

مدل سازی سه بعدی به روش تفاضل محدود برای تعیین اثر پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی توده سنگ بر پایداری شیب دیواره نهایی معدن طلا-مس شادان

پویا فدایی^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

۲- استادیار؛ گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۳- دانشیار؛ گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، واحد علوم و تحقیقات، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

دریافت: ۱۳۹۹/۰۷/۰۱؛ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۱

چکیده

در این مطالعه، مجموعه‌ای از مدل سازی عددی سه بعدی به روش تفاضل محدود و به کمک نرم افزار $FLAC^{3D}$ به منظور ارزیابی اثر پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی موثر بر پایداری شیب نهایی دیواره شرقی معدن طلا-مس شادان انجام گرفت. از این رو بر پایه روش کاهش مقاومت و محاسبه حداقل فاکتور ایمنی (FOS) مورد نظر ($1/20$)، شیب بهینه دیواره نهایی معدن تعیین شد و سپس اثر ضریب تنش افقی (k)، شعاع انحنای شیب و فشار آب منفذی بر میزان پایداری آن مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان داد که کاهش و یا افزایش ضریب تنش افقی در بازه $0/50$ تا $2/00$ ، ضمن عدم تغییر در مقدار فاکتور ایمنی، سبب ایجاد تغییر شکل به خصوص جابجایی افقی در دیواره شیب کاواک می گردد. به طوری که با کاهش ضریب تنش افقی (k)، مقادیر حداکثر کرنش برشی و جابجایی های افقی و قائم کاهش یافته و بالعکس با افزایش ضریب k ، حداکثر کرنش برشی و جابجایی های افقی و قائم در دیواره و کف کاواک معدن نیز افزایش می یابند. با کاهش مقدار شعاع انحنای شیب، فاکتور ایمنی افزایش یافته که با افزایش آن مقدار تغییر شکل و جابجایی های ایجاد شده در دیواره و کف کاواک نیز کاهش می یابند. همچنین عمل زهکشی آب زیرزمینی به همراه کاهش فشار آب منفذی در پشت شیب دیواره کاواک، سبب افزایش فاکتور ایمنی و در نتیجه کاهش تغییر شکل و جابجایی می گردد.

مدل سازی عددی، پایداری شیب، پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی، نرم افزار تفاضل محدود $FLAC^{3D}$ ، معدن طلا-مس شادان

واژگان کلیدی

۱- مقدمه

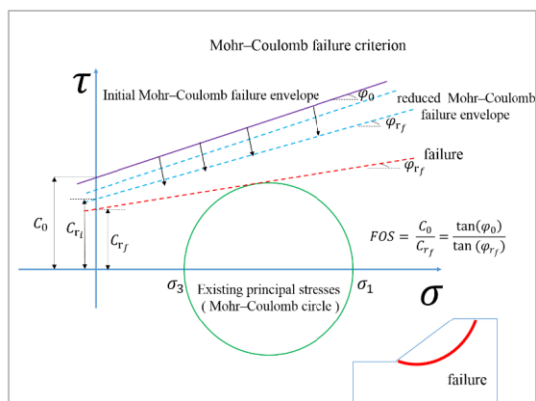
تعیین پایداری شیب یک بخش اساسی و مهم از مرحله طراحی پروژه های مهندسی معدن و عمران محسوب می گردد. این مساله به ویژه در معادن روباز بزرگ و ساخت سد از اهمیت دوچندان برخوردار می باشد. افزایش نرخ رشد اقتصادی و تقاضای مواد معدنی، بسیاری از معادنی که در سطح و نزدیک سطح زمین بودند استخراج شده و امروزه ذخایری برای استخراج در دست طراحی اند که نسبتاً در اعماق قرار دارند. در یک معدن روباز، گسیختگی و ناپایداری شیب نه تنها منجر به تاخیر در تولید ماده معدنی می گردد بلکه ممکن است منجر به آسیب های جدی به تجهیزات و بعضاً از بین رفتن آن ها گردد [1] و

[2]. از این رو نقش پایداری شیب چه در مرحله طراحی، چه در استخراج و یا پیش بینی شکست بسیار حایز اهمیت است. زاویه کلی شیب دیواره های معادن نیز از نزدیک به قائم برای توده سنگ های با کیفیت بالا تا 30° ، برای توده سنگ های ضعیف، متغیر است. شیب دیواره های معادن روباز معمولاً بر اساس فاکتور ایمنی $1/2-1/4$ طراحی می شوند و جابجایی احتمالی دیواره ها و ریزش های سطحی در برخی مناطق در طول مدت زمان استخراج تا حدی قابل قبول است [3] و [4]. الگوی حفاری معدن نیز باید به گونه ای 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

می شود [15]:

$$FOS = SRF = \frac{C_0}{C_r} = \frac{\tan \varphi_0}{\tan \varphi_r} \quad (1)$$

جایی که C_0 و φ_0 به ترتیب مقاومت چسبندگی اولیه و زاویه اصطکاک داخلی اولیه و همچنین C_r و φ_r به ترتیب مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی کاهش یافته، می باشند. فاکتور ایمنی در رابطه (۱) معادل فاکتور کاهش مقاومت است.



شکل ۱- روش کاهش مقاومت برشی [11]

در تحقیق حاضر نیز روش عددی با استفاده از روش کاهش مقاومت در نرم افزار $FLAC^{3D}$ به کار گرفته شده است. به منظور محاسبه فاکتور ایمنی برای هر روش، روش کاهش مقاومت در نرم افزار $FLAC^{3D}$ که از یک روش تفاضل محدود (FDM) برای تجزیه و تحلیل بهره می برد، استفاده می شود [16]. نقی پور و همکاران [13] اثر مشخصات هندسی پیت از جمله عرض، ارتفاع و شیب پله، ارتفاع پیت و زاویه کلی شیب را بر طراحی شیب بهینه دیواره نهایی معدن طلا-مس شادان مورد بررسی قرار دادند. این تحقیق در ادامه مطالعه آن ها و به منظور ارزیابی شعاع انحنای شیب، ضریب تنش افقی و فشار آب منفذی به عنوان پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی توده سنگ موثر بر پایداری شیب دیواره نهایی معدن می باشد. از این رو با مدل سازی عددی به روش کاهش مقاومت (SRM)، ضمن تعیین شیب بهینه و پایدار پیت معدن بر اساس محاسبه حداقل فاکتور ایمنی (۱/۲۰)، اثر ضریب تنش افقی، شعاع انحنای شیب و فشار آب منفذی بر میزان پایداری شیب مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.

۲- مشخصات معدن روباز طلا-مس شادان

۲-۱- معرفی معدن

معدن روباز طلا-مس شادان در ۶۵ کیلومتری جنوب غرب شهرستان بیرجند (استان خراسان جنوبی) واقع شده و جزو توابع بخش مرکزی شهرستان خوسف (راضی روستای شادان) به شمار می رود. محدوده مورد نظر بین طول های جغرافیایی $58^{\circ}56'43''$ - $59^{\circ}00'00''$

مسائل اقتصادی است. به این دلیل که حفاری معادن با شیب بیشتر، معمولاً هزینه کمتری نسبت به حفاری معادن با شیب های کمتر دربر دارد زیرا حجم باطله برداری کمتری انجام می شود. اما شیروانی های پرشیب نیاز به نصب تجهیزات پایداری سازی گران تر همانند راک بولت ها و شاتریت، برای کاهش خطر عدم پایداری کلی شیروانی و گسیختگی های سنگی در مدت عمر عملیاتی پروژه دارند [5] و [6].

یکی از اساسی ترین مسائل در مهندسی سنگ، تحلیل و تعیین پایداری سطوح شیب دار با هدف تشخیص پایداری و یا عدم پایداری شیروانی برای تقویت آن به منظور بالا بردن ضریب اطمینان آن می باشد. تحلیل پایداری مقدماتی اغلب به منظور تعیین پارامترهای بحرانی موثر در پایداری صورت می گیرند. در صورتی که ارزیابی پارامترهای هندسی و فیزیکی در پایداری شیروانی و تعیین نقش هر یک از آن ها نیازمند انجام تحلیل های دقیق تر می باشند. به منظور بررسی پایداری شیروانی های سنگی و به عبارتی دیواره معدن روباز روش های مختلفی وجود دارد. از جمله این روش ها می توان به روش های تجربی، روش های تعادل حدی و روش های عددی اشاره کرد [7] و [8]. در روش های تجربی بر اساس سیستم طبقه بندی به بررسی پایداری شیب ها می پردازند. روش های تجربی آسان ترین و سریع ترین روش برای تحلیل پایداری اند. روش های تعادل حدی یکی از پرکاربردترین روش ها در تحلیل پایداری شیروانی ها هستند. از این روش ها می توان برای تعیین ضریب اطمینان انواع مختلف ناپایداری های محتمل در شیب های خاکی و سنگی استفاده کرد. روش های تحلیل عددی پیشرفت های تازه تری نسبت به روش های تعادل حدی به منظور ارزیابی پایداری شیب ها و محاسبه فاکتور ایمنی (Factor of safety) داشته اند. به طوری که طی سال های اخیر به طور گسترده روش های عددی به عنوان یک ابزار قدرتمند در شبیه سازی و تحلیل پایداری شیروانی ها، مورد استفاده قرار گرفته اند، که این موضوع منجر به ارائه راه حل های ایده آل و نزدیک تر به شرایط واقعی پروژه شده است [9]، [10]، [11]، [12]، [13] و [14].

