از این ساختارهای منفصل هستند. سیمای عمومی تمام این ساختارها، ناپیوستگی نامیده می‌شود. این ناپیوستگی‌ها در حقیقت پاسخی هستند که سنگ در مقابل بارهای وارده از خود نشان می‌دهد و تاثیرات بسیار زیادی را بر روی خواص ژئومکانیکی و پایداری توده سنگ دارند.

آگاهی از وضعیت عمومی درزه و شکاف‌ها و صفحات لایه‌بندی در یک توده سنگ از اهمیت بالایی برخوردار است. در ادامه به مهم‌ترین ویژگی‌های ناپیوستگی‌ها که تاثیر بسزایی در رفتار توده سنگ دارند، پرداخته می‌شود.

۴-۲-۱- جهت‌داری ناپیوستگی‌ها

جهت‌داری عاملی است که وضع جانمایی درزه‌ها در فضا را نشان می‌دهد و با امتداد یا جهت شیب (آزیموت) و شیب خط بزرگ‌ترین شیب در صفحه درزه تعریف می‌شود. پس از دسته‌بندی جهت‌داری درزه-های برداشت شده، تابع چگالی احتمال مناسب برای توزیع شیب و جهت شیب درزه تعیین می‌شود. معمولاً

¹ Non-homogeneous

² Anisotropic

از توزیع فیشر به لحاظ دارابودن ویژگی سادگی و انعطاف پذیری، برای توزیع شیب و از توزیع یکنواخت برای جهت شیب استفاده می‌شود.

جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به سطوح داخلی فضای حفر شده، تاثیر تعیین کننده‌ای در تمایل به ناپایداری، به دلیل احتمال سقوط بلوک‌های سنگی و یا لغزش روی صفحه ناپیوستگی دارد. جهت‌داری متقابل ناپیوستگی‌ها نسبت به یکدیگر، تعیین کننده شکل بلوک‌هایی است که توده‌سنگ به آن تقسیم شده است (Vutukuri and Katsuyama, 1994). جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به جهت فضای حفر شده در برخی سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ مانند امتیاز ساختاری سنگ (RSR) و طبقه‌بندی ژئومکانیکی (RMR) در نظر گرفته شده است.

جهت‌داری ناپیوستگی‌ها نسبت به جهت تنش‌های اصلی از عوامل مهم در احتمال لغزیدن در امتداد ناپیوستگی است. با توجه به مطالعات میدانی، برخی درزه‌های اصلی منطقه در امتداد عمود بر محور تونل احداث شده در تراز ۱۶۶۵ و با شیب زیاد واقع شده‌اند. بر اساس طبقه‌بندی ژئومکانیکی (RMR)، این وضعیت جهت‌داری درزه‌ها، اثری نسبتاً مطلوب بر پایداری تونل دارد. (شرکت باما، ۱۳۹۶)

از آنجا که توده‌سنگ منطقه معدن رومرمر از چهار دسته ناپیوستگی با فاصله‌داری اندک تشکیل شده و از طرف دیگر منطقه مورد بررسی در عمق حدود ۳۵۰ متری زمین واقع شده است، می‌توان انتظار داشت که مجموعه ناپیوستگی‌ها و سنگ سالم در مقاومت نهایی توده‌سنگ نقش داشته باشند.

با توجه به این که توده‌سنگی که دارای چهار دسته ناپیوستگی یا بیشتر باشد را می‌توان به عنوان توده سنگ ایزوتروپ در نظر گرفت. بر این اساس، توده‌سنگ معدن رومرمر را می‌توان ایزوتروپ فرض نمود.

۴-۲-۲- فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها

فاصله‌داری به صورت فاصله عمودی بین دو ناپیوستگی مجاور متعلق به یک سری ناپیوستگی تعریف می‌شود. فاصله‌داری ناپیوستگی نقش مهمی در مقاومت و پایداری توده‌سنگ بازی می‌کند. فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها از عوامل مهم تعیین کننده اندازه تک بلوک سنگ سالم است. با افزایش اندازه بلوک و یا به عبارت دیگر، کم شدن تعداد درزه‌ها، بر مقاومت سنگ افزوده می‌شود. نسبت فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها به

ابعاد فضای حفر شده بر چگونگی تغییر شکل و شکست سنگ اثر می‌گذارد. همچنین قابلیت حفاری، خواص خردشوندگی و نفوذپذیری توده‌سنگ به فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها وابسته است (Vutukuri and Katsuyama, 1994).

فراوانی ناپیوستگی‌ها معمولاً به صورت خطی اندازه‌گیری شده و با تعداد ناپیوستگی‌هایی بیان می‌شود که خط برداشت را در طول واحد قطع می‌کنند. فراوانی خطی برابر با معکوس فاصله‌داری متوسط است. فراوانی ناپیوستگی‌ها با تغییر جهت خط برداشت تغییر می‌کند. بنابراین، لازم است جهت مقدار فراوانی نیز تعیین شود (لیان‌یانگ ژانگ، ۱۳۹۰).

همانند دیگر ویژگی‌های توده‌سنگ، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها مقدار مشخصی ندارد و به صورت دامنه‌ای از مقادیر با یک توزیع آماری معین بیان می‌شود. بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی، توزیع نمایی منفی برای توصیف فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها مناسب است.

پارامتر فاصله‌داری توسط اکثر سیستم‌های طبقه‌بندی سنگ از جمله امتیاز ساختاری سنگ (RSR)، طبقه‌بندی ژئومکانیکی (RMR) و سیستم Q مورد استفاده قرار می‌گیرد. بر اساس روش RMR ناپیوستگی‌هایی با فاصله بیش از ۲ متر بسیار دور در نظر گرفته می‌شوند و فاصله‌داری کمتر از ۶ سانتی‌متر نیز بسیار نزدیک هستند.

بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی، متوسط فاصله‌داری درزه‌ها در تراز ۱۶۶۵ برابر ۲۱ سانتی‌متر است. به عبارت دیگر فراوانی درزه‌ها برابر ۴/۶۸ به دست می‌آید. بر اساس طبقه‌بندی ژئومکانیکی (RMR)، امتیازی متوسط برای این مقدار فاصله‌داری در نظر گرفته شده است. بنابراین از این لحاظ می‌توان تاثیر فاصله‌داری بر پایداری توده‌سنگ منطقه را متوسط ارزیابی نمود. (شرکت باما، ۱۳۹۶)

ذکر این نکته بسیار مهم است که فاصله‌داری درزه‌ها از دیواره‌ی تونل‌های استخراجی برداشت شده است. روشن است که سطح دیواره تونل‌ها بر اثر انفجار دچار آسیب شده و درزه‌داری آن افزایش یافته است.

۴-۲-۳- اندازه (پایایی) ناپیوستگی‌ها

پایایی به صورت گسترش یا اندازه واقعی ناپیوستگی در طول صفحه‌ی آن تعریف می‌شود (ISRM,)

(1978). از روی پایایی می‌توان معیاری از گسترش فضایی ناپیوستگی در سنگ بدست آورد. پایایی^۱ ناپیوستگی در سنگ متراکم و سخت که معمولا با منتهی شدن به ناپیوستگی‌های دیگر رخ می‌دهد، مقدار پایایی را کاهش می‌دهد. پایایی ناپیوستگی در میان سایر پارامترهای هندسی آن دارای بیشترین تاثیر بر مقاومت توده‌سنگ است (Einstein et al., 1983). حضور درزه‌های ناپیوسته اثر مهمی بر روی ویژگی‌ها و رفتار توده‌سنگ دارد و باید به دقت برای تعیین ویژگی‌های مهندسی توده سنگ در نظر گرفته شوند (Kim et al., 2007).

به طور معمول برای توزیع طول اثر واقعی درزه، سه تابع نمایی منفی، لاگ‌نرمال و گاما (Kulatilake et al., 2003; Priest, 1993; Zhang and Einstein, 2000; Zadhesh et al., 2013) برای اطلاعات حاصل از پیمایش دوبعدی درزه‌ها بکار برده می‌شوند.

در خصوص توده سنگ تراز ۱۶۶۵ معدن رومرمر، متوسط طول دسته ناپیوستگی‌های توده سنگ در حدود ۱/۸ متر است و همچنین از تابع توزیع لاگ نرمال پیروی می‌کنند. (شرکت باما، ۱۳۹۶)

۴-۲-۴- چگالی و شدت ناپیوستگی

شدت ناپیوستگی‌های سنگ در اصل بیانگر اندازه‌ای از ناپیوستگی‌ها بر واحد توده‌سنگ است که در آن واحد توده‌سنگ، می‌تواند حجم، مساحت و یا طول باشد.

مقدار چگالی سطحی (P_{20}) به مقیاس وابسته است و در مقیاس‌های کوچکتر از طول خط اثر بیشینه، به جای مقدار P_{20} ، پارامتر P_{21} به عنوان طول خط اثر ناپیوستگی در واحد سطح نمونه‌گیری به کار می‌رود. مقادیر P_{20} و P_{21} به جهت‌داری نسبی ناپیوستگی‌ها و صفحه نمونه‌گیری وابسته است.

انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 1978)، رابطه تجربی زیر را بین P_{30} و RQD ارائه کرد.

$$RQD = 115 - 3.3P_{30} \quad (1-4)$$

نکته قابل توجه این است که رابطه‌ی فوق برای $P_{30} > 35$ ، $RQD = 0$ و برای $P_{30} < 4.5$ ، $RQD = 100$

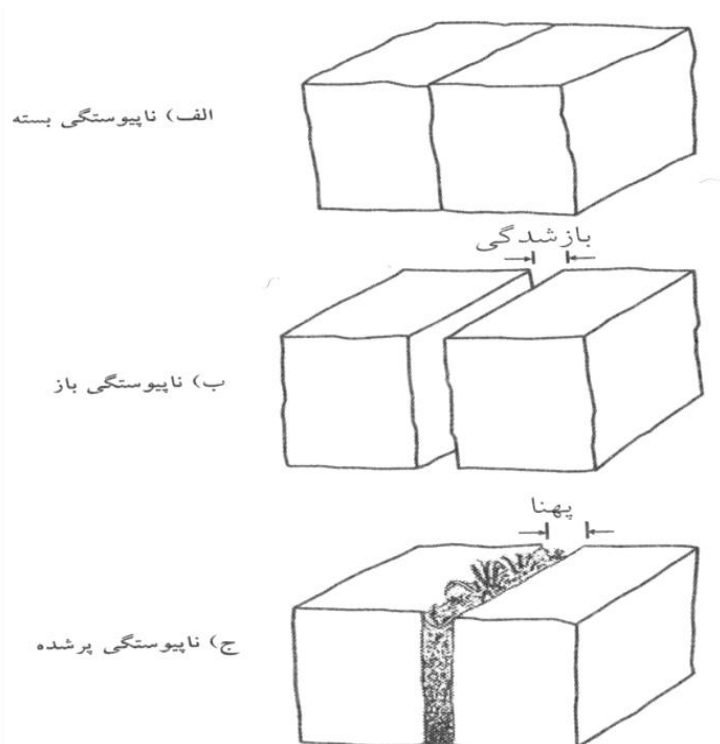
خواهد شد. تاکنون رابطه‌ای مستقیم بین شدت ناپیوستگی‌ها و مقاومت توده‌سنگ ارائه نشده است. تنها

¹ Termination

رابطه‌ی موجود (که البته به طور مستقیم به مقاومت مربوط نمی‌شود)، همین رابطه تجربی ۱-۴ بین P_{30} و RQD است. با استفاده از این رابطه و با توجه به اینکه مقدار P_{30} (چگالی حجمی) برای منطقه برابر ۱۱ حاصل شده است، مقدار RQD برابر ۷۹ به دست خواهد آمد. از طرف دیگر شدت حجمی درزه‌داری کل منطقه، حدود $8 \text{ (m}^2/\text{m}^3)$ محاسبه شده است که خود نشان‌دهنده مقدار قابل توجه درزه‌داری در منطقه است. (شرکت باما، ۱۳۹۶)

۴-۲-۵- بازشدگی ناپیوستگی

با توجه به شکل ۱-۴، بازشدگی عبارت است از فاصله عمودی بین دو دیواره‌ی ناپیوستگی که با هوا یا آب پر شده باشد. در نتیجه بازشدگی را می‌توان از عرض مواد پرکننده‌ی ناپیوستگی تشخیص داد. مقدار بازشدگی بر مقاومت برشی، تغییرشکل پذیری و هدایت هیدرولیکی توده‌سنگ‌های دارای ناپیوستگی تاثیر می‌گذارد. در خصوص بازشدگی، باید تاثیر توامان بازشدگی و پرشدگی را بر مقاومت توده سنگ مورد بررسی قرار داد.

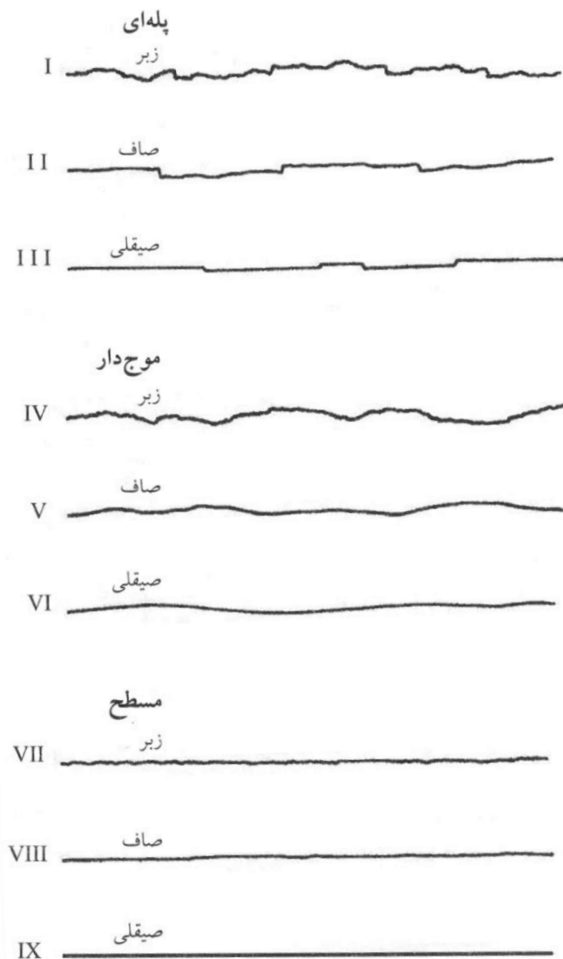


شکل ۱-۴: تعاریف بازشدگی ناپیوستگی‌های باز و بسته (ISRM, 1978)

در خصوص توده سنگ معدن رومرمر، بازشدگی ناپیوستگی‌ها از کمتر از ۱ تا ۱۰ میلی‌متر تغییر می‌کند. متوسط بازشدگی برای منطقه برابر ۱/۵ میلی‌متر اندازه‌گیری شده است. در خصوص پرشدگی ناپیوستگی‌ها می‌توان گفت که برخی ناپیوستگی‌ها فاقد پرکننده و برخی دارای پرکننده هستند. بر اساس اندازه‌گیری‌های میدانی انجام شده، در حدود ۲۴ درصد از ناپیوستگی‌های برداشت شده حاوی پرکننده و مابقی فاقد آن هستند. مواد پرکننده این ناپیوستگی‌ها اغلب بسیار نرم و حاوی رس است. با توجه به این که تعداد ناپیوستگی‌های حاوی پرکننده زیاد نیست، می‌توان انتظار داشت که تاثیر قابل توجهی بر پایداری توده سنگ نداشته باشند. اما باید در تحلیل پایداری‌ها، به کاهش ضرایب مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها در نتیجه وجود پرکننده و تاثیر آن بر پایداری کلی توده سنگ، توجه نمود و ضریب اطمینانی برای این موضوع در نظر گرفت. در مهمترین سیستم‌های طبقه‌بندی توده سنگ همچون RMR و Q ویژگی‌های بازشدگی، پرشدگی و همچنین زبری به عنوان پارامترهای موثر در تعیین رده توده سنگ و مقاومت کلی آن در نظر گرفته شده‌اند.

۴-۲-۶- زبری

زبری معرف ناصافی و معوج بودن سطح داخلی ناپیوستگی نسبت به صفحه اصلی آن است. شکل ۴-۲، مقاطع نمونه‌ی زبری و اصطلاحات پیشنهادی انجمن جهانی مکانیک سنگ (ISRM) نشان داده شده است. طول هر کدام از این مقاطع در محدوده ۱ تا ۱۰ متر است و مقیاس‌های عمودی و افقی با هم برابرند. زبری بر مقاومت برشی به ویژه در ناپیوستگی‌های جابه‌جا نشده و متصل (مثلاً ناپیوستگی‌های پرنشده) تاثیر می‌گذارد. میزان این تاثیر با افزایش دهانه، ضخامت پرشدگی یا جابه‌جایی برشی قبلی کاهش می‌یابد.



شکل ۴-۲: پروفیل‌های نمونه‌ی زبری و اصطلاحات پیشنهادی (ISRM, 1978)

۴-۳- عوامل مربوط به خصوصیات مکانیکی توده‌سنگ

رفتار مکانیکی و مقاومتی توده‌سنگ بستگی به مجموع رفتار سازنده‌های آن، یعنی سنگ سالم و ناپیوستگی‌ها دارد. سنگ سالم از موادی با پارامترهای ژئومکانیکی مختلف تشکیل شده که به مبدا تشکیل و فرآیندهای زمین‌شناسی رخ داده روی آن بستگی دارد. خواص مقاومتی و خواص فیزیکی نظیر مقاومت فشاری تک محوری، تخلخل، چگالی، و ... از جمله این پارامترها هستند که می‌توانند ویژگی‌های مکانیکی توده‌سنگ را تحت الشعاع خود قرار دهند.

۴-۳-۱- چگالی سنگ

چگالی به صورت متوسط جرم واحد حجم تعریف می‌شود. چگالی سنگ به ترکیب کانی‌ها، تخلخل

و مواد پرکننده خلل و فرج بستگی دارد. در جدول ۴-۱، مقادیر شاخص چگالی سنگ‌های مختلف ارائه شده است. عدد چکش اشمیت با افزایش چگالی افزایش می‌یابد. یاشار و اردوغان (۲۰۰۴) رابطه‌ی تجربی زیر را بین چگالی و عدد چکش اشمیت و بر اساس نتایج آزمایش شش نوع سنگ مختلف پیشنهاد کردند (Yashar and Erdogan, 2004):

$$R_{n(L)} = 3.0e^{1.066\rho} \quad (R^2 = 0.84) \quad (2-4)$$

که $R_{n(L)}$ عدد چکش اشمیت نوع L ، ρ چگالی بر حسب gr/cm^3 و R^2 ضریب همبستگی است.

جدول ۴-۱: مقادیر نمونه‌ی چگالی سنگ بکر (Lama and Vutukuri, 1978)

| نوع سنگ | محدوده‌ی چگالی (kg/m^3) | چگالی متوسط (kg/m^3) |
|-----------------|-----------------------------|--------------------------|
| سنگ‌های آذرین | | |
| گرانیت | ۲۵۱۶-۲۸۰۹ | ۲۶۶۷ |
| گرانودیوریت | ۲۶۶۸-۲۷۸۵ | ۲۷۱۶ |
| سینیت | ۲۶۳۰-۲۸۹۹ | ۲۷۵۷ |
| کوارتز دیوریت | ۲۶۸۰-۲۹۶۰ | ۲۸۰۶ |
| دیوریت | ۲۷۲۱-۲۹۶۰ | ۲۸۳۹ |
| نوریت | ۲۷۲۰-۳۰۲۰ | ۲۹۱۴ |
| گابرو | ۲۸۵۰-۳۱۲۰ | ۲۹۷۶ |
| دیاباز | ۲۸۰۴-۳۱۱۰ | ۲۹۶۵ |
| پریدوتیت | ۳۱۵۲-۳۲۷۶ | ۳۲۳۴ |
| دونیت | ۳۲۰۴-۳۳۱۴ | ۳۲۷۷ |
| پیروکسنیت | ۳۱۰۰-۳۳۱۸ | ۳۲۳۱ |
| آنورتوزیت | ۲۶۴۰-۲۹۲۰ | ۲۷۳۴ |
| سنگ‌های رسوبی | | |
| ماسه سنگ | ۲۱۷۰-۲۷۰۰ | — |
| آهک | ۲۳۷۰-۲۷۵۰ | — |
| دولومیت | ۲۷۵۰-۲۸۰۰ | — |
| گچ | ۲۲۳۰ | — |
| مرمر | ۲۷۵۰ | — |
| شیل | ۲۰۶۰-۲۶۶۰ | — |
| ماسه | ۱۹۲۰-۱۹۳۰ | — |
| سنگ‌های دگرگونی | | |
| گنیس | ۲۵۹۰-۳۰۶۰ | ۲۷۰۳ |
| شیست | ۲۷۰۰-۳۰۳۰ | ۲۷۹۰ |
| اسلیت | ۲۷۲۰-۲۸۴۰ | ۲۸۱۰ |
| آمفیبولیت | ۲۷۹۰-۳۱۴۰ | ۲۹۹۰ |
| گرانولیت | ۲۶۳۰-۳۱۰۰ | ۲۸۳۰ |
| اکولوژیت | ۳۳۳۸-۳۴۵۲ | ۳۳۹۲ |

مقادیر ارائه شده چگالی حجمی در جدول در رطوبت طبیعی تعیین شده است.

بر اساس جدول ۴-۱ که مقادیر نمونه‌ی چگالی سنگ بکر را ارائه می‌دهد، مقدار چگالی سنگ آهک در محدوده ۲۳۷۰ تا ۲۷۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب و دولومیت در محدوده ۲۷۵۰ تا ۲۸۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب تغییر می‌کند. البته باید توجه نمود که مقادیر ارائه شده مربوط به چگالی سطحی هستند. مقدار چگالی نسبت به عمق تغییر می‌کند و باید این موضوع مورد توجه قرار داده شود.

بر اساس رابطه (۴-۲)، ارائه شده توسط یاشار و اردوغان (۲۰۰۴)، بین چگالی و عدد چکش اشمیت، مقدار چگالی سنگ بکر معدن رومرمر برابر ۲۷۶۵ کیلوگرم بر متر مکعب تخمین زده می‌شود.

۴-۳-۲- مقاومت فشاری تک‌محوری

مقاومت عبارت است از میزان پایداری سنگ در مقابل تنش‌های خارجی که این تنش‌ها ممکن است در حالت سکون (استاتیک) و یا پویا (دینامیک) روی سنگ تاثیر بگذارند. تنش ممکن است از نوع فشاری، کششی، خمشی و یا برشی باشد. به‌طور طبیعی، سنگ در مقابل تنش‌های فشاری مقاومت بیشتری دارد. مقاومت فشاری و کششی خواصی هستند که اغلب برای طبقه‌بندی سنگ استفاده می‌شود. مقاومت فشاری استاتیکی سنگ‌ها از حدود ۱۰ تا ۵۰۰ مگاپاسکال با توجه به نوع سنگ‌ها تغییر می‌کند. محدوده‌ی مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS^1) سنگ‌های مختلف در جدول ۴-۲، درج شده است.

¹ Uniaxial Compressive Strength

جدول ۴-۲: محدوده‌ی مقادیر نمونه‌ی مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر (AASHTO, 1989)

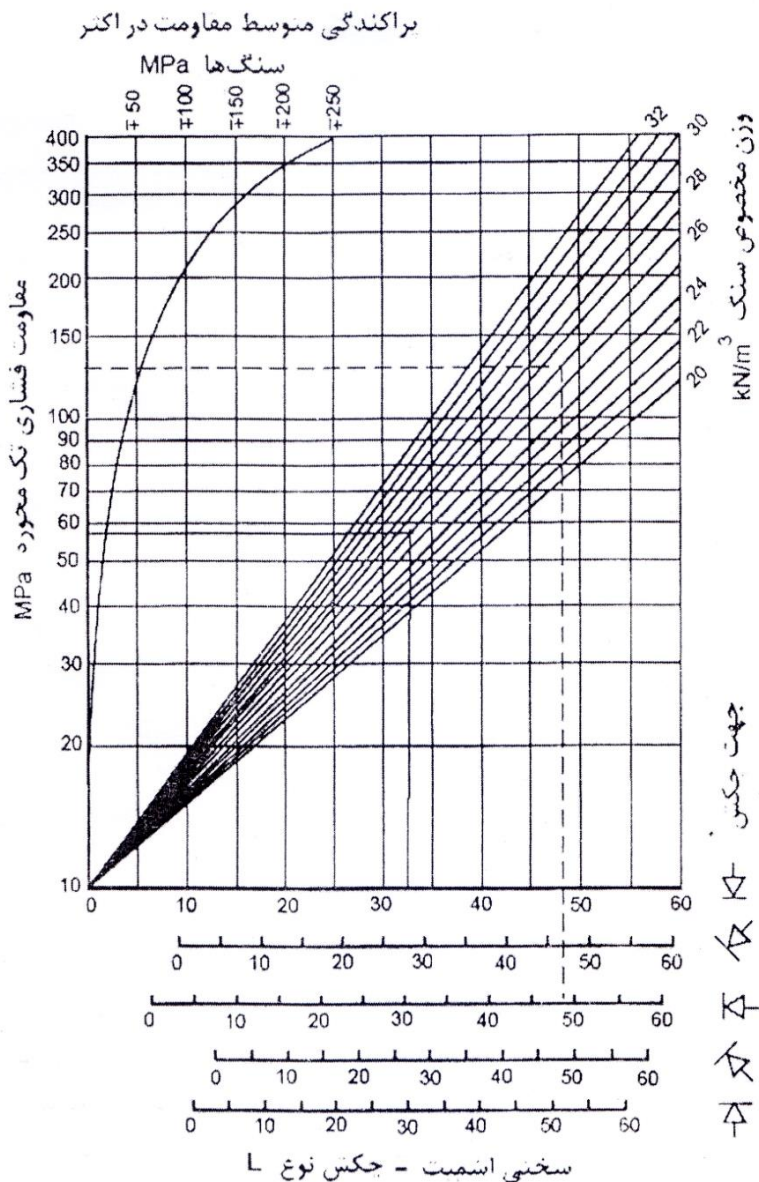
| مقاومت فشاری سنگ بکر (MPa)* | سنگ | تشریح عمومی | طبقه‌ی سنگ |
|-----------------------------|-----------------|--|------------|
| ۳۳-۳۱۰ | دولومیت | سنگ‌های کربناته با بلورهای دارای کلیواژی توسعه‌یافته | الف |
| ۲۴-۲۹۰ | آهک | | |
| ۳۸-۶۹ | کربناتیت | | |
| ۳۸-۲۴۱ | مرمر | | |
| ۱۳۱-۳۳۸ | تاکتیت - اسکارن | | |
| ۲۹-۱۴۵ | آرژلیت | سنگ‌های رسی دگرگون‌شده | ب |
| ۱-۸ | رس سنگ | | |
| ۵۲-۱۹۳ | مارن | | |
| ۲۴-۲۴۱ | فیلیت | | |
| ۱۰-۱۱۷ | سیلتستون | | |
| ۷-۳۵ | شیل** | | |
| ۱۴۵-۲۰۷ | اسلیت | | |
| ۳۳-۲۲۱ | کنگولومرا | سنگ‌های ماسه‌ای با بلورهای مقاوم و کلیواژ ضعیف | ج |
| ۶۷-۱۷۲ | ماسه‌سنگ | | |
| ۶۲-۳۷۹ | کوارتزیت | | |
| ۹۷-۱۷۹ | آندزیت | سنگ‌های آذرین بلوری با دانه‌بندی مناسب | د |
| ۲۱-۵۷۲ | دیاباز | | |
| ۱۱۷-۲۷۶ | آمفیبولیت | سنگ‌های آذرین درشت‌دانه و دگرگونی بلوری | ه |
| ۱۲۴-۳۱۰ | گابرو | | |
| ۲۴-۳۱۰ | گنیس | | |
| ۱۴-۳۳۸ | گرانیت | | |
| ۱۰-۹۷ | کوارتز دیوریت | | |
| ۱۳۱-۱۵۹ | کوارتز مونزونیت | | |
| ۱۰-۱۴۵ | شیست | | |
| ۱۷۹-۴۲۷ | سینیت | | |

* محدوده‌ی مقادیر مقاومت تک‌محوری سنگ بکر که توسط پژوهشگران مختلف گزارش شده‌است.
** شیل نفتی در نظر گرفته نشده‌است.

یکی از روش‌های تعیین غیرمستقیم مقاومت فشاری سنگ‌ها، استفاده از سختی اشمیت است. دیبر و میلر^۱ در سال ۱۹۶۵ مطالعاتی در زمینه تعیین مقاومت فشاری سنگ‌ها با استفاده از سختی اشمیت انجام دادند. این مطالعات بر روی نمونه‌های مغزه‌ای از ۲۸ محل مختلف که دامنه وسیعی از سنگ‌ها را پوشش

^۱ Miller

می‌داد، انجام گرفت. آن‌ها دریافتند که سختی اشمیت با مقاومت فشاری تک محوری، ضریب همبستگی معادل ۰٫۸۸ دارد. با توجه به شکل ۴-۳، چنان‌چه سختی اشمیت در چگالی خشک سنگ ضرب شود، عدد حاصل با مقاومت تک محوری یک رابطه لگاریتمی با ضریب همبستگی ۰٫۹۴۳ تشکیل می‌دهد.



شکل ۴-۳: نمودار همبستگی بین عدد چکش اشمیت نوع L، چگالی و مقاومت فشاری تک محوری (Deere & Miller., 1965).

برای تعیین سختی اشمیت، ابتدا داده‌هایی که دارای کمترین و بیشترین مقدار هستند، حذف شده و از بقیه داده‌ها میانگین گرفته می‌شود. به منظور تخمین مقاومت فشاری تک محوری توده-سنگ آهک دولومیتی معدن رومرمر و همچنین سایر ویژگی‌های مکانیکی سنگ مذکور، در تراز مورد بررسی در شش نقطه مختلف با استفاده از چکش اشمیت آزمایش‌هایی انجام شده است مقدار میانگین سختی اشمیت محاسبه شده برای سنگ واقع در تراز ۱۶۶۵ برابر ۵۷/۲۱ است. (شرکت باما، ۱۳۹۶)

در جدول ۳-۴، مجموعه‌ای از روابط تجربی برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از عدد چکش اشمیت ارائه شده است. توجه به این نکته الزامی است که روابط مختلف ممکن است مقادیر بسیار متفاوتی از مقاومت فشاری تک‌محوری را ارائه نمایند. برای به دست آوردن نتایج منطقی، انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های مقاومت فشاری تک‌محوری، به منظور تنظیم و کالیبره کردن نتایج آزمایش‌های چکش اشمیت و تعیین نوع چکش (L یا N) ضروری است.

جدول ۳-۴: روابط بین مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر و عدد چکش اشمیت

| مرجع | نوع سنگ | R ² | رابطه |
|---------------------------------|--|----------------|--|
| Deere and Miller,) (1966) | ۲۸ لیتولوژی مختلف، ۳ نوع سنگ پایه | ۰/۹۴ | $\sigma_c = 6.9 \times 10^{[0.0087 \rho R_{n(L)} + 0.16]}$ |
| (Sachpazis, 1990) | مرمر، آهک، دولومیت | ۰/۹۲ | $\sigma_c = 4.29 R_{n(L)} - 67.5$ |
| Morales, et al.,) (2004) | آهک، رس‌سنگ، سیلتستون، مارن، ماسه‌سنگ، اوفیت | ۰/۸۸ | $\sigma_c = e^{0.053 R_{n(L)} + 1.332}$ |
| Yasar and) (Erdogan, 2004a) | آهک، ماسه‌سنگ، مرمر، بازالت | ۰/۸۰ | $\sigma_c = 4 \times 10^{-6} \times R_{n(L)}^{4.2917}$ |
| (Katz, et al., 2000) | گچ، آهک، ماسه‌سنگ، مرمر، سینیت، گرانیت | - | $\sigma_c = 2.208 e^{0.067 R_{n(N)}}$ |
| (Kahraman, 2001b) | دولومیت، ماسه‌سنگ، آهک، مارن، دیاباز، سرپانتین، هماتیت | ۰/۷۸ | $\sigma_c = 6.97 e^{0.014 \rho R_{n(N)}}$ |

واحد σ_c بر حسب MPa، ρ چگالی سنگ بر حسب gf/cm^3 و $R_{n(L)}$ و $R_{n(N)}$ به ترتیب اعداد چکش اشمیت نوع L و

N و R^2 ضریب همبستگی است.

برای تخمین مقاومت فشاری تک‌محوری می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد (Vutukuri and

:Katsuyama, 1994)

$$\sigma_c = \frac{\rho - 2.4}{0.00179} \quad (MPa) \quad (3-4)$$

که در آن ρ چگالی بر حسب gr/cm^3 است.

در مورد سنگ‌های کربناته بهتر است از رابطه زیر استفاده شود (Vutukuri and

:Katsuyama, 1994)

$$\sigma_c = 0.0863 e^{2.85\rho} \quad (MPa) \quad (4-4)$$

از آنجا که جرم مخصوص رابطه‌ی نزدیکی با میزان تخلخل دارد، بر مقاومت سنگ بکر نیز

موثر است. مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ‌های بکر با افزایش جرم مخصوص افزایش می‌یابد. طغرل

و ظریف (۱۹۹۹) رابطه‌ی تجربی ساده‌ای بین مقاومت فشاری تک‌محوری (σ_c) و جرم مخصوص

خشک (ρ_d) برای سنگ‌های گرانیتی ترکیه به صورت زیر ارائه کردند (Turgrul and Zarif, 1999):

$$\sigma_c = 0.566 \rho_d - 1347 \quad (R^2 = 0.67) \quad (5-4)$$

که در این رابطه، σ_c بر حسب MPa، ρ_d بر حسب kg/m^3 و R^2 ضریب همبستگی است.

