

ارزیابی پارامترهای هندسی مؤثر بر طراحی شیب بهینه دیواره نهایی معدن طلا-مس شادان

امید نقی پور^۱، علی نقی دهقان^{۲*}، کاوه آهنگری^۳

۱- کارشناسی ارشد گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، omid.naghipour@gmail.com

۲- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، a.dehghan@srbiau.ac.ir

۳- دانشیار گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران، kaveh.ahangari@gmail.com

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۸/۰۷/۰۷ - تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۶/۰۴)

چکیده

انتخاب شیب بهینه و پایدار برای جلوگیری از اضافه باطله برداری و کاهش ریسک ریزش دیواره معادن روباز یک امری ضروری است. هدف اصلی این تحقیق، ارائه یک طراحی پایدار و بهینه از شیب نهایی دیواره شرقی معدن طلا-مس شادان بر مبنای محاسبه حداقل فاکتور ایمنی (۱/۲۰) به روش مدل سازی عددی و تحت شرایط مختلف مشخصات هندسی شیب است. مدل سازی عددی به روش تفاضل محدود (FDM) و با استفاده از نرم افزار $FLAC^{3D}$ که قابلیت محاسبه فاکتور ایمنی (FS) به روش کاهش مقاومت برشی را دارد، انجام گرفت. بنابراین، مجموعه ای از مدل های عددی سه بعدی (3D) در قالب سناریوهای مختلف با تغییر در مشخصات هندسی شیب دیواره نهایی کاواک معدن (عرض، ارتفاع و شیب پله، ارتفاع پیت و زاویه کلی شیب)، بررسی و ارزیابی شدند. بر اساس تحلیل های انجام شده در طول سناریوهای مختلف، نهایتاً سناریوی پنجم با حداقل فاکتور ایمنی ۱/۲۰ به عنوان طرح پیشنهادی معرفی شد. بر اساس طرح اولیه معدن (سناریوی اول) با فاکتور ایمنی ۱/۳۹، در سناریوی پنجم با کاهش عرض پله ها از ۶/۸ متر به ۵ متر و نیز افزایش ارتفاع آن ها از ۱۰ متر به ۱۲ متر که منجر به افزایش زاویه شیب سطح پله ها (از ۷۰ درجه به ۷۳ درجه) و متعاقباً افزایش زاویه کلی شیب (از ۴۳ درجه به ۵۲ درجه) می شود، فاکتور ایمنی شیب نهایی دیواره کاواک معدن به مقدار حداقل ۱/۲۰ کاهش یافته است. بیشترین تأثیر ناشی از تغییر فاکتور ایمنی مربوط به کرنش برشی و جابجایی افقی در مدل است به طوری که حداکثر کرنش برشی ($1/125^2$) و حداکثر جابجایی افقی (۲۵/۷۵ - سانتی متر) مربوط به سناریوی پنجم با حداقل فاکتور ایمنی (۱/۲۰) است. در حالی که بیشترین مقدار جابجایی قائم (۲۹/۶۳ سانتی متر) مربوط به مدل سناریوی اول (FS=۱/۳۹) با بیشترین ارتفاع دیواره در حدود ۲۱۹ متر می باشد که کمترین تأثیرگذاری از مقدار فاکتور ایمنی را نشان می دهد.

کلمات کلیدی

تحلیل پایداری، مدل سازی عددی، نرم افزار $FLAC^{3D}$ ، فاکتور ایمنی، معدن طلا-مس شادان

۱-مقدمه

اطمینان آن است. تحلیل پایداری مقدماتی اغلب به منظور تعیین پارامترهای بحرانی مؤثر در پایداری صورت می‌گیرند. در صورتی که ارزیابی پارامترهای هندسی و فیزیکی در پایداری شیروانی و تعیین نقش هر یک از آنها نیازمند انجام تحلیل-های دقیق‌تر می‌باشند. به منظور بررسی پایداری شیروانی‌های سنگی و به عبارتی دیواره معدن روباز روش‌های مختلفی وجود دارد. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های تجربی، روش-های تعادل حدی و روش‌های عددی اشاره کرد [۳، ۷ و ۸]. در روش‌های تجربی بر اساس سیستم طبقه‌بندی به بررسی پایداری شیب‌ها می‌پردازند. روش‌های تجربی آسان‌ترین و سریع‌ترین روش برای تحلیل پایداری‌اند. روش‌های تعادل حدی یکی از پرکاربردترین روش‌ها در تحلیل پایداری شیروانی‌ها هستند. از این روش‌ها می‌توان برای تعیین ضریب اطمینان انواع مختلف ناپایداری‌های محتمل در شیب‌های خاکی و سنگی استفاده کرد. روش‌های تحلیل عددی پیشرفت‌های تازه‌تری نسبت به روش‌های تعادل حدی به منظور ارزیابی پایداری شیب‌ها و محاسبه فاکتور ایمنی^۲ (FS) داشته‌اند. به طوری که طی سال‌های اخیر به طور گسترده روش‌های عددی (شامل روش‌های پیوسته^۳، روش‌های ناپیوسته^۴ و روش‌های ترکیبی^۵) به عنوان یک ابزار قدرتمند در شبیه‌سازی و تحلیل پایداری معدن روباز، مورد استفاده قرار گرفته‌اند، که این موضوع منجر به ارائه راه‌حل‌های ایده‌آل و نزدیک‌تر به شرایط واقعی پروژه شده است [۹-۱۲].

فاکتور ایمنی (FS) یک رویکرد رایج برای ارزیابی پایداری شیب است. بیشاپ^۶، فاکتور ایمنی را به عنوان نسبت مقاومت برشی واقعی به حداقل مقاومت برشی مورد نیاز برای حفظ تعادل تعریف کرد (شکل ۱) [۹، ۱۱]. از این رو، مقدار FS یک (FS=1) نشان می‌دهد که گسیختگی شیب قریب الوقوع است. روش کاهش مقاومت^۷ (SRM) توسط موهر- کولمب برای محاسبه FS به طور گسترده در تحقیقات پایداری شیب و مدل‌سازی عددی کاربرد دارد. در روش SRM، خصوصیات مقاومت برشی واقعی توده سنگ (چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) تا زمانی که یک گسیختگی رخ دهد با یک ضریب کاهش می‌یابد (شکل ۱). فاکتور کاهش مقاومت^۸ (SRF) بوسیله رابطه (۱) به صورت زیر تعریف می‌شود [۱۳]:

$$FOS = SRF = \frac{C_r}{C_r} = \frac{\tan \phi_r}{\tan \phi_r} \quad (1)$$

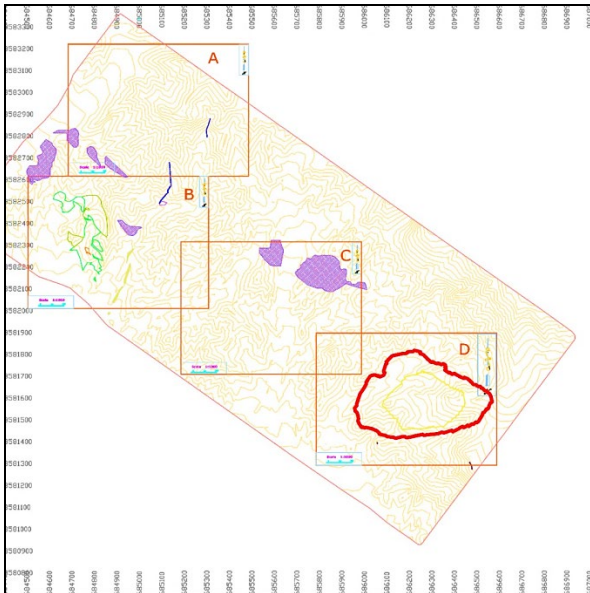
در حالی که C_r و ϕ_r به ترتیب مقاومت چسبندگی اولیه و زاویه اصطکاک داخلی اولیه و همچنین C_r و ϕ_r به ترتیب

بسیاری از فعالیت‌های مهندسی باعث برش توده سنگ می‌شوند. در مهندسی عمران می‌توان پروژه‌هایی از قبیل، سیستم‌های حمل و نقل شامل مترو و خطوط آهن، سدها برای تولید برق و خدمات آبی و صنعتی را نام برد و همچنین در معدن‌کاری نیز می‌توان به پروژه‌هایی از قبیل استخراج معدن روباز که بخش عمده‌ای از تولید مواد معدنی جهان را تشکیل می‌دهند، اشاره کرد. امروزه با رشد تقاضای جهانی برای مواد معدنی و پیشرفت در تکنولوژی، عمق معدن روباز به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. این امر چندین چالش طراحی را در مهندسی شیب ایجاد کرده و احتمال گسیختگی شیب-های بزرگ را افزایش داده است [۱ و ۲]. در یک معدن روباز، گسیختگی شیب نه تنها منجر به تأخیر در تولید می‌شود بلکه ممکن است باعث آسیب و از بین رفتن تجهیزات نیز شود. زاویه کلی شیب دیواره‌های معدن نیز از نزدیک به قائم برای توده سنگ‌های با کیفیت بالا تا 30° ، برای توده سنگ‌های ضعیف، متغیر است. شیب دیواره‌های معدن روباز معمولاً بر اساس فاکتور ایمنی $1/4 - 1/2$ طراحی می‌شوند و جابجایی احتمالی دیواره‌ها و ریزش‌های سطحی در برخی مناطق در طول مدت زمان استخراج تا حدی قابل قبول است [۳ و ۴].

در طراحی حفاری شیروانی‌ها مقدار کمی انعطاف‌پذیری برای تنظیم و تعدیل کردن جهت‌داری شیروانی در مقابل شرایط زمین‌شناسی منطقه وجود دارد. با توجه به طراحی معدن روباز، موقعیت کاواک^۱ معدن باید در بدنه سنگ بکر طراحی شود و طراحی معدن باید به گونه‌ای باشد که با شرایط زمین‌شناسی حاکم بر منطقه همخوانی داشته باشد. الگوی حفاری معدن نیز باید به گونه‌ای باشد که حداکثر ایمنی را به واسطه حفاری در حداکثر ارتفاع و شیب مناسب تأمین کند. به طور کلی یک طراحی مناسب، تقابل بین پایداری و مسائل اقتصادی است. به این دلیل که حفاری معدن با شیب بیشتر، اغلب هزینه کمتری نسبت به حفاری معدن با شیب‌های کمتر در بر دارد زیرا حجم باطله‌برداری کمتری انجام می‌شود. اما شیروانی‌های پر شیب نیاز به نصب تجهیزات پایداری‌سازی گران‌تر همانند راک بولت‌ها و شاتکریت، برای کاهش خطر عدم پایداری کلی شیروانی و گسیختگی‌های سنگی در مدت عمر عملیاتی پروژه دارند [۳، ۵ و ۶].

یکی از اساسی‌ترین مسائل در مهندسی سنگ، تحلیل و تعیین پایداری سطوح شیب‌دار با هدف تشخیص پایداری و یا عدم پایداری شیروانی برای تقویت آن به منظور بالا بردن ضریب

چهار آنومالی در قالب بلوک‌های معدنی (A تا D) مشخص شده‌اند که در شکل ۲ نمای کلی از منطقه و محدوده هر بلوک نشان داده شده است. از میان چهار بلوک مشخص شده در محدوده معدن مورد نظر، در حال حاضر مطالعات زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی (ژئومکانیکی) تنها به منظور طراحی شیب‌های پایدار بلوک (D) انجام شده است (شکل ۲) [۱۵].



