

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد

بررسی تأثیر پارامترهای هیدرومکانیکی بر طراحی شیب معدن مس میدوک به روش عددی

نگارنده: مژگان رسولی

استاد راهنما

دکتر شکرالله زارع

شهریور ۱۴۰۰

تشکر و قدردانی

ماحصل آموخته‌هایم را تقدیم می‌کنم به آنان که مهر آسمانی‌شان آرام بخش آلام زمینی‌ام است. به استوارترین تکیه گاهم، دستان پرمهر پدرم، به سبزترین نگاه زندگیم، چشمان زیبای مادرم که هرچه آموختم در مکتب عشق شما آموختم و هرچه بکوشم قطره‌ای از دریای بی‌کران مهربانیتان را سپاس نتوانم بگویم. امروز هستی‌ام به امید شماست و فردا کلید باغ بهشتم رضای شما را آوردی گران سنگ تر از این ارزان نداشتم تا به خاک پایتان نثار کنم، باشد که حاصل تلاشم نسیم گونه غبار خستگی‌تان را بزدايد.

از استاد ارجمند جناب آقای دکتر زراع، استاد راهنما و جناب آقای مزرعه لی که همواره بنده را مورد لطف خود قرار داده‌اند کمال تشکر را دارم.

همچنین از امور معدن میدوک شرکت ملی صنایع مس ایران، شرکت ایتسکا، تکت و کاواک آرای نوین معدن به دلیل ارائه داده‌های مورد نیاز تشکر و قدردانی می‌گردد.

تقدیم به وجود با ارزش‌تان...

تعهد نامه

اینجانب مژگان رسولی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی معدن/ مکانیک سنگ دانشکده معدن دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه بررسی تأثیر پارامترهای هیدرومکانیکی بر طراحی شیب معدن مس میدوک به روش عددی تحت راهنمایی دکتر شکرالله زارع متعهد می شوم.

- 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 ارائه نشده است .
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد 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 بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، 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

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج ، کتاب ، برنامه های رایانه ای ، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد . این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود .

استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

تحلیل پایداری شیب‌ها یکی از مهم‌ترین مسائل در فعالیتهای معدنی است. هر گونه تحلیل نادرست می‌تواند به خسارات جبران ناپذیری منجر شود. انواع روش‌های تحلیل پایداری شیب شامل روش‌های عددی، تعادل حدی و تجربی است. در این پروژه برای تحلیل پایداری شیب از روش‌های تعادل حدی و عددی استفاده شده است. روش تعادل حدی به علت سهولت کاربرد، سابقه زیاد و تجربه طولانی به کارگیری آنها، به شدت مورد توجه محققین قرار گرفته است. همچنین روش‌های عددی نیاز به فرمول بندی پیچیده‌تر، کامپیوترهای ابر قدرت و زمان بیشتری برای تحلیل دارند، در نتیجه قادر به ارائه رفتار واقعی‌تر شیب‌ها می‌باشند. در روش تعادل حدی از نرم افزار SLIDE و در روش عددی از نرم افزار FLAC دو بعدی استفاده شده است. در این پایان نامه، پایداری شیب دیواره‌های معدن مس میدوک مورد مطالعه قرار گرفته است. از آنجایی که وجود آب زیرزمینی یکی از مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر روی پایداری شیب معادن روباز می‌باشد، تأثیر ترازهای مختلف آب زیرزمینی بر روی ضریب ایمنی بررسی شد تا دید مناسبی از این پارامتر به دست آید. تعداد ۷ مقطع عرضی به صورت عمود بر سطح دیواره برای تحلیل انتخاب شد به گونه‌ای که معرف تمامی دیواره‌های معدن باشد. محیط معدن به صورت محیط پیوسته معادل و معیار پایداری مورد پذیرش برای تحلیل دیواره‌های شیب، برابر با ضریب ایمنی $1/3$ در نظر گرفته شد. نتایج نشان داد که در روش تعادل حدی مقاطع ۴، ۱، ۶ و ۷ دارای ضریب ایمنی کمتر از $1/3$ بودند که در نهایت با پایدار کردن این مقاطع، شیب بهینه برای مقاطع پیشنهاد شد. در روش عددی نیز مقاطع ۴، ۱ و ۷ ناپایدار بودند. همچنین در ۵ تراز مختلف آب زیرزمینی، تراز ۱۰۰، ۷۵، ۵۰، ۲۵ و ۰ نسبت به کف معدن مقدار ضریب ایمنی برای مقاطع تعیین شد که نتایج نشان داد با کم کردن ارتفاع آب زیرزمینی نسبت به کف معدن، مقدار ضریب ایمنی افزایش می‌یابد.

کلید واژه: پایداری شیب، تحلیل تعادل حدی، تحلیل عددی، شیب بهینه، آب زیرزمینی

فهرست مطالب

فصل اول: کلیات.....	۱
۱-۱- مقدمه.....	۲
۲-۱- ضرورت انجام تحقیق.....	۳
۳-۱- هدف از تحقیق.....	۴
۴-۱- جمع بندی و نتیجه گیری.....	۵
۵-۱- ساختار پایان نامه.....	۵
فصل دوم: روش های تحلیل پایداری شیب.....	۷
۱-۲- مقدمه.....	۸
۲-۲- پایداری شیب.....	۸
۳-۲- عوامل مؤثر بر پایداری شیب.....	۹
۱-۳-۲- عوامل ساختاری.....	۹
۲-۳-۲- وجود زون ضعیف یا لایه بندی در ساختار سنگ.....	۱۰
۳-۳-۲- نقش ناهمواری ناپیوستگی های توده سنگ بر پایداری.....	۱۰
۴-۳-۲- فشار آب.....	۱۰
۵-۳-۲- تأثیر گسل و آب بر پایداری شیب.....	۱۱
۶-۳-۲- تأثیر زلزله.....	۱۱
۴-۲- روش های طراحی شیب های سنگی.....	۱۲
۵-۲- انواع روش های تحلیل پایداری شیب ها در معادن روباز.....	۱۴
۱-۵-۲- روش های تجربی.....	۱۴
۱-۱-۵-۲- سیستم رده بندی SMR.....	۱۴
۲-۱-۵-۲- سیستم رده بندی MRMR.....	۱۸
۳-۱-۵-۲- طبقه بندی Q- Slope.....	۱۸
۲-۵-۲- روش های تعادل حدی.....	۲۲
۱-۲-۵-۲- روش فلنیوس (روش معمولی قطعات).....	۲۳
۲-۲-۵-۲- روش بیشاب اصلاح شده.....	۲۴
۳-۲-۵-۲- روش اسپنسر.....	۲۵
۴-۲-۵-۲- روش مورگنشترن- پرایس.....	۲۵
۵-۲-۵-۲- روش سارما.....	۲۵
۳-۵-۲- روش های عددی.....	۲۶

۲۷	۲-۵-۳-۱- انواع روش های تحلیل عددی
۲۷	(۱) مدل سازی پیوسته
۲۸	(۲) مدل سازی ناپیوسته
۲۸	(۳) روش های ترکیبی (هیبریدی)
۲۹	(۱-۱) روش المان محدود
۲۹	(۲-۱) روش المان مرزی
۳۰	(۳-۱) روش تفاضل محدود
۳۰	(۱-۲) روش المان مجزا
۳۲	۲-۶- توصیف انواع مدل های ناپایداری شیب
۳۳	۲-۳-۱- شکست صفحه ای
۳۵	۲-۳-۲- شکست گوه ای
۳۷	۲-۳-۳- شکست دایره ای
۳۹	۲-۳-۴- شکست واژگونی
۴۰	(۱) شکست واژگونی خمشی
۴۱	(۲) شکست واژگونی بلوکی
۴۱	(۳) شکست واژگونی بلوکی - خمشی
۴۲	(۴) شکست های واژگونی ثانویه
۴۳	فصل سوم: پیشینه تحقیق
۴۴	۳-۱- مقدمه
۴۵	۳-۲- مطالعات پیشین
۵۳	فصل چهارم: آشنایی با معدن مس میدوک
۵۴	۴-۱- مقدمه
۵۴	۴-۲- آشنایی با معدن مس میدوک
۵۴	۴-۲-۱- آب و هوا و موقعیت جغرافیایی کانسار میدوک
۵۵	۴-۲-۲- تاریخچه عملیات اکتشافی در معدن مس میدوک
۵۸	۴-۲-۳- وضعیت فعلی معدن
۵۹	۴-۲-۴- زمین شناسی کانسار مس پورفیری میدوک
۶۲	۴-۲-۵- کانی شناسی ماده معدنی
۶۴	۴-۲-۶- عیار حد
۶۴	۴-۲-۷- تکتونیک

۶۶	۴-۲-۸- وضعیت آب زیرزمینی
۶۹	فصل پنجم: تحلیل پایداری شیب با روش تعادل حدی و عددی
۷۰	۵-۱- مقدمه
۷۰	۵-۲- جمع آوری اطلاعات
۷۱	۵-۲-۱- مقاومت فشاری تک محوره
۷۳	۵-۲-۲- زاویه اصطکاک داخلی
۷۴	۵-۲-۳- مقاومت کششی
۷۴	۵-۲-۴- معیار شکست هوک و براون
۷۶	۵-۲-۵- مطالعات میدانی
۷۸	۵-۳- تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ با تحلیل عدم قطعیت
۸۱	۵-۴- ناپیوستگی ها
۸۳	۵-۵- ساخت مدل
۸۸	۵-۵-۱- سطح ایستابی
۸۹	۵-۶- تحلیل پایداری
۸۹	۵-۶-۱- تحلیل تعادل حدی
۸۹	۵-۶-۱-۱- نرم افزار SLIDE
۹۰	۵-۶-۱-۲- تحلیل پایداری شیب با نرم افزار SLIDE
۹۴	۵-۶-۱-۳- تحلیل هیدرومکانیکی با روش تعادل حدی
۹۵	۵-۶-۲- تحلیل عددی
۹۶	۵-۶-۲-۱- نرم افزار FLAC
۹۷	۵-۶-۲-۲- تحلیل پایداری شیب با نرم افزار FLAC
۱۱۲	۵-۶-۲-۳- تحلیل هیدرومکانیکی با روش عددی
۱۱۳	۵-۷- مقایسه مدل رفتاری Ubiquitous joint model با مدل پیوسته معادل
۱۱۴	۵-۸- معیار پایداری
۱۱۵	۵-۹- طراحی ژئوتکنیکی
۱۱۵	۵-۱۰- تحلیل حساسیت
۱۱۷	۵-۱۱- اعتبار سنجی پیش بینی های مدل سازی
۱۱۹	۵-۱۲- نتیجه گیری
۱۲۱	فصل ششم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۱۲۲	۶-۱- نتیجه گیری

۶-۲- پیشنهادات..... ۱۲۲

منابع و مراجع..... ۱۲۳

فهرست جدول‌ها

جدول (۱-۱) تاثیر پایداری شیب در مراحل مختلف معدنکاری به روش روباز	۴
جدول (۱-۲) مقادیر ضریب اطمینان برای عملیات مختلف	۱۳
جدول (۲-۲) مقادیر ضریب‌های F_3, F_2, F_1 در زمینه جهتداری مختلف درزه‌ها	۱۶
جدول (۳-۲) مقادیر ضریب F_4 با توجه به روش حفر پله	۱۷
جدول (۴-۲) رده‌های متفاوت پایداری بر حسب مقادیر SMR	۱۷
جدول (۵-۲) سیستم نگهداری پیشنهادی برای رده‌های مختلف SMR	۱۷
جدول (۶-۲) زاویه شیب پیشنهاد شده بر مبنای مقادیر MRMR	۱۸
جدول (۷-۲) شاخص کیفی توده سنگ	۱۹
جدول (۸-۲) تعداد درزه	۲۰
جدول (۹-۲) زبری درزه	۲۰
جدول (۱۰-۲) دگرسانی درزه	۲۱
جدول (۱۱-۲) شرایط محیطی و زمین شناسی	۲۲
جدول (۱۲-۲) محدودیت‌ها و مزایای روش‌های عددی	۳۱
جدول (۱-۳) نتایج کد FLAC	۴۶
جدول (۲-۳) حداقل و حداکثر مقدار ضریب محلی ایمنی	۴۶
جدول (۳-۳) نتایج تحلیل ضریب ایمنی با روش المان محدود و تعادل حدی	۴۹
جدول (۴-۳) ضریب ایمنی برای خاک رسی	۵۱
جدول (۵-۳) ضریب ایمنی برای خاک ماسه ای	۵۱
جدول (۱-۴) پراکندگی و توزیع کانی‌ها در زون اکسید	۶۳
جدول (۱-۵) پارامترهای ژئومکانیکی	۸۰
جدول (۲-۵) پارامترهای نرم افزار RocLab	۸۱
جدول (۳-۵) خروجی نرم افزار RocLab	۸۱
جدول (۴-۵) شیب و جهت شیب بلوک‌های تقسیم شده پیت معدن	۸۳
جدول (۵-۵) خصوصیات درزه	۸۳
جدول (۶-۵) ابعاد هندسی شیب	۸۵
جدول (۷-۵) سطح ایستابی آب	۸۸
جدول (۸-۵) مقدار ضریب ایمنی با روش تعادل حدی	۹۵
جدول (۹-۵) پارامترهای ورودی نرم افزار FLAC	۹۹
جدول (۱۰-۵) مقدار ضریب ایمنی با روش عددی	۱۱۲
جدول (۱۱-۵) نتایج ضریب ایمنی در مدل رفتاری درزه دار و موهر کولمب	۱۱۳
جدول (۱۲-۵) مقادیر ضریب ایمنی و احتمال گسیختگی	۱۱۴

جدول (۵-۱۳) شیب بهینه مقاطع با روش تعادل حدی ۱۱۵

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲) انواع عوامل ساختاری در دیواره معادن روباز ۱۰
- شکل (۲-۲) نقش مجموعه درزه در ایجاد فشار آب در شیب سنگی ۱۱
- شکل (۳-۲) دیاگرام آزاد نیروها در روش فلیوس ۲۴
- شکل (۴-۲) دیاگرام آزاد نیروها در روش بیشاب ۲۴
- شکل (۵-۲) نیروهای بین قطعه ای در روش اسپنسر ۲۵
- شکل (۶-۲) چهار مکانیسم پایه ناپایداری شیب سنگی (a): لغزش دایره‌ای (b): لغزش صفحه‌ای، (c): لغزش گوه‌ای (d): لغزش واژگونی ۳۳
- شکل (۷-۲) شرایط عمومی شکست صفحه ای ۳۴
- شکل (۸-۲) شکست صفحه ای در شیروانی ۳۵
- شکل (۹-۲) هندسه شکست گوه ای ۳۶
- شکل (۱۰-۲) شکست گوه ای ۳۷
- شکل (۱۱-۲) انواع شکست های دایره ای ۳۸
- شکل (۱۲-۲) ریزش قاشقی در شیروانی ۳۹
- شکل (۱۳-۲) شکست واژگونی خمشی ۴۰
- شکل (۱۴-۲) شکست واژگونی بلوکی ۴۱
- شکل (۱۵-۲) شکست واژگونی بلوکی - خمشی ۴۲
- شکل (۱-۳) مقدار ضریب ایمنی برای شیب ساده و همگن در زوایا شیب مختلف با روش تعادل حدی و عددی ۴۷
- شکل (۲-۳) مقدار ضریب ایمنی برای شیب متشکل از دو واحد زمین شناسی در زوایا مختلف با روش تعادل حدی و عددی ۴۸
- شکل (۳-۳) پروفیل پایداری شیب ۵۰
- شکل (۴-۳) ضریب ایمنی خاک رس و ماسه‌های برای ارتفاع مختلف در برابر ساختار شیب جانبی ۵۰
- شکل (۱-۴) موقعیت جغرافیایی شهر بابک ۵۵
- شکل (۲-۴) وضعیت پله‌های معدن در سال ۱۳۹۹ ۵۸
- شکل (۳-۴) نمای کلی معدن ۵۹
- شکل (۴-۴) نقشه زمین شناسی معدن میدوک ۶۲
- شکل (۵-۴) شکستگی های شعاعی در محدوده معدن ۶۵
- شکل (۶-۴) شکستگی های مخروطی در محدوده معدن ۶۶
- شکل (۱-۵) موقعیت موقعیت مکانی چال های حفاری ژئوتکنیک ۷۱
- شکل (۲-۵) منحنی های توزیع احتمال و هیستوگرام برای (a,b) مقاومت فشاری تک محوره ، (c-d) مدول یانگ، (e-f) نسبت پواسون ، (a,c,e) دیوریت و (b,d,f) آندزیت - توف ۷۲

شکل (۳-۵) منحنی‌های توزیع احتمال و هیستوگرام (a-b) چسبندگی و (c-d) زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب (a,c) دیوریت و (b,d) آندزیت-توف	۷۳
شکل (۵-۵) منحنی و هیستوگرام توزیع احتمال برای مقادیر m نمونه‌های (a) دیوریت و (b) توف-آندزیت	۷۶
شکل (۶-۵) نمودار شناسایی GSI	۷۷
شکل (۷-۵) هیستوگرام مقادیر GSI توده‌های سنگی (a) دیوریت و (b) آندزیت-توف	۷۸
شکل (۸-۵) بلوک‌های تقسیم شده پیت معدن	۸۲
شکل (۹-۵) پیت معدن میدوک	۸۵
شکل (۱۰-۵) مقاطع معدن میدوک	۸۸
شکل (۱۱-۵) مقطع ۱ در SLIDE	۹۱
شکل (۱۲-۵) مقطع ۲ در SLIDE	۹۱
شکل (۱۳-۵) مقطع ۳ در SLIDE	۹۲
شکل (۱۴-۵) مقطع ۴ در SLIDE	۹۲
شکل (۱۵-۵) مقطع ۵ در SLIDE	۹۳
شکل (۱۶-۵) مقطع ۶ در SLIDE	۹۳
شکل (۱۷-۵) مقطع ۷ در SLIDE	۹۴
شکل (۱۸-۵) تغییرات سطح آب زیرزمینی در مقطع ۱	۹۵
شکل (۲۶-۵) تغییرات سطح آب زیرزمینی در مقطع ۱	۱۱۳
شکل (۲۷-۵) گسیختگی دیواره در مقیاس‌های مختلف. الف) گسیختگی در مقیاس پله، ب) گسیختگی در مقیاس بین رمپی، ج) گسیختگی در مقیاس کل دیواره	۱۱۴
شکل (۲۸-۵) تغییرات ضریب ایمنی در مقطع ۲ با تغییرات چسبندگی	۱۱۶
شکل (۲۹-۵) تغییرات ضریب ایمنی در مقطع ۲ با تغییرات زاویه اصطکاک	۱۱۷
شکل (۳۰-۵) مقطع ۱	۱۱۸
شکل (۳۱-۵) بردارهای سرعت در مقطع ۱	۱۱۹

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

پایداری شیب، عامل مهم در طراحی و عملیات معدن روباز، استخراج سنگ، پروژه‌های حفاری مهندسی عمران، مهندسی ژئوتکنیک و همچنین از مسائل مورد توجه در مکانیک سنگ می‌باشد. تحلیل‌های پایداری شیب، از جمله روش‌هایی هستند که به منظور ارزیابی شرایط پایداری و ایمنی شیب‌های طبیعی و ساخته دست بشر مورد استفاده قرار می‌گیرند. [۱].

در زمینه تحلیل پایداری شیب و تعیین شیب بهینه در معادن، تاکنون تحقیقات زیادی انجام گرفته است. مهم‌ترین هدف طراحی تحلیل شیب دیواره‌های معدن، جلوگیری از ناپایداری است. از تاثیرات ریزش در معادن روباز می‌توان به تلفات جانی، مالی و توقف تولید ماده معدنی اشاره کرد. طراحی زوایای شیب معادن در معدنی که عمق آنها پیوسته افزایش می‌یابد، از اهمیت بسیاری برخوردار است. تغییرات جزئی در زوایای نهایی شیب پیت، اثرات بزرگی بر هزینه‌های نهایی معدنکاری دارد. اگر شیب دیواره‌ها کم در نظر گرفته شود، باطله برداری به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد. از طرف دیگر دیواره‌های پر شیب باعث کاهش ایمنی و افزایش خطر ریزش دیواره‌ها خواهد شد. یکی از مشکلات افزایش بی رویه عمق معادن روباز، ریزش دیواره‌های شیب می‌باشد. شکست در شیب نهایی پیت می‌تواند به صورت بالقوه باشد. هدف از طراحی دیواره‌های یک معدن روباز، احداث دیواره‌هایی با زاویه شیب بهینه است [۲، ۳].

سطح شکست مهم‌ترین عامل در محاسبه ضریب ایمنی در برابر لغزش یا شکست برشی است. ضریب ایمنی برای تحلیل پایداری شیب، معمولاً به صورت نسبت مقاومت برشی نهایی تقسیم بر مقاومت برشی اولیه در شکست تعریف می‌شود. در استخراج معدن، طراحی شیب‌های پایدار تاثیر قابل توجهی بر اقتصاد معدن روباز دارد [۴-۱۰].

هدف اصلی تحلیل‌های پایداری شیب، یافتن نواحی بحرانی شکست، طراحی شیب‌های بهینه با توجه به رعایت دستور العمل‌های ایمنی، رعایت جنبه‌های اقتصادی و طراحی گزینه‌های احتمالی برای مقاوم‌سازی شیب است.

در معادن روباز به منظور استخراج ذخیره ماده معدنی، از پله‌های شیب‌دار استفاده می‌کنند. هر چه شیب پله‌ها و شیب معدن زیادتر باشد، هزینه‌های باطله برداری و استخراج کمتر می‌شود. پایداری شیب در معادن روباز به منظور طراحی شیب بهینه‌ای صورت می‌گیرد، که این شیب بهینه باعث کاهش هزینه‌های معدنکاری، اطمینان از توانایی سنگ در پایداری، کاهش خطر شکست و جلوگیری از آسیب رساندن به کارکنان و ماشین آلات معدنی شود. انتخاب شیب بهینه برای معدن، از نظر پایداری مهم‌ترین بخش از طراحی را تشکیل می‌دهد [۱۱].

به منظور مینیمم کردن میزان باطله برداری و افزایش برداشت ماده معدنی، طراحان عموماً سعی در افزایش شیب نهایی پیت معدن تا حداکثر مقدار ممکن را می‌نمایند. ارزیابی مکرر پایداری شیب نهایی یک عامل مهم در عملکرد معدن روباز می‌باشد. تکامل طراحی معدن نه تنها موجب بهبود وضعیت پایداری شیب و ایمنی معدن می‌شود بلکه موجب کاهش هزینه‌های معدنکاری می‌شود [۱۲].

۱-۲- ضرورت انجام تحقیق

تنوع روش‌ها برای تحلیل پایداری شیب زیاد می‌باشد. از این رو ملزم به انتخاب روش تحلیل مناسب با توجه به شرایط منطقه می‌باشیم. انتخاب شیب بهینه می‌تواند در کاهش میزان حوادث تاثیر بسزایی داشته باشد [۱۱ و ۱۲].

با توجه به مطالعات انجام شده در معدن مس میدوک، تحلیل پایداری دیواره‌های این معدن از موارد ضروری طرح توسعه می‌باشد. در این مطالعه سعی می‌شود، تحلیلی منطقی و قابل اطمینان از پایداری دیواره معدن مس میدوک با استفاده از روش تعادل حدی و عددی ارائه شود. در این مطالعه هدف طراحی شیب نهایی معدن مس میدوک با استفاده از روش عددی و روش تعادل حدی با تحلیل هیدرومکانیکی است.

۱-۳- هدف از تحقیق

در چند دهه اخیر به دلایل اقتصادی عمق معادن روباز افزایش یافته است. با افزایش عمق معدن، خطر ناپایداری شیب‌های بزرگ مقیاس نیز افزایش خواهد یافت. بدین ترتیب پایداری شیب در طراحی، اجرا و یا پیش‌بینی احتمال شکست، بسیار مهم می‌باشد و لازم است از تکنیک‌های مناسب برای تحلیل پایداری شیب استفاده شود [۱۱ و ۱۳].

جدول زیر نقش پایداری شیب را در معادن روباز برای مراحل مختلف نشان می‌دهد.

جدول (۱-۱) تاثیر پایداری شیب در مراحل مختلف معدنکاری به روش روباز [۱۴].

نقش پایداری شیب	در طراحی	اقتصادی	کاهش نسبت W/O کاهش زمان برگشت سرمایه افزایش ذخیره معدنی قابل استخراج
		ایمنی	کنترل بهتر دیواره های معدن کنترل بهتر آب های سطحی و زیرزمینی طراحی سیستم های پایدار سازی شیب در صورت لزوم
	در مرحله استخراج	اقتصادی	امکان انفجار دلخواه به منظور دسترسی به خرد شدن بهتر وجود دارد، لذا هزینه های حفاری و انفجار ثانویه کاهش می یابد.
		ایمنی	امکان ایجاد پله های ایمنی با کارایی بالا وجود دارد.
	پیش بینی شکست	اقتصادی	کاهش ضایعات معدنی که در اثر شکست وجود خواهد داشت . کاهش خسارت جانی و مالی
		ایمنی	امکان ادامه عملیات با حداقل احتمال حادثه

عملیات استخراج و باطله برداری معدن روباز مس میدوک در سال ۱۳۷۲ آغاز شده است و تاکنون تعداد زیادی از پله‌های طراحی شده معدن استخراج شده است. معدن مس میدوک در ۴۰ کیلومتری شمال شرق شهر بابک و ۱۳۰ کیلومتری شمال غرب معدن مس سرچشمه، در استان کرمان واقع شده است. پایداری شیب معدن از اهمیت بسیاری در طول حیات کاری معدن برخوردار است چرا که ناپایداری شیب ممکن است حتی موجب ریزش معدن و تعطیلی گردد.

در این مطالعه با توجه به اهمیت پایداری شیب در معادن روباز و تأثیرگذاری آن بر مسائل اقتصادی و ایمنی، به بررسی پایداری دیواره معدن مس میدوک با استفاده از روش تعادل حدی و عددی، با بهره-گیری از نرم افزار مناسب پرداخته می‌شود. که هدف از این تحقیق بررسی تأثیر پارامترهای ژئومکانیکی و هیدرولیکی بر روی طراحی شیب دیواره‌های معدن میدوک است. با توجه به شرایط آب زیرزمینی، تحلیل هیدرومکانیک ضرورت دارد انجام شود.

۴-۱- جمع بندی و نتیجه گیری

به دلیل افزایش رشد اقتصادی و تقاضای مواد معدنی، بسیاری از معادنی که در سطح و نزدیک سطح زمین بودند استخراج گردیده و امروزه ذخایری برای استخراج در دست طراحی هستند که نسبتاً در اعماق قرار دارند. بدین ترتیب نقش پایداری شیب در مراحل مختلف معدنکاری بسیار اهمیت دارد. از نظر ایمنی در مرحله طراحی و در مرحله استخراج، پایداری شیب موجب کنترل بهتر دیواره‌های معدن، آب‌های سطحی و زیر زمینی، طراحی پله‌های ایمن در دیواره نهایی معدن می‌شود [۱۴].

۵-۱- ساختار پایان نامه

پایان نامه در ۵ فصل تدوین شده است. در فصل اول به کلیات تحقیق مربوط به پایداری شیب معادن روباز، هدف، ضرورت تحقیق و سازمان دهی پایان نامه پرداخته شده است. در فصل دوم، به بررسی عوامل موثر بر پایداری شیب، انواع روش‌های تحلیل پایداری شیب و انواع ناپایداری‌های پرداخته شده است. در فصل سوم به برخی مطالعات تحلیل پایداری شیب در گذشته پرداخته شده است. در فصل چهارم مشخصات معدن مس میدوک پرداخته شده است. در فصل پنجم نیز پارامترهای ژئوتکنیکی مورد استفاده، تحلیل پایداری شیب با روش تعادل حدی و عددی نیز بیان شده و در نهایت شیب بهینه برای مقاطع معدن پیشنهاد شده است. در فصل آخر نیز نتیجه گیری و پیشنهادات بیان شده است.

فصل دوم

انواع روش های تحلیل پایداری

شیب

۲-۱- مقدمه

انواع روش‌های تحلیل پایداری را می‌توان به روش‌های تجربی^۱، تعادل حدی^۲ و روش‌های عددی^۳ تقسیم کرد. روش‌های تجربی بر مبنای طبقه بندی توده سنگ‌ها می‌باشد. در روش‌های تعادل حدی، احتمال لغزش توده سنگ یا خاک بر اثر نیروی جاذبه مورد بررسی قرار می‌گیرد و با تعیین نیروهای مقاوم و شکست، ضریب ایمنی شیروانی تعیین می‌شود. روش‌های مدل‌سازی عددی، امکان حل مسائلی با هندسه پیچیده، ناهمسانگردی مواد، رفتار غیر خطی، تنش‌های برجا و غیره را فراهم می‌سازد [۱۵].

در ادامه به تشریح عوامل مؤثر بر پایداری شیب، روش‌های طراحی شیب، انواع روش‌های تحلیل پایداری شیب، توصیف انواع مدل‌های ناپایداری شیب و مکانیزم سطوح لغزش در سطح شیب‌دار پرداخته می‌شود.

۲-۲- پایداری شیب

تحلیل پایداری شیب یک مساله مهم و حساس در مهندسی مکانیک سنگ به ویژه برای پروژه‌های بزرگ مانند سد‌ها، معدن، بزرگراه‌ها و تونل‌ها است. روش‌های زیادی برای ارزیابی پایداری یک شیب وجود دارد. هدف اصلی تحلیل پایداری شیب معمولاً تعیین ضریب ایمنی در برابر شکست شیب است. تحقیقات بسیاری در چند دهه اخیر انجام شده‌اند، اما تحلیل پایداری شیب هنوز یک چالش در مهندسی مکانیک سنگ می‌باشد.

به طور کلی شیب یک سطح، زمینی است که در یک زاویه‌ای به سطح افقی قرار می‌گیرد. شیب‌ها ممکن است به صورت طبیعی و یا معمولاً توسط انسان ایجاد شوند. هر شیب ویژگی‌های منحصر به فردی از خاک و ویژگی‌های هندسی دارد که سعی در مقاومت در برابر جاذبه یا شکست دارد. ریزش شیب باعث می‌شود که خاک به سمت پایین انتقال یابد که معمولاً به آرامی یا به سرعت و بدون توجه اتفاق می‌افتد. لغزش‌ها

^۱ experimental method

^۲ limit equilibrium method

^۳ Numerical method

به طور کلی از ترک‌های کششی به اندازه خط مو شروع می‌شود که در داخل لایه‌های خاک گسترش می‌یابند [۱۶].

۲-۳- عوامل مؤثر بر پایداری شیب

مهم‌ترین عوامل تأثیر گذار بر پایداری و یا عدم پایداری شیب‌های سنگی عبارت‌اند از [۱۱]:

۱- عوامل ساختاری

۲- وجود زون ضعیف و یا لایه بندی در ساختار توده‌سنگ

۳- نقش ناپیوستگی‌های توده‌سنگ بر پایداری

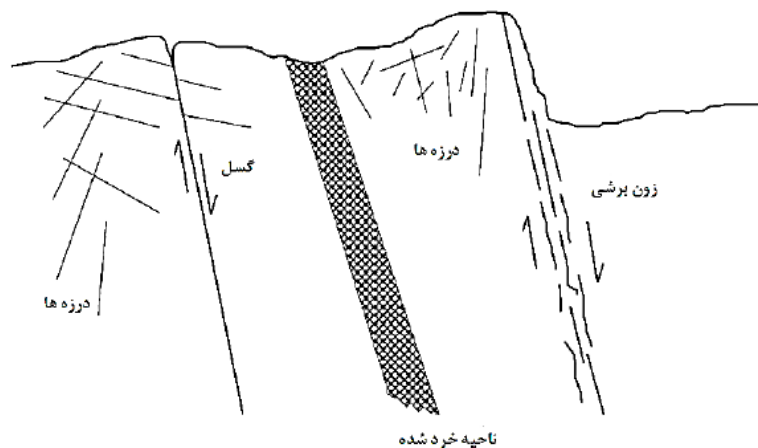
۴- فشار آب

۵- تأثیر گسل و آب بر پایداری شیب

۶- تأثیر زلزله

۲-۳-۱- عوامل ساختاری

به طور کلی عوامل ساختاری یکی از مهم‌ترین دلایل مؤثر بر پایداری دیواره معادن روباز هستند. ساختار زمین‌شناسی شامل نوع سنگ و ناپیوستگی‌های توده‌سنگ می‌شود. ناپیوستگی‌های سنگ شامل شکستگی-های ریز تا شکستگی‌هایی به طول هزاران کیلومتر است. میزان مقاومت نمونه‌های آزمایشگاهی به وجود این ریز ترک‌ها بستگی دارد. در شکل (۲-۱) انواع عوامل ساختاری نشان داده شده است [۱۷].



شکل (۲-۱) انواع عوامل ساختاری در دیواره معادن روباز [۱۷]

۲-۳-۲- وجود زون ضعیف یا لایه‌بندی در ساختار سنگ

وجود سطوح ضعیف در توده سنگ می‌تواند موجب ناپایداری شود. به دلیل وجود زون ضعیف یا سطوح لایه‌بندی در میان سنگ و ایجاد ناپیوستگی، از مقاومت توده سنگ به طور قابل توجهی کاسته می‌شود. بنابراین شناخت سطوح ضعیف و اندازه‌گیری مقاومت ناپیوستگی‌های توده سنگ، ضروری می‌باشد. این شناخت می‌تواند در شکست و همچنین پایداری شیب مؤثر باشد [۱۴].

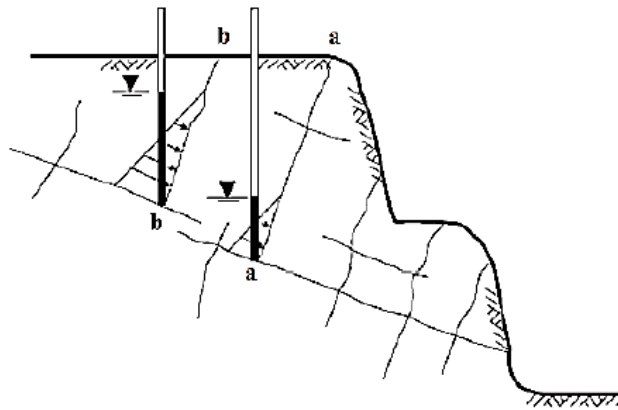
۲-۳-۳- نقش ناهمواری ناپیوستگی‌های توده سنگ بر پایداری

وجود ناهمواری در سطوح گسل یا درزه باعث تغییر جزئی در مقاومت ناپیوستگی و نوع شکست در آن می‌شود. تأثیر سطح ناپیوستگی به تنش قائم بستگی دارد. در توده سنگی که ناپیوستگی‌های آن ناهموار است این تأثیر وجود دارد که بین مقاومت برشی و تنش قائم به ازای تنش‌های مختلف، تفاوت وجود داشته باشد [۱۴].