فاکتور ایمنی (FOS) یک رویکرد رایج برای ارزیابی پایداری شیب است. بیشاپ (Bishop)، فاکتور ایمنی را به عنوان نسبت مقاومت برشی واقعی به حداقل مقاومت برشی مورد نیاز برای حفظ تعادل تعریف کرد (شکل ۱) [9] و [11]. از این رو، مقدار FOS یک (FOS=1) نشان می دهد که گسیختگی شیب قریب الوقوع است. روش کاهش مقاومت (SRM) (Strength reduction method) توسط موهر- کولمب برای محاسبه FOS به طور گسترده در تحقیقات پایداری شیب و مدل سازی 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 می یابد (شکل ۱). فاکتور کاهش مقاومت (Strength reduction factor) (SRF) به وسیله رابطه (۱) به صورت زیر تعریف

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 وهله 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 می‌باشد.

به منظور 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) [19] و استانداردهای انجمن مصالح و آزمون آمریکا (ASTM) [20] انجام شده است. بر اساس طبقه‌بندی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM)، مقاومت فشاری لیتولوژی منطقه غالباً در محدوده "متوسط (Medium)" قرار می‌گیرد به غیر از سنگ برش که در محدوده "نسبتاً ضعیف (Moderate)" است. علت پایین بودن مقادیر مقاومت فشاری نسبت به داده‌های گزارش شده برای سنگ‌های آذرین در منابع مکانیک سنگی، احتمالاً به دگرسانی پتاسیک و فلیک منطقه برمی‌گردد به طوری که خواص مقاومتی این سنگ‌ها را تحت تاثیر قرار داده است.

به منظور مدل‌سازی عددی ارزیابی پایداری و طراحی شیب نهایی معدن، از پارامترهای فیزیکی و مکانیکی مربوط به توده سنگ‌های محدوده معدن طلا-مس شادان استفاده شده است (جدول ۱).

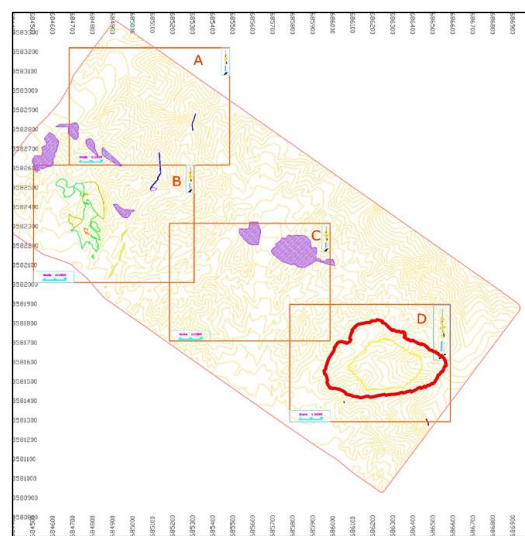
۳- ارزیابی پارامترهای موثر بر پایداری شیب

در این بخش، ضمن معرفی فرآیند مدل‌سازی عددی، پایدارترین طرح شیب دیواره نهایی معدن بر پایه مشخصات هندسی شیب کاواک انتخاب شده و سپس بر اساس طرح بهینه، سایر پارامترهای هندسی (شعاع انحنا شیب) و ژئومکانیکی (ضریب تنش افقی و فشار منفذی) موثر بر پایداری شیب، مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرند.

۳-۱- مدل‌سازی عددی

ارزیابی پارامترهای هندسی موثر بر پایداری شیب نهایی دیواره شرقی معدن طلا-مس شادان به منظور دستیابی به یک طرح بهینه برای حفاری و استخراج ماده معدنی مورد نظر به روش مدل‌سازی عددی (تفاضل محدود) و به کمک نرم‌افزار $FLAC^{3D}$ 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

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 چهار آنومالی در قالب بلوک‌های معدنی (A تا D) مشخص شده‌اند که در شکل ۲ نمایی 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) [17].



شکل ۲- نمای کلی و محدوده بلوک‌های معدنی [17]

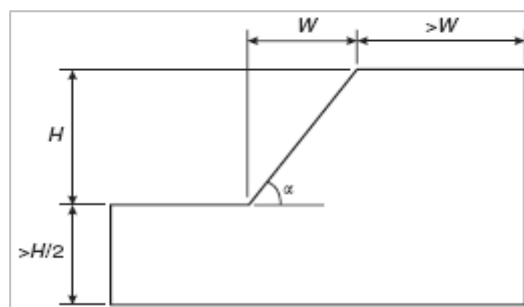
۲-۲- ویژگی‌های زمین‌شناسی و ژئومکانیکی معدن

منطقه مورد مطالعه از نظر چین‌شده‌شناسی، نفوذی‌های دیوریتی تا گرانودیوریتی پورفیری به عنوان سنگ میهمان بوده که در سنگ‌های ولکانیکی آندزیتی مربوط به ائوسن نفوذ کرده‌اند [18]. همچنین از نظر زمین‌ساخت، منطقه شادان در یک بلوک گسلی آپلیفت (Uplift) یا بالازدگی قوسی شکل از سنگ‌های ولکانوپلوتونیک ائوسن، واقع شده که در مرز شمالی آن، گسلی معکوس با شیب به سمت شمال وجود دارد. در سنگ‌های رخنمون یافته، دگرسانی پتاسیک تیبیک (بیوتیت ثانویه شدید و فلدسپات پتاسیم در سنگ‌های ولکانیکی آندزیتی و نفوذی‌های گرانودیوریت) همراه با استوک‌ورک‌ها (Stock work) و رگه‌های کوارتز-سولفید (اکسید شده) در سطح همراه با مالاکیت‌های کوچک) مشاهده می‌شود.

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

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 به‌دست‌آمده و ایجاد خطا، مانع از افزایش حجم و زمان محاسبات شود. ابعاد مدل در راستای محورهای X ، Y و Z به صورت تابعی از ابعاد ارتفاع شیروانی (H)، فاصله افقی میان پای (پاشنه) و تاج (لبه) شیروانی (W) و غیره مطابق شکل ۳ تعیین شده است [21]. 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 [21]

جهت ایجاد شرایط مرزی، گره‌های اطراف مدل در جهت‌های افقی (X و Y) بر روی صفحات $X-Z$ و $Y-Z$ ثابت شدند (گیرداری

جدول ۱- خواص ژئومکانیکی توده سنگ‌های معدن طلا-مس شادان [17]

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	۲/۵۸	۶/۰۵	۱/۴۱	۰/۰۴۸	۲/۳۴	۲/۴۳	۰/۸۷	۰/۳۴	۰/۱۸۰	۳۴
	آندزیتی										
۴	مونزودیوریت	۲/۵۷	۷/۲۲	۳/۷۳	۰/۱۳۸	۴/۸۷	۴/۰۵	۱/۸۷	۰/۳۰	۰/۴۱۰	۴۱/۵

۳-۲- طراحی شیب پایدار

به‌منظور طراحی یک شیب بهینه و پایدار از معدن طلا-مس شادان، مجموعه‌ای از مدل‌سازی عددی در قالب سناریوهای مختلف با تغییر در مشخصات هندسی شیب دیواره نهایی (عرض، ارتفاع و زاویه سطح پله، ارتفاع و زاویه کلی شیب) انجام شد. از این‌رو جهت

لازم به ذکر است، فرآیند مدل‌سازی عددی مورد نظر جهت آنالیز پایداری و طراحی شیب بوده و بسته به ارزیابی پارامترهای هندسی (شعاع انحنای شیب) و ژئومکانیکی (ضریب تنش افقی و فشار منفذی)، قابل تغییر هستند.

نیز به حداقل مقدار مورد نظر ($1/20$) کاهش یافته است (جدول ۳). علاوه بر تغییر در مشخصات هندسی بخش‌های مختلف شیب دیواره معدن افزایش ارتفاع شیب کلی کاواک (ارتفاع پیت) نیز در کاهش فاکتور ایمنی موثر می‌باشد (مقایسه میان سناریوهای چهارم و پنجم).

در شکل ۴ شرایط مدل‌سازی عددی برای سناریوی پنجم (مدل طرح بهینه و پایدار) و نیز نتایج حاصل از آن نشان داده شده است. بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده، با افزایش ارتفاع شیب دیواره کاواک از 204 متر در سناریوی چهارم با فاکتور ایمنی $1/23$ (جدول ۳)، به 211 متر (جدول ۲ و شکل ۴ الف)، فاکتور ایمنی به حداقل مقدار مورد نظر که معادل $1/2$ می‌باشد، کاهش یافته است (جدول ۳ و شکل ۴ ب تا و).