بر اساس جدول ۴-۲ که مقادیر نمونه‌ی مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر را ارائه می‌-

دهد، مقدار مقاومت فشاری سنگ آهک در بازه‌ی بسیار گسترده‌ی ۲۴ تا ۲۹۰ مگاپاسکال و مقاومت

فشاری دولومیت در بازه ۳۳ تا ۳۱۰ مگاپاسکال تغییر می‌کند.

با توجه به عدد چکش اشمیت که برابر ۵۷/۲۱ است و همچنین با توجه به این که دیواره‌های

مورد آزمایش قائم و چکش به صورت افقی بوده است، مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری با استفاده از

نمودار شکل، برای تراز ۱۶۶۵ در حدود ۲۱۰ مگاپاسکال تخمین زده می‌شود.

بر اساس روابط تجربی بین مقاومت فشاری تک‌محوری و چگالی یعنی رابطه (۳-۴) و (۴-۴) و

نیز رابطه (۴-۵)، مقادیر مقاومت فشاری تک محوری به ترتیب برابر ۲۰۴/۲۳ ، ۲۲۸/۶۰ و ۲۱۸/۳۲ مگاپاسکال برای سنگ بکر معدن رومرمر به دست می‌آید. با توجه به این نتایج، می‌توان مقدار مقاومت فشاری تک‌محوری برای سنگ معدن رومرمر را حدود ۲۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفت.

۴-۳-۳- مقاومت کششی

سنگ‌ها معمولاً در مقابل کشش ضعیف هستند و بنابراین وجود تنش کششی در ساختمان سنگ به شکست آن می‌انجامد. مقاومت فشاری تک محوری سنگ‌ها در آزمایشگاه به‌طور مستقیم به‌دست می‌آید اما به‌دست آوردن مقاومت کششی آن به‌طور مستقیم در آزمایشگاه کاری بسیار دشوار است و به همین دلیل از روش‌های غیرمستقیم نظیر آزمایش‌های کششی غیرمستقیم، آزمایش برزلی و خمش چند نقطه‌ای استفاده می‌شود.

همبستگی بالایی بین مقاومت کششی و مقاومت فشاری تک‌محوری وجود دارد. به منظور برآورد اولیه از مقاومت کششی، معمولاً رابطه‌ی ساده‌ی زیر به کار می‌رود (لیان‌یانگ ژانگ، ۱۳۹۰):

$$\sigma_t = -\frac{\sigma_c}{10} \quad (۴-۶)$$

نزیر^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۳ بر اساس مطالعات آزمایشگاهی، رابطه‌ی تجربی زیر را بین مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و مقاومت کششی غیر مستقیم (BTS) (بر اساس آزمایش برزلی) ارائه نمودند (Nazir et al., 2013). ضریب همبستگی برای این رابطه ۰/۹ تعیین شده است.

$$UCS (MPa) = 9.25 BTS^{0.947} \quad (R^2 = 0.9) \quad (۴-۷)$$

به منظور برآورد اولیه از مقاومت کششی سنگ بکر معدن رومرمر، می‌توان با استفاده از رابطه (۴-۶)، ارائه شده توسط لیان‌یانگ ژانگ، اقدام به تعیین مقاومت کششی سنگ نمود. بر این اساس مقدار مقاومت کششی برای سنگ منطقه برابر ۲۰ مگاپاسکال بدست می‌آید.

همچنین بر اساس رابطه‌ی ارائه شده توسط نزیر و همکاران در سال ۲۰۱۳ بین مقاومت

^۱ Nazir

فشاری تک محوری (UCS) و مقاومت کششی غیر مستقیم (BTS) (بر اساس آزمایش برزیلی) یعنی رابطه (۴-۷)، مقدار مقاومت کششی برای سنگ منطقه برابر ۲۵/۶۸ مگاپاسکال حاصل می‌شود. با توجه به این نتایج، می‌توان مقدار مقاومت کششی برای سنگ معدن رومرمر را حدود ۲۰ مگاپاسکال در نظر گرفت.

۴-۳-۴- مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته (مدول یانگ) عبارت است از نسبت تنش محوری به کرنش متناظر آن تحت بار تک‌محوره که رفتار سنگ‌ها را تحت تنش بیان می‌کند. حضور ناپیوستگی‌ها در سنگ به عنوان عاملی مهم و تاثیرگذار در مدول سنگ شناخته شده است. روش معمول تعیین مدول الاستیسیته یک ماده‌سنگ انجام آزمایش مقاومت فشاری ساده روی مغزه‌های استوانه‌ای سنگ است که به وسیله مغزه‌گیرهای الماسه تهیه شده‌اند. از آنجا که تهیه نمونه‌های استاندارد وقت‌گیر و هزینه‌بر است، بنابراین از روش‌های غیرمستقیم و روابط تجربی برای تخمین مدول الاستیسیته ماده‌سنگ استفاده می‌شود. جدول ۴-۴، تعدادی از روابط تجربی بین سختی چکش اشمیت و مدول الاستیسیته‌ی ماده‌سنگ را ارائه می‌دهد. همچنین در جدول ۴-۵، مقادیر مدول الاستیسیته سنگ‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۴-۴: رابطه‌ی بین مدول الاستیک E و عدد چکش اشمیت Rn

| ردیف | رابطه | R ² | نوع سنگ | مرجع |
|------|-------------------------------------|----------------|---|-------------------------------|
| ۱ | $E = 0.6005 \rho R_{n(L)} - 2.0276$ | - | ۲۸ واحد لیتولوژی، ۳ نوع سنگ | Deere and) (Miller, 1966 |
| ۲ | $E = 1.940 R_{n(L)} - 33.92$ | 0.78 | مرمر، آهک، دولومیت | Sachpazis,) (1990 |
| ۳ | $E = 0.00013 R_{n(N)}^{3.09074}$ | 0.99 | گچ، آهک، ماسه‌سنگ، مرممر، سینیت، گرانیت | Katz, et al.,) (2000 |
| ۴ | $E = e^{0.054R_{n(L)} + 1.146}$ | 0.90 | ژئپس | Yilmaz and) (Sendir, 2002 |

E بر حسب GPa، ρ چگالی سنگ بر حسب gr/cm³، R_{n(L)} و R_{n(N)} به ترتیب اعداد بازگشت چکش اشمیت نوع L و

جدول ۴-۵: مقادیر نمونه‌ی مدول الاستیک سنگ‌های بکر (AASHTO, 1989)

| انحراف استاندارد | مدول الاستیک (GPa) | | | تعداد انواع سنگ | تعداد مقادیر | نوع سنگ |
|------------------|--------------------|-------|--------|-----------------|--------------|----------|
| | متوسط | حداقل | حداکثر | | | |
| ۲۴/۵ | ۵۲/۷ | ۶/۴۱ | ۱۰۰ | ۲۶ | ۲۶ | گرانیت |
| ۴۲/۷ | ۵۱/۴ | ۱۷/۱ | ۱۱۲ | ۳ | ۳ | دیوریت |
| ۶/۶۹ | ۷۵/۸ | ۶۷/۶ | ۸۴/۱ | ۳ | ۳ | گابرو |
| ۱۲/۳ | ۸۸/۳ | ۶۹ | ۱۰۴ | ۷ | ۷ | دیاباز |
| ۱۷/۹ | ۵۶/۱ | ۲۹ | ۸۴/۱ | ۱۲ | ۱۲ | بازالت |
| ۱۶ | ۶۶/۱ | ۳۶/۵ | ۸۸/۳ | ۷ | ۷ | کوارتزیت |
| ۱۷/۲ | ۴۲/۶ | ۴ | ۷۳/۸ | ۱۳ | ۱۴ | مرمر |
| ۱۵/۹ | ۶۱/۱ | ۲۸/۵ | ۸۲/۱ | ۱۳ | ۱۳ | گنیس |
| ۶/۶۲ | ۹/۵۸ | ۲/۴۱ | ۲۶/۱ | ۲ | ۱۱ | اسلیت |
| ۲۱/۹ | ۳۴/۳ | ۵/۹۳ | ۶۹ | ۱۲ | ۱۳ | شمیست |
| ۳/۹۳ | ۱۱/۸ | ۸/۶۲ | ۱۷/۳ | ۳ | ۳ | فیلیت |
| ۸/۲۱ | ۱۴/۷ | ۰/۶۲ | ۳۹/۲ | ۱۹ | ۲۷ | ماسه‌سنگ |
| ۱۱/۴ | ۱۶/۵ | ۲/۶۲ | ۳۲/۸ | ۵ | ۵ | سیلتستون |
| ۱۰ | ۹/۷۹ | ۰/۰۰۷ | ۳۸/۶ | ۱۴ | ۳۰ | شیل |
| ۲۵/۷ | ۳۹/۳ | ۴/۴۸ | ۸۹/۶ | ۳۰ | ۳۰ | آهک |
| ۲۳/۷ | ۲۹/۱ | ۵/۷۲ | ۷۸/۶ | ۱۶ | ۱۷ | دولوستون |

بر اساس جدول ۴-۵، که مقادیر نمونه‌ی مدول الاستیک سنگ بکر را نشان می‌دهد، مقدار مدول الاستیک سنگ آهک در بازه‌ی بسیار گسترده‌ی ۴/۵ تا ۹۰ گیگاپاسکال با میانگین حدود ۴۰ گیگاپاسکال و مدول الاستیک دولومیت در بازه ۶ تا ۸۰ گیگاپاسکال با میانگین ۳۰ گیگاپاسکال تغییر می‌کند. با میانگین‌گیری از مقادیر به دست آمده از روابط مختلف، مقدار مدول الاستیک سنگ معدن برابر ۴۰ گیگاپاسکال حاصل می‌شود. این مقدار در بازه بیان شده برای سنگ آهک، هم‌خوانی دارد. در حالت اشباع، بر طبق پیشنهاد واسارهلیبی (۲۰۰۳ و ۲۰۰۵)، مقدار مدول الاستیک سنگ معدن رومرمر ۲۵ گیگاپاسکال کاهش می‌یابد.

۴-۳-۵- نسبت پواسون

نسبت پواسون عبارت است از نسبت کرنش جانبی سنگ به کرنش محوری آن وقتی که

سنگ تحت بارگذاری تراکمی تک محوره قرار داشته باشد. نسبت پواسون سنگ‌ها معمولاً بین ۰/۲ تا ۰/۳ است. سنگ‌های دارای مقدار نسبت پواسون کوچک، خاصیت خردشوندگی بیشتری از خود نشان می‌دهند. در جدول ۴-۶، مقادیر نسبت پواسون سنگ‌های مختلف ارائه شده است.

جدول ۴-۶: مقادیر نمونه ضریب پواسون سنگ‌های بکر (AASHTO, 1989)

| انحراف استاندارد | نسبت پواسون | | | تعداد انواع سنگ | تعداد مقادیر | نوع سنگ |
|------------------|-------------|-------|--------|-----------------|--------------|----------|
| | متوسط | حداقل | حداکثر | | | |
| ۰/۰۸ | ۰/۲۰ | ۰/۰۹ | ۰/۳۹ | ۲۲ | ۲۲ | گرانیت |
| ۰/۰۲ | ۰/۱۸ | ۰/۱۶ | ۰/۲۰ | ۳ | ۳ | گابرو |
| ۰/۰۶ | ۰/۲۹ | ۰/۲۰ | ۰/۳۸ | ۶ | ۶ | دیاباز |
| ۰/۰۵ | ۰/۲۳ | ۰/۱۶ | ۰/۳۲ | ۱۱ | ۱۱ | بازالت |
| ۰/۰۵ | ۰/۱۴ | ۰/۰۸ | ۰/۲۲ | ۶ | ۶ | کوارتزیت |
| ۰/۰۸ | ۰/۲۸ | ۰/۱۷ | ۰/۴۰ | ۵ | ۵ | مرمر |
| ۰/۰۹ | ۰/۲۲ | ۰/۰۹ | ۰/۴۰ | ۱۱ | ۱۱ | گنیس |
| ۰/۰۸ | ۰/۱۲ | ۰/۰۲ | ۰/۳۱ | ۱۱ | ۱۲ | شیست |
| ۰/۱۱ | ۰/۲۰ | ۰/۰۸ | ۰/۴۶ | ۹ | ۱۲ | ماسه سنگ |
| ۰/۰۶ | ۰/۱۸ | ۰/۰۹ | ۰/۲۳ | ۳ | ۳ | سیلتستون |
| ۰/۰۶ | ۰/۰۹ | ۰/۰۳ | ۰/۱۸ | ۳ | ۳ | شیل |
| ۰/۰۶ | ۰/۲۳ | ۰/۱۲ | ۰/۳۳ | ۱۹ | ۱۹ | آهک |
| ۰/۰۸ | ۰/۲۹ | ۰/۱۴ | ۰/۳۵ | ۵ | ۵ | دولوستون |

بر اساس جدول ۴-۶ که مقادیر نمونه‌ی ضریب پواسون سنگ بکر را نشان می‌دهد، مقدار ضریب پواسون سنگ آهک در بازه ۰/۱۲ تا ۰/۳۳ با میانگین ۰/۲۳ و ضریب پواسون دولومیت در بازه ۰/۱۴ تا ۰/۳۵ با میانگین ۰/۲۹ تغییر می‌کند. با توجه به این مقادیر، می‌توان مقدار ضریب پواسون را برای سنگ معدن رومرمر، برابر ۰/۲۶ در نظر گرفت.

۴-۴ - جمع بندی

مقاومت و پایداری توده سنگ به عوامل مختلفی وابسته است که از آن جمله می توان به جنس توده سنگ، شبکه هندسی ناپیوستگی ها، ویژگی های مقاومتی ناپیوستگی ها، ویژگی های مکانیکی سنگ سالم، میدان تنش برجا و شرایط آب های زیرزمینی اشاره نمود.

از مهم ترین خصوصیات هندسی ناپیوستگی ها که نیز تاثیر بسزایی در پایداری توده سنگ دارند، می توان به جهت داری (شیب و جهت شیب)، فاصله داری، بازشدگی، پرشدگی و اندازه (پایایی) آن اشاره نمود.

همچنین رفتار مکانیکی و مقاومتی توده سنگ بستگی به مجموع رفتار سازنده های آن، یعنی سنگ سالم و ناپیوستگی ها دارد. خواص مقاومتی و خواص فیزیکی نظیر مقاومت فشاری تک محوری، تخلخل، چگالی، و ... از جمله این پارامترها هستند که می توانند ویژگی های مکانیکی توده سنگ را تحت الشعاع خود قرار دهند.

بدین منظور با بررسی و شناخت عوامل و پارامترهای ژئومکانیکی موثر بر مقاومت و پایداری توده سنگ به برآورد این پارامترها با استفاده از روش های تجربی و روابط موجود، پرداخته شده است. ویژگی های مکانیکی و هندسی برآورد شده برای توده سنگ معدن رومرمر، به طور خلاصه در جدول ۴-۷، ارائه شده است.

جدول ۴-۷: خلاصه ویژگی‌های مکانیکی و هندسی توده‌سنگ معدن رومرمر (شرکت باما، ۱۳۹۶)

| ردیف | پارامتر | مقدار | واحد |
|------|--|--------------|--------------------------------|
| ۱ | چگالی | ۲۷۶۵ | kg/m ³ |
| ۲ | تخلخل | - | درصد |
| ۳ | مقاومت فشاری تک‌محوری | ۲۰۰ | MPa |
| ۴ | مقاومت کششی | ۲۰ | MPa |
| ۷ | مدول الاستیک | ۴۰ | GPa |
| ۵ | مقاومت فشاری تک‌محوری | ۱۴۳ | در شرایط اشباع |
| | مقاومت کششی | ۱۶ | |
| | مدول الاستیک | ۲۵ | |
| ۸ | ضریب پواسون | ۰٫۲۶ | --- |
| ۹ | سرعت موج P | ۵/۵ | km/Sec |
| ۱۰ | جهت‌داری ناپیوستگی‌ها | نسبتاً مطلوب | --- |
| ۱۱ | فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها | ۲۱ | cm |
| ۱۲ | اندازه (پایایی) ناپیوستگی‌ها | ۱٫۸ | m |
| ۱۳ | شدت حجمی (P ₃₂) ناپیوستگی‌ها | ۸ | m ² /m ³ |
| ۱۴ | بازشدگی ناپیوستگی‌ها | ۱٫۵ | mm |
| ۱۵ | زاویه اصطکاک داخلی ناپیوستگی‌ها | ۳۵ | درجه |
| ۱۶ | چسبندگی ناپیوستگی‌ها | ۰٫۱ | MPa |

فصل پنجم

طراحی پایه‌های معدن

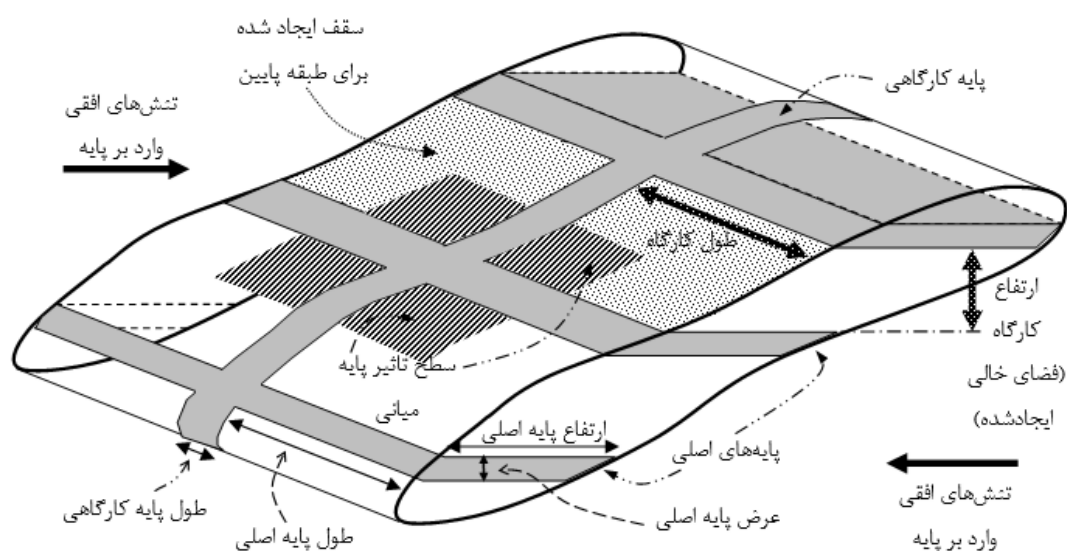
رومرمر به روش تجربی

توده سنگ مشترک دست نخورده بین دو یا چند فضای زیرزمینی پایه نامیده می‌شود. پایه‌ها با اهداف مختلفی چون حفاظت از راهروها، شفت‌ها و فضاهای زیرزمینی بزرگ احداث می‌شوند. پایه‌ها در معادن به دو گروه عمده تقسیم می‌شوند. پایه‌هایی که برای جداسازی یک بلوک استفاده می‌شوند (پایه‌های زنجیری) و پایه‌هایی که به منظور محافظت از فضای کارگاه در زمان پایه‌برداری استفاده می‌شوند (پایه‌های باقیمانده). در معادن زغالی پایه‌ها اغلب به شکل سطح مقطع مستطیلی هستند که در یک آرایش منظم جهت ایجاد فضای امن برای استخراج ایجاد شده‌اند. در معادن غیرزغال هم پایه‌ها برای اهدافی مشابه استفاده می‌شوند که البته با توجه به روش استخراج زیرزمینی انواع اشکال و کاربری‌ها را خواهند داشت. در پروژه‌های عمرانی هم پایه‌ها برای حفاظت از فضاهای زیرزمینی بزرگ استفاده می‌شوند. با انجام حفاری‌ها در اطراف پایه‌ها، بار وارد بر پایه افزایش می‌یابد و این فرآیند افزایش بار تا زمان رسیدن به مقاومت نهایی ادامه دارد. با توجه به کاربری پایه‌ها، اهمیت آن‌ها در حفظ پایداری فضاهای زیرزمینی و ایمنی آن‌ها به روشنی مشخص است.

در معدن کاری زیرزمینی، شرایط ژئوتکنیکی منطقه به ندرت امکان استخراج صد در صد ماده معدنی را فراهم می‌کند و مقداری از ماده معدنی به منظور نگهداری برجای گذاشته می‌شود. پایه‌های باقیمانده به عنوان عناصر نگهدارنده و کنترل کننده فضای ایجاد شده هستند. بنابراین مقداری از ذخیره قابل بازیابی نخواهد بود. نسبت بین ماده معدنی استخراج شده به کل ذخیره ماده معدنی، ضریب بازیابی (نسبت استخراج) نامیده می‌شود. هرچه ابعاد پایه کوچک‌تر باشد، ضریب بازیابی استخراج بالاتر رفته و برعکس هرچه ابعاد پایه بزرگ‌تر باشد، ضریب بازیابی استخراج کاهش می‌یابد. اگر ابعاد پایه درست انتخاب نشود، مقداری از سرمایه برجای گذاشته می‌شود. در نتیجه طراحی پایه‌ها در بهینه‌سازی عملیات معدن کاری بسیار مهم بوده و برای رسیدن به یک طرح ایمن و اقتصادی، مطالعات دقیق رفتار سنگ‌ها و تحلیل پایداری فضای استخراجی غیر قابل اجتناب است. در هر حال هدف نهایی، تعیین حداقل ابعاد پایه‌ها به ترتیبی که هم جنبه ایمنی و هم جنبه اقتصادی را تامین

کند، است. در بحث طراحی پایه‌ها میبایست به پایداری کارگاه‌های استخراج که نیز برای استخراج مواد معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرند توجه داشت.

در خصوص معدن رومرمر باید به این نکته دقت نمود که به دلیل شیب معدن و طراحی خاص استخراج آن، بار وارد بر پایه به صورت افقی است. به عبارت دیگر پایه‌ها به جای این که بین سقف و کف قرار گیرند، نگهدارنده دیواره‌های جانبی (که در معدن رومرمر به آن‌ها سقف و کف گفته می‌شود) هستند. این وضعیت در شکل ۵-۱، نشان داده شده است. مورد دیگری که در معدن رومرمر به دلیل طراحی خاص آن ملاحظه می‌شود، اهمیت پایداری سقف ایجاد شده برای هر طبقه است. در شکل ۵-۱، طرح معدن برای یک رگه به طور شماتیک نشان داده شده و همچنین عناصر تشکیل‌دهنده آن معرفی شده است.



شکل ۵-۱: طرح مفهومی استخراج معدن رومرمر برای یک رگه و عناصر تشکیل‌دهنده آن

به منظور تحلیل پایداری سقف ایجاد شده، می‌توان از روش‌های تجربی بررسی قابلیت تخریب/پایداری استفاده نمود. در مباحث معدنکاری، تخریب‌پذیری، مقیاس یا واحدی (اغلب غیر کمی) برای نشان دادن قابلیت تخریب شدن یک کانسار تحت شرایط محیطی خاص است. در کاربردهای معدنی معمولاً مساله اصلی در برآورد تخریب‌پذیری، تخمین ابعاد مورد نیاز زیربرش که با شعاع هیدرولیکی بیان می‌شود، به منظور شروع تخریب در یک توده سنگ با خواص مکانیکی معلوم

است. منظور از زیربرش فضای ایجاد شده در داخل زمین معمولاً با سقفی مسطح است. البته باید دقت نمود که در این قسمت هدف عدم تخریب سقف یا به عبارت دیگر پایداری سقف است. از میان عوامل تاثیرگذار بر پایداری یا تخریب سقف، عامل هندسی (شعاع هیدرولیکی) از مهم‌ترین عوامل محسوب می‌شوند. به عبارت دیگر، یک توده سنگ با ویژگی‌های ژئومکانیکی و شرایط محیطی مشخص، در صورت ایجاد زیربرش در آن، در صورتی که شعاع هیدرولیکی آن از یک حد مشخصی بیشتر نشود، در سقف یک فضای زیرزمینی پایدار می‌ماند. با افزایش ابعاد زیربرش، سقف به آستانه تخریب خواهد رسید.

به منظور طراحی مناسب‌تر معدن با هدف حداکثر بازیابی، ۱۲ سناریوی مختلف پیش‌بینی شده است. در این سناریوها ارتفاع کارگاه‌ها ۱۴، ۲۴، ۳۴ و ۴۴ متر، طول کارگاه‌ها ۱۴، ۲۴ و ۳۴ متر، عرض پایه‌های اصلی ۶ متر و طول پایه‌های کارگاهی ۶ متر در نظر گرفته شده است. سناریوهای مختلف بر اساس ترکیبی از این اندازه‌ها تعریف می‌شوند. هر یک از سناریوهای مختلف به روش تجربی مورد بررسی قرار گرفته و بدین ترتیب امکان‌پذیری یا عدم امکان‌پذیری هر سناریو مشخص می‌شود.

۵-۲- طراحی ابعاد مناسب پایه‌ها

مراحل طراحی پایه‌ها عبارتند از (عطایی، ۱۳۹۰):

تخمین بار (تنش) وارد بر پایه، تخمین مقاومت پایه و تعیین ضریب ایمنی پایه

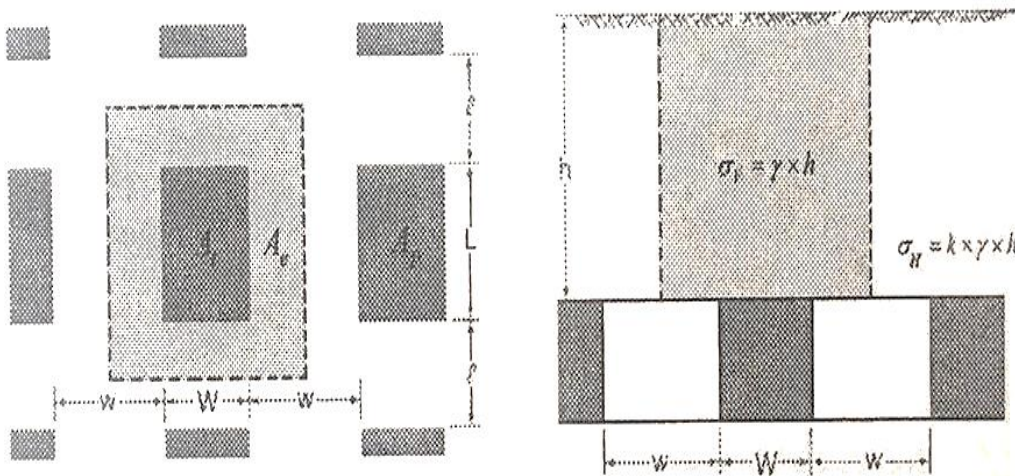
۵-۲-۱- برآورد بار وارد بر پایه با استفاده از روش‌های تجربی مناسب

پارامترهای متعددی از جمله عمق روباره، وزن مخصوص روباره، عرض فضا، طول پایه، عرض پایه، ضخامت لایه استخراج شده و خواص مکانیکی کانسار تاثیر زیادی بر الگوی توزیع تنش در پایه دارند. تئوری‌های متعددی برای محاسبه تنش متوسط پایه‌ها وجود دارد. این تئوری‌ها عبارتند از:

تئوری سطح تاثیر^۱، خیز تیر^۲، خیز پایه^۳ و ضریب پی^۴. تئوری‌های خیز تیر و خیز پایه بر اساس رفتار الاستیک خطی استوارند و شرایط بارگذاری روبره را می‌توان با تقریب خوبی به صورت یک تیر یا یک صفحه ضخیم در نظر گرفت (عطایی، ۱۳۹۰).

۵-۲-۱-۱- تئوری سطح تاثیر

معروف‌ترین تئوری تخمین تنش متوسط پایه، تئوری سطح تاثیر می‌باشد. در این پروژه از میان تئوری‌های محاسبه تنش متوسط در پایه‌ها، از تئوری سطح تاثیر به دلیل کاربرد گسترده آن استفاده می‌شود. این تئوری بر اساس تعادل نیروهای وارد بر پایه استوار است. طبق این تئوری پایه‌ها بار خود را در وسط با هم تقسیم می‌کنند. طبق تئوری سطح تاثیر، هر پایه می‌تواند تا فاصله نصف عرض راهروهای مجاور خود را نگهداری کند. همانطور که در شکل ۵-۲، مشاهده می‌شود، سطح دربرگیرنده خود پایه و نصف عرض راهروهای مجاور پایه، سطح تاثیر پایه خواهد بود. برای محاسبه ضریب بازیابی قبل از هر چیز باید سطح تاثیر هر پایه را محاسبه کرد.



شکل ۵-۲: تعیین تنش متوسط وارد بر پایه با استفاده از تئوری سطح تاثیر (Hoek and Brown, 1980)

^۱- Representative area Theory (Tributary area Theory)

^۲- Beam deflection concept

^۳- pillar deflection concept

^۴- concept of foundation coefficient

همانطور که قبل تر بیان شد، ضریب بازیابی برابر با نسبت ماده معدنی استخراج شده به کل ذخیره است. با استفاده از رابطه (۱-۵) می توان ضریب بازیابی هر پایه را محاسبه کرد.

$$R = \frac{A_m}{A_t} = \frac{A_t - A_p}{A_t} \quad \text{رابطه (۱-۵)}$$

$$A_t = A_m + A_p$$

که در این روابط A_t سطح تاثیر پایه، A_p سطح پایه، A_m سطح استخراج شده و R ضریب بازیابی می باشد.

طبق رابطه (۲-۵)، مقدار تنش عمودی (σ_v) برابر است با:

$$\sigma_v = \sum \gamma_i h_i \quad \text{رابطه (۲-۵)}$$

تنش عمودی که بر سطح تاثیر اعمال می شود باید توسط پایه تحمل شود. اگر S_p تنش متوسط وارد بر پایه باشد، رابطه تعادلی (۳-۵) زیر برقرار است:

$$S_p \times A_p = \sigma_v \times A_t \quad \text{رابطه (۳-۵)}$$

بنابراین:

$$S_p = \frac{A_t}{A_p} \sigma_v$$

$$S_p = \frac{1}{1-R} \sigma_v$$

رابطه (۳-۵) نشان می دهد که با افزایش درصد استخراج، تنش متوسط وارد بر پایه افزایش می یابد.

مقادیر تنش متوسط در هر نوع پایه محاسبه شده است که نتایج در جدول ۱-۵، درج شده

است. در این جدول، w_p و w_o به ترتیب عرض پایه و عرض اتاق و L_p و L_o به ترتیب طول پایه و طول اتاق هستند.

جدول ۵-۱: تنش متوسط در انواع پایه‌ها با استفاده از تئوری سطح تاثیر (عطایی، ۱۳۹۰)

| تنش متوسط وارد بر پایه | نوع پایه |
|---|----------|
| $S_p = (1 + \frac{w_o}{w_p})^2 \sigma_v$ | مربعی |
| $S_p = (1 + \frac{w_o}{w_p})(1 + \frac{L_o}{L_p}) \sigma_v$ | مستطیلی |
| $S_p = \frac{A_t}{A_p} \sigma_v$ | نامنظم |

۵-۲-۲- برآورد مقاومت پایه

یکی از عواملی که در تعیین ابعاد پایه‌های معدنی نقش کلیدی دارد. مقاومت پایه یا ظرفیت باربری پایه است. منظور از مقاومت پایه حداکثر باری است که پایه یا واحد سطح آن می‌تواند تحمل کند که به ابعاد، شکل هندسی، توجیه فضایی و خصوصیات توده سنگ تشکیل دهنده بستگی دارد.

۵-۲-۲-۱- روش‌های تجربی برای برآورد مقاومت پایه

در ۱۰۰ سال اخیر مدل‌های تجربی زیادی برای طراحی پایه‌ها در سنگ‌های سخت و نرم ارائه شده است. در جدول ۵-۲، تعدادی از روش‌های مرسوم آورده شده است.

جدول ۵-۲: مدل تجربی برای طراحی پایه‌ها

| نوع سنگ | مدل | مرجع | شماره |
|----------------|--|--------------------------|-------|
| سنگ آهک | $\sigma_p = 0.35\sigma_c (0.778 + 0.222(\frac{w}{h}))$ | Krauland & Soder., 1987 | ۱ |
| سنگ آهک/اسکارن | $\sigma_p = 0.31\sigma_c (0.778 + 0.222(\frac{w}{h}))$ | Sojoberg, J., 1992 | ۲ |
| سنگ‌های سخت | $\sigma_p = 0.44\sigma_c (0.68 + 0.52(\frac{w}{h}))$ | Lunder & Pakalnis., 1997 | ۳ |

در روابط σ_p ، مقاومت پایه بر حسب MPa، σ_c : مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر بر

حسب MPa، W: عرض پایه (m)، h: ارتفاع پایه (m)، می‌باشد.

۵-۲-۳- انتخاب ضریب ایمنی مناسب

پایداری پایه‌ها می‌تواند با محاسبه فاکتور ایمنی آن‌ها ارزیابی شود. این پارامتر با استفاده از رابطه (۱-۵) قابل محاسبه است.

$$FOS = \frac{\sigma_{CF}}{\sigma_{Pa}} \quad (۱-۵)$$

که در این رابطه FOS: فاکتور ایمنی، σ_{CF} : مقاومت پایه و σ_{Pa} : تنش وارد بر پایه است.