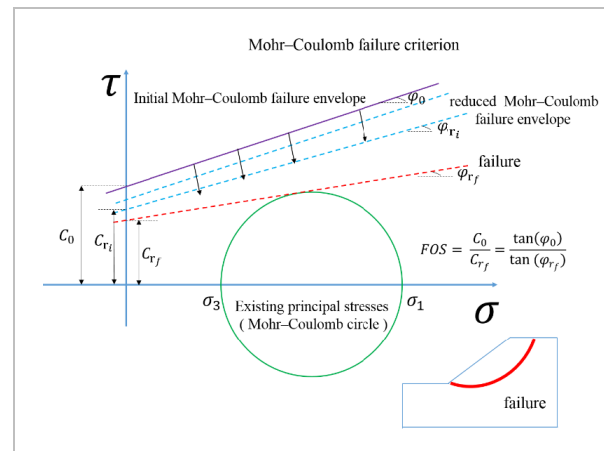
شکل ۲- نمای کلی منطقه و محدوده چهار بلوک معدنی [۱۵]

۲-۲- ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومکانیکی معدن

منطقه مورد مطالعه از نظر چینه‌شناسی، نفوذی‌های دیوریتی تا گرانودیوریتی پورفیری^۹ به‌عنوان سنگ میهمان بوده که در سنگ‌های ولکانیکی آندزیتی مربوط به ائوسن نفوذ کرده‌اند [۱۶]. همچنین از نظر زمین‌ساخت، منطقه شادان در یک بلوک گسلی آپلیفت^{۱۰} (بالازدگی) قوسی‌شکل از سنگ‌های ولکانوپلوتونیک ائوسن^{۱۱} واقع شده که در مرز شمالی آن، گسلی معکوس با شیب به سمت شمال وجود دارد. در سنگ‌های رخنمون یافته، دگرسانی پتاسیک تیپیک (بیوتیت) ثانویه شدید و فلدسپات پتاسیم در سنگ‌های ولکانیکی آندزیتی و نفوذی‌های گرانودیوریت) همراه با استوک‌ورک‌ها^{۱۲} و رگه‌های کوارتز-سولفید (اکسید شده) در سطح همراه با ملاکیت‌های کوچک) مشاهده می‌شود.

در محدوده معدن طلا-مس شادان (بلوک D) مجموعه‌ای از مطالعات سطحی و زیرسطحی به‌منظور برآورد پارامترهای ژئومکانیکی ماده‌سنگ و توده‌سنگ انجام شده است (شامل تعداد ۱۴ حلقه گمانه اکتشافی به مجموع طول ۱۷۶۷ متر). بر اساس مطالعات انجام شده (بررسی‌های برجا و گمانه‌های

مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته هستند.



شکل ۱- روش کاهش مقاومت برشی [۱۱]

فاکتور ایمنی در رابطه (۱) معادل فاکتور کاهش مقاومت است. در مطالعه حاضر نیز این روش با استفاده از روش کاهش مقاومت در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ بکار گرفته شده است. برای محاسبه فاکتور ایمنی برای هر روش، روش کاهش مقاومت در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ که از یک روش تفاضل محدود (FDM) برای تجزیه و تحلیل بهره می‌برد، استفاده می‌شود [۱۴].

مهم‌ترین هدف این تحقیق، ارزیابی پارامترهای هندسی مؤثر بر تعیین شیب بهینه دیواره نهایی معدن بر مبنای محاسبه فاکتور ایمنی (FS) است. بنابراین تحلیل سه‌بعدی پایداری شیب دیواره نهایی معدن طلا-مس شادان به روش تفاضل محدود (FDM) با در نظر گرفتن پارامترهای هندسی شیب دیواره معدن (عرض، ارتفاع و زاویه سطح پله، ارتفاع و زاویه شیب کلی پیت)، به‌منظور دستیابی به زاویه شیب بهینه انجام شد.

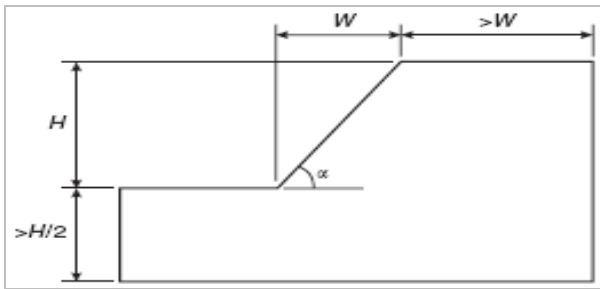
۲- مشخصات معدن طلا-مس شادان

۲-۱- معرفی پروژه

کانسار طلا-مس پورفیری شادان در ۶۵ کیلومتری جنوب غرب شهر بیرجند (استان خراسان جنوبی) واقع شده و جزو توابع بخش مرکزی شهرستان خوسف (اراضی روستای شادان) به شمار می‌رود. محدوده مورد نظر بین طول‌های جغرافیایی $59^{\circ}00'00''$ - $58^{\circ}56'43''$ غربی و عرض‌های جغرافیایی $32^{\circ}25'4''$ - $32^{\circ}20'50''$ شمالی واقع شده است و مساحتی در حدود ۳۵ کیلومتر مربع را پوشش می‌دهد. در این محدوده

مدل‌سازی عددی (تفاضل محدود) و به کمک نرم افزار $FLAC^{3D}$ انجام گرفته است. بدین منظور، در طی فرآیند ساخت مدل‌های عددی از مشخصات ژئومکانیکی مربوط به چهار لایه اصلی زمین‌شناسی در دیواره شرقی معدن شامل آندزیت، لیتیک توف، توف آندزیتی و مونزودیوریت (جدول ۱) استفاده شده است. در مدل‌سازی عددی، محیط سنگی به صورت ناهمگن، ناهمسانگرد با رفتار الاستوپلاستیک و معیار موهر کولمب در نظر گرفته شد.

ابعاد مدل به گونه‌ای در نظر گرفته شده تا ضمن جلوگیری از تأثیر مرزهای مدل بر نتایج و ایجاد خطا، مانع از افزایش حجم و زمان محاسبات شود. ابعاد مدل در راستای محورهای X ، Y و Z بصورت تابعی از ابعاد ارتفاع شیروانی (H)، فاصله افقی میان پای (پاشنه) و تاج (لبه) شیروانی (W) و غیره مطابق شکل ۳ تعیین شده است [۱۹]. شعاع انحنای کاواک معدن (فاصله بین محور دوران و پاشنه شیب) بر اساس طرح شکل هندسی کاواک نهایی معدن، در حدود ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است.



شکل ۳- توصیه‌هایی برای مرزهای میدان دور در تحلیل پایداری شیروانی [۱۹]

اکتشافی)، به‌طور کلی در این محدوده ۸ نوع لیتولوژی مختلف تشکیل شده است که دو نوع لیتولوژی گرانودیوریت و آندزیت با سهم ۸۲٪، واحدهای زمین‌شناسی غالب در منطقه می‌باشند. در وهلهٔ بعدی سه لیتولوژی توف آندزیتی (با سهم ۶٪)، برش (با سهم ۵٪) و لیتیک توف (با سهم ۵٪)، لیتولوژی‌های مهم در منطقه می‌باشند و در نهایت لیتولوژی مونزودیوریت با سهم ۲٪، از جمله واحدهای زمین‌شناسی منطقه است.

به‌منظور ارزیابی و نیز برآورد پارامترهای ژئومکانیکی ماده سنگ و توده سنگ‌های مورد نظر، مجموعه‌ای از آزمون‌های آزمایشگاهی و میدانی مختلفی مطابق با روش‌های پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ ($ISRM^{13}$) [۱۷] و استانداردهای انجمن مصالح و آزمون آمریکا ($ASTM^{14}$) [۱۸] انجام شده است. بر اساس طبقه‌بندی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ ($ISRM$)، مقاومت فشاری لیتولوژی منطقه غالباً در محدودهٔ "متوسط" قرار می‌گیرد به غیر از سنگ برش که در محدودهٔ "نسبتاً ضعیف" است. علت پایین بودن مقادیر مقاومت فشاری نسبت به داده‌های گزارش شده برای سنگ‌های آذرین در منابع مکانیک سنگی، احتمالاً به دگرسانی پتاسیک و فیلیک منطقه بر می‌گردد به‌طوری‌که خواص مقاومتی این سنگ‌ها را تحت تأثیر قرار داده است. به‌منظور مدل‌سازی عددی ارزیابی پایداری و طراحی شیب نهایی معدن، از پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مربوط به توده‌سنگ‌های محدوده معدن طلا-مس شادان استفاده شده است (جدول ۱).

۳- تحلیل پایداری و طراحی شیب بهینه

۳-۱- فرآیند مدل‌سازی عددی

ارزیابی پارامترهای هندسی مؤثر بر پایداری شیب نهایی دیواره شرقی معدن طلا-مس شادان به‌منظور دستیابی به یک طراح بهینه حفاری و استخراج ماده معدنی مورد نظر به روش

جدول ۱- خواص ژئومکانیکی توده سنگ‌های معدن طلا-مس شادان [۵]

شماره	نوع سنگ	وزن مخصوص (gr/cm^3)	تخلخل (%)	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)	مدول تغییر شکل پذیری (GPa)	مدول بالک (GPa)	مدول برشی (GPa)	نسبت پواسون	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی
۱	آندزیت	۲/۵۹	۶/۵۷	۱/۵۹	۰/۰۴۱	۲/۴۷	۲/۲۸	۰/۹۳	۰/۳۲	۰/۲۱۰	۳۱/۵
۲	لیتیک توف	۲/۴۵	۹/۲۵	۱/۵۱	۰/۰۶۳	۲/۱۹	۲/۲۸	۰/۸۱	۰/۳۴	۰/۱۹۵	۳۳/۵
۳	توف آندزیتی	۲/۵۸	۶/۰۵	۱/۴۱	۰/۰۴۸	۲/۳۴	۲/۴۳	۰/۸۷	۰/۳۴	۰/۱۸۰	۳۴
۴	مونزودیوریت	۲/۵۷	۷/۲۲	۳/۷۳	۰/۱۳۸	۴/۸۷	۴/۰۵	۱/۸۷	۰/۳۰	۰/۴۱۰	۴۱/۵

دیواره شرقی معدن طلا-مس شادان مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور دستیابی به شیب بهینه دیواره نهایی معدن، فاکتور ایمنی $1/20$ به عنوان حداقل مبنای پایداری شیروانی معدن در نظر گرفته شده است. بنابراین به منظور دستیابی به این هدف، پنج سناریو (جدول ۲) از مشخصات هندسی مختلف پله‌های کاواک معدن مورد تحلیل و ارزیابی قرار گرفته است:

۱-۲-۳- سناریوی اول

این سناریو، بر مبنای طرح اولیه ارائه شده توسط مهندسی مشاور برای حفاری و استخراج ماده معدنی در محدوده نهایی کاواک معدن ارائه شده است. مشخصات هندسی طرح اولیه دیواره شرقی معدن در شکل ۴ ارائه شده است. دیواره شرقی معدن در طرح اولیه حدوداً دارای 20° پله و 2 رمپ است. ارتفاع و زاویه شیب دیواره نهایی به ترتیب در حدود 219 متر و 43° درجه است. ارتفاع و عرض رمپ شماره 1 و 2 با یکدیگر متفاوت هستند. به طوریکه ارتفاع و عرض رمپ شماره 1 به ترتیب در حدود 5 و $10/50$ متر و همچنین ارتفاع و عرض رمپ شماره 2 به ترتیب در حدود 10 و 12 متر در نظر گرفته شده است (ارتفاع رمپ 2 برابر با ارتفاع پله است). همچنین زاویه سطح شیب دیواره رمپ شماره 1 و 2 به ترتیب 67° و 70° درجه لحاظ شده است. مشخصات هندسی مربوط به پله‌های طراحی شده برای کل شیروانی کاواک معدن یکسان در نظر گرفته شده است. به طوریکه ارتفاع، عرض و زاویه پله‌ها به ترتیب برابر با 10 متر، $6/8$ متر و 70° درجه می‌باشند (شکل ۴).

برای ایجاد شرایط مرزی، گره‌های اطراف مدل در جهت‌های افقی (X و Y) بر روی صفحات $X-Z$ و $Y-Z$ ثابت شدند (گیرداری غلطکی)، در حالی که گره‌های کف مدل علاوه بر جهت افقی، در جهت عمودی (Z) و بر روی صفحات $X-Z$ و $Y-Z$ نیز ثابت شدند (گیرداری مفصلی). بنابراین در مرزهای مدل، جابجایی‌های افقی در صفحات $X-Z$ و $Y-Z$ و جابجایی عمودی در صفحات $X-Y$ وجود ندارد.