۲-۳-۴- فشار آب

وجود درزه‌ها در توده سنگ باعث تجمع آب و ایجاد فشار آب می‌شود. این فشار آب عمود بر سطح ناپیوستگی‌ها عمل می‌کند. از جمله عوامل کاهش مقاومت سنگ و ناپایداری شیب می‌توان به توزیع

یکنواخت درزه‌ها با فاصله کم که باعث به وجود آمدن فشار آب می‌شود اشاره نمود. همان طور که در شکل (۲-۲) نشان داده شده، فشار آب در درزه b-b زیادتر از فشار آب در درزه a-a است. از عوامل موثر بر تعیین فشار آب و میزان تاثیر آن بر پایداری شیب می‌توان به جهت شیب و عمق درزه و همچنین اندازه‌گیری سطح آب توسط پیزومتر (فشار سنج)، اشاره نمود [۱۴].



شکل (۲-۲) نقش مجموعه درزه در ایجاد فشار آب در شیب سنگی [۱۸].

۲-۳-۵- تاثیر گسل و آب بر پایداری شیب

از نظر نفوذپذیری، متغیر بودن نواحی گسل زده می‌تواند موجب فشار آب متفاوت شود. برای مثال سنگ‌ها در ناحیه مرکزی گسل به شدت تحت تاثیر انرژی قرار گرفته‌اند و کاملاً خرد شده‌اند بدین ترتیب مانند خاک عمل می‌کند و نمی‌توانند آب را از خود عبور دهد در حالی که هر چه قدر به آئینه گسل نزدیک شده، نفوذپذیری سنگ‌ها افزایش یافته و مانند کانال آب عمل می‌کنند [۱۴].

۲-۳-۶- تاثیر زلزله

زلزله از نیروهایی می‌باشد که باعث ناپایداری در شیب‌های سنگی می‌شود. در اثر آزادسازی ناگهانی تنش، ارتعاشات زمین باعث ایجاد امواج طولی، عرضی و جابه‌جایی می‌شوند. با ایجاد تنش‌های برشی ناگهانی در

زمین که از اثر امواج عرضی است، می‌تواند باعث ناپایداری توده‌های سنگی گردد. پدیده‌ی روان گونگی^۱ از مهم‌ترین پدیده‌هایی که در اثر زلزله ایجاد می‌شود. این پدیده بیشتر در خاک‌های ریزدانه و چسبنده، به علت بارگذاری در آنها و عدم وجود زمان کافی برای زهکشی، باعث افزایش فشار منفذی و جابه‌جایی‌های برشی شده است [۱۹].

۲-۴- روش‌های طراحی شیب‌های سنگی

روش‌های مختلف برای طراحی شیب سنگ‌ها بطور خلاصه در زیر بیان می‌شود. نیروی برشی در امتداد سطوح لغزش یک ویژگی اصلی روش‌های طراحی شیب است. در صورتی دیواره ناپایدار خواهد بود که نیروی برشی روی یک سطح بزرگتر از مقاومت برشی آن سطح باشد. پایداری دیواره می‌تواند بر اساس یک یا چند مورد زیر بحث شود [۱۵]:

۱- ضریب اطمینان (FS)^۲: برای شیب‌ها، ضریب اطمینان به صورت نسبت مقاومت برشی واقعی به مقاومت برشی حداقل که برای جلوگیری از شکست ضروری است، تعریف می‌شود. یک روش منطقی برای محاسبه فاکتور ایمنی در برنامه تفاضل عددی یا المان محدود به این صورت است که مقاومت برشی را تا زمانی که تخریب رخ می‌دهد، کاهش دهد. فاکتور ایمنی عبارتند از نسبت مقاومت واقعی سنگ به مقاومت برش کاهش یافته در شکست می‌باشد [۱۵].

۲- تحلیل حساسیت: در این روش یک پارامتر به جای داشتن یک مقدار، به صورت مجموعه‌ای از اعداد در یک بازه تعریف می‌شود. اهمیت این روش برای تعیین پارامتری است که بیشترین تأثیر را بر روی پایداری دارد [۱۵].

^۱ Liquid faction

^۲ Factor of Safety

۳- روش‌های طراحی آماری: این روش اختلاف توزیع نیروهای مقاوم و محرک است. یکی از معروف

ترین الگوریتم‌ها در روش‌های طراحی آماری الگوریتم مونت کارلو می‌باشد [۱۵].

۴- روش طراحی ضریب مقاومت و بار (LRFD)^۱: این روش بر اساس شرط پایداری می‌باشد که ضریب

مقاومت بایستی بزرگتر یا مساوی با مجموع ضرایب بار باشد [۱۵].

ضریب اطمینان رایج‌ترین روش برای طراحی شیب سنگ‌ها می‌باشد. ضریب اطمینان به طور گسترده برای

هر نوع شرایط زمین‌شناسی، سنگ یا خاک کاربرد دارد. ضریب ایمنی قابل اطمینان متفاوتی برای هر نوع

عملیات وجود دارد. حد بالا و پایین ضرایب اطمینان برای اهداف مختلف توسط ترزاقی و پک در سال ۱۹۶۷

و موسسه زمین‌شناسی کانادا در سال ۱۹۹۲ به دست آمده است. که مقادیر ضریب اطمینان در جدول (۲)-

(۱) آمده است. برای دیواره‌های معادن روباز ضریب اطمینان معمولاً بین ۱/۲ تا ۱/۴ می‌باشد [۱۵].

جدول (۲-۱) مقادیر ضریب اطمینان برای عملیات مختلف [۱۵]

نوع عملیات	عملیات خاکی	عملیات حفاری	پی سازی
ضریب اطمینان	۱/۱-۱/۳	۱/۵-۲	۲-۳

از تحلیل‌های تعادل حدی برای محاسبه مستقیم فاکتور ایمنی، و از تحلیل‌های عددی برای محاسبه شروع

کرنش‌های پیش‌رونده در سنگ، استفاده می‌شود. اولین بار روش‌های طراحی احتمالاتی برای شیب‌های

سنگی در دهه ۱۹۷۰ توسعه یافت، اما به طور گسترده تا سال ۲۰۰۳ مورد استفاده قرار نگرفتند. علت

احتمالی این عدم مقبولیت، استفاده از اصلاحاتی است که به خوبی قابل درک نیستند. و تجربیات محدودی

در احتمال‌های مورد قبول برای استفاده در طراحی وجود دارد [۱۵].

^۱ Load and Resistance Factor Design

محاسبه کرنش در شیب‌ها، مهم‌ترین پیشرفت اخیر در طراحی شیب است. این تکنیک، نتیجه پیشرفت روش‌های عددی است و به طور گسترده در زمینه‌های معدنی که جابجایی‌ها قابل تحمل هستند و شیب دارای تغییر شرایط زمین‌شناسی است، استفاده می‌شوند. روش طراحی ضریب مقاومت و بار (LRFD)، برای طراحی‌های ساختاری ایجاد شد و امروزه برای سیستم‌های ژئوتکنیکی، نظیر ساختارهای حایل و فونداسیون-ها گسترش یافته است [۱۵].

انتخاب فاکتور ایمنی واقعی، احتمال شکست یا کرنش مجاز که در طراحی استفاده می‌شود، باید برای هر محلی به طور جداگانه و مناسب با آن محل باشد. مراحل طراحی نیازمند توجه به بسیاری از تخمین‌ها است و تغییرات فاکتورهای ساخت و زمین‌شناسی باید مورد توجه قرار گیرد [۱۵].

۲-۵- انواع روش‌های تحلیل پایداری شیب‌ها در معادن روباز

۲-۵-۱- روش‌های تجربی

روش تجربی عبارتند از طبقه بندی توده‌سنگ‌ها با توجه به خصوصیات سنگ بکر و ناپیوستگی‌ها و دیگر عوامل مانند آب موجود در توده‌سنگ، می‌باشد. طبقه‌بندی مهندسی از رایج ترین روش‌ها در تحلیل پایداری است. سیستم‌های رده‌بندی مختلفی برای بررسی شرایط سنگ بکر و توده‌سنگ ارائه شده است. با انجام تغییرات در برخی از سیستم‌های رایج، قابلیت طراحی شیب‌های سنگی به روش‌های تجربی فراهم شده است. در ادامه به برخی از این سیستم‌ها اشاره شده است.

۲-۵-۱-۱- سیستم رده‌بندی SMR

سیستم SMR بر مبنای سیستم رده‌بندی RMR ارائه شده است. این رده بندی علاوه بر پارامترهای رده بندی RMR که شامل مقاومت سنگ بکر، RQD، فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها، شرایط ناپیوستگی‌ها و وضعیت

$$SMR = RMR_{basic} - (F_1.F_2.F_3) + F_4$$

آب در ناپیوستگی‌ها است، ضرایب اصلاحیه‌ای نیز شامل موقعیت فضایی ناپیوستگی‌ها نسبت به شیب و روش حفر پله به آن اضافه شده است. SMR با رابطه (۲-۱) بیان می‌شود [۲۰]:

رابطه (۲-۱)

که در آن:

F_1 : بیانگر توازی بین امتداد سطح شیب و امتداد درزه غالب است. این ضریب از ۱، برای حالتی که هر دو تقریباً موازی هستند تا ۰/۱۵ برای حالتی که زاویه بین آن‌ها کمتر از ۳۰ درجه و احتمال شکست بسیار پایین است، تغییر می‌کند.

F_2 : شیب درزه غالب در حالت شکست صفحه‌ای و یا زاویه شیب تقاطع دو درزه غالب در حالت شکست گوه‌ای است. اندازه این ضریب از مقدار ۰/۱۵ تا ۱ تغییر می‌کند.

F_3 : وضعیت شیب درزه و شیب سطح پله است.

F_4 : ضریب روش حفر پله می‌باشد.

مقدار F_1 از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$F_1 = (1 - \sin A) \quad \text{رابطه (۲-۲)}$$

در این رابطه A زاویه بین امتداد سطح شیب و امتداد درزه غالب است.

F_2 : مربوط به شیب درزه غالب در حالت شکست صفحه‌ای و یا زاویه شیب تقاطع دو درزه غالب در حالت شکسته گوه‌ای است. اندازه این ضریب از مقدار ۰/۱۵ تا ۱ تغییر می‌کند و از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$F_r = \tan \beta_j$$

رابطه (۳-۲)

در این رابطه β_j زاویه شیب درزه غالب است.

F_r : مربوط به وضعیت شیب درزه و شیب سطح پله است.

F_ϵ : ضریب مربوط به روش حفر پله است که مقادیر آن در جدول ۳-۲ آمده است.

رده‌های متفاوت پایداری بر حسب مقادیر SMR در جدول ۴-۲ و سیستم نگهداری پیشنهادی برای رده

های مختلف SMR در جدول ۵-۲ درج شده است.

جدول (۲-۲) مقادیر ضریب‌های F_3, F_2, F_1 در زمینه جهت‌داری مختلف درزه‌ها [۲۰]

سیار نامساعد	نامساعد	نسبتا مناسب	مساعد	بسیار مساعد	نوع پایداری در شیب	
$< 5^\circ$	$5 - 10^\circ$	$10 - 20^\circ$	$20 - 30^\circ$	$> 30^\circ$	$ \alpha_j - \alpha_s $	P
					$ \alpha_j - \alpha_s - 18 $	T
					$ \alpha_i - \alpha_s $	W
1	0.85	0.7	0.4	0.15	F_1	P/W/T
$> 45^\circ$	$35 - 45^\circ$	$30 - 35^\circ$	$20 - 30^\circ$	$< 20^\circ$	$ \beta_j $	P
					$ \beta_i $	W
1	0.85	0.7	0.4	0.15	F_2	P/W
1	1	1	1	1	F_2	T
$< -10^\circ$	$-10 - 0^\circ$	0°	$0 - 10^\circ$	$> 10^\circ$	$ \beta_j - \beta_s $	P
					$ \beta_i - \beta_s $	T
		$> 120^\circ$	$110 - 120^\circ$	$< 110^\circ$	$ \beta_j + \beta_s $	T
-60	-50	-25	-6	0	F_3	P/W/T

جدول (۲-۳) مقادیر ضریب F4 با توجه به روش حفر پله [۲۰]

P: شکست صفحه ای	T: شکست واژگونی	W: شکست گوه ای
α_j امتداد درزه	α_s امتداد شیب	α_i امتداد خط تقاطع دو درزه
β_j شیب درزه	β_s شیب شیروانی	β_i شیب خط تقاطع دو درزه

روش حفر	مقدار F4
شیب طبیعی	15
روش پیش شکافی	10
اتشباری صاف	8
آتشباری معمولی با حفر مکانیزه	0
آتشباری ضعیف	-8

جدول (۲-۴) رده‌های متفاوت پایداری بر حسب مقادیر SMR [۲۰]

رده	V	IV	III	II	I
مقادیر SMR	0-20	21-40	41-60	61-80	81-100
توصیف توده سنگ	بسیار بد	بد	طبیعی	خوب	بسیار خوب
پایداری	کاملاً پایدار	ناپایدار	نسبتاً ناپایدار	پایدار	کاملاً پایدار
ریزش ها	صفحه ای بزرگ یا خاک گونه یا دایره ای	صفحه ای یا گوه ای بزرگ	صفحه ای در طول برخی درزه ها ولی عمدتاً گوه	برخی ریزش های بلوکی	فاقد شکست
احتمال شکست	0.9	0.6	0.4	0.2	0

جدول (۲-۵) سیستم نگهداری پیشنهادی برای رده‌های مختلف SMR [۲۰]

سیستم نگهداری پیشنهادی	مقادیر SMR	رده های SMR
بدون نگهداری	91-100	I_a
بدون نگهداری، لق گیری مورد نیاز است.	81-90	I_b
بدون نگهداری، حفر گودال یا نصب توری در پاشنه شیب، نصب موضعی پیچ سنگ	71-80	II_a
(حفر گودال و یا نصب توری)، نصب موضعی یا سیستماتیک پیچ سنگ	61-70	II_b
(حفر گودال و یا نصب توری)، نصب موضعی یا سیستماتیک پیچ سنگ، شاتکریت موضعی	51-60	III_a
(حفر گودال و یا نصب توری)، نصب سیستماتیک پیچ سنگ و یا مهاری، شاتکریت سیستماتیک، نصب دیوار در پاشنه و یا بتن دندانه ای	41-50	III_b
مهاری، شاتکریت سیستماتیک، نصب دیوار در پاشنه و یا بتن (یا حفر مجدد)، زهکشی	31-40	IV_a
شاتکریت مسلح سیستماتیک، نصب دیوار در پاشنه و یا بتن، حفر مجدد، زهکشی عمیق	20-31	IV_b
دیوار ثقلی یا مهار شده، حفر مجدد	11-20	V_a
دیوار ثقلی یا مهار شده، حفر مجدد	0-10	V_b

۲-۱-۵-۲- سیستم رده بندی MRMR

مبنای این سیستم نیز همانند SMR، سیستم RMR است که در این سیستم عواملی از قبیل وضعیت تنش‌های برجا و القایی، تاثیر آتشیاری و اثر گسل‌های اصلی و شکستگی‌ها اضافه شده است. امتیاز مربوط به این سیستم از حاصل ضرب فاکتورهای ذکر شده در مقدار RMR حاصل می‌شود. MRMR مطابق رابطه زیر تعریف می‌شود [۲۰]:

$$MRMR = RMR \times A_B \times A_S \times S \quad \text{رابطه (۲-۴)}$$

A_B : ضریب تعدیل آتشیاری که دامنه آن ۰/۸ تا ۱

A_S : ضریب تعدیل تنش در محل و تغییر تنش که دامنه آن ۰/۶ تا ۱/۲

S : ضریب تعدیل گسل‌های اصلی و شکستگی‌ها که دامنه ی آن ۰/۷ تا ۱ است.

حاصل ضرب این سه نباید کمتر از ۰/۵ شود. بر اساس امتیاز MRMR شیب پله های معدن مطابق جدول ۲-۶ توصیه می‌شود.

جدول (۲-۶) زاویه شیب توصیه شده بر مبنای مقادیر MRMR [۲۰]

مقدار امتیاز	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
زاویه شیب (درجه)	<35	35	40	45	50	55	60	65	70	75	>75

۲-۱-۵-۳- طبقه بندی Q- Slope

هدف از شیب Q این است که به زمین‌شناسان و مهندسين ژئوتکنیک اجازه داده شود تا پایداری شیب‌های سنگی حفاری شده را ارزیابی کنند و هنگامی که شرایط توده سنگ در طول ساخت قابل مشاهده است، تغییراتی را برای زوایای شیب ایجاد کند [۲۲، ۲۱].

شیب Q از شش پارامتر مشابه RQD، J_n ، J_r ، J_a ، J_w و SRF استفاده می‌کند [۲۳].

معادله Q به صورت زیر بیان می‌شود:

$$Q_{Slope} = \frac{RQD}{J_n} \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right)_o \times \frac{J_{Wice}}{SRF_{Slope}} \quad \text{رابطه (۵-۲)}$$

۱- اندازه بلوک: (RQD/J_n)

۲- مقاومت برشی: حداقل مطلوب $(J_r/J_a)_o$

۳- عوامل خارجی و تنش: (J_{wise}/SRF_{Slope})

مقاومت برشی با استفاده از معادله زیر تخمین زده می‌شود:

$$\tau = \sigma_n \tan^{-1} \left(\frac{J_r}{J_a} \right)_o \quad \text{رابطه (۶-۲)}$$

جداول زیر به ترتیب رتبه‌های RQD، J_n ، J_r ، J_a را توصیف می‌کند.

جدول (۷-۲) شاخص کیفی توده سنگ [۲۳]

RQD Description		RQD(%)
A	Very Poor	0-25
B	Poor	25-50
C	Fair	50-75
D	Good	75-90
E	Excellent	90-100

جدول (۸-۲) تعداد درزه [۲۳]

Joint Set Number Description		J_n
A	Massive, no or few joint	0.5-1
B	One joint set	2
C	One joint set plus random joints	3
D	Two joint sets	4
E	Two joint sets plus random joints	6
F	Three joint sets	9
G	Three joint sets plus random joints	12
H	Four or more joint sets, random, heavily jointed	15
J	Crushed rock, earthlike	20

جدول (۹-۲) زبری درزه [۲۳]

Joint Roughness Number Description		J_r
a) Rock Wall Contact, b) Contact after shearing		
A	Discontinuous joints	4
B	Rough or irregular, undulating	3
C	Smooth, undulating	2
D	Slickensided, undulating	1.5
E	Rough or irregular, planar	1.5
F	Smooth, planar	1
G	Slickensided, planar	0.05
c) No rock-wall contact when sheared		
H	Zone containing clay minerals thick enough to prevent rock-wall contact.	1
J	sandy, gravely or crushed zone thick enough to prevent rock-wall contact.	1

جدول (۲-۱۰) دگرسانی درزه [۲۳]

Joint Alteration Number Description		Ja
a) Rock-well contact (no clay filling, only coatings)		
A	Tightly healed, hard non-softening, impermeable filling, i.e. quartz or epidote.	0.75
B	Unaltered joint walls, surface staining only.	1
C	Slightly altered joint walls. Non-softening mineral coating, sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	2
D	Silty- or sandy- clay coating, small clay disintegrated rock, etc.	3
E	softening or low friction clay mineral coating, i. e. kaolinite or mica. Also chlorite, talc, gypsum, graphite, etc., and small quantities of swelling clays.	4
b) Rock-wall contact after some shearing(thin clay fillings, probable thickness~1-5mm)		
F	Sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	4
G	Strongly over-consolidated non-softening clay mineral fillings.	6
H	Medium or low over-consolidation. Softening, clay mineral fillings.	8
J	Swelling-clay filling, i.e. montmorillonite. Value of Ja depends on per cent of swelling clay-size particles, and access to water.	8-12
c) No rock-wall contact when sheared(thick clay/crushed rock fillings)		
M	Zones or bands of disintegrated or crushed rock and clay(see G, H, J for description of clay condition).	6,8, or 8-12
N	Zones or band of silty-or sandy-clay, small clay fraction(non-softening).	5
OPR	Thick, continuous zones or bands of clay(see G, H, J for description of clay condition).	10,13,or 13-20

J_{wise} که در جدول ۱۱-۲ توصیف شده است، ساختار و ویژگی های سنگ ها و نیز شرایط محیطی، از جمله فرسایش و بارش ، اثرات پیوند یخ بندان را در نظر می گیرد.

جدول (۱۱-۲) شرایط محیطی و زمین شناسی [۲۳]

J_{wise}	Desert Environment	Wet Environment	Tropical Stonns	Ice Wedging
stable structure, competent rock	1	0.7	0.5	0.9
stable structure, incompetent rock	0.7	0.6	0.3	0.5
unstable structure, competent rock	0.8	0.5	1	0.3
unstable structure, incompetent rock	0.5	0.3	0.05	0.2

۲-۵-۲- روش های تعادل حدی

روش های تعادل حدی از قدیمی ترین روش ها در تعیین سطح لغزش بحرانی و ضریب ایمنی می باشند. در این روش فرض می شود شکست در یک سطح گسیختگی معین رخ دهد و همچنین تنش برشی لازم برای حفظ تعادل با مقاومت برشی خاک مقایسه شده و ضریب اطمینان پایداری شیب محاسبه می گردد. این فرآیند برای چندین سطح مختلف انجام می شود و سطحی که دارای ضریب اطمینان کمتری باشد به عنوان سطح گسیختگی احتمالی و جواب مسئله پذیرفته می شود. نسبت نیروهای مقاوم به نیروهای محرک برای لغزش را ضریب ایمنی می نامند [۲۴].

روش های تعادل حدی در سه دسته اصلی تجزیه و تحلیل می شوند. این سه دسته عبارتند از:

- روش های کلاسیک
- روش های گرافیکی
- روش های برداری

تکنیک گرافیکی یکی از تکنیک‌هایی می‌باشد که در تجزیه و تحلیل پایداری شیروانی‌های سنگی به کار برده می‌شود. با استفاده از تکنیک تصاویر استروگرافیک ناپیوستگی‌ها مشخص می‌شود و بحرانی‌ترین وضعیت تعیین می‌گردد [۱۸].

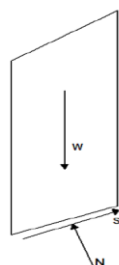
روش‌های برداری، فرمول بندی نسبتاً ساده‌ای را برای تمام کمیت‌های مربوط به ریخت‌شناسی بلوک^۱ ارائه می‌دهد. با استفاده از بردارها می‌توان تعادل استاتیکی و جنبشی بلوک‌ها تحت تاثیر وزن بلوک، نیروهای اعمال شده، اصطکاک، ممان اینرسی و عکس العمل سیستم نگهداری مورد بررسی قرار داد [۱۸].

با توجه به فرضیات مورد استفاده تحلیل‌های متعددی برای به دست آوردن ضریب ایمنی ارائه شده است که از جمله این تحلیل‌ها عبارتند از: روش فلنیوس^۲، روش بیشاب^۳، روش جانبو^۴، روش اسپنسر^۵، مورگنشترن^۶ - پرایس^۷ و روش سارما^۸ می‌باشد.

۲-۵-۱-۲- روش فلنیوس (روش معمولی قطعات)

در این روش از نیروی جانبی بین قطعات صرف نظر می‌شود. در شکل ۲-۳ دیاگرام آزاد نیروی‌های وارد بر یک قطعه را در این روش نشان می‌دهد. برای محاسبه ضریب اطمینان، تعادل لنگرها حول مرکز دایره لغزش به کار گرفته می‌شود [۲۵].

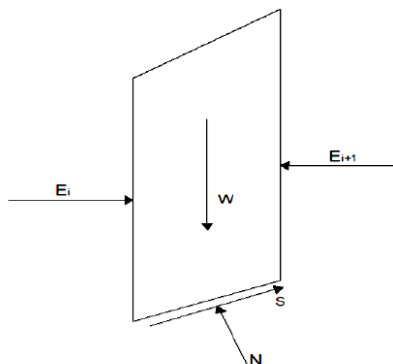
^۱ Block morphology
^۲ Fellenius
^۳ Bishop
^۴ Janbu
^۵ Spencer
^۶ Morgenstern and Price
^۷ Sarma



شکل (۳-۲) دیاگرام آزاد نیروها در روش فلنیوس [۲۵]

۲-۲-۵-۲- روش بیشاب اصلاح شده

در روش بیشاب اصلاح شده از مولفه مماسی بین قطعات صرف نظر می‌گردد و برای به دست آوردن ضریب اطمینان، از تعادل لنگر و نیروهای قائم استفاده می‌شود. شکل ۴-۲ دیاگرام آزاد نیروهای وارد بر یک قطعه را در روش بیشاب ساده شده نشان می‌دهد [۲۵].

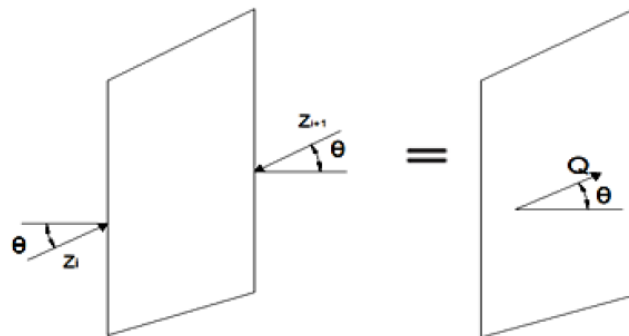


شکل (۴-۲) دیاگرام آزاد نیروها در روش بیشاب [۲۵]

چندین روش مختلف قطعات وجود دارد که معادلات تعادل استاتیکی را به طور کامل تامین می‌کنند. هر کدام از این روش‌ها فرضیات مختلفی برای محاسبه ضریب اطمینان دارند از جمله این روش‌ها، می‌توان به روش اسپنسر، مورگنشرن- پرایس و سارما اشاره کرد که هر یک از این روش‌ها در ادامه توضیح داده می‌شوند.

۲-۵-۲-۳- روش اسپنسر

در روش اسپنسر فرض می‌شود که زاویه نیروی بین تمامی قطعات یکسان و برابر (θ) است. این زاویه به عنوان یک مجهول بوده که در معادلات تعادل محاسبه می‌گردد. همچنین در این روش فرض می‌شود که نیروی عمودی تکیه‌گاه در مرکز هر قطعه وارد می‌شود [۲۵].



شکل (۲-۵) نیروهای بین قطعه ای در روش اسپنسر [۲۵]

۲-۵-۲-۴- روش مورگنشترن - پرایس

در این روش فرض می‌شود که نیروی برشی بین قطعات به نیروی عمودی وابسته است [۲۵].

۲-۵-۲-۵- روش سارما

در روش سارما ضریب زلزله مجهول و ضریب اطمینان معلوم در نظر گرفته می‌شود بدین ترتیب که یک مقدار معین برای ضریب اطمینان فرض شده و ضریب زلزله‌ای که این مقدار ضریب اطمینان را نتیجه می‌دهد، محاسبه می‌گردد. معمولاً ضریب اطمینان برابر یک در نظر گرفته می‌شود و ضریب زلزله محاسبه می‌گردد و این مقدار به عنوان ضریب لرزه‌ای که باعث لغزش می‌شود، ارائه می‌شود. در روش سارما نیروی بین قطعات به مقاومت برشی وابسته است [۲۵].

۲-۵-۳- روش‌های عددی

معادن روباز عمیق و شیب‌های سنگی بزرگ بسیاری از واحدهای سنگی و ساختارهای زمین‌شناسی را در معرض دید قرار می‌دهد (به عنوان مثال، گسل‌ها، صفحات لایه‌بندی) که ممکن است یکپارچگی شیب‌ها را کاهش دهد. مدل‌سازی عددی ابزاری قدرتمند برای شبیه‌سازی این ساختارها است [۲۶].

کاربرد روش‌های عددی در سال‌های اخیر، از گسترش بی‌نظیری برخوردار بوده است. می‌توان این گسترش را با رشد توانایی‌های فنی در استفاده از رایانه‌ها و تجهیزات محاسباتی الکترونیکی دانست. به گونه‌ای که امروزه در کاربرد این روش، سخت‌افزارها، جایگزین نیروی انسان در اجرای عملیات، با بهره‌گیری از دقت بالا گردیده است [۱۴].

دلایل کاربرد مدل‌های عددی برای مطالعات پایداری شیب به شرح زیر است [۱۴]:

- در مقایسه با مدل‌های تجربی که در آن‌ها حالت شکست به وضوح تعریف شده است، مدل‌های عددی می‌توانند خارج از پایگاه‌های داده‌ی خودشان به طور اطمینان بخشی برون‌یابی شوند.
- نسبت به روش‌های تحلیلی، فیزیکی و تعادل حدی که ممکن است برای برخی سایت‌ها مناسب نباشند و به سمت ساده‌سازی مبالغه آمیز شرایط میل کنند و احتمالاً به راه‌حل‌های بسیار محافظه کارانه‌ای منجر شوند، روش‌های آنالیز عددی قادرند تا ویژگی‌های زمین‌شناسی اصلی مانند گسل‌ها، آب زیرزمینی را با هم ترکیب کنند و یک تقریب واقع‌گرایانه‌تری از رفتار واقعی شیب‌ها ارائه دهند.
- آنالیز عددی به توصیف رفتارهای فیزیکی مشاهده شده کمک می‌کند.
- آنالیز عددی می‌تواند احتمالات چند گانه مدل‌های زمین‌شناسی حالات شکست و گزینه‌های طراحی را ارزیابی کند.

اساس روش‌های عددی، تقسیم سازه به قطعات کوچکی به نام المان است. در هر المان رفتار مواد ثابت می‌باشد. ارتباط المان‌ها از طریق گره‌های محصورکننده برقرار می‌شود و المان‌ها به وسیله این گره‌های محصورکننده تعریف می‌شوند. این گره‌ها نیز به هم متصل نیستند. همچنین در المان‌ها، اضلاع معنی ندارد و گره‌ها تعیین کننده می‌باشند. در روش‌های عددی تبدیل یک محیط با بی‌نهایت درجه آزادی به محیطی با درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط محیط مد نظر است. جابجایی ناشی از یک سیستم بارگذاری خاص بر روی مدل مدنظر، فقط از طریق تنش‌ها و گره‌ها به دست می‌آید [۱۷].

۲-۵-۳-۱- انواع روش‌های تحلیل عددی

روش‌های عددی و محاسبات مورد استفاده برای تحلیل پایداری شیب‌های سنگی و خاکی، از نظر محیط مورد تحلیل به سه دسته تقسیم می‌شوند:

- (۱) مدل‌سازی محیط‌های پیوسته^۱
- (۲) مدل‌سازی محیط‌های ناپیوسته^۲
- (۳) روش‌های ترکیبی (مدل‌سازی هیبریدی)^۳

(۱) مدل‌سازی پیوسته

تحلیل شیب‌هایی است که شامل توده‌سنگ‌های حجیم و سالم می‌باشند مدل‌سازی پیوسته بهترین راه، برای تحلیل سنگ‌های خاکسان یا سنگ‌های خرد شده مناسب است. این روش‌ها در محیط‌های ایزوتروپ و همگن کاربرد دارد. لذا برای تحلیل محیط‌های که شامل ناپیوستگی‌هایی از جمله گسل و سطوح لایه‌بندی، مناسب نمی‌باشد [۲۷].

^۱ Continuum Modeling
^۲ Discontinuous Modeling
^۳ Hybrid Modeling

روش‌های تحلیل محیط‌های پیوسته عبارتند از:

۱- روش المان محدود (FEM)^۱

۲- روش المان مرزی (BEM)^۲

۳- روش تفاضل محدود (FDM)^۳

(۲) مدل‌سازی ناپیوسته

این روش سنگ را به عنوان یک توده ناپیوسته در نظر می‌گیرد. به طوری که بلوک‌ها می‌توانند به صورت صلب یا تغییر شکل پذیر باشند. این روش در مجموع به عنوان روش المان مجزا^۴ (DEM) معرفی شده است. از معروف‌ترین نرم افزارها در محیط ناپیوسته UDEC می‌باشد. این نرم افزار مناسب برای محیط‌های درزه‌دار و همچنین در بررسی زمین لغزه‌ها و ریزش‌های سطحی می‌باشد [۲۷].

(۳) روش‌های ترکیبی (هیبریدی)

اغلب روش‌های ترکیبی اساساً برای مشکلات ناشی از جریان، تنش و تغییر شکل سنگ‌های شکسته استفاده می‌شوند [۲۸].

انواع اصلی این روش‌ها عبارتند از:

(۱) BEM-FEM

(۲) DEM-FEM

(۳) DEM-BEM

^۱ Finite Element Method

^۲ Boundary Element Method

^۳ Finite Difference Method

^۴ Discrete Element Method

(۱-۱) روش المان محدود

این روش در رشته‌های مختلف مهندسی از جمله مکانیک جامدات، مکانیک سیالات، عمران و معدن به کار گرفته می‌شود. از مزایای مهم کاربرد این روش، امکان تحلیل سازه‌های بزرگ با حداقل زمان، دقت فراوان و جامع بودن نتایج است. عمومیت کاربرد این روش در تحلیل تنش‌ها و تغییر شکل سازه‌های گوناگون در رشته‌های مختلف مهندسی است. این روش برای تحلیل زون‌های سست و دارای شکستگی زیاد، هندسه‌های نامنظم و مدل غیر یکنواخت مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۹].

در این روش کل سازه به شبکه‌های کوچک‌تری تقسیم می‌شود، به نحوی که هر شبکه از نظر مشخصات رفتاری در یک ناحیه خاص قرار می‌گیرد. این المان‌ها در نقاط گره‌ای به هم متصل هستند. هر المان توسط گره‌های اطراف خود تعریف می‌شود. ارتباط بین آن‌ها از طریق گره‌های مشترک بوده و باید مشخصات هندسی سازه و رفتاری هر المان تعریف شود. در این روش به دلیل تشکیل ماتریس سختی حافظه زیادی برای کامپیوتر مورد نیاز است. همچنین برای تعداد المان‌های بالا، سرعت انجام عملیات بسیار پایین می‌باشد [۲۹].

(۲-۱) روش المان مرزی

در روش المان مرزی برخلاف روش المان محدود، نیازی به تقسیم ناحیه مورد نظر به المان‌ها نیست، زیرا در این روش توابع مورد استفاده برای تخمین جواب در داخل ناحیه مورد نظر به نحوی انتخاب می‌شوند که دقیقاً در معادلات دیفرانسیل حاکم صدق نمایند. لذا صرفاً نیاز به برقراری شرایط مرزی خواهد بود. در این روش واکنش المان‌ها نسبت به شرایط بارگذاری شده خارجی محاسبه شده و رفتار المان‌های مرزی بر اساس معادلات دیفرانسیل جزئی شبیه سازی شده و تحلیل می‌شود. استفاده از این روش به تدریج رو به افزایش است اما برای فهم این روش نیز باید پیچیدگی‌ها و مسائل ریاضی را در سطح بالا درک نمود.

در این روش ابعاد مسئله به میزان یک مرتبه کاهش می‌یابد. لذا به جای المان‌بندی حجمی، تنها نیاز به استفاده از المان‌بندی بر روی سطح است. به این معنی که تعداد مجهولات، در مورد مسائل سه بعدی کاهش می‌یابد. که مجهولات مسئله صرفاً بر روی مرز آن واقع است. مزیت دیگر این روش، برقراری کامل تعادل است که به معنای امکان بررسی آسان محیط‌های نامحدود است [۳۰].