۵-۳- برآورد بار وارد بر پایه‌های معدن رومرمر

در این بخش، به‌منظور برآورد تنش وارد بر پایه‌های اصلی معدن رومرمر از روش سطح تاثیر استفاده شده است. همان‌طور که قبلاً بیان شد، به دلیل وضعیت خاص قرارگیری پایه‌های اصلی معدن رومرمر، تنش وارد بر پایه‌ها، تنش افقی است. برای محاسبه تنش افقی در عمق مورد نظر، نسبت تنش افقی به قائم (K) باید تعیین شود. از آنجا که در محدوده مورد نظر، مقدار K تعیین نشده است، با توجه به تغییرات K نسبت به عمق بر اساس مطالعات پیشین، در این پروژه مقدار K در سه حالت حد پایین، متوسط و بالا به‌ترتیب برابر ۱، ۱/۵ و ۲ در نظر گرفته شده است. با توجه به ضخامت متوسط رگه که برابر با ۸ متر تخمین زده شده است و همچنین شیب متوسط لایه که برابر ۳۵ درجه است، مقدار متوسط ارتفاع پایه اصلی برابر با ۱۴ متر محاسبه می‌شود. با توجه به روباره (h) ۳۵۰ متری و وزن مخصوص سنگ (γ) برابر با 27097 N/m^3 مقدار تنش عمودی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \gamma \times h \\ &= 27097 \times 350 \text{ N/m}^2 \\ &= 9.48 \text{ Mpa} \end{aligned} \quad (۳-۵)$$

بر اساس این مقدار و یکی از حالات ارتفاع کارگاه (۱۴ متر)، طول کارگاه (۱۴ متر) و عرض پایه اصلی (تعریف شده در شکل ۱-۵، که ۶ متر است)، مقدار تنش وارد بر پایه اصلی (S_p) بر اساس تئوری سطح تاثیر با توجه به مقادیر مختلف K، محاسبه و در جدول ۵-۳، ارائه شده است.

جدول ۵-۳: مقدار تنش وارد بر پایه بر اساس تئوری سطح تاثیر با توجه به مقادیر مختلف K

| تنش عمودی روباره (MPa) | نسبت تنش افقی به عمودی (K) | تنش افقی (MPa) | تنش وارد بر پایه اصلی بر اساس تئوری سطح تاثیر (S _p) (MPa) |
|---------------------------|----------------------------------|-------------------|---|
| ۹,۴۸ | ۱ | ۹,۴۸ | ۱۸,۵۹ |
| ۹,۴۸ | ۱,۵ | ۱۴,۲۲ | ۲۷,۸۹ |
| ۹,۴۸ | ۲ | ۱۸,۹۶ | ۳۷,۱۹ |

۵-۴- برآورد مقاومت پایه‌ها در معدن رومرمر

برای تخمین مقاومت پایه‌های اصلی، از روابط ارائه شده در جدول ۵-۲، استفاده شده است.

در این قسمت، از روابط ارائه شده برای سنگ آهک توسط کروند و سولدر^۱ (۱۹۸۷) و سوچویرگ^۲ (۱۹۹۲) و رابطه ارائه شده برای سنگ‌های سخت توسط لندر و پاکالنیس^۳ (۱۹۹۷) استفاده شده است.

با توجه به موقعیت خاص قرارگیری پایه‌های اصلی در معدن رومرمر، ارتفاع پایه اصلی در روابط به صورت تعریف شده در شکل ۵-۱، است. از طرف دیگر در حال حاضر طول پایه‌های کارگاهی (در راستای طول رگه) ۶ متر و طول کارگاه‌ها ۴ متر است. بر اساس سناریوهای انتخاب شده، در صورتی که پایه‌های کارگاهی یکی در میان استخراج (برداشت) شوند، طول پایه اصلی برابر ۱۴ متر و چنانچه از پایه‌های کارگاهی دو پایه برداشت شود و یک پایه باقی بماند، طول پایه اصلی برابر ۲۴ متر و در صورتی که سه پایه کارگاهی برداشت شود و یک پایه باقی بماند، طول پایه اصلی برابر ۳۴ متر در نظر گرفته می‌شود. عرض پایه اصلی در روابط نیز همانند روابط محاسبه بار پایه، برابر عرض پایه تعریف شده در شکل ۵-۱، یعنی ۶ متر فرض شده است. ارتفاع پایه با توجه به ضخامت لایه و شیب

¹ Krauland and Solder

² Sojoberg

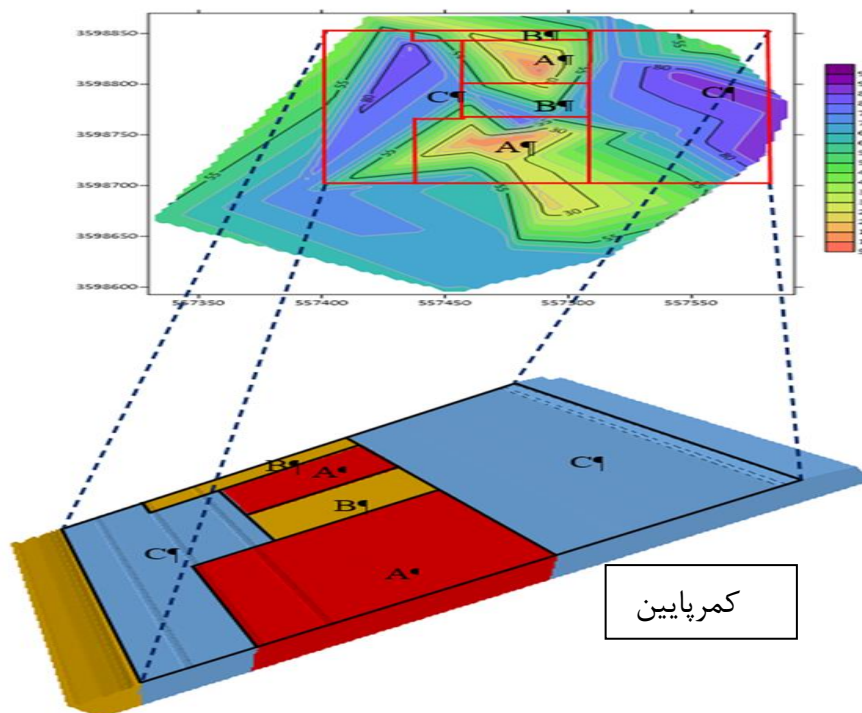
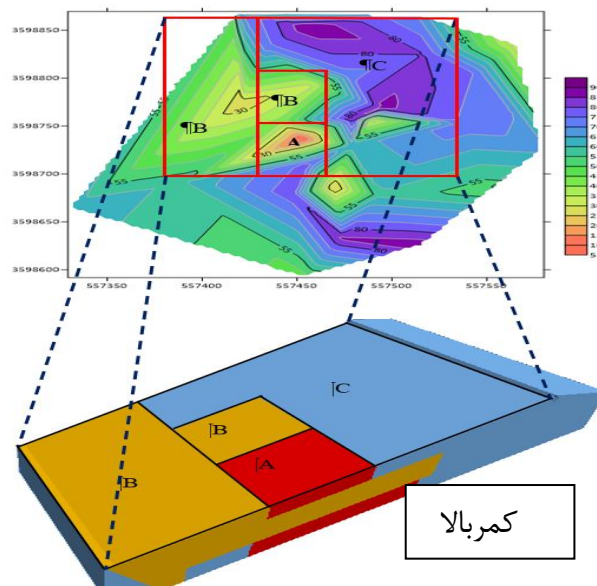
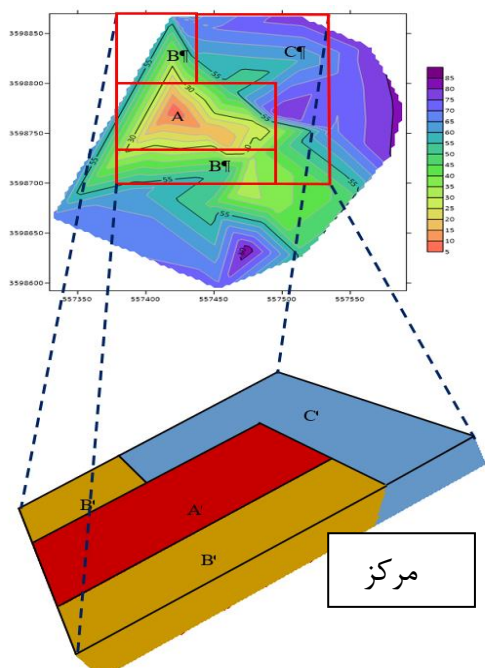
³ Lunder and Pakalnis

آن محاسبه می‌شود. برای حالت استخراج یک رگه با ضخامت متوسط ۸ متر، ارتفاع پایه ۱۴ متر منظور می‌شود و برای حالت استخراج دو رگه به‌طور همزمان با ضخامت متوسط ۱۵ متر، ارتفاع پایه ۲۶ متر در نظر گرفته می‌شود. مقاومت فشاری تک محوری نیز بر اساس نتایج آزمایشگاهی برابر ۲۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. بر اساس این مقادیر و با در نظر گرفتن مقادیر فرضی برای ارتفاع و عرض پایه اصلی (تعریف شده در شکل ۵-۱)، مقادیر مقاومت پایه‌ها بر اساس روابط تجربی تعیین شده، محاسبه و در جدول ۴-۵، ارائه شده است.

جدول ۴-۵: تعیین مقاومت پایه برای حالت استخراج یک رگه تنها بر اساس روابط تجربی مختلف

| میانگین مقاومت پایه (MPa) | مقاومت پایه (MPa) | ارتفاع پایه (متر) | عرض پایه (متر) | رابطه بر آورد مقاومت پایه |
|---------------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|------------------------------|
| ۶۵ | ۶۱/۱۴ | ۱۴ | ۶ | Krauland and Solder, 1987 |
| | ۵۴/۱۵ | ۱۴ | ۶ | Sojoberg, 1992 |
| | ۷۹/۵۲ | ۱۴ | ۶ | Lunder and Pakalnis, 1997 |

به دلیل تفاوت وضعیت درزه‌داری و کیفیت توده‌سنگ در ترازهای مختلف معدن، پهنه‌های A، B و C، شامل محدوده‌هایی با مقادیر مختلف RQD، در طراحی‌ها لحاظ شده است. پلان‌های کیفیت توده‌سنگ به همراه جانمایی این نواحی در طراحی‌ها، در شکل ۵-۳، نمایش داده شده است.



شکل ۵-۳: پهنه‌بندی توده‌سنگ بر اساس کیفیت توده‌سنگ (کمربالا، مرکز و کمرپایین ماده معدنی)

۵-۵- روش‌های تجربی موجود برای بررسی پایداری سقف

مهم‌ترین روش‌های تجربی موجود برای بررسی آستانه تخریب یا پایداری سقف، روش کینگ^۱، شاخص قابلیت تخریب^۲، حداقل عرض زیربرش^۳، نمودار تخریب لابسچر^۴، نمودار پایداری ماتیوس^۵، نمودار توسعه یافته ماتیوس^۶، نمودار پاتوین^۷ و نمودار پایداری استوارت و فورسیت^۸ است.

در این بخش، با تمرکز بر توده‌سنگ معدن رومرمر، به‌منظور برآورد ابعاد سقف پایدار در حالت بدون نگهداری یا به عبارت دیگر، تعیین ابعاد مناسب راهروها از روش‌های تجربی تعیین تخریب/پایداری توده‌سنگ استفاده می‌شود.

روش‌های تجربی تعیین تخریب/پایداری توده‌سنگ، با افزایش مطالعات موردی و دسترسی به داده‌های واقعی از معادن تخریب توده‌ای و پهنه‌ای بهبود یافته‌اند. در روش کینگ رابطه‌ای کمی بین RQD و قابلیت تخریب/پایداری توسعه داده شده است و فراوانی درزه‌ها به‌عنوان تنها عامل موثر بر پایداری در نظر گرفته شده است. در روش حداقل عرض زیربرش، با در نظر گرفتن مقاومت سنگ و تنش‌های القایی به‌عنوان عوامل موثر، حداقل عرض زیربرش برای جلوگیری از تشکیل سقف قوسی قابل تعیین است. عدم توجه به سایر عوامل موثر از نقاط ضعف این روش است.

روش نمودار لابسچر در دامنه سنگ‌های با مقاومت کم تخمین‌های قابل قبولی از تخریب/پایداری دارد، ولی به علت کم بودن مطالعات موردی در دامنه توده‌سنگ‌های با مقاومت بیشتر، تخمین‌های نادرستی از تخریب/پایداری، توسط نمودار لابسچر گزارش شده است. همچنین دستورالعمل‌های استفاده از ضرایب برای تعیین مقدار MRMR روشن و قابل فهم نیستند.

¹ King

² Cavability Index

³ UnderCut minimum span

⁴ Laubscher's caving chart

⁵ Mathews' stability graph

⁶ Extended Mathews stability graph

⁷ Potvin chart

⁸ Stewart & Forsyth stability graph

روش نمودار توسعه‌یافته ماتیوس دستورالعمل‌های دقیق‌تری نسبت به لابسچر برای تعیین ضرایب تعدیل ارایه کرده است ولی خطوط مرزی که گسیختگی اصلی را از ناحیه تخریب پیوسته جدا می‌کند به‌طور دقیق تعیین نشده است.

نمودار پاتوین، شامل دو ناحیه‌ی پایدار و تخریبی و یک ناحیه‌ی گذار است و صرفاً برای برآوردهای اولیه شعاع هیدرولیکی لازم، برای پایدار ماندن یا شروع تخریب، مناسب است.

نمودار پایداری استوارت و فورسیت نیز در راستای اصلاح نمودار پایداری ماتیوس ارایه شده است و شامل چهار ناحیه‌ی احتمالاً پایدار، احتمالاً ناپایدار، دارای احتمال وقوع شکست بزرگ و احتمالاً تخریبی و سه ناحیه‌ی گذار است. در این روش ناحیه‌ی تخریب، با قابلیت اطمینان بیشتری نسبت به نمودار ماتیوس و لابسچر رسم شده است.

به‌طور کلی روش‌های نمودار لابسچر و نمودار توسعه‌یافته ماتیوس نسبت به سایر روش‌ها از کاربرد بیشتری برخوردار هستند. از آنجا که روش ماتیوس برای طراحی کارگاه‌های باز توسعه داده شده است، علی‌رغم شفافیت بیشتر نسبت به روش لابسچر در استفاده از ضرایب تعدیل، کمتر استفاده شده است. در عین حال، روش نمودار لابسچر در خصوص توده‌سنگ‌های با مقاومت بالا، تخمین‌های نادرستی از پایداری/تخریب ارایه می‌دهد. روش نمودار استوارت و فورسیت نیز گرچه با استفاده از آنالیز برگشتی با استفاده از داده‌های معادن تخریب توده‌ای تخمین مناسبی در ناحیه تخریب‌پذیر انجام می‌دهد، اما به علت عدم وجود مرزهای مشخص بین نواحی چهارگانه در این نمودار، نسبت به روش‌های نمودار لابسچر و نمودار توسعه‌یافته ماتیوس، کمتر مورد استفاده قرار گرفته است.

با توجه به موضوعات پیش گفته، در این بخش بررسی وضعیت تخریب/پایداری محدوده معدن رومرر باما با دو روش نمودار پایداری ماتیوس و نمودار پایداری استوارت و فورسیت انجام شده است.

۵-۵-۱- روش نمودار پایداری ماتیوس

نمودار پایداری ماتیوس از نظر مفهومی بسیار شبیه به نمودار تخریب لابسچر است. ماتیوس این روش را برای طراحی کارگاه‌های باز^۱ و عمق کمتر از ۱۰۰۰ متر ارایه کرده است. طراحی در روش ماتیوس مطابق شکل ۵-۴، بر اساس برآیندی از دو پارامتر عدد پایداری (N) و ضریب شکل یا شعاع هیدرولیکی (S) انجام می‌شود. عدد پایداری نشان‌دهنده توانایی توده‌سنگ در حفظ پایداری تحت تنش‌های موجود است و ضریب شکل یا شعاع هیدرولیکی برای محاسبه هندسه سطح استفاده می‌شود. عدد پایداری در محور عمودی قرار می‌گیرد و برآوردی از کیفیت توده‌سنگ اطراف کارگاه را نشان می‌دهد. برای در نظر گرفتن تنش‌های القایی و جهت استخراج باید از ضرایب تعدیل استفاده شود. نمودار پایداری ماتیوس به سه ناحیه‌ی پایدار، احتمالاً ناپایدار و تخریبی و نیز دو ناحیه‌ی گذار تقسیم می‌شود.

در روش نمودار پایداری ماتیوس، از سیستم طبقه‌بندی Q' (عدد اصلاح شده‌ی کیفیت توده‌سنگ) برای برآورد کیفیت توده‌سنگ استفاده می‌شود. Q' از رابطه (۵-۵) قابل محاسبه است.

$$Q' = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \quad (۴-۵)$$

که در آن:

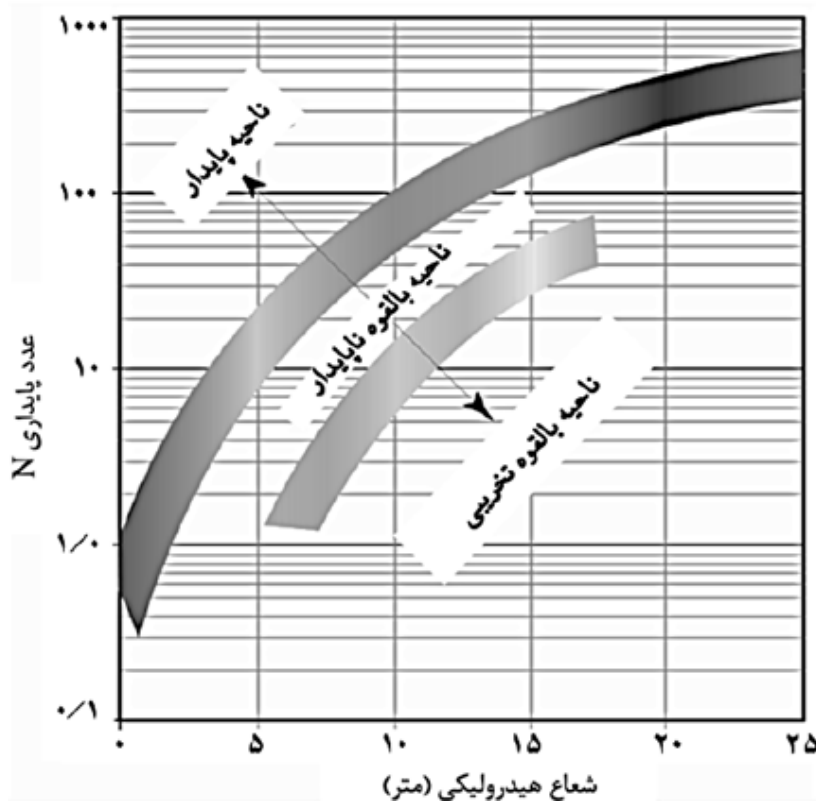
RQD: اندیس کیفیت توده‌سنگ

J_n: عدد دسته درزه در سیستم طبقه‌بندی Q

J_r: عدد زبری درزه در سیستم طبقه‌بندی Q

J_a: عدد هوازدگی درزه در سیستم طبقه‌بندی Q

^۱ Open stoping



شکل ۵-۴: نمودار پایداری ماتیوس (Mathews et al., 1980)

عدد پایداری مطابق رابطه (۵-)، از حاصل ضرب Q' در ضرایب تعدیل برای تنش‌های القایی، جهت ناپیوستگی و جهت جبهه کار به دست می‌آید.

$$N = Q' \times A \times B \times C \quad (۵-۵)$$

که در آن:

A: ضریب تعدیل تنش برابر با نسبت مقاومت سنگ بکر به تنش فشاری القایی در خط مرکزی جبهه کار

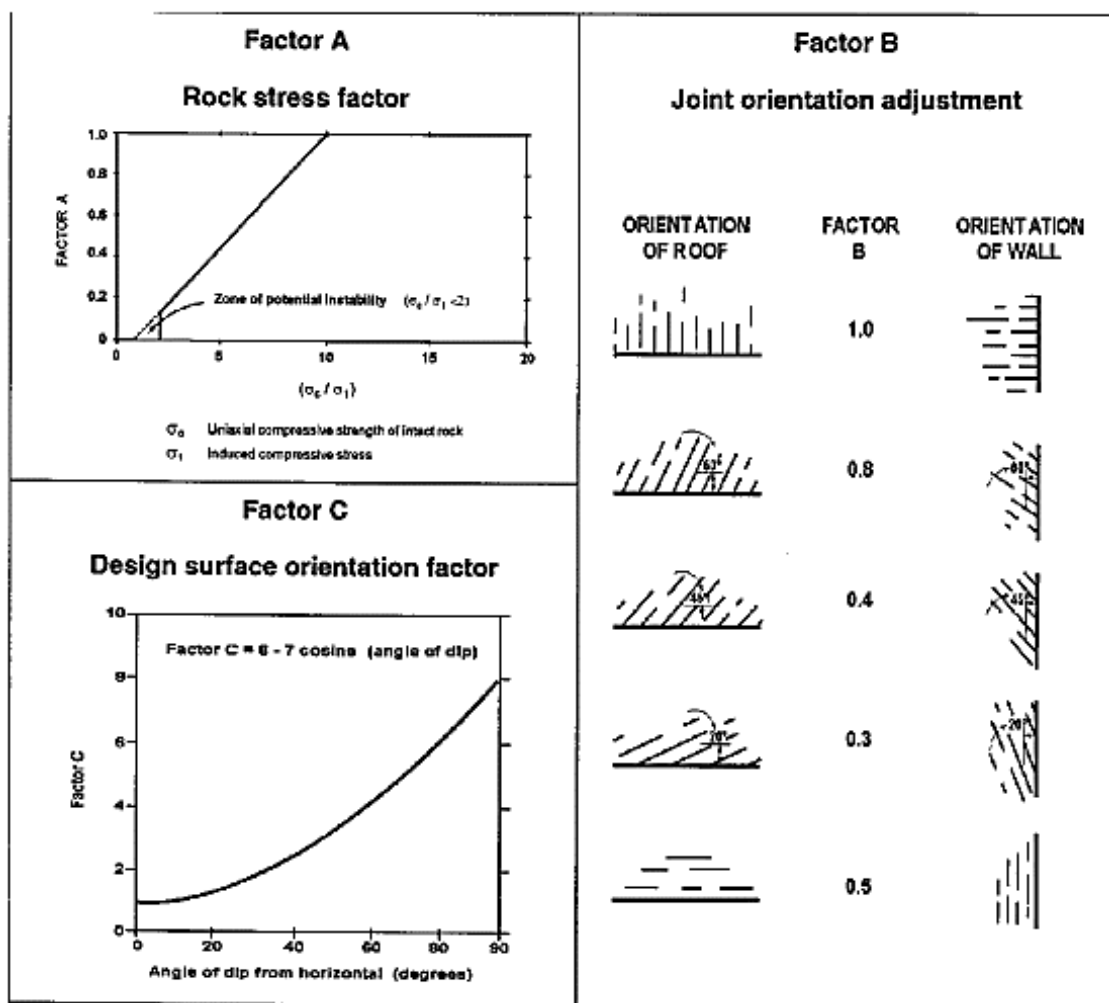
B: ضریب تعدیل جهت‌داری درزه برابر با زاویه‌ی اختلاف نسبی شیب جبهه کار و دسته درزه‌ی بحرانی

C: ضریب تعدیل جهت‌داری جبهه کار برابر با شیب سطح استخراجی و تأثیر آن بر پایداری جبهه کار است.

ضرایب تعدیل نمودار پایداری ماتیوس در شکل ۵-۵، نشان داده شده است.

هندسه‌ی کارگاه استخراج با محاسبه‌ی ضریب شکل در نظر گرفته می‌شود. این ضریب، بیانگر نسبت مساحت جبهه کار به محیط آن است.

نمودار پایداری ماتیوس بر پایه تجزیه و تحلیل بیش از ۳۵۰ مطالعه موردی از معادن زیرزمینی کانادا استوار است و در بر گیرنده عوامل اصلی موثر بر طراحی کارگاه‌های باز است (Suorineni et al., 2000).



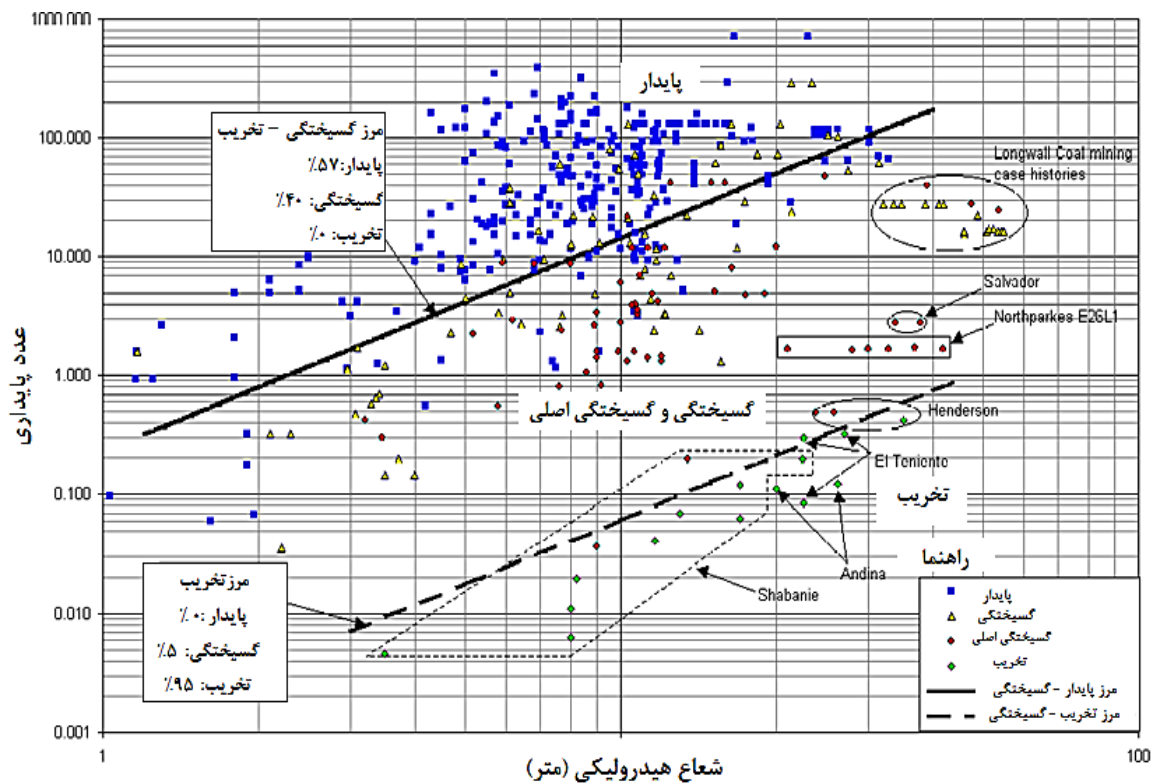
شکل ۵-۵: ضرایب تعدیل نمودار پایداری ماتیوس (Mathews et al., 1980)

۵-۵-۲- روش نمودار توسعه یافته ماتیوس

با افزایش مطالعات موردی در کاربرد نمودار پایداری ماتیوس، ترومن^۱ داده‌های مربوط به پایداری، گسیختگی‌های فرعی و اصلی مناطق مورد مطالعه را جمع‌آوری و روش ماتیوس را در دامنه وسیعی از خصوصیات توده‌سنگ توسعه داده است (Trueman, et al., 2000). شکل ۵-۶، نمودار تعمیم‌یافته‌ی لگاریتمی ماتیوس شامل داده‌های جدید و نواحی پایدار ترسیم شده به روش آماری است. این نمودار بر اساس پایگاه داده‌ای متشکل از ۴۰۰ نمونه از معدن چارلوت^۲ و سایر معادن استرالیا ترسیم شده است (Mawdesley, et al., 2001). روش ماتیوس دستورالعمل‌های دقیق‌تری نسبت به لابسچر برای تعیین ضرایب تعدیل ارائه کرده است. این کار باعث کاهش ذهنیت‌گرایی موجود در تجربه‌های شخصی شده است. در عین اینکه نمودار ماتیوس با اضافه نمودن داده‌های جدید تعمیم یافته است، اما به دلیل عدم وجود داده‌های کافی، تعریف دقیق خطوط گذار امکان‌پذیر نمی‌باشد و خطی که گسیختگی اصلی را از ناحیه تخریب پیوسته جدا می‌کند، نشان دهنده احتمال وقوع ۱۰۰ درصد تخریب نخواهد بود. در دسترس بودن داده‌های بیشتر منجر به محدود شدن عدم قطعیت و اعتماد بیشتر در استفاده از این روش برای پیش‌بینی پایداری یا قابلیت تخریب می‌شود (Mawdesley, 2002).

^۱ Trueman

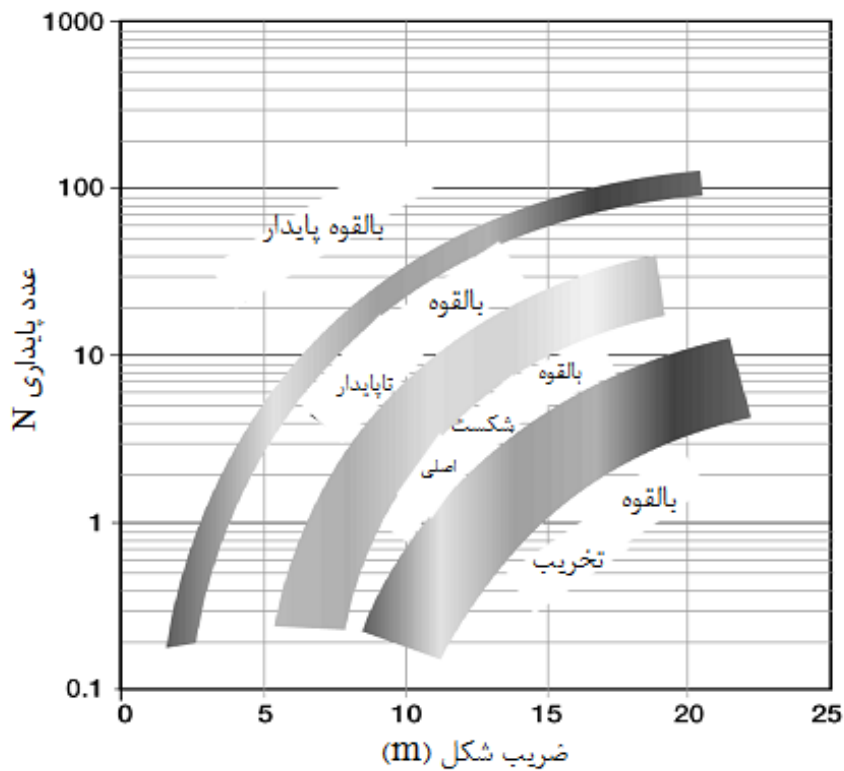
^۲ charlotte



شکل ۵-۶: نمودار تعمیم یافته‌ی پایداری ماتیوس با استفاده از رگرسیون آماری (Mawdsley, et al., 2001)

۵-۵-۳- نمودار پایداری استوارت و فورسیت

نمودار پایداری استوارت و فورسیت نیز در راستای اصلاح نمودار پایداری ماتیوس ارائه شده است. مطابق شکل ۵-۷، در نمودار پایداری استوارت و فورسیت، چهار ناحیه‌ی احتمالا پایدار، احتمالا ناپایدار، دارای احتمال وقوع شکست بزرگ و احتمالا تخریبی و سه ناحیه‌ی گذار وجود دارد. در نمودار پایداری استوارت و فورسیت، ناحیه‌ی احتمالا تخریبی بر مبنای نمودار تخریب لابسچر تقریب زده شده بود، اما از آنجا که داده‌ای برای اعتبار سنجی مکان قرارگیری خط تخریب وجود نداشت، استوارت و فورسیت با استفاده از آنالیز برگشتی نمونه‌هایی از معادن تخریب بلوکی و پهنه‌ای، ناحیه‌ی تخریب را در نمودار، با قابلیت اطمینان بیش‌تر ترسیم کردند (Mawdsley, et al., 2001).



شکل ۵-۷: نمودار اصلاح شده‌ی پایداری ماتیوس توسط استوارت و فورسیت (Stewart & Forsyth, 1995)

در عمل برای قضاوت در مورد پایداری یا تخریب‌پذیری یک توده‌سنگ با احداث یک زیربرش مشخص، باید با استفاده از تمامی روش‌های تجربی پیش‌گفته اقدام به برآورد قابلیت تخریب نمود و سپس از طریق قضاوت مهندسی، تحلیل عددی و مقایسه نتایج به‌دست آمده با موارد مشابه در مورد پایداری یا تخریب‌پذیری توده‌سنگ تصمیم‌گیری نمود.

۵-۶- برآورد پایداری محدوده معدن رومرمر با روش نمودار توسعه یافته ماتئوس

به منظور برآورد قابلیت تخریب/پایداری با روش نمودار توسعه یافته ماتئوس، مشخصات توده سنگ برداشت شده در منطقه معدن رومرمر در محاسبه عدد پایداری در نظر گرفته شده است. عدد پایداری برای سه پهنه A، B و C محاسبه شده است. چگالی سنگ در این محدوده مطالعاتی، برابر 2.76 gr/cm^3 تخمین زده شده است.