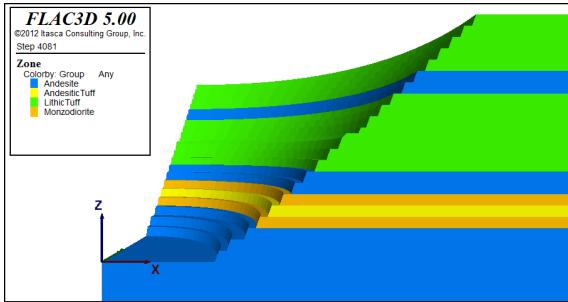
بر اساس مطالعات زیرسطحی، شرایط آب زیرزمینی در محدوده مورد مطالعه (دیواره شرقی معدن) در پشت شیروانی (در فاصله حدوداً بیش از 150 متری)، در ارتفاع حدود 80 تا 85 متری از کف کاواک معدن قرار داشته که با یک شیب ملایم در حدود 5° درجه کاهش یافته و در ارتفاع حدود 60 متری از کف معدن به سطح شیروانی برخورد نموده و باعث رخنمون در دیواره کاواک معدن می‌شود. از اینرو در مدل‌سازی عددی و با بهره‌گیری از کدهای برنامه فیش در نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ ، تراز آب زیرزمینی به صورت شرایط موجود و بدون در نظر گرفتن وضعیت زهکشی آب، مدل‌سازی شده است. چون در محل معدن طلا-مس شادان هیچ گونه مطالعه‌ای (از جمله آزمون‌های شکافت هیدرولیکی^{۱۷}، جک تخت^{۱۸}، روش بیش مغزه‌گیری^{۱۹} و غیره) به منظور برآورد مقدار و جهت تنش‌های برجای منطقه از جمله تنش‌های افقی حداقل و حداکثر و همچنین تنش قائم صورت نگرفته است، در مطالعه حاضر مقدار ضریب تنش افقی (k) بر اساس فرض تنش‌های هیدروستاتیک محدوده مطالعه، به صورت واحد در نظر گرفته است.

۲-۳- ارزیابی پارامترهای هندسی شیب

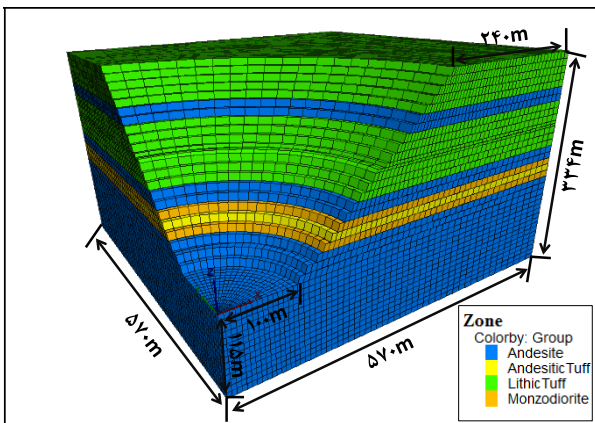
در این بخش، اثر مشخصات هندسی پله‌های کاواک معدن از جمله ارتفاع، عرض و شیب بر میزان پایداری شیب نهایی

جدول ۲- مشخصات هندسی شیب دیواره کاواک و ابعاد مدل عددی برای سناریوهای مختلف

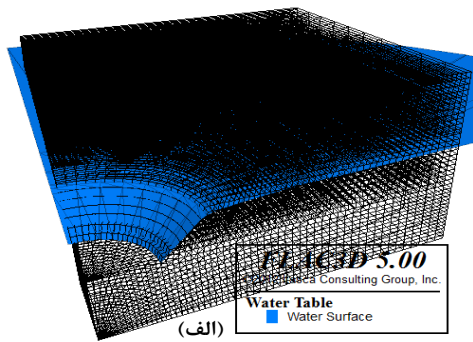
ارتفاع دیواره (m)	انحنای شیب (m)	زاویه کلی شیب دیواره (deg.)	زاویه شیب پله (deg.)	عرض پله (m)	ارتفاع پله (m)	ابعاد مدل (m)			سناریو
						z	y	x	
219	100	43	70	6/8	10	334	570	570	اول
209	100	48	70	5	10	319	510	510	دوم
204	100	48	73	6/8	12	314	510	510	سوم
204	100	52	73	5	12	314	430	430	چهارم
211	100	52	73	5	12	321	430	430	پنجم



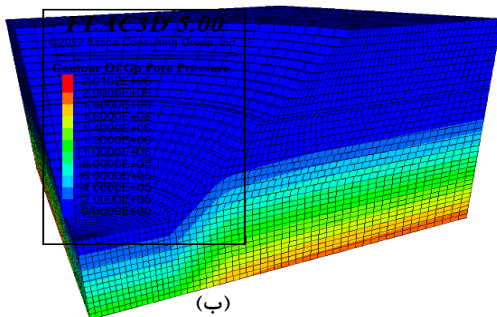
شکل ۵- شبیه‌سازی ابعاد هندسی شیب دیواره شرقی معدن به همراه سطوح لایه‌بندی



شکل ۶- ابعاد هندسی مدل سه بعدی دیواره شرقی معدن در سناریوی اول



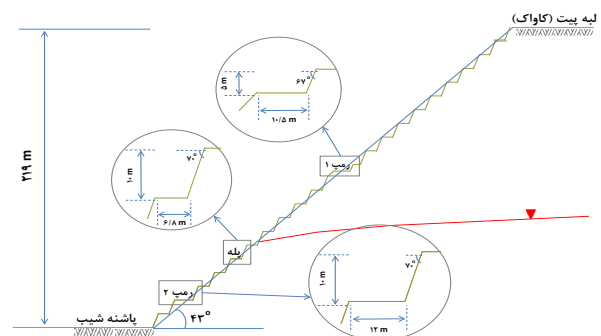
(الف)



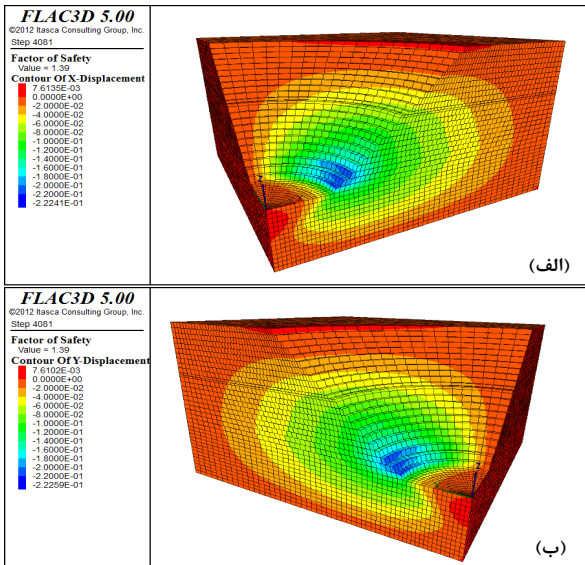
(ب)

شکل ۷- تراز آب زیرزمینی (الف) و کانتور فشار آب منفذی (ب) در دیواره شرقی شیب نهایی کاواک معدن

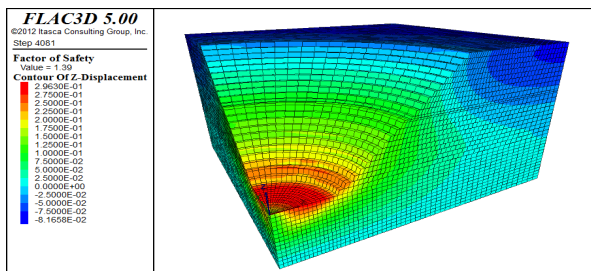
در مطالعه حاضر با توجه به تعداد پله‌ها و اهمیت آن‌ها در تعیین شیب دیواره نهایی معدن، بنابراین سعی شده است تا تنها با تغییر در مشخصات هندسه پله‌های موجود، ارزیابی پایداری شیروانی کاواک معدن بررسی شود. مشخصات هندسی مربوط به طراحی شیب دیواره نهایی کاواک معدن و نیز ابعاد هندسی مدل عددی در جدول ۲ ارائه شده است. ساخت ابعاد هندسی شیب دیواره شرقی معدن در سناریوی اول به همراه وضعیت سطوح لایه‌بندی (چینه‌شناسی) آن به منظور برآورد مقدار فاکتور ایمنی شیروانی در شکل ۵ ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل ۵ مشاهده می‌شود، ابعاد هندسی سه بعدی دیواره شرقی معدن دقیقا مشابه با مشخصات هندسی طرح اولیه کاواک معدن ساخته شده است (شکل ۴). ابعاد هندسی مدل عددی نیز با توجه به شرایط مرزی و مطابق با آنچه در بخش ۳-۱ بیان شد، در نظر گرفته شده است. به طوری که ابعاد مدل در راستای افقی محور X و Y برابر با ۵۷۰ متر و در راستای قائم محور Z برابر با ۳۳۴ متر است (شکل ۶). فاصله افقی بالای شیب کاواک در راستای محور X از لبه شیب تا مرز مدل به مقدار ۲۴۰ متر، ارتفاع پاشنه شیب در راستای محور Z برابر با ۱۱۵ متر و شعاع انحنای شیب نیز ۱۰۰ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۶). در مدل هندسی سه‌بعدی ساخته شده برای سناریوی اول، علاوه بر شرایط مش بندی لحاظ شده، وضعیت لایه‌بندی هر چهار نوع توده سنگ در دیواره شرقی معدن که دارای مشخصات فیزیکی و مکانیکی متفاوتی هستند، نشان داده شده است (شکل ۶). همچنین در مدل عددی، وضعیت جریان آب زیرزمینی و بواسطه آن فشار منفذی ایجاد شده در توده سنگ‌های دیواره شرقی کاواک معدن شبیه‌سازی شده است (شکل ۷). همان‌گونه که در شکل ۷ نشان داده شده، تراز آب زیرزمینی در پشت دیواره شرقی کاواک معدن (مطابق با شکل شماتیک ۴) در مدل عددی اعمال و اثر آن بر پایداری شیب دیواره نهایی معدن بررسی شده است.