(۳-۱) روش تفاضل محدود

مشابه با روش المان محدود در این روش نیز، ناحیه مورد تحلیل به المان‌هایی تقسیم می‌شود. تفاضل محدود، یک روش تکرار شونده است. ابتدا معادلات دیفرانسیل به معادلات جبری تبدیل می‌شوند. مقادیر عددی موجود را جایگزین نموده و در نتیجه مقادیر عددی جدیدی به دست می‌آید که این مقادیر مجدداً جایگزین مقادیر قبلی می‌شوند و این پروسه تا رسیدن سیستم به یک حالت تعادل ادامه می‌یابد. در این حالت جواب‌های معادلات دیفرانسیل (سرعت‌ها، تغییر مکان‌ها، تنش‌ها و کرنش‌ها) به دست می‌آیند. هیچ گونه ماتریس سختی در این روش به وجود نمی‌آید، لذا محدودیت کمتری دارد و همچنین حل بدون ماتریس، اجازه تغییر مکان‌های بزرگ، بدون اقدامات اضافی را می‌دهد و برای محاسبات دینامیکی بسیار مؤثرتر است. از این روش به راحتی می‌توان در آنالیز موادی که رفتار زمان‌مندی را دارند استفاده کرد. از معایب این روش این است که برای تحلیل مسائل استاتیکی خطی زمان زیادی را در مقایسه با روش‌های دیگر می‌گیرد [۳۰].

(۱-۲) روش المان مجزا

این روش بر اساس فرض توده‌سنگ به عنوان یک محیط ناپیوسته شکل گرفته است. بنابراین در این روش عوارض ساختاری نظیر درزه‌های سنگی، لایه‌بندی، گسل و انواع ناپیوستگی‌ها نیز تاثیر دارد. مانند روش اجزای محدود در سطوح جدیدتر، المان‌ها می‌توانند دارای هر شکل دلخواهی باشند و همچنین می‌توان بلوک‌ها را به صورت صلب در نظر گرفت. این روش از قدرت و انعطاف بالایی برخوردار است. زمان محاسبه

در این روش از روش‌های دیگر بیشتر است. با توجه به ماهیت ناپیوسته بودن محیط‌های سنگی این روش کاملاً مناسب برای تغییر شکل و شکست توده‌های سنگی است [۱۵].

اطلاعات مورد نیاز برای مدل‌سازی در این روش بسیار گسترده است، بنابراین نیاز به اطلاعات کاملی از ویژگی‌های ناپیوستگی‌های منطقه مورد نیاز است که این امر به سادگی مقدور نیست. این روش را می‌توان به چهار روش عمده تقسیم بندی نمود:

(۱) Distinct Element method

(۲) Model method

(۳) (DDA) Discontinuum Deformation Analysis

(۴) Momentum Exchange method

جدول زیر مزایا، معایب و محدودیت‌های روش‌های مختلف تحلیل پایداری عددی را نشان می‌دهد.

جدول (۲-۱۲) محدودیت‌ها و مزایای روش‌های عددی [۳۱]

روش	مزایا	معایب و محدودیت ها	پارامترهای بحرانی
پیوسته	قابل کاربرد تغییر شکل و شکست، قابلیت مدل کردن مکانیسم‌های پیچیده، کاربرد در تحلیل‌های سه بعدی، مدل سازی اثر آب، مدل سازی تغییر شکل خزشی، مدل سازی بارگذاری دینامیک، قابلیت تهیه نرم افزار بر مبنای این مدل	نیازمندی به کابر با مهارت و تجربه بالا، آنالیز حساسیت پیچیده	هندسه شیب، پارامترهای رفتاری، ویژگی های آب زیرزمینی، مقاومت برشی، تنش برجا
ناپیوسته	قابل کاربرد تغییر شکل و حرکت بلوک ها نسبت به هم، مدل سازی رفتار پیچیده سنگ و ناپیوستگی نسبت به هم	نیازمند کاربر با مهارت بالا، تاثیر اثر مقیاس، نیازمند به شبیه سازی پارامترهای ناپیوستگی، محدودیت داده های ورودی درزه	هندسه شیب، سختی ناپیوستگی و مقاومت برشی، ویژگی های آب زیرزمینی و تنش برجا
ترکیبی	ترکیب المان های مجزا و محدود با قابلیت شبیه سازی شکست پیش رونده و جدایش درزه ها و سنگ های لایه ای	توانایی حافظه بالا، تطابق کم با داده های تجربی، نیازمند به کالیبراسیون	ترکیبی از داده های ورودی بالا

۲-۶- توصیف انواع مدل‌های ناپایداری شیب

شیب‌های سنگی معمولاً در حفاریات سطحی در مقابل تنش‌های ناشی از وزن توده پایدار هستند، مگر اینکه بدلیل وجود ناپیوستگی‌ها و تحت تاثیر تنش‌های یاد شده بر آن ناپیوستگی‌ها به گسیختگی برسند که در آن صورت ارتفاع و شیب گودبرداری و مختصات فضایی جبهه کار از اهمیت ویژه‌ای در پایداری برخوردار می‌باشد. با درک و شناخت نحوه ریزش، ارزیابی احتمال ریزش و ضریب ایمنی و نیز اقدامات مهندسی برای بدست آوردن ایمنی لازم امکان دارد [۳۲].

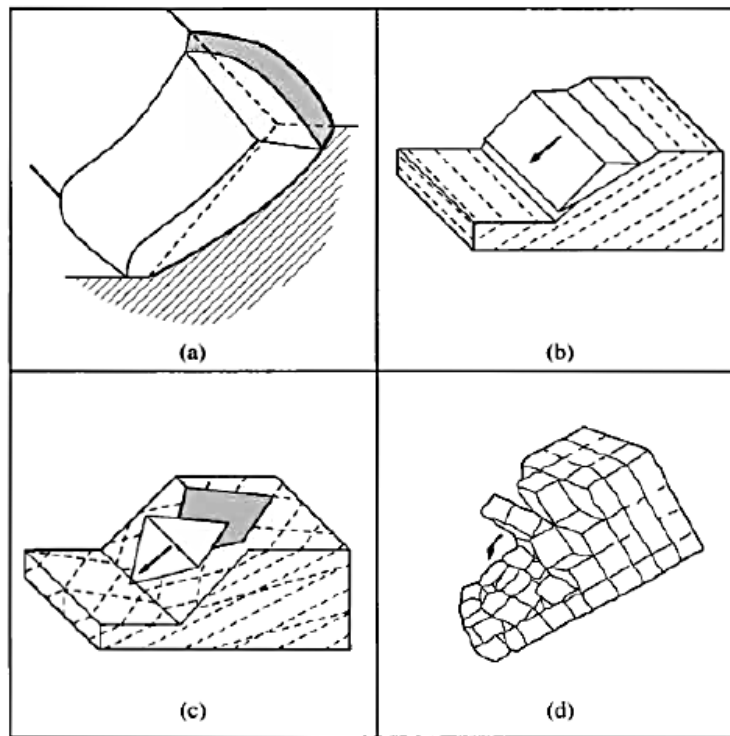
زمانی که چندین دسته صفحات ضعیف وجود دارد که با زوایای مایل یکدیگر را قطع می‌کنند، بررسی مدل‌های جنبشی (سینماتیکی) می‌تواند در پیش‌بینی محتمل‌ترین الگوی ریزش شیب موثر باشد. ریزش‌هایی که به حرکت بلوک‌ها بر صفحات ناپیوستگی مرتبط می‌شوند به یکی از سه نحوه لغزش صفحه‌ای^۱، گوه‌ای^۲ و ترکیبی از آن رخ می‌دهند. در صورتی که در حفاریات روباز دسته درزه‌هایی با امتداد موازی امتداد شیب و یا به صورت قائم وجود داشته باشد، احتمال شکست واژگونی^۳ وجود خواهد داشت و در محیط‌های سنگی هوازده و سنگ‌های بسیار نرم مانند برخی از شیل‌ها رفتاری شبیه به خاک در شکست نمایان خواهد گشت که به آن شکست دایره‌ای یا قاشقی^۴ گویند. شکل (۲-۶) مکانیسم‌هایی را نشان می‌دهد که به طور سنتی به عنوان چهار مکانیسم پایه ناپایداری برای دامنه‌های سنگی در نظر گرفته می‌شوند. علاوه بر این، خطر سقوط سنگ‌ریزه از بلوک‌های سست سنگ بالای جاده‌ها و اقدامات اصلاحی برای کاهش خطر، مورد دیگری است که در طراحی پایداری شیب در نظر گرفته می‌شود [۳۲].

^۱ Plane failure

^۲ Wedge failure

^۳ Toppling failure

^۴ Circular failure



شکل (۶-۲) چهار مکانیسم پایه ناپایداری شیب سنگی (a): لغزش دایره‌ای (b): لغزش صفحه‌ای، (c): لغزش گوه‌ای (d): لغزش واژگونی [۳۲]

۲-۳-۱- شکست صفحه‌ای

در معادن روباز شکست صفحه‌ای در مقایسه با شکست‌های قاشقی و گوه‌ای کمتر اتفاق می‌افتد. این نوع شکست وقتی اتفاق می‌افتد که کلیه شرایط شکست وجود داشته باشد. شرایط عمومی شکست صفحه‌ای عبارتند از [۱۴]:

۱) امتداد صفحه ناپیوستگی یا امتداد سطحی که موجب شکست می‌شود باید به موازات امتداد شیب دامنه یا حدودا $\pm 20^\circ$ درجه با آن اختلاف داشته باشد.

۲) امتداد صفحه ناپیوستگی^۱ (صفحه شکست) باید در دامنه شیب ظاهر شده باشد. این بدین معنی است که شیب صفحه شکست از شیب دامنه کمتر باشد یعنی در شکل (۷-۲) داشته باشیم:

^۱ Slide plane

(۳)

$$\psi_f > \psi_p$$

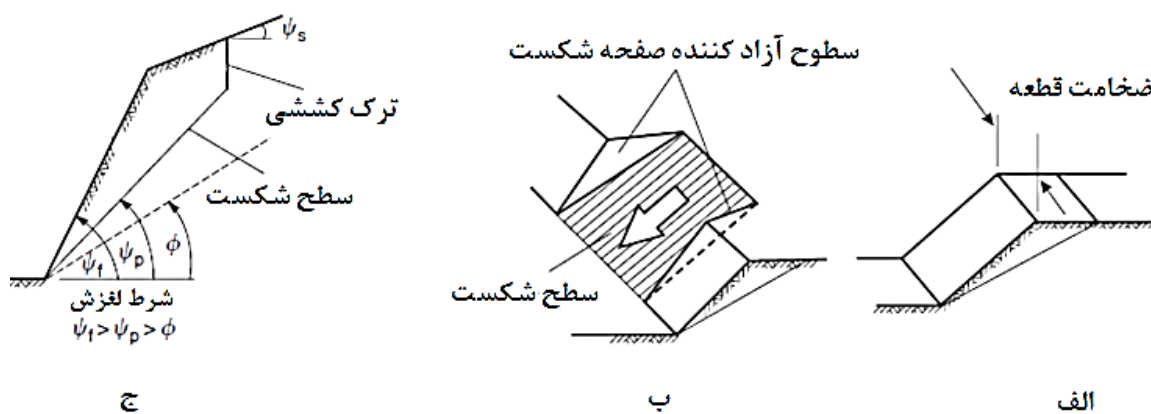
رابطه (۷-۲)

(۴) زاویه شیب سطح شکست باید بزرگ‌تر از زاویه اصطکاک داخلی این صفحه باشد.

$$\psi_p > \phi$$

رابطه (۸-۲)

(۵) سطوح نگه دارنده^۱ صفحه شکست کمترین مقاومت را داشته باشند.

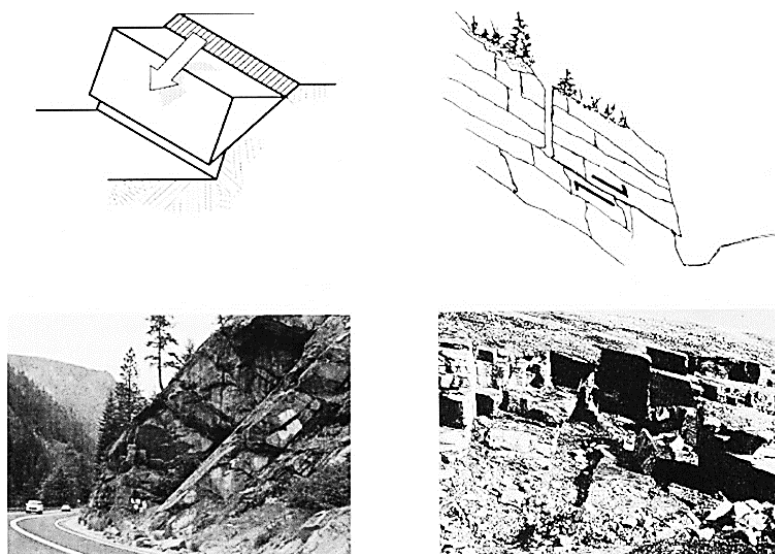


شکل (۷-۲) شرایط عمومی شکست صفحه‌ای

الف) ضخامت زون (ب) سطوح آزاد کننده زون دارای پتانسیل شکست (ج) زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)، زاویه شکست (ψ_p) و شیب پله (ψ_f) [۱۸]

شکل زیر دو نمونه از شکست صفحه‌ای رخ داده در شیروانی را نشان می‌دهد.

^۱ Release surface



شکل (۲-۸) شکست صفحه‌ای در شیروانی [۱۸]

۲-۳-۲- شکست گوه‌ای

در شکست گوه‌ای، وجود دو صفحه ناپیوستگی مورب (شیب دار)، که ممکن است دو دسته درزه و یا یک دسته درزه با یک گسل باشد، ضروری است. این شکست وقتی اتفاق می‌افتد که این دو صفحه ناپیوستگی به طور مورب در لبه و دامنه شیب گسترش و همدیگر را قطع کنند و خط تقاطع این دو صفحه در دامنه شیب ظاهر شود. گوه‌ای از سنگ که بین این دو صفحه ناپیوستگی وجود دارد در امتداد خط تقاطع سقوط می‌کند.

هندس گوه جهت تحلیل مکانیک پایه لغزش، در شکل (۲-۹) نشان داده شده است. معمولاً در شکست گوه‌ای صفحه ناپیوستگی که زاویه کمتر دارد را صفحه A و صفحه دیگر را که شیب بیشتری دارد، صفحه B می‌نامند. شرط شکست گوه‌ای عبارتند از [۱۴]:

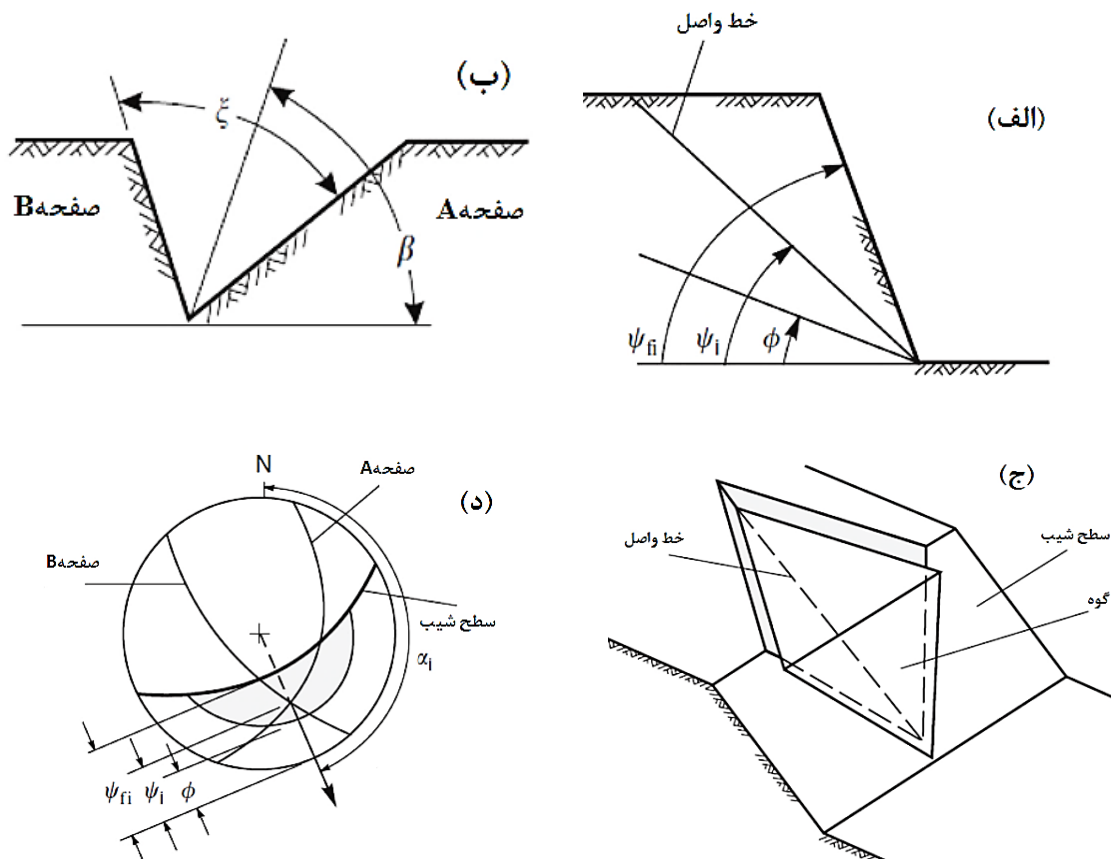
$$\psi_f > \psi_i \quad \text{و}$$

رابطه (۲-۹)

ψ_f : زاویه شیب سطح شیب‌دار در جهت خط تقاطع دو صفحه

ψ_i : زاویه شیب خط تقاطع دو صفحه

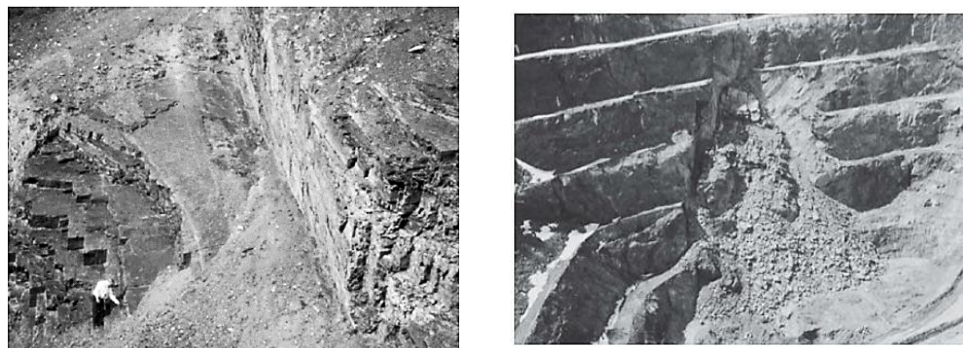
ϕ : زاویه اصطکاک داخلی



شکل (۲-۹) هندسه شکست گوه‌ای

الف) دید از راست خط واصل دو صفحه شکست (ب) دید در امتداد خط واصل دو صفحه شکست (ج) نمایش سه بعدی شکست گوه‌ای (د) تصویر استریو پلات از هندسه شکست گوه‌ای [۱۸]

در شکل (۲-۱۰) دو نمونه از شکست گوه‌ای رخ داده شده در شیروانی را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱۰) شکست گوه‌ای [۱۸]

۲-۳-۳- شکست دایره‌ای

شکست در شیب‌های سنگی عمدتاً ناشی از ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی است که توده‌سنگ را به دو بخش تقسیم می‌کند. در این قسمت پایداری سطوحی را بررسی خواهیم کرد که رفتار سست‌تری از خود نشان می‌دهند. شرایط شکست دایره‌ای عبارتند از [۱۴]:

۱) وجود ذرات منفرد در داخل خاک یا توده سنگ هوازده و خرد شده، این ذرات در مقایسه با ابعاد سطح شیب‌دار، بسیار کوچک‌اند و به علت داشتن شکل و اندازه‌های مختلف نمی‌توانند یک توده به هم پیوسته را ایجاد کنند.

۲) سنگ‌های شکسته شده داخل رمپ‌های بزرگ باطله نیز همین حالت را دارا بوده و شبیه خاک رفتار می‌کنند. بنابراین امکان وقوع شکست دایره‌ای در آن‌ها وجود دارد.

۳) ذرات آسیا شده و باطله‌های کارخانه فرآوری نیز به دلیل فوق نمی‌توانند در ارتفاع چند فوتی دچار شکست شوند.

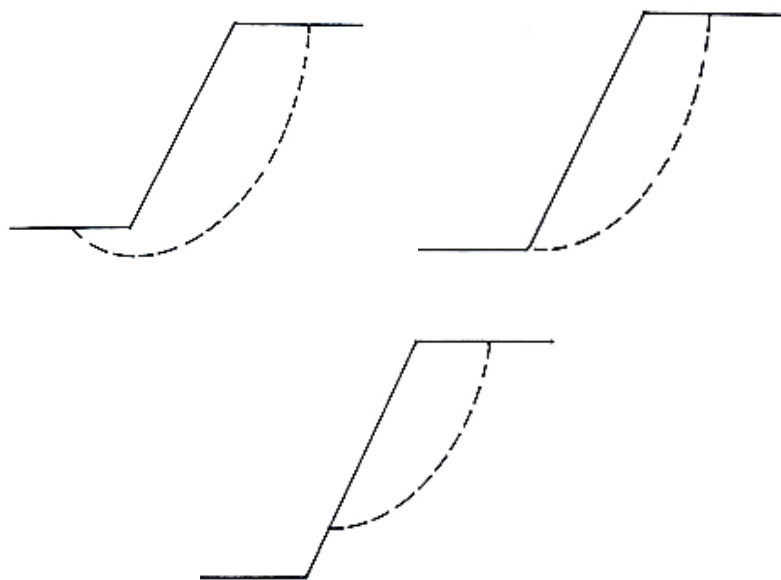
۴) سنگ‌های به شدت هوازده و دگرسان شده نیز می‌توانند دچار این نوع شکست شوند.

۵) ظاهر شدن آب در پای شیب می‌تواند از نشانه‌های اولیه وقوع شکست باشد.

۶) وجود ترک کششی در سطح شیب که به علت وارد آمدن تنش، در عمق گسترش پیدا می‌کند به نحوی که تا نصف یا بیشتر از ارتفاع شیب، پیشروی کرده و موجب شکست دایره‌ای می‌شود.

شکست‌های دایره‌ای از نظر اندازه و گسترش به سه گروه تقسیم می‌شوند. گروه اول شامل آن دسته از شکست‌هایی است که صفحه شکست تا پای پله^۱ ادامه دارد. گروه دوم آن دسته از شکست‌هایی را شامل می‌شود که صفحه شکست تا زیر پله^۲ ادامه دارد و در گروه سوم صفحه شکست، دامنه شیب^۳ را قطع می‌کند.

در شکل (۲-۱۱) انواع شکست‌های دایره‌ای نشان داده شده است.



شکل (۲-۱۱) انواع شکست‌های دایره‌ای [۱۸]

شکل (۲-۱۲) چند نمونه از ریزش قاشقی رخ داده در شیروانی را نشان می‌دهد.

^۱ Toe circular failure

^۲ Base circular failure

^۳ Non circular failure



شکل (۲-۱۲) ریزش قاشقی در شیروانی [۱۸]

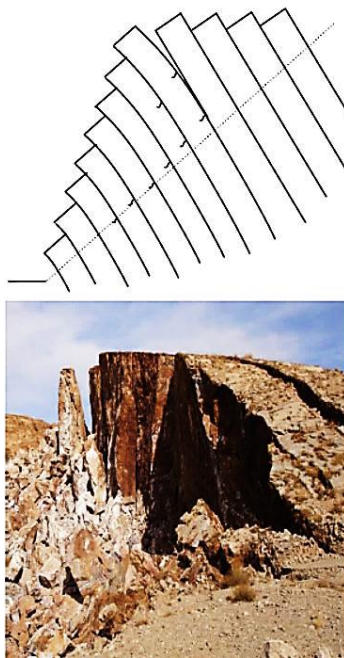
۲-۳-۴- شکست واژگونی

شکست‌هایی که تاکنون بیان شد، عمدتاً ناشی از لغزش بر روی یک سری سطوح بودند. اما شکست واژگونی ناشی از چرخش و واژگون شدن یک بلوک یا یک تکه سنگی است که دارای قاعده ثابت است. دو عامل ارتفاع بلوک و زاویه قرارگیری آن، در پایداری یک بلوک سنگی بسیار مؤثر است. هنگامی که ارتفاع بلوک بسیار بزرگ‌تر از قاعده بلوک سنگی مستقر در سطح شیب‌دار باشد، بلوک سقوط خواهد کرد، همچنین در شرایطی که زاویه قرارگیری بلوک سنگی بزرگ‌تر از زاویه اصطکاک داخلی آن باشد سنگ لغزش خواهد کرد.

شکست‌های واژگونی توسط بری^۱ و گودمن^۲ با توجه به عوامل شکست و آنچه در مطالعات صحرایی قابل تشخیص هستند گروه بندی شده‌اند که در ذیل به آن‌ها اشاره می‌شود [۱۴]:

(۱) شکست واژگونی خمشی^۳

این نوع شکست معمولاً در شیب‌های سنگی اتفاق می‌افتد. علت پدید آمدن آن وجود درزه‌هایی با شیب زیاد است که باعث می‌شوند سنگ پیوسته، به صورت ستون‌هایی از توده‌سنگ جدا شده و خمیده شده و در نهایت سقوط کند. معمولاً به علت برداشتن پای پله، سنگ‌ها شروع به لغزش کرده و فرآیند شکست واژگونی آغاز می‌شود. این عمل به تدریج در توده‌سنگ گسترش پیدا می‌کند و اغلب همراه با شکاف‌های عمیق و گسترده است. شکل (۲-۱۳) این نوع شکست را نشان می‌دهد.

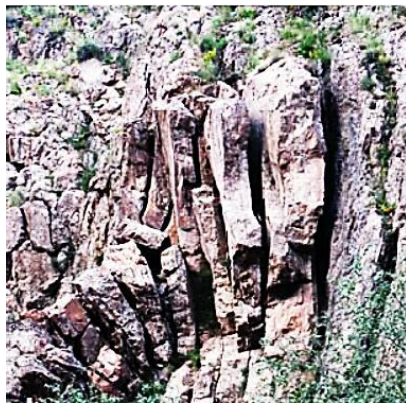
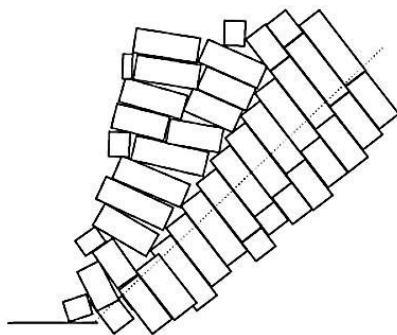


شکل (۲-۱۳) شکست واژگونی خمشی [۳۲]

^۱ Bray
^۲ Goodman
^۳ Flexural toppling failure

(۲) شکست واژگونی بلوکی^۱

این نوع واژگونی در صورتی به وجود می‌آید که سنگ سخت به وسیله یک سری درزه‌های فاصله‌دار و عمود بر هم، به صورت بلوک‌های ویژه‌ای در آمده باشد. ستون‌های کوتاهی که پای پله را می‌سازند به وسیله بلوک‌های بلند پشت سرشان هل داده شده و شروع به افتادن می‌کنند. به همین ترتیب شکست واژگونی به سمت بالا گسترش می‌یابد. شکل (۲-۱۴) واژگونی بلوکی را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱۴) شکست واژگونی بلوکی [۳۸]

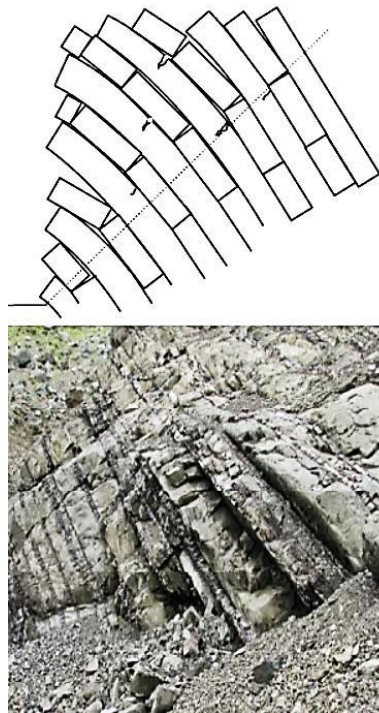
(۳) شکست واژگونی خمشی^۲

همانطور که در شکل (۲-۱۵) نشان داده شده است، مشخصه این نوع شکست خمش شبه پیوسته در طول ستون‌های بلندی است که به وسیله تعداد متعددی درزه متقاطع به وجود آمده‌اند. بر خلاف واژگونی خمشی

^۱ Block toppling failure

^۲ Block flexural toppling

که در آن ستون‌های پیوسته خمیده شده و می‌شکنند، در این حالت، شکست در اثر جمع جابجایی‌ها روی درزه‌ها به وجود می‌آید، زیرا تعداد شکاف‌های کششی در این حالت، از شکست خمشی بیشتر است و تماس لبه با سطح نیز در این حالت بیشتر از حالت شکست بلوکی است.



شکل (۲-۱۵) شکست واژگونی بلوکی - خمشی [۳۲]

(۴) شکست‌های واژگونی ثانویه^۱

این نوع شکست‌ها در اثر شکستگی پای شیب به وجود می‌آیند. شکستگی پای شیب می‌تواند در اثر عوامل طبیعی مثل هوازدهی یا فرسایش و یا در اثر فعالیت انسان باشد. در همه این شرایط ابتدا سنگ از نظر فیزیکی شکسته خواهد شد و سپس شکست واژگونی در آن به وجود می‌آید.

^۱ Secondary toppling failure

فصل سوم

پیشنه تحقیق

تلاش برای یافتن روش‌های تحلیل پایداری شیب تاریخچه‌ای طولانی دارد. روش‌های مدل‌سازی عددی، امکان حل مسائلی با هندسه پیچیده، ناهمسانگردی مواد، رفتار غیر خطی، تنش‌های برجا و غیره را فراهم می‌سازد. این‌گونه مسائل با استفاده از روش‌های معمولی قابل حل نیستند. روش عددی نسبت به بقیه روش‌های تحلیل به دلیل ارائه رفتار واقعی‌تر شیب‌ها کاربرد فراوانی پیدا کرده است. برای مثال وقتی شیب متشکل از سازندهای زمین‌شناسی با ساختارهای گوناگون است، مکانیسم ناپایداری نسبت به لغزش صفحه-ای بسیار پیچیده‌تر است و در این حالت نمی‌توان توپوگرافی را با یک سطح ساده و شیب بالایی مدل‌سازی کرد و ضروری است که از روش‌های آنالیز عددی استفاده نمود. مدل‌های عددی برنامه‌های کامپیوتری هستند که تلاش می‌کنند تا پاسخ مکانیکی توده‌سنگ، واقع شده در معرض مجموعه‌ای از شرایط اولیه مانند تنش‌های برجا و سطح آب، شرایط مرزی و تغییرات القایی مانند حفاری شیب را ارائه دهند. روش‌های عددی زمان را در نظر می‌گیرند اما روش تعادل حدی وابستگی به زمان ندارند. روش‌های تعادل حدی رفتار مواد را پلاستیک کاملاً سخت در نظر می‌گیرند و قادر نیستند جابه‌جایی‌ها یا تغییر شکل‌ها را محاسبه کنند. در مقابل، روش‌های عددی قادرند جابه‌جایی‌ها و تغییر شکل‌ها را محاسبه کنند و می‌توان آن‌ها را در مدل‌های متنوع مواد، برای شبیه‌سازی رفتارهای شیب سنگ مورد استفاده قرار داد. از دیگر تفاوت این دو روش می‌توان به سادگی روش‌های تعادل حدی نسبت به روش‌های عددی اشاره نمود. روش‌های عددی نسبت به روش‌های تعادل حدی روش‌های جدیدتری هستند و کاربرد آن‌ها از سال ۲۰۰۵ به طور قابل توجهی افزایش یافته است، که بخشی از آن به دلیل افزایش سرعت کامپیوترها است، اما دلیل دیگر آن مقبولیت بیشتر این روش در نزد عموم متخصصین امر می‌باشد [۱۵].

در سال‌های اخیر با توجه به اهمیت پایداری شیب در معادن مطالعات بسیاری صورت گرفته است، در ادامه به برخی مطالعات انجام شده در زمینه پایداری شیب اشاره می‌شود.

روش‌های عددی در مقایسه با روش‌های تعادل حدی نسبتاً جدید هستند. تکنیک‌های عددی برای به دست آوردن تنش و توزیع کرنش در هر نقطه از شبکه تعریف شده، استفاده می‌شوند. به ویژه برای تحلیل پایداری شیب زمانی که تحت انواع مختلف بارگذاری و یا زمانی که دارای هندسه پیچیده باشند، مفید هستند.

۳-۲- مطالعات پیشین

کوردی^۱ و همکاران در سال ۲۰۰۱ روشی ترکیبی برای تحلیل پایداری شیب با روش عددی و استفاده از کد تفاضل محدود و روش تعادل حدی با تحلیل خطای دایره‌ای ارائه کردند. حالت تنش با یک کد تفاضل محدود محاسبه شده و سپس در برنامه‌ای براساس روش تعادل حدی برای محاسبه ضریب ایمنی استفاده می‌شود. این رویکرد جدید را برای یک کد تفاضل محدود (FLAC) بکار گرفته اند. در این روش از پارامتری به نام ضریب ایمنی جهانی استفاده شده است. این ضریب ایمنی به صورت میانگین عوامل ایمنی محلی تعریف می‌شود که با دو روش محاسبه می‌شوند، روشی به عنوان سطح شکست موضعی^۲ و روشی به عنوان سطح شکست محلی بهینه‌سازی^۳ شده است، شناخته می‌شود. در این مقاله سطح شکست به صورت دایره‌ای فرض شده است. به منظور به دست آوردن ضریب ایمنی کلی، باید مقادیر ضرایب ایمنی محلی برای هر نقطه (عنصر) شیب (مدل) تعیین شود [۳۳].

منطقه مورد مطالعه در این مقاله مربوط به شیب یک معدن روباز در فرانسه است. برای مدل سازی از مدل رفتاری موهر - کولمب نیز استفاده شده است. هدف از این مطالعه بررسی پایداری شیب در طولانی مدت بود. ضریب ایمنی محلی و جهانی محاسبه شد و نتایج آن نیز در جدول ۳-۱ و ۳-۲ بیان شده است. سپس همین مثال با روش تعادل حدی محاسبه شد و نتایج آن با روش عددی مقایسه شد. در هر دو حالت، تحلیل پایداری حفره در طولانی مدت نشان داد که شیب ناپایداری، ایجاد نمی‌کند. ضریب ایمنی به دست آمده تا

^۱ Kourdey

^۲ surface of failure locally

optimized ^۳ surface of failure locally

حد زیادی بالاتر از ۱ هستند. سپس نتیجه گرفته شد که استفاده از یک روش عددی قابل اعتمادتر و نتایج دقیق‌تری نسبت به روش تعادل می‌دهد. برای مسائل پیچیده‌تر، انجام تحلیل تعادل حدی با استفاده از یک روش عددی مناسب است [۳۳].