با فرض قرار گرفتن مدل توده سنگ مورد بررسی در عمق ۳۵۰ متری از سطح زمین و این که تنش قائم صرفاً ناشی از وزن طبقات بالاتر باشد، مقدار تنش قائم ناشی از روباره حدود $9/5 \text{ Mpa}$ برآورد شده است. با توجه به پلان کیفیت توده سنگ برای کمر بالای ماده معدنی، RQD حداقل و حداکثر برای پهنه A، به ترتیب معادل ۵ درصد و ۳۰ درصد، برای پهنه B، به ترتیب معادل ۳۰ درصد و ۵۵ درصد و برای پهنه C، به ترتیب معادل ۵۵ درصد و ۸۵ درصد منظور شده است. تنش‌های القایی موثر بر سطوح زیربرش بر اساس مدل‌سازی عددی هندسه‌های متفاوت زیربرش با شیب صفحات جانبی صفر، ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه در شرایط تنش مشابه توسط لابسچر و استرهویزن تعیین شده است (Esterhuizen, 2005).

با فرض افقی بودن سطوح جانبی (کمترین میزان تنش القایی) مقدار تنش القایی برابر با ۱۵ مگاپاسکال خواهد بود و چنانچه سطوح جانبی شیبی حدود ۴۰ درجه داشته باشند (بیشترین میزان تنش القایی)، تنش القایی حدود ۲۶ مگاپاسکال خواهد بود. لازم به ذکر است که با توجه به نبود اطلاعات کافی در ارتباط با وضعیت تنش‌ها در عمق، مقادیر مختلف RQD برای هر پهنه و همچنین جهت درزه‌داری نسبت به جهت پیشروی زیربرش، در محاسبه عدد پایداری، ضرایب تعدیل برای ناپایدارترین و پایدارترین حالت ممکن، فرض شده است. مقدار پارامتر J_n ، با توجه به وجود سه دسته درزه و یک دسته لایه‌بندی در محدوده، عدد ۹ انتخاب شده است. مقدار پارامتر J_r با توجه به سطح زیر و نامنظم و موج‌دار برای درزه‌ها در هر سه حالت حد بالا (خوش‌بینانه)، حد متوسط (منصفانه) و حد پایین (بدبینانه)، عدد ۳ پیش‌بینی شده است. مقدار پارامتر J_a ، از جداول امتیاز محاسبه Q، با

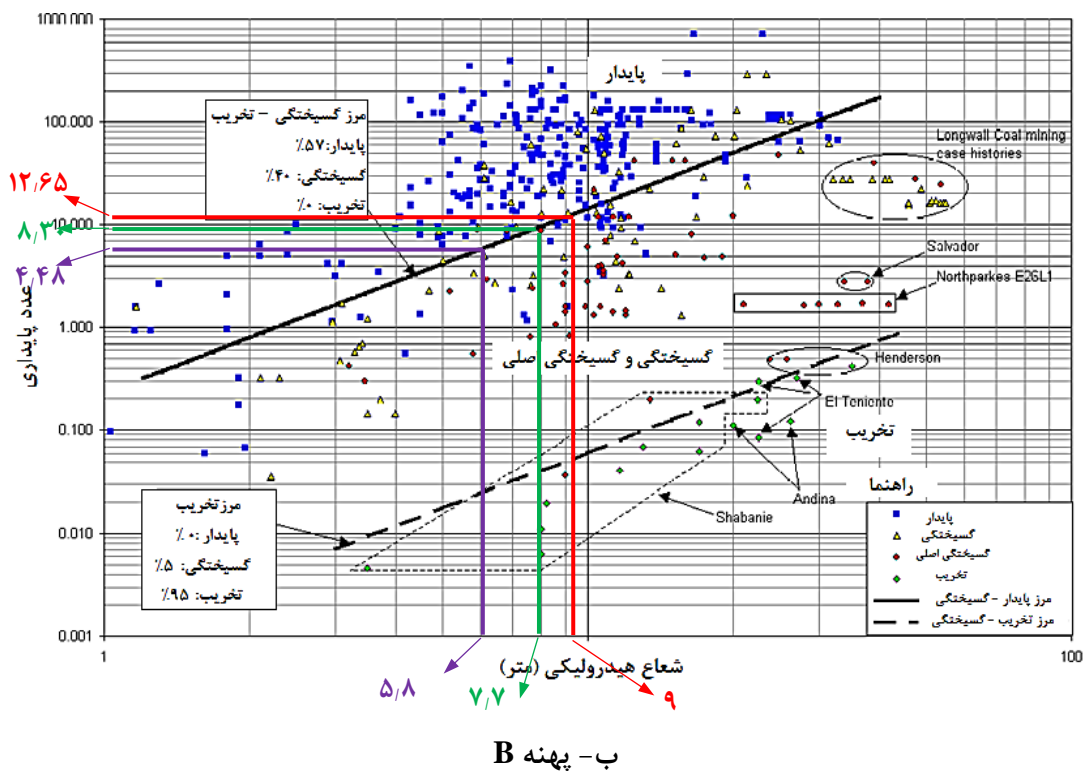
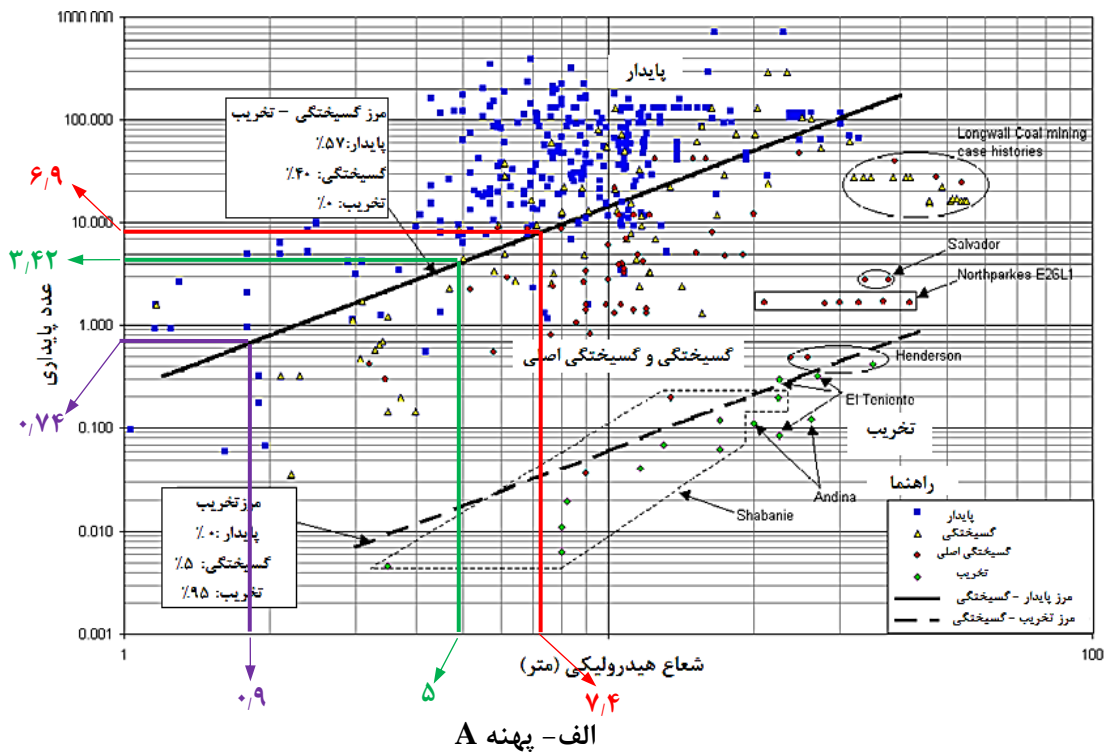
توجه به این که سطح درزه‌ها هوازده نشده و در بیشتر موارد به خوبی به یکدیگر جوش خورده‌اند، در هر سه حالت حد پایین، متوسط و بالا عدد ۱ منظور گردیده است.

با فرض میانگین مقاومت فشاری ۲۰۰ مگاپاسکال و حداقل و حداکثر تنش القایی فشاری در سقف تخریب به ترتیب برابر با ۱۵ و ۲۶ مگاپاسکال، با استفاده از نمودار شکل ۵-۵، ضریب تعدیل A حداقل ۰٫۶۵ و حداکثر ۱ به دست آمده است. با توجه به این که در میان چهار دسته درزه شناخته شده در محدوده، تنها دسته درزه چهارم بحرانی بوده و هم راستای تونل است، بنابراین برای محاسبه ضریب B این دسته درزه مد نظر قرار می‌گیرد. از آنجا که شیب دسته درزه چهارم ۶۸ درجه است، اختلاف شیب این دسته درزه و شیب سقف کارگاه (که هم شیب رگه است) برابر ۳۳ درجه محاسبه می‌شود. بنابراین با استفاده از شکل ۵-۵ مقدار ۰٫۳ برای حالت‌های بدبینانه، واقع بینانه و خوش بینانه، برای ضریب B انتخاب شده است. به دلیل آن که زاویه شیب جبهه کار (شیب سطح استخراجی یا به عبارت دیگر شیب سقف کارگاه) نسبت به سطح افق برابر ۳۵ درجه است با توجه به شکل ۵-۵، مقدار ۲٫۳ برای ضریب تعدیل C منظور شده است. با در نظر گرفتن موارد فوق، مقادیر عدد پایداری N برای پهنه A، B و C، محاسبه و در جدول ۵-۵ درج شده است.

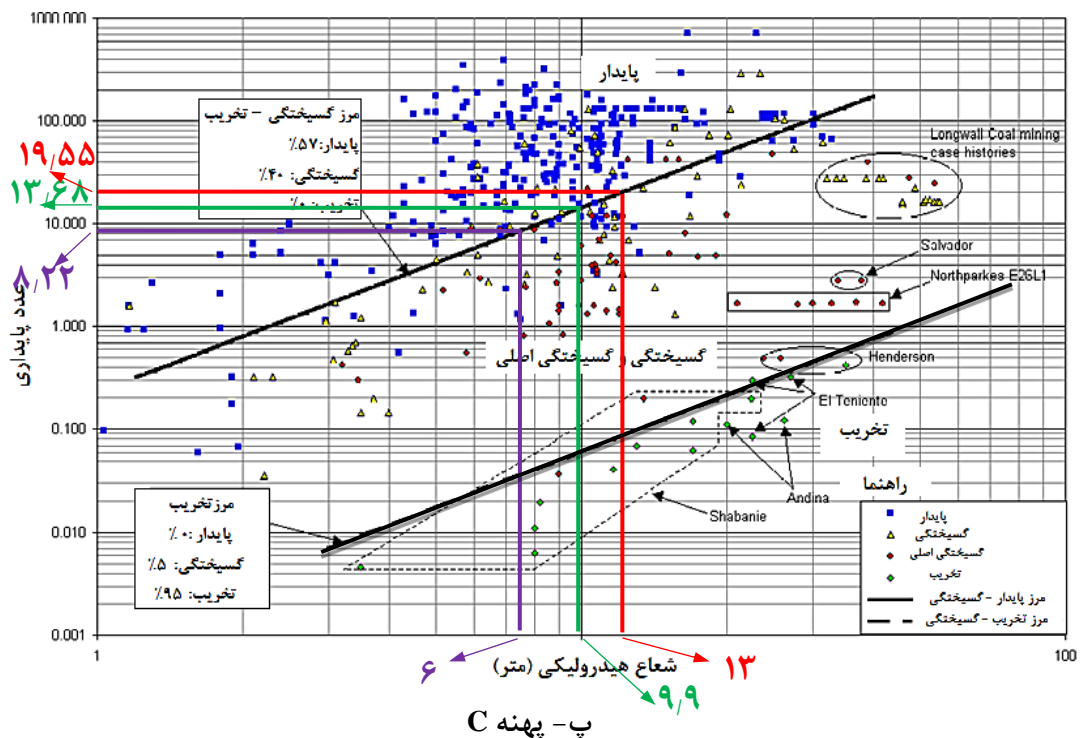
جدول ۵-۵: محاسبه عدد پایداری برای محدوده معدن رومرمر

| پهنه | حالت | RQD | Jn | Jr | Ja | Q | ضریب A | ضریب B | ضریب C | عدد پایداری |
|--------|----------|------|----|----|----|-------|--------|--------|--------|-------------|
| پهنه A | حد پایین | ۵ | ۹ | ۳ | ۱ | ۱٫۶۶ | ۰٫۶۵ | ۰٫۳ | ۲٫۳ | ۰٫۷۴ |
| | میانگین | ۱۷٫۵ | ۹ | ۳ | ۱ | ۵٫۸۳ | ۰٫۸۵ | ۰٫۳ | ۲٫۳ | ۳٫۴۲ |
| | حد بالا | ۳۰ | ۹ | ۳ | ۱ | ۱۰ | ۱ | ۰٫۳ | ۲٫۳ | ۶٫۹ |
| پهنه B | حد پایین | ۳۰ | ۹ | ۳ | ۱ | ۱۰ | ۰٫۶۵ | ۰٫۳ | ۲٫۳ | ۴٫۴۸ |
| | میانگین | ۴۲٫۵ | ۹ | ۳ | ۱ | ۱۴٫۱۶ | ۰٫۸۵ | ۰٫۳ | ۲٫۳ | ۸٫۳۰ |
| | حد بالا | ۵۵ | ۹ | ۳ | ۱ | ۱۸٫۳۳ | ۱ | ۰٫۳ | ۲٫۳ | ۱۲٫۶۵ |
| پهنه C | حد پایین | ۵۵ | ۹ | ۳ | ۱ | ۱۸٫۳۳ | ۰٫۶۵ | ۰٫۳ | ۲٫۳ | ۸٫۲۲ |
| | میانگین | ۷۰ | ۹ | ۳ | ۱ | ۲۳٫۳۳ | ۰٫۸۵ | ۰٫۳ | ۲٫۳ | ۱۳٫۶۸ |
| | حد بالا | ۸۵ | ۹ | ۳ | ۱ | ۲۸٫۳۳ | ۱ | ۰٫۳ | ۲٫۳ | ۱۹٫۵۵ |

با ترسیم اعداد پایداری محاسبه شده، در نمودار پایداری ماتیوس مقادیر حد پایین و میانگین و حد بالای شعاع هیدرولیکی برای پایداری سقف کارگاه برای پهنه A، B و C مطابق شکل ۵-۸، الف، ب و پ به دست آمده است.



شکل ۵-۸: بررسی شعاع هیدرولیکی پایدار محدوده‌ی رومرمر با استفاده از نمودار تعمیم یافته ماتیوس

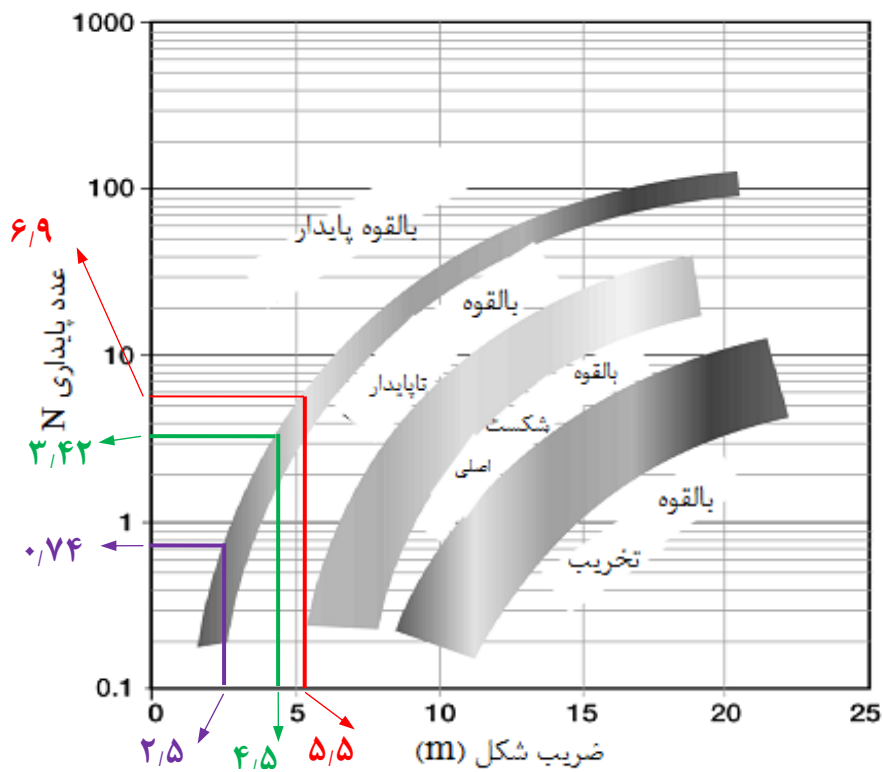


ادامه‌ی شکل ۵-۸: بررسی شعاع هیدرولیکی پایدار محدوده‌ی رومرمر با استفاده از نمودار تعمیم یافته ماتیوس

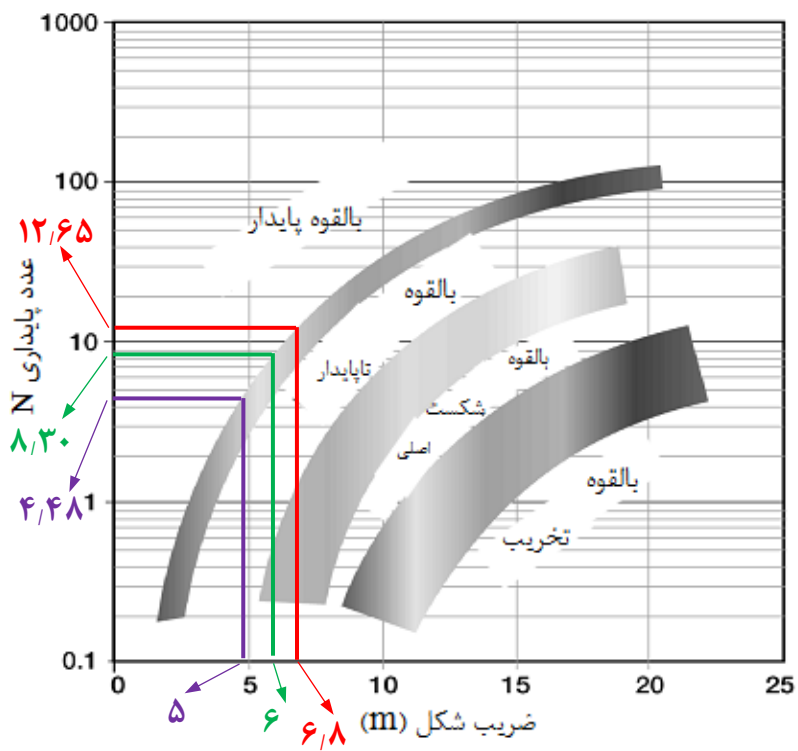
۵-۷- برآورد پایداری محدوده معدن رومرمر با روش استوارت و فورسیت

بررسی قابلیت تخریب/پایداری به روش استوارت و فورسیت برای پهنه‌های A، B و C به تفکیک بر اساس اعداد پایداری محاسبه شده در جدول ۵-۵، بررسی شده است. در شکل ۵-۹، الف، ب و پ، شعاع هیدرولیکی برای حد پایین، میانه و حد بالای اعداد پایداری برای هر پهنه مشخص شده است. همان‌طور که در شکل ۵-۹، مشاهده می‌شود، حد بالای شعاع هیدرولیکی محاسبه شده برای پهنه‌های A، B و C به ترتیب معادل ۵/۵، ۶/۸ و ۸ به دست آمده است.

با مقایسه شعاع هیدرولیکی به دست آمده از این روش و شعاع هیدرولیکی محاسبه شده در روش نمودار توسعه یافته ماتیوس، مشاهده می‌شود شعاع هیدرولیکی محاسبه شده در این روش، تقریباً در تمامی حالات نسبت به اعداد به دست آمده از روش توسعه یافته ماتیوس کمتر است. به عبارت دیگر، شعاع هیدرولیکی به دست آمده از روش استوارت و فورسیت نسبت به روش نمودار توسعه یافته ماتیوس محافظه کارانه تر است.

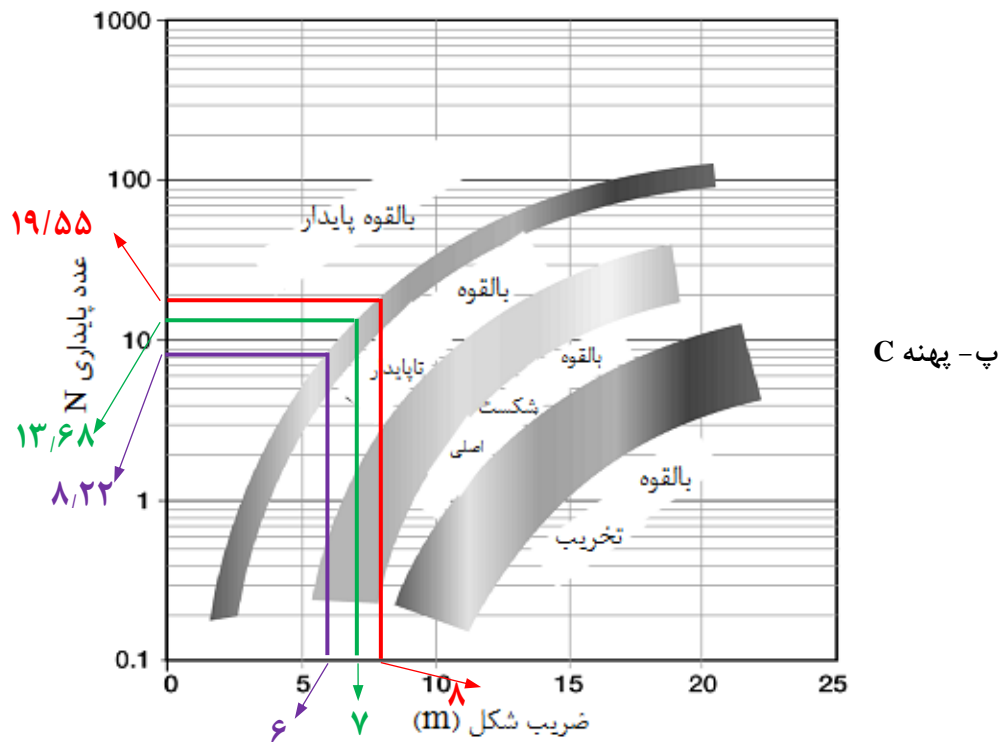


الف - پهنه A



ب - پهنه B

شکل ۵-۹: بررسی شعاع هیدرولیکی پایدار محدوده‌ی رومرمر با استفاده از نمودار استوارت و فورسیت



ادامه شکل ۵-۹: بررسی شعاع هیدرولیکی پایدار محدوده‌ی رومرمر با استفاده از نمودار استوارت و فورسیت

۵-۸- تعیین ابعاد کارگاه‌ها و پایه‌های معدن رومرمر با هدف دستیابی به نسبت استخراج

بیشینه

در این بخش، سناریوهای مختلف طراحی معدن بر اساس روش‌های تجربی تحلیل پایداری شده و بهترین سناریو با هدف حداکثر نمودن درصد استخراج انتخاب خواهد شد. هر سناریو در ۹ حالت (سه حالت مختلف نسبت تنش افقی به عمودی (K) و سه حالت بدبینانه، واقع‌بینانه و خوش-بینانه و همچنین سه پهنه) بررسی شده است. سناریوهای اول تا دوازدهم برای حالت استخراج یک رگه تنها و دو رگه (V4 و V4+) به‌طور همزمان، بررسی شده است. در تمامی سناریوها، مقاومت فشاری تک محوری سنگ بکر برابر ۲۰۰ مگاپاسکال، عرض پایه (تعریف شده شکل ۵-۱) برابر ۶ متر در نظر گرفته شده است. ضریب ایمنی برای تصمیم‌گیری در خصوص پایداری یا ناپایداری پایه نیز ۱/۲ در نظر گرفته شده است.

۵-۸-۱- سناریوی اول (ارتفاع کارگاه ۴۴ متر و طول کارگاه ۳۴ متر)

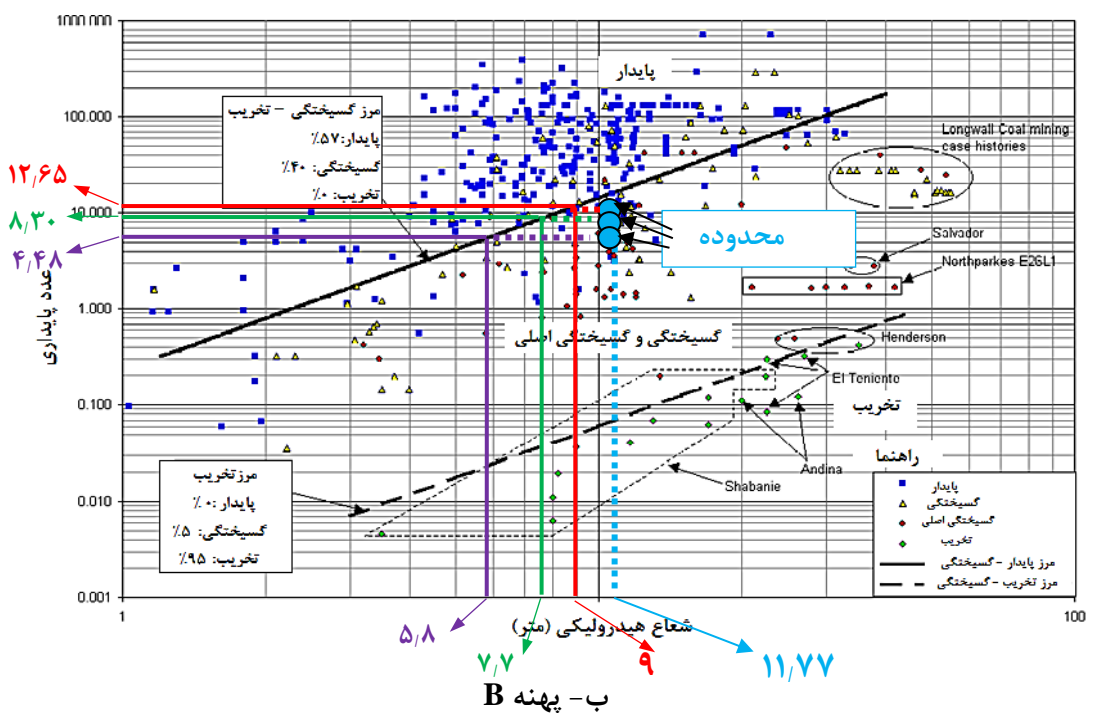
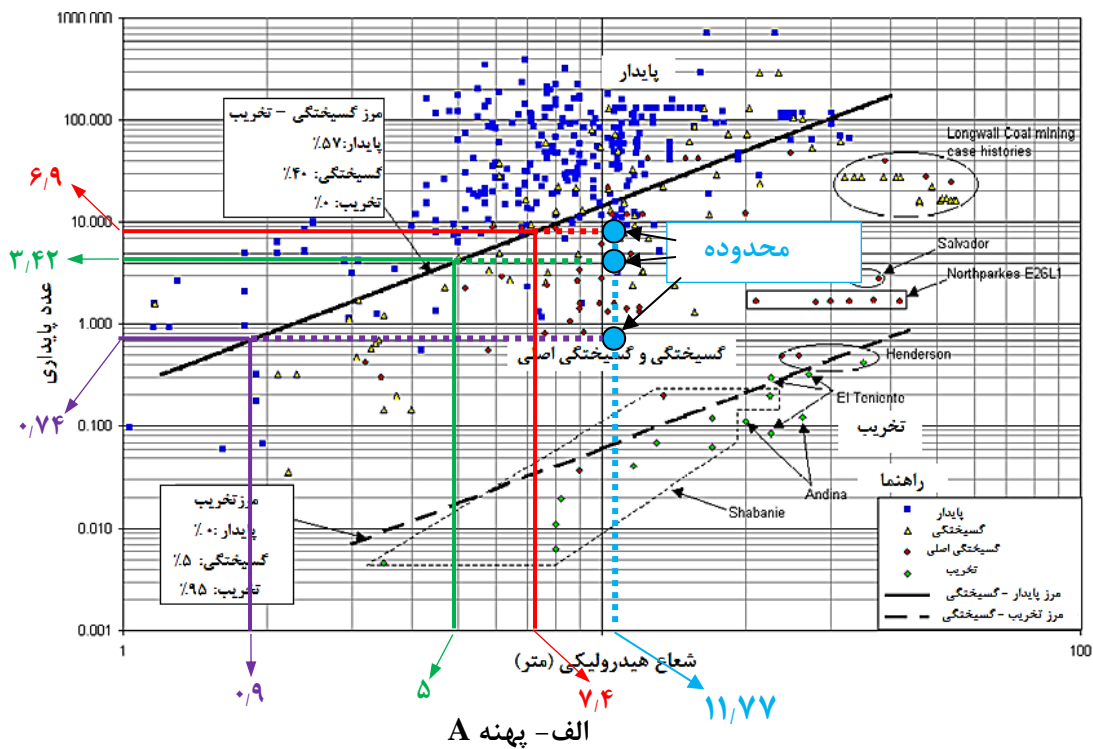
بر اساس سناریوی اول، مقادیر بار وارد بر پایه، مقاومت پایه، ضریب اطمینان و شعاع

هیدرولیک به صورت جدول ۵-۶، محاسبه و ارایه شده است.

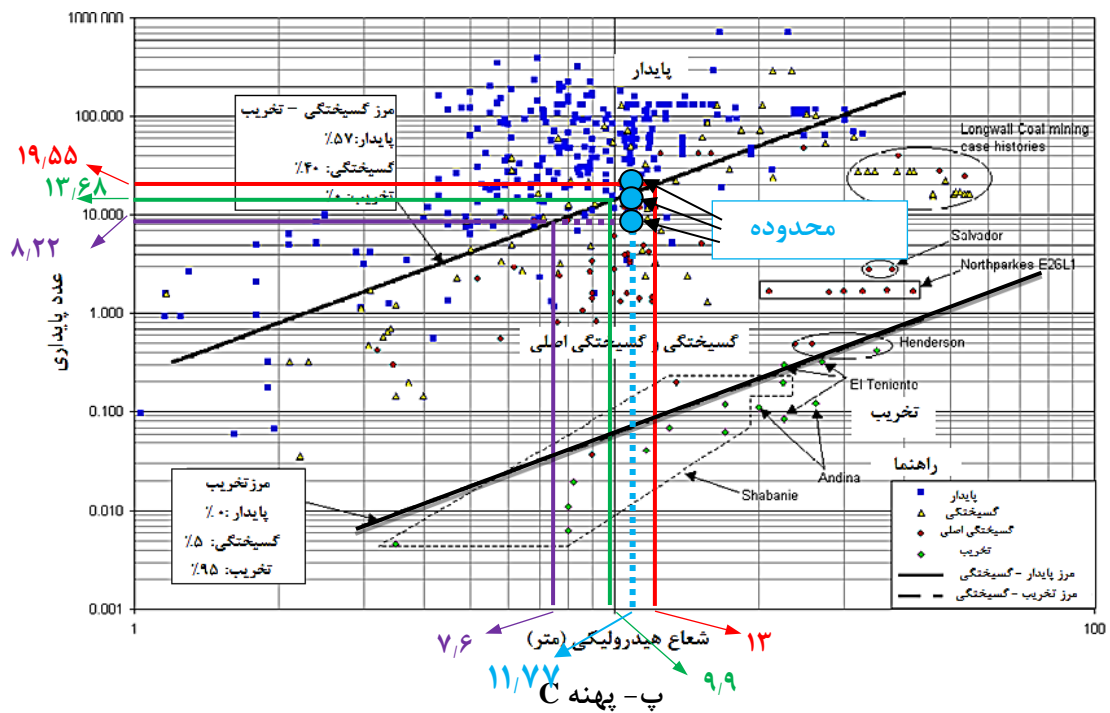
جدول ۵-۶: پارامترهای طراحی و وضعیت پایه در سناریوی اول (ارتفاع کارگاه ۴۴ متر و طول کارگاه ۳۴ متر)

| وضعیت پایداری | ضریب اطمینان | میانگین مقاومت پایه (MPa) | تنش (بار) وارد بر پایه | | ارتفاع پایه h (متر) | عرض پایه (متر) | ارتفاع کارگاه (متر) | طول کارگاه = طول پایه (متر) | حالت استخراج |
|---------------|--------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|----------------|---------------------|-----------------------------|-------------------|
| | | | اندازه تنش افقی (MPa) | تنش افقی به عمودی (K) | | | | | |
| پایدار | ۱٫۷۲ | ۶۵ | ۳۷٫۶۳ | ۱ | ۱۴ | ۶ | ۴۴ | ۳۴ | یک رگه |
| ناپایدار | ۱٫۱۵ | | ۵۶٫۴۵ | ۱٫۵ | | | | | |
| ناپایدار | ۰٫۸۶ | | ۷۵٫۲۶ | ۲ | | | | | |
| پایدار | ۱٫۵۹ | ۶۰ | ۳۷٫۶۳ | ۱ | ۲۶ | ۶ | ۴۴ | ۳۴ | دو رگه (V4+ و V4) |
| ناپایدار | ۱٫۰۶ | | ۵۶٫۴۵ | ۱٫۵ | | | | | |
| ناپایدار | ۰٫۳۸ | | ۷۵٫۲۶ | ۲ | | | | | |

در این شرایط با توجه به طول پایه و ارتفاع کارگاه، شعاع هیدرولیکی برابر ۱۱٫۷۷ به دست می‌آید. در شکل ۵-۱۰ و شکل ۵-۱۱، پایداری سقف، برای سه پهنه A، B و C و همچنین سه حالت RQD حد پایین (بدبینانه)، حد میانگین (متوسط) و حد بالا (خوش بینانه) با استفاده از دو روش نمودار توسعه- یافته ماتیوس و نمودار استوارت و فورسیت بررسی شده است. قابل ذکر است سقف ایجاد شده برای حالت استخراج یک رگه و دورگه V4+ و V4 به طور همزمان، از لحاظ ابعادی تفاوتی ندارد. نتایج به طور خلاصه در جدول ۵-۷، ارایه شده است.