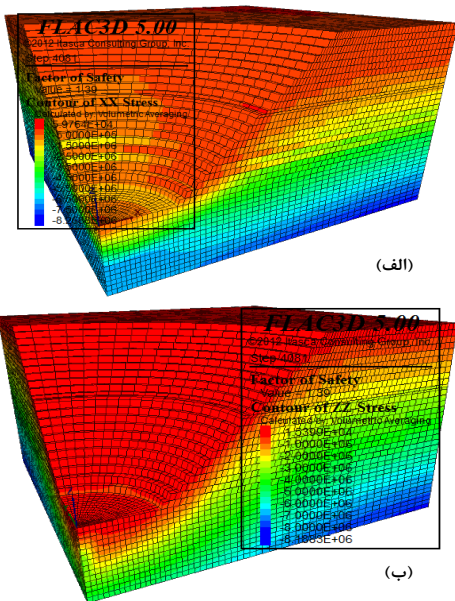
شکل ۴- جزئیاتی از ابعاد هندسی بخش‌های مختلف شیب دیواره شرقی معدن



شکل ۹- کانتورهای جابجایی افقی؛ (الف) در راستای محور x، و (ب) محور y

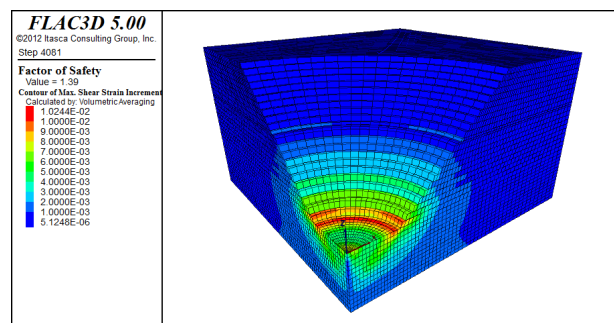


شکل ۱۰- کانتور جابجایی قائم ایجاد شده در مدل سناریوی اول

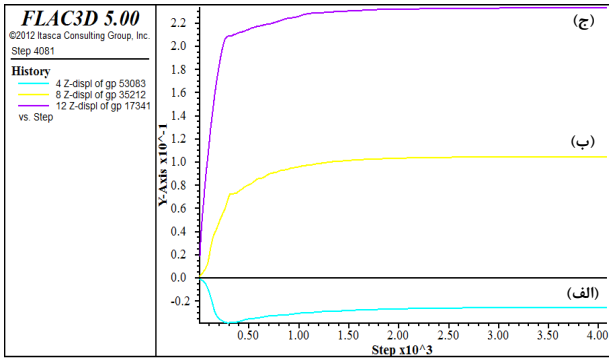


شکل ۱۱- کانتور تنش‌های افقی (الف) و قائم (ب) در مدل سناریوی اول

نتایج حا تحلیل عددی پایداری شیب دیواره نهایی معدن بر مبنای ارزیابی مقادیر فاکتور ایمنی، کرنش برشی و جابجایی- های افقی و قائم در قسمت‌های مختلف دیواره کاواک معدن از جمله بخش‌های فوقانی، میانی و تحتانی بررسی شده است. نتایج مدل‌سازی عددی سناریوی اول در اشکال ۸ تا ۱۰ ارائه شده است. همان‌گونه که در اشکال مذکور مشاهده می‌شود، فاکتور ایمنی به‌دست آمده از تحلیل پایداری شیب نهایی دیواره، ۱/۳۹ است. کرنش برشی ایجاد شده در مدل با افزایش میزان تنش‌های افقی و قائم (شکل ۱۱-الف و ب)، از لبه شیب به کف کاواک معدن، افزایش یافته و به حداکثر مقدار خود معادل $1/0.2e^{-2}$ رسیده است. با افزایش حداکثر کرنش برشی در بخش تحتانی و در قسمت پاشنه شیب کاواک، مقادیر جابجایی‌های افقی و قائم نیز متعاقباً افزایش یافته‌اند (اشکال ۹ و ۱۰). همان‌گونه که در شکل ۹ نشان داده شده است، مقادیر حداکثر جابجایی افقی در راستای محور X و Y با یکدیگر برابر و معادل ۲۲/۲- سانتی‌متر است (جابجایی به سمت داخل شیب دیواره معدن). جابجایی‌های قائم ایجاد شده در مدل هم به صورت نشست و هم به‌صورت بالاآمدگی مشاهده می‌شوند (شکل ۱۰). به‌طوری‌که در بخش فوقانی و در پشت شیب دیواره کاواک، جابجایی‌ها به‌صورت نشست بوده و رفته رفته با افزایش عمق، این جابجایی‌ها به‌صورت بالاآمدگی نمایان شده- اند که مقادیر آن‌ها با افزایش عمق کاواک و به واسطه افزایش میزان تنش قائم در پاشنه شیب به حداکثر مقدار خود و معادل ۲۹/۶۰ سانتی‌متر رسیده است (شکل ۱۰). کانتور (خطوط همتراز) تنش‌های افقی (در راستای محور X-Z) و قائم در مدل سناریوی اول در شکل ۱۱-الف و ب نشان داده شده است. همان‌گونه که انتظار می‌رود در نزدیکی دیواره کاواک معدن، تنش‌های افقی و یا قائم (به‌عنوان تنش‌های اصلی حداکثر) کمتر از مقدار تنش‌های دست نخورده بوده که بواسطه تنش نرمال کم، امکان بازشدگی درزه و شکست برشی در امتداد ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ می‌تواند افزایش یابد.



شکل ۸- کانتور حداکثر کرنش برشی در مدل سناریوی اول



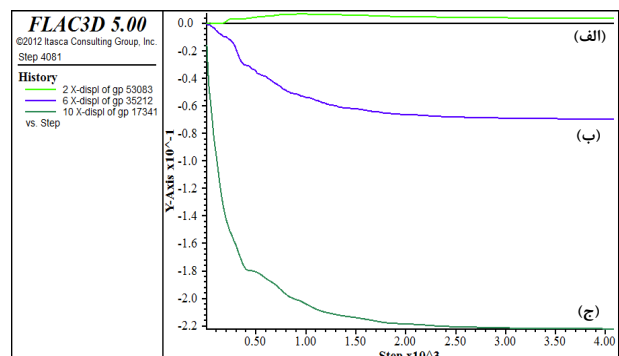
شکل ۱۳- نمودار جابجایی قائم (بر روی صفحه x-z) در بخش‌های (الف) فوقانی، (ب) میانی و (ج) تحتانی شیب دیواره کاواک

۲-۳- سناریوی دوم

در این سناریو تنها عرض پله‌های شیب دیواره کاواک از ۶/۸ متر به ۵ متر کاهش داده شده است. با توجه به کاهش عرض پله‌ها، زاویه شیب دیواره کاواک معدن نیز از ۴۳ به ۴۷ درجه افزایش یافته است. با افزایش زاویه شیب دیواره نهایی کاواک و نیز با توجه به توپوگرافی ناهموار در سطح فوقانی شیب (لبه کاواک)، ارتفاع دیواره شیب از ۲۱۹ متر به حدود ۲۰۹ متر کاهش یافته است. زاویه شیب سطح پله‌ها نیز در این سناریو ثابت باقی مانده است چرا که زاویه شیب پله‌ها بر اساس ارتفاع پله و میزان زاویه انحراف شیب سطح پله از حالت قائم، تعیین می‌شود. مشخصات هندسی مربوط به طراحی شیب دیواره نهایی کاواک معدن به همراه ابعاد هندسی مدل عددی در جدول ۲ ارائه شده است.

هندسه مدل عددی ساخته شده برای سناریوی دوم در شکل ۱۴-الف نشان داده شده است. با توجه به تغییر در ارتفاع دیواره کاواک (H) و همچنین فاصله افقی میان پاشنه و لبه شیب دیواره نهایی کاواک (W)، ابعاد مدل عددی ساخته شده برای سناریوی دوم متفاوت از سناریوی اول است (شکل ۱۴-الف). بنابراین ابعاد مدل در راستای محورهای افقی x و y برابر با ۵۱۰ متر و در راستای قائم برابر با ۳۱۹ متر است. نتایج تحلیل پایداری شیب دیواره نهایی طراحی شده برای کاواک معدن در شکل ۱۴ (ب تا و) ارائه شده است. مقدار فاکتور ایمنی به دست آمده در این سناریو با توجه به کاهش عرض پله و نیز افزایش زاویه کلی شیب، از ۱/۳۹ در سناریوی اول به ۱/۲۸ کاهش یافته است. همچنین با توجه به کاهش فاکتور ایمنی شیب دیواره نهایی، مقادیر حداکثر کرنش برشی به مقدار خیلی کمی افزایش یافته و به برابر با $1/0.8e^{-2}$ است (شکل ۱۴-ب). حداکثر جابجایی افقی (بر روی صفحه x-z)

نمودارهای جابجایی افقی و قائم (بر روی صفحه x-z)، برای بخش‌های فوقانی، میانی و تحتانی شیب دیواره نهایی کاواک معدن به ترتیب در اشکال ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است (با توجه به تقارن مدل در راستای محور x و y، تنها مقادیر جابجایی بر روی صفحه x-z نشان داده شده است). به طوری که مقادیر جابجایی افقی و قائم، با افزایش عمق کاواک معدن (به واسطه افزایش تنش‌های افقی و قائم و نیز افزایش کرنش برشی)، افزایش یافته‌اند (اشکال ۱۲ و ۱۳). همان‌گونه که در شکل ۱۲ (نمودار الف) نشان داده شده است، مقدار جابجایی افقی در بخش فوقانی شیب دیواره معدن، به صورت مثبت (۳/۷ میلی-متر) و نشان‌دهنده حرکت دیوار به سمت خارج یا پشت شیب کاواک است. همان‌طور که پیشتر اشاره شد، به واسطه میزان نشست ایجاد شده در بخش فوقانی دیوار کاواک و نیز در پشت شیروانی، جابجایی افقی ایجاد شده تمایل به حرکت در جهت نشست (جابجایی قائم) لبه فوقانی شیروانی دارد. جابجایی افقی در بخش میانی و تحتانی کاواک معدن به صورت منفی و به سمت داخل شیب دیواره کاواک تمایل به حرکت دارد (شکل ۱۲، نمودارهای ب و ج). مقادیر جابجایی افقی ثبت شده در بخش میانی و تحتانی دیواره کاواک به ترتیب ۶/۹- و ۲۲- سانتی متر می باشند. مقادیر جابجایی قائم نیز با افزایش عمق کاواک معدن از لبه شیروانی به کف کاواک به مقدار قابل توجهی بسته به افزایش میزان تنش قائم افزایش یافته است. به طوری که جابجایی قائم در بخش فوقانی دیواره شیب به صورت نشست و به مقدار ۲/۵- سانتیمتر (به واسطه نشست ایجاد شده در پشت شیب دیواره کاواک معدن) و در بخش‌های میانی و تحتانی کاواک به صورت بالآمدگی و به ترتیب به مقدار ۱۰ و ۲۳ سانتی متر افزایش یافته است (شکل ۱۳).



شکل ۱۲- نمودار جابجایی افقی (بر روی صفحه x-z)؛ در بخش‌های (الف) فوقانی، (ب) میانی و (ج) تحتانی شیب دیواره کاواک

مطالعه، به نظر می‌رسد نقش افزایش ارتفاع پله‌ها از ۱۰ متر به ۱۲ (که سبب افزایش حدود ۳ درجه‌ای زاویه سطح پله‌ها شده است) نسبت به کاهش عرض پله‌ها (از ۶/۸ متر به ۵ متر در سناریوی دوم و بدون تغییر در زاویه سطح پله‌ها) در تعیین مقدار فاکتور ایمنی کمتر بوده است به طوری که پایداری شیب دیواره نهایی کاواک معدن در سناریوی سوم ($FS=1/32$) نسبت به سناریوی دوم ($FS=1/28$) با حفظ شرایط نسبتا یکسان زاویه کلی شیب (۴۸ درجه)، بیشتر است. البته اثر کاهش حدود ۵ متری ارتفاع دیواره نهایی کاواک معدن را نمی‌توان در کاهش کمتر فاکتور ایمنی برای سناریوی سوم نسبت به سناریوی دوم نادیده گرفت (این موضوع به شکل دقیقتری در سناریوی پنجم برای دستیابی به حداقل فاکتور ایمنی ۱/۲ بررسی شده است).

مقادیر حداکثر کرنش برشی و جابجایی‌های افقی و قائم در کل مدل و نیز در قسمت‌های مختلف دیواره شیب نهایی کاواک در شکل ۱۵-ب تا و نشان داده شده است. مقادیر کرنش برشی و جابجایی‌های (افقی و قائم) به دست آمده در این سناریو نیز تابعی از مقادیر تنش‌های افقی و قائم ایجاد شده در طول دیواره شیب کاواک بوده که از سطح به کف کاواک افزایش یافته است. با توجه به افزایش فاکتور ایمنی از ۱/۲۸ در سناریوی دوم به ۱/۳۲ در سناریوی سوم، مقادیر حداکثر کرنش برشی (۳-۹/۷۷۵، شکل ۱۵-ب)، و حداکثر جابجایی‌های افقی (۲۱/۱-سانتی‌متر- شکل ۱۵-ج) و قائم (۲۶ سانتی‌متر- شکل ۱۵-د) در مدل نیز کاهش یافته است. مقادیر تغییر شکل‌های افقی و قائم مربوط به بخش‌های مختلف شیب دیواره نهایی کاواک به-ترتیب در شکل ۱۵ (ه و و) ارائه شده است.