جدول (۱-۳) نتایج کد FLAC [۳۳]

FS-global	1.33
x-coordinate of the center of the cricle	574 m
y-coordinate of the center of the cricle	570 m
diameter of the cricle	75 m

جدول (۲-۳) حداقل و حداکثر مقدار ضریب محلی ایمنی [۳۳]

FS- local minimum	1.005
FS-local maximum	5.49

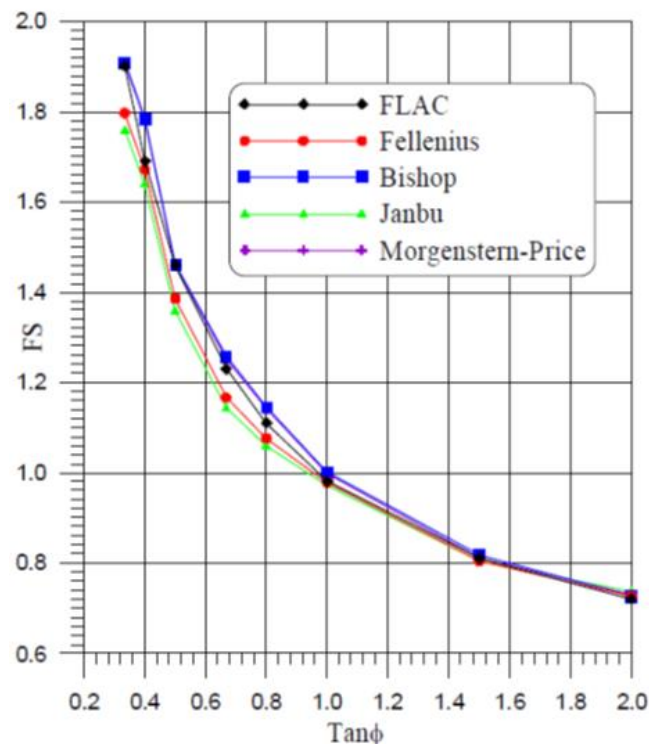
کالا^۱ و فلسیاک^۲ در سال ۲۰۰۳ با روش عددی تکنیک کاهش مقاومت برشی^۳ (SSR) و روش تعادل حدی (LEM) به تحلیل پایداری شیب پرداختند. تحلیل آنها بر دقت SSR از طریق مقایسه با راه‌حل‌های تعادل حدی مورد بررسی قرار گرفت. ضریب ایمنی برآورد شده توسط SSR به دست آمده در حالت‌های مختلف با روش‌های تعادل حدی مقایسه شد. ضریب ایمنی در روش عددی نیز با نرم افزار FLAC بررسی شد. پایداری شیب در حالت هندسه ساده و همگن برای چندین زوایا شیب بررسی شد و نتایج آن در شکل ۱-۳ بیان شده است. سپس برای شیبی که متشکل از دو واحد زمین شناسی بود برای چندین زاویه شیب آنالیز شد (شکل ۲-۳). نتایج نشان داد که برای شیب ساده و همگن ضریب ایمنی محاسبه شده با روش SSR

^۱ Cala

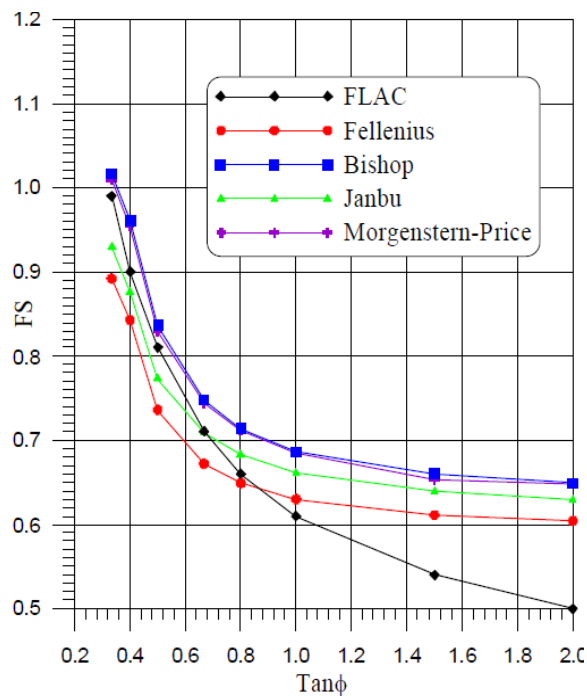
^۲ Flisiak

^۳ Shear strength reduction technique

معمولاً نتایج مشابهی با روش تعادل حدی دارد. با این حال برای شیب‌های دارای هندسی پیچیده و متشکل از دو واحد زمین‌شناسی، تفاوت‌های قابل توجهی بین مقادیر ضریب ایمنی در روش SSR با روش تعادل حدی می‌باشد [۳۴].



شکل (۱-۳) مقدار ضریب ایمنی برای شیب ساده و همگن در زوایای شیب مختلف با روش تعادل حدی و عددی [۳۴]



شکل (۲-۳) مقدار ضریب ایمنی برای شیب متشکل از دو واحد زمین شناسی در زوایا مختلف با روش تعادل حدی و

عددی [۳۴]

آدیلا^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۳ به پایداری معدن روباز زغال سنگ Dubrave در بخش میانی ناودیس جنوبی کرکا، با نرم افزار ADINA (تحلیل غیر خطی فزاینده خودکار) (FEM) و نرم افزار SWASE (LEM) پرداختند. نتایج در دو نوع مدل با وجود و عدم وجود آب زیرزمینی و دو نوع مش بندی متوسط و خوب بررسی شد. مدل دارای زاویه شیب ۳۰ درجه و ارتفاع شیب ۳۳ متر می باشد. نتایج نیز در جدول ۳-۳ ارائه شده است. در جدول ۳، A نشان دهنده مدل با آب زیرزمینی و B بدون آب زیرزمینی است. همچنین مدل I با نوع مش متوسط و مدل II با نوع مش خوب است. بدیهی است که ضریب ایمنی برای مدل IA ۱۱٪ کمتر از مدل II A است، در حالی که ضریب ایمنی برای مدل IB بیشتر از ۹٪ از مدل II B می باشد.

^۱ Adila

تفاوت در نتایج مدل I و II نشان می‌دهد که بین مش متوسط و خوب حداکثر ۱۱٪ انحراف وجود دارد. همچنین، نتایج در مدل A و مدل B متفاوت است، که نشان می‌دهد برخی انحرافات به دلیل وجود آب زیر زمینی وجود است. روش SWASE با آب زیرزمینی ضریب ایمنی ۰/۹۹ و بدون آب زیرزمینی ضریب ایمنی ۱/۱۴ را نشان می‌دهد. تحلیل نتایج بدست‌آمده با این دو روش نشان می‌دهد که همپوشانی بیشتر در مش بندی خوب وجود دارد. روش المان محدود می‌تواند تعدادی از عوامل موثر در آنالیز را به دست آورد و در نتیجه دقت ارزیابی را افزایش می‌دهد و بنابراین تصمیم‌گیری درست در فرآیندهای کاری بعدی را تحت‌تاثیر قرار می‌دهد. در نتیجه روش المان محدود به دلیل امکان استفاده از هندسه پیچیده شیب و لایه‌ها، انواع مختلف مواد، تاثیرات آب و سایر عوامل مرتبط، مزایای زیادی نسبت به روش‌های تعادل حدی دارد. مدل I در مقایسه با روش تعادل حدی نتایجی را ارائه کرد که تفاوت قابل‌توجهی نداشتند، اما مدل II نتایج دقیق‌تری نسبت به روش SWASE به ما داد، به دلیل مش بندی خوب است [۳۵].

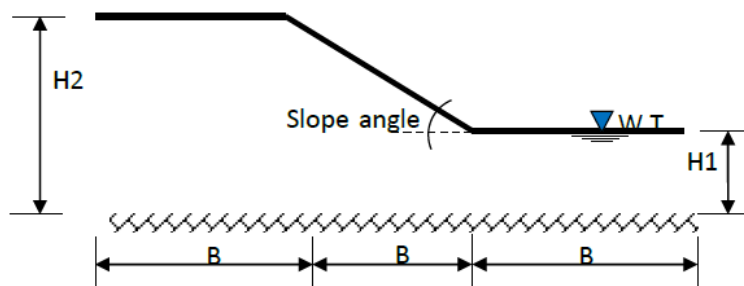
جدول (۳-۳) نتایج تحلیل ضریب ایمنی با روش المان محدود و تعادل حدی [۳۵]

	Model					
	Model I (FEM)		Model II (FEM)		SWASE (LEM)	
	A	B	A	B	A	B
FS	0/9	1/2	1	1/1	0/99	14/1

جاسیم^۱ در سال ۲۰۱۴ به شبیه‌سازی المان محدود دو بعدی و تحلیل مشکلات پایداری شیب در دو نوع خاک چسبنده، غیر چسبنده و همچنین در زاویه‌های مختلف شیب پرداخت. شکل ۳-۳ طرح پلان و نمای نمونه اولیه ایده آل شیب جانبی با عرض ۳B و ارتفاع H_۱ و H_۲ را نشان می‌دهد. این پروژه دو نوع خاک،

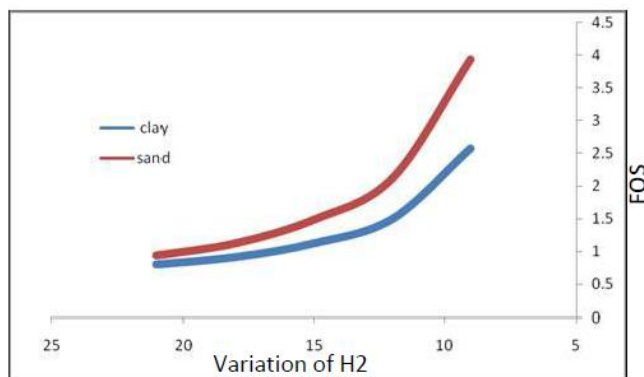
^۱ Jasim

ماسه‌ای و رسی را در نظر می‌گیرد. فرض شده‌است که ویژگی‌های این خاک‌ها در طول مطالعه ثابت هستند. به علاوه، عمق H_1 ثابت است. در حالی که این مطالعه مقادیر مختلفی از H_2 را می‌پذیرد [۱۶].



شکل (۳-۳) پروفیل پایداری شیب [۱۶]

ضریب ایمنی نشان‌دهنده کلید اصلی برای تحلیل مساله پایداری شیب است. برای هر دو نوع خاک، ضریب ایمنی با کاهش زاویه شیب یا H_2 افزایش می‌یابد. در حالی که به نظر می‌رسد که زاویه شیب خاک رس، ضریب ایمنی نسبتاً بالا (خطر کمتر) در مقایسه با مشکل شیب در خاک ماسه‌ای دارد. حتی عملکرد جابجایی کلی همان طور که در شکل (۴-۳) و جداول (۴-۳) و (۵-۳) نشان داده شده‌است، تغییر می‌کند. این احتمال به دلیل مقاومت بالای خاک در خاک رسی در مقایسه با خاک شنی است [۱۶].



شکل (۴-۳) ضریب ایمنی خاک رس و ماسه‌ای برای ارتفاع مختلف در برابر ساختار شیب جانبی [۱۶]

جدول (۳-۴) ضریب ایمنی برای خاک رسی [۱۶]

H2	B	FS
1.5H1	20	2.57
2H1	20	1.5
2.5H1	20	1.123
3H1	20	0.916
3.5H1	20	0.803

جدول (۳-۵) ضریب ایمنی برای خاک ماسه ای [۱۶]

H2	B	FS
1.5H1	20	3.93
2H1	20	2.126
2.5H1	20	1.49
3H1	20	1.123
3.5H1	20	0.936

نتایج نشان داد که با کاهش زاویه و افزایش ارتفاع شیب ضریب ایمنی افزایش می‌یابد و همینطور خاک رس (چسبنده) دارای ضریب ایمنی بالاتری نسبت به خاک ماسه‌ای (غیر چسبنده) است که به دلیل افزایش مقاومت بالاتر خاک رس می‌باشد. در نهایت نتیجه گرفته شد که عملکرد شیب عمدتاً تحت تاثیر زاویه شیب و نیز انواع خاک است [۱۶].

یو^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۸ به تحلیل پایداری شیب با تکنیک کاهش مقاومت برشی و معیار موهر کولمب و هوک براون تعمیم یافته پرداختند. تحلیل پایداری شیب در دو حالت خشک و اشباع بررسی شد. نتایج نشان داد که مقدار ضریب ایمنی به دست آمده با معیار موهر کولمب بیشتر از مقدار هوک براون تعمیم

^۱ You

یافته می باشد. این تفاوت به برآورد بیش از حد پارامترهای مقاومت برشی توسط معیار خطی موهر کولمب تحت تنش‌های محدود کننده کم در مقایسه با هوک براون غیر خطی می‌باشد [۳۶].

آذر فار^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۹ روشی جدید برای تحلیل پایداری شیب ارائه کردند. در این مطالعه، نظریه و آزمایش با هم ترکیب شد تا مشکلات موجود را با استفاده از مدل‌سازی عددی و آزمایشگاهی برطرف کنند. ناحیه مورد مطالعه از سنگ‌های متنوع و ساختارهای زمین شناسی مختلف (مانند گسل، صفحات لایه بندی) تشکیل شده است. در این مطالعه، پایداری شیب یک پله منفرد در مقیاس‌های کوچک و آزمایشگاهی، سپس کل معدن روباز در مقیاس بزرگ و در حضور مناطق گسلی مورد بررسی قرار گرفته شد. روش عددی ایزاری قدرتمند برای مدل‌سازی شیب مورد نظر می‌باشد. مدل‌سازی با استفاده از نرم افزار FLAC 3D انجام شده است. در این مطالعه از روش‌های WZ^۲، UJ^۳ و IF^۴ برای شبیه سازی رفتار گسل و روش SSR برای محاسبه مقادیر ضریب ایمنی استفاده شده است. ضریب ایمنی شیب بر اساس تغییرات پارامترهای طراحی، مانند خواص مکانیکی توده سنگ و گسل، انواع گسل و چارچوب مدل‌سازی (به عنوان مثال چگالی مش، نسبت هم گرایی) ارزیابی شد. در میان روش‌های مدل‌سازی گسل، UJ بیشترین حساسیت را به شرایط اولیه و WZ کمترین را نشان داد. اگرچه روش UJ به اطلاعات بیشتری در مدل سازی گسل نیاز دارد، حساسیت بالای آن تنها زمانی قابلیت بهتر این روش را نشان می‌دهد که شرایط اولیه به طور قابل اطمینانی جمع‌آوری شده باشند [۲۶].

^۱ Azarfar

^۲ weak zone

^۳ ubiquitous-joint

^۴ interface

فصل چهارم

آشنایی با معدن مس

میدوک

۴-۱- مقدمه

مس قدیمی ترین فلزی است که انسان پس از عصر سنگ به آن دست یافت. این فلز حدود ۸۰۰۰ سال پیش وارد زندگی انسان شد و اگر چه میزان ذخیره آهن در پوسته زمین ۷۰۰ بار بیش از مس است، اما مس و حتی آلیاژهایی مانند مفرغ، بسیار زودتر از آهن (حدود ۴۰۰۰ سال) توسط انسان کشف شدند. ناحیه کرمان از نظر کانی سازی مس، یکی از گسترده ترین و مهم ترین مناطق ایران است که از دیر باز مورد توجه صنعت معدنکاری بوده است. در ادامه مشخصات معدن میدوک، سپس پارامترهای ژئومکانیکی مورد استفاده در تحلیل پایداری بیان می شود.

۴-۲- آشنایی با معدن مس میدوک

۴-۲-۱- آب و هوا و موقعیت جغرافیایی کانسار میدوک

معدن مس مس میدوک در ۴۲ کیلومتری شمال شرق شهرستان شهر بابک و ۱۳۲ کیلومتری شمال غرب معدن مس سرچشمه، در استان کرمان، قرار گرفته است (شکل ۴-۱). فاصله مستقیم کانسار تا شهرستان شهر بابک ۲۷ کیلومتر است که با یک جاده آسفالته به شهر بابک مرتبط می شود. این کانسار در ناحیه ای کوهستانی قرار گرفته و بلندترین نقطه آن ۲۸۴۲ متر از سطح دریا ارتفاع دارد. طول و عرض جغرافیایی معدن میدوک به ترتیب ۵۵/۱۰ و ۳۰/۲۵ می باشد. سیمای ظاهری این منطقه در اغلب نقاط شامل تپه ماهورهای نسبتاً مدوری است که با شیب ملایم به دره های کم عمق منتهی می گردد. نام قدیم این معدن لاجاه بوده است که اخیراً به علت مجاور بودن با روستای میدوک با این نام نامگذاری شده است. حداکثر دمای این منطقه ۳۵ و حداقل آن به ۱۵ درجه سانتیگراد زیر صفر می رسد. معدن مس میدوک از نظر زمین شناسی در زون ایران مرکزی واقع و از خصوصیات این زون فعالیت های شدید ماگمایی و تکتونیکی می باشد. میانگین بارندگی سالیانه در این منطقه ۲۵۶ میلیمتر بوده و از نظر آب و هوایی، این منطقه دارای زمستانی سرد و طولانی و تابستانی ملایم است [۳۷].



شکل (۴-۱) موقعیت جغرافیایی شهر بابک [۳۷]

۴-۲-۲- تاریخچه عملیات اکتشافی در معدن مس میدوک

عملیات اکتشافی این معدن در سال ۱۳۴۴ با صدور پروانه اکتشافی از طرف وزارت صنایع و معادن برای معدن مس میدوک و سایر معادن مس اطراف به شرکت سهامی مهشهر نیز آغاز شد. شرکت مهشهر با کمک کارشناسان یوگوسلاوی معدن میدوک را زیر پوشش عملیات اکتشافی قرار داد و در نهایت ذخیره‌ای در حدود ۷۰ میلیون تن را برای آن برآورده نمود. در سال ۱۳۴۷ پروانه بهره‌برداری این معدن به شرکت سازمه که از تلفیق سازمان گسترش و نوسازی صنایع ایران و شرکت مهشهر به وجود آمده بود، انتقال یافت که می‌توان این تاریخ را سرآغاز گام نهادن بخش دولتی در امر سرمایه‌گذاری بر روی مس میدوک نامید [۳۷].

بعد از آن با مشارکت متال شافت آلمانی در این تشکیلات شرکتی به نام متال سازمه به وجود آمد که کارشناسان آلمانی این شرکت در ادامه اکتشافات قبلی تعداد ۱۲ حلقه چاه کم عمق (از ۱۳۲ تا ۲۴۵ متری) با مترآژ کلی ۲۶۲۰ متر و ۲۳۰۰ متر تونل افقی و تعدادی ترانشه را حفر نمودند و در نهایت کلیه نقشه‌ها و گزارشات تحویل این شرکت شد که متأسفانه از این مدارک بیش از چند نقشه زمین‌شناسی سطحی، نقشه آنالیز و تونل‌ها و گزارش ژئوفیزیک در دسترس نیست. نتایج کارهای اکتشافی این شرکت مؤید وجود دو میلیون تن دیگر کانی اکسید با عیار ۱٪ و ۲۰ میلیون تن دیگر در بخش هیپوژن کشف گردید (تعیین هیپوژن به علت عمق کم حفاری‌ها، ناقص بوده است) [۳۷].

به دنبال تأسیس شرکت ملی صنایع مس ایران، کانسار مس میدوک نیز در اقمار شرکت مذکور قرار گرفته و تحت پوشش این شرکت درآمد. در سال ۱۳۵۷ قراردادی با شرکت کبار جهت حفاری هشت هزار متر چاه عمودی منعقد گردید که به دنبال پیروزی انقلاب شکوهمند اسلامی کلیه فعالیت‌ها در این منطقه رأساً توسط واحد اکتشافی صنایع مس ایران ادامه یافت و در اواخر سال ۱۳۵۹ شرکت کبار توسط پیمانکار لهستانی (کوپکس) عملیات حفاری اکتشافی را آغاز نمود که در نتیجه مجموعه فعالیت‌های انجام شده از بدو امر تا تیر ماه ۱۳۶۲ منجر به حفر حدود ۳۲ حلقه چاه عمودی با مترآژ کلی ۸۰۶۴ متر و شش حلقه تونل افقی با مترآژ ۲۳۰۰ متر گردید. همچنین در این مقطع زمانی فعالیت‌های مربوط به پی‌جویی منابع آب برای مرحله ساخت نیز آغاز گردید و با عقد قراردادی با شرکت جویاب تعداد سه حلقه چاه در دشت بنه یکه و آبدر با آبدهی مناسب در نظر گرفته شد. در طول سال‌های ۱۳۶۳ الی ۱۳۶۸ به واسطه جنگ تحمیلی طبق نظر سازمان برنامه و بودجه عملیات اکتشافی متوقف گردید لیکن در نیمه دوم سال ۱۳۶۸ فعالیت مجدد این معدن تحت عنوان طرح تجهیز و تغلیظ کانسار مس میدوک در دو فاز، حفاری با سی و چهارمین چاه عمودی به عمق ۲۱۵ متر با سرعت، آغاز و با حفر چاه‌های سی و پنجمین تا پنجاه و دومین ادامه یافت. از جمله فعالیت‌های انجام شده در این فاز، بستن قراردادی بین شرکت ملی صنایع مس و شرکت

فنلاندی اتوکمپو است که جهت مطالعات فنی اقتصادی و اکتشاف تکمیلی صورت گرفته است. همچنین در این مرحله به منظور تکمیل اطلاعات حفاری‌های اکتشافی اقدام به عقد قراردادی با شرکت سنگ آهن مرکزی بافق یزد جهت حفر ۱۷ حلقه چاه با مترآژ کلی ۷۴۱۴/۵ متر گردید که از این تعداد چاه، ۴ حلقه عمودی و بقیه زاویه‌دار می‌باشند و زاویه بین ۶۰ تا ۸۰ درجه (نسبت به افق) تغییر می‌کند [۳۷].

همچنین به منظور نمونه‌گیری و انجام تست پیلوت از ذخیره معدنی هیپوژن، اقدام به حفر تونلی با زاویه ۲۳ نسبت به افق و طول ۲۸۰ متر توسط شرکت ملی زغال سنگ کرمان گردید. نمونه‌گیری جهت تست پیلوت از ذخیره سوپرژن فوقانی و میانی از تونل شماره ۴، و برای ذخیره سوپرژن تحتانی از تونل مورب انجام گرفت. از آنجا که مطالعات فنی و اقتصادی انجام شده توسط شرکت اتوکمپو در حد مطالعات کلی بوده و جهت سرمایه‌گذاری در امر طراحی و استخراج معدن و همچنین ساخت دستگاه‌ها و کارخانجات از سنگ‌شکن تا تغلیظ نیاز به مطالعات گسترده‌تر و جزئی‌تر بود. از سال ۱۳۷۲ جهت مشاوره و مطالعه بیشتر و همچنین بررسی مجدد فعالیت‌های شرکت اتوکمپو، با شرکت استرالیایی مین پروک قراردادی منعقد گردید. تا در جهت بهینه نمودن طرح، تغییراتی در سیستم کارخانه و محل نصب به عمل آید. در سال ۱۳۷۷ یک طرح جامع جهت ذخیره معدن و همچنین عملیات استخراج از سوی شرکت معدنکاری اولنگ ارائه گردید که میزان ذخیره از ۱۴۵ میلیون تن به ۱۷۱ میلیون تن با عیار متوسط ۰/۸۳ درصد افزایش داده شد که در قالب طرح ۳۰ ساله میزان ۱۴۴ میلیون تن از این ماده معدنی با عیار معدنی متوسط ۰/۸۵ درصد به روش روباز با پله‌هایی با ارتفاع ۱۵ متر استخراج خواهد شد و مابقی در فازهای بعدی قابل استخراج می‌شود [۳۷].

به طور کلی تاکنون تعداد ۵۵ حلقه چاه با زوایا و مترآژ مختلف حفر گردیده است که از این میزان تعداد ۵۰ حلقه چاه با مترآژ ۱۶۳۱۸ متر آن در محدوده معدن و ۵ حلقه با مترآژ ۱۴۸۹ متر در خارج از محدوده معدنی حفاری شده است که جمع کل این حفاری‌ها ۱۷۸۰۷ متر می‌باشد. همچنین تعداد ۶ تونل افقی به

متر از ۱۳۵۰ متر و یک تونل زاویه‌دار به طول ۲۸۰ متر با شیب ۲۳ درجه، که در آن زون‌های اکسید، سوپرژن و هیپوژن قابل رویت است، حفر شده است [۳۷].

۳-۲-۴- وضعیت فعلی معدن

بهره‌برداری از معدن تا تراز $Z=2540$ متری پیش رفته‌است. در واقع عملیات معدن‌کاری روی چهار پله با تراز ۲۵۴۰، ۲۵۵۵، ۲۵۷۰، ۲۵۸۵ متر در حال انجام است. پله‌های بالای چهار پله مذکور در قسمت شرق معدن به حد نهایی خود رسیده‌اند (شکل ۲-۴ و ۳-۴). در مورد وضعیت آب زیرزمینی، هر چند طبق مطالعات اکتشافی انتظار می‌رفت که در تراز $Z=2540$ متری با سطح آب زیرزمینی برخورد شود ولی هنوز اینگونه نشده است و دلیل آن هم احتمالاً کم آبی سال‌های اخیر باشد. قابل ذکر است که اکتشافات اخیر حاکی از وجود کانسار تا افق ۱۷۵۵ متری و احتمالاً پایین‌تر از این افق می‌باشد. به عبارت دیگر معدن مس میدوک می‌تواند بیش از ۵۰۰ متر پایین‌تر از عمق پیش‌بینی ابتدایی گسترش یابد [۳۸].



شکل (۲-۴) وضعیت پله‌های معدن در سال ۱۳۹۹



شکل (۳-۴) نمای کلی معدن

۴-۲-۴- زمین‌شناسی کانسار مس پورفیری میدوک

منطقه میدوک قسمتی از بخش مس خیز استان کرمان است که از نظر زمین‌شناسی می‌توان آن را قسمتی از سیستم کوهزایی آلپ- هیمالیا دانست. در ناحیه مس خیز کرمان سنگ‌های گوناگون آذرآواری (با ترکیب آندزیت، بازالتی)، گدازه‌های جریان‌ی سنگ‌های آهکی و ماسه سنگ عمده‌ترین رخساره سنگ‌شناسی بوده و عموماً متعلق به ائوسن می‌باشد. کمر بند فلززایی ایران مرکزی از مهم‌ترین خطوط کمربندی سیستم کوهزایی آلپ- هیمالیا مربوط به این زمان است. از کمربندهای شناخته شده آن همراه با زون ولکانیکی پلوتونیک ارومیه- قلعه دختر است که کانسار مس سرچشمه و میدوک در آن واقع هستند [۳۹].

توده معدنی میدوک تقریباً به شکل مدور به قطر حدود ۴۰۰ متر می‌باشد. این توده معدنی یک دره که به سمت شمال بازشدگی دارد، قرار دارد. واحدهای پتروگرافی کانسار مس میدوک را می‌توان به سه گروه تقسیم نمود [۴۰]:

الف: سنگ‌های آذرین خروجی شامل:

- گدازه‌های جریان‌ی با ترکیب آندزیتی و آندزیت بازالتی با خمیره ریزدانه و رنگ‌های سیاه و سیاه متمایل به سبز.
- آندزیت پورفیری کلریته
- سنگ‌های آذرآواری شامل توف‌های خاکستری
- سنگ‌های دگرسان شده ریزدانه که بعضاً سیلیسی شده و کانی‌های اکسید آهن و ژاروسیت در درزه‌های آن‌ها تشکیل گردیده است.

ب: سنگ‌هایی که دارای منشا رسوبی - آذرین هستند:

- ماسه سنگ‌های قرمز با خمیره بسیار ریزدانه که اکسیدهای آهن شدید و به تعداد زیادی در آن‌ها نفوذ نموده است.
- برش آذرین که حاصل تحمل نیروهای زمین ساختی بوده و نشان‌دهنده عمل جابجایی خردشدگی و به هم چسبیدگی مجدد قطعات منفصل سنگ‌هاست.
- جوش سنگ‌های آهکی

ج: سنگ‌های آذرین درونی شامل:

از خصوصیات این سنگ‌های نفوذی عیاردار، فراوانی هورنبلند و بیوتیت و کم‌یابی پیروکسن در آن‌ها و همچنین شکستگی و ترک‌خوردگی نسبتاً زیاد در زمان کانی‌سازی در این سنگ‌ها است. این سنگ‌های

نفوذی عیاردار عمده‌ترین سنگ میزبان این نوع کانسارها است که در مورد کانسار مس میدوک این سنگ‌ها شامل دیوریت پورفیری دگرسان شده و دایک‌ها می‌باشد. دیوریت پورفیری دگرسان شده عمده‌ترین سنگ میزبان کانی‌های مس در کانسار میدوک و دارای رنگ خاکستری است که دگرسانی سرسیتی، رسی و بعضاً کلریتی را با شدت متفاوت تحمل نموده است [۴۰].

دایک‌ها از جنس دیوریت پورفیری بوده و در حقیقت همان ترکیب سنگ‌شناسی سنگ میزبان را دارد. دگرسانی در آن‌ها به شدت دگرسانی سنگ میزبان و کانی‌سازی در آن‌ها به شدت کانی‌سازی در سنگ میزبان نمی‌باشد. این خصوصیات کلی دایک‌هایی است که در داخل محدوده توده نفوذی آلتره اصلی کانسار مس میدوک ظاهر گردیده است. جهت‌داری این دایک‌ها عمدتاً شمال‌غربی - جنوب‌غربی بوده و عرض آن‌ها در مقایسه با گسترش طولی آن‌ها نسبتاً کم است [۴۰].

به طور خلاصه در کانسار مس میدوک باطله را آندزیت آلتره و ماده معدنی را دیوریت پورفیری تشکیل می‌دهد. نقشه زمین‌شناسی این معدن در شکل ۴-۴ نشان داده شده است. به طور کلی از آلتراسیون‌های دیده شده در کانسار میدوک می‌توان به آلتراسیون رسی، سرسیتی، پتاسیک (به‌صورت بیوتیت)، پروپیلیتیک (به‌صورت کلریت و اپیدوت) و سیلیسی اشاره کرد [۴۰].



شکل (۴-۴) نقشه زمین‌شناسی معدن میدوک [۴۱].

۴-۲-۵- کانی‌شناسی ماده معدنی

با توجه به اطلاعات زمین‌شناسی و بررسی‌های انجام شده بر روی مغزه‌های چاه‌های حفاری، کانسار مس میدوک را می‌توان به صورت قارچی با کلاhek بیضی ناقص به ابعاد 400×450 متر مربع که شامل زون سوپرژن در قسمت بالا و زون هیپوژن در قسمت پایین تشبیه نمود که شامل سه بخش (زون) مختلف به شرح زیر است [۳۸]:

- زون اکسید که به علت نفوذ آب و تاثیر عوامل جوی بر روی آن و انجام عمل شست و شوی کانی‌ها (کانی‌های سولفیدی) و ته نشینی آن‌ها در بخش زیرین به وجود آمده و ضخامت تقریبی آن بین پانزده تا یکصد متر متغیر است و کانی‌های موجود در این زون عبارتند از: مالاکیت، آزوریت و اکسیدهای آهن (هماتیت و منیتیت). مقدار کل ذخیره سنگ اکسیدی در توده معدن مس میدوک قریب یک و نیم میلیون تن محاسبه شده است.

ارزیابی پراکندگی و توزیع این کانی‌ها در زون اکسید در جدول ۴-۱ نشان داده شده است:

جدول ۴-۱ پراکندگی و توزیع این کانی‌ها در زون اکسید [۴۱].

کانی	درصد
مالاکیت	۷۰
ازوریت	۲۵
غیره	۵

- زون سوپرژن که مهم‌ترین کانی‌های آن کالکوسیت، کوالین و پیریت می‌باشد و ضخامت آن بین صد تا سیصد متر تغییر می‌کند و ذخیره قطعی در این ناحیه حدود هفتاد و یک میلیون تن با عیار ۰/۹۹٪ می‌باشد [۳۷].
- زون هیپوژن که کانی‌های آن شامل کالکوپیریت و بورنیت است و ذخیره قطعی در این زون حدود ۷۴ میلیون تن با عیار ۰/۶۹٪ می‌باشد [۳۷]. کنتاکت بین زون سوپرژن و هیپوژن تدریجی بوده و غالباً تفکیک دقیق این دو زون مشکل می‌باشد، شاخص عمده این منطقه وجود کانی‌های کالکوپیریت بورنیت و کالکوسیت اولیه است. در این زون سنگ بسیار سخت است. از مشخصات این زون، بالا بودن Core Recovery (بازیابی مغزه) و آلتراسیون شدید سیلیسی است و بطور محلی رسی می‌باشد. کانی فلوتورین به مقدار نسبتاً فراوان در این زون دیده می‌شود. تاکنون حد زیرین منطقه کانی‌سازی زون هیپوژن مشخص نشده است و عمیق‌ترین چاه حفاری این معدن ۱۰۱۳/۵ متر با زوایه ۷۰ درجه به سمت شرق بوده که به صورت عمودی حدود ۹۵۰ متر است ولی تا این عمق نیز از شدت کانی‌سازی آن کاسته نشده است [۳۹].

۴-۲-۶- عیار حد^۱

برای تعیین عیار حد یک معدن تعدادی از عوامل شامل روند پیشرفت تکنولوژی جهت استحصال کانی یا فلز مورد نیاز از ماده معدنی، بازار جهانی آن فلز یا کانی و غیره نقش دارند. با توجه به این عوامل عیار حد برای معدن مس میدوک ۰/۲۳ درصد مس در نظر گرفته شد. در پی ارائه طرح استخراجی شرکت معدنکاری اولنگ، عیار حد ۰/۲۵ درصد در نظر گرفته شده است. در سال ۱۳۷۷ یک طرح جامع جهت ذخیره معدن و همچنین عملیات استخراج از سوی شرکت معدنکاری اولنگ ارائه گردید که میزان ذخیره از ۱۴۵ میلیون تن به ۱۷۱ میلیون تن با عیار متوسط ۰/۸۳ درصد افزایش داده شد که در قالب طرح ۳۰ ساله میزان ۱۴۴ میلیون تن از این ماده معدنی با عیار متوسط ۰/۸۵ درصد به روش روباز با پله‌هایی با ارتفاع ۱۵ متر استخراج خواهد شد و مابقی در فازهای بعدی قابل استخراج می‌شود [۳۹].