دستیابی به طرح بهینه شیب دیواره نهایی معدن، فاکتور ایمنی $1/2$ به عنوان حداقل مبنای پایداری شیروانی معدن در نظر گرفته شد. مشخصات هندسی شیب و ابعاد مدل‌های عددی مورد نظر جهت تحلیل پایداری در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی و ارزیابی پایداری شیب دیواره نهایی از سناریوی اول بر مبنای طرح اولیه معدن تا دستیابی به یک طرح بهینه حفاری و استخراج ماده معدنی در سناریوی پنجم در جدول ۳ به طور خلاصه ارائه شده است. بر پایه آنالیزهای انجام‌شده طی سناریوهای مختلف، با کاهش عرض پله‌ها از $6/8$ متر به 5 متر و نیز افزایش ارتفاع آن‌ها از 10 متر به 12 متر که منجر به افزایش زاویه شیب سطح پله‌ها (73° درجه) و متعاقباً افزایش زاویه کلی شیب (52° درجه) می‌گردد (جدول ۲)، فاکتور ایمنی شیب دیواره کاواک معدن

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

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

جدول ۳- خلاصه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی برای سناریوهای مختلف

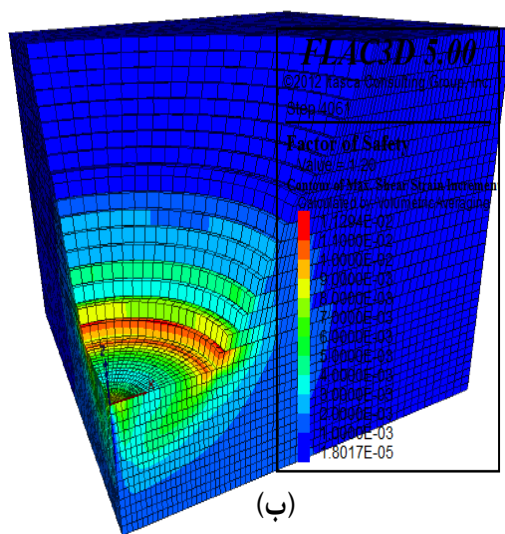
سناریو	حداکثر کرنش برشی (m)	حداکثر جابجایی افقی (cm)	حداکثر جابجایی قائم (cm)	جابجایی فوقانی دیواره (cm)		جابجایی میانی دیواره (cm)		جابجایی تحتانی دیواره (cm)		فاکتور ایمنی (FOS)
				z	x	z	x	z	x	
اول	-2	-22/24	29/63	0/37	-3/50	-6/90	10/45	-22/20	23/29	1/39
دوم	-2	-22/22	27/30	0/50	-3/30	-6/40	8/18	-22/11	20/49	1/28
سوم	-3	-21/16	26/00	0/25	-1/92	-5/10	7/72	-21/10	17/97	1/32
چهارم	-2	-24/00	25/82	0/48	-2/00	-5/00	6/89	-23/98	17/42	1/23
پنجم	-2	-25/75	27/16	0/52	-2/50	-5/70	7/16	-25/68	18/25	1/20

با کاهش فاکتور ایمنی، میزان حداکثر کرنش برشی در مدل (جدول ۳ و شکل ۴ ب) و همچنین جابجایی‌های افقی در مدل (جدول ۳ و شکل ۴ ج) و دیواره کاواک (جدول ۳ و شکل ۴ ه)، با افزایش مقادیر تنش‌های افقی، افزایش یافته‌اند. به طوری که حداکثر کرنش برشی و حداکثر جابجایی ایجاد شده در مدل به ترتیب معادل $1/12e^{-2}$ متر و $25/7$ سانتی متر بوده و مربوط به بخش تحتانی دیواره کاواک می‌باشند (جدول ۳). مقادیر جابجایی قائم در مدل و خصوصاً دیواره شیب، هر چند با افزایش عمق و تنش‌های قائم، افزایش می‌یابند، اما تاثیرپذیری کمی نسبت به مقدار فاکتور ایمنی پایداری شیب دیواره نهایی دارند (جدول ۳ و شکل ۴ د و و). در مجموع، مدل سناریوی پنجم به عنوان طرح بهینه و نهایی جهت ارزیابی دیگر پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی موثر بر پایداری شیب دیواره نهایی معدن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

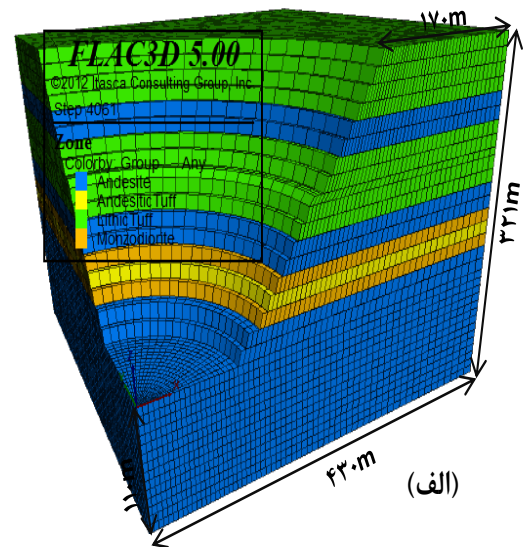
۳-۳- اثر ضریب تنش افقی (k)

بر اساس تحلیل‌ها و آنالیزهای انجام شده، مدل سناریوی پنجم با حداقل فاکتور ایمنی $1/20$ ، به عنوان طرح بهینه و پایدار جهت اجرا در سایت معدن طلا-مس شادان معرفی گردید. همچنین با توجه به در نظر گرفتن شرایط تنش‌های برجا به صورت هیدروستاتیک ($\sigma_v = \sigma_H = \sigma_h$) در محدوده مورد مطالعه ناشی از عدم اطلاعات کافی (عدم انجام مطالعات میدانی)، و اهمیت ضریب تنش بر جای زمین و یا ضریب تنش افقی (k) در مسائل تحلیل پایداری و طراحی شیب، از این‌رو تلاش شده است تا با لحاظ نمودن مقادیر مختلف k (کمتر و بیشتر از ۱)، ارزیابی دقیق‌تری از اثر این پارامتر بر میزان پایداری و تغییر شکل شیب دیواره نهایی کاواک معدن طلا-مس شادان در طرح پیشنهادی (سناریوی پنجم) صورت گیرد. به عبارت دیگر، از آنجایی که در تحلیل پایداری شیب دیواره معدن جهت دستیابی به مناسب‌ترین طرح اجرایی بر مبنای حداقل فاکتور ایمنی $1/20$ ، از مقدار واحد ضریب تنش افقی ($k=1$) استفاده شده است، از این‌رو در این بخش از مطالعه، محدوده‌ای از مقادیر ضریب تنش افقی ($0/5$) تا ۲) در طرح پیشنهادی اعمال و اثر آن‌ها بر میزان پایداری و تغییر شکل شیب دیواره کاواک مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از مدل سازی عددی اثر ضریب تنش افقی بر پایداری شیب در جدول ۴ ارائه شده است. همان گونه که در جدول ۴ و نیز به عنوان نمونه در شکل ۵ (ضریب تنش افقی کمتر از یک؛ $k=0/50$) و شکل ۶ (ضریب تنش افقی بزرگ‌تر از یک؛ $k=1/50$)، مشاهده می‌شود، با کاهش و یا افزایش مقادیر k ، هیچگونه تغییری در مقدار فاکتور ایمنی پایداری شیب دیواره معدن مشاهده نمی‌شود. از طرفی با کاهش و یا افزایش مقدار ضریب تنش افقی k ، مقادیر حداکثر کرنش برشی و همچنین میزان تغییر شکل‌های ایجاد شده در شیب دیواره معدن، دستخوش تغییرات قابل توجهی می‌باشند. به طوری که با کاهش مقدار k ، مقادیر حداکثر کرنش برشی و جابجایی‌های افقی و قائم در مدل کاهش