۴-۲-۳- سناریوی چهارم

این سناریوی ترکیبی از سناریوی دوم (کاهش عرض پله‌ها) و سناریوی سوم (افزایش ارتفاع و شیب سطح پله‌ها) است. با کاهش عرض پله‌ها و نیز افزایش ارتفاع پله‌ها به همراه افزایش زاویه شیب سطح آن‌ها، زاویه شیب دیواره نهایی کاواک معدن به حدود ۵۲ درجه افزایش می‌یابد. بر اساس شرایط حاکم، ارتفاع دیواره کاواک نیز ۲۰۴ متر در نظر گرفته شده است (شکل ۱۶-الف). مشخصات هندسی مربوط به طراحی شیب دیواره نهایی کاواک معدن و نیز ابعاد هندسی مدل عددی در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج تحلیل پایداری شیب دیواره نهایی معدن در شکل ۱۵ (ب تا و) ارائه شده است. بواسطه ترکیب مدل‌های سناریوی دوم و سوم، فاکتور ایمنی شیب دیواره کاواک به مقدار ۱/۲۳ کاهش یافته است. مقادیر حداکثر کرنش برشی در این مدل برابر با $1/04e^{-2}$ است (شکل ۱۶-ب).

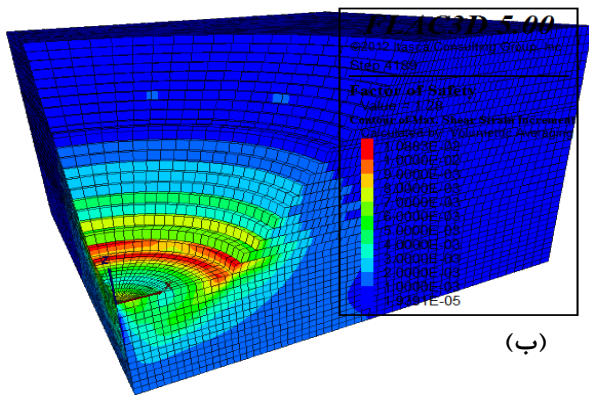
تغییری نداشته است و برابر با ۲۲/۲- سانتی‌متر می‌باشد (شکل ۱۴-ج). مقدار حداکثر جابجایی قائم نیز در مدل به مقدار ۲۷/۳ سانتی‌متر کاهش یافته است (شکل ۱۴-د). به نظر می‌رسد علی‌رغم کاهش فاکتور ایمنی پایداری شیب، با کاهش حدود ۱۰ متری ارتفاع دیواره کاواک و متعاقباً کاهش تنش‌های افقی و قائم در دیواره معدن، میزان تغییر شکل‌های افقی نسبتاً ثابت و تغییر شکل‌های قائم نیز کاهش یافته است. مقادیر جابجایی‌های افقی و قائم اندازه‌گیری شده (بر روی صفحه $x-z$) در قسمت‌های فوقانی، میانی و تحتانی دیواره کاواک نیز در مقایسه با سناریوی اول گویای همین مساله می‌باشند (شکل ۱۴-ه و و). همان‌گونه که در شکل ۱۴ (ب تا ه) مشاهده می‌شود، با افزایش عمق کاواک معدن، بواسطه افزایش میزان تنش‌های افقی و قائم مقادیر کرنش برشی و جابجایی‌های افقی و قائم نیز افزایش یافته‌اند. روند تغییر شکل و جابجایی‌های افقی و قائم ایجاد شده در دیواره شیب نهایی کاواک معدن در سناریوی دوم مطابق با روند تغییر شکل‌های ایجاد شده در سناریوی اول می‌باشند. چون حداکثر تغییر شکل (جابجایی قائم) در کف کاواک نسبت به بخش‌های دیگر از جمله شیب دیواره کاواک بیشتر است، بنابراین کانتور حداکثر تغییر شکل/جابجایی قائم مدل (شکل ۱۴-د) نسبت به منحنی حداکثر جابجایی قائم (شکل ۱۴-و) که مربوط به بخش تحتانی شیب دیواره کاواک است، بیشتر است.

۳-۲-۳- سناریوی سوم

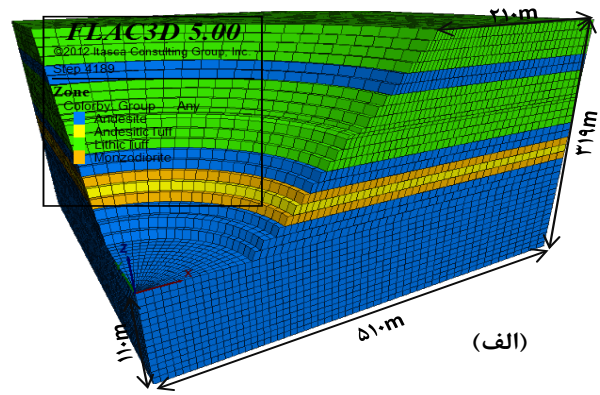
در این سناریو برخلاف سناریوی دوم، تنها ارتفاع پله‌ها از ۱۰ متر به ۱۲ متر افزایش یافته است. متعاقباً با افزایش ارتفاع پله، علاوه بر افزایش ارتفاع زاویه پله‌ها از ۷۰ درجه به ۷۳ درجه، زاویه کلی شیب دیواره نهایی کاواک معدن نیز از ۴۳ درجه نسبت به طرح اولیه به ۴۸ درجه افزایش یافته است (برابر با زاویه شیب دیواره نهایی در سناریوی دوم). در واقع به-منظور بررسی اثر ارتفاع شیروانی روی میزان فاکتور ایمنی و نیز پایداری شیب دیواره نهایی کاواک معدن، ارتفاع پیت در این سناریو نسبت به سناریوی دوم (با حفظ شرایط برابر در مقدار زاویه شیب نهایی)، ۵ متر بیشتر در نظر گرفته شده است. مشخصات هندسی مربوط به طراحی شیب دیواره نهایی کاواک معدن و نیز ابعاد هندسی مدل عددی در جدول ۲ ارائه شده است. نتایج مدل‌سازی عددی سناریوی سوم در شکل ۱۵ نشان داده شده است. فاکتور ایمنی به دست آمده در این سناریو با توجه به زاویه شیب نهایی که برابر با سناریوی دوم (۴۸ درجه) است، بیشتر و به مقدار ۱/۳۲ است. در این مرحله از

کاهش فاکتور ایمنی در مدل سناریوی چهارم نسبت به سناریوهای دوم و سوم، مقادیر جابجایی افقی (که بیشترین تاثیر را بر ترتیب نسبت به کرنش برشی و جابجایی قائم در برابر تغییر مقدار فاکتور ایمنی از خود نشان می‌دهد)، به حداکثر مقدار خود حدوداً برابر با ۲۴- سانتیمتر در قسمت تحتانی دیواره کاواک رسیده است (شکل ۱۶-ج و ه). با توجه به ثابت بودن ارتفاع دیواره کاواک نسبت به مدل سناریوی سوم، مقادیر حداکثر جابجایی قائم در مدل و همچنین در بخش‌های مختلف شیب دیواره کاواک، تغییر بسیار ناچیزی داشته است (شکل ۱۵-د و و).

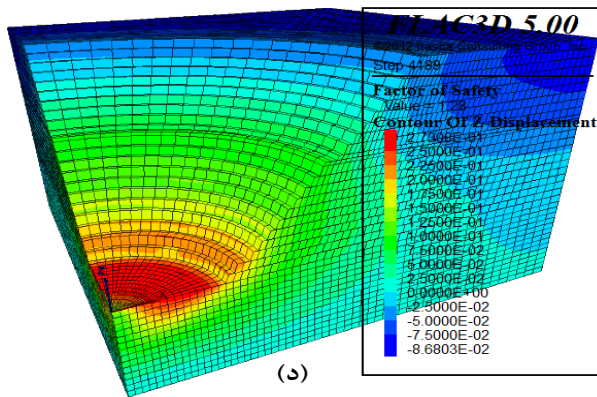
همچنین مقادیر حداکثر جابجایی افقی و قائم در مدل به ترتیب برابر با ۲۴- و ۲۵/۸ سانتی‌متر می‌باشند (به ترتیب شکل ۱۶-ج و د). مقادیر جابجایی‌های افقی (در صفحه X-Z) و قائم ایجاد شده در بخش‌های فوقانی، میانی و تحتانی شیب دیواره کاواک معدن به ترتیب در بخش‌های (ه) و (و) شکل ۱۶ ارائه شده است. همان‌گونه که در شکل ۱۶ (ب تا و)، نشان داده شده است، با افزایش مقادیر تنش‌های افقی و قائم از سطح به کف کاواک معدن، متعاقباً مقادیر کرنش برشی و جابجایی‌های افقی و قائم نیز افزایش یافته‌اند. همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، حداکثر جابجایی قائم در مدل مربوط به کف کاواک بوده که به صورت بالآمدگی مشاهده می‌شود (شکل ۱۶-د). با توجه به



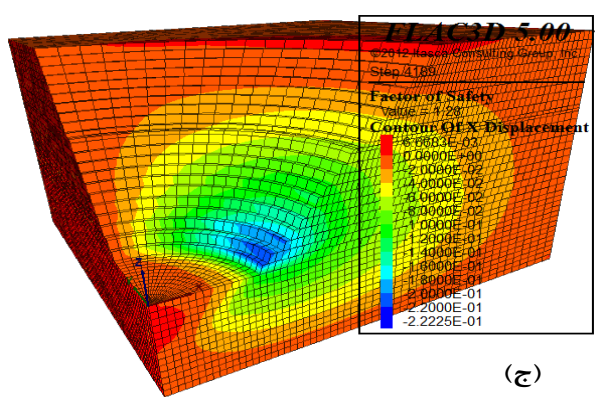
(ب)



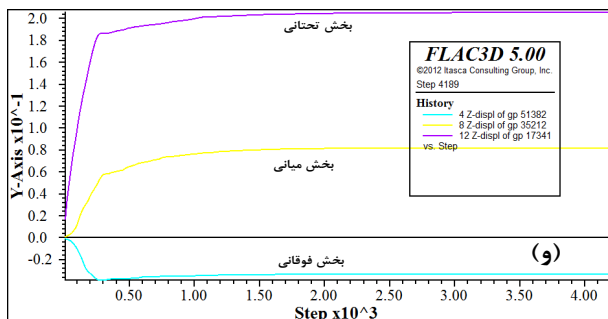
(الف)



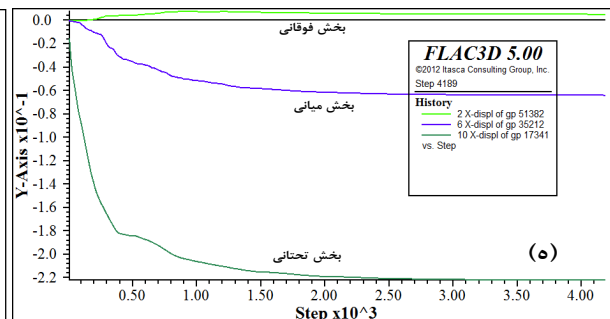
(د)



(ج)

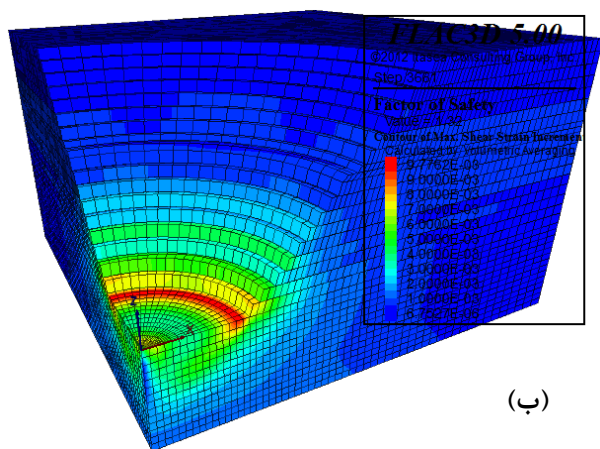


(و)