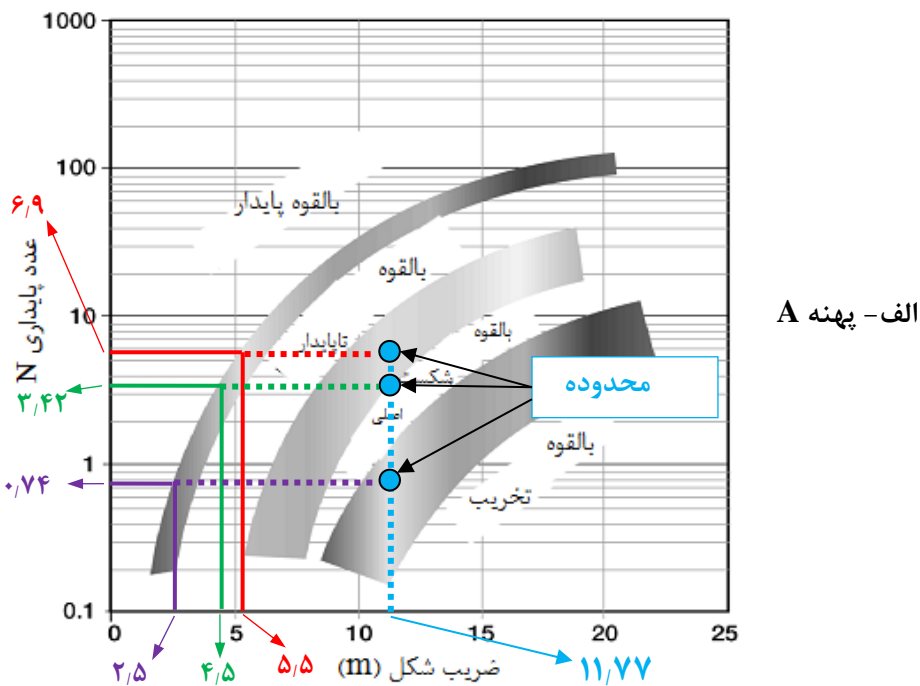


شکل ۵-۱۰: بررسی پایداری سقف محدوده‌ی رومرمر برای سناریوی اول با استفاده از نمودار توسعه‌یافته ماتپوس

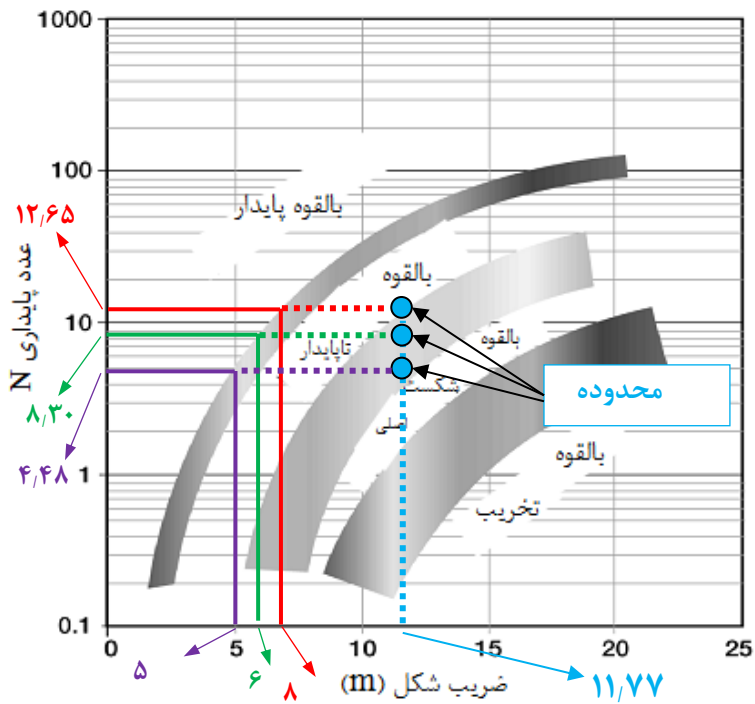


ادامه‌ی شکل ۵-۱۰: بررسی پایداری سقف محدوده‌ی رومرمر برای سناریوی اول با استفاده از نمودار توسعه‌یافته

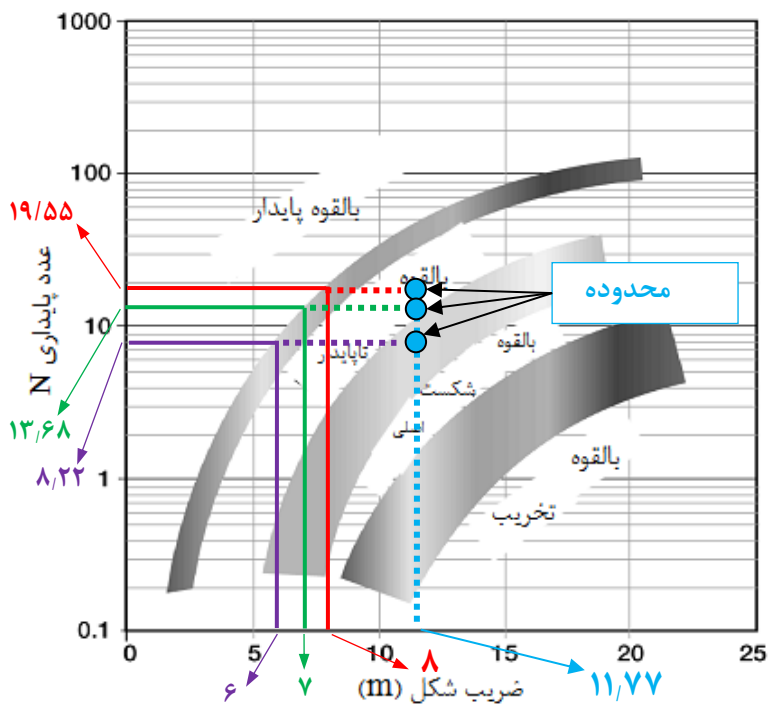
ماتیوس



شکل ۵-۱۱: بررسی پایداری سقف محدوده‌ی رومرمر برای سناریوی اول با استفاده از نمودار استوارت و فورسیت



ب- پهنه B



ب- پهنه C

ادامه شکل ۵-۱۱: بررسی پایداری سقف محدوده‌ی رومرمر برای سناریوی اول با استفاده از نمودار استوارت و فورسیت

جدول ۵-۷: وضعیت پایداری سقف محدوده‌ی رومرمر برای سناریوی اول

| وضعیت پایداری | | شعاع هیدرولیکی محدوده رومرمر | عدد پایداری | حالت RQD | پهنه |
|-----------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|----------------|-------------|--------|
| روش نمودار استوارت و فورسیت | روش نمودار توسعه یافته ماتیوس | | | | |
| ناپایدار | ناپایدار | ۱۱,۷۷ | ۰,۷۴ | حد پایین | پهنه A |
| ناپایدار | ناپایدار | ۱۱,۷۷ | ۳,۴۲ | میانگین | |
| ناپایدار | ناپایدار | ۱۱,۷۷ | ۶,۹ | حد بالا | |
| ناپایدار | ناپایدار | ۱۱,۷۷ | ۴,۴۸ | حد پایین | پهنه B |
| ناپایدار | ناپایدار | ۱۱,۷۷ | ۸,۳۰ | میانگین | |
| ناپایدار | ناپایدار | ۱۱,۷۷ | ۱۲,۶۵ | حد بالا | |
| ناپایدار | ناپایدار | ۱۱,۷۷ | ۸,۲۲ | حد پایین | پهنه C |
| ناپایدار | ناپایدار | ۱۱,۷۷ | ۱۳,۶۸ | میانگین | |
| ناپایدار | پایدار | ۱۱,۷۷ | ۱۹,۵۵ | حد بالا | |

بنابراین در سناریو اول، بر اساس جدول ۵-۶، برای هر دو حالت استخراج یک رگه و دو رگه به‌طور هم‌زمان، پایه‌ها در حالت نسبت تنش افقی به عمودی $K=1$ ، پایدار و در دو حالت $K=1.5$ و $K=2$ ناپایدار هستند. همچنین بر اساس نتایج به‌دست آمده از جدول ۵-۷، بر اساس هر دو معیار نمودار توسعه‌یافته ماتیوس و نمودار استوارت و فورسیت، وضعیت سقف در پهنه‌های A و B در هر سه حالت RQD، بدبینانه، متوسط و خوش‌بینانه، ناپایدار است. تنها در حالت خوش‌بینانه RQD برای پهنه C و فقط بر اساس معیار نمودار توسعه‌یافته ماتیوس، سقف پایدار است. در مجموع می‌توان سناریوی اول را از لحاظ پایداری پایه و پایداری سقف، در تمامی حالات ناپایدار پیش‌بینی نمود.

۵-۸-۲- سناریوی دوم (ارتفاع کارگاه ۴۴ متر و طول کارگاه ۲۴ متر)

بر اساس سناریوی دوم، مقادیر بار وارد بر پایه، مقاومت پایه، ضریب اطمینان و شعاع هیدرولیک به صورت جدول ۵-۸، محاسبه و ارائه شده است. وضعیت پایداری سقف محدوده‌ی رومرمر برای سناریوی دوم در جدول ۵-۹، شده است.

جدول ۵-۸: پارامترهای طراحی و وضعیت پایه در سناریوی دوم (ارتفاع کارگاه ۴۴ متری و طول کارگاه ۲۴ متری)

| وضعیت پایداری | ضریب اطمینان | میانگین مقاومت پایه (MPa) | تنش (بار) وارد بر پایه | | ارتفاع پایه h (متر) | عرض پایه (متر) | ارتفاع کارگاه (متر) | طول کارگاه = طول پایه (متر) | حالت استخراج |
|---------------|--------------|---------------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|----------------|---------------------|-----------------------------|-------------------|
| | | | اندازه تنش افقی (MPa) | تنش افقی به عمودی (K) | | | | | |
| پایدار | ۲,۰۲ | ۶۵ | ۳۲,۰۴ | ۱ | ۱۴ | ۶ | ۴۴ | ۲۴ | یک رگه |
| پایدار | ۱,۳۵ | | ۴۸,۰۶ | ۱,۵ | | | | | |
| ناپایدار | ۱,۰۱ | | ۶۴,۰۸ | ۲ | | | | | |
| پایدار | ۱,۸۷ | ۶۰ | ۳۲,۰۴ | ۱ | ۲۶ | ۶ | ۴۴ | ۲۴ | دو رگه (V4 و V4+) |
| پایدار | ۱,۲۴ | | ۴۸,۰۶ | ۱,۵ | | | | | |
| ناپایدار | ۰,۹۳ | | ۶۴,۰۸ | ۲ | | | | | |

جدول ۵-۹: وضعیت پایداری سقف محدوده‌ی رومرمر برای سناریوی دوم

| وضعیت پایداری | | شعاع هیدرولیکی محدوده رومرمر | عدد پایداری | حالت RQD | پهنه |
|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|-------------|----------|--------|
| روش نمودار استوارت و فورسیت | روش نمودار توسعه یافته ماتیوس | | | | |
| ناپایدار | ناپایدار | ۹,۱۴ | ۰,۷۴ | حد پایین | پهنه A |
| ناپایدار | ناپایدار | ۹,۱۴ | ۳,۴۲ | میانگین | |
| ناپایدار | ناپایدار | ۹,۱۴ | ۶,۹ | حد بالا | |
| ناپایدار | ناپایدار | ۹,۱۴ | ۴,۴۸ | حد پایین | پهنه B |
| ناپایدار | ناپایدار | ۹,۱۴ | ۸,۳۰ | میانگین | |
| ناپایدار | ناپایدار | ۹,۱۴ | ۱۲,۶۵ | حد بالا | |
| ناپایدار | ناپایدار | ۹,۱۴ | ۸,۲۲ | حد پایین | پهنه C |
| ناپایدار | پایدار | ۹,۱۴ | ۱۳,۶۸ | میانگین | |
| ناپایدار | پایدار | ۹,۱۴ | ۱۹,۵۵ | حد بالا | |

مقادیر بار وارد بر پایه، مقاومت پایه، ضریب اطمینان، وضعیت پایداری پایه‌ها و سقف مطابق سناریوی اول، برای بقیه سناریوها نیز بدست آمده و به منظور جلوگیری از حجم زیاد مطالب، نتایج پایداری پایه‌ها و سقف در جدول ۵-۱۱ آورده شده است. در ضمن شعاع هیدرولیکی سناریوهای سه تا دوازده نیز مطابق جدول ۵-۱۰، است.

جدول ۵-۱۰: شعاع هیدرولیکی سناریوهای سه تا دوازده

| شماره سناریو | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ |
|----------------|------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| شعاع هیدرولیکی | ۵/۹۱ | ۱۰/۸۰ | ۸/۵۴ | ۵/۶۶ | ۹/۳۷ | ۷/۶۲ | ۵/۶۶ | ۷/۱۰ | ۶/۰۵ | ۴/۴۴ |

۵-۹- جمع‌بندی

در این جمع‌بندی، نتایج حاصل از بررسی سناریوهای مختلف ارائه شده و برای حالت‌های استخراج یک رگه و دو رگه به‌طور همزمان، حالت‌های مختلف نسبت تنش افقی به عمودی (K) و سه پهنه A، B و C و همچنین حالت‌های متفاوت RQD پهنه‌ها (حد پایین، متوسط و بالا) بهترین سناریو یا سناریوها معرفی شده است. نتایج جمع‌بندی در جدول ۵-۱۱، ارائه شده است. در تمامی حالت‌ها در صورتی که وضعیت پایه پایدار باشد، وضعیت پایداری سقف بررسی شده است. بدین معنی که اگر پایه ناپایدار باشد، سناریو ناموفق ارزیابی می‌شود. برای بررسی وضعیت سقف، چون بر اساس دو معیار نمودار توسعه‌یافته ماتیوس و نمودار استوارت و فورسیت بررسی‌ها انجام شده است و در بعضی حالت‌ها نتیجه تحلیل پایداری این دو روش یکسان نیست، از دو رنگ سبز و زرد استفاده شده است. در صورتی که وضعیت پایداری سقف بر اساس هر دو روش پایدار تشخیص داده شود، از رنگ سبز استفاده می‌شود. در صورتی که پایداری سقف بر اساس یک روش پایدار و بر اساس روش دیگر ناپایدار تشخیص داده شود، از رنگ زرد برای بیان وضعیت پایداری سقف استفاده شده است. حالت ناپایدار به رنگ قرمز نشان داده شده است.

با مقایسه نتایج پایداری سناریوی هشتم و نهم که در آن ارتفاع کارگاه یکسان (۲۴ متر) و طول کارگاه از ۲۴ متر در سناریوی هشتم به ۱۴ متر در سناریوی نهم کاهش پیدا می‌کند و همچنین با مقایسه نتایج سناریوی نهم و دوازدهم که در آن طول کارگاه یکسان (۱۴ متر) و ارتفاع کارگاه از ۲۴ متر در سناریوی نهم به ۱۴ متر در سناریوی دوازدهم کاهش پیدا می‌کند، می‌توان نتیجه گرفت که برداشت پایه‌های امتدادی بهتر از برداشت پایه‌های شیبی است. به عبارت دیگر، به‌عنوان مثال، کارگاه با ارتفاع ۲۴ و طول ۱۴ از لحاظ پایداری بهتر از کارگاه با ارتفاع ۱۴ متر و طول ۲۴ متر است.

جدول ۵-۱۱: وضعیت پایداری پایه‌ها و سقف معدن رومرمر در حالت‌های مختلف بر اساس طراحی تجربی

| سناریو پایدار | | | | | | | | | | | | حالت RQD | پهنه | نسبت تنش افقی به عمودی (K) | حالت استخراج | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|---|--------|----------------------------|--------------|---------|--|--|--|--|--|--|--|
| | | | | | | | | | | | | حد پایین | پهنه A | ۱ | یک رگه | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | ۱۲ | میانگین | | | | | | | | | | | |
| | | ۳ | | | ۶ | | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | حد بالا | | | | | | | | | | | |
| | | ۳ | | | ۶ | | | ۹ | | | ۱۲ | حد پایین | پهنه B | | | | | | | | | | |
| | | ۳ | | | ۶ | | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | میانگین | | | | | | | | | | | |
| | | ۳ | | ۵ | ۶ | | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | حد بالا | | | | | | | | | | | |
| | | ۳ | | | ۶ | | | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | حد پایین | پهنه C | | | | | | | | | | |
| | | ۲ | ۳ | | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | | | | میانگین | | | | | | | |
| ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | حد بالا | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | حد پایین | پهنه A | ۱,۵ | یک رگه | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | ۱۲ | | | | میانگین | | | | | | | |
| | | ۳ | | | ۶ | | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | حد بالا | | | | | | | | | | | |
| | | ۳ | | | ۶ | | | ۹ | | | ۱۲ | حد پایین | پهنه B | | | | | | | | | | |
| | | ۳ | | | ۶ | | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | میانگین | | | | | | | | | | | |
| | | ۳ | | ۵ | ۶ | | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | حد بالا | | | | | | | | | | | |
| | | ۳ | | | ۶ | | | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | حد پایین | پهنه C | | | | | | | | | | |
| | | ۲ | ۳ | | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | | | | میانگین | | | | | | | |
| | | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | | | | حد بالا | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | حد پایین | پهنه A | ۲ | یک رگه | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | ۱۲ | | | | میانگین | | | | | | | |
| | | ۳ | | | ۶ | | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | حد بالا | | | | | | | | | | | |
| | | ۳ | | | ۶ | | | ۹ | | | ۱۲ | حد پایین | پهنه B | | | | | | | | | | |
| | | ۳ | | | ۶ | | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | میانگین | | | | | | | | | | | |
| | | ۳ | | | ۶ | | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | حد بالا | | | | | | | | | | | |
| | | ۳ | | | ۶ | | | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | حد پایین | پهنه C | | | | | | | | | | |
| | | ۳ | | | ۶ | | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | میانگین | | | | | | | | | | | |
| | | ۳ | | | ۶ | | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | حد بالا | | | | | | | | | | | |
| <p>سناریوی ۴: ارتفاع کارگاه ۳۴ متر و طول کارگاه ۳۴ متر</p> <p>سناریوی ۳: ارتفاع کارگاه ۴۴ متر و طول کارگاه ۱۴ متر</p> <p>سناریوی ۲: ارتفاع کارگاه ۴۴ متر و طول کارگاه ۲۴ متر</p> <p>سناریوی ۱: ارتفاع کارگاه ۴۴ متر و طول کارگاه ۳۴ متر</p> | | | | | | | | | | | | <p>توضیحات: سناریوی ۱۲: ارتفاع کارگاه ۱۴ متر و طول کارگاه ۱۴ متر</p> <p>سناریوی ۱۱: ارتفاع کارگاه ۱۴ متر و طول کارگاه ۲۴ متر</p> <p>سناریوی ۱۰: ارتفاع کارگاه ۱۴ متر و طول کارگاه ۳۴ متر</p> <p>سناریوی ۹: ارتفاع کارگاه ۲۴ متر و طول کارگاه ۱۴ متر</p> <p>سناریوی ۸: ارتفاع کارگاه ۲۴ متر و طول کارگاه ۲۴ متر</p> <p>سناریوی ۷: ارتفاع کارگاه ۲۴ متر و طول کارگاه ۳۴ متر</p> <p>سناریوی ۶: ارتفاع کارگاه ۳۴ متر و طول کارگاه ۱۴ متر</p> <p>سناریوی ۵: ارتفاع کارگاه ۳۴ متر و طول کارگاه ۲۴ متر</p> | | | | | | | | | | | |
| <p>■ پایه و سقف پایدار</p> <p>■ پایه پایدار و سقف تا حدودی پایدار</p> <p>■ پایه و سقف ناپایدار</p> | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

ادامه جدول ۵- ۱۱: وضعیت پایداری پایه‌ها و سقف معدن رومرمر در حالت‌های مختلف بر اساس طراحی تجربی

| سناریو پایدار | | | | | | | | | | | | حالت RQD | پهنه | نسبت تنش افقی به عمودی (K) | حالت استخراج |
|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|----------|--------|----------------------------|--------------|
| سناریو ۱ | | | | | | | | | | | | حد پایین | پهنه A | ۱ | دو رگه |
| سناریو ۱ | | | | | | | | | | | | میانگین | | | |
| سناریو ۱ | | | | | | | | | | | | حد بالا | | | |
| سناریو ۱ | | | | | | | | | | | | حد پایین | پهنه B | | |
| سناریو ۱ | | | | | | | | | | | | میانگین | | | |
| سناریو ۱ | | | | | | | | | | | | حد بالا | | | |
| سناریو ۱ | | | | | | | | | | | | حد پایین | پهنه C | | |
| سناریو ۱ | | | | | | | | | | | | میانگین | | | |
| سناریو ۱ | | | | | | | | | | | | حد بالا | | | |
| سناریو ۱٫۵ | | | | | | | | | | | | حد پایین | پهنه A | | |
| سناریو ۱٫۵ | | | | | | | | | | | | میانگین | | | |
| سناریو ۱٫۵ | | | | | | | | | | | | حد بالا | | | |
| سناریو ۱٫۵ | | | | | | | | | | | | حد پایین | پهنه B | | |
| سناریو ۱٫۵ | | | | | | | | | | | | میانگین | | | |
| سناریو ۱٫۵ | | | | | | | | | | | | حد بالا | | | |
| سناریو ۱٫۵ | | | | | | | | | | | | حد پایین | پهنه C | | |
| سناریو ۱٫۵ | | | | | | | | | | | | میانگین | | | |
| سناریو ۱٫۵ | | | | | | | | | | | | حد بالا | | | |
| سناریو ۲ | | | | | | | | | | | | حد پایین | پهنه A | | |
| سناریو ۲ | | | | | | | | | | | | میانگین | | | |
| سناریو ۲ | | | | | | | | | | | | حد بالا | | | |
| سناریو ۲ | | | | | | | | | | | | حد پایین | پهنه B | | |
| سناریو ۲ | | | | | | | | | | | | میانگین | | | |
| سناریو ۲ | | | | | | | | | | | | حد بالا | | | |
| سناریو ۲ | | | | | | | | | | | | حد پایین | پهنه C | | |
| سناریو ۲ | | | | | | | | | | | | میانگین | | | |
| سناریو ۲ | | | | | | | | | | | | حد بالا | | | |
| <p>توضیحات: سناریوی ۱۲: ارتفاع کارگاه ۱۴ متر و طول کارگاه ۱۴ متر سناریوی ۱۱: ارتفاع کارگاه ۱۴ متر و طول کارگاه ۲۴ متر سناریوی ۱۰: ارتفاع کارگاه ۱۴ متر و طول کارگاه ۳۴ متر سناریوی ۹: ارتفاع کارگاه ۲۴ متر و طول کارگاه ۱۴ متر سناریوی ۸: ارتفاع کارگاه ۲۴ متر و طول کارگاه ۲۴ متر سناریوی ۷: ارتفاع کارگاه ۲۴ متر و طول کارگاه ۳۴ متر سناریوی ۶: ارتفاع کارگاه ۳۴ متر و طول کارگاه ۱۴ متر سناریوی ۵: ارتفاع کارگاه ۳۴ متر و طول کارگاه ۲۴ متر</p> <p> ■ پایه و سقف پایدار ■ پایه پایدار و سقف تا حدودی پایدار ■ پایه و سقف ناپایدار </p> | | | | | | | | | | | | | | | |

فصل ششم

طراحی پایه‌ها با استفاده از

تحلیل عددی

مشکل اصلی برای طراحی پایه، مقاومت پایه است. تاکنون روش‌های تحلیلی و تجربی زیادی برای برآورد مقاومت پایه ارایه شده است. تمام فرمول‌های تجربی ارایه شده برای برآورد مقاومت پایه‌ها در شرایط شیب کم استفاده می‌شوند. حداکثر شیب مجاز ۱۰ درجه نسبت به سطح افقی است (Hoek & Brown, 1982). این روش‌ها در عین سادگی معایبی دارند که موجب شده تمایل طراحان به استفاده از روش‌های عددی برای برآورد مقاومت پایه افزایش یابد.

یکی از اصلی‌ترین معایب روش‌های تجربی این است که در این روش‌ها نقش پارامترهای موثر در رفتار پایه‌ها به روشنی تشریح نشده است. نتایج تحلیل‌های مختلف که توسط پژوهشگران انجام شده نشان می‌دهد از این روش‌ها در هر هندسه پایه و عمقی نمی‌توان استفاده کرد و استفاده از آن‌ها مستلزم یک سری کارهای اصلاحی است.

روش‌های عددی باعث پیشرفت قابل توجهی در مسایل ژئومکانیک شده است. روش تفاضل به عنوان یکی از پر کاربردترین روش‌های عددی، در بسیاری از مسایل مهندسی ژئوتکنیک کاربرد دارد. این روش برای مدل نمودن تغییرمکان‌ها و کرنش‌های بزرگ توده‌سنگ ابزار مناسبی است به همین جهت کاربرد آن در مسایل مهندسی سنگ عمومیت پیدا کرده است. $FLAC^{3D}$ یکی از نرم‌افزارهای تفاضل محدود است که با استفاده از محاسبات سریع لاگرانژی به تحلیل محیط‌های پیوسته می‌پردازد. محاسبات در این نرم افزار به صورت تفاضل محدود ساده بوده و در آن مدل‌های مهندسی ژئوتکنیک به کار گرفته می‌شود.

در این قسمت، با تمرکز بر توده‌سنگ معدن رومرمر، به منظور برآورد ابعاد سقف پایدار در حالت بدون نگهداری یا به عبارت دیگر، تعیین عرض مناسب راهرو با شرط خود نگهدار بودن سقف، از روش عددی برای تحلیل پایداری کارگاه‌های استخراج استفاده می‌شود.

۶-۲- جانمایی پایه‌ها و کارگاه‌های استخراج معدن رومرمر

همان‌طور که در شکل ۶-۱، مشاهده می‌شود و در فصل‌های قبل نیز به آن اشاره شد، کانسار محدوده رومرمر به صورت رگه‌ای است که با زاویه حدوداً ۳۵ درجه نسبت به افق قرار دارد. در تراز ۱۶۶۵ رگه‌های ۷۴ و ۷۴+ در فاصله‌ی بسیار نزدیکی در مجاورت هم قرار گرفته‌اند. عملیات استخراج در این تراز با حفر دو تونل موازی و دنباله رگه انجام شده که یک تونل درون رگه‌ی ۷۴ و دیگری درون رگه‌ی ۷۴+ حفر شده است. ماده معدنی باقی‌مانده بین تونل‌ها با حفر دستک‌های عمود بر امتداد رگه‌ها برداشت می‌شود. در نتیجه‌ی حفر دستک‌ها، پایه‌ها و کارگاه‌هایی با ابعاد به ترتیب ۶ و ۴ متر ایجاد می‌شود. در تراز ۱۶۷۵ رگه‌های ۷۴ و ۷۴+ به تدریج از یک‌دیگر فاصله گرفته‌اند. بنابراین عملیات استخراج تنها توسط یک تونل دنباله رگه، درون رگه‌ی ۷۴ و حفر دستک‌هایی عمود بر امتداد رگه انجام شده است. در بالاترین تراز معدن یعنی تراز ۱۶۸۵ که به نوعی سقف معدن محسوب می‌شود، عملیات استخراج مشابه تراز ۱۶۶۵ است. در واقع در این تراز رگه‌های ۷۴ و ۷۴+ هر دو قابل دسترس و استخراج هستند. سایر ترازهای معدن مانند تراز ۱۶۵۵ حفاری تونل‌ها و کارگاه‌ها به اتمام رسیده و در تراز ۱۶۴۵ عملیات استخراج در حال توسعه است.

پس از اتمام عملیات استخراج در تمامی ترازهای معدن، بازیابی پایه‌ها و سقف کارگاه‌ها انجام می‌شود، به این صورت که ابتدا از تراز ۱۶۷۵، پایه‌ها به صورت پسر و بازیابی می‌شود. همزمان با بازیابی پایه‌ها در این تراز، سقف کارگاه (کف کارگاه در تراز ۱۶۸۵) آتشکاری و استخراج می‌شود. برای تضمین پایداری فضای کارگاهی و افزایش ارتفاع کارگاه‌ها، در هر تراز به ازای استخراج تعدادی پایه، یک پایه باقی گذاشته می‌شود.

این عملیات شامل، بازیابی و استخراج پایه‌ها و سقف کارگاه‌ها به نوبت در سایر ترازهای پایینی انجام می‌شود. به دلیل افزایش ابعاد فضای کارگاهی پس از عملیات بازیابی در چند تراز، یک تراز از معدن برای جلوگیری از ریزش سقف کارگاه استخراج به صورت دست نخورده باقی می‌ماند. این

فضا که در اثر بازیابی چند تراز ایجاد شده است یک طبقه معدن را تشکیل می‌دهد و پایه‌هایی که بین طبقات معدن باقی می‌مانند، پایه‌های اصلی معدن نامیده می‌شوند.

باید به این نکته دقت نمود که با توجه به نحوه قرارگیری کانسار و روش استخراج آن، بار وارد بر پایه به صورت افقی است. تحلیل عددی انجام شده برای طرح استخراج معدن رومرمر سعی دارد موضوعات زیر را مورد بررسی قرار دهد:

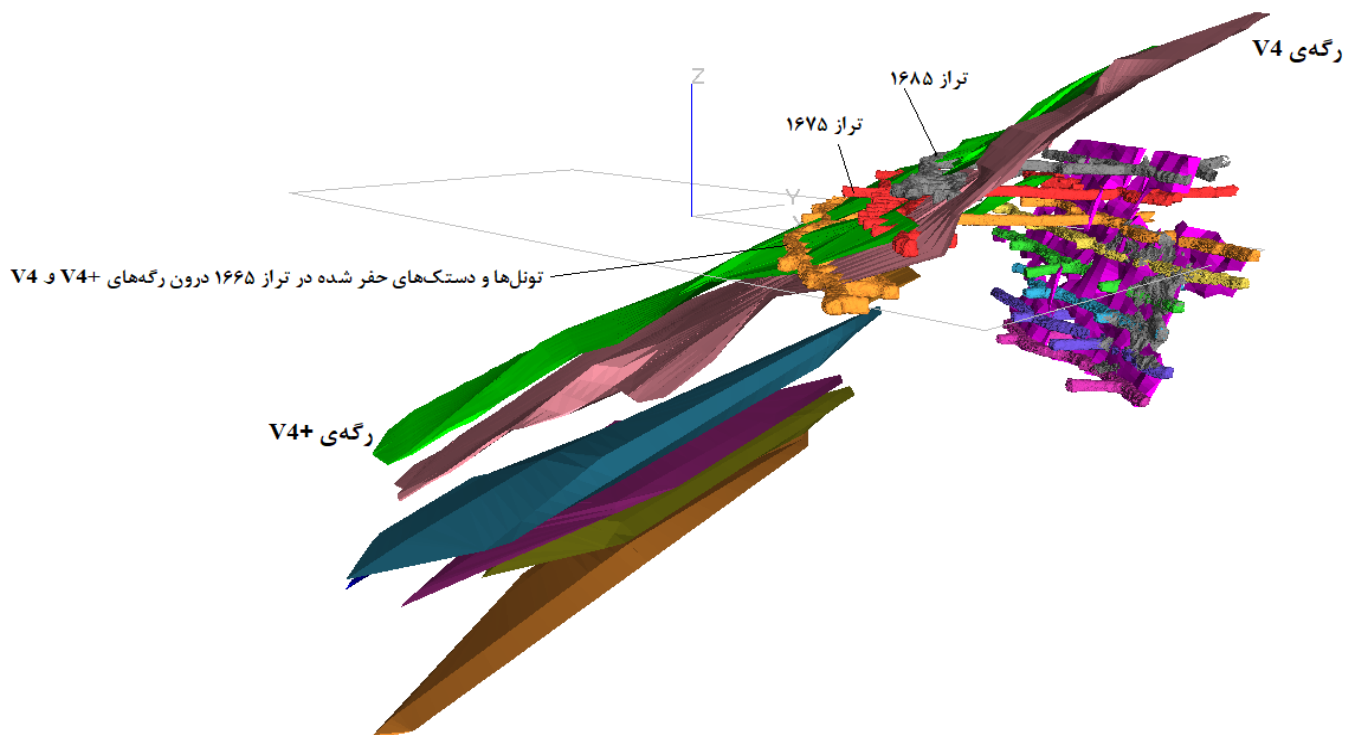
۱- به ازای استخراج چه تعداد پایه در هر تراز خاص، یک پایه دست نخورده باقی گذاشته

شود؟

۲- یک طبقه‌ی معدن چه تعداد تراز را شامل شود؟

تمامی موضوعات بالا در قالب سناریوهای طراحی شده با استفاده از مدلسازی عددی مورد

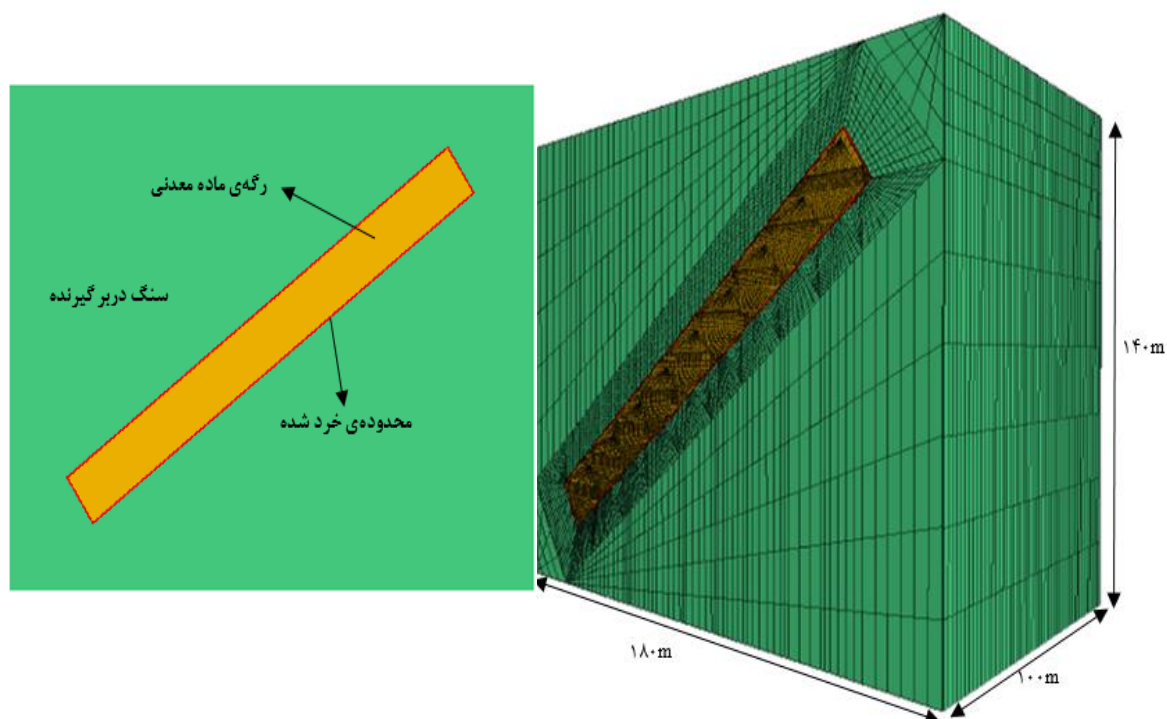
بررسی قرار می‌گیرد.