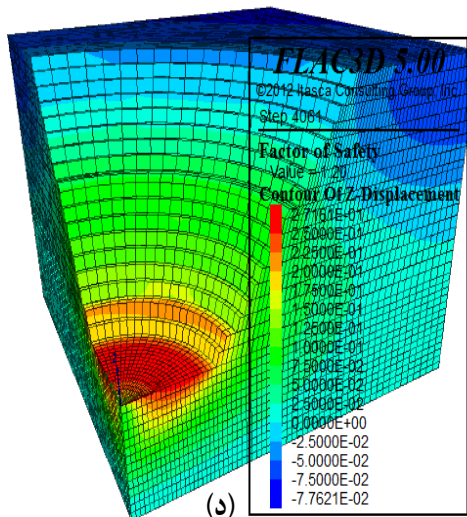
یافته و با افزایش آن، تغییرات قابل توجه و چشمگیری در مقادیر مذکور مشاهده می‌شود (جدول ۴). همچنین کانتور (خطوط هم‌تراز) تنش‌های افقی و قائم مربوط به دو مدل با ضرایب تنش افقی کمتر از ۱ ($k=0/50$) و بزرگ‌تر از ۱ ($k=1/50$) در شکل ۷ نشان داده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، هنگامی که مقدار k کوچک‌تر از ۱ می‌باشد، مقادیر تنش قائم از تنش افقی بیشتر بوده (شکل ۷ الف و ب) که با افزایش k ($k=1/50$)، مقادیر تنش افقی افزایش یافته و مقدار آن بیشتر از تنش قائمی که مقدار آن تقریباً بدون تغییر بوده است، می‌باشد (شکل ۷ ج و د). با افزایش مقادیر تنش‌های افقی در مدل و بخصوص بر روی شیب دیواره کاواک، میزان تغییر شکل‌های حاصله نیز افزایش می‌یابد. از آنجایی که با تغییر ضریب تنش افقی k ، تغییر محسوسی در مقادیر تنش قائم ایجاد نمی‌شود، اما مشاهده می‌شود که با افزایش k ، مقادیر تغییر شکل و جابجایی قائم نیز به واسطه افزایش تنش کل در مدل افزایش می‌یابند (جدول ۴). حداکثر مقادیر کرنش برشی (از $3e^{-3}$ تا $6/73e^{-3}$ متر)، حداکثر مقدار تنش افقی (از $10/09$ - سانتی متر) و حداکثر جابجایی قائم (از $19/29$ سانتی متر) در مدل با ضریب تنش افقی $0/50$ به ترتیب به مقادیر $4/08e^{-2}$ متر، $89/37$ - و $82/82$ سانتی متر در مدل با ضریب تنش افقی ۲ افزایش می‌یابند (جدول ۴). لازم به ذکر است که حداکثر جابجایی‌های قائم و افقی در مدل به ترتیب مربوط به کف کاواک و بخش تحتانی شیب دیواره معدن (پاشنه شیب) می‌باشند، لذا همان گونه که در جدول ۴ نشان شده است، مقادیر حداکثر جابجایی افقی در مدل و نیز مقادیر جابجایی افقی در بخش تحتانی شیب دیواره کاواک به یکدیگر بسیار نزدیک بوده در حالی که مقادیر حداکثر جابجایی قائم در کف کاواک با پاشنه شیب با یکدیگر متفاوت می‌باشند و از این‌رو مقادیر آن‌ها با یکدیگر اختلاف مشخصی دارند. از آنجایی که بیشترین مقدار تغییر شکل و جابجایی در شیب دیواره نهایی در بخش تحتانی آن و کف کاواک رخ می‌دهد، از این‌رو با افزایش مقدار k ، مقادیر جابجایی افقی در بخش تحتانی دیواره شیب و حتی کف کاواک بیشتر از جابجایی قائم می‌باشد. به عبارتی، زمانی که مقدار k بعضاً کمتر و برابر با ۱ است، مقادیر جابجایی قائم از مقادیر جابجایی افقی بیشتر بوده و زمانی که مقدار آن به بزرگ‌تر از ۱ افزایش می‌یابد، مقادیر جابجایی افقی بیشتر از مقادیر جابجایی قائم می‌گردد. لازم به ذکر است که همان گونه که در جدول ۴ ارائه شده است، مقادیر جابجایی‌های افقی و قائم ثبت شده بر روی قسمت‌های مختلف شیب دیواره کاواک معدن با افزایش مقادیر تنش افقی و قائم از سطح به کف کاواک، روند افزایشی منظم‌تر و مشخص‌تری از خود نشان می‌دهند (بعضاً در بخش‌های فوقانی و میانی شیب دیواره کاواک مقادیر تغییر شکل‌ها از نوسانات بسیار جزئی برخوردار می‌باشند، اما روند کلی تغییر شکل‌ها بر اساس نتایج ارائه شده می‌باشد).



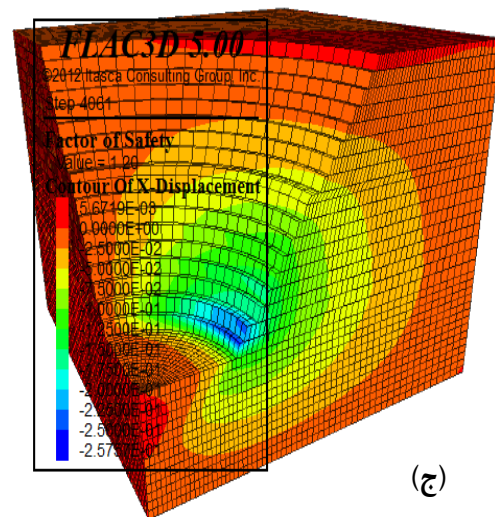
(ب)



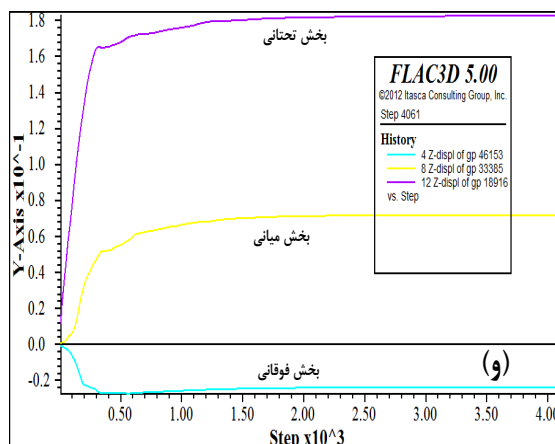
(الف)



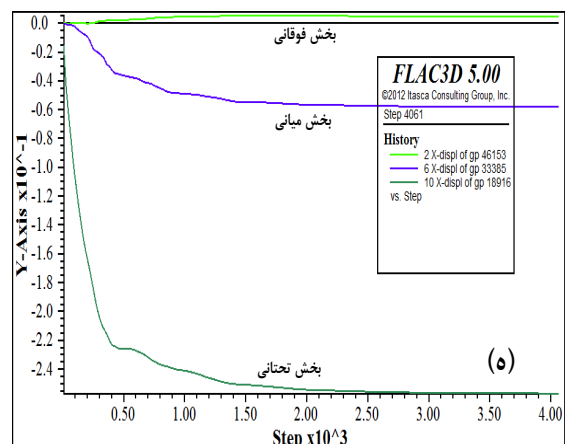
(د)



(ج)



(و)

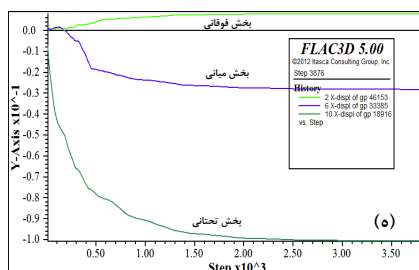
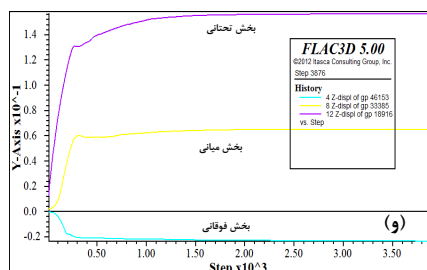
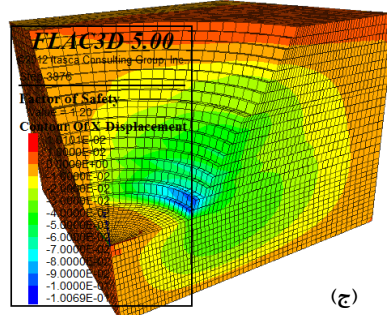
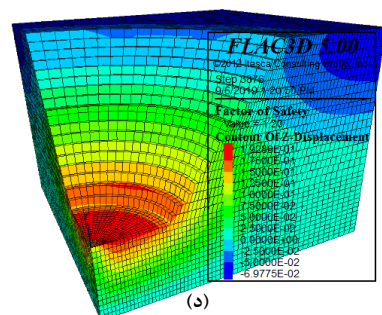
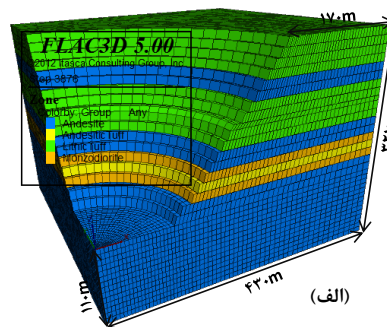
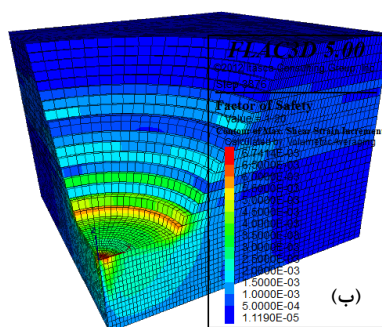


(ه)