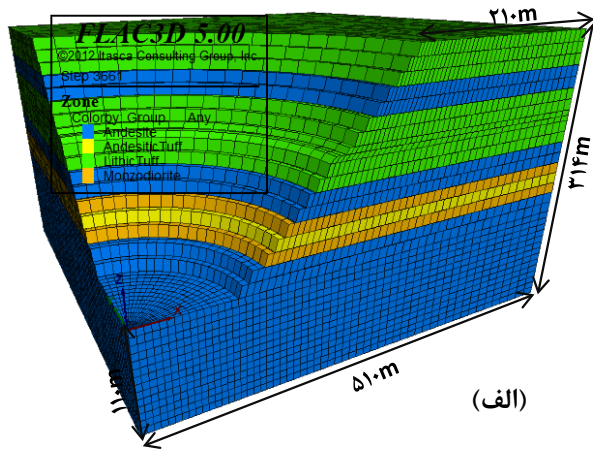


(ه)

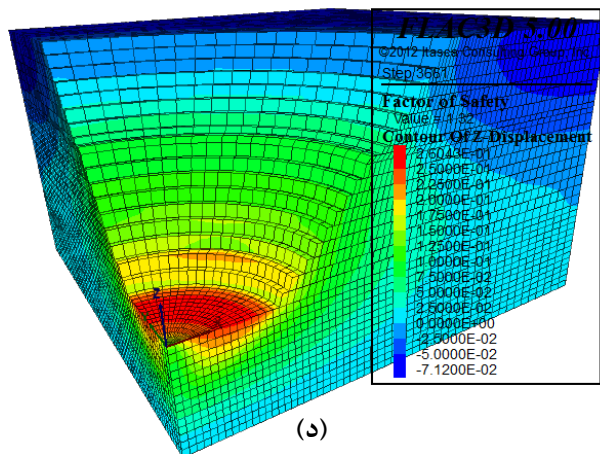
شکل ۱۴- هندسه مدل و نتایج مدل‌سازی عددی در سناریوی دوم: (الف) ابعاد مدل هندسی، (ب) کانتور حداکثر کرنش برشی، (ج) کانتور جابجایی افقی، (د) کانتور جابجایی قائم، (ه) نمودار جابجایی قائم در بخش‌های فوقانی، میانی و تحتانی دیواره کاواک



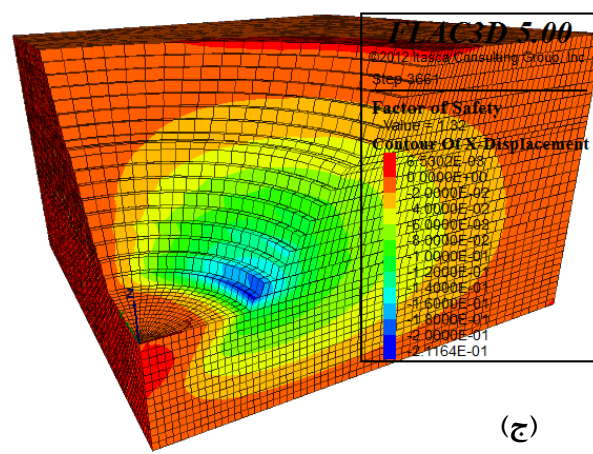
(ب)



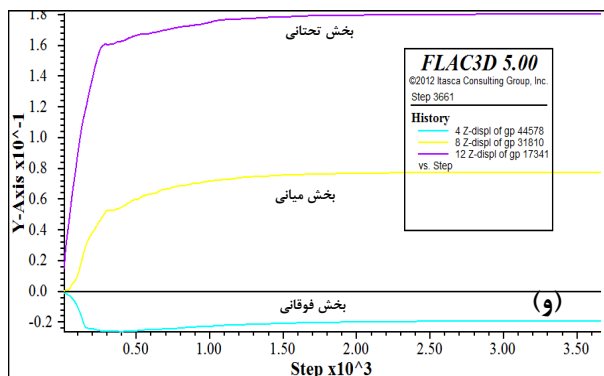
(الف)



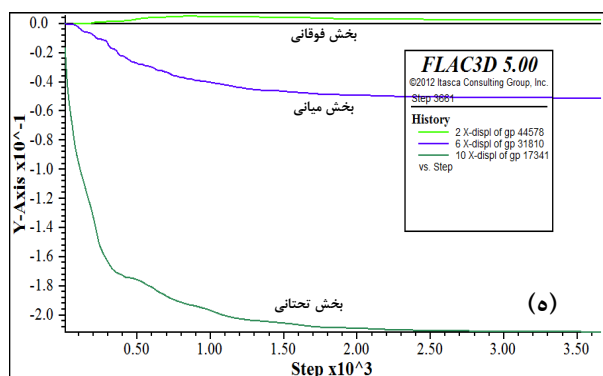
(د)



(ج)

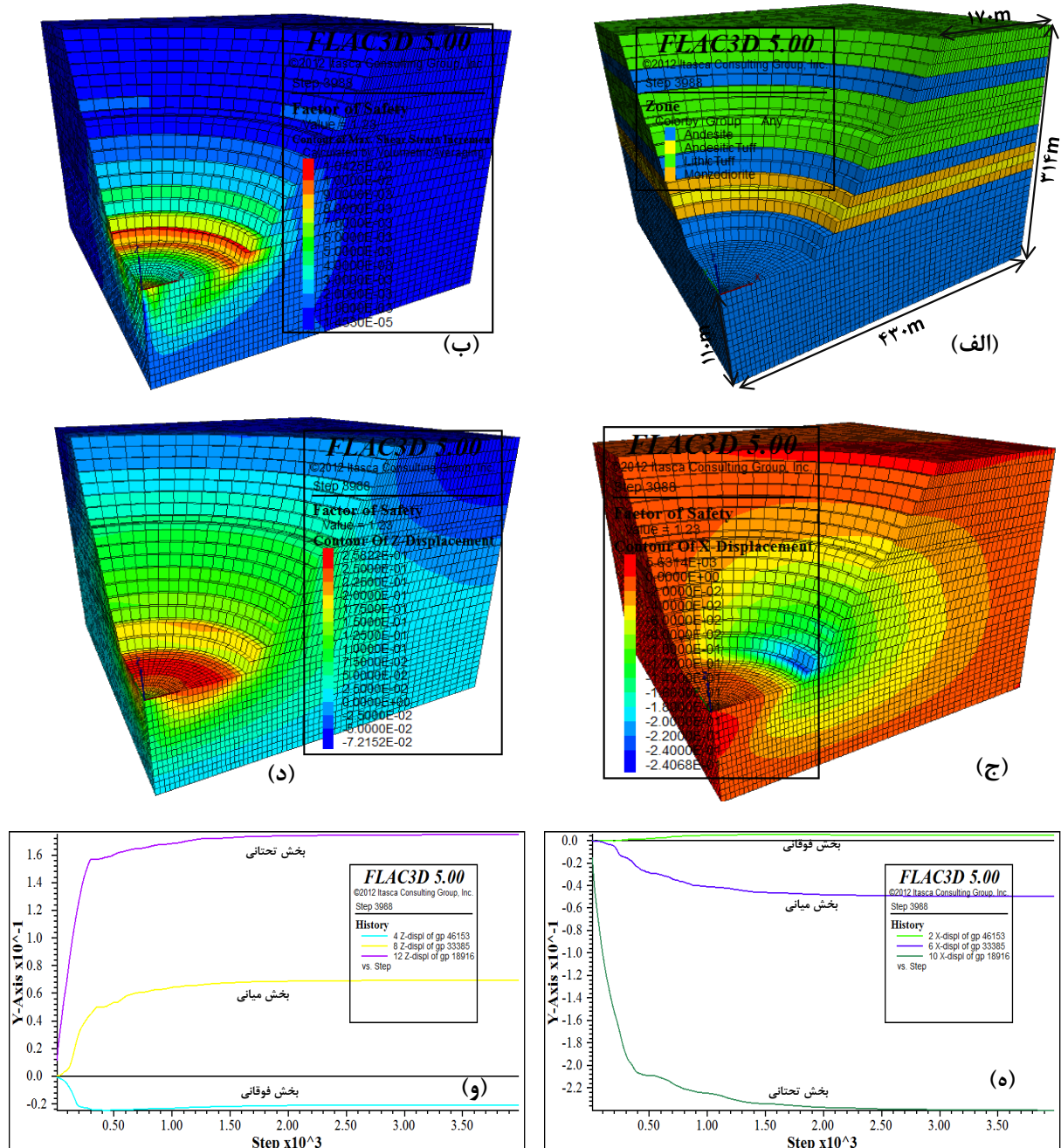


(و)



(ه)

شکل ۱۵- هندسه مدل و نتایج حاصل از مدل سازی عددی در سناریوی سوم: (الف) ابعاد مدل هندسی، (ب) کانتور حداکثر کرنش برشی، (ج) کانتور جابجایی افقی، (د) کانتور جابجایی قائم، (ه) نمودار جابجایی قائم در بخش های فوقانی، میانی و تحتانی دیواره کاواک



شکل ۱۶- هندسه مدل و نتایج مدل‌سازی عددی در سناریوی چهارم؛ الف) ابعاد مدل هندسی، ب) کانتور حداکثر کرنش برشی، ج) کانتور جابجایی افقی، د) کانتور جابجایی قائم، ه) نمودار جابجایی قائم در بخش‌های فوقانی، میانی و تحتانی دیواره کاواک

۵-۲-۳- سناریوی پنجم

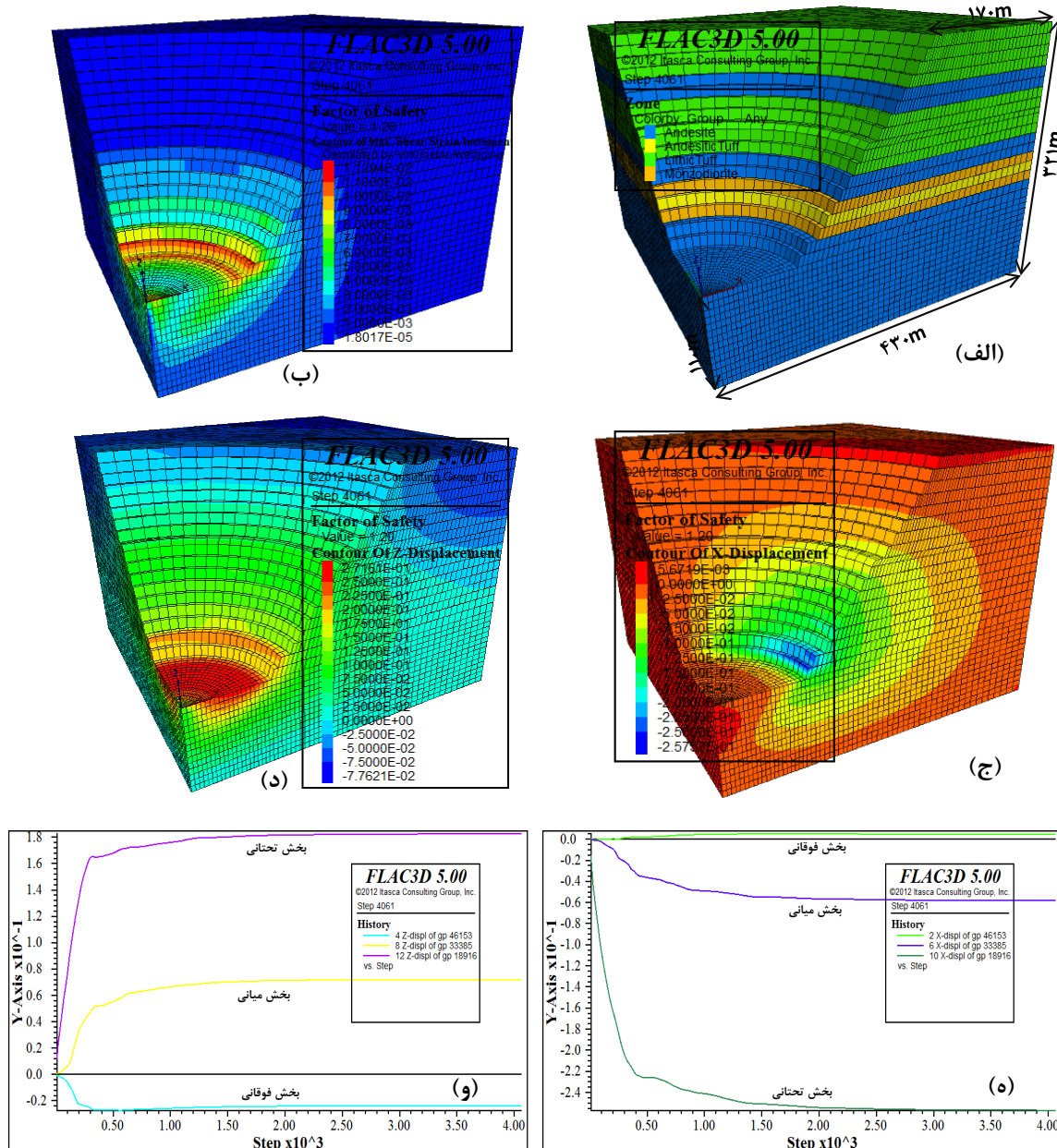
سعی و خطا همراه بوده است، مناسب‌ترین شرایط هندسی کاواک معدن برای دستیابی به فاکتور ایمنی ۱/۲، بدست آمد. در واقع، مشخصات هندسی این سناریو درست مشابه با سناریوی چهارم که ترکیبی از سناریوهای دوم و سوم است، در نظر گرفته شد. از آنجایی که حداقل فاکتور ایمنی به دست آمده از مدل‌های عددی، حاصل سناریوی چهارم و برابر با ۱/۲۳