شکل ۶-۱: نحوه قرارگیری رگه‌ها، تونل‌ها و کارگاه‌های استخراج در ترازهای مختلف معدن رومرمر

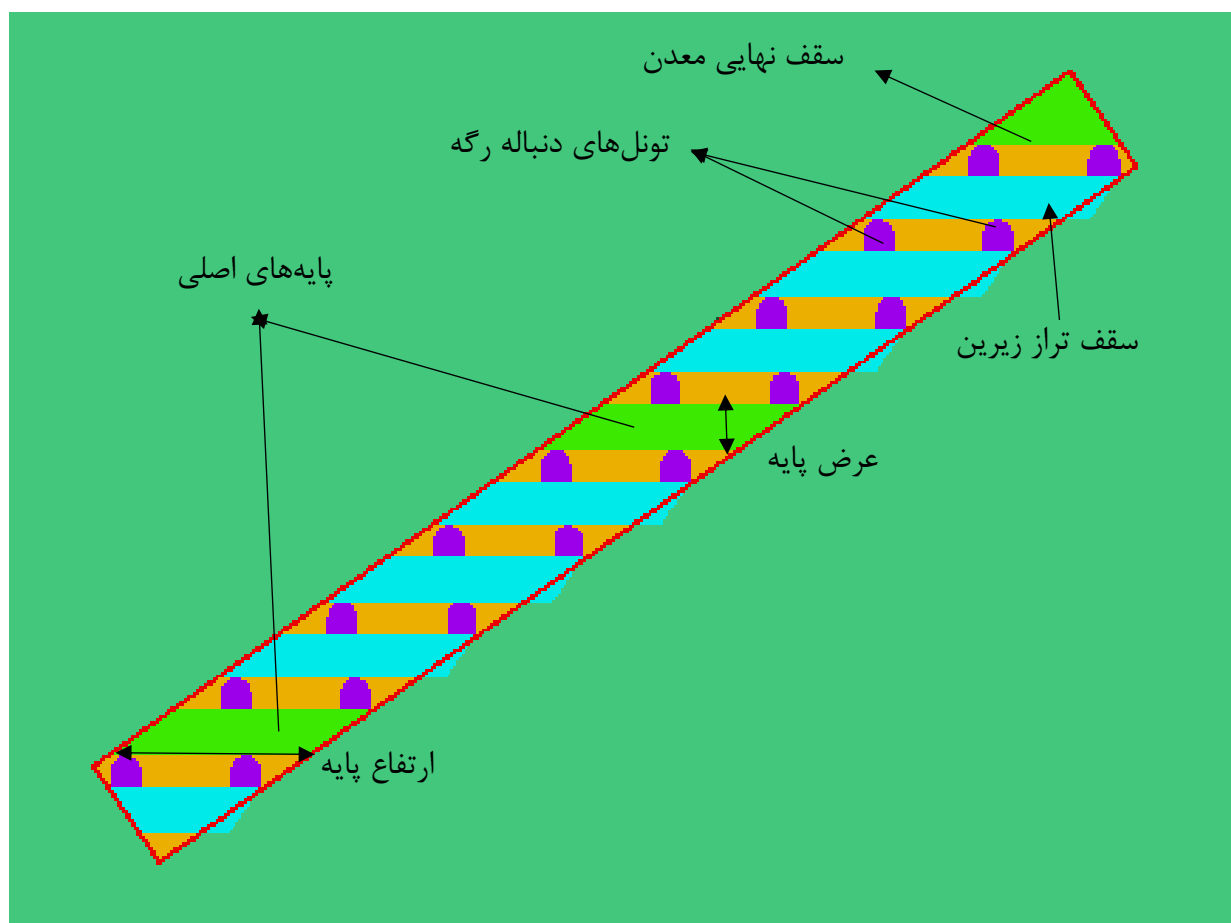
۳-۶- ساخت مدل هندسی معدن رومرمر

برای طراحی معدن رومرمر مدل بلوکی با ابعاد $140 \times 100 \times 180$ متر طراحی شده است. در این طراحی یکبار ماده معدنی معادل رگه‌های $V4+$ و $V4$ با ضخامت حدود ۱۵ متر و یکبار تنها رگه‌ی $V4$ با ضخامت حدود ۸ متر با شیب ۳۵ درجه نسبت به افق شبیه‌سازی شده است. همچنین در اطراف رگه‌ی ماده معدنی یک محدوده با ضخامت حدود ۶۰ سانتی‌متر به عنوان زون خردشده حاصل از آشکاری در نظر گرفته شده است. نمایی از مدل بلوکی مش بندی شده و ماده معدنی در شکل ۲-۶، آرایه شده است. تونل‌ها با ابعاد دهانه‌ی حداکثر $4/5$ متر درون ماده‌ی معدنی طراحی شده‌اند. عرض پایه‌ها و کارگاه‌های استخراج در هر تراز مطابق آنچه در کارگاه‌های معدن رومرمر اجرا شده به ترتیب معادل ۶ و ۴ متر در نظر گرفته شده است. همچنین اختلاف ارتفاع کف به کف ترازها از یکدیگر ۱۰ متر است.

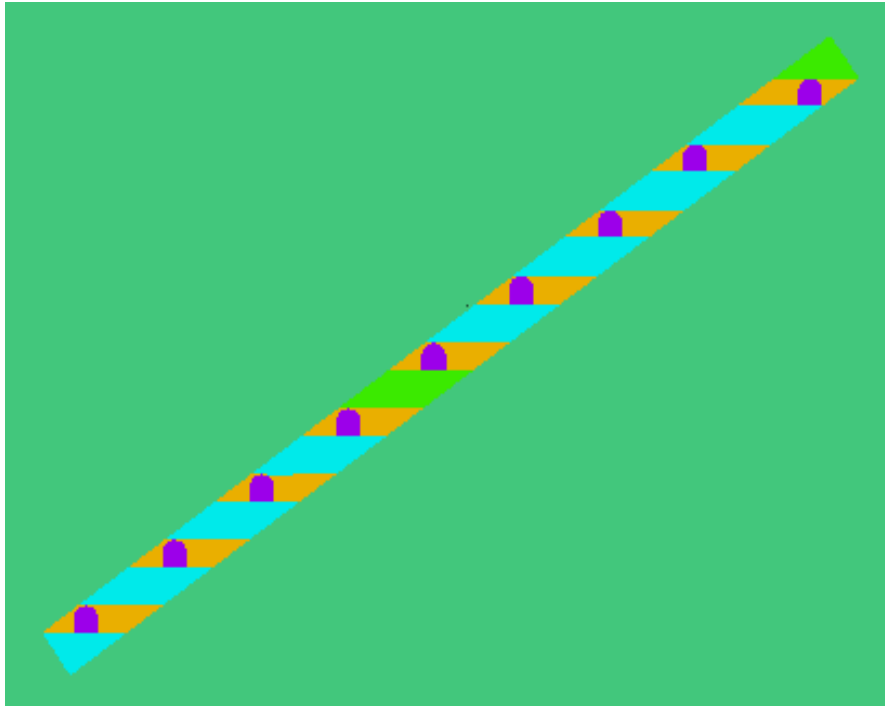


شکل ۲-۶: نمایی از مدل بلوکی و رگه‌ی ماده معدنی

پس از ساخت هندسه‌ی مدل، شرایط اولیه و مرزی در مدل اعمال شده است. با وجود قرارگیری محدوده مورد مطالعه در عمق حدود ۳۵۰ متری از سطح زمین، تنها بخشی از روباره‌ی معدن مدل شده است و باقی روباره به صورت تنش ثقلی وارد محاسبات شده است. در شکل ۳-۶: جانمایی تونل‌ها و پایه‌ها در رگه‌های ۷۴ و ۷۴+ در مدل عددی و شکل ۴-۶: جانمایی تونل‌ها و پایه‌ها در رگه‌ی ۷۴ در مدل عددی، نشان داده شده است.



شکل ۳-۶: جانمایی تونل‌ها و پایه‌ها در رگه‌های ۷۴ و ۷۴+ در مدل عددی



شکل ۴-۶: جانمایی تونل‌ها و پایه‌ها در رگه‌ی ۷۴ در مدل عددی

ویژگی‌های آرایه شده در جدول ۱-۶، بر اساس نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی به دست آمده است. از طرفی بر اساس نتایج آرایه شده توسط هوک و بری در سال ۱۹۸۱ برای سنگ آهک دارای پرشدگی، مقدار چسبندگی در حدود ۰/۱ مگاپاسکال و زاویه اصطکاک داخلی بین ۱۰ تا ۳۸ درجه تغییر می‌کند. در خصوص توده‌سنگ معدن رومرمر از آنجا که اغلب ناپیوستگی‌ها فاقد پرکننده و زبر و خشن هستند، زاویه اصطکاک داخلی برابر با ۳۵ درجه در نظر گرفته شده است. با توجه به حضور زون خردشده و پهنه‌های مختلف RQD، ایجاد تمایز بین ویژگی‌های توده‌سنگ در نواحی و ترازهای مختلف معدن ضروری است. بنابراین علاوه بر پارامترهای آرایه شده در جدول ۲-۶ و جدول ۳-۵، برای سنگ سالم و توده‌سنگ با کیفیت بالا (پهنه‌ی C)، باید ویژگی‌های توده‌سنگ در پهنه‌های A و B (پهنه‌های ضعیف و متوسط) نیز برآورد شود. بدین منظور بر اساس مشاهدات و بازدیدهای صحرائی و همچنین بهره‌گیری از رابطه ۱-۶ و رابطه ۲-۶ که به ترتیب توسط بنیاوسکی و هوک آرایه شده‌اند، شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) برای هر پهنه محاسبه می‌شود.

$$RMR = 9LnQ + 44 \quad (۱-۶)$$

$$GSI = RMR - 5 \quad (۲-۶)$$

مقادیر بدست آمده از مشاهدات صحرایی برای پهنه‌های A، B و C به ترتیب معادل ۴۵، ۵۰ و ۵۵ و بر اساس رابطه ۵-۵، معادل ۵۴/۸، ۶۲/۸ و ۶۷/۳ برآورد شده است. بنابراین با در نظر گرفتن یک ضریب اطمینان مناسب، مقادیر GSI بدست آمده از مشاهدات صحرایی و جدول طبقه‌بندی اساس محاسبات قرار گرفته است.

در نهایت پارامترهای توده‌سنگ، مطابق روش قبل با استفاده از نرم افزار RocLab برآورد شده‌اند. نتایج خروجی RocLab در هر یک از پهنه‌های A، B و C در جدول ۶-۴، ارائه شده است.

جدول ۶-۱: ویژگی‌های مکانیکی سنگ سالم

| ردیف | پارامتر | مقدار | واحد |
|------|-----------------------|-------|------|
| ۱ | مقاومت فشاری تک محوری | ۲۰۰ | MPa |
| ۲ | مدول الاستیک | ۱۰۰ | GPa |
| ۳ | ضریب پواسون | ۰/۱۸ | - |

جدول ۶-۲: ویژگی‌های مکانیکی ناپیوستگی‌ها

| ردیف | پارامتر | مقدار | واحد |
|------|--------------------|-------|------|
| ۱ | زاویه اصطکاک داخلی | ۳۵ | درجه |
| ۲ | چسبندگی | ۰/۱ | MPa |

جدول ۶-۳: مقادیر مقاومت فشاری و مدول تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ معادل

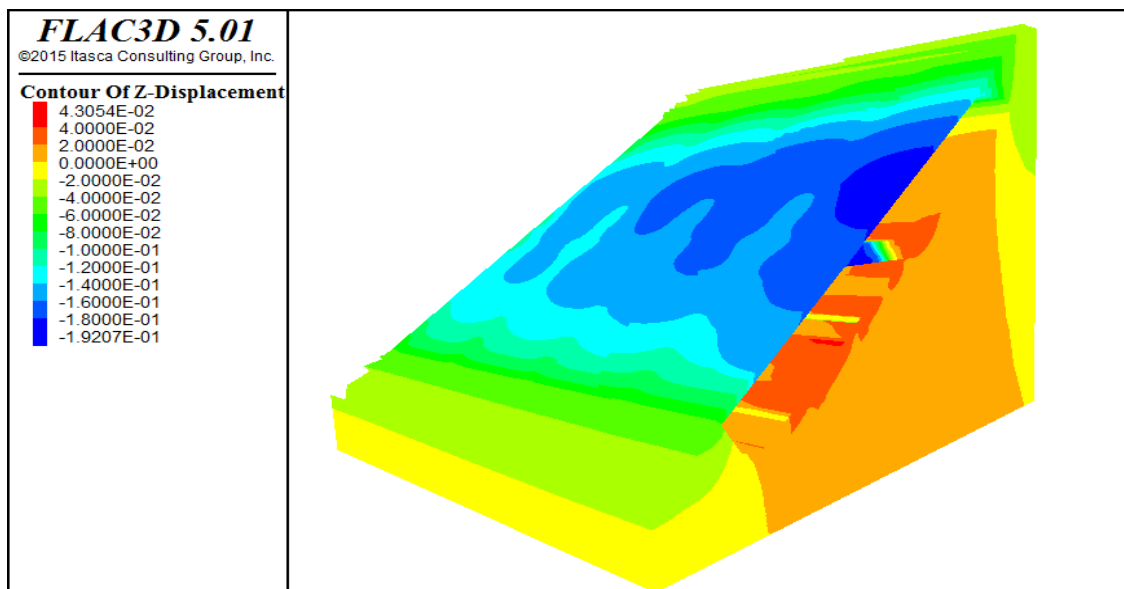
| σ_{ci} (MPa) | GSI | پارامترهای توده‌سنگ | | |
|---------------------|-----|---------------------|---------------------|-------------|
| | | σ_{tm} (MPa) | σ_{cm} (MPa) | E_m (GPa) |
| ۲۰۰ | ۵۵ | -۰/۸ | ۱۶ | ۱۳/۳ |

جدول ۶-۴: مشخصات ژئومکانیکی توده‌سنگ معدن رومرمر در پهنه‌های A، B و C

| محدوده | مدول تغییر شکل‌پذیری (GPa) | نسبت پواسون | چگالی (Kg/m^3) | مقاومت کششی (MPa) | چسبندگی (MPa) | زاویه اصطکاک (Deg) |
|----------|----------------------------|-------------|--------------------|-------------------|---------------|--------------------|
| پهنه‌ی A | ۷/۴ | ۰/۲۷ | ۲۷۶۵ | ۰/۴ | ۱ | ۶۲ |
| پهنه‌ی B | ۱۰ | ۰/۲۶ | ۲۷۶۵ | ۰/۵۷ | ۱/۵ | ۶۲ |
| پهنه‌ی C | ۱۳/۳ | ۰/۲۵ | ۲۷۶۵ | ۰/۸ | ۲/۱ | ۶۲ |

۴-۶- چگونگی تحلیل مدل عددی

در اکثر طراحی‌های عددی در زمینه مکانیک سنگ و معدن مانند تحلیل پایداری شیب، تونل و معادن روباز و زیرزمینی، تحلیل نتایج بر اساس مقادیر جابجایی، تنش‌های القایی و وضعیت پلاستیک‌شدگی مدل پس از حفاری و استخراج فضا صورت می‌گیرد. در خصوص طراحی کارگاه‌های استخراج معدن رومرمر در ابتدا مقادیر جابجایی‌های ایجاد شده در سقف، پس از استخراج کانسار مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به شکل ۶-۵، بیشترین مقادیر جابجایی رخ داده در سقف در بحرانی‌ترین (بزرگترین) حالت ابعاد کارگاه، در حدود ۱۹/۲ سانتی‌متر برآورد شده است. قضاوت در مورد نحوه عملکرد توده‌سنگ در برابر جابجایی‌های ایجاد شده و بررسی پتانسیل پایداری و تخریب سقف در مدل عددی، نیازمند به کارگیری معیارهای مربوط به جابجایی است. با توجه به عدم کفایت معیارهای موجود در این زمینه و عدم دسترسی به معیار کارآمد، تحلیل مدل عددی براساس تنش‌های القایی و وضعیت پلاستیک‌شدگی توده‌سنگ در سقف کارگاه صورت گرفته است.



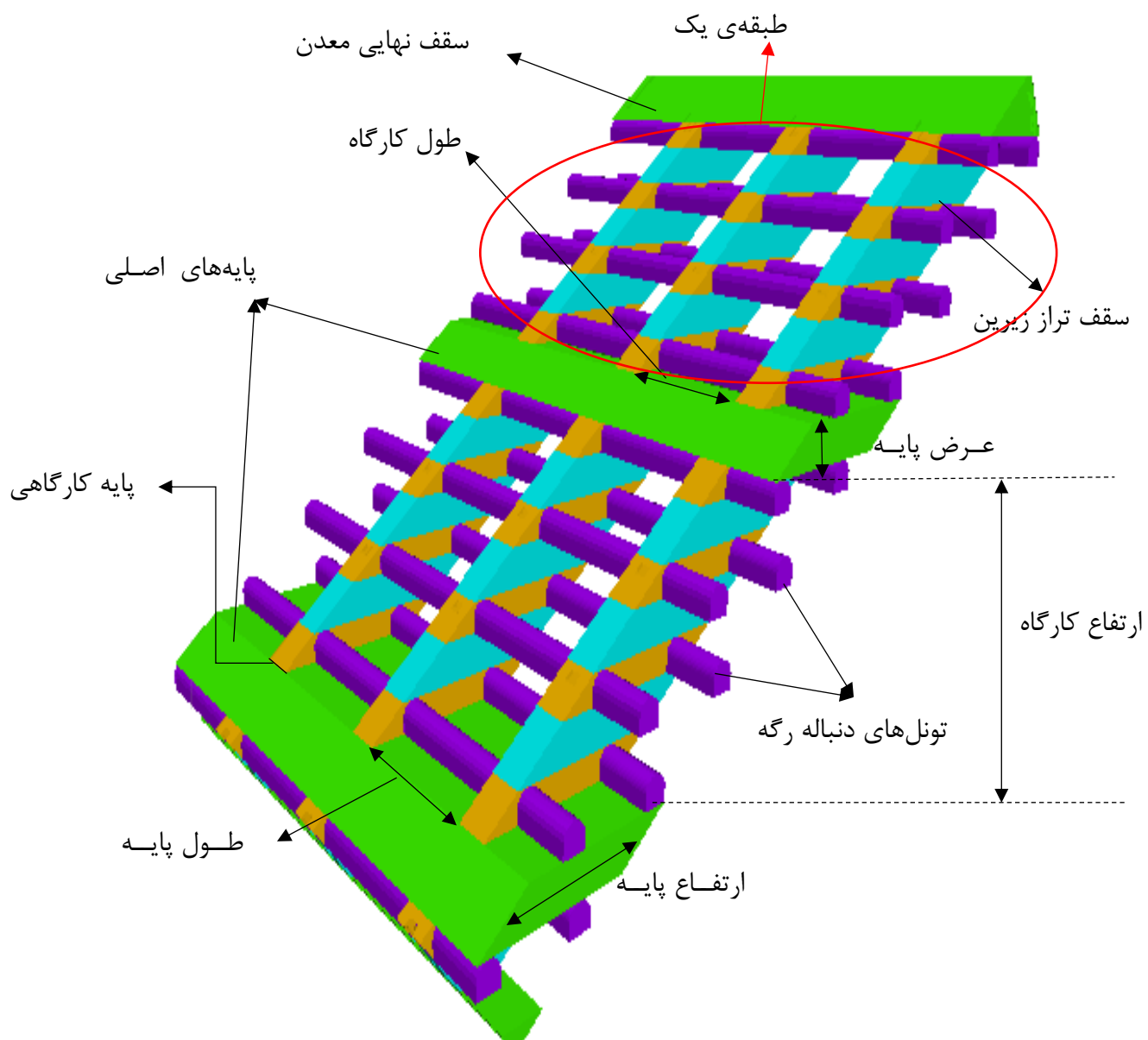
شکل ۶-۵: چگونگی جابجایی‌های ایجاد شده در سقف کارگاه

۶-۵- سناریوهای طراحی معدن رومرمر

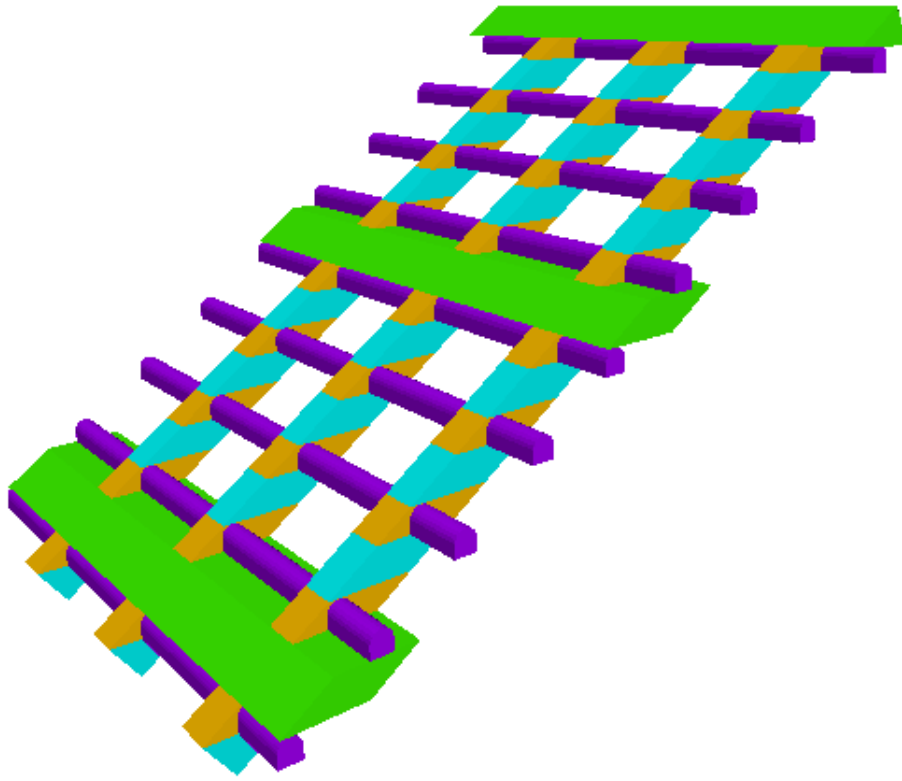
برای استخراج معدن رومرمر با هدف حداکثر بازیابی ماده معدنی و همچنین تضمین پایداری سقف کارگاه‌های استخراج شده، سناریوهای مختلفی بر اساس طول و ارتفاع کارگاه استخراج طراحی شده است. ارتفاع کارگاه در ۴ سناریو ۱۴، ۲۴، ۳۴ و ۴۴ متر مورد بررسی قرار می‌گیرد. ارتفاع ۱۴ متر برای کارگاه به این مفهوم است که به ازای بازیابی پایه‌ها در دو تراز و استخراج سقف از داخل تونل در تراز زیرین، یک پایه به صورت دست نخورده باقی بماند. به همین ترتیب در اثر بازیابی و استخراج در ۳، ۴ و ۵ تراز ارتفاع نهایی کارگاه به ترتیب برابر با ۲۴، ۳۴ و ۴۴ متر خواهد شد. طول کارگاه استخراج وابسته به تعداد پایه‌هایی است که در هر تراز بازیابی می‌شود یا برجای می‌مانند. بر این اساس طول‌های ۲۴، ۳۴ و ۴۴ متر برای کارگاه استخراج در نظر گرفته شده است که به ترتیب بیان‌گر این است که یک پایه به ازای بازیابی سه پایه، یک پایه به ازای بازیابی دو پایه و یک پایه به ازای بازیابی یک پایه در هر تراز دست نخورده باقی گذاشته می‌شود. با توجه به عدم دسترسی به مقادیر ضریب کاهش تنش در محدوده معدن رومرمر تمامی سناریوهای مربوط به ابعاد کارگاه استخراج، در مقادیر ضریب کاهش تنش مختلف بررسی شده‌اند. از طرفی با توجه به عمق نسبتاً کم محدوده مقدار این ضریب همواره بزرگتر از یک خواهد بود بنابراین مقادیر بکار رفته برای K، برابر با ۲، ۱/۵ و ۱ انتخاب شده است.

با توجه به موارد مطرح شده در مجموع تعداد ۱۲ سناریو برای طرح استخراج کارگاه‌های معدن رومرمر در نظر گرفته شده است. هر یک از سناریوها برای دو حالت یعنی طراحی رگه‌های ۷۴ و ۷۴+ و رگه‌ی ۷۴، مورد بررسی قرار می‌گیرد. در نهایت وضعیت پلاستیک شدگی و میزان تنش‌های وارده بر پایه‌ها و سقف کارگاه‌های استخراج در هر سناریو معیار طراحی ابعاد بهینه کارگاه‌ها قرار می‌گیرد.

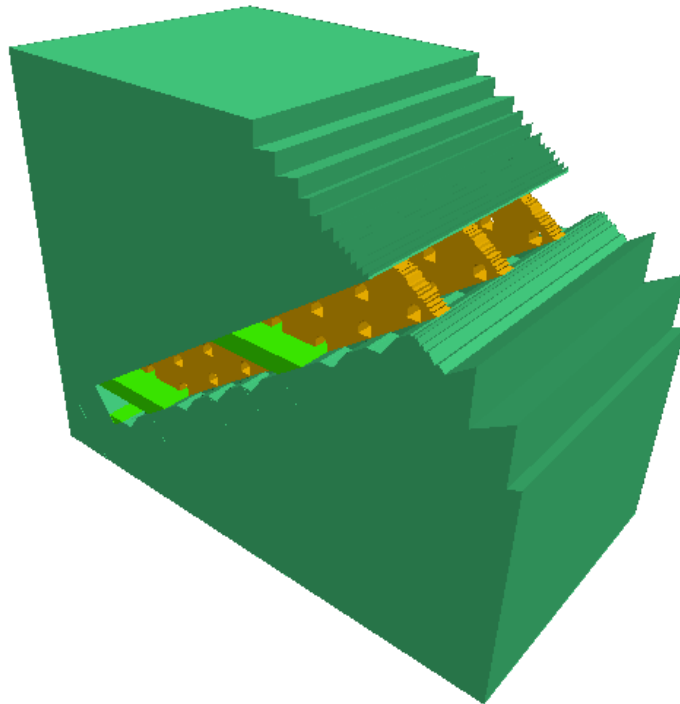
در شکل ۶-۶: نمایی از پایه‌ها و طبقات معدن در رگه‌های ۷۴ و ۷۴+ و در شکل ۶-۷ تا شکل ۶-۹، نمونه‌ای از تصاویر پایه‌های اصلی و کارگاهی، طبقات معدن و فضای نهایی کارگاه‌های استخراج پس از عملیات بازیابی ارائه شده است.