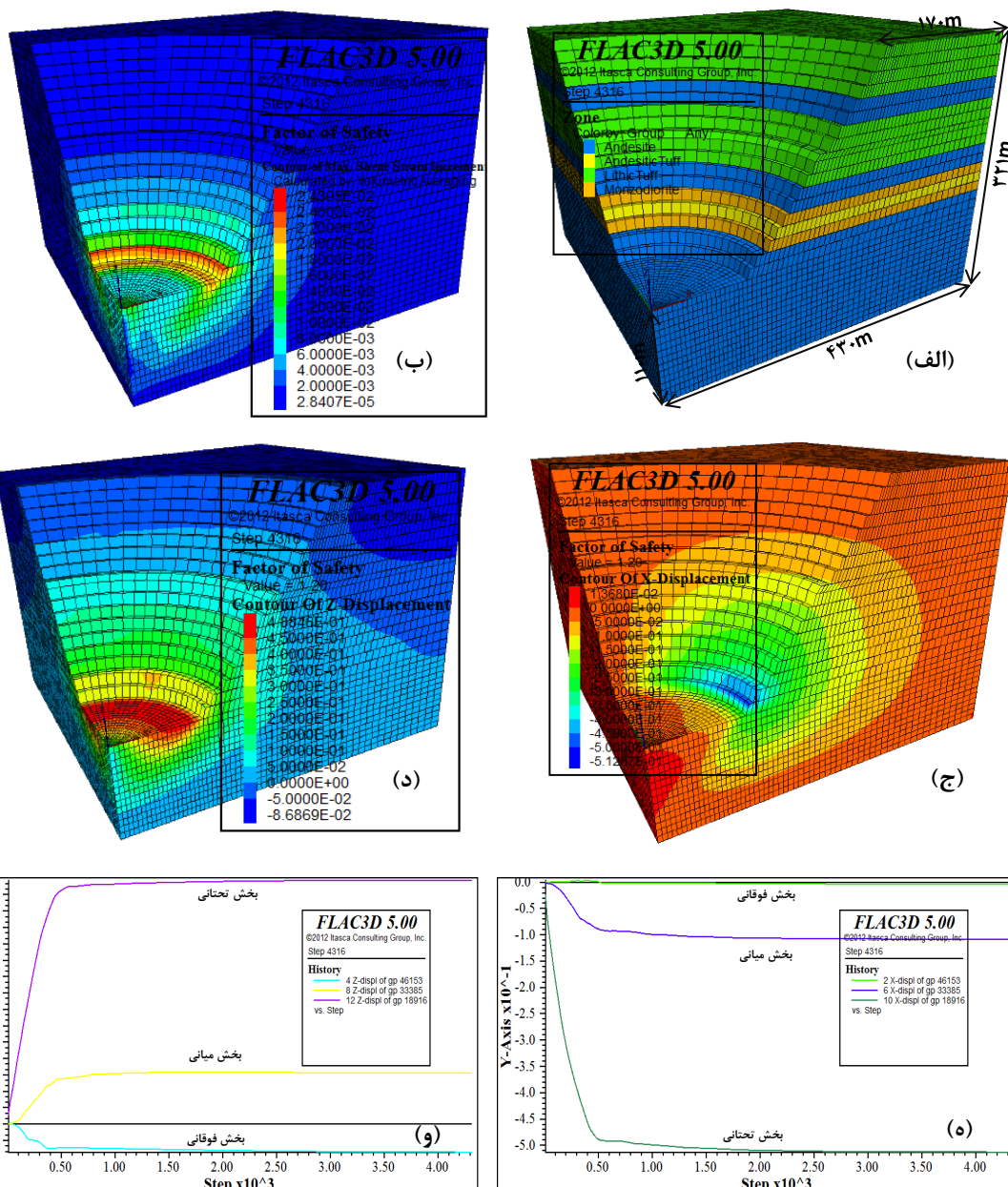
شکل ۴- هندسه مدل و نتایج حاصل از مدل سازی عددی در سناریوی پنجم

جدول ۴- خلاصه نتایج حاصل از ارزیابی اثر ضریب تنش افقی (k) بر پایداری شیب دیواره کاواک معدن

ضریب تنش افقی k	حداکثر کرنش برشی (m)	حداکثر جابجایی افقی (cm)	حداکثر جابجایی قائم (cm)	جابجایی فوقانی دیواره (cm)	جابجایی میانی دیواره (cm)	جابجایی تحتانی دیواره (cm)	فاکتور ایمنی (FOS)
				Z	X	Z	
۰/۵۰	$۶/۷۴e^{-۲}$	-۱۰/۱۰	۱۹/۲۸	-۲/۳۰	-۲/۸۲	۶/۵۰	۱/۲۰
۰/۷۵	-۲	-۱۶/۸۵	۲۱/۶۲	-۲/۴۴	-۴/۳۳	۷/۴۱	۱/۲۰
	$۸/۳۳e$						
۱/۰۰	$۱/۱۲e^{-۲}$	-۲۵/۷۵	۲۷/۱۶	-۲/۵۰	-۵/۷۰	۷/۱۶	۱/۲۰
۱/۲۵	$۱/۷۹e^{-۲}$	-۳۹/۶۳	۳۴/۹۹	-۰/۳۲	-۱۱/۸۲	۶/۰۰	۱/۲۰
۱/۵۰	$۲/۴۳e^{-۲}$	-۵۱/۲۸	۴۸/۸۴	-۰/۴۳	-۱۰/۸۴	۶/۱۹	۱/۲۰
۱/۷۵	$۳/۲۷e^{-۲}$	-۷۰/۸۷	۶۵/۰۲	-۱/۱۴	-۱۳/۵۲	۶/۸۲	۱/۲۰
۲/۰۰	$۴/۰۸e^{-۲}$	-۸۹/۳۷	۸۲/۸۲	-۱/۲۰	-۱۵/۴۹	۸/۴۰	۱/۲۰



شکل ۵- نتایج حاصل از مدل سازی عددی با ضریب تنش افقی $k=۰/۵۰$: (الف) هندسه مدل (ب) حداکثر کرنش برشی مدل، (ج) حداکثر جابجایی افقی مدل، (د) حداکثر جابجایی قائم مدل، (ه) منحنی های جابجایی افقی بر روی شیب دیواره، (و) منحنی های جابجایی قائم بر روی شیب دیواره

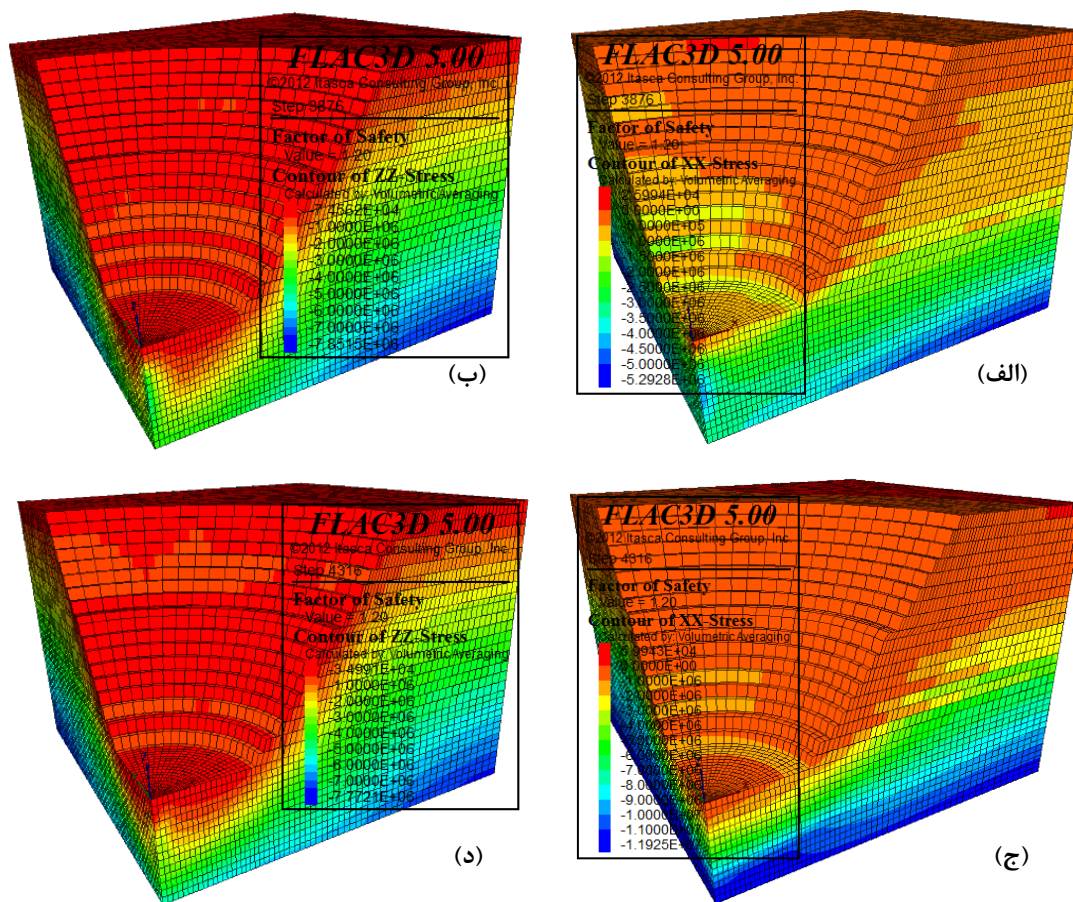


شکل ۶- نتایج حاصل از مدل سازی عددی با ضریب تنش افقی $k=1/50$: (الف) هندسه مدل (ب) حداکثر کرنش برشی مدل، (ج) حداکثر جابجایی افقی مدل، (د) حداکثر جابجایی قائم مدل، (ه) منحنی های جابجایی افقی بر روی شیب دیواره، (و) منحنی های جابجایی قائم بر روی شیب دیواره

۳-۴- اثر شعاع انحنای شیب

با توجه به اهمیت شعاع انحنای شیب بر پایداری دیواره نهایی کاواک معدن، در این بخش از مطالعه ابتدا اثر این پارامتر بر طرح پیشنهادی سناریوی پنجم با فاکتور ایمنی $1/20$ ، مورد ارزیابی قرار گرفت. سپس به منظور بررسی بیشتر این پارامتر و اثر آن بر میزان پایداری شیب دیواره نهایی معدن در شرایط فاکتور ایمنی بالاتر، این مساله بر روی مدل طرح اولیه معدن یعنی سناریوی اول با فاکتور ایمنی $1/39$ (جدول ۲) نیز مورد بررسی قرار گرفته است. از این رو با توجه به اینکه در سناریوهای اول (طرح اولیه) و پنجم (طرح پیشنهادی)،

شعاع انحنای شیب 100 متر در نظر گرفته شده است، در این بخش از تحقیق از شعاع انحنای کمتر و بیشتر از این مقدار (به ترتیب 50 و 150 متر) جهت بررسی پایداری شیب دیواره نهایی کاواک معدن استفاده شده است. در جدول ۵ نتایج مربوط به چهار مدل عددی بر اساس شرایط ذکر شده به منظور بررسی اثر شعاع انحنای شیب بر پایداری شیب دیواره کاواک معدن ارائه شده است. در جدول ۵ مقادیر حداکثر کرنش برشی، حداکثر جابجایی های افقی و قائم و نیز فاکتور ایمنی برای هر مدل ارائه شده است.