هدف از اجرای این سناریو، دستیابی به شیب بهینه دیواره نهایی معدن بر مبنای حداقل فاکتور ایمنی پایداری شیروانی (۱/۲) است. مشخصات هندسی مربوط به طراحی شیب دیواره نهایی کاواک معدن و نیز ابعاد هندسی مدل عددی در جدول ۲ ارائه شده است. بر اساس بررسی‌ها و آنالیزهای مختلف که با

حدودی مشخص شد، بنابراین تلاش شده است تا ضمن ثابت نگه داشتن مشخصات هندسی شیب دیواره کاواک مشابه با آنچه در سناریوی چهارم لحاظ شده، با تغییر در مقدار ارتفاع دیواره، حداقل فاکتور ایمنی پایداری شیب دیواره نهایی کاواک معدن حاصل شود. شرایط مدل‌سازی عددی برای سناریوی پنجم و نیز نتایج آن در شکل ۱۷ ارائه شده است.

است، در این سناریو تلاش شده است تا با به حداقل رساندن مقدار فاکتور ایمنی به میزان ۱/۲، مناسب‌ترین طرح از نظر فنی که پایداری شیب نهایی دیواره شرقی کاواک معدن را تأمین می‌نماید، به دست آید.

به‌عبارتی، چون طی تحلیل‌های انجام شده در سناریوهای قبلی، اهمیت ارتفاع دیواره کاواک بر مقدار فاکتور ایمنی تا



شکل ۱۷- هندسه مدل و نتایج مدل‌سازی عددی در سناریوی پنجم؛ الف) ابعاد مدل هندسی، ب) کانتور حداکثر کرنش برشی، ج) کانتور جابجایی افقی، د) کانتور جابجایی قائم، ه) نمودار جابجایی قائم در بخش‌های فوقانی، میانی و تحتانی دیواره کاواک

حداکثر کرنش برشی و حداکثر جابجایی افقی در سناریوی اول (FS=1/39)، از این روند کلی تبعیت نکرده و مقادیر مذکور از مقادیر سناریوهای دوم و سوم نیز بیشتر می‌باشند. به عبارت دیگر، در سناریوی اول با توجه به برآورد بیشترین مقدار فاکتور ایمنی (1/39) و علیرغم انتظار میزان تغییرشکل کمتر در مدل نسبت به سایر مدل‌ها، اما مشاهده می‌شود که مقادیر کرنش برشی و جابجایی افقی ایجاد شده در این مدل نه تنها کمتر نبوده است بلکه نسبت به دو سناریوی دوم و سوم (به ترتیب با فاکتورهای ایمنی 1/32 و 1/28) نیز بیشتر می‌باشند. به نظر می‌رسد با توجه به ارتفاع بیشتر شیب دیواره کاواک در این مدل (ارتفاع 219 متر)، و متعاقباً افزایش حداکثر تنش افقی نسبت به سایر مدل‌ها (به‌ویژه سناریوهای دوم و سوم)، مقادیر حداکثر کرنش برشی و حداکثر جابجایی افقی در این مدل تأثیرپذیری کمتری نسبت به فاکتور ایمنی پایداری شیب که بر اساس روش کاهش مقاومت (وابسته به فاکتورهای ϕ و c) می‌باشد، داشته‌اند. همچنین مشاهده می‌شود (جدول 3 و شکل 18-ج) که تغییرات مقادیر حداکثر جابجایی قائم (به صورت بالآمدگی در کف کاواک) با مقادیر فاکتور ایمنی، روند کاملاً مشخصی نداشته و در واقع تغییرات حداکثر مقادیر جابجایی قائم در سناریوهای مختلف بر اساس حداکثر ارتفاع دیواره کاواک معدن دارای روند کاملاً مشخصی است (شکل 19). به طوری که سناریوی اول با ارتفاع حدود 219 متر دارای بیشترین مقدار جابجایی قائم و سناریوهای سوم و چهارم با ارتفاع حدود 204 متر دارای کمترین مقدار جابجایی قائم می‌باشند. به عبارتی با افزایش ارتفاع دیواره نهایی کاواک معدن و نیز افزایش تنش قائم (از سطح به کف کاواک)، میزان تغییرشکل‌های قائم به صورت نشست و یا بالآمدگی در دیواره و کف کاواک معدن افزایش می‌یابد.

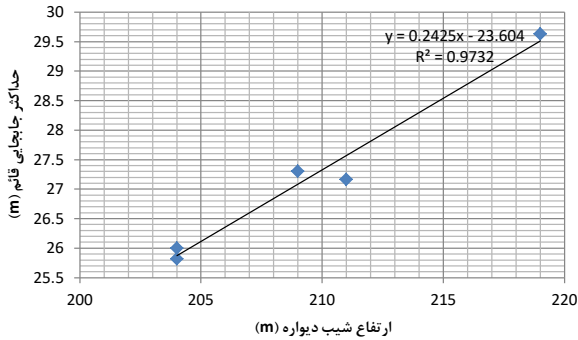
بر اساس تحلیل‌های انجام شده، با افزایش ارتفاع دیواره کاواک از 204 متر در سناریوی چهارم با فاکتور ایمنی 1/23 (شکل 15)، به 211 متر (شکل 17-الف)، فاکتور ایمنی به حداقل مقدار مورد نظر که معادل 1/2 است، کاهش یافته است (شکل 17-ب تا و). با کاهش فاکتور ایمنی، میزان حداکثر کرنش برشی در مدل (شکل 17-ب) و همچنین جابجایی‌های افقی در مدل (شکل 17-ج) و دیواره کاواک (شکل 17-ه)، با افزایش مقادیر تنش‌های افقی، افزایش یافته‌اند. به طوری که حداکثر کرنش برشی و حداکثر جابجایی ایجاد شده در مدل به ترتیب معادل $1/12 \times 10^{-2}$ و $25/7$ سانتی‌متر بوده و مربوط به بخش تحتانی دیواره کاواک می‌باشند. همان‌گونه که پیشتر اشاره شد، مقادیر جابجایی قائم در مدل و خصوصاً دیواره شیب، هر چند با افزایش عمق و تنش‌های قائم، افزایش می‌یابند، اما تأثیرپذیری کمی نسبت به مقدار فاکتور ایمنی پایداری شیب دیواره نهایی دارد (شکل 17-د و و).

3-3- نتایج و بحث

نتایج مدل‌سازی و تحلیل پایداری شیب دیواره نهایی کاواک معدن از سناریوی اول بر مبنای طرح اولیه تا دستیابی به یک طرح بهینه حفاری و استخراج ماده معدنی در سناریوی پنجم به‌طور خلاصه در جدول 3 ارائه شده است. همچنین در شکل 18 نمودارهای تغییرات حداکثر کرنش برشی و حداکثر جابجایی‌های افقی و قائم نسبت به مقادیر فاکتور ایمنی در مدل‌های مختلف نشان داده شده است. به‌طور کلی، مقادیر حداکثر کرنش برشی و حداکثر جابجایی افقی در سناریوهای دوم تا پنجم (با فاکتورهای ایمنی 1/32 تا 1/20)، با کاهش فاکتور ایمنی، روند نسبتاً مشخصی به‌صورت افزایشی از خود نشان می‌دهند (شکل 18-الف و ب)، در حالی که مقادیر

جدول 3- خلاصه نتایج مدل‌سازی عددی برای سناریوهای مختلف

سناریو	حداکثر کرنش برشی	حداکثر جابجایی افقی (cm)	حداکثر جابجایی قائم (cm)	جابجایی فوقانی دیواره (cm)		جابجایی میانی دیواره (cm)		جابجایی تحتانی دیواره (cm)		فاکتور ایمنی (FS)
				Z	X	Z	X	Z	X	
اول	$1/02 \times 10^{-2}$	-22/24	29/63	0/37	-3/50	-6/90	10/45	-22/20	23/29	1/39
دوم	$1/00 \times 10^{-2}$	-22/22	27/30	0/50	-3/30	-6/40	8/18	-22/11	20/49	1/28
سوم	$9/77 \times 10^{-3}$	-21/16	26/00	0/25	-1/92	-5/10	7/72	-21/10	17/97	1/32
چهارم	$1/04 \times 10^{-2}$	-24/00	25/82	0/48	-2/00	-5/00	6/89	-23/98	17/42	1/23
پنجم	$1/12 \times 10^{-2}$	-25/75	27/16	0/52	-2/50	-5/70	7/16	-25/68	18/25	1/20



شکل ۱۹- روند تغییرات حداکثر مقادیر جابجایی قائم نسبت به ارتفاع دیواره کاواک

۴- نتیجه گیری

مهم ترین نتایج تحقیق حاضر به شرح ذیل است:

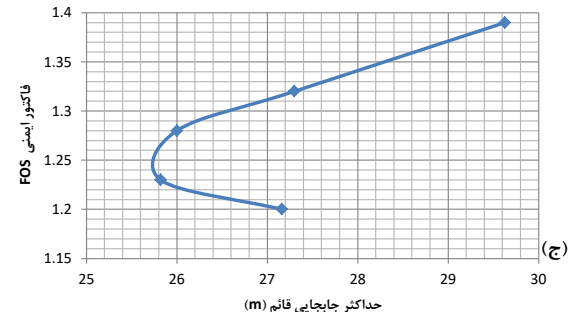
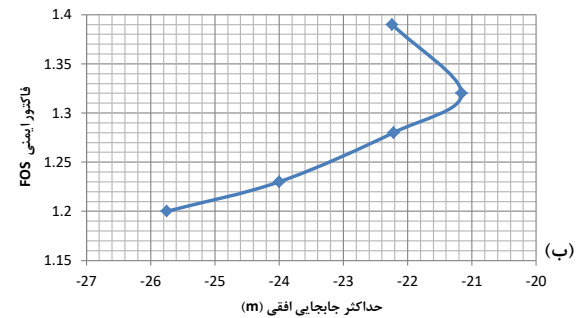
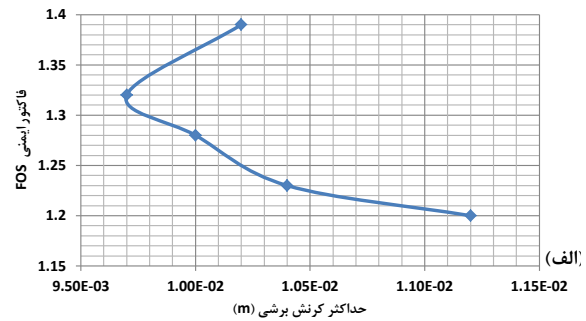
۱- فرآیند مدل سازی عددی برای دستیابی به طرح بهینه شیب دیواره نهایی معدن طلا-مس شادان در طول پنج سناریو با مشخصات هندسی مختلف شیب انجام شد که نهایتاً سناریوی پنجم (جدول ۲) با توجه به حداقل فاکتور ایمنی ۱/۲۰، به عنوان مناسب ترین طرح اجرایی برای معدن مورد نظر پیشنهاد شد.