۴-۲-۷- تکتونیک

متاسفانه تاکنون کار تکتونیکی جامعی در منطقه میدوک صورت نگرفته است. در زیر به‌طور خلاصه به کارهای انجام شده اشاره گردیده است، به نظر می‌رسد که شکستگی‌های معدن میدوک تحت تاثیر دو مرحله عمده تکتونیکی به وجود آمده‌اند که این دو مرحله عبارتند از [۳۸]:

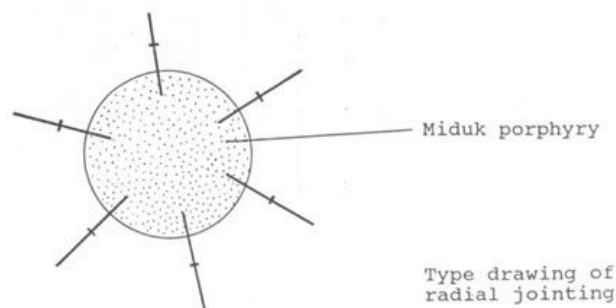
- شکستگی‌های تکتونیکی توده ماگمایی میدوک پورفیری
 - شکستگی‌های جوان‌تر با روند شمالی جنوبی
- نوع غالب شکستگی‌های این کانسار درزه‌های ساده همراه با تعدادی گسل فرعی است. هرگونه گسل اصلی، زون خرد شده و غیره که از محدوده معدن بگذرد و بتواند روی طراحی پیت معدن تاثیر بگذارد، یافته نشده است. چین خوردگی ناحیه‌ای شدید نیست و تاثیر کمی روی زمین‌شناسی محلی دارد. تعدادی حفره در زون اکسید توسط حفاری یافته شد. آن‌ها احتمالاً باقیمانده رگه یا لنزهای قابل حل در آب هستند که در

^۱ Cut of grade

کانسار مس پورفیری یا نزدیک به آن کاملاً رایج می‌باشند. شکستگی‌های محدوده معدن را می‌توان به چهار دسته زیر تقسیم بندی کرد [۳۸]:

- شکستگی‌های شعاعی^۱
- شکستگی‌های مخروطی^۲
- شکستگی‌های شمال - جنوبی^۳
- شکستگی‌های شرقی - غربی^۴

دو نوع اول یعنی شکستگی‌های شعاعی و مخروطی احتمالاً با مرحله نفوذ توده میدوک پورفیری در ارتباط می‌باشند. شکستگی‌های شعاعی عمده‌ترین گروه شکستگی‌ها را تشکیل می‌دهند که اکثراً به صورت عمود بوده و در همه محدوده معدن به چشم می‌خورند (شکل ۴-۵) [۳۸].



شکل (۴-۵) شکستگی‌های شعاعی در محدوده معدن [۴۱]

شکستگی‌های مخروطی، شکستگی‌های مایلی هستند که به طور وضوح در توده میدوک پورفیری اطراف دره معدن به چشم می‌خورند. این گروه مهم‌ترین مسائل را در پایداری شیب دیواره معدن به وجود می‌آورند. خوشبختانه فراوانی شکستگی‌های مزبور به طرف بیرون کاهش می‌یابد و درزه‌های مخروطی نباید هیچ

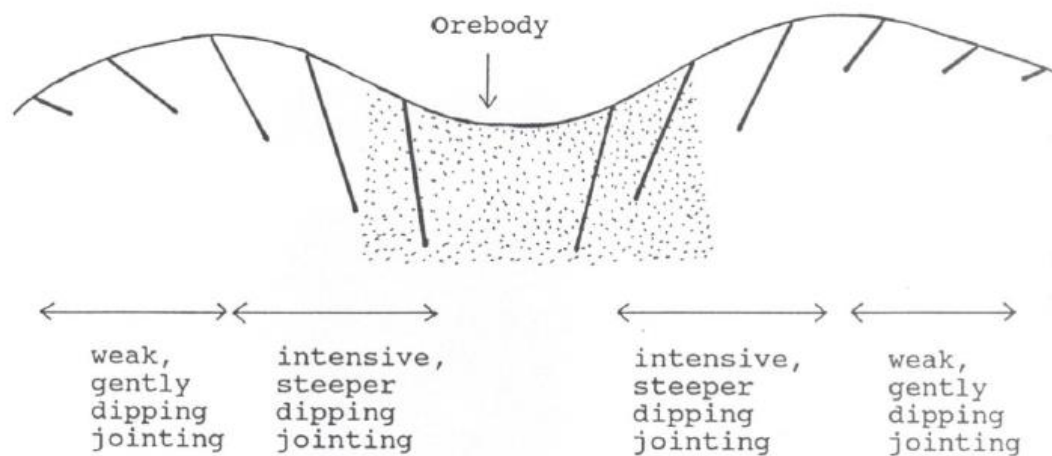
^۱ Radial Jointing

^۲ Conical Jointing

^۳ N-S Jointing

^۴ E-w Jointing

مشکل خاصی برای شیب نهایی معدن داشته باشد. شیب و تراکم این شکستگی‌ها در زیر نشان داده شده است (شکل ۴-۶) [۳۸].



شکل (۴-۶) شکستگی‌های مخروطی در محدوده معدن [۴۱].

شکستگی‌های عمودی با روند شمالی - جنوبی در یک محدوده بزرگ اطراف معدن قابل مشاهده هستند. به عنوان مثال می‌توان از رگه چاه مسی نام برد که کانی‌سازی در امتداد این شکستگی صورت گرفته است. دو دسته شکستگی‌های شمالی - جنوبی و شعاعی فراوان‌ترین شکستگی‌ها در محدوده معدن می‌باشند که میزان فراوانی شکستگی‌های شمالی - جنوبی در پیرامون دایک‌های جوان بیشتر می‌باشد و به نظر می‌رسد که از نظر ژنتیکی در ارتباط با دایک‌های مذکور باشند. شکستگی‌های نوع چهارم یا شرقی غربی احتمالاً از نظر ژنتیکی در ارتباط با شکستگی‌های شمالی - جنوبی هستند. لازم به ذکر است که همه شکستگی‌های عمودی روی محدوده معدن عمل کرده‌اند [۳۸].

۴-۲-۸- وضعیت آب زیرزمینی

سطح آب زیرزمینی در کانسار میدوک $Z=2540$ m برآورده شده است. کوه‌های میدوک بر روی خط تقسیم کننده آب‌های زیرزمینی واقع گردیده‌اند و به همین خاطر جریان آب سطحی با زیرزمینی با مسافت زیاد

در محدوده معدن وجود ندارد. در طول معدن کاری در بالای سطح آب زیرزمینی، تنها جریان آب محدوده معدن، آب باران است. بعد از رسیدن به سطح آب زیرزمینی مقدار آب وارده به محدوده معدن به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. اما پایین رفتن سطح آب زیرزمینی در طول معدن کاری زون هیپوژن (کلاً حدود ۲۰۰ متر) فقط ذخیره آب زیرزمینی محلی را تحت تاثیر قرار می‌دهد. به همین خاطر است که هم مقدار جریان آب ورودی به پیت معدن و هم میزان تاثیر روی خواص ژئوتکنیکی سنگ دیواره نسبتاً کم خواهد شد. بنابراین تأثیر آب‌های زیرزمینی در شیروانی‌های سنگی معدن میدوک تقریباً به طور کامل از بین می‌رود [۴۱].

فصل پنجم

تحلیل پایداری شیب با روش تعادل

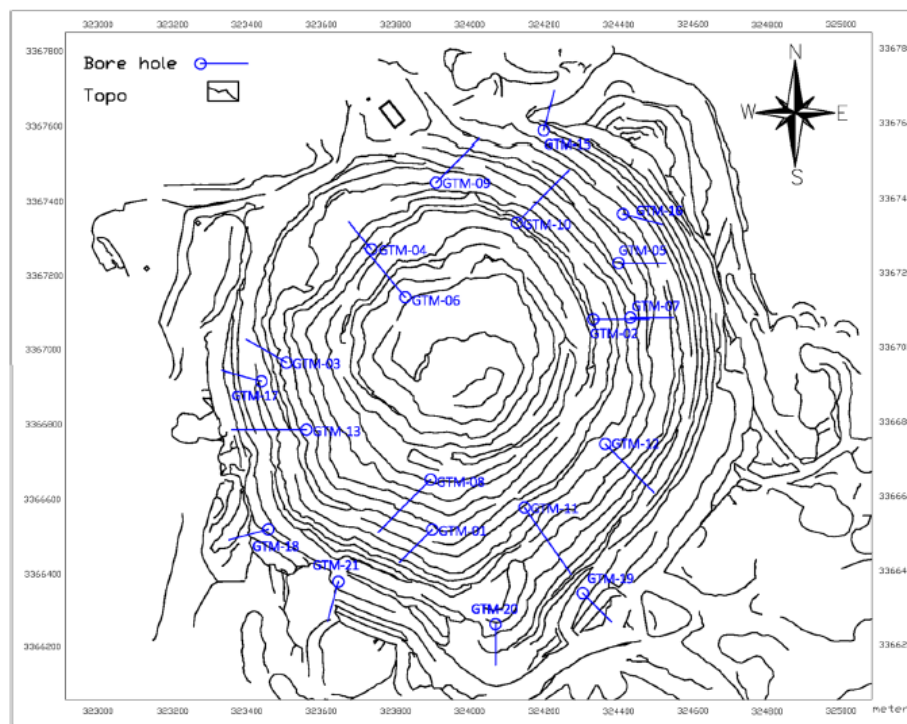
حدی و عددی

۵-۱- مقدمه

پایداری شیب یکی از مهم‌ترین زمینه‌های مهندسی برای طراحان معادن می‌باشد. انتخاب شیب مناسب برای هر معدن چه از نظر پایداری شیب و یا از نظر اقتصادی مهمترین بخش فرایند معدنکاری را تشکیل می‌دهد. در روش روباز به منظور استخراج ذخیره معدنی از پله استفاده می‌کنند. مطالعه پایداری شیب در روش روباز به منظور استفاده شیب بهینه صورت می‌گیرد. در این فصل به بررسی پایداری شیب پرداخته می‌شود. ابتدا اطلاعات معدن، سپس تخمین پارامترهای ژئومکانیکی، ناپیوستگی‌ها و مدل سازی هندسه شیب معدن بیان می‌شود. سپس پایداری شیب با روش تحلیل تعادی حدی توسط نرم افزار SLIDE و تحلیل عددی با نرم افزار FLAC دو بعدی بررسی می‌شود و نتایج آنها شرح داده خواهد شد.

۵-۲- جمع آوری اطلاعات

دو عملیات حفاری ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی در معدن میدوک انجام شده است، که داده‌های ژئومکانیکی در دسترس هستند، اولی با مجموع ۲۰ چال حفاری جهت دار و عمق بیشتر از ۵۵۰۰ متر و دومی با ۳۹ چال عمودی و عمق بیشتر از ۲۷۰۰۰ است. شکل ۵-۱ مسیر و شیب چال‌های ژئوتکنیک را نسبت به نقشه معدن نشان می‌دهد، واحدهای سنگی مورد مطالعه در این تحقیق در دو گروه سنگ‌شناسی دیوریت و آندزیت - توف طبقه‌بندی شده‌اند [۴۲].



شکل (۵-۱) موقعیت موقعیت مکانی چال‌های حفاری ژئوتکنیک [۴۲]

تعدادی از نمونه‌های اصلی برای آزمایش‌های آزمایشگاهی در طول عملیات حفاری انتخاب شدند تا خواص ژئومکانیکی واحدهای سنگی دست‌نخورده، از جمله مقاومت تراکم تک محوری (UCS)^۱، مقاومت فشاری سه محوری (TCS)^۲، مقاومت کششی برزیلی (BTS)^۳، شاخص بار نقطه‌ای (PLI)^۴ و آزمایش برش مستقیم (DST)^۵ بدست آید.

۵-۲-۱- مقاومت فشاری تک محوره

تست مقاومت فشاری تک محوره رایج‌ترین ابزار در پروژه‌های مهندسی سنگ است. در مجموع ۶۵۶ آزمایش مقاومت فشاری تک محوره در معدن میدوک براساس روش‌های پیشنهادی جامعه بین‌المللی مکانیک

^۱ Uniaxial compression resistanc

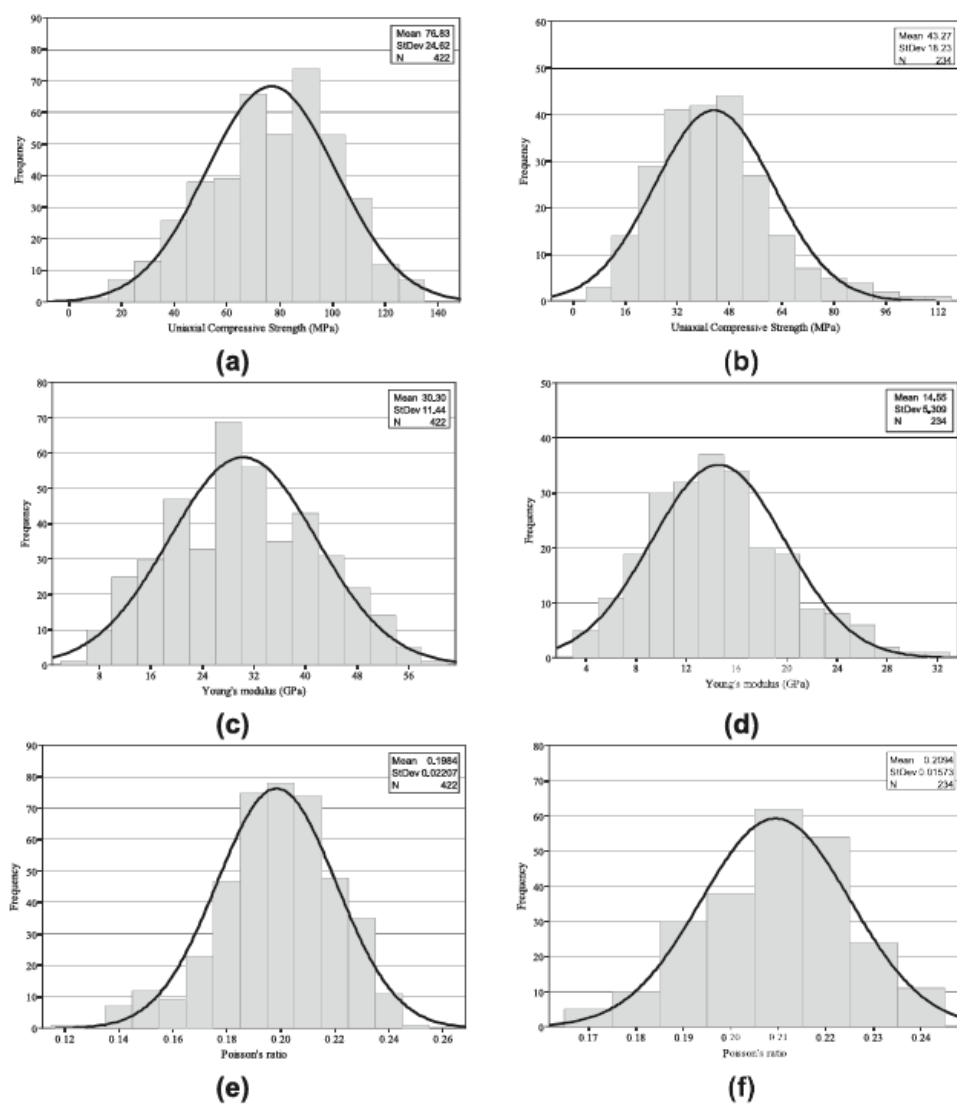
^۲ Three-axis compressive strength

^۳ Brazilian tensile strength

^۴ Point load index

^۵ Direct cutting test

سنگ [۴۳]، که ۲۳۴ آزمایش متعلق به آندزیت - توف و ۴۲۲ آزمایش متعلق به واحد دیوریت انجام شده است. نسبت ابعاد برای نمونه‌ها با قطر ۵/۹ تا ۶/۱ سانتی متر بین ۲ تا ۲/۵ نگه داشته شده است که طول آن‌ها در محدوده ۱۱/۸ تا ۱۵/۲۵ سانتی متر است. هیستوگرام مقاومت فشاری تک محوره، نسبت پواسون و مدول یانگ مقادیر نمونه های دیوریت و آندزیت-توف در شکل ۲-۵ ارائه شده است. از توزیع نرمال برای نشان دادن تغییرپذیری در مقاومت فشاری تک محوره، مدول یانگ و نسبت پواسون استفاده شده است [۴۲].

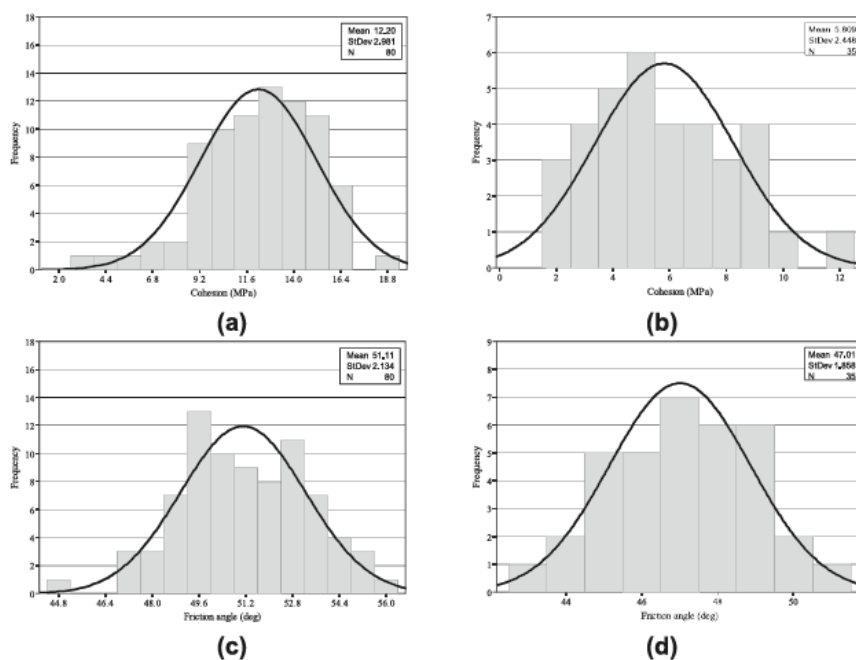


شکل (۲-۵) منحنی‌های توزیع احتمال و هیستوگرام برای (a,b) مقاومت فشاری تک محوره ، (c-d) مدول یانگ، (e-f) نسبت پواسون ، (a,c,e) دیوریت و (b,d,f) آندزیت - توف [۴۲]

۵-۲-۲- زاویه اصطکاک داخلی

تست مقاومت فشاری سه محوره عموماً برای تعیین ویژگی‌های مقاومت نمونه‌های سنگ دست‌نخورده استفاده می‌شود (یعنی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی). فشارهای اعمال‌شده به نمونه شامل دو جز، تنش‌های محدود کننده و انحرافی می‌باشد. فشار جانبی از لحاظ هیدرولیکی به سطح خارجی نمونه اعمال می‌شود در حالی که افزایش فشار انحرافی در جهت محوری اعمال می‌شود تا زمانی که شکست رخ دهد. آزمایش‌های مقاومت فشاری سه محوره بر روی ۱۱۵ نمونه استوانه‌ای، ۸۰ آزمایش بر روی نمونه‌های دیوریت و ۳۵ آزمایش بر روی نمونه‌های آندزیت - توف در معدن میدوک انجام شده است [۴۲].

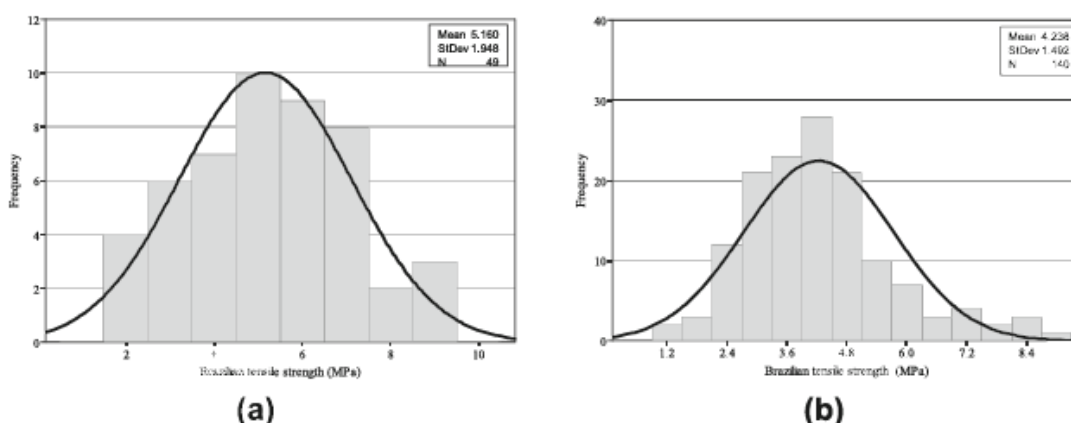
نمودار چسبندگی و مقادیر زاویه اصطکاک داخلی برای نمونه‌های دیوریت و آندزیت - توف در شکل ۵-۳ ارائه شده است. برای توصیف چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی واحدهای سنگی دست‌نخورده در معدن مس میدوک از توزیع نرمال استفاده شده است [۴۲].



شکل (۵-۳) منحنی‌های توزیع احتمال و هیستوگرام چسبندگی و (c-d) زاویه اصطکاک داخلی به ترتیب (a,c) دیوریت و (b,d) آندزیت - توف [۴۲]

۵-۲-۳- مقاومت کششی

مقاومت کششی نمونه‌های سنگ ممکن است با استفاده از روش‌های مستقیم و غیر مستقیم ارزیابی شود. اما روش مستقیم، به دلیل مشکلات در آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام تست، رایج نیست. تست مقاومت کششی برزیلی (BTS) معمولاً برای سنگ‌های سخت استفاده می‌شود تا میزان مقاومت کششی آن‌ها به دست آید. مقاومت کششی برزیلی در ۱۸۹ نمونه در طول عملیات حفاری اندازه‌گیری شد که از میان آن‌ها ۱۴۰ نمونه مغزه با ترکیب سنگ‌شناسی آندزیت - توف و ۴۹ نمونه مغزه با ترکیب سنگ‌شناسی دیوریت شناسایی شدند. شکل ۴-۵ هیستوگرام مقاومت کششی را برای نمونه‌های دیوریت و آندزیت - توف نشان می‌دهد [۴۲].



شکل (۴-۵) منحنی توزیع احتمال و هیستوگرام برای مقاومت کششی نمونه‌های دیوریت (a) و (b) آندزیت - توف [۴۲]

۵-۲-۴- ثابت m_i معیار هوک و براون

معیار شکست هوک - براون براساس یک مطالعه آزمایشگاهی در مورد رابطه بین تنش‌های اصلی در نقطه شکست سنگ‌ها توسعه یافته است [۴۴].

معیار سنگ‌های بکر را می‌توان به صورت زیر توصیف کرد:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 1 \right)^{0.5} \quad \text{رابطه (۱-۵)}$$

که σ_c مقاومت فشاری سنگ بکر است، σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش‌های حداکثر و حداقل و m_i مربوط به ماده سنگی است که با آزمایش‌های سه محوری در فشارهای محدود کننده مختلف محاسبه می‌شود.

با فرض $\sigma_1 = 0$ ، σ_3 برابر تنش کششی (σ_t) در رابطه ۱-۵ است، m_i به شرح زیر است:

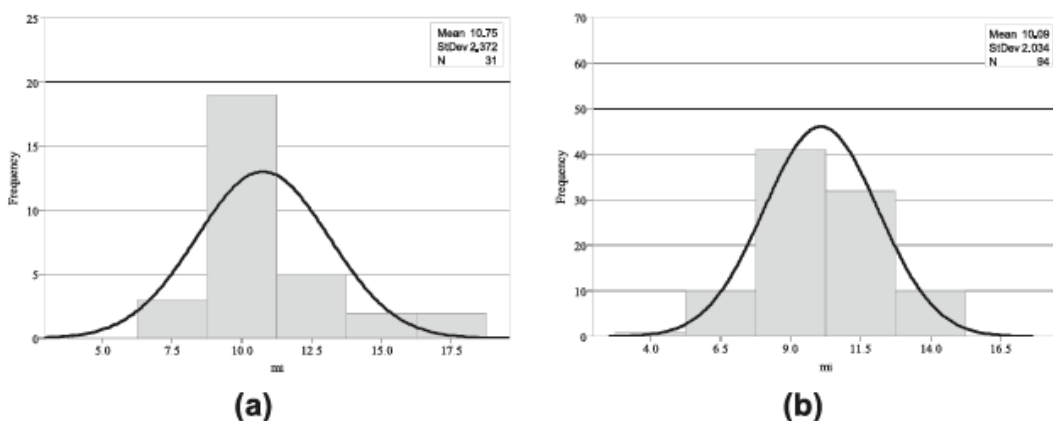
$$m_i = \left(\left(\frac{\sigma_t}{\sigma_c} \right)^2 - 1 \right) \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_t} \right) = -R \left(\frac{1}{R^2} - 1 \right) \quad \text{رابطه (۲-۵)}$$

وقتی نسبت مقاومت فشاری به کششی (R) بیشتر یا برابر با ۸ باشد، می‌توان عبارت $(\sigma_t / \sigma_c)^2$ در رابطه ۲-۵ حذف کرد پس معادله m_i به صورت زیر باشد [۴۵]:

$$m_i \approx \frac{\sigma_c}{|\sigma_t|} = R \quad \text{رابطه (۳-۵)}$$

به دلیل محدودیت‌های مالی و فنی در بازیابی نمونه‌های مناسب، آزمون‌های سه محوره گزینه معمول در پروژه‌های ژئومکانیکی نیستند. به طوری که با استفاده از روش مرسوم نمی‌توان تغییرپذیری m_i را در نظر گرفت. بنابراین، رابطه بالا به ویژه در تغییرات آماری پارامترهای ژئومکانیکی که به دلیل در دسترس بودن نتایج تست UCS و BTS تمرکز دارد در این مطالعه مفید است. لازم به ذکر است که رابطه ۳-۵ فقط برای سنگ‌های دارای $R \geq 8$ قابل استفاده است [۴۲].

شکل ۵-۵ هیستوگرام و نمودار توزیع احتمال داده‌های m_i نمونه‌های دیوریت و آندزیت - توف را نشان می‌دهد [۴۲].

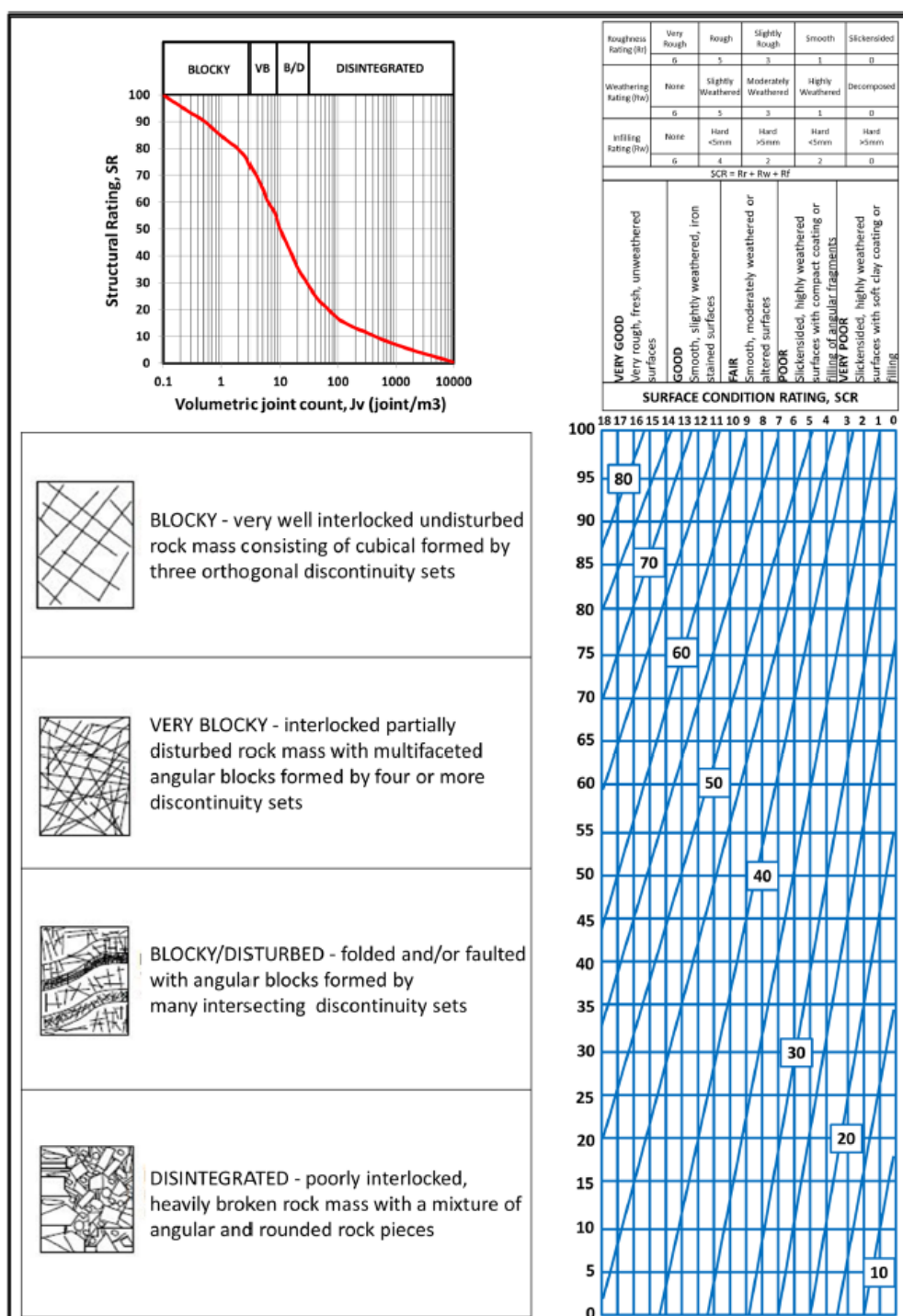


شکل (۵-۵) منحنی و هیستوگرام توزیع احتمال برای مقادیر mi نمونه‌های (a) دیوریت و (b) توف- آندزیت [۴۲]

۵-۲-۵- مطالعات میدانی

شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI) به عنوان یک ابزار شناسایی توده سنگ معرفی شد که شامل ساختار سنگ و شرایط سطح درزه‌ها در طبقه‌بندی توده سنگ است. همچنین می‌توان خصوصیات توده سنگ را به عنوان داده‌های ورودی برای تحلیل عددی با استفاده از چندین رابطه پیشنهادی مربوط به GSI و ویژگی‌های سنگ دست‌نخورده تخمین زد [۴۶].

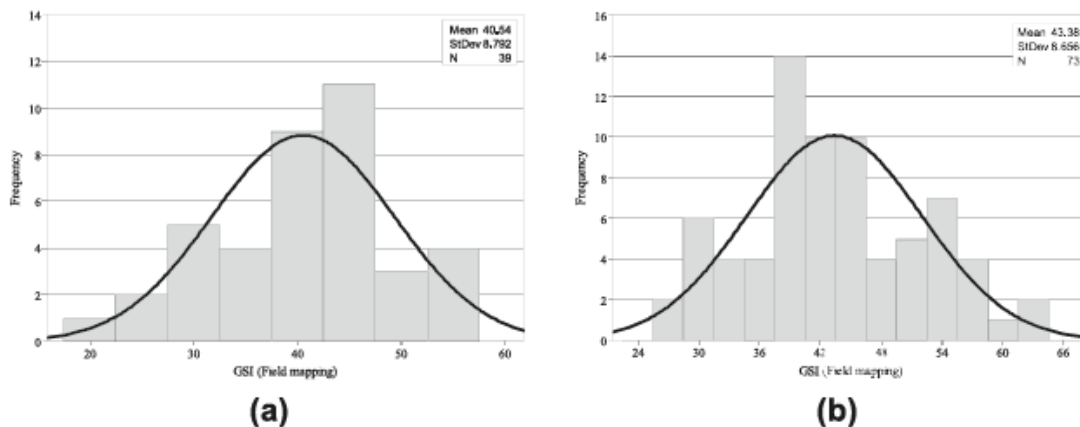
بررسی‌های میدانی به منظور ارزیابی وضعیت سطح درزه‌ها و سازه‌های توده سنگ انجام شده است. که از روش کمی برای تخمین GSI در معدن مس میدوک استفاده شده است. با توجه به کیفیت واحدهای توده سنگ در منطقه مورد مطالعه که عمدتاً در درجه‌بندی بسیار بلوکی و بلوکی آشفته طبقه‌بندی می‌شوند و مقایسه بین مقادیر کمی و کیفی GSI، روش کمی به عنوان مرجع برای نگاشت های میدانی انتخاب شده است [۴۷]. نمودار GSI در شکل ۵-۶ ارائه شده است.



شکل (۵-۶) نمودار شناسایی GSI [۴۲]

مقادیر GSI برابر با ۴۰ و ۴۵ به ترتیب به عنوان مقادیر میانگین GSI برای دیوریت و آندزیت پیشنهاد شد.

شکل ۵-۷ هیستوگرام GSI و منحنی‌های توزیع واحدهای سنگ‌شناسی را نشان می‌دهد [۴۲].



شکل (۵-۷) هیستوگرام مقادیر GSI توده‌های سنگی (a) دیوریت و (b) آندزیت-توف [۴۲]

۵-۳- تخمین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ

تخمین ویژگی‌های توده سنگ، یکی از مهم‌ترین مسائل در مراحل اولیه پروژه مهندسی سنگ می‌باشد. ویژگی‌های توده سنگ به عنوان پارامترهای ورودی برای طراحی پروژه در نظر گرفته شده و تحقیقات ناقص، برخی از مشکلات فنی و اقتصادی مانند طراحی ناپایدار ایجاد می‌کند. در نتیجه، داشتن چشم‌انداز کامل از منطقه از ویژگی‌های ژئومکانیکی یک پروژه که از طریق به‌کارگیری تکنیک تحقیق قوی امکان پذیر است، بسیار مهم است. روش‌های مستقیم و غیر مستقیم معمولاً برای تعیین ویژگی‌های توده سنگ به عنوان روش‌های مرسوم استفاده می‌شوند. روش‌های مستقیم شامل تست‌های آزمایشگاهی و درجا می‌باشد. بدیهی است که تهیه نمونه توده سنگ نماینده در مقیاس آزمایشگاهی تقریباً غیر عملی است. به همین دلیل است که ویژگی‌های کلی توده سنگ در مقیاس بزرگ اغلب از طریق اندازه‌گیری‌های مستقیم در دسترس نمی‌باشد. روش‌های غیرمستقیم شامل همبستگی‌های تجربی، طبقه‌بندی و سیستم‌های مشخص‌سازی برای تخمین مقاومت توده سنگ و خواص تغییر شکل پذیری هستند. تغییر پذیری مکانی با توجه به تنوع

ویژگی‌های توده سنگ به ویژه در معدن مس پورفیری که به دلیل فرایندهای دگرسانی که ویژگی‌های مختلف توده سنگ را تجزیه می‌کنند و منجر به مقدار قابل توجهی عدم قطعیت در خواص توده سنگ می‌شوند، یکی از عوامل عدم قطعیت می‌باشد [۴۲].