شکل ۷- کانتور تنش‌های افقی و قائم در مدل با ضریب تنش افقی $k=0.5$ (الف و ب) و $k=1/50$ (ج و د)

جدول ۵- خلاصه نتایج حاصل از مدل سازی عددی اثر شعاع انحنای شیب بر پایداری دیواره نهایی معدن

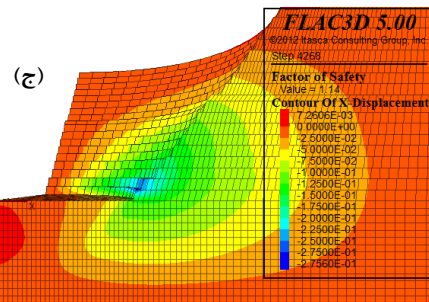
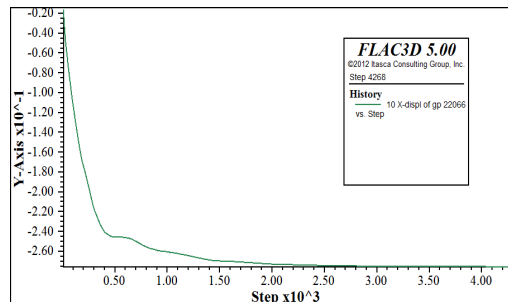
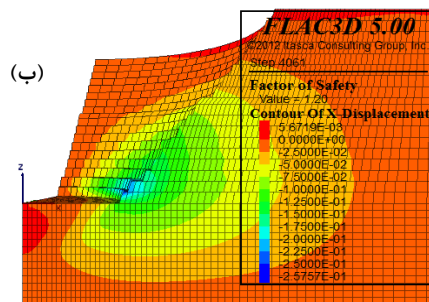
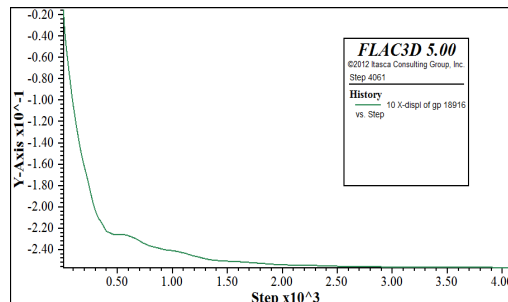
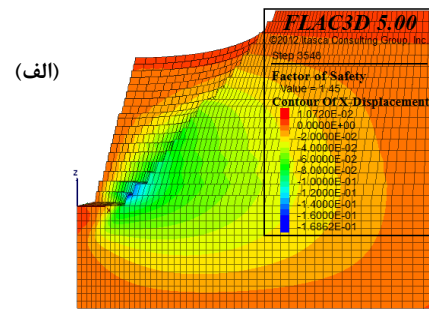
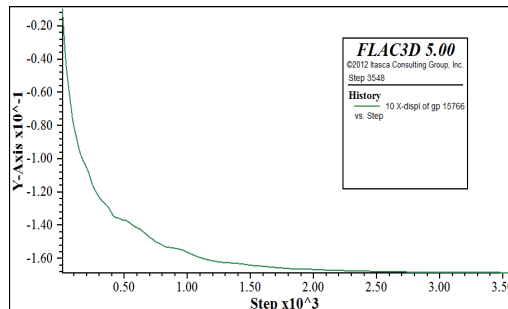
سنا ر یو (مدل)			اول (طرح اولیه)			پنجم (طرح پیشنهادی)		
شعاع انحنای شیب (m)			۵۰	۱۰۰	۱۵۰	۵۰	۱۰۰	۱۵۰
حداکثر کرنش برشی (m)			$1/0.1e^{-2}$	$1/0.2e^{-2}$	$1/0.3e^{-2}$	$1/0.4e^{-2}$	$1/1.2e^{-2}$	$1/2.4e^{-2}$
حداکثر جابجایی افقی (cm)			-۱۹/۹۷	-۲۲/۲۴	-۲۳/۲۷	-۱۶/۸۶	-۲۵/۷۵	-۲۷/۵۶
حداکثر جابجایی قائم (cm)			۲۷/۸۱	۲۹/۶۳	۳۰/۱۹	۲۴/۵۸	۲۷/۱۶	۲۸/۱۲
جابجایی فوقانی دیواره (cm)			x	۰/۹۷	۰/۳۷	۰/۹۵	۰/۵۲	۰/۱۴
جابجایی میانی دیواره (cm)			x	-۲/۲۲	-۳/۵۰	-۱/۹۸	-۲/۵۰	-۲/۷۱
جابجایی تحتانی دیواره (cm)			x	-۵/۲۹	-۶/۹۰	-۳/۹۲	-۵/۷۰	-۶/۸۶
جابجایی تحتانی دیواره (cm)			z	۹/۶۳	۱۰/۴۵	۱۱/۱۳	۶/۵۹	۷/۱۶
جابجایی تحتانی دیواره (cm)			x	-۱۹/۹۶	-۲۲/۲۰	-۲۳/۲۰	-۱۶/۸۲	-۲۵/۶۸
جابجایی تحتانی دیواره (cm)			z	-۲۱/۱۲	۲۳/۳۹	۲۴/۹۰	۱۴/۷۸	۱۸/۲۵
فاکتور ایمنی (FOS)			۱/۵۰	۱/۳۹	۱/۳۳	۱/۴۵	۱/۲۰	۱/۱۴

همان گونه که در جدول ۵ ارائه شده است، با کاهش و افزایش شعاع انحنای شیب، فاکتور ایمنی نیز به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. به عبارت دیگر، با کاهش شعاع انحنای شیب به ۵۰ متر، فاکتور ایمنی نیز از مقدار ۱/۲۰ برای طرح پیشنهادی و از مقدار ۱/۳۹ برای مدل طرح اولیه به ترتیب به ۱/۴۵ و ۱/۵۰ افزایش یافته است. در حالی که با افزایش شعاع انحنای شیب به ۱۵۰ متر، فاکتور ایمنی برای طرح پیشنهادی و طرح اولیه به ترتیب به ۱/۱۴ و ۱/۳۳ کاهش نشان می‌دهد. در واقع میزان تغییر فاکتور ایمنی با کاهش

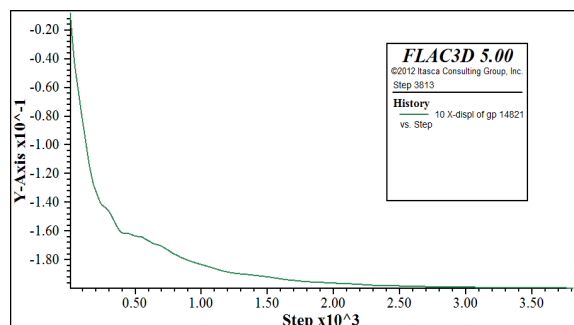
شعاع انحنای شیب، فاکتور ایمنی نیز به ترتیب افزایش و کاهش یافته است. به عبارت دیگر، با کاهش شعاع انحنای شیب به ۵۰ متر، فاکتور ایمنی نیز از مقدار ۱/۲۰ برای طرح پیشنهادی و از مقدار ۱/۳۹ برای مدل طرح اولیه به ترتیب به ۱/۴۵ و ۱/۵۰ افزایش یافته است. در حالی که با افزایش شعاع انحنای شیب به ۱۵۰ متر، فاکتور ایمنی برای طرح پیشنهادی و طرح اولیه به ترتیب به ۱/۱۴ و ۱/۳۳ کاهش نشان می‌دهد. در واقع میزان تغییر فاکتور ایمنی با کاهش

کاواک با توجه به تغییرات مقادیر فاکتور ایمنی به ترتیب برای مدل‌های طرح اولیه (سناریوی اول) و طرح پیشنهادی (سناریوی پنجم)، نشان داده شده است. با افزایش شعاع انحنای شیب و کاهش فاکتور ایمنی، میزان تغییر شکل‌های ایجادشده در مدل و نیز دیواره شیب کاواک (بخش تحتانی) افزایش یافته است.