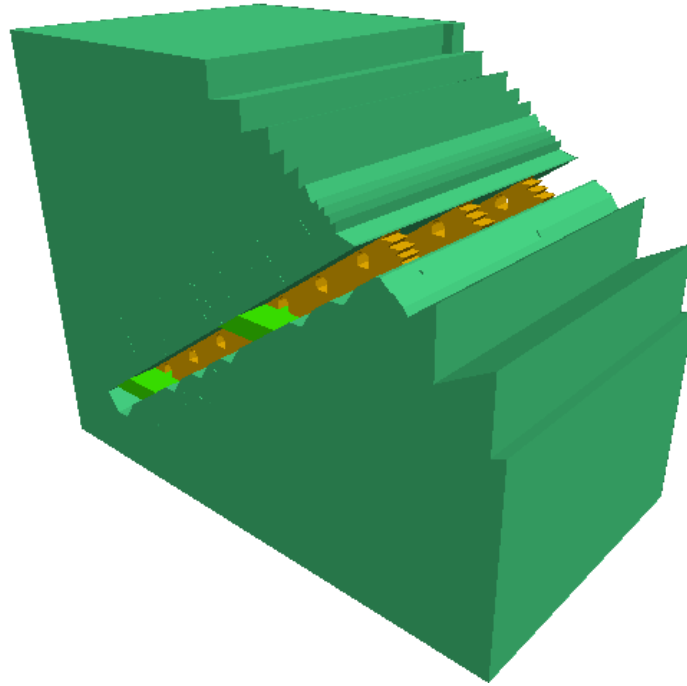
شکل ۶-۶: نمایی از پایه‌ها و طبقات معدن در رگه‌های ۷۴ و ۷۴+



شکل ۶-۷: نمایی از پایه‌ها و طبقات معدن در رگه‌ی ۷۴



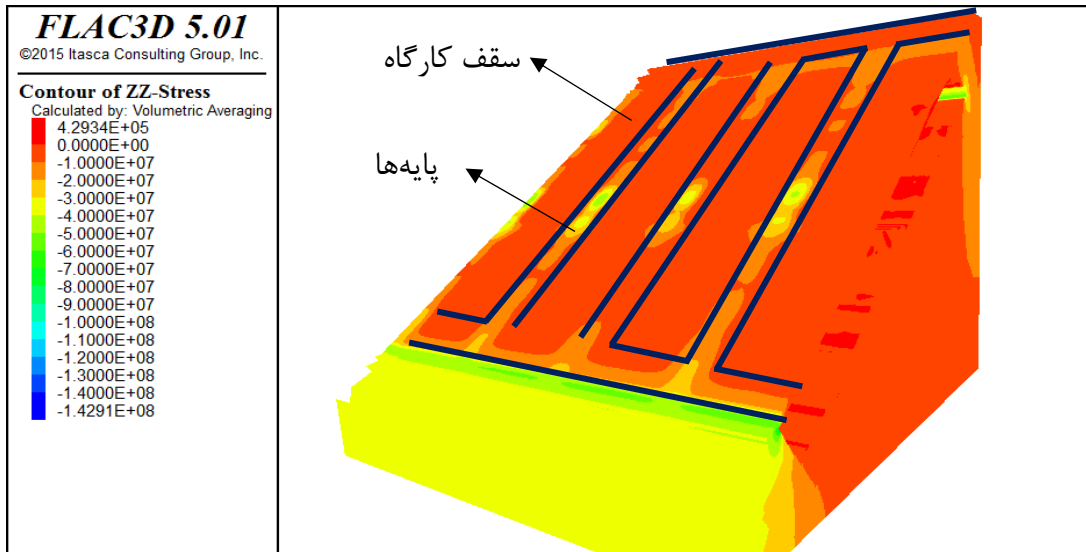
شکل ۶-۸: نمایی از کارگاه‌های استخراج پس از بازیابی ماده معدنی در رگه‌های ۷۴ و ۷۴+



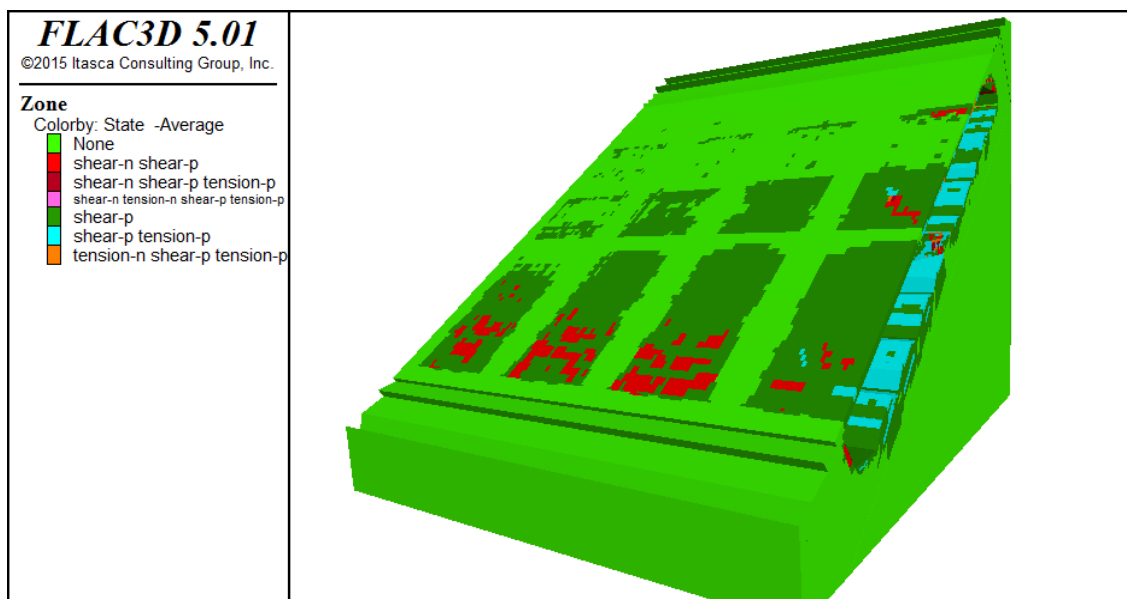
شکل ۶-۹: نمایی از کارگاه‌های استخراج پس از بازیابی ماده معدنی در رگه‌ی ۷۴

۶-۵-۱- سناریوی اول (ارتفاع کارگاه ۴۴ متری و طول کارگاه ۳۴ متری)

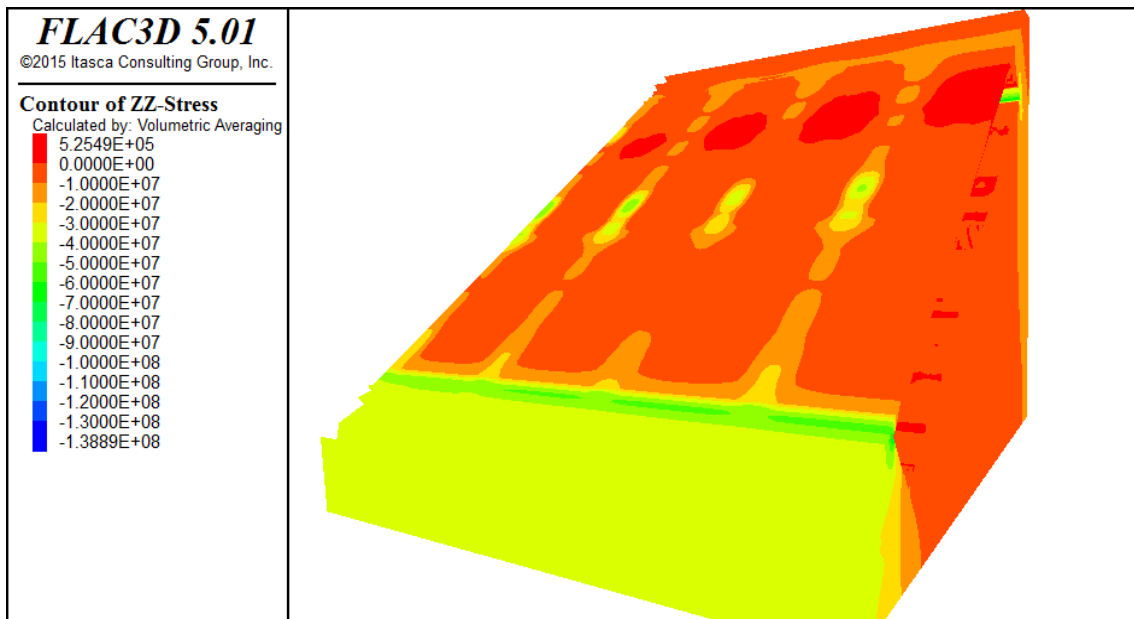
ارتفاع و طول کارگاه در این سناریو به ترتیب ۴۴ و ۳۴ متر در نظر گرفته شده است. کانتور تنش‌های قائم و وضعیت پلاستیک شدگی سقف کارگاه در سناریوی شماره یک، به ازای مقادیر مختلف ضریب کاهش تنش و برای محدوده رگه‌های ۷۴ و ۷۴+ و محدوده‌ی رگه‌ی ۷۴ در شکل ۶-۱۰ تا ۶-۲۱، نشان داده شده است.



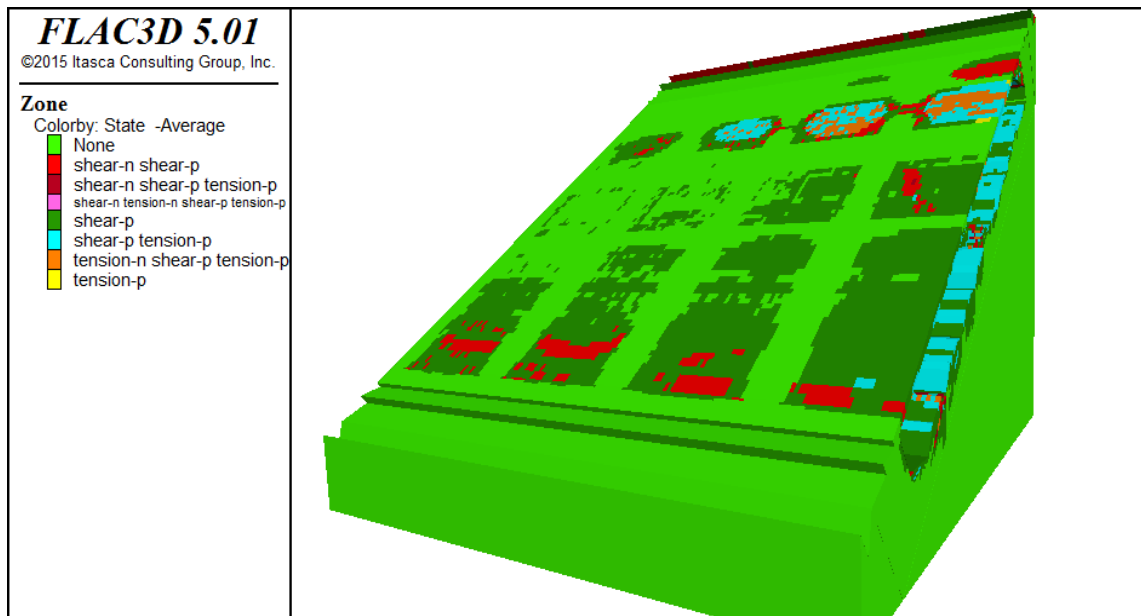
شکل ۶-۱۰: وضعیت تنش‌های قائم در سقف کارگاه‌های استخراج رگه‌های V_4 و V_4+ به ازای $K=2$ در سناریوی یک



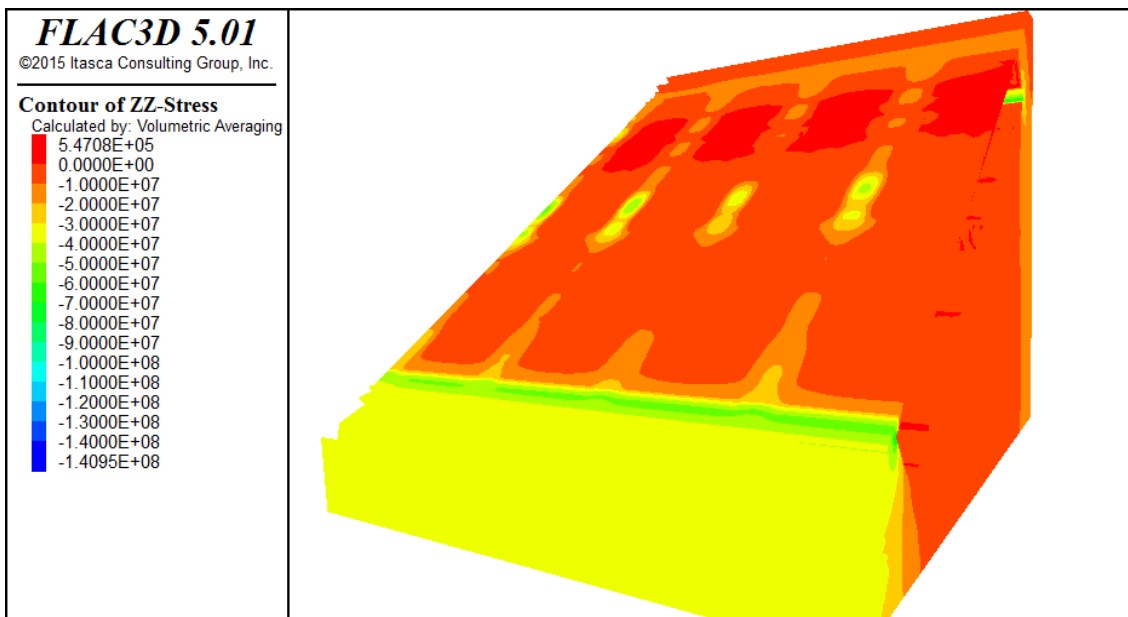
شکل ۶-۱۱: وضعیت پلاستیک‌شدگی توده‌سنگ در محدوده سقف کارگاه استخراج رگه‌های V_4 و V_4+ به ازای $k=2$ در سناریوی یک



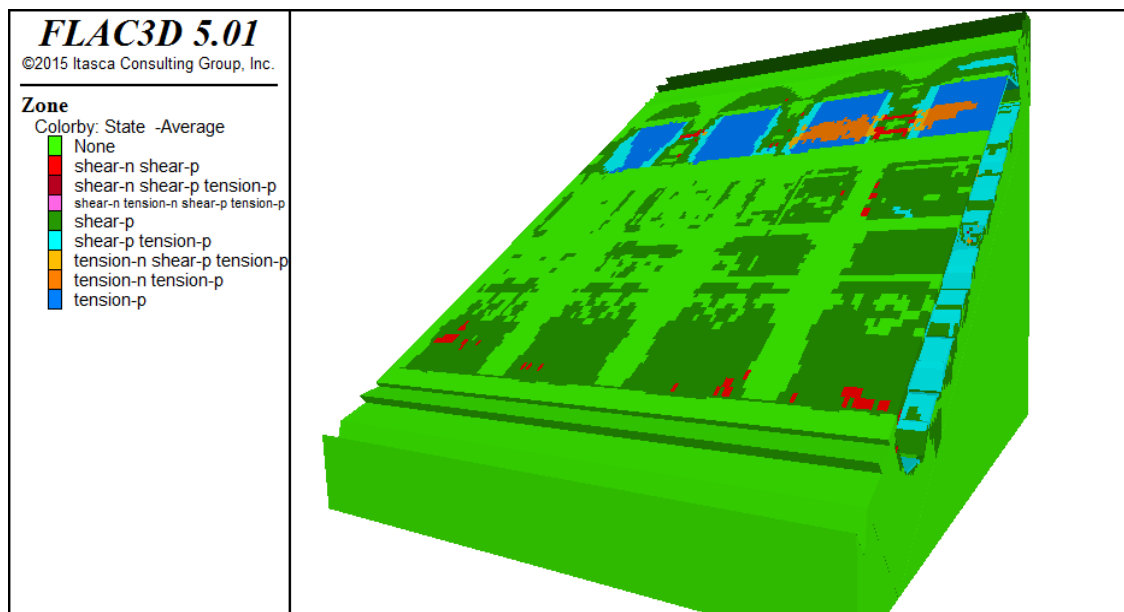
شکل ۶-۱۲: وضعیت تنش‌های قائم در سقف کارگاه‌های استخراج رگه‌های V_4 و V_4+ به ازای $K=1/5$ در سناریوی یک



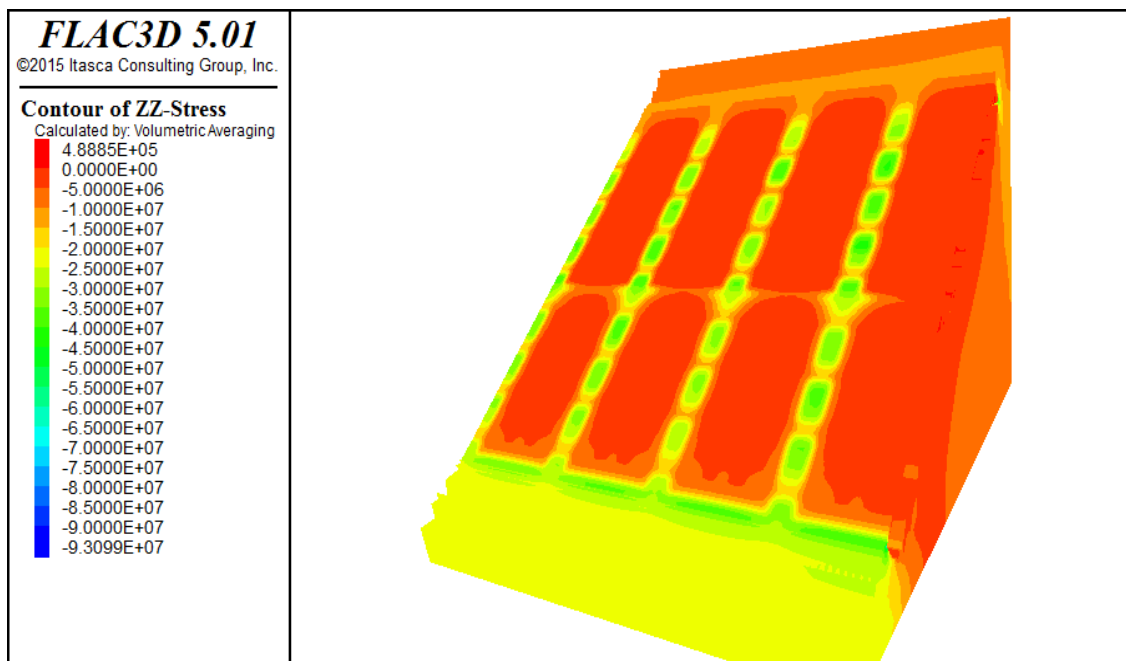
شکل ۶-۱۳: وضعیت پلاستیک‌شدگی توده‌سنگ در محدوده سقف کارگاه استخراج رگه‌های V_4 و V_4+ به ازای $k=1/5$ در سناریوی یک



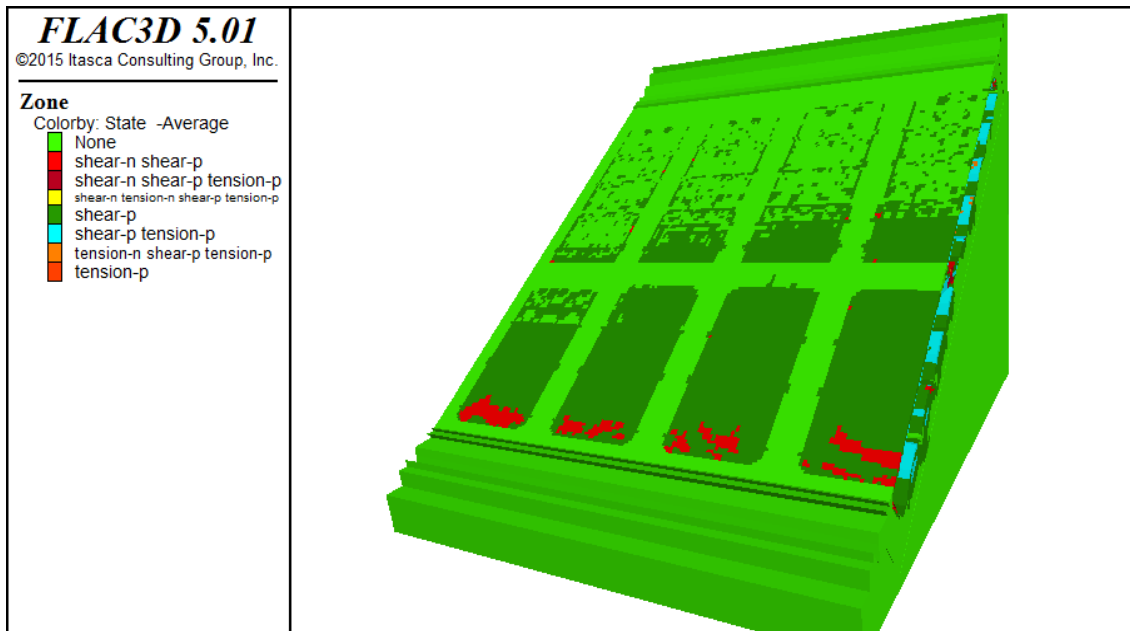
شکل ۶-۱۴: وضعیت تنش‌های قائم در سقف کارگاه‌های استخراج رگه‌های V_4 و V_4+ به ازای $K=1$ در سناریوی یک



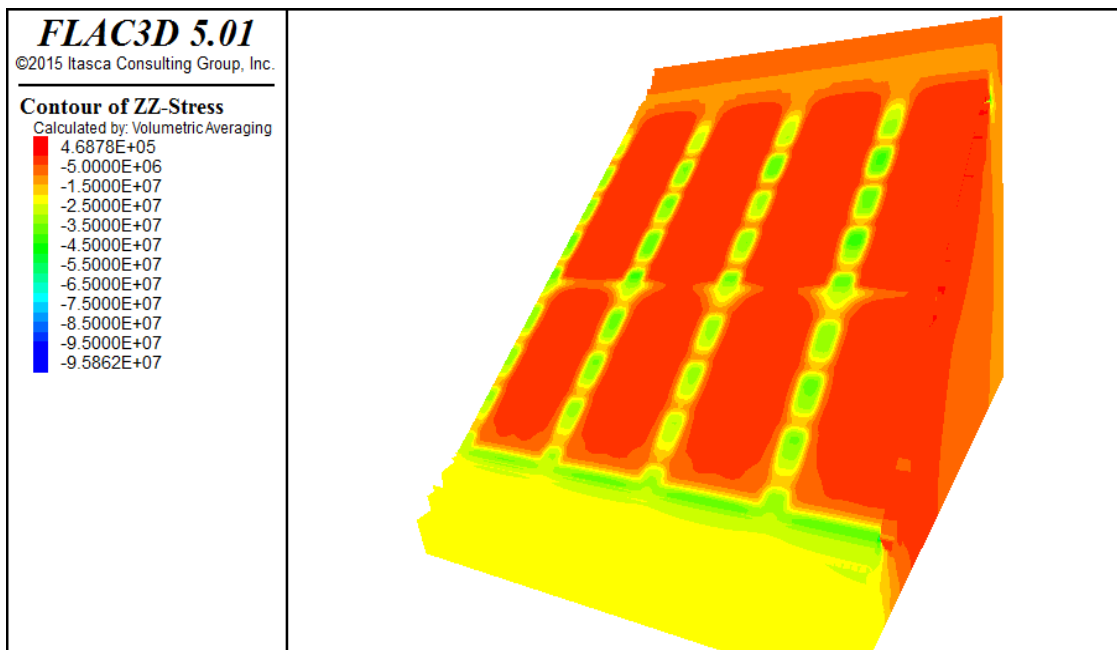
شکل ۶-۱۵: وضعیت پلاستیک‌شدگی توده‌سنگ در محدوده سقف کارگاه استخراج رگه‌های V_4 و V_4+ به ازای $K=1$ در سناریوی یک



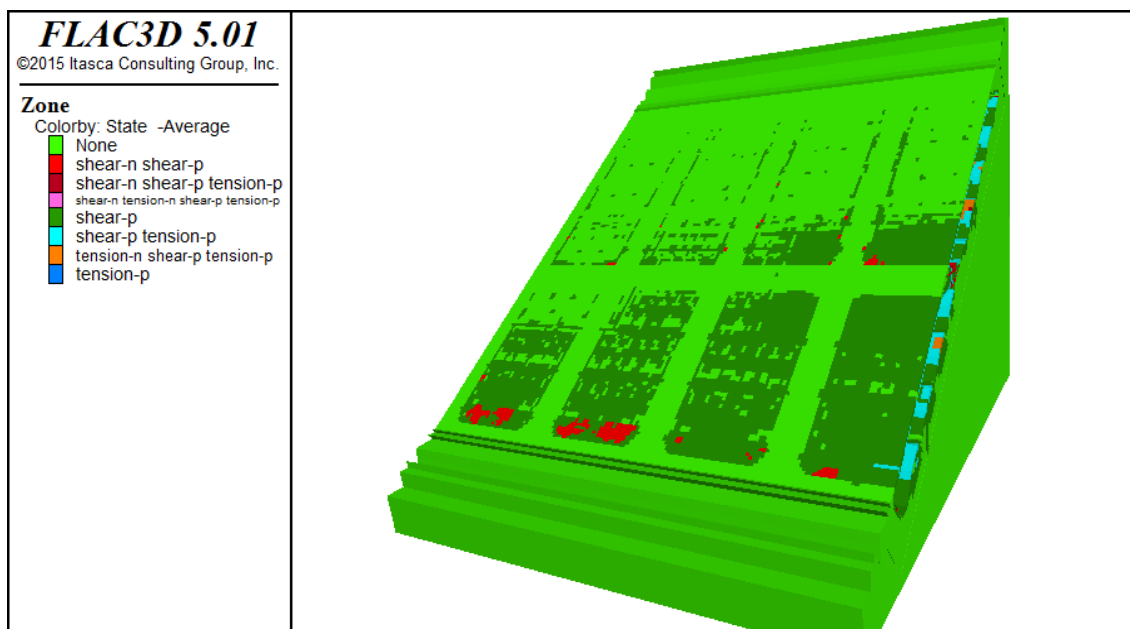
شکل ۶-۱۶: وضعیت تنش‌های قائم در سقف کارگاه‌های استخراج رگه‌ی ۷۴ به ازای $K=2$ در سناریوی یک



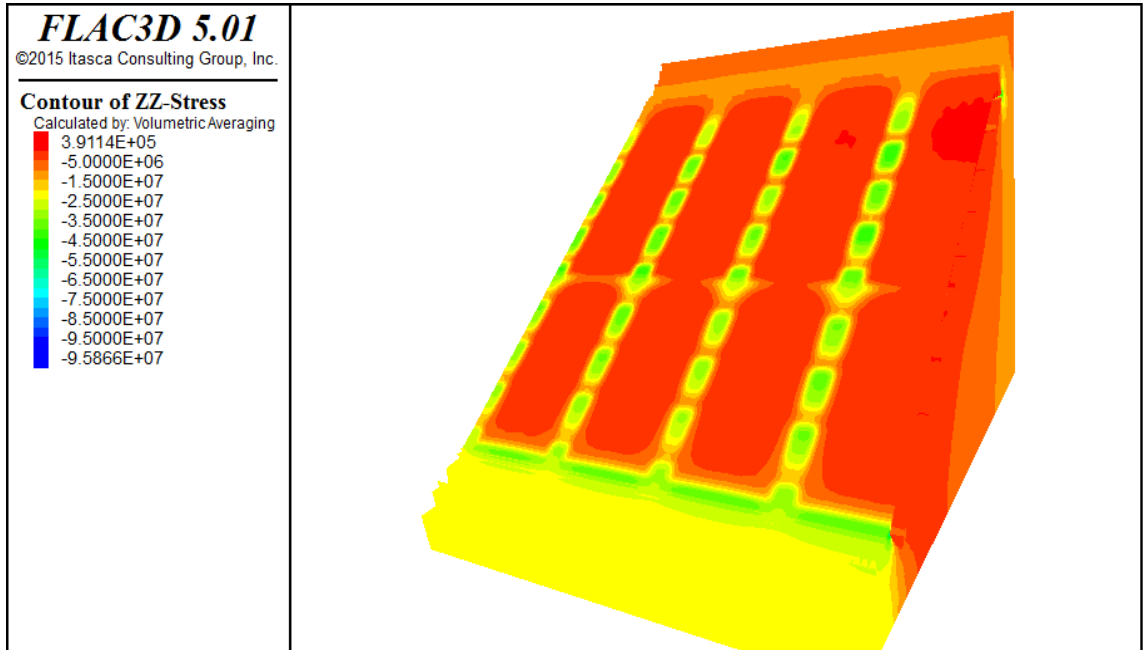
شکل ۶-۱۷: وضعیت پلاستیک‌شدگی توده‌سنگ در محدوده سقف کارگاه استخراج رگه‌ی ۷۴ به ازای $K=2$ در سناریوی یک



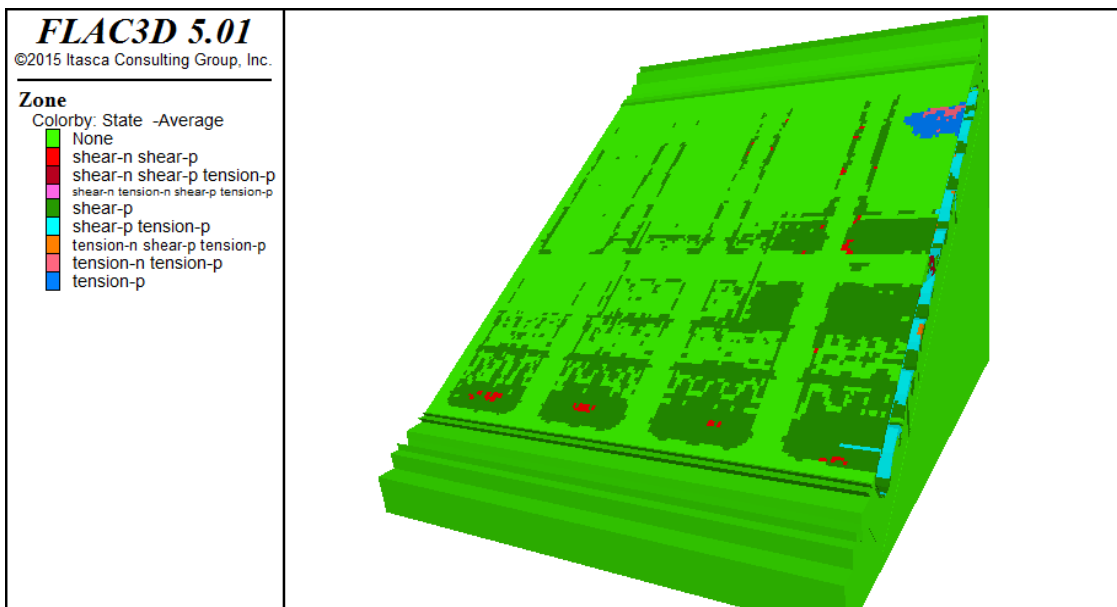
شکل ۶-۱۸: وضعیت تنش‌های قائم در سقف کارگاه‌های استخراج رگه‌ی ۴V به ازای $K=1/5$ در سناریوی یک



شکل ۶-۱۹: وضعیت پلاستیک‌شدگی توده‌سنگ در محدوده سقف کارگاه استخراج رگه‌ی ۴V به ازای $K=1/5$ در سناریوی یک

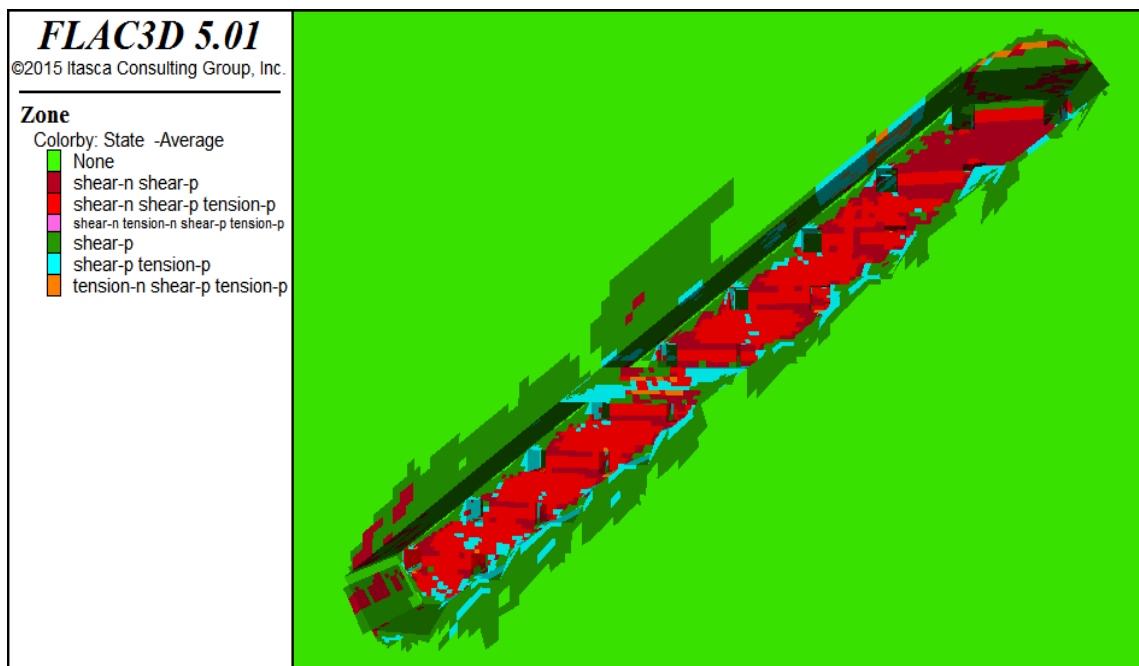


شکل ۶-۲۰: وضعیت تنش‌های قائم در سقف کارگاه‌های استخراج رگه‌ی ۴V به ازای $K=1$ در سناریوی یک



شکل ۶-۲۱: وضعیت پلاستیک‌شدگی توده‌سنگ در محدوده سقف کارگاه استخراج رگه‌ی ۴V به ازای $K=1$ در سناریوی یک

به منظور بررسی وسعت و عمق گسیختگی در بالای سقف کارگاه‌های رگه‌های V_4 و V_4+ ، مقطع مناسب مانند آنچه در شکل ۶-۲۲، مشاهده می‌شود و همچنین برای ارزیابی وضعیت پایداری پایه‌ها، محدوده‌های پلاستیک‌شدگی در مقطع عمود بر پایه‌ها نیز مورد بررسی قرار گرفته است.



شکل ۶-۲۲: نمایی از محدوده‌ی مخروطی شکل و گسترش مناطق پلاستیک در بالای سقف کارگاه رگه‌های V_4 و V_4+ در سناریوی یک

با توجه به میدان تنش‌های ایجاد شده و حالت پلاستیک‌شدگی توده‌سنگ، ملاحظه می‌شود، بیشترین ناپایداری‌ها در سقف کارگاه‌ها در طبقه‌ی اول معدن ایجاد شده است، این موضوع به خصوص در مدل‌های مربوط به رگه‌های V_4 و V_4+ بهتر قابل مشاهده است. در رگه‌های V_4 و V_4+ برای نسبت تنش افقی به قائم (K) برابر $1/5$ و 2 ، سقف در ترازهای پایین ناپایدار و در ترازهای بالا پایدار است. در حالت $K=1$ ناپایداری به صورت موضعی و جزئی رخ داده و در کل می‌توان انتظار داشت که شرایط سقف پایدار باشد. با توجه به، محدوده‌های پلاستیک‌شدگی در سقف کارگاه‌های رگه‌ی V_4 ، نواحی گسیخته شده طبق انتظار بیشتر در پهنه‌های A و B رخ داده است. برای نسبت تنش افقی به عمودی (K) برابر 2 در پایین‌ترین تراز ناپایداری در سقف کارگاه مشاهده می‌شود. در حالت $K=1.5$ سقف کارگاه در مقایسه با $K=2$ ، پایدارتر است و در حالت $K=1$ به جز بخش‌های بسیار محدود در

پایین‌ترین تراز که در هنگام انجام عملیات قابل مدیریت است، در بقیه بخش‌ها سقف پایدار است. در مدل مربوط به رگه‌های ۷۴ و ۷۴+، کلیه پایه‌های کارگاهی تحت گسیختگی قرار گرفته‌اند، بنابراین پتانسیل تخریب این پایه‌ها در سناریوی شماره یک بسیار بالاست، این در حالی است که در مدل رگه ۷۴ گسیختگی کمتری حادث شده است.

وضعیت پایداری کارگاه در سناریوی شماره یک، بر اساس نتایج، به همراه مقادیر جابجایی‌ها در سقف کارگاه برای حالت‌های مختلف طراحی در جدول ۶-۵، ارزیابی شده است. وضعیت پایدار، تا حدودی پایدار و ناپایدار پایه و سقف، به ترتیب توسط رنگ‌های سبز، زرد و قرمز مشخص شده‌اند.

جدول ۶-۵: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره یک، به ازای مقادیر مختلف K

| وضعیت پایداری بر اساس نتایج تنش‌ها و پلاستیک‌شدگی | | بیشترین جابجایی در سقف (cm) | K | محدوده |
|---|------|-----------------------------|-----|----------------|
| سقف | پایه | | | |
| | | ۱۲/۵ | ۲ | رگه‌ی V۴ |
| | | ۱۰/۵۳ | ۱/۵ | |
| | | ۱۰/۴۵ | ۱ | |
| | | ۱۹/۲ | ۲ | رگه‌ی V۴+ و V۴ |
| | | ۱۹/۳۵ | ۱/۵ | |
| | | ۲۰/۹ | ۱ | |

۶-۵-۲- سناریوی دوم (ارتفاع کارگاه ۴۴ متری و طول کارگاه ۲۴ متری)

وضعیت پایداری کارگاه در سناریوی شماره دو، بر اساس نتایج، به همراه مقادیر جابجایی‌ها

در سقف کارگاه برای حالت‌های مختلف طراحی در جدول ۶-۶، ارایه شده است.