در ابتدا، داده‌های سنگ دست بکر به دست آمده در طول یک کار آزمایشی عظیم از نظر آماری تحلیل می‌شوند تا اطمینان حاصل شود که از یک جامعه احتمالی جمع‌آوری شده‌اند. سپس، درجه‌بندی ساختاری توده‌های سنگی و شرایط سطحی سازه‌ها در این زمینه صورت می‌گیرد. در نهایت، یک کد خاص مونت کارلو در آزمایشگاه ماتریس (MATLAB) برای ارزیابی عدم قطعیت ذاتی ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌های سنگی براساس معیار شکست هوک - براون توسعه داده می‌شود [۴۲].

همانطور که گفته شد مدول یانگ، نسبت پواسون، مقاومت فشاری تک محوره، پیوستگی، زاویه اصطکاک، معیار ثابت هوک و براون و شاخص مقاومت زمین شناسی از یک جامعه نرمال انتخاب می‌شوند و می‌توانند به عنوان متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شوند. از این رو، یک روش تصادفی برای بدست آوردن ویژگی‌های توده سنگ براساس پارامترهای آماری سنگ سالم و ناپیوستگی‌ها ارائه شده‌است. محاسبه ثابت‌های هوک - براون واحدهای توده سنگ (a, s, m_b) اولین گام برای تخمین خواص توده سنگ است. هوک و همکاران معادلات ۴-۵، ۵-۵ و ۶-۵ را پیشنهاد کردند و محاسبه ثابت‌های توده سنگ براساس GSI و m_i به صورت زیر می‌باشد [۴۸]:

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right) \quad \text{رابطه (۴-۵)}$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right) \quad \text{رابطه (۵-۵)}$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad \text{رابطه (۶-۵)}$$

پارامتر D در معادلات ۴-۵ و ۵-۵ نشان دهنده عامل آسفتگی است که به اهمیت انفجار و آزاد سازی تنش تجربه شده توسط توده سنگ (مقدار ۰ برای توده سنگ بکر و ۱ برای توده سنگ کاملاً تخریب شده) بستگی دارد. در این پروژه، مقدار D ، برابر با ۰/۷ در نظر گرفته شده است.

پارامترهای ژئومکانیکی، که با روش تحلیل عدم قطعیت به دست آمده، در جدول ۵-۱ نشان داده می-شود [۴۲].

جدول (۵-۱) پارامترهای ژئومکانیکی [۴۲]

نوع سنگ	آندزیت - توف	دیوریت
mi	10.75	10.09
mb	0.47	0.47
s	0.0003	0.0002
a	0.51	0.51
UCS	43.27Mpa	76.83Mpa
GSI	43.38	40.54
γ	27kN/m ³	28kN/m ³

سپس از خواص محیط معادل با استفاده از نرم افزار RocLab که بر پایه معیار هوک و براون بنا نهاده شده است استفاده می شود. پارامترهای مورد نیاز برای تعیین خواص محیط معادل در نرم افزار RocLab به صورت زیر است که در جدول ۵-۲ نشان داده شده است:

σ_{ci} (مقاومت فشاری تک محوری سنگ درجا)، GSI (شاخص مقاومت زمین شناسی)، m_i (خواص ثابت سنگ درجا)، D (فاکتور آسیب)، γ (وزن مخصوص)، E_i (مدول الاستیک سنگ درجا) و σ_{3max} معادل است با مقدار پیش فرض در نرم افزار و مقدار عمق برابر با ۵۰ متر در نظر گرفته شده است.

جدول (۵-۲) پارامترهای ورودی نرم افزار RocLab [۴۲]

نوع سنگ	σ_{ci} (مگا پاسکال)	GSI	m_i	D	γ (کیلوگرم بر متر مکعب)	E_i (مگا پاسکال)
آندزیت - توف	43.27	43.38	10.75	0.7	2700	17308
دیوریت	76.83	40.54	10.09	0.7	2800	24969

پارامترهای به دست آمده از RocLab برای مدل سازی عددی به صورت زیر است (جدول ۵-۳):

Erm (مدول الاستیسیته توده سنگ)، c (چسبندگی توده سنگ) و ϕ (زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ).

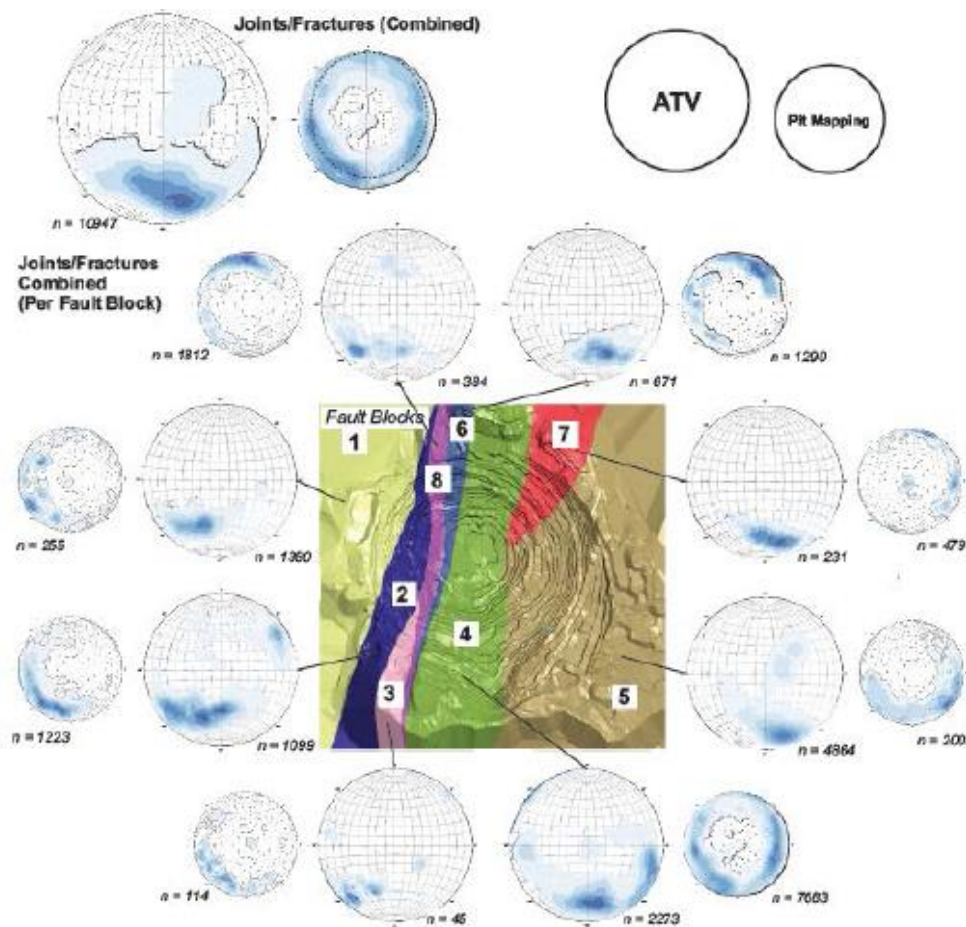
جدول (۵-۳) خروجی نرم افزار RocLab

نوع سنگ	Erm	C	ϕ
آندزیت - توف	1227.23Mpa	0.303Mpa	38.9
دیوریت	1499.07Mpa	0.36Mpa	40.99

۵-۴- ناپیوستگی ها

انواع مختلفی از شکست شیب ممکن است همراه با ساختارهای زمین شناسی مختلف باشند. اولین مرحله برای پایداری می تواند تشخیص ناپیوستگی های موجود در منطقه باشد. ناپیوستگی ها در دو بخش بزرگ مقیاس (گسل ها) و کوچک مقیاس (درزه ها) بررسی می شوند. برای بررسی کلی درزه ها، مطالعه انفرادی درزه ها نتیجه ای به دست نمی دهد و باید آن ها را به روش آماری مطالعه کرد. روش مناسب در تحلیل و ارزیابی داده های حاصل از برداشت درزه ها استفاده از استریونت می باشد. تحلیل ساختاری تمام نقاط نگاشت، با استفاده از استریونت ها، برای تعیین جهت گیری های ساختاری اصلی و هندسه ها انجام شد. ابتدا، تمام نقاط نگاشت که گسل و درزه ها را ثبت می کنند، بر روی یک استریونت نمایش داده شدند و برای روند اصلی تحلیل شدند که برای داده ها، جهت شیب و شیب ارائه شده است. این مرحله از پروژه با کمک نرم افزار

DIPS انجام شد. پیت معدن به ۸ بلوک تقسیم شد (شکل ۵-۸) که شیب و جهت شیب این ۸ بلوک در جدول ۴-۵ نشان داده شده است.



شکل (۵-۸) بلوک‌های تقسیم شده پیت معدن [۴۹]

جدول (۴-۵) شیب و جهت شیب بلوک‌ها [۴۹]

structural Domain	Dip	Dip Direction
Block 1	51	22
Block 2	70	43
Block 3	62	31
Block 4	69	12
Block 5	7	344
Block 6	69	217
Block 7	88	200
Block 8	77	176

ناپیوستگی‌هایی که در این پروژه بررسی شد، درزه‌ها است. مشخصات درزه در جدول ۵-۵ نشان داده شده است.

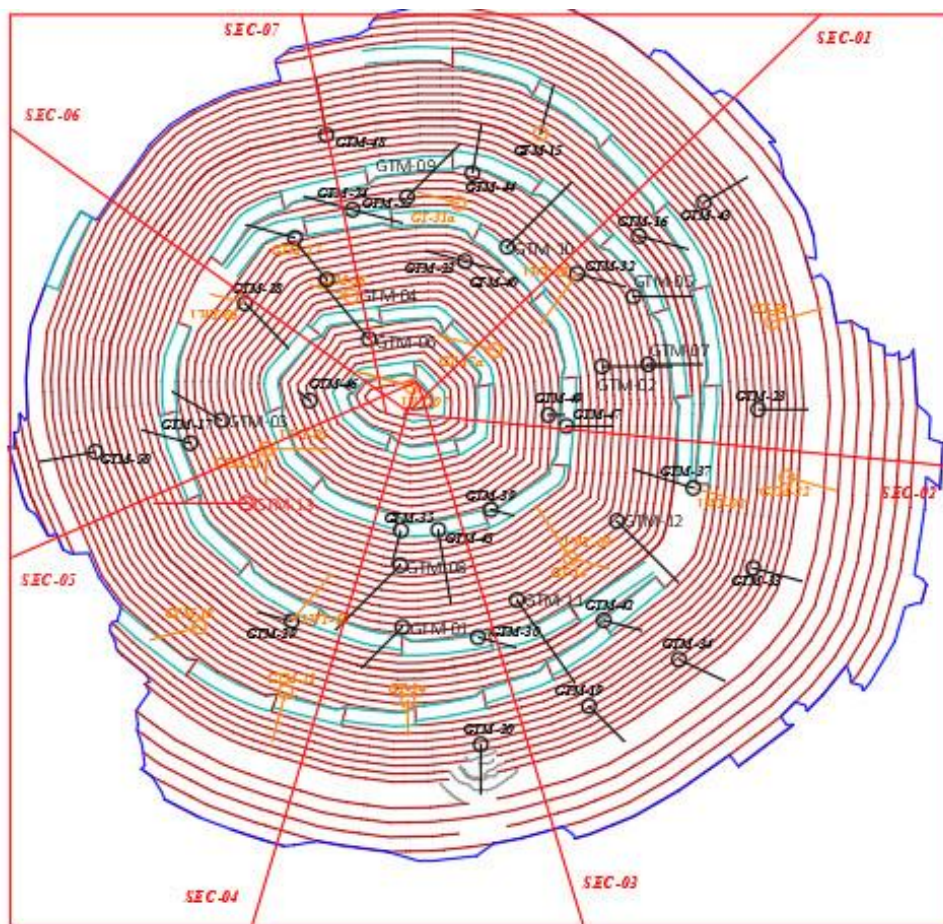
جدول (۵-۵) خصوصیات درزه [۴۹]

Rock	ALT	JOINT	
		Cohesion	friction
		kpa	.
ANS	PHY	170	35
	PROP	55	38
DIO	PROP	210	38
QDI	PHY	200	38
	PROP	200	38
TUFF	PHY	215	35
	PROP	260	36

۵-۵- ساخت مدل

مدل‌های موجود در تحلیل توده سنگ‌ها را می‌توان به دو دسته کلی مدل‌های محیط پیوسته و محیط ناپیوسته تقسیم نمود. در روش‌های ناپیوسته درزه‌ها به صورت صریح شبیه سازی می‌گردند. اما هنگامیکه

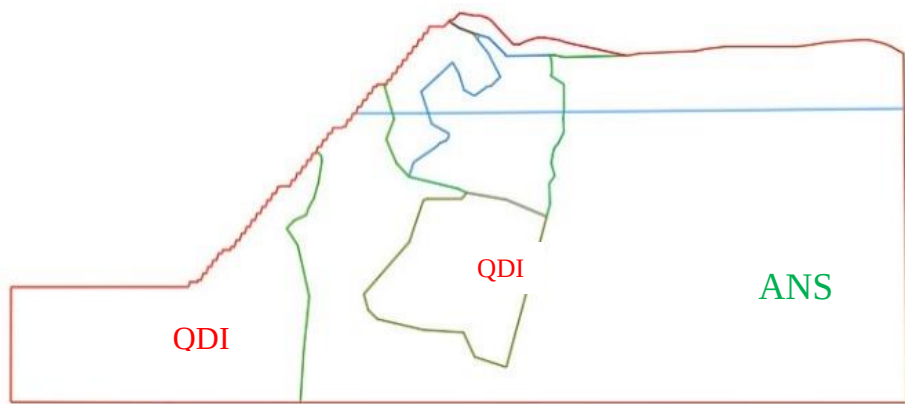
تعداد درزه‌ها در یک مدل افزایش می‌یابد، تعریف صریح تمامی آنها دشوار و حتی در برخی از موارد غیرممکن می‌گردد. روش‌های تحلیلی محیط پیوسته معادل را می‌توان به عنوان جایگزین مدل‌های ناپیوسته در تحلیل توده سنگ‌های درزه دار به کار گرفت. در این پروژه محیط معدن به صورت محیط پیوسته در نظر گرفته شد و در روش عددی تاثیر حضور درزه‌ها نیز به صورت ضمنی و با استفاده از مدل ساختاری Ubiquitous joint model در محیط پیوسته لحاظ شده است. بنابراین از خواص محیط پیوسته معادل برای توده سنگ محدوده معدن در مدل عددی استفاده خواهد شد. تحلیل پایداری شیب توسط نرم افزار SLIDE برای تحلیل تعادل حدی و نرم افزار FLAC برای تحلیل عددی استفاده بررسی خواهد شد. تحلیل پایداری شیب معدن نیز به صورت دو بعدی بررسی می‌شود. اولین مرحله از تحلیل پایداری شیب معدن ساخت هندسه مدل است. با استفاده از چال‌های حفاری و تصاویر عکس برداری شده و نقاط برداشت شده از منطقه معدن، طرح نهایی پیت معدن ساخته شد که در شکل ۵-۹ نشان داده شده است. ساخت هندسه مدل نیز برای ۷ مقطع انجام شد و مقاطع طوری انتخاب شده‌اند که عمود بر سطح دیواره و معرف شرایط کلی معدن باشند (شکل ۵-۱۰). در جدول ۵-۶ ابعاد هندسی شیب نشان داده شده است.



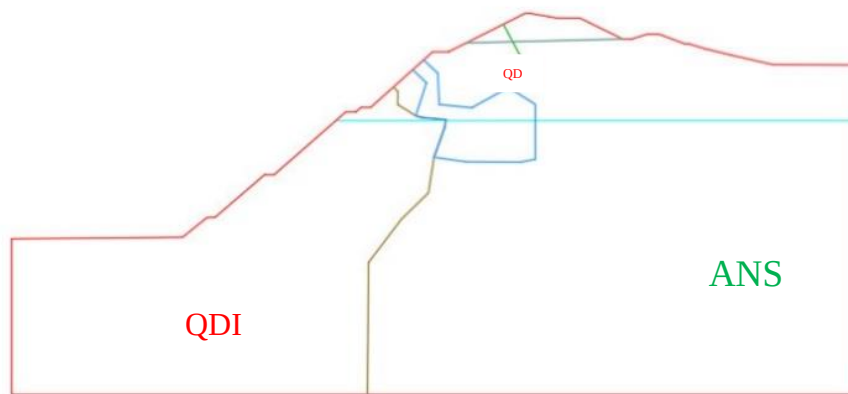
شکل (۵-۹) بیت معدن میدوک [۴۹]

جدول (۵-۶) مشخصات هندسی شیب

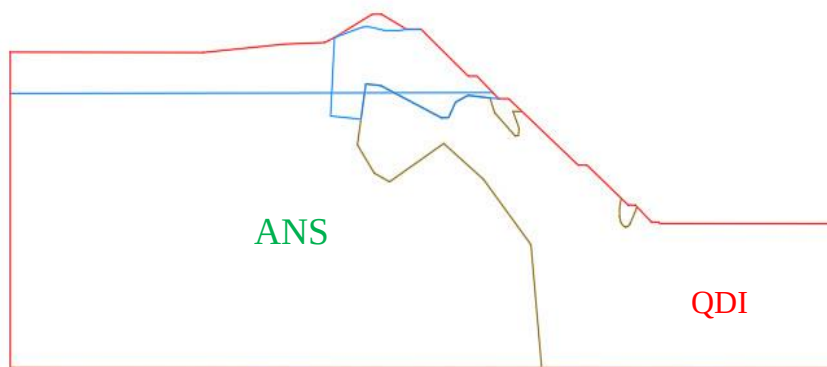
	7	6	5	4	3	2	1	
ارتفاع دیواره (متر)	695	718	729.03	734.1	949.8	1028.6	826.4	
شیب کلی (درجه)	35	36	36	35	35	34	44	



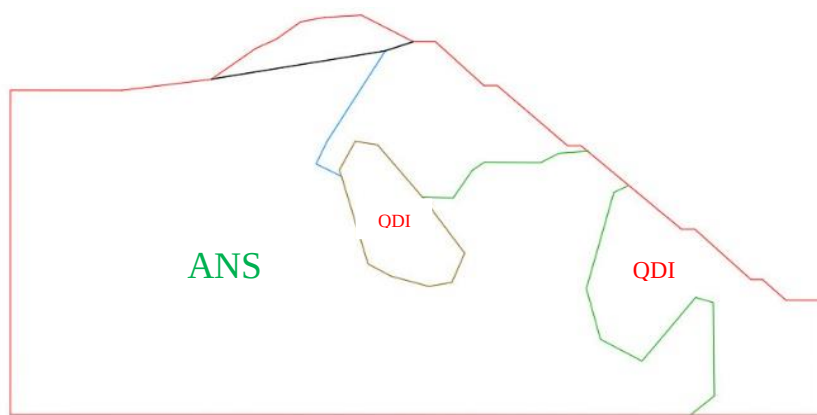
(الف)



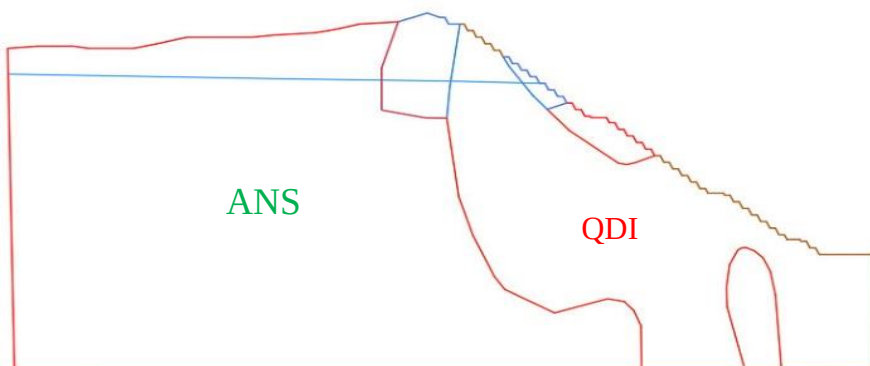
(ب)



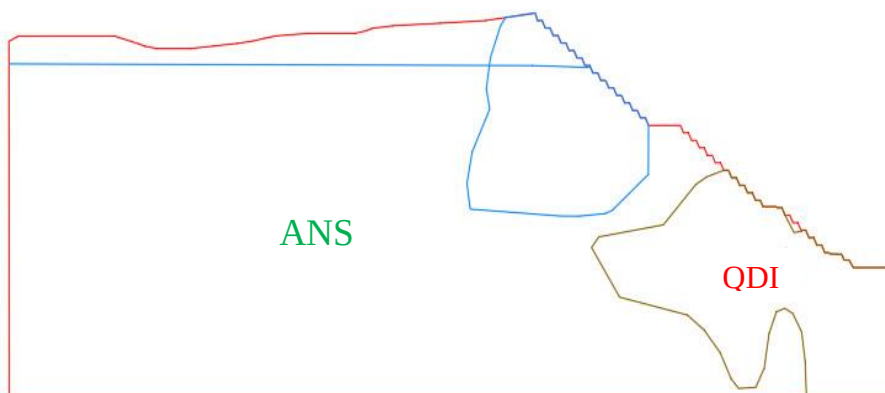
(پ)



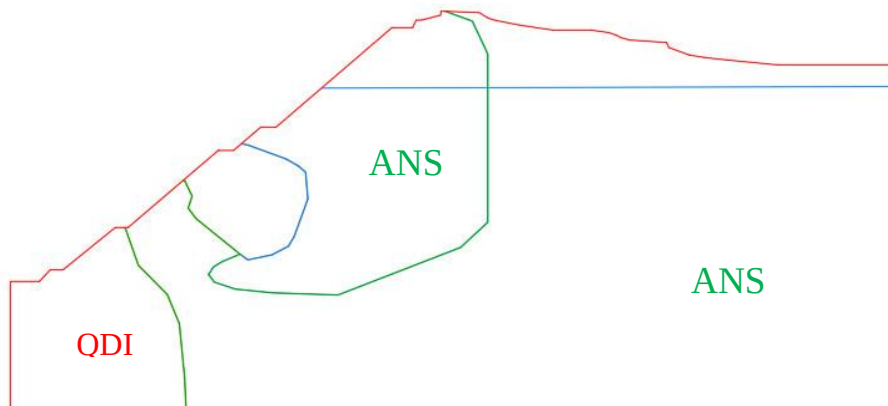
(a)



(b)



(c)



(ز)

شکل (۵-۱۰) مقاطع معدن میدوک (الف): مقطع ۱، (ب): مقطع ۲، (پ): مقطع ۳، (ج): مقطع ۴، (د): مقطع ۵، (ر): مقطع ۶، (ز): مقطع ۷
(ANS: آندزیت - توف، QDI: دیوریت)

۵-۵-۱- سطح ایستابی

مقدار ارتفاع آب زیرزمینی در مقاطع، نسبت به کف معدن با استفاده از برداشت‌های انجام شده توسط لوله‌های پیژومتر نصب‌شده در گمانه‌ها برداشت شده است، که این مقادیر در جدول ۵-۷ بیان می‌شود.

جدول (۵-۷) سطح ایستابی آب

مقاطع	1	2	3	4	5	6	7
سطح ایستابی آب (m)	695.201	855	825.163	643.92	659.231	672.562	651.391

۵-۶- تحلیل پایداری

۵-۶-۱- تحلیل تعادل حدی

روش‌های تعادل حدی، ساده‌ترین و متداول‌ترین روش برای تحلیل پایداری شیب است. از دیگر ویژگی‌های این روش می‌توان به سرعت زیاد تحلیل و اطلاعات ورودی کمتری نسبت به روش عددی اشاره کرد. روش‌های تعادل حدی می‌تواند در مدل‌سازی شیب‌ها و تحلیل پایداری آنها بسیار پر کاربرد باشد و دید نسبتاً خوبی در مورد وضعیت پایداری شیب‌ها ارائه دهند. ضریب اطمینان به عنوان یکی از خروجی‌های اصلی تحلیل‌های تعادل حدی به حساب می‌آید. این ضریب به صورت نسبت مقاومت برشی به تنش برشی تعریف می‌شود. بدین منظور برای تحلیل پایداری شیب معدن میدوک به روش تعادل حدی از نرم افزار SLIDE استفاده شده است. که در ادامه به معرفی کوتاه این نرم افزار پرداخته می‌شود.

۵-۶-۱-۱- نرم افزار SLIDE

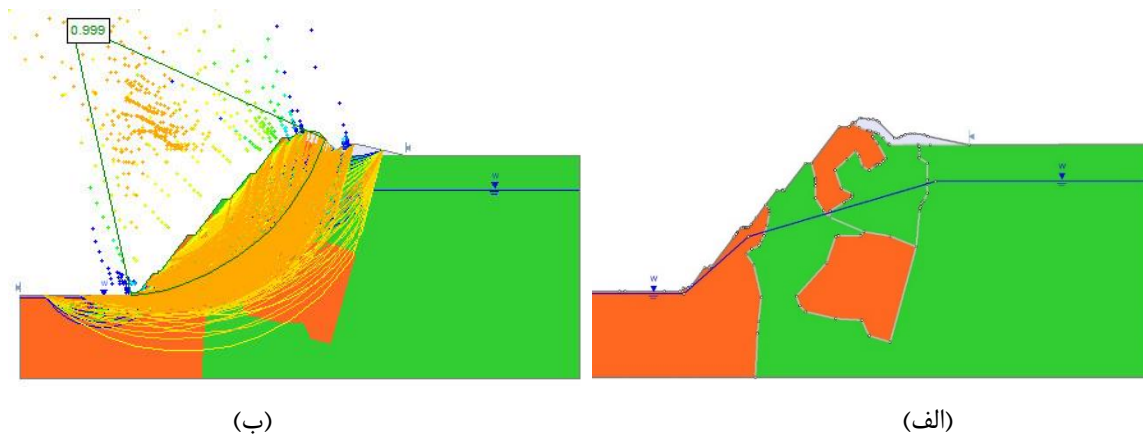
نرم افزار SLIDE از سری نرم افزارهای شرکت راک ساینس می‌باشد. این نرم افزار جهت تحلیل پایداری شیب‌های سنگی و خاکی در حالت دو بعدی استفاده می‌کند. در این نرم افزار قابلیت مدل سازی با معیارهای رفتاری نظیر مدل موهر کولمب، هوک و براون و ... وجود دارد. این نرم افزار امکان بهره‌گیری از روش‌های تحلیل مانند اسپنسر، سارما، مورگنسترن-پرایس، بیشاپ ساده شده، جانبوی ساده شده/اصلاح شده، فلنیوس و بسیاری از روش‌های دیگر تعادل حدی را فراهم می‌کند. در این نرم افزار دو نوع تحلیل دایره‌ای و غیر دایره‌ای وجود دارد. با توجه به اینکه مقاطع مورد بررسی از چند نوع سنگ با مشخصات غیر یکسان تشکیل شده است، از تحلیل غیر دایره‌ای استفاده شده است. مشخصات هندسی شیب، خصوصیات ژئومکانیکی مصالح تشکیل دهنده و وضعیت آب زیر زمینی برای تحلیل پایداری شیب به روش تعادل حدی ضروری می‌باشد.

۵-۶-۱-۲- تحلیل پایداری شیب با نرم افزار SLIDE

مدل سازی و تحلیل پایداری شیب با استفاده از نرم افزار SLIDE انجام شد. اولین گام برای بررسی پایداری، تعیین مرزهای شیب مورد مطالعه است. گام بعدی تخصیص مواد و انتخاب روش تحلیل است. در نهایت فاکتور ایمنی محاسبه می گردد. به منظور برآورد پایداری شیب کلی پیت معدن، مدل سازی در ۷ مقطع معدن میدوک بررسی شد و نتایج زیر حاصل شد. در این تحلیل از معیار هوک و براون تعمیم یافته استفاده شده است. لیتولوژی های موجود در مقاطع توف، آندزیت و دیوریت می باشد. پارامترها در نواحی آندزیت - توف و دیوریت در جدول ۵-۱ بیان شده است. برای ناحیه باطله نیز معیار هوک و براون استفاده شده است، همچنین مقدار چسبندگی باطله برابر 50 kpa ، زاویه اصطکاک برابر 30° درجه و وزن مخصوص 20 N/m^3 می باشد.

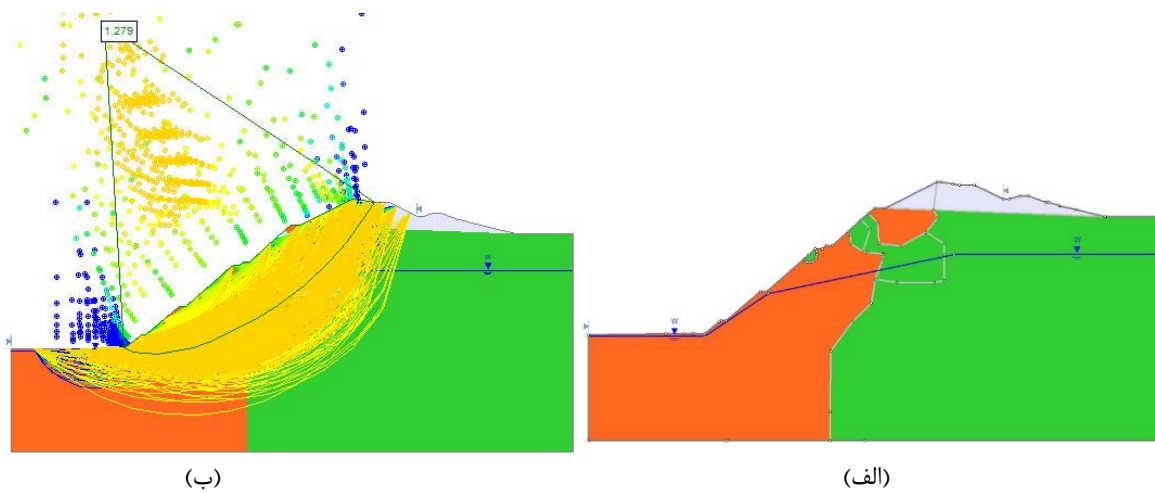
مقاطع معدن در نرم افزار SLIDE شبیه سازی شد و تحلیل غیر دایره ای نیز انتخاب شد. با توجه به معیار هوک و براون تعمیم یافته طبق جدول ۵-۱ به نواحی مورد نظر خواص اختصاص یافته شد. سپس در قسمت Analysis در نرم افزار SLIDE گزینه Compute انتخاب کرده و پس از انجام محاسبات در قسمت Interpretet مقدار ضریب ایمنی نشان داده شده است. نتایج مقاطع در شکل های زیر نشان داده شده است. در شکل ۵-۱۱ در قسمت (الف) مقطع ۱ و در قسمت (ب) سطح شکست بحرانی و مقدار ضریب ایمنی

۰/۹۹ با روش تحلیل GLE/Morgnstern-price نشان می دهد.



شکل (۵-۱۱) مقطع ۱ در SLIDE

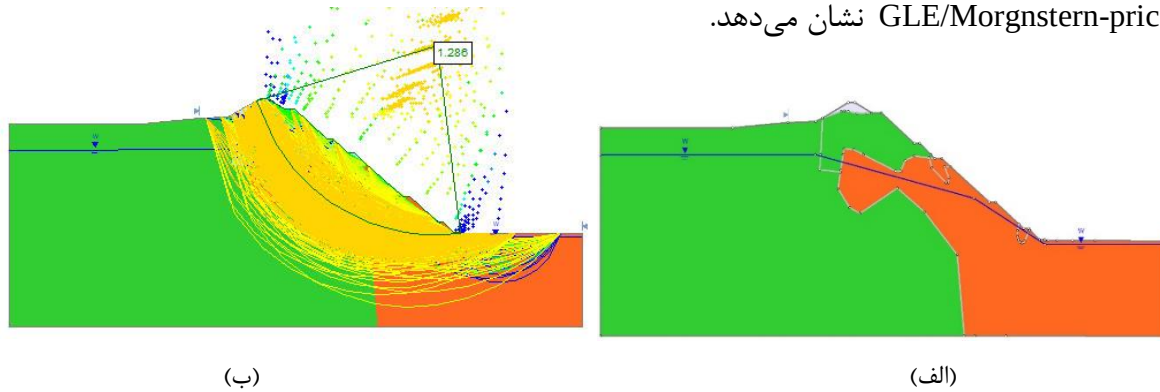
مقطع ۲ نیز در نرم افزار SLIDE شبیه سازی شد و در شکل ۵-۱۲ نشان داده شده است و مقدار ضریب ایمنی ۱/۲۷۹ با تحلیل GLE/Morgnstern-price به دست آمد.



شکل (۵-۱۲) مقطع ۲ در SLIDE

در شکل ۵-۱۳ در قسمت (الف) مقطع ۳ و قسمت (ب) ضریب ایمنی $1/286$ با روش تحلیل

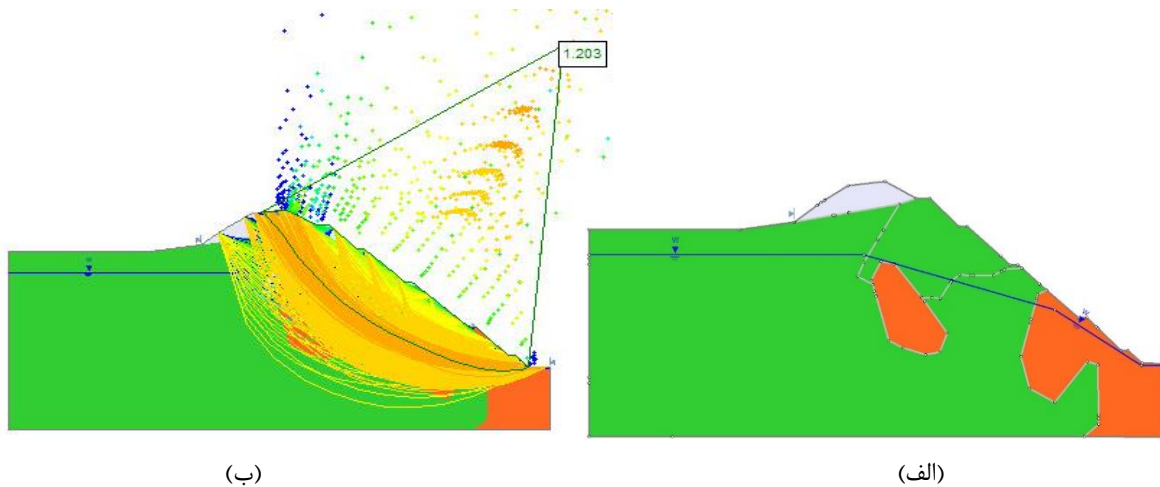
GLE/Morgnstern-price نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۳) مقطع ۳ در SLIDE

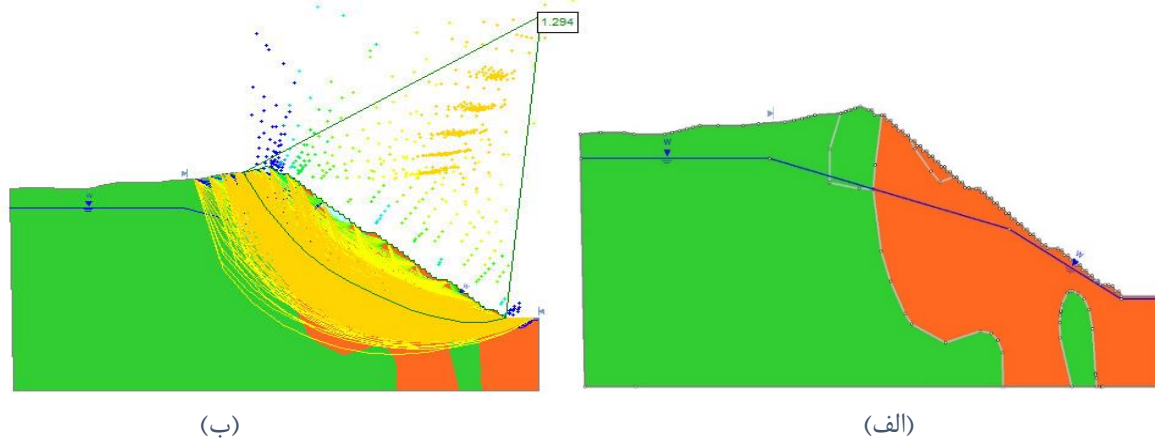
در شکل ۵-۱۴ مقطع ۴ مدل سازی شد و ضریب ایمنی $1/203$ با روش تحلیل GLE/Morgnstern-price

به دست آمد.