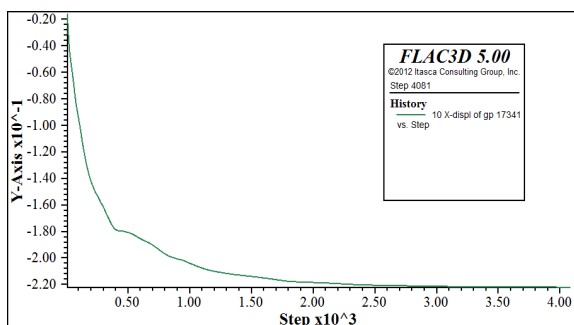
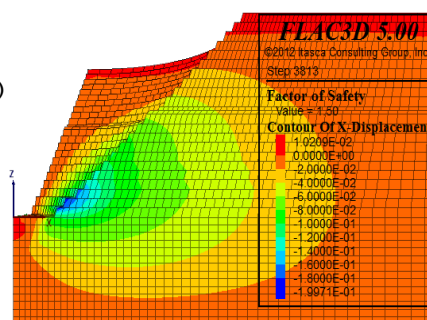
شعاع انحنای شیب (۵۰ متر) بیشتر از افزایش انحنای شیب (۱۵۰ متر) می‌باشد (خصوصاً در حالت حداقل فاکتور ایمنی مورد نظر؛ ۱/۲۰). به دنبال افزایش و یا کاهش مقدار فاکتور ایمنی شیب، میزان تغییر شکل‌ها و جابجایی‌ها در مدل نیز دستخوش تغییرات می‌باشند. به‌عنوان نمونه در شکل‌های ۸ و ۹ مقادیر حاصل از جابجایی‌های افقی ایجادشده در کل مدل و نیز در بخش تحتانی شیب دیواره



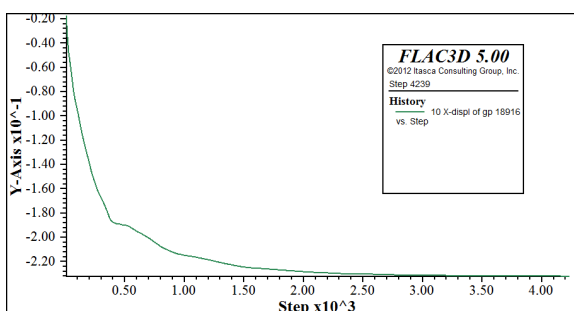
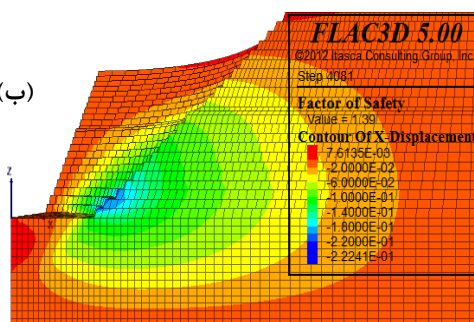
شکل ۸- کانتور و منحنی حداکثر جابجایی‌های افقی سناریوی پنجم در مدل‌های با شعاع انحنای ۵۰ متر (الف)، ۱۰۰ متر (ب) و ۱۵۰ متر (ج)



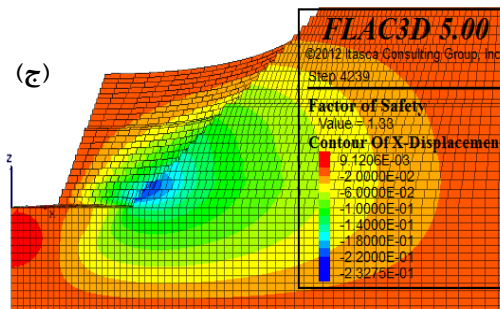
(الف)



(ب)



(ج)



شکل ۹- کانتور و منحنی حداکثر جابجایی‌های افقی سناریوی اول در مدل‌های با شعاع انحنای ۵۰ متر (الف)، ۱۰۰ متر (ب) و ۱۵۰ متر (ج)

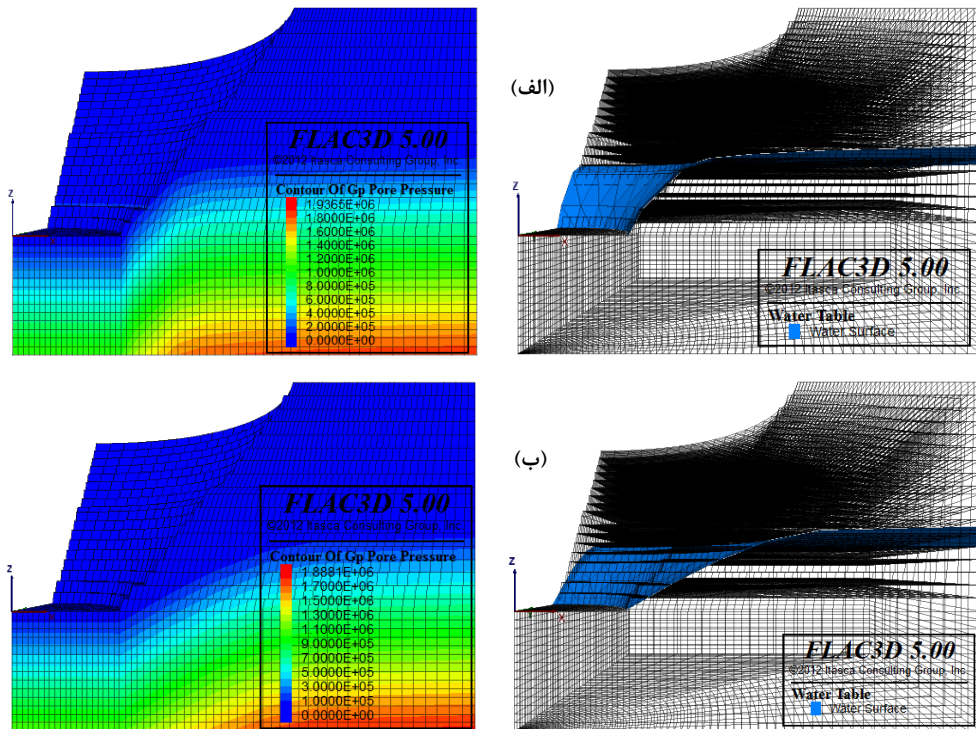
شیب دیواره معدن، در پاشنه شیب رخمون دارد (شکل ۱۰ ب).

از این‌رو در این بخش از مطالعه، نتایج حاصل از ارزیابی پایداری شیب دیواره کاواک در شرایط زهکشی شده با نتایج بدست آمده در سناریوی پنجم در حالت زهکشی نشده مورد مقایسه قرار گرفته است (جدول ۳).

در جدول ۶، نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی ارزیابی پایداری شیب دیواره نهایی کاواک معدن در حالت‌های زهکشی نشده و زهکشی شده ارائه شده است. همان‌گونه که در جدول ۶ نشان داده شده است، با ایجاد شرایط زهکشی و کاهش تراز آب زیرزمینی به همراه فشار آب حفره‌ای (فشار منفذی) در پشت شیب دیواره کاواک، فاکتور ایمنی پایداری شیب از ۱/۲۰ در حالت زهکشی نشده به ۱/۳۶ افزایش یافته است که با افزایش مقدار فاکتور ایمنی شیب دیواره کاواک، مقادیر حداکثر کرنش برشی و جابجایی‌های افقی و قائم در مدل نیز کاهش یافته‌اند. بیشترین مقدار کاهش تغییر شکل در مدل مربوط به جابجایی‌های افقی در بخش‌های مختلف شیب دیواره کاواک معدن به خصوص در بخش تحتانی دیواره می‌باشد (شکل ۱۱).

۳-۵- اثر فشار آب منفذی

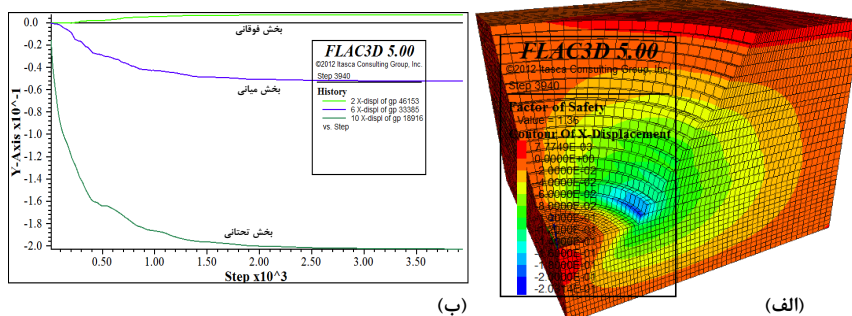
با توجه به اهمیت حضور آب زیرزمینی و ایجاد فشار آب منفذی ناشی از آن در برخی از مسائل مهندسی به ویژه پایداری شیروانی-های سنگی در معادن روباز، از این‌رو در این بخش از مطالعه، اثر فشار آب منفذی در شرایط تغییر تراز آب زیرزمینی (زهکشی شده و زهکشی نشده) بر پایداری شیب دیواره نهایی معدن مورد ارزیابی قرار گرفته است. بدین منظور، سناریوی پنجم به عنوان طرح پیشنهادی در این تحقیق (جدول ۲)، جهت بررسی اثر شرایط آب زیرزمینی بر میزان پایداری شیب دیواره نهایی معدن، انتخاب شده است. در شکل ۱۰ (الف و ب) شرایط آب زیرزمینی به همراه فشار آب منفذی در پشت شیب دیواره نهایی کاواک معدن، به ترتیب در دو حالت زهکشی نشده و زهکشی شده نشان داده شده است. آب زیرزمینی در شرایط زهکشی نشده (شکل ۱۰ الف) در تراز حدود ۶۰ متری از کف کاواک با شیب دیواره تلاقی داشته است در حالی که با اعمال شرایط زهکشی و کاهش تراز آب زیرزمینی، آب زیرزمینی بدون تماس با