۲- طرح اولیه اجرای شیب نهایی دیواره شرقی معدن (سناریوی اول) با زاویه شیب کلی ۴۳ درجه و ارتفاع ۲۱۹ متر دارای فاکتور ایمنی ۱/۳۹ بوده که با تغییر در مشخصات هندسی پله ها و شیب دیواره کاواک (ارتفاع، عرض و زاویه)، فاکتور ایمنی به مقدار حداقل و مورد نظر (۱/۲۰) در سناریوی پنجم کاهش یافته است. به عبارتی در سناریوی پنجم (که تلفیقی از سناریوهای دوم، سوم و چهارم می باشد)، با کاهش عرض پله از ۶/۸ به ۵ متر و افزایش ارتفاع پله (از ۱۰ متر) و زاویه سطح آن (از ۷۰ درجه) به ترتیب به ۱۲ متر و ۷۳ درجه، فاکتور ایمنی شیب دیواره نهایی معدن از ۱/۳۹ در طرح اولیه به ۱/۲۰ کاهش یافته است.

۳- بر اساس نتایج سناریوی های دوم و سوم، در شرایط مشابه از نظر مشخصات هندسی پله، رمپ و شیب کلی پیت، اثر کاهش عرض پله نسبت به افزایش ارتفاع و زاویه سطح آن بر مقدار کاهش فاکتور ایمنی مشهودتر است. در سناریوی دوم تنها با کاهش عرض پله از ۶/۸ به ۵ متر و همچنین در سناریوی سوم تنها با افزایش ارتفاع و زاویه پله به ترتیب به ۱۲ متر و ۷۳

با توجه تغییرات نسبتاً کم بازه فاکتور ایمنی از سناریوی اول (۱/۳۹) تا سناریوی پنجم (۱/۲۰)، حداکثر مقادیر کرنش برشی و تغییر شکل های افقی و قائم در شیب دیواره نهایی کاواک معدن از تغییرات زیادی برخوردار نمی باشند و از اینرو در یک محدوده نسبتاً نزدیک به یکدیگر قرار دارند.

بر مبنای بررسی و ارزیابی های انجام شده در این مرحله از مطالعه، مدل سناریوی شماره ۵ با حداقل فاکتور ایمنی ۱/۲۰ به عنوان طرح بهینه و پیشنهادی به منظور اجرا در محل معدن طلا-مس شادان معرفی می گردد. همانگونه که در جدول ۳ نشان داده شده است، حداکثر مقادیر تغییر شکل های افقی و قائم که در بخش تحتانی و کف شیب دیواره معدن ناشی از اجرای مدل سناریوی پنجم بوجود می آیند، (بترتیب در حدود ۲۵- و ۲۷ سانتی متر) کمتر از ۳۰ سانتی متر می باشند.



شکل ۱۸- نمودار تغییرات حداکثر کرنش برشی (الف)، حداکثر جابجایی افقی (ب) و حداکثر جابجایی قائم (ج) با مقادیر فاکتور ایمنی در سناریوهای مختلف

مربوط به مدل سناریوی اول با بیشترین ارتفاع دیواره در حدود ۲۱۹ متر می‌باشد که کمترین تأثیرگذاری از مقدار فاکتور ایمنی را نشان می‌دهد.

۸- حداکثر مقادیر جابجایی‌های افقی و قائم در مدل سناریوی پنجم یا پیشنهادی (در شرایط تنش هیدرواستاتیک و ضریب تنش افقی واحد) که به ترتیب مربوط به بخش تحتانی شیب دیواره و کف کاواک معدن است، کمتر از ۳۰ میلیمتر و در محدوده قابل قبول قرار دارند.

۵- تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله بدین‌وسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از مجموعه معدن طلا-مس شادان و نیز مهندسین مشاور بهینه گستر کاوش‌گران معادن به جهت همکاری و مساعدت-های لازم در انجام تحقیق حاضر، اعلام می‌نمایند.

منابع

- [1] He M.C., Feng J.L., Sun X.M., (2008), "Stability Evaluation and Optimal Excavation Design of Rock Slope at Antaibao Open Pit Coal Mine, China", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 45, pp. 289- 302.
- [2] Jun Yang, Zhigang Tao, Baoliang Li, Yang Gui, Haifeng Li, (2012), "Stability Assessment and Feature Analysis of Slope in Nanfen Open Pit Iron Mine", International Journal of Mining Science and Technology 22, pp. 329-333.
- [3] Wyllie, D. C., & Mah, C. (2014), "Rock slope engineering". CRC Press.
- [4] Zhang, K., Cao, P., Ma, G., Fan, W., Meng, J., & Li, K. (2016), "A new methodology for open pit slope design in Karst-Prone ground conditions based on integrated stochastic-limit equilibrium analysis". Rock Mechanics and Rock Engineering, 49(7), 2737-2752.
- [5] Kliche, C. A. (1999), "Rock slope stability". SME.
- [6] Hoek, E., & BRAY, J. (1989), "Rock Slopes Design, Excavation, Stabilization" (No. FHWA-TS-89-045).
- [7] Jing L., Hudson. J.A. (2002), "Numerical methods in rock mechanics". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences.

درجه، فاکتور ایمنی از ۱/۳۹ در سناریوی اول به ۱/۲۸ برای سناریوهای دوم و ۱/۳۲ برای سناریوی سوم کاهش یافته است.

۴- بر اساس نتایج بدست آمده از سناریوی‌های چهارم و پنجم در شرایط هندسی مشابه، افزایش ارتفاع دیواره نهایی کاواک به مقدار کم (در حدود ۷ متر) نیز می‌تواند بر تعدیل و کاهش فاکتور ایمنی مؤثر باشد. به طوری که در سناریوی پنجم بدون تغییر در مشخصات هندسی شیب نهایی دیواره (زاویه، عرض و ارتفاع پله، زاویه شیب کلی پیت و غیره)، با افزایش ارتفاع دیواره کاواک از ۲۰۴ متر به ۲۱۱ متر، فاکتور ایمنی در سناریوی چهارم از ۱/۲۳ به ۱/۲۰ در سناریوی پنجم کاهش یافته است.

۵- در سناریوهای مختلف با افزایش تنش‌های افقی و قائم از سطح به کف کاواک، مقادیر کرنش برشی و جابجایی‌های افقی و قائم نیز در مدل افزایش یافته‌اند. به طوری که بیشترین مقادیر کرنش برشی و جابجایی افقی (در جهت شیب) مربوط به بخش تحتانی شیب دیواره کاواک و بیشترین مقدار جابجایی قائم (به صورت بالآمدگی) مربوط به کف کاواک معدن می‌باشند.

۶- با کاهش فاکتور ایمنی، مقادیر تغییرشکل و جابجایی در مدل افزایش یافته به طوری که حداکثر تغییرشکل و جابجایی‌های ایجاد شده در مدل‌ها مربوط به جابجایی‌های افقی در بخش تحتانی شیب دیواره و نیز جابجایی‌های قائم در کف کاواک است. به عبارت دیگر، با کاهش فاکتور ایمنی، کرنش برشی و جابجایی‌های افقی در مدل (بویژه بخش تحتانی دیواره کاواک) افزایش یافته‌اند در حالیکه حداکثر جابجایی‌های قائم در مدل مربوط به کف کاواک می‌باشد.

۷- بیشترین تأثیر ناشی از تغییر (کاهش و یا افزایش) فاکتور ایمنی مربوط به کرنش برشی و جابجایی افقی در مدل می‌باشد به طوری که در سناریوی پنجم (مدل پیشنهادی) با کاهش فاکتور ایمنی به ۱/۲۰، کرنش برشی به حداکثر مقدار خود معادل $1/12e^{-2}$ رسیده و متعاقباً جابجایی افقی نیز در مدل به مقدار حداکثر ۲۵/۷۵ سانتی‌متر افزایش یافته است. بیشترین مقدار جابجایی قائم (۲۹/۶۳ سانتی‌متر) ثبت شده در مدل‌ها

and western Pakistan". *Economic Geology*, 107(2), 295-332.

[17] ISRM (1981), "Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses. *Rock Characterization, Testing and Monitoring*", London. Pergamon, Oxford, 221 pp.

[18] ASTM, E. 9. (2001), "Standard test methods for tension testing of metallic materials". Annual book of ASTM standards. ASTM.

[19] Duncan C. Wyllie and Christopher W. Mah. (2004), "Rock slope engineering civil and mining". The Institute of Mining and Metallurgy, 4th Edition.

پی نوشت ها

¹ Pit

² Factor of safety

³ Continuum methods

⁴ Discrete methods

⁵ Hybrid methods

⁶ Bishop

⁷ Strength reduction method

⁸ Strength reduction factor

⁹ Diorite and granodiorite porphyry

¹⁰ Uplift

¹¹ Eocene volcanic-polotonic

¹² Stock work

¹³ International Society for Rock Mechanics

¹⁴ American Society for Testing and Materials

¹⁵ Medium

¹⁶ Moderate

¹⁷ Hydraulic fracturing

¹⁸ Flat jack

¹⁹ Over coring

[8] Jing L., (2003), "A Review of Techniques, Advances and Outstanding Issues in Numerical Modelling for Rock Mechanics and Rock Engineering", Division of Engineering Geology, Royal Institute of Technology, Technikerringen 72, Stockholm S-100 44, Sweden.

[9] Abderrahmane, Taleb Hosni, and B. Abdelmajid. 2016. "Assessment of Slope Stability by Continuum and Discontinuum Methods". World Academy of Science, Engineering, and Technology, Int. J. of Civil and Environmental Eng., Vol:10 No.4.

[10] You, G., Al Mandalawi, M., Soliman, A., Dowling, K., & Dahlhaus, P. (2017, July), "Finite element analysis of rock slope stability using shear Strength Reduction Method". In International Congress and Exhibition Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology" (pp. 227-235). Springer, Cham.

[11] Azarfar, B., Peik, B., Abbasi, B., & Roghanchi, P. (2018, August), "A Discussion on Numerical Modeling of Fault for Large Open Pit Mines". In 52nd US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. American Rock Mechanics Association.

[12] Azarfar, B., Ahmadvand, S., Sattarvand, J & Abbasi, B. (2019), "Stability Analysis of Rock Structure in Large Slopes and Open-Pit Mine: Numerical and Experimental Fault Modeling". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01915-4>.

[13] Dawson, E.M, W.H Roth, and A Drescher. (1999), "Slope stability analysis by strength". *Geotechnique* 49 (6): 835-840.

[14] Itasca (2017), "FLAC3D (Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions)", Version 6.0. Minneapolis: Itasca Consulting Group, Inc.

[۱۵] مهندسين مشاور بهينه گستر کاوش گران معادن، (۱۳۹۶)، «گزارش نهایي مطالعات مکانیک سنگ معدن طلا-مس

شادان».

[16] Richards, J. P., Spell, T., Rameh, E., Raziq, A., & Fletcher, T. (2012), "High Sr/Y magmas reflect arc maturity, high magmatic water content, and porphyry Cu±Mo±Au potential: Examples from the Tethyan arcs of central and eastern Iran