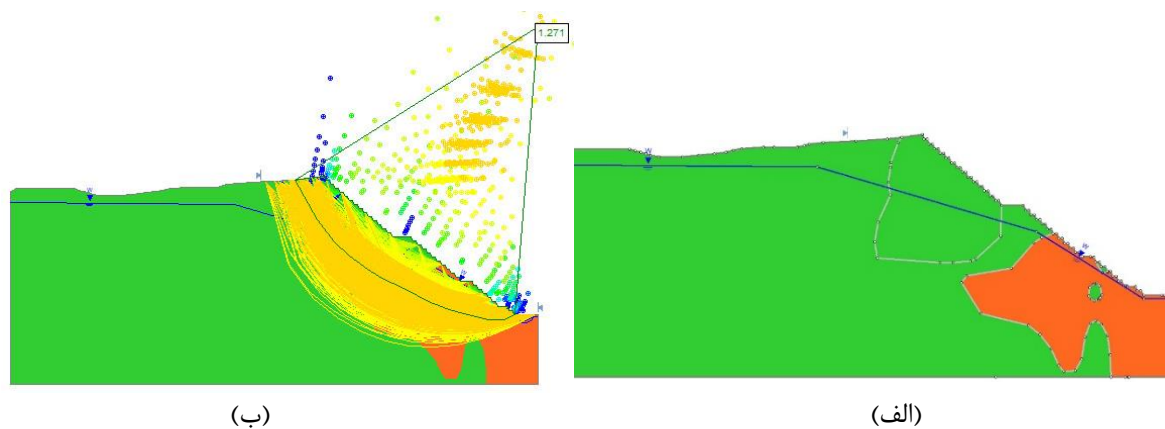
شکل (۵-۱۴) مقطع ۴ در SLIDE

در شکل ۵-۱۵ در قسمت (الف) مقطع ۵ و در قسمت (ب) سطح شکست بحرانی و مقدار ضریب ایمنی ۱/۲۹۴ با روش تحلیل GLE/Morgnstern-price نشان می‌دهد.



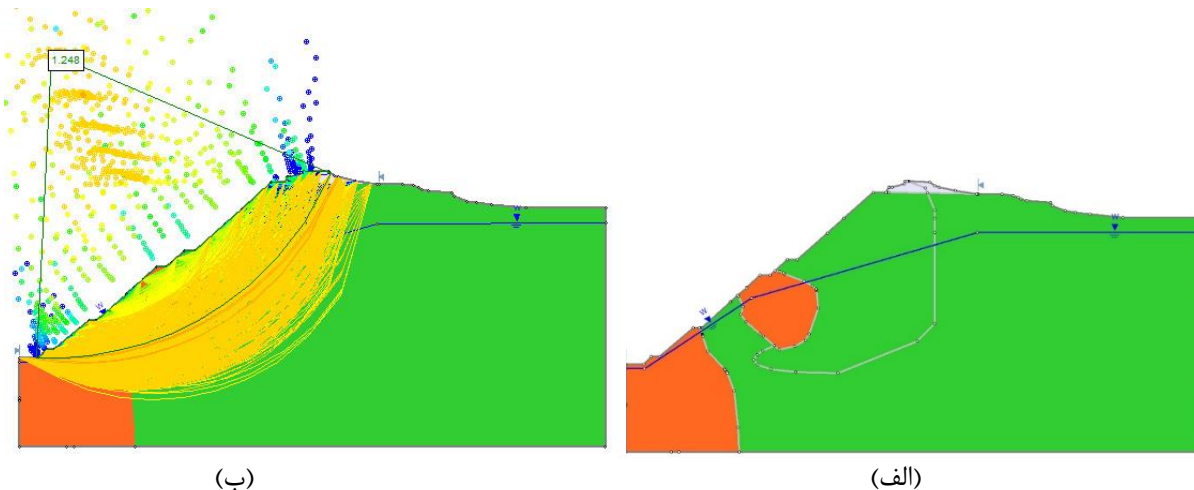
شکل (۵-۱۵) مقطع ۵ در SLIDE

در شکل ۵-۱۶ در قسمت (الف) مقطع ۶ و در قسمت (ب) سطح شکست بحرانی و مقدار ضریب ایمنی ۱/۲۷۱ با روش تحلیل GLE/Morgnstern-price نشان می‌دهد.



شکل (۵-۱۶) مقطع ۶ در SLIDE

شکل ۱۷-۵ در قسمت (الف) مقطع ۷ و در قسمت (ب) سطح شکست بحرانی و مقدار ضریب ایمنی ۱/۲۴۶ با روش تحلیل GLE/Morgnstern-price نشان می‌دهد.



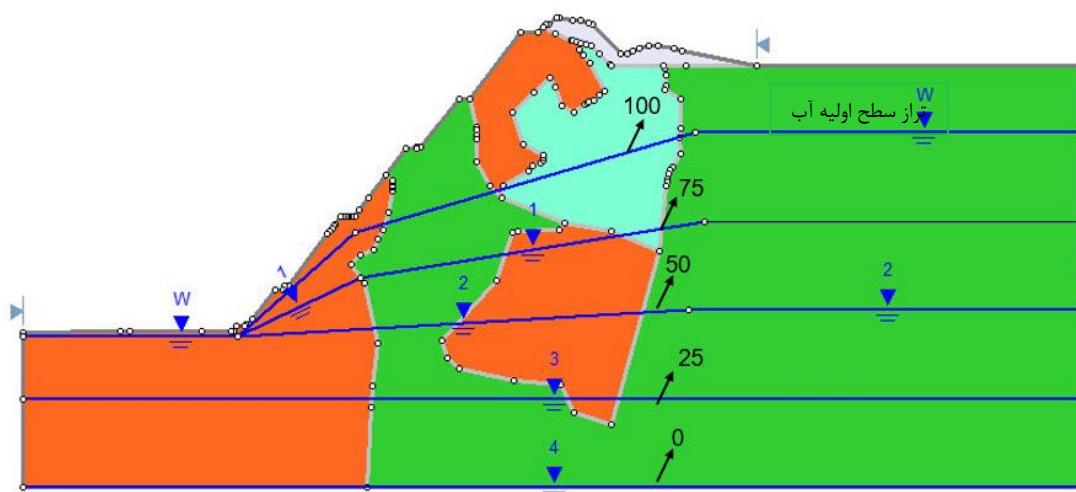
شکل (۱۷-۵) مقطع ۷ در SLIDE

۵-۶-۱-۳- تحلیل هیدرومکانیکی با روش تعادل حدی

برای ۷ مقطع معدن در ترازهای مختلف آب زیرزمینی ۰، ۲۵، ۵۰، ۷۵، ۱۰۰ نسبت به ارتفاع اولیه آب، مقدار ضریب ایمنی تعیین شد و نتایج آن در جدول ۵-۸ نشان داده شده است. تغییرات تراز آب زیرزمینی برای مقطع ۱ در شکل ۱۸-۵ نشان داده شده است که با کم کردن سطح ارتفاع آب زیرزمینی نسبت به کف معدن مقدار ضریب ایمنی افزایش پیدا کرده است.

جدول (۵-۸) مقدار ضریب ایمنی با روش تعادل حدی

تراز آب زیرزمینی/مقطع	1	2	3	4	5	6	7
100	0.99	1.495	1.363	1.249	1.448	1.271	1.246
75	0.96	1.562	1.38	1.249	1.512	1.624	1.115
50	0.97	1.565	1.38	1.249	1.565	1.625	1.55
25	0.97	1.565	1.38	1.249	1.567	1.635	1.55
0	0.97	1.565	1.392	1.249	1.567	1.635	1.55



شکل (۵-۱۸) تغییرات سطح آب زیرزمینی در مقطع ۱

۵-۶-۲- تحلیل عددی

روش‌های عددی، روش‌های بسیار پیچیده و دقیقی می‌باشند که در حل مسائل مختلف مهندسی، از جمله تحلیل پایداری شیب دیواره‌های معدن کاربرد زیادی دارند. هر چند محاسبات در این روش‌ها بسیار پیچیده می‌باشد و نیاز به اطلاعات اولیه زیادی دارند، اما نتایج قابل قبولی ارائه می‌دهند که می‌توان با اطمینان بالایی از آن‌ها استفاده نمود. به دلیل تاثیر ناپیوستگی‌ها از قبیل درزه در معدن میدوک، محیط تحلیل

پیوسته معادل در نظر گرفته شد. بنابراین روش تفاضل محدود مناسب تشخیص داده شد و از نرم افزار FLAC برای تحلیل روش عددی استفاده شد.

۵-۶-۲-۱- نرم افزار FLAC

نرم افزار FLAC، یک برنامه‌ی تفاضل محدود می‌باشد. این برنامه رفتار سازه‌هایی را که در آن خاک، سنگ و یا سایر مصالحی که ممکن است بعد از حد تسلیم به حالت پلاستیک برسند به خوبی مدل‌سازی می‌کند. این نرم افزار به دلیل بهره‌گیری از الگویی از محاسبات لاگرانژی، امکان محاسبات را به خصوص در حالت پلاستیک با سرعت و دقت بیشتری فراهم نموده است [۵۰].

از جمله قابلیت‌های نرم افزار FLAC، می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- قابلیت مدل‌سازی المان‌های سطح مشترک که از طریق آن می‌توان صفحات لغزش یافته، درزه‌ها، لایه‌های خاک و اندرکنش خاک و سازه را به دقت شبیه‌سازی نمود.
- مدهای تحلیلی کرنش صفحه‌ای، تنش صفحه‌ای و تقارن محوری
- توانایی مدل‌سازی جریان آب زیرزمینی و تحکیم در خاک
- توانایی مدل‌سازی المان‌های سازه‌ای برای شبیه‌سازی حایل‌های تونل، سیستم‌های میخکوبی، راک بولت‌ها، شمع‌ها، ریز شمع‌ها و غیره.
- توانایی تحلیل دینامیکی مسائل ژئوتکنیکی جهت مدل‌سازی بارهای هارمونیک، بار زلزله و انفجار
- توانایی مدل‌سازی ویسکوالاستیک و ویسکوپلاستیک

نرم افزار FLAC در دو نسخه دو بعدی و سه بعدی ارائه شده است. هر چند شیوه مدل‌سازی و تحلیل عددی در این دو نسخه تفاوت‌هایی دارد، اما پایه حل معادلات در این دو نسخه عملاً یکسان بوده و همچنین از الگوی یکسانی در طی مراحل شبیه‌سازی، برخوردار هستند.

در نسخه‌های قدیمی‌تر نرم‌افزار، ساخت هندسه و بقیه موارد تحلیل، کاملاً به صورت برنامه نویسی (اصطلاحاً کد نویسی) به نرم‌افزار معرفی می‌شد. استفاده از این نرم‌افزار به صورت کد نویسی به نوبه خود پیچیدگی‌های زیادی داشت، اما با ارائه نسخه‌های بالاتر که قابلیت مدل‌سازی در محیط‌های گرافیکی نیز داشتند، کار ساخت مدل و انجام تحلیل بسیار ساده‌تر شد.

این نرم‌افزار دارای چندین مدل رفتاری داخلی است که امکان شبیه‌سازی مصالح بسیار خطی را نیز میسر می‌سازد مدل‌های رفتاری در نرم‌افزار FLAC عبارت‌اند از [۵۰]:

- مدل الاستیک – ایزوتروپیک
- مدل الاستیک – ایزوتروپیک صفحه‌ای
- مدل پلاستیک موهر – کولمب
- مدل سنگ درزه‌دار
- مدل سخت شوندگی – نرم شوندگی
- مدل تسلیم مجدد (تجربی)

۵-۶-۲-۲- تحلیل پایداری شیب با نرم‌افزار FLAC

مراحل شبیه‌سازی و تحلیل در نرم‌افزار FLAC به شرح زیر است:

۱- ساخت هندسه محیط و ایجاد یک شبکه تفاضل محدود

۲- اعمال مدل رفتاری و خصوصیات مصالح

۳- اعمال شرایط مرزی و اولیه

۴- ایجاد تعادل اولیه

۵- اعمال شرایط اجرایی (مانند حفاری تونل)

۶- تعیین ضریب ایمنی

اولین قدم در مدل‌سازی هندسی، شناخت محدوده منطقه معدن و توپوگرافی آن می‌باشد. همانطور که قبلاً بیان شده است ساخت هندسه معدن در ۷ مقطع در اتوکد انجام شده که این مقاطع در شکل ۵-۱۰ نشان

داده شده است. سپس این مقاطع وارد نرم افزار FLAC شده و مدل سازی می‌شوند. با توجه به شرایط حاکم بر منطقه مدل رفتاری Ubiquitous joint model برای تحلیل استفاده شده است.

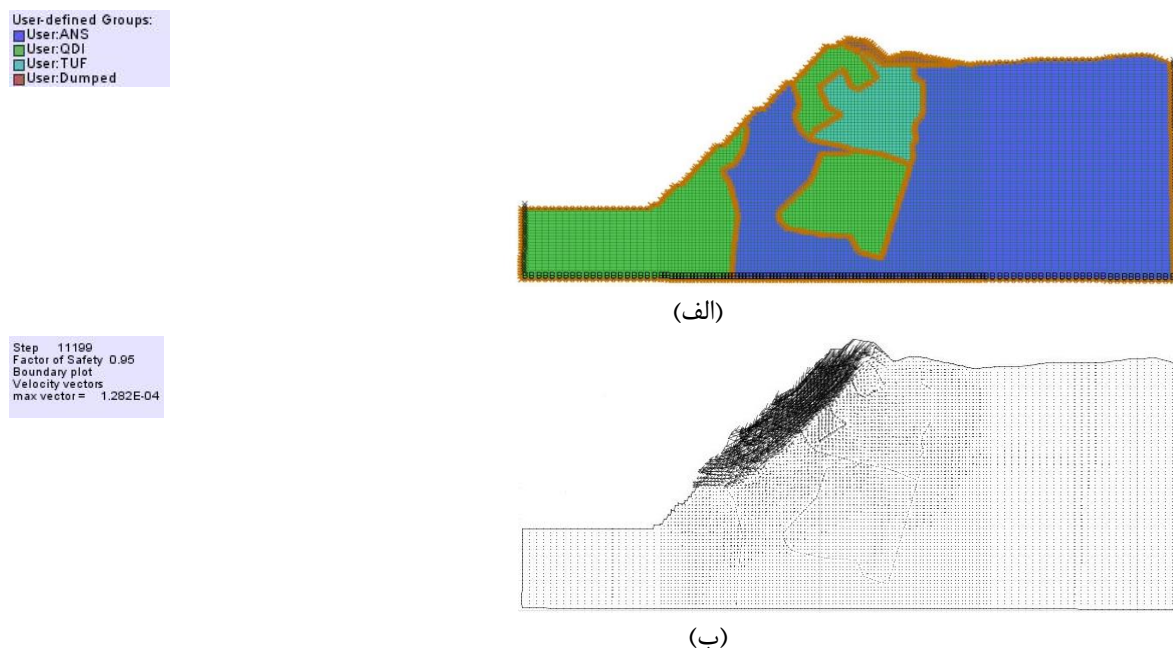
همچنین با توجه به مدل رفتاری سنگ درزه‌دار و اطلاعات موجود در جداول ۴-۵ و ۵-۵ پارامترهای ورودی مورد نیاز برای نرم افزار به دست آمد و این پارامترها در جدول ۹-۵ بیان شده است. برای ناحیه باطله نیز از مدل رفتاری موهر کولمب استفاده شده است. پس از ساخت مدل و ایجاد شبکه تفاضل محدود، مش بندی fine برای مقاطع انتخاب شد. با انتخاب Assign در زیر مجموعه material خواص هر محیط به طور جداگانه معرفی شدند و به نواحی مورد نظر اختصاص داده شد که این پارامترها در جدول ۹-۵ بیان شده است. با اعمال تنظیمات مربوط به گرانش و وارد کردن سطح آب زیرزمینی با دستور Water table، و همچنین اختصاص دادن وزن آب برابر با 1000 kg/m^3 در نظر گرفته شد. با استفاده از دستورات نیازی به وارد کردن دستی تنش‌ها نمی‌باشد و تنش‌ها خود به خود توسط نرم افزار محاسبه می‌شوند. پس از به تعادل اولیه رساندن مدل، در بخش Run، Solve، مقدار ضریب ایمنی نیز در قسمت Run در بخش Solve Fos تعیین شد. به همین ترتیب برای ۷ مقطع این مراحل انجام شد و مقدار ضریب ایمنی به دست آمد که نتایج آن در شکل‌های زیر بیان شده است. همچنین مقدار سطح آب زیرزمینی نیز تغییر داده شد تا تاثیر آن بر مقدار ضریب ایمنی تعیین شود.

جدول (۵-۹) پارامترهای ورودی نرم افزار FLAC

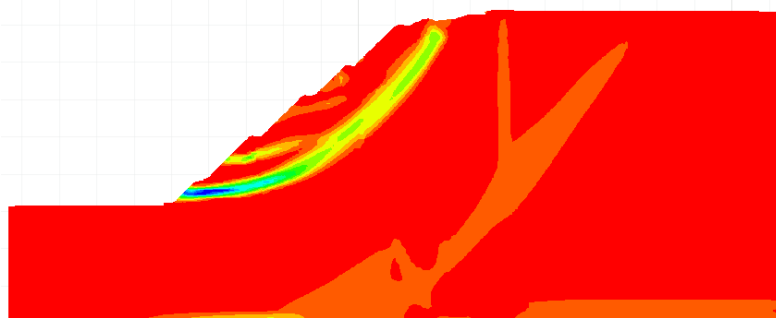
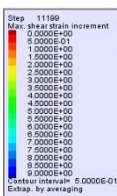
دیوریت	توف	آندزیت	
2800Kg/m ³	2500kg/m ³	2700kg/m ³	Mass Density
9.99×10 ⁸	7.61×10 ⁸	7.61×10 ⁸	Bulk modulus(pa)
5.99×10 ⁸	4.56×10 ⁸	4.56×10 ⁸	shear modulus(pa)
1499.07×10 ⁶	1141.6×10 ⁶	1141.6×10 ⁶	Elastic modulus(pa)
0.25	0.25	0.25	Possion ratio
360000	303000	303000	Cohesion(pa)
1000	1000	1000	Tension(pa)
40.99	38.9	38.9	Friction angle
0	0	0	Diation angle
38	35.5	36.5	Jfriction angle
300000	237500	112500	Jcohesion(pa)
0	0	0	Jtension(pa)
0	0	0	Jdilation angle

برای محاسبه فاکتور ایمنی از کاهش مقاومت برشی استفاده شده است. بدین منظور، مقاومت برشی کاسته می‌شود تا گسیختگی رخ دهد. نسبت مقاومت برشی واقعی به مقاومت برشی که گسیختگی رخ داده است بیانگر فاکتور ایمنی است.

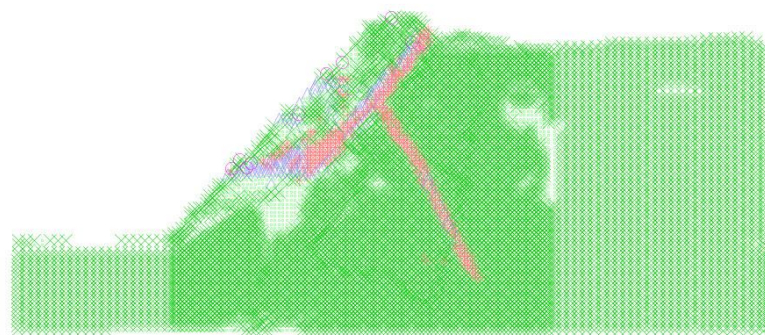
برای بررسی پایداری دیواره در این مقطع، از نشانگر پلاستیک و کانتور کرنش برشی حداکثر استفاده شده است. در مقطع شماره ۱ در شکل ۵-۱۹، مقدار فاکتور ایمنی کمتر از ۱ می‌باشد که در وضعیت کنونی، دیواره دچار ریزش خواهد شد. براساس بردار جابجایی (ب) و نشانگر پلاستیک (د)، ریزش قاشقی تا وسط پله دوم در دیواره معدن رخ خواهد داد. ناپایداری این دیواره ترکیبی از گسیختگی برشی سنگ سالم در قسمت‌های بالایی دیواره و لغزش بر روی سطوح ناپیوستگی‌ها در بخش پایینی دیواره است. همانگونه که در خطوط هم‌تراز حداکثر کرنش برشی تجمعی (ج) مشاهده می‌شود، بیشترین میزان کرنش برشی در پاشنه دیواره وجود دارد، اما به علت وجود ناپیوستگی در راستای پله دوم، خط ریزش قاشقی از محل ناپیوستگی اتفاق می‌افتد.



شکل (۵-۱۹) (الف) موقعیت مقطع، (ب) بردارهای سرعت، مقطع ۱ در FLAC



(ج)

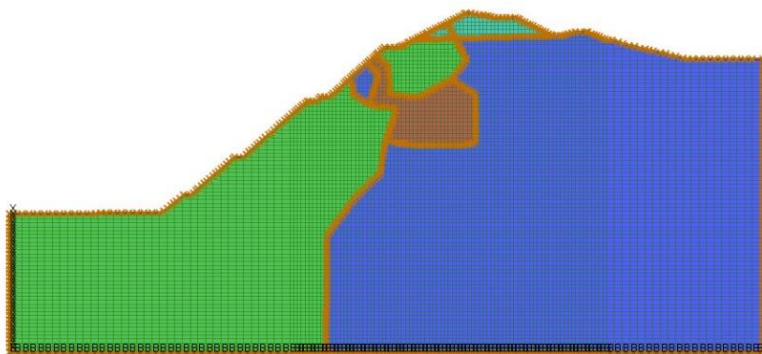


(د)

ادامه شکل (۵-۱۹) (ج) کرنش برشی تجمعی و (د) نشانگر پلاستیک مقطع ۱ در FLAC

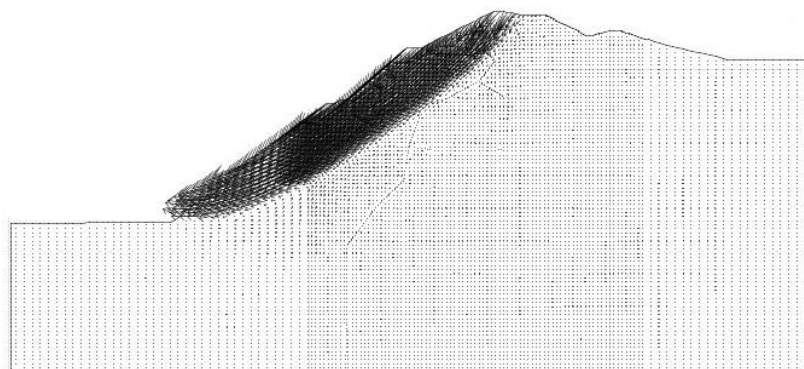
در مقطع شماره ۲ در شکل ۵-۲۰، مقدار ضریب ایمنی $1/49$ محاسبه شده است. با توجه به اینکه این تحلیل استاتیکی بوده و خطر ریزش متوسط در نظر گرفته شده است، ضریب ایمنی $1/3$ به عنوان ضریب ایمنی مجاز برای تحلیل پایداری در روش تحلیل عددی در نظر گرفته شده است [۱۸]. بنابراین، دیواره با شرایط موجود پایدار است. همچنین، دایره سطح ریزش در شکل (ج) نشان داده شده است که از نوع قاشقی است. براساس نشانگر پلاستیک در شکل (د)، ناپایداری این دیواره با گسیختگی از نوع برشی سنگ سالم در تمامی قسمت‌ها رخ خواهد داد. با توجه به کانتور جابجایی قائم در شکل (ه)، حداکثر جابجایی زون ریزشی می‌تواند در بخش بالایی اتفاق افتد و این میزان با افزایش عمق کاهش خواهد یافت. کانتور تنش قائم در شکل (و) نشان داده شده که نشان دهنده خطوط هم‌تراز تنش هم راستا با دیواره معدن می‌باشد.

User-defined Groups:
 ■ ROCK-ANS
 ■ ROCK-QDI
 ■ Soil-Dumped
 ■ ROCK-TUF



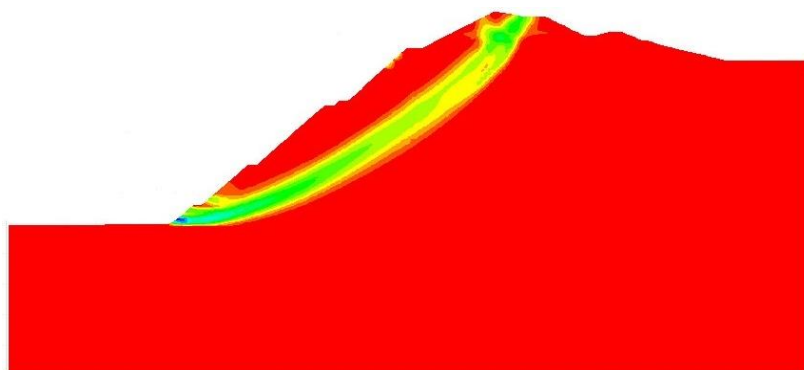
(الف)

Step 33878
 Factor of Safety 1.40
 Boundary plot
 Velocity vectors
 max vector = 1.489E-03



(ب)

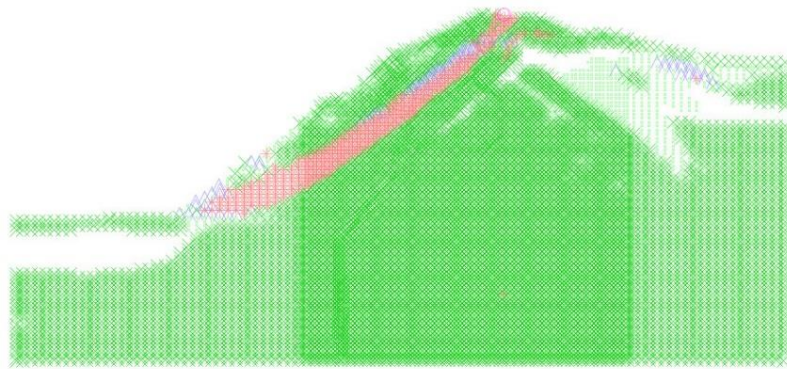
Step 33878
 Max shear strain increment
 0.000E+00
 2.500E-02
 5.000E-02
 7.500E-02
 1.000E-01
 1.250E-01
 1.500E-01
 1.750E-01
 2.000E-01
 2.250E-01
 2.500E-01
 2.750E-01
 3.000E-01
 3.250E-01
 3.500E-01
 Contour interval= 2.500E-0
 Extrap. by averaging



(ج)

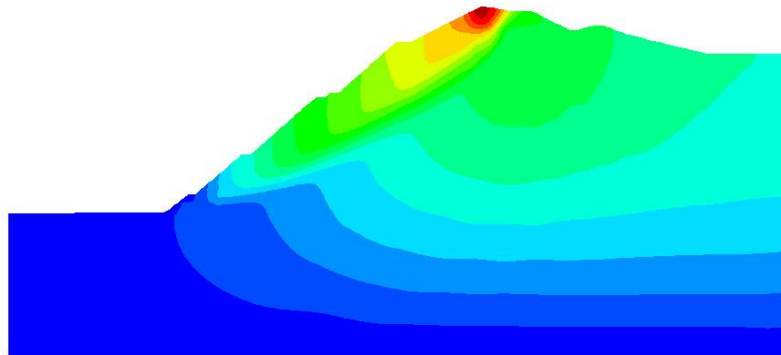
شکل (۵-۲۰) (الف) موقعیت مقطع، (ب) بردارهای سرعت، (ج) کرنش برشی تجمعی مقطع ۲ در FLAC

Step 33878
Plasticity Indicator
* at yield in shear or vol.
X elastic, at yield in past
o at yield in tension
^ slip along ubiq. joints
ubiq. joints fail in past



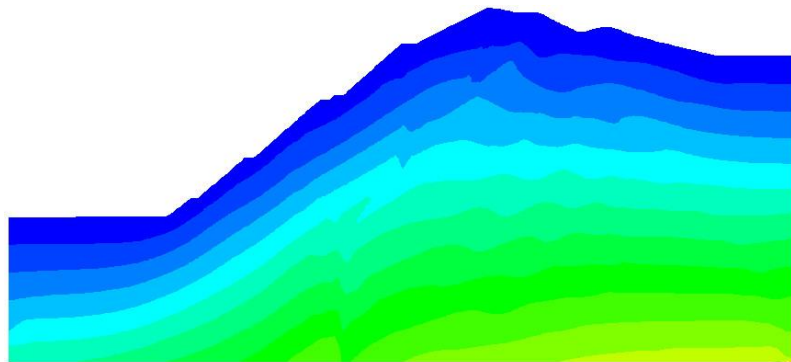
(د)

Step 33878
Y-displacement contours
-3.7500E+01
-3.5000E+01
-3.2500E+01
-3.0000E+01
-2.7500E+01
-2.5000E+01
-2.2500E+01
-2.0000E+01
-1.7500E+01
-1.5000E+01
-1.2500E+01
-1.0000E+01
-7.5000E+00
-5.0000E+00
-2.5000E+00
0.0000E+00
Contour interval= 2.5000E+00



(ه)

Step 33878
Y-displacement contours
-3.7500E+01
-3.5000E+01
-3.2500E+01
-3.0000E+01
-2.7500E+01
-2.5000E+01
-2.2500E+01
-2.0000E+01
-1.7500E+01
-1.5000E+01
-1.2500E+01
-1.0000E+01
-7.5000E+00
-5.0000E+00
-2.5000E+00
0.0000E+00
Contour interval= 2.5000E+00



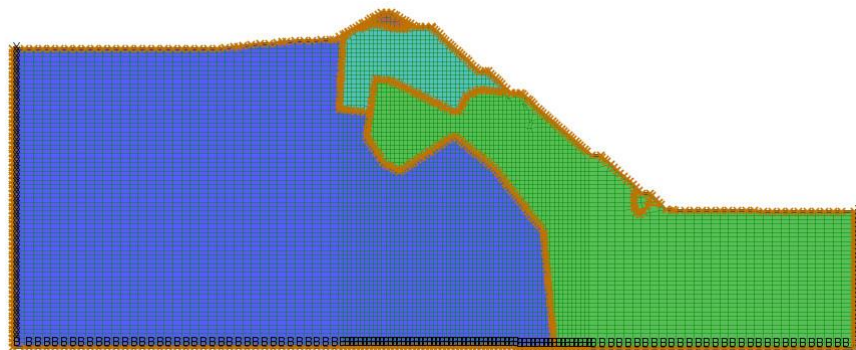
(و)

ادامه شکل (۵-۲۰) (د) نشانگر پلاستیک، (ه) کانتور جابجایی قائم و (و) کانتور تنش قائم مقطع ۲ در FLAC

در مقطع ۳ در شکل ۵-۲۱، مقدار ضریب ایمنی برابر $1/36$ بدست آمد که با توجه به شرایط تحلیل استاتیکی، دیواره پایدار است. با توجه به بردارهای سرعت و سطح بحرانی ریزش بدست آمده، در قسمت بالایی به دلیل وجود سطح مشترک بین دو سنگ دیوریت و توف، سطح ریزش بصورت کاملاً دایره‌ای نمی‌باشد و تابع این سطح مشترک است. از سوی دیگر با توجه به نشانگر پلاستیک موجود، لغزش در راستای

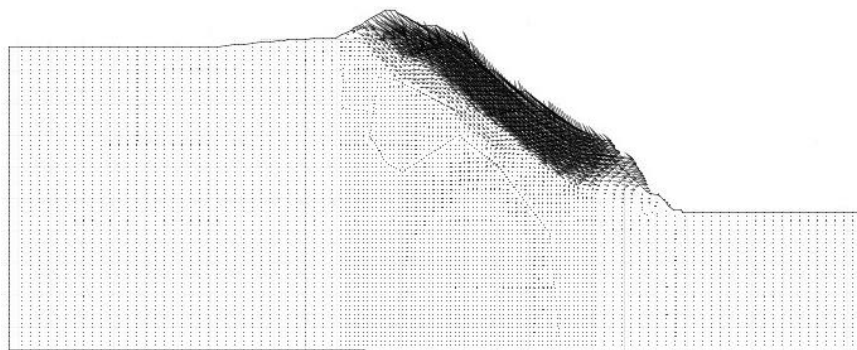
ناپیوستگی در بخش عمده‌ای از زون ریزش مشاهده می‌شود، در حالی که در قسمت پایینی، گسیختگی برشی رخ خواهد داد.