شکل ۱۰- تراز آب زیرزمینی به همراه کانتور فشار آب حفره‌ای (منفذی) در شرایط زهکشی نشده (الف) و زهکشی شده (ب) شیب دیواره نهایی معدن

جدول ۶- نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی پایداری شیب دیواره کاواک در حالت‌های زهکشی شده و زهکشی نشده

فاکتور ایمنی	جابجایی تحتانی دیواره (cm)		جابجایی میانی دیواره (cm)		جابجایی فوقانی دیواره (cm)		حداکثر جابجایی قائم (cm)	حداکثر جابجایی افقی (cm)	حداکثر کرنش برشی (m)	مدل
(FOS)	z	x	z	x	z	x	(cm)	(cm)		
۱/۲۰	۱۸/۲۵	-۲۵/۶۸	۷/۱۶	-۵/۷۰	-۲/۵۰	۰/۵۲	۲۷/۱۶	-۲۵/۷۵	$1/12e^{-2}$	زهکشی نشده
۱/۳۶	۱۶/۵۲	-۲۰/۲۲	۶/۹۴	-۵/۲۳	-۲/۱۸	۰/۴۸	۲۷/۰۲	-۲۰/۳۱	$1/11e^{-2}$	زهکشی شده



شکل ۱۱- (الف) کانتور جابجایی افقی در مدل و (ب) منحنی‌های جابجایی افقی در بخش‌های مختلف شیب دیواره کاواک

ذیل است:

۱- مدل سناریوی شماره ۵ (جدول ۲) با حداقل فاکتور ایمنی ۱/۲۰ به عنوان طرح بهینه و پایدار به‌منظور اجرا در محل معدن طلا-مس شادان پیشنهاد گردید.

۴- نتیجه‌گیری

بر اساس مدل‌سازی عددی و ارزیابی‌های انجام‌شده از پارامترهای هندسی و ژئومکانیکی موثر بر میزان پایداری شیب دیواره نهایی معدن طلا-مس شادان، مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح

شعاع انحنای ۱۵۰ متر می‌باشد.

۶- با تغییر در تراز آب زیرزمینی و وضعیت فشار آب حفره‌ای در پشت شیب دیواره کاواک، میزان پایداری و تغییر شکل شیب دیواره معدن نیز دستخوش تغییراتی خواهد بود. به طوری که با عملیات زهکشی و کاهش تراز آب زیرزمینی (کاهش فشار آب حفره‌ای)، میزان فاکتور ایمنی در مدل پیشنهادی از ۱/۲۰ به ۱/۳۶ افزایش یافته و متعاقباً با افزایش پایداری شیب، مقادیر کرنش برشی و جابجایی‌های افقی و قائم نیز در مدل و خصوصاً در شیب دیواره نهایی کاواک معدن کاهش می‌یابد.

۷- نتایج بدست آمده در این تحقیق می‌تواند مبنای تحلیل پایداری و طراحی شیب دیواره نهایی معدن با توجه به تخمین و یا برآورد مقدار ضریب تنش افقی (تنش برجا) در محل معدن طلا-مس شادان در بازه مطالعه‌شده ($k=0.50-2$) واقع گردد.

۸- بر اساس نتایج بدست آمده از این تحقیق، از آنجایی که با افزایش شعاع انحنای شیب از ۱۰۰ متر به ۱۵۰ متر، میزان تغییر فاکتور ایمنی و به دنبال آن تغییر شکل‌های ایجادشده در مدل ناچیز می‌باشد، به نظر می‌رسد شعاع انحنای شیب (۱۰۰ متر) انتخاب‌شده برای تحلیل پایداری و طراحی شیب دیواره نهایی معدن نسبتاً مناسب می‌باشد. اما می‌توان با انجام یک آنالیز حساسیت دقیق‌تر و با در نظر گرفتن محدوده بیشتر شعاع انحنای شیب (بیش از ۱۰۰ متر)، حداکثر شعاع انحنای شیب مورد نظر برای اجرای طرح معدن طلا-مس شادان را به دست آورد.

۵- سپاس‌گزاری

نویسنده این مقاله بدینوسیله مراتب تشکر و قدردانی خود را از مجموعه معدن طلا-مس شادان و نیز مهندسین مشاور بهینه‌گستر کاوش‌گران معادن به جهت همکاری و مساعدت‌های لازم در انجام تحقیق حاضر، اعلام می‌نماید.

۲- علاوه بر مشخصات هندسی شیب (زاویه، عرض و ارتفاع پله، ارتفاع و زاویه شیب کلی پیت)، ضریب تنش افقی (k)، فشار آب منفذی و شعاع انحنای شیب از عوامل تاثیرگذار بر میزان پایداری و تغییر شکل شیب دیواره نهایی معدن محسوب می‌شوند.

۳- کاهش و یا افزایش ضریب تنش افقی (k)، هیچگونه اثری بر مقدار فاکتور ایمنی پایداری شیب دیواره نهایی معدن ندارد. به طوری که با کاهش ضریب تنش افقی از ۱/۰۰ به ۱/۵۰ و یا بالعکس با افزایش آن به ۲/۰۰، در مقدار فاکتور ایمنی (۱/۲۰) هیچگونه تغییری مشاهده نمی‌شود.

۴- ضریب تنش افقی (k)، از پارامترهای موثر بر میزان تغییر شکل و جابجایی در شیب دیواره نهایی کاواک معدن محسوب می‌شود. به طوری که حداکثر مقادیر کرنش برشی (از $6/73e^{-3}$ متر)، حداکثر مقدار تنش افقی (از $10/09$ سانتی‌متر) و حداکثر جابجایی قائم (از $19/29$ سانتی‌متر) در مدل با ضریب تنش افقی ۰/۵۰ با یک تغییر چشمگیر به ترتیب به مقادیر $4/08e^{-3}$ متر، $89/37$ سانتی‌متر و $82/82$ سانتی‌متر در مدل با ضریب تنش افقی ۲/۰۰ (سطح بالای تنش‌های افقی برجا) افزایش می‌یابند (به واسطه افزایش تنش‌های افقی و متعاقباً افزایش تنش کل در مدل، مقادیر جابجایی‌های قائم نیز افزایش یافته‌اند).

۵- شعاع انحنای شیب از دیگر پارامترهای تاثیرگذار بر فاکتور ایمنی و به دنبال آن میزان تغییر شکل و جابجایی شیب دیواره نهایی کاواک معدن محسوب می‌گردد. کاهش شعاع انحنای شیب از ۱۰۰ متر به ۵۰ متر هم در سناریوی اول یا طرح اولیه (با فاکتور ایمنی ۱/۳۹) و هم در سناریوی پنجم یا مدل پیشنهادی (با فاکتور ایمنی ۱/۲۰) سبب افزایش فاکتور ایمنی به ترتیب به ۱/۵۰ و ۱/۴۵ می‌گردد. همچنین افزایش شعاع انحنای شیب به ۱۵۰ متر در هر دو سناریوی اول و پنجم، ضمن کاهش فاکتور ایمنی به ترتیب به ۱/۳۳ و ۱/۱۴، میزان تغییرات ایجادشده در مدل با شعاع انحنای ۵۰ متر بیشتر از مدل با

۶- منابع

- [1] Duncan, J.M, and S.G Wright. (1980), "The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis". Eng. Geology 16: 5-17.
- [2] Hoek, E. , Bray. J.W. (1981), Rock slope engineering. 3rd Edition. London, Institue of Mining And Metallurgy.
- [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.

[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, Technikerängen 72, Stockholm S-100 44, Sweden.

[9] Abderrahmane, Taleb Hosni, and B. Abdelmadjid. 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] Naghi Pour, O., Dehghan, A.N., Ahangari, K., 2020. Evaluation of geometrical parameters affecting on the optimal slope design of Shadan Gold-Copper Open

Pit Mine. Iranian Journal of Mining Engineering (IJME), 15(48): 28-44.

[14] Imani Kalehsar, R., Khodaei, M., Dehghan, A.N., Najafi N, 2021. Numerical modeling of effect of surcharge load on the stability of nailed soil slope. Modeling Earth Systems and Environment. DOI: 10.1007/s40808-021-01087-7.

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

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

[۱۷] مهندسین مشاور بهینه‌گستر کاوش‌گران معادن، (۱۳۹۶)، «گزارش نهایی مطالعات مکانیک سنگی معدن طلا-مس شادان».

[18] Richards, J. P., Spell, T., Rameh, E., Razique, 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 and western Pakistan". Economic Geology, 107(2), 295-332.

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

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

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