جدول ۶-۶: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره دو، به ازای مقادیر مختلف K

| وضعیت پایداری بر اساس نتایج تنش‌ها و پلاستیک‌شدگی | | حداکثر جابجایی در سقف (cm) | K | محدوده |
|---|------|----------------------------|-----|----------------|
| سقف | پایه | | | |
| | | ۹ | ۲ | رگه‌ی V۴ |
| | | ۷/۸۷ | ۱/۵ | |
| | | ۷/۴۱ | ۱ | |
| | | ۱۵/۷۹ | ۲ | رگه‌ی V۴+ و V۴ |
| | | ۱۵/۸ | ۱/۵ | |
| | | ۱۶/۶ | ۱ | |

۶-۵-۳- سناریوی سوم (ارتفاع کارگاه ۴۴ متری و طول کارگاه ۱۴ متری)

وضعیت پایداری کارگاه در سناریوی شماره سه، بر اساس نتایج، به همراه مقادیر جابجایی‌ها در سقف کارگاه برای حالت‌های مختلف طراحی در جدول ۶-۷، ارزیابی شده است.

جدول ۶-۷: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره سه، به ازای مقادیر مختلف K

| وضعیت پایداری بر اساس نتایج تنش‌ها و پلاستیک‌شدگی | | بیشترین جابجایی در سقف (cm) | K | محدوده |
|---|------|-----------------------------|-----|----------------|
| سقف | پایه | | | |
| | | ۴/۲۷ | ۲ | رگه‌ی V۴ |
| | | ۴/۲۳ | ۱/۵ | |
| | | ۴/۴۱ | ۱ | |
| | | ۱۰/۵ | ۲ | رگه‌ی V۴+ و V۴ |
| | | ۹/۹ | ۱/۵ | |
| | | ۱۰/۱ | ۱ | |

۶-۵-۴- سناریوی چهارم (ارتفاع کارگاه ۳۴ متری و طول کارگاه ۳۴ متری)

وضعیت پایداری کارگاه در سناریوی شماره چهار، بر اساس نتایج، به همراه مقادیر جابجایی‌ها در سقف کارگاه برای حالت‌های مختلف طراحی در جدول ۶-۸، ارزیابی شده است.

جدول ۶-۸: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره چهار، به ازای مقادیر مختلف K

| وضعیت پایداری بر اساس نتایج تنش‌ها و پلاستیک‌شدگی | | بیشترین جابجایی در سقف (cm) | K | محدوده |
|---|------|-----------------------------|-----|----------------|
| سقف | پایه | | | |
| | | ۱۲/۳۵ | ۲ | رگه‌ی V۴ |
| | | ۱۰/۴۱ | ۱/۵ | |
| | | ۱۰/۲۱ | ۱ | |
| | | ۱۷/۶۳ | ۲ | رگه‌ی V۴+ و V۴ |
| | | ۱۷/۶۱ | ۱/۵ | |
| | | ۱۸/۳۲ | ۱ | |

۶-۵-۵- سناریوی پنجم (ارتفاع کارگاه ۳۴ متری و طول کارگاه ۲۴ متری)

وضعیت پایداری کارگاه در سناریوی شماره پنج، بر اساس نتایج، به همراه مقادیر جابجایی‌ها در سقف کارگاه برای حالت‌های مختلف طراحی در جدول ۶-۹، ارایه شده است.

جدول ۶-۹: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره پنج، به ازای مقادیر مختلف K

| وضعیت پایداری بر اساس نتایج تنش‌ها و پلاستیک‌شدگی | | بیشترین جابجایی در سقف (cm) | K | محدوده |
|---|------|-----------------------------|-----|----------------|
| سقف | پایه | | | |
| | | ۸/۵ | ۲ | رگه‌ی V۴ |
| | | ۷/۶ | ۱/۵ | |
| | | ۷/۱۱ | ۱ | |
| | | ۱۴ | ۲ | رگه‌ی V۴+ و V۴ |
| | | ۱۳/۸۴ | ۱/۵ | |
| | | ۱۴/۲۸ | ۱ | |

۶-۵-۶- سناریوی ششم (ارتفاع کارگاه ۳۴ متری و طول کارگاه ۱۴ متری)

وضعیت پایداری کارگاه در سناریوی شماره شش، بر اساس نتایج، به همراه مقادیر جابجایی‌ها در سقف کارگاه برای حالت‌های مختلف طراحی در جدول ۶-۱۰، ارایه شده است.

جدول ۶-۱۰: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره شش، به ازای مقادیر مختلف K

| وضعیت پایداری بر اساس نتایج تنش‌ها و پلاستیک‌شدگی | | بیشترین جابجایی در سقف (cm) | K | محدوده |
|---|------|-----------------------------|-----|----------------|
| سقف | پایه | | | |
| | | ۴/۱ | ۲ | رگه‌ی V۴ |
| | | ۴ | ۱/۵ | |
| | | ۴/۲۴ | ۱ | |
| | | ۸/۹۷ | ۲ | رگه‌ی V۴+ و V۴ |
| | | ۸/۴۶ | ۱/۵ | |
| | | ۸/۵۶ | ۱ | |

۶-۵-۷- سناریوی هفتم (ارتفاع کارگاه ۲۴ متری و طول کارگاه ۳۴ متری)

وضعیت پایداری کارگاه در سناریوی شماره هفت، بر اساس نتایج، به همراه مقادیر جابجایی‌ها در سقف کارگاه برای حالت‌های مختلف طراحی در جدول ۶-۱۱، ارزیابی شده است.

جدول ۶-۱۱: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره هفت، به ازای مقادیر مختلف K

| وضعیت پایداری بر اساس نتایج تنش‌ها و پلاستیک‌شدگی | | بیشترین جابجایی در سقف (cm) | K | محدوده |
|---|------|-----------------------------|-----|----------------|
| سقف | پایه | | | |
| | | ۱۱/۳۶ | ۲ | رگه‌ی V۴ |
| | | ۹/۹۶ | ۱/۵ | |
| | | ۱۰ | ۱ | |
| | | ۱۵/۷۹ | ۲ | رگه‌ی V۴+ و V۴ |
| | | ۱۵/۹۷ | ۱/۵ | |
| | | ۱۶/۶۹ | ۱ | |

۶-۵-۸- سناریوی هشتم (ارتفاع کارگاه ۲۴ متری و طول کارگاه ۲۴ متری)

وضعیت پایداری کارگاه در سناریوی شماره هشت، بر اساس نتایج، به همراه مقادیر جابجایی‌ها در سقف کارگاه برای حالت‌های مختلف طراحی در جدول ۶-۱۲، ارزیابی شده است.

جدول ۶-۱۲: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره هشت، به ازای مقادیر مختلف K

| وضعیت پایداری بر اساس نتایج تنش‌ها و پلاستیک‌شدگی | | بیشترین جابجایی در سقف (cm) | K | محدوده |
|---|------|-----------------------------|-----|----------------|
| سقف | پایه | | | |
| | | ۸/۳ | ۲ | رگه‌ی V۴ |
| | | ۷/۱۴ | ۱/۵ | |
| | | ۷/۱۱ | ۱ | |
| | | ۱۲/۴۶ | ۲ | رگه‌ی V۴+ و V۴ |
| | | ۱۲/۴۷ | ۱/۵ | |
| | | ۱۲/۹۳ | ۱ | |

۶-۵-۹- سناریوی نهم (ارتفاع کارگاه ۲۴ متری و طول کارگاه ۱۴ متری)

وضعیت پایداری کارگاه در سناریوی شماره نه، بر اساس نتایج، به همراه مقادیر جابجایی‌ها در سقف کارگاه برای حالت‌های مختلف طراحی در جدول ۶-۱۳، ارایه شده است.

جدول ۶-۱۳: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره نه، به ازای مقادیر مختلف K

| وضعیت پایداری بر اساس نتایج تنش‌ها و پلاستیک‌شدگی | | بیشترین جابجایی در سقف (cm) | K | محدوده |
|---|------|-----------------------------|-----|----------------|
| سقف | پایه | | | |
| | | ۳/۹۵ | ۲ | رگه‌ی ۷۴ |
| | | ۳/۹۹ | ۱/۵ | |
| | | ۴/۲ | ۱ | |
| | | ۸/۲۲ | ۲ | رگه‌ی ۷۴ و ۷۴+ |
| | | ۷/۵۹ | ۱/۵ | |
| | | ۷/۶ | ۱ | |

۶-۵-۱۰- سناریوی دهم (ارتفاع کارگاه ۱۴ متری و طول کارگاه ۳۴ متری)

وضعیت پایداری کارگاه در سناریوی شماره ده، بر اساس نتایج، به همراه مقادیر جابجایی‌ها در سقف کارگاه برای حالت‌های مختلف طراحی در جدول ۶-۱۴، ارایه شده است.

جدول ۶-۱۴: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره ده، به ازای مقادیر مختلف K

| وضعیت پایداری بر اساس نتایج تنش‌ها و پلاستیک‌شدگی | | بیشترین جابجایی در سقف (cm) | K | محدوده |
|---|------|-----------------------------|-----|----------------|
| سقف | پایه | | | |
| | | ۱۱/۲ | ۲ | رگه‌ی ۷۴ |
| | | ۹/۶۳ | ۱/۵ | |
| | | ۹/۵۷ | ۱ | |
| | | ۱۳/۸ | ۲ | رگه‌ی ۷۴ و ۷۴+ |
| | | ۱۴ | ۱/۵ | |
| | | ۱۴/۳۵ | ۱ | |

۶-۵-۱۱- سناریوی یازدهم (ارتفاع کارگاه ۱۴ متری و طول کارگاه ۲۴ متری)

وضعیت پایداری کارگاه در سناریوی شماره یازدهم، بر اساس نتایج، به همراه مقادیر جابجایی‌ها در سقف کارگاه برای حالت‌های مختلف طراحی در جدول ۶-۱۵، ارائه شده است.

جدول ۶-۱۵: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره یازدهم، به ازای مقادیر مختلف K

| وضعیت پایداری بر اساس نتایج تنش‌ها و پلاستیک‌شدگی | | بیشترین جابجایی در سقف (cm) | K | محدوده |
|---|------|-----------------------------|-----|----------------|
| سقف | پایه | | | |
| | | ۷/۸۵ | ۲ | رگه‌ی V۴ |
| | | ۶/۷۵ | ۱/۵ | |
| | | ۶/۵ | ۱ | |
| | | ۱۰/۴ | ۲ | رگه‌ی V۴+ و V۴ |
| | | ۱۰/۴ | ۱/۵ | |
| | | ۱۰/۶ | ۱ | |

۶-۵-۱۲- سناریوی دوازدهم (ارتفاع کارگاه ۱۴ متری و طول کارگاه ۱۴ متری)

وضعیت پایداری کارگاه در سناریوی شماره دوازدهم، بر اساس نتایج، به همراه مقادیر جابجایی‌ها در سقف کارگاه برای حالت‌های مختلف طراحی در جدول ۶-۱۶، ارائه شده است.

جدول ۶-۱۶: مقادیر جابجایی در سقف کارگاه برای سناریوی شماره دوازدهم، به ازای مقادیر مختلف K

| وضعیت پایداری بر اساس نتایج تنش‌ها و پلاستیک‌شدگی | | بیشترین جابجایی در سقف (cm) | K | محدوده |
|---|------|-----------------------------|-----|----------------|
| سقف | پایه | | | |
| | | ۳/۷۵ | ۲ | رگه‌ی V۴ |
| | | ۳/۷۸ | ۱/۵ | |
| | | ۳/۹۹ | ۱ | |
| | | ۶/۸ | ۲ | رگه‌ی V۴+ و V۴ |
| | | ۶/۲ | ۱/۵ | |
| | | ۶/۱۳ | ۱ | |

۶-۶-جمع‌بندی

در این بخش یک جمع‌بندی کلی از سناریوهای مختلف، برای حالت‌های استخراج یک رگه و دو رگه به‌طور همزمان، حالت‌های مختلف نسبت تنش افقی به عمودی (K) و در نظر گرفتن مشخصات ژئومکانیکی متفاوت برای هر یک از پهنه‌های A، B و C ارایه شده است. در ادامه، بهترین سناریو یا سناریوها در شرایط پایداری مناسب برای پایه‌ها و سقف کارگاه‌ها با رویکرد استخراج حداکثری معرفی شده است. نتایج جمع‌بندی در جدول ۶-۱۷، آماده است.

جدول ۶-۱۷: وضعیت پایداری پایه‌ها و سقف کارگاه‌های معدن رومرمر در حالت‌های مختلف بر اساس طراحی عددی

| سناریوی پایدار | | | | | | | | | | | | نسبت تنش افقی به عمودی (K) | حالت استخراج |
|----------------|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----------------------------|------------------|
| | | | | | | | | | | | ۱۲ | ۱ | رگه‌های ۷۴+ و ۷۴ |
| | | | | | | | | | | | ۱۲ | ۱/۵ | |
| | | | | | | | | | | | ۱۲ | ۲ | |
| ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱ | رگه‌ی ۷۴ |
| ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۱/۵ | |
| ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ | ۱۱ | ۱۲ | ۲ | |

همان‌طور که قبلاً اشاره شده است، وضعیت پایدار، تا حدودی پایدار و ناپایدار پایه و سقف، به ترتیب با رنگ‌های سبز، زرد و قرمز مشخص شده‌اند. بر اساس نتایج به‌دست آمده، در برخی از سناریوها، سقف کارگاه در حالت پایدار قرار دارد، این در حالی است که در همان سناریو پایه‌ها به مرز ناپایداری رسیده‌اند. در این موارد به دلیل عدم پایداری پایه‌ها در برابر بارهای وارده، سقف کارگاه نیز

دچار ریزش خواهد شد. بنابراین به عنوان یک نتیجه‌ی کلی در چنین مواردی، سقف و پایه هر دو ناپایدار و سناریوی مورد نظر ناموفق ارزیابی شده است.

درمدل مربوط به رگه‌های V_4 و V_4+ ، در سناریو شماره‌ی یک (به ازای $k=1$ و 2 و $5/1$)، سناریوی شماره‌ی دو (به ازای $k=1$ و $5/1$)، سناریوی شماره‌ی چهار (به ازای $K=1$)، سناریوی شماره‌ی پنج (به ازای $K=1$) و سناریوی شماره‌ی هفت (به ازای $K=1$ و 2)، علاوه بر گسیختگی‌های موضعی در سقف، نواحی ناپایدار مخروطی شکل تا محدوده بالاتر از سقف کارگاه‌ها گسترش پیدا کرده‌اند. بنابراین در این موارد نگرانی از بروز گسیختگی‌ها بیشتر است. در سایر سناریوها تنها گسیختگی‌هایی با ضخامت کم در سقف کارگاه‌ها رخ داده است.

نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد، در اکثر سناریوهای طراحی رگه‌ی V_4 ، ثبات و پایداری سقف کارگاه‌ها تضمین شده است و تنها در برخی سناریوها که ابعاد کارگاه در آن‌ها بزرگ‌تر است مانند سناریو شماره یک، دو و هفت گسیختگی‌های موضعی و با ضخامت کم رخ داده است.

خروجی‌های تحلیل عددی حاکی از این است که افزایش طول کارگاه عامل اصلی افزایش تنش‌های فشاری وارد بر سقف کارگاه و پایه‌ها و به تبع آن افزایش جابجایی‌ها و ناپایداری‌ها است و این نکته در تمامی سناریوها مشهود است. همچنین مقایسه بین سناریوهای شماره‌ی سه، شش، نه و دوازده نشان می‌دهد، در طول ۱۴ متر در هر ارتفاعی از کارگاه، سقف کارگاه کاملاً پایدار است.

در برخی از سناریوها که پایه در وضعیت ناپایدار و سقف تنها تحت گسیختگی‌های موضعی با ضخامت کم قرار گرفته است، انتظار ریزش و ناپایداری در سقف وجود دارد.

از آن‌جا که در روش عددی، تحلیل پایداری سقف و پایه به صورت توأمان مورد بررسی قرار می‌گیرد، نتایج آن نسبت به روش تجربی که پایداری سقف و پایه به صورت جداگانه تحلیل می‌شود، محافظه‌کارانه‌تر است.

فصل هفتم

نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۷-۱- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

طراحی پایه‌ها در بهینه‌سازی عملیات معدن‌کاری بسیار مهم بوده و برای رسیدن به یک طرح ایمن و اقتصادی، باید مطالعات دقیق رفتار سنگ‌ها و تحلیل پایداری فضای استخراجی صورت پذیرد. در بحث طراحی پایه‌ها لازم است به پایداری کارگاه‌های استخراج که نیز برای استخراج مواد معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرند توجه داشت. رفتار پایه‌ها پیچیده، و عواملی که بر پایه تاثیر می‌گذارند، پرشمار هستند. بنابراین تا به حال راه حل دقیق برای طراحی پایه ارائه نشده است. اگر چه روش‌های موجود فهم ما را بهبود بخشیده‌اند، اما هر کدام از روش‌های طراحی موجود دارای محدودیت‌هایی هستند که باید در حین طراحی اعمال شوند. مورد دیگری که در معدن رومرمر به دلیل طراحی خاص آن ملاحظه می‌شود، اهمیت پایداری سقف ایجاد شده برای هر طبقه است که بایستی در طراحی مناسب پایه‌ها به آن توجه نمود. بدین منظور با استفاده از روش‌های تجربی و عددی به تحلیل پایداری پایه‌ها و همچنین سقف پایدار که نیز به نوعی در توجیه ابعاد فضایی پایدار پایه‌ها، ادامه فعالیت استخراجی در ترازهای دیگر معدن و اقتصادی بودن طرح، تاثیر گذار است، پرداخته شده است.

نتایج حاصل از طراحی تجربی نشان می‌دهد که برداشت پایه‌های امتدادی بهتر از برداشت پایه‌های شیبی است. به عبارت دیگر، به‌عنوان مثال، کارگاه با ارتفاع ۲۴ و طول ۱۴ از لحاظ پایداری بهتر از کارگاه با ارتفاع ۱۴ متر و طول ۲۴ متر است.

نتایج تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد، در اکثر سناریوهای طراحی رگه‌ی ۷۴، ثبات و پایداری سقف کارگاه‌ها تضمین شده است و تنها در برخی سناریوها که ابعاد کارگاه در آن‌ها بزرگ‌تر است مانند سناریو شماره یک، دو و هفت، گسیختگی‌های موضعی و با ضخامت کم رخ داده است. همچنین مقایسه بین سناریوهای شماره‌ی سه، شش، نه و دوازده نشان می‌دهد، در طول ۱۴ متر در هر ارتفاعی از کارگاه، سقف کارگاه کاملاً پایدار است.

به طور کلی نتایج حاصل از تحلیل عددی نشان می‌دهد که افزایش طول کارگاه عامل اصلی افزایش تنش‌های فشاری وارد بر سقف کارگاه و پایه‌ها و به تبع آن افزایش جابجایی‌ها و ناپایداری‌ها است. از آنجایی که در روش عددی، تحلیل پایداری سقف و پایه به صورت توأمان مورد بررسی قرار می‌گیرد، نتایج آن نسبت به روش تجربی که پایداری سقف و پایه به صورت جداگانه تحلیل می‌شود، محافظه‌کارانه‌تر است.

در نهایت با بررسی نتایج حاصل از تحلیل تجربی و عددی، می‌توان برای حالت یک رگه، کارگاه با طول ۱۴ متر و ارتفاع‌های ۳۴، ۲۴ و ۱۴، و برای حالت دو رگه، کارگاه با طول ۱۴ متر و ارتفاع ۱۴ متر، را برای طراحی مناسب دانست.

۷-۲- پیشنهادها

پیشنهاد می‌شود در موارد مشابه معدن رومرمر و با توجه به لزوم نگاه کل‌گرا به موضوع طراحی و تحلیل پایه‌ها در معادن زیرزمینی، در کنار روش‌های تجربی از روش‌های عددی که بر اساس نتایج این تحقیق مشخص شده است که محافظه‌کارانه‌تر هستند، استفاده شود.

با توجه به این که در این تحقیق برای کاربرد روش عددی، از مدل رفتاری موهرکلمب در طراحی پایه‌ها استفاده شده است، در تمامی سناریوها با در نظر گرفتن یک تقریب مناسب، از پلاستیک‌شدگی‌های جزئی ایجاد شده در پایه‌ها چشم‌پوشی شده است. به هر حال، برای انجام تحلیل بهتر و دستیابی به نتایج واقع‌گرایانه‌تر، پیشنهاد می‌شود پس از انجام آزمون‌های لازم و تعیین ویژگی‌های مکانیکی و رفتاری توده‌سنگ در خصوص رفتار پایه‌ها، از مدل رفتاری کرنش نرمی استفاده شود.

در این تحقیق، میدان تنش بر اساس اطلاعات کلی موجود برآورد شده است. با توجه به اهمیت ویژگی‌های میدان تنش، پیشنهاد می‌شود، میدان تنش منطقه به درستی ارزیابی شود و مورد استفاده قرار گیرد.

در نهایت پیشنهاد می‌شود از نتایج حاصل از پیاده‌سازی یافته‌های این تحقیق، برای اعتبارسنجی مدل‌های ارایه شده و واسنجی (کالیبراسیون) آن‌ها استفاده شود.

- AASHTO (1989), “Standard Specifications for Highway Bridges”, 14th edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington DC.
- Dabagh , A ., Fatehi Marji, M., Forghani, H., (2009). “Simulation of Subsidence with a Higher Order Displacement Discontinuity Method”. International Journal of Mining Engineering, Volume 4, Issue 7, Page 53-6 (In Persian).
- Deere, D.U., Miller, R.P. (1965), “Engineering classification and index properties for intact rock”, Tech. Rep. No. AFWL-TR-65-116, Air Force Weapons Lab, Kirtland Air Base, New Mexico.
- Einstein, H. H., Veneziano D., Baecher G. B., O’Reilly K. J. (1983), “The effect of discontinuity persistence on a rock slope stability”, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 20, 5, pp. 82-94
- Esterhuizen, GS., (2005), BCFV3.05-A program to predict block cave fragmentation, Technical reference and user’s guide.
- Hoek, E. and Brown, E.T., 1980. Underground Excavations in Rock. The institution of Mining and Metallurgy, London
- Hoek, E., Bray, J.W. (1981), “Rock Slope Engineering”, 3rd edition, Institution of Mining and Metallurgy, London, UK.
- Hoek, E., Brown, E.T., 1982, “Underground excavations in rock”, The institution of Mining and Metallurgy, Hertford, England, 527 p.
- ISRM, (1978), “Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses”, International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts, 15, 6, pp. 319–368.
- Jeremic M. L “Ground mechanics in hard rock mining” Latin Book of Rock mechanics Publisher A. A. Balkema 537p, 1987.
- Jun De, Q. I., Jing, C. H. A. I., & zhang, J. (2014). Numerical Design of Pillar Width in the Inclined Coal Seam. Advanced Materials Research, 977.
- Kim B. H., Cai M., Kaiser P. K. (2007), “Rock Mass Strength with Non-persistent Joints”, 1st Canada - U.S. Rock Mechanics Symposium, 27-31 May, Vancouver, Canada, pp. 241-248.
- Krauland, N., Soder, P.E., 1987, “Determining pillar strength from pillar failure observations”, Engineering Mining Journal, Vol., 8, pp: 34-40
- Kulatilake P.H.S.W., Um J., Wang M., Escandon R. F., Varvaiz J. (2003),

- “Stochastic fracture geometry modeling in 3-D including validations for a part of Arrowhead East Tunnel, California, USA”, *Engineering Geology*, 70, pp. 131–155.
- Lama, R.D., Vutukuri, V.S. (1978), “Handbook on mechanical properties of rocks”, *Trans. Tech. Publ.*, 4, 317-399.
 - Lunder, P.J., Pakalnis, R., 1997, “Determination of the strength of hard rock mine pillars”, *Bulletin of Canadian Inst. Min. Metall.*, Vol. 90, pp: 51-55.
 - Mathews, K. E. Hoek, D. C. Wyllie and S. B. V. 1980 Stewart, “Prediction Of Stable Excavation Spans for Mining at Depths below 1000 Metres in Hard Rock,” *Report to Canada Centre for Mining and Energy Tehnology.*.
 - Mawdesley, C. A. (2002), “Prediction rock mass cavability in block caving mines”, *Ph.D Thesis. Queensland: University of Queensland .*
 - Mawdesley, C., Trueman, R., & Whiten, W. (2001), “Extending the Mathews Stability Graph for open stope design”, *Trans Inst. Min and Metall, Sect A: Min Technol*, pp. 27-39.
 - Maybee G. w “Pillar design in hard brittle rocks” Thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the degree of Master of Applied.1992
 - Momenzadeh M. (1976). "Stratabound lead-zinc ores in the lower Cretaceous and Jurassic sediments in. Diss., Univ., Heidelberg.
 - Mortazavi A., Hassani F.P., Shabani M.(2008), “A numerical investigation of rock pillar failure mechanism in underground openings”. *Journal of Computers and Geotechnics*. Volume 36, Issue 5, June 2009, Pages 691-697.
 - Priest S. D. (1993), “Discontinuity Analysis for Rock Engineering”, Published by Chapman & Hall, 2-6 Boundary Row, London SE1 8 HN.
 - Sojoberg, J., 1992, “Failure modes and pillar behavior in the Zinkgruvan mine”, *Proc. Of 33rd U.S. RockMechanics symposium, Sante Fe. Rotterdam, A. A. Balkema*, pp: 491-500.
 - Stewart SBV & Forsyth WW (1995), “The Mathews method for open stope design”, *CIM Bull*.pp. 45-53.
 - Stocklin J. (1968). "Structural history and tectonics of Iran; a review",. *American Association of*, 1229-1258.
 - Suorineni, F., Kaiser, p., and Tannant, D., (2000), “Unifying application of the stability graph for open stope design”, *Paper submitted to CIM Bull*.
 - Trueman, R., Mikula, P., Mawdesley, C., & Harries, N. (2000), “Experience in Australia with the application of the Mathews’ method for open stope design”, *CIM Bull*, pp. 162-167.

- Turgrul, A., Zarif, I.H. (1999), "Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey", *Engrg. Geol.*, 51, 303-317.
- Vasarhelyi, B. (2003), "Some observations regarding the strength and deformability of sandstones in case of dry and saturated conditions", *Bull. Engrg. Geol. Envir.*, 62, 245-249.
- Vasarhelyi, B., (2005), "Statistical analysis of the influence of water content on the strength of the Miocene limestone", *Rock Mech. and Rock Engrg.*, 38, 69-76.
- Vutukuri, V.S., Katsuyama, K., (1994), "Introduction to Rock Mechanics", Industrial Publishing & Consulting, Incorporated, 275 p.
- Xu, B., Yin, S., Zhang, X., & Wu, J. (2014). *Research on the Stability of Waterproof Coal Pillar in Steep Seam under Aquifers. An Interdisciplinary Response to Mine Water Challenges* Sui, Sun & Wang, China University of Mining and Technology Press, Xuzhou, ISBN 978-7-5646-2437-8
- Yasar, E., Erdogan, Y. (2004b), "Correlating sound velocity with the density, compressive strength and Young's modulus of carbonate rocks", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 41, 871-875.
- York G, Ganbulat I, Jack Bw. (2000). "Cool pillar design Procedurey", Safety in mine research advisory committee, CSIR Mining Technology, 337 COL project, 216p
- Zadhesh J., Jalali S. E., Ramezanzadeh A. (2013), "Estimation of joint trace length probability distribution function in igneous, sedimentary, and metamorphic rocks", *Arab. J. Geo. Sci.*, DOI 10.1007/s12517-013-0861-1.
- Zhang L. and Einstein H. H. (2000), "Estimating the Intensity of Rock Discontinuities", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 37, pp. 819-837.

• جلالی، م، نجفی، م، (۱۳۹۱)، طراحی ابعاد بهینه پایه در معدن کرومیت فاریاب با توجه به ترتیب مراحل استخراج، نشریه علمی - پژوهشی "مهندسی معدن"، دوره هفتم، شماره پانزدهم، صفحه ۳۵ تا ۴۷

• جلالی، م، عسکرنژاد، ن، بهری، ز، (۱۳۹۰)، تعیین شکل مناسب پایه های استوانه ای هذلولوی در روش استخراج کارگاه و پایه با استفاده از مدل سازی عددی مطالعه ی موردی "معدن کرومیت فاریاب"

• زنگویی، محمود، (۱۳۹۳)، "تحلیل پایداری کارگاه های استخراج زیرزمینی معدن سرب و روی

- انگوران"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه زنجان.
- شرکت باما، ۱۳۹۶، تحلیل پایداری پایه‌های تاج و کارگاهی در کارگاه‌های استخراج معدن رومرمر، طرح پژوهشی، دانشگاه صنعتی شاهرود.
 - عطایی، م. (۱۳۹۰). معدن‌کاری زیرزمینی؛ آماده‌سازی معادن زیرزمینی، روش‌های بدون نگهداری، جلد اول. شاهرود: انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.
 - غلام‌نژاد، جواد و پوزش، علیرضا، ۱۳۹۲، تحلیل پایداری کارگاه استخراج زیرزمینی با استفاده از روش عددی در معدن اتاق و پایه دهبید، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک، اردبیل.
 - لیان‌یانگ زانگ، (۱۳۹۰)، خواص و رفتار مهندسی سنگ‌ها، ترجمه شریف‌زاده، م.، نورانی، ر.، چاپ اول، انتشارات مرکز نشر صدا، ۳۰۴ ص.
 - مرتضوی، ع، شعبانی مشکول، م، (۱۳۸۴)، تحلیل عددی تاثیر درزه داری توده سنگ در مقاومت پایه‌های سنگی.
 - مرتضوی، ع، شعبانی مشکول، م، هم‌متی شعبانی، ع، (۱۳۸۵)، تحلیل عددی مقاومت پایه‌های سنگی با استفاده از پارامترهای تغییر یافته‌ی معیار هوک و براون، نشریه دانشکده فنی، جلد ۴۰، شماره ۱ صفحه ۷۹ تا ۹۱
 - مهاجرانی، س. انجام برداشت‌های میدانی و استخراج پارامترهای هندسی سنگ درون‌گیر سازه تونل منطقه رومرمر. گزارش فاز سوم (مرحله اول) امور ژئوتکنیک، شرکت باما، ۱۳۹۴.
 - مهاجرانی، س. تهیه نقشه سه بعدی سنگ‌شناسی و پر شدگی ناپیوستگی‌ها، نقشه سه بعدی درزه‌داری منطقه رومرمر و تحلیل مقاطع. گزارش فاز دوم امور ژئوتکنیک، شرکت باما، ۱۳۹۴.
 - مهاجرانی، س. مطالعات مقدماتی و تحلیل آماری بر روی داده‌ها. گزارش فاز اول امور ژئوتکنیک، شرکت باما، ۱۳۹۴.
 - نجفی، م، نوروزی، م، مطهری، م، (۱۳۹۴)، "مدلسازی عددی پایه‌های زغالی در لایه‌های زغالی شیبدار، مطالعه موردی معدن زغال‌سنگ همکار"، نشریه علمی-پژوهشی روش‌های تحلیلی و عددی در مهندسی معدن، شماره ۱۱ صفحه ۲۷ تا ۳۳
 - نوروزی، م، (۱۳۹۳)، "برآورد مقاومت توده‌سنگ دارای ناپیوستگی‌های ناپایا با استفاده از مدل تصادفی شبکه درزه‌های مجزا (مورد مطالعاتی توده‌سنگ ساختگاه سد و نیروگاه رودبار لرستان)"،

پایان نامه دکترا - دانشگاه صنعتی شاهرود.

- نوریان بیدگلی، مجید و شمسی، غلامرضا، ۱۳۸۳، "تحلیل پایداری پایه تاج بین کارگاه‌های استخراج معدن کوشک"، دومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، تهران.
 - هارتمن، ه. (۱۹۸۷). اصول مهندسی معدن ترجمه مهدی یوری. انتشارات دانشگاه صنایع و معادن.
-
-

Abstract:

In this project, stope and crown pillars in Roomarmar lead and zinc mine have been analysed, globally. In the global analysis, all pillars and stopes located in each mine field were considered as a integrated components.

Based on global analysis, in the first step, some senario related various geometeries of the mine levels have been generated. Then, geomechanical properties of the rock mass were assigned to the contry rock sorounded each levels. Fainally, emprical and numerical analysis were implemented on the each senarios.

Generally speeking, emprical analysis showes pillars that they were located between gate ways can be more efficient than pillars that they were remained parallel to gate ways.

More over, numerical analysis indicates the effect of stope extention in strike direction of vien on the instability of stopes is more than stope extention in dip direction of vein.

Comparisson between numerical and emprical analysis says that numerical results are more conservative than emprical analysis.

Keywords: Stability Analysis, Stope and Pillar, FLAC^{3D}, Roomarmar mine



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, Petroleum & Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Tunnel and Underground Spaces

stability analysis of pillars in stopes of Roomarmar mine

By:

Mehdi heydarmojeni

Supervisor:

Seyed-mohammad esmaiel
jalali

Advisor:

Mohammad mohammadkhani

October 2020