User-defined Groups:
 ROCK:ANS
 ROCK:QDI
 ROCK:TUF
 Soil:Dumped



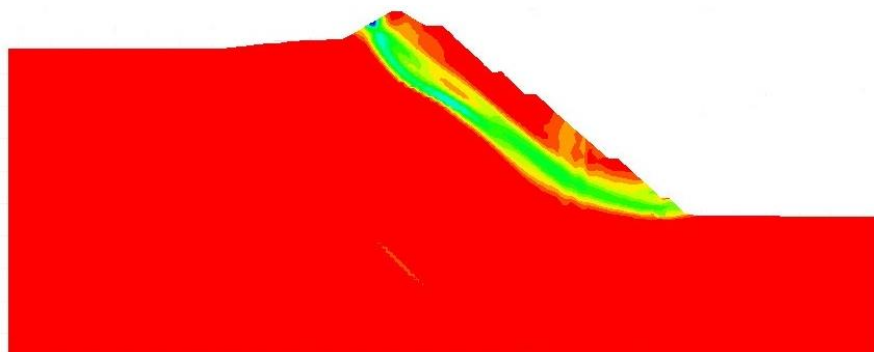
(الف)

Step 35481
 Factor of Safety 1.36
 Boundary plot
 Velocity vectors
 max vector = 4.232E-03



(ب)

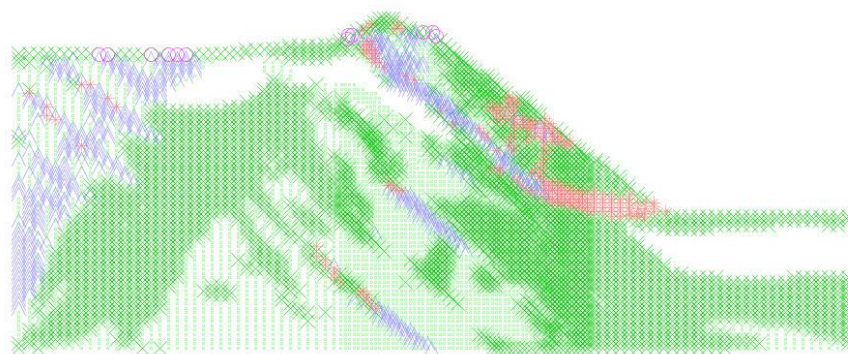
Step 35481
 Max. shear strain increment
 0.0000E+00
 2.5000E-02
 5.0000E-02
 7.5000E-02
 1.0000E-01
 1.2500E-01
 1.5000E-01
 1.7500E-01
 2.0000E-01
 2.2500E-01
 2.5000E-01
 2.7500E-01
 3.0000E-01
 3.2500E-01
 3.5000E-01
 Contour interval: 2.5000E-01
 Extrap. by averaging



(ج)

شکل (۵-۲۱) (الف) موقعیت مقطع، (ب) بردارهای سرعت، (ج) کرنش برشی تجمعی مقطع ۳ در FLAC

Step: 31353
 Plasticity Indicator
 * at yield in shear or vol.
 X elastic, at yield in past
 o at yield in tension
 ^ slip along ubiq. joints
 ubiq. joints fail in past

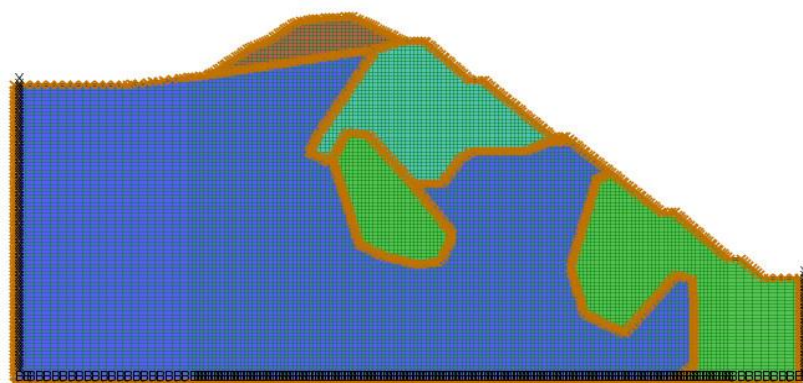


(د)

ادامه شکل (۵-۲۱) (د) نشانگر پلاستیک مقطع ۳ در FLAC

مقدار فاکتور ایمنی محاسبه شده در تحلیل استاتیکی مقطع ۴ در شکل ۵-۲۲، برابر ۱/۲۵ می‌باشد. با در نظر گرفتن فاکتور ایمنی مجاز، این دیواره با فاصله کمی از حد مجاز، ناپایدار است. ناپایداری این دیواره ترکیبی از گسیختگی برشی سنگ سالم در قسمت‌های پایینی دیواره و لغزش بر روی سطوح ناپیوستگی‌ها در بخش بالایی و میانی دیواره است. علاوه بر این، در قسمت خاک دپو شده بالای دیواره تسلیم برشی و کششی مشاهده می‌شود که این پدیده در کانتور حداکثر کرنش برشی تجمعی نیز به وضوح مشخص است.

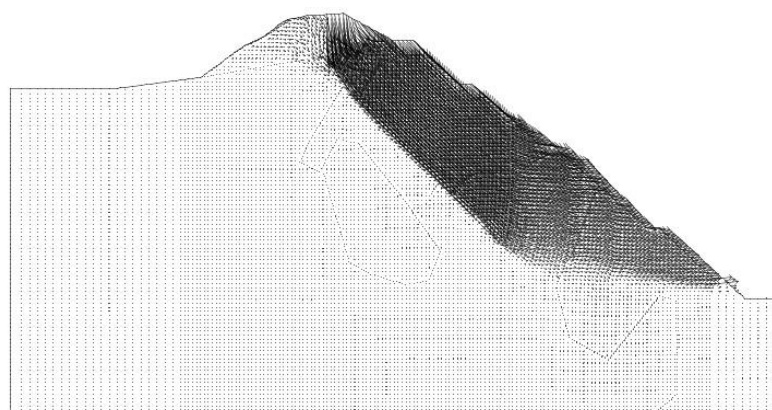
User-defined Groups:
 ■ ROCK:ANS
 ■ ROCK:QDI
 ■ ROCK:TUF
 ■ Soil:Dumped



(الف)

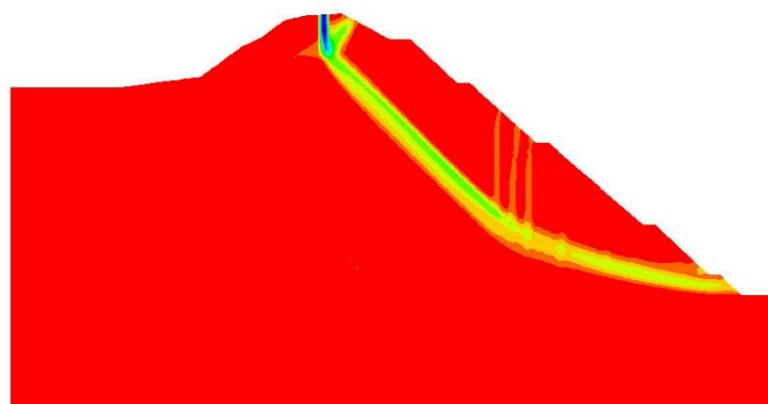
شکل (۵-۲۲) (الف) موقعیت مقطع مقطع ۴ در FLAC

Step 45652
Factor of Safety 1.25
Boundary plot
Velocity vectors
max vector = 2.872E-03



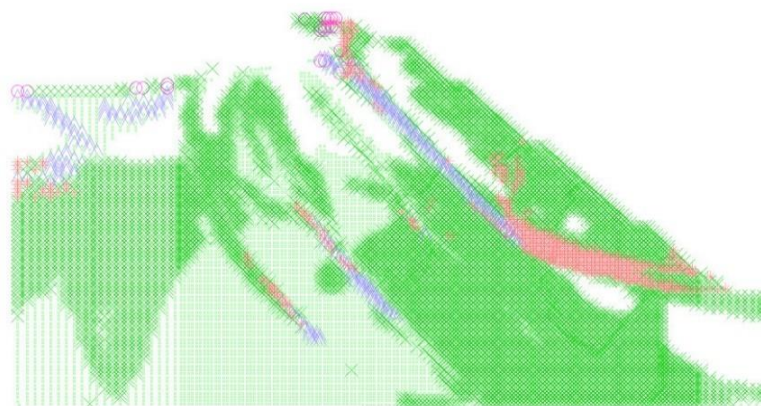
(ب)

Step 45652
Max. shear strain increment
0.0000E+00
2.0000E-01
4.0000E-01
6.0000E-01
8.0000E-01
1.0000E+00
1.2000E+00
1.4000E+00
1.6000E+00
1.8000E+00
2.0000E+00
Contour interval= 2.0000E-0
Extrap. by averaging



(ج)

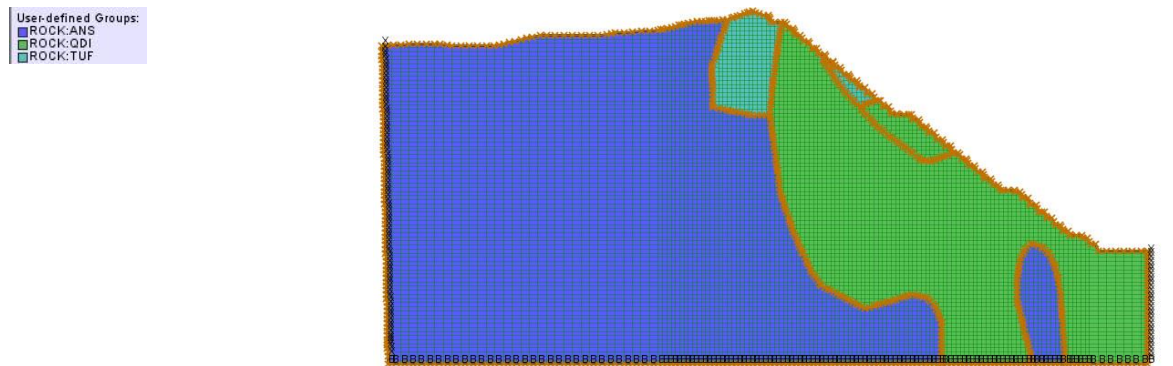
Step 31776
Plasticity Indicator
x at yield in shear or vol.
X elastic, at yield in past
o at yield in tension
^ slip along ubiq. joints
ubiq. joints fail in past



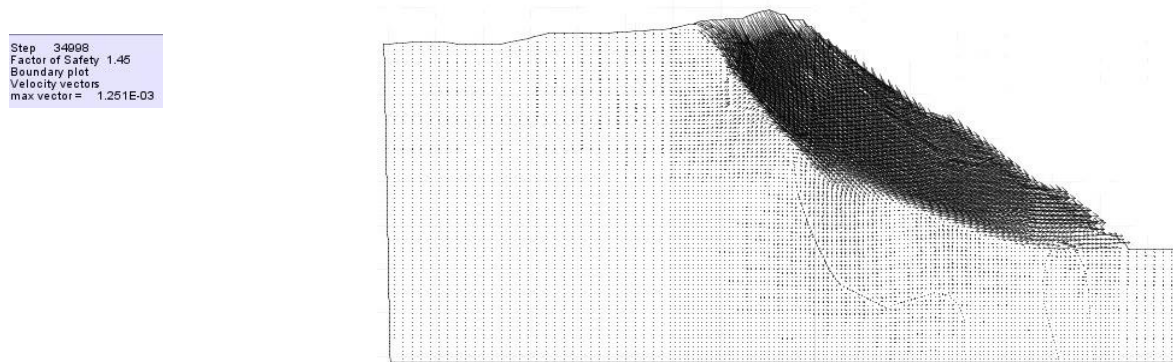
(د)

ادامه شکل (۲۲-۵) (ب) بردارهای سرعت، (ج) کرنش برشی تجمعی و (د) نشانگر پلاستیک مقطع ۴ در FLAC

ضریب ایمنی به دست آمده از تحلیل عددی مقطع ۵ در شکل ۵-۲۳ برابر ۱/۴۵ می باشد که نشان دهنده پایداری دیواره در حالت استاتیکی است. بخش عمده دیواره از سنگ دیوریت تشکیل شده که باعث تشکیل دایره ریزش قاشقی شده است. با مشاهده کانتور حداکثر کرنش برشی تجمعی (ج) می توان دریافت که مقادیر حداکثر کرنش برشی در بیشتر نقاط دایره ریزش وجود دارد. با توجه به نشانگر پلاستیک در شکل (د)، گسیختگی در بخش بالایی از نوع لغزش در راستای ناپیوستگی و در بخش پایینی از نوع برش سنگ سالم است. همچنین، در بخش میانی دایره ریزش، زون وسیعتری از تسلیم برشی وجود دارد که می توان آن را به ادغام گسیختگی برشی و لغزش ناپیوستگی در این بخش نسبت داد.

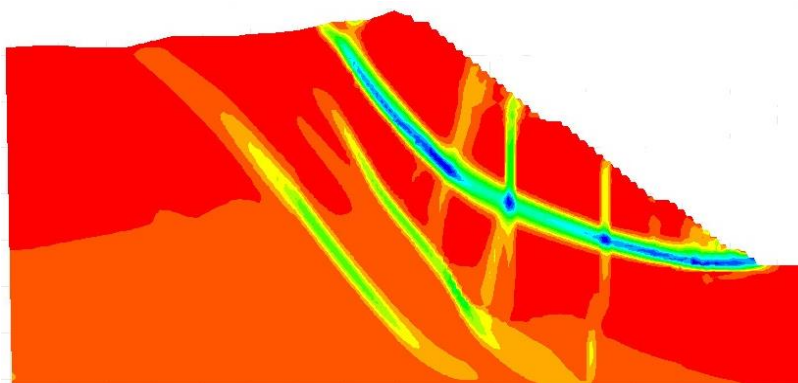


(الف)

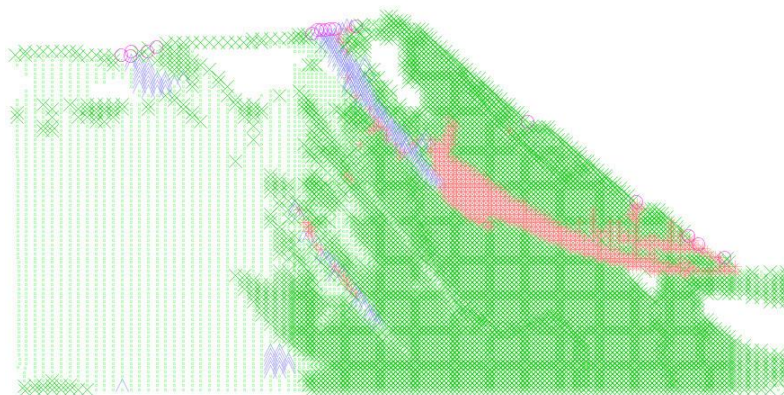


(ب)

شکل (۵-۲۳) (الف) موقعیت مقطع، (ب) بردارهای سرعت مقطع ۵ در FLAC



(ج)

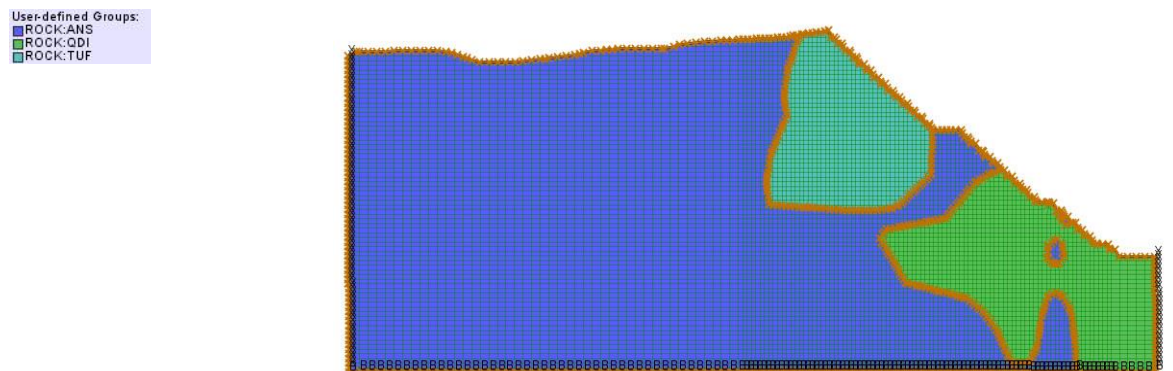


(د)

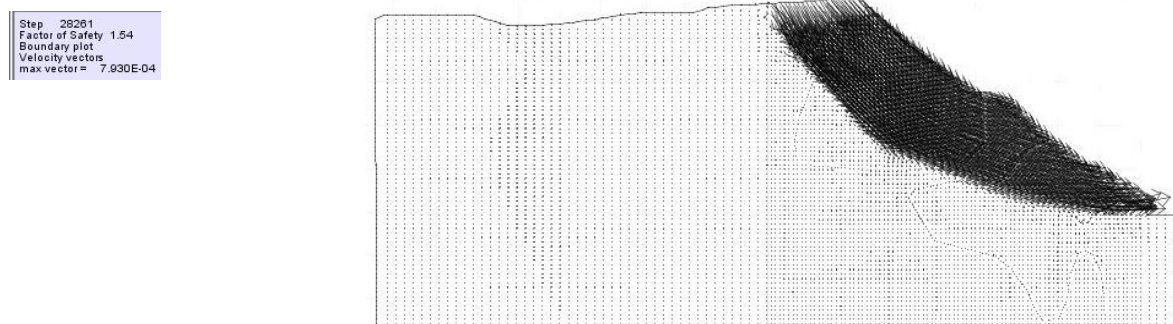
ادامه شکل (۵-۲۳) (ج) کرنش برشی تجمعی و (د) نشانگر پلاستیک مقطع ۵ در FLAC

در مقطع ۶ در شکل ۵-۲۴، مقدار ضریب ایمنی برابر $1/54$ به دست آمده که با توجه به شرایط تحلیل استاتیکی، دیواره پایدار است. با مشاهده کانتور حداکثر کرنش برشی تجمعی (ج) می توان دریافت که مقادیر حداکثر کرنش برشی در نیمه پایینی دایره شکست و پاشنه دیواره وجود دارد. در بخش بالایی دیواره که از سنگ توف تشکیل شده، گسیختگی به صورت لغزش بر روی سطح ناپیوستگی است که در نشانگر پلاستیک نیز این پدیده قابل رویت است. علاوه بر این، در بخش میانی و پایینی ریزش از نوع گسیختگی برشی سنگ سالم است. در پله بالایی دیواره معدن، یک زون با تسلیم برشی مشاهده می شود که با توجه به مقادیر کرنش

برشی تجمعی به تنهایی منجر به ریزش موضعی نشده است. اما ممکن است با گذشت زمان و تاثیر پدیده هوازدگی، ریزش‌های مقطعی در این بخش رخ دهد.



(الف)



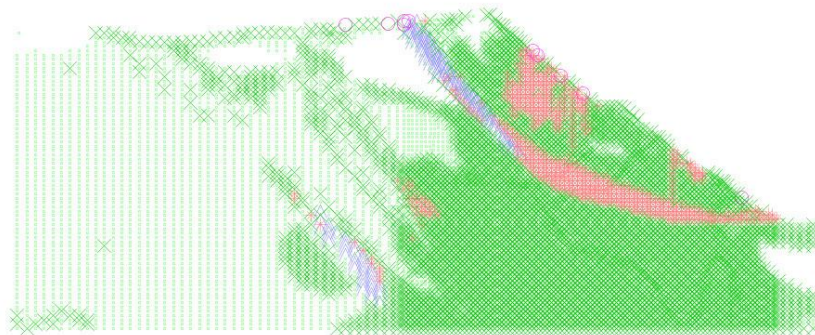
(ب)



(ج)

شکل (۵-۲۴) (الف) موقعیت مقطع، (ب) بردارهای سرعت، (ج) کرنش برشی تجمعی مقطع ۶ در FLAC

Step: 37613
 Plasticity Indicator
 * at yield in shear or vol.
 X elastic, at yield in past
 o at yield in tension
 ^ slip along ubiq. joints
 ubiq. joints fail in past

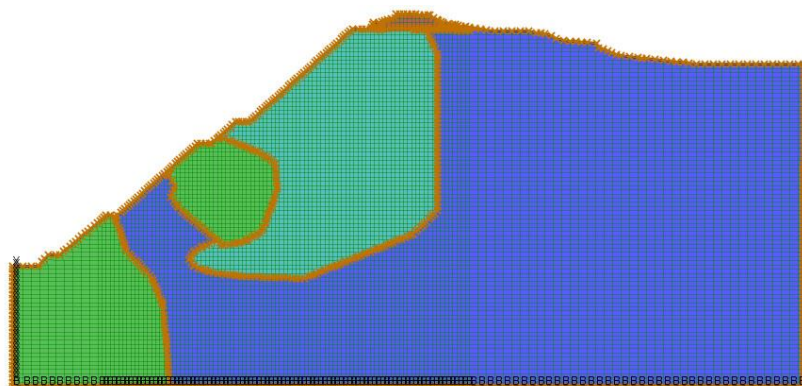


(د)

ادامه شکل (۵-۲۴) (د) نشانگر پلاستیک مقطع ۶ در FLAC

ضریب ایمنی بدست آمده از تحلیل عددی مقطع ۷ در تحلیل اولیه برابر $1/0.3$ به دست آمده است. با نگاه دقیق تر به کانتور کرنش برشی حداکثر می توان مشاهده کرد که ریزش جزئی در پله چهارم اتفاق افتاده که منجر به کاهش فاکتور ایمنی شده است. همانگونه که در شکل (د) مشخص است، گسیختگی در سنگ توف از نوع لغزش بر روی ناپیوستگی است در حالی که دایره شکست در سنگ دیوریت دچار گسیختگی برشی می گردد.

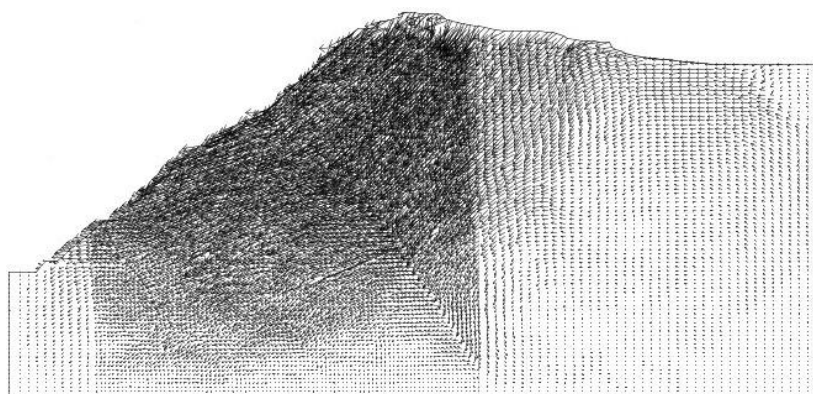
User-defined Groups:
 ■ ROCK:ANS
 ■ ROCK:QDI
 ■ ROCK:TUF
 ■ Soil:Dumped



(الف)

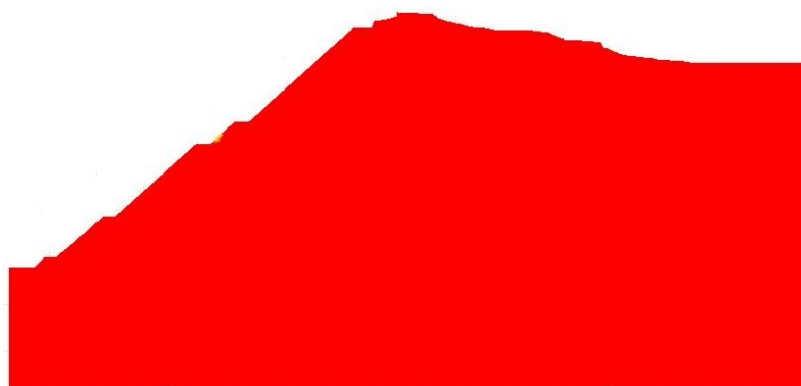
شکل (۵-۲۴) (الف) موقعیت مقطع ۷ در FLAC

Step 24040
Factor of Safety 1.03
Boundary plot
Velocity vectors
max vector = 1.002E-05



(ب)

Step 24040
Max. shear strain increment
0.0000E+00
5.0000E-02
1.0000E-01
1.5000E-01
2.0000E-01
2.5000E-01
3.0000E-01
3.5000E-01
4.0000E-01
4.5000E-01
5.0000E-01
5.5000E-01
Contour interval= 5.0000E-02
Extrap. by averaging



(ج)

Step 39117
Plasticity Indicator
* at yield in shear or vol.
x elastic, at yield in past
o at yield in tension
^ slip along ubiq. joints
_ ubiq. joints fail in past



(د)

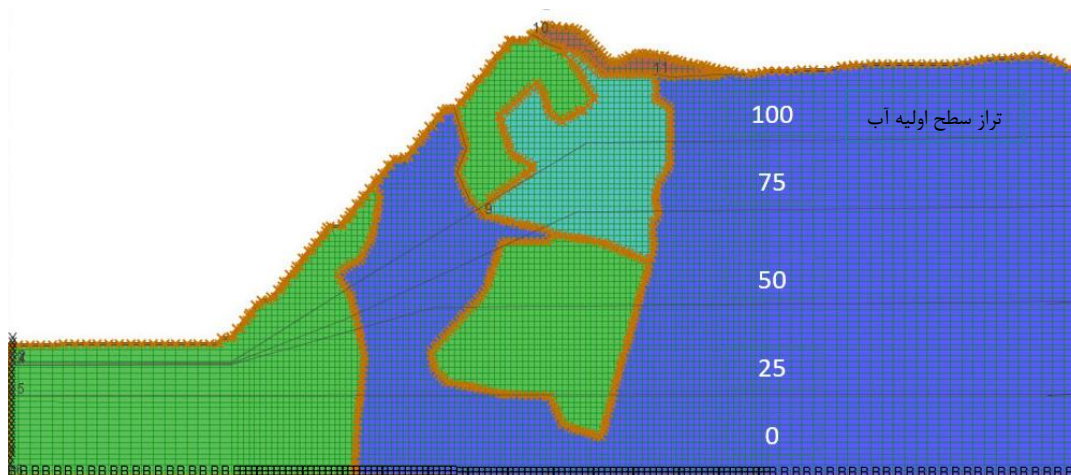
ادامه شکل (۲۴-۵) (ب) بردارهای سرعت، (ج) کرنش برشی تجمعی و (د) نشانگر پلاستیک مقطع ۷ در FLAC

۵-۶-۲-۳- تحلیل هیدرومکانیکی با روش عددی

در جدول ۵-۱۰ مقدار ضریب ایمنی مقاطع در ترازهای مختلف آب زیرزمینی با روش عددی نشان داده شده است. تراز ۱۰۰ برابر با سطح اولیه آب زیرزمینی می باشد. همچنین در شکل ۵-۲۶ تغییرات تراز آب زیرزمینی برای مقطع ۱ نشان داده شده است که همانند نتایج روش تعادل حدی با کم کردن ارتفاع سطح آب نسبت به کف معدن مقدار ضریب ایمنی افزایش می یابد و تا حدودی می تواند موثر در ایمنی شیب باشد.

جدول (۵-۱۰) مقدار ضریب ایمنی با روش عددی

تراز آب زیرزمینی/مقطع	1	2	3	4	5	6	7
100	0.95	1.495	1.363	1.249	1.448	1.544	1.026
75	0.96	1.562	1.38	1.249	1.512	1.624	1.155
50	0.970	1.565	1.38	1.249	1.565	1.625	1.55
25	0.970	1.565	1.38	1.249	1.567	1.635	1.55
0	0.970	1.565	1.392	1.249	1.567	1.635	1.55



شکل (۵-۲۶) تغییرات سطح آب زیرزمینی در مقطع ۱

۵-۷- مقایسه مدل رفتاری Ubiquitous joint model با مدل پیوسته معادل

همانطور که بیان شده است در جدول ۵-۱۰ نتایج روش عددی با مدل رفتاری Ubiquitous joint model نشان داده شده است. در این مدل رفتاری درزه‌ها نیز لحاظ شده است. سپس همین مقاطع در نرم افزار FLAC به صورت محیط پیوسته معادل مدل‌سازی شدند. در این مدل درزه‌ها نیز لحاظ نمی‌شوند و از مدل رفتاری موهر کولمب استفاده شده است. مقدار ضریب ایمنی ۷ مقطع معدن در تراز آب زیرزمینی ۱۰۰ با مدل رفتاری موهر کولمب تعیین شد. نتایج ضریب ایمنی مدل رفتاری موهر کولمب با مدل درزه‌دار در تراز آب ۱۰۰ در جدول ۵-۱۱ نشان داده شده است. مقایسه نتایج نشان داد ضریب ایمنی مقاطع در محیط پیوسته معادل با مدل رفتاری موهر کولمب بیشتر از مدل رفتاری درزه‌دار می‌باشد، که علت افزایش ضریب ایمنی در مدل رفتاری موهر کولمب وجود نداشتن درزه‌ها در مقاطع می‌باشد.

جدول (۵-۱۱) نتایج ضریب ایمنی در مدل رفتاری درزه دار و موهر کولمب

مدل رفتاری / مقاطع	1	2	3	4	5	6	7
Ubiquitous joint model	0.95	1.495	1.363	1.249	1.445	1.544	1.026
Mohr- coulomb	1.143	1.547	1.418	1.313	1.468	1.559	1.31

۵-۸- معیار پایداری

معیار پایداری در دیواره‌های معدن معمولاً به صورت ضریب اطمینان و یا در صد احتمال گسیختگی بیان می‌شود. در جدول ۵-۱۳ مقادیر پیشنهاد شده و مورد استفاده برای تک پله، بین رمپ و کل دیواره معدن نشان داده شده است [۵۱].

جدول (۵-۱۲) مقادیر ضریب ایمنی و احتمال گسیختگی [۱۸]

معیار پذیرش			مقیاس دیواره
POS(max)	FOS(min)	FOS(min)	
P[FOS<1]	دینامیک	استاتیک	
25-50%		1.1	تک پله
20%	1	1.2	بین رمپی
10%	1.05	1.3	کلی

در این مطالعه هر دو روش تعادل حدی و عددی برای تعیین زاویه شیب پایدار دیواره مورد استفاده قرار گرفته است. هدف طراحی مذکور به منظور اجتناب از هرگونه گسیختگی می‌باشد. که در شکل ۵-۲۷ گسیختگی در سه مقیاس نشان داده شده است.



(ج)

(ب)

(الف)

شکل (۵-۲۷) گسیختگی دیواره در مقیاس های مختلف. الف) گسیختگی در مقیاس پله، ب) گسیختگی در مقیاس بین رمپی، ج) گسیختگی در مقیاس کل دیواره

۵-۹- طراحی ژئوتکنیکی

طبق جدول ۵-۱۲ حداقل مقدار ضریب ایمنی برای پایداری کل شیب برابر $1/3$ می‌باشد. با توجه به نتایج ضریب ایمنی با روش تعادل حدی و روش تحلیل GLE/Morgnstern-price تنها مقطع ۶ دارای ضریب ایمنی بالای $1/3$ و بقیه مقاطع دارای ضریب ایمنی زیر $1/3$ است. در مقطعی که دارای ضریب ایمنی زیر $1/3$ می‌باشد، با کاهش زاویه شیب کلی، شیب را پایدار کرده و مقدار شیب بهینه برای مقاطع با روش تعادل حدی در جدول ۵-۱۳ بیان شده است.

جدول (۵-۱۳) شیب بهینه مقاطع با روش تعادل حدی

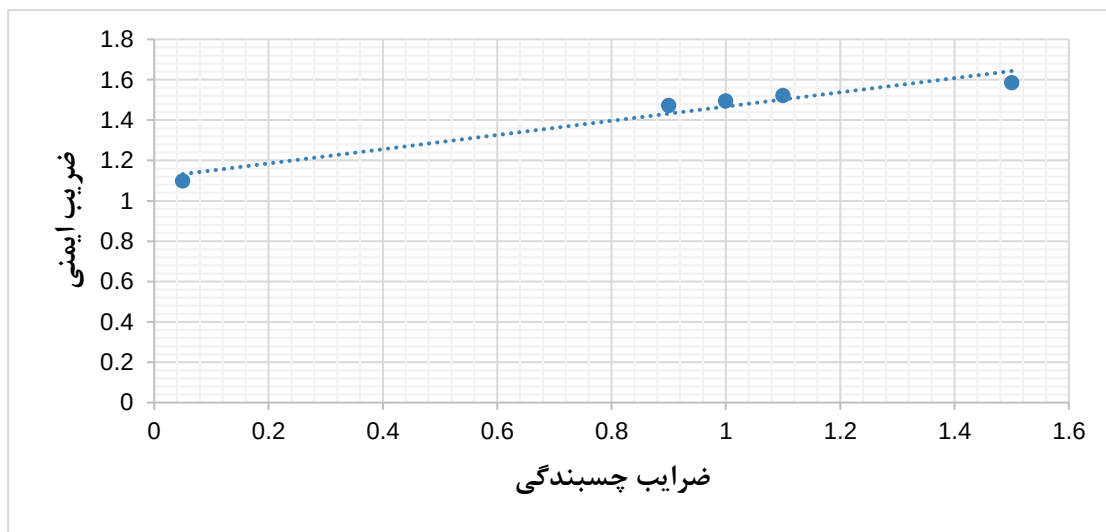
مقطع	1	2	3	4	5	6	7
شیب کلی (درجه)	38	32	34	33	35	36	34

با توجه به نتایج ضریب ایمنی به دست آمده از روش عددی که با نرم افزار FLAC انجام شده است، مقاطع ۴، ۱ و ۷ ناپایدار بوده و دارای ضریب ایمنی کمتر از $1/3$ می‌باشند، مقاطع ۲، ۳، ۵ و ۶ دارای حداقل ضریب ایمنی برای پایداری شیب هستند.

۵-۱۰- تحلیل حساسیت

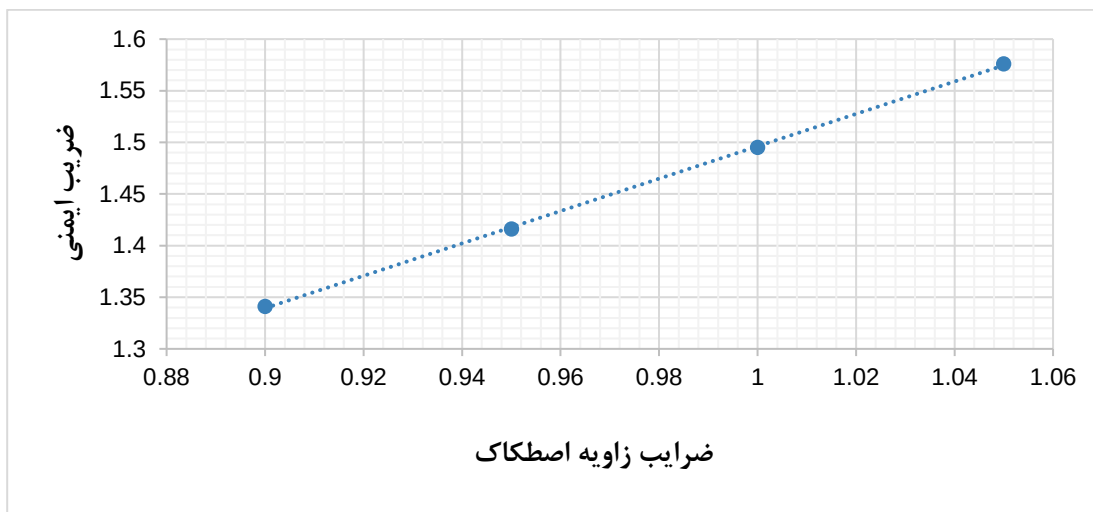
تحلیل فاکتور ایمنی، شامل مقادیر ثابت از پارامترهایی است که نیروهای رانش و مقاومت شیب را توصیف می‌کنند. در واقع هر پارامتر، محدوده‌ای از مقادیر را دارد و روشی که تاثیر این تغییرپذیری بر فاکتور ایمنی را آزمایش می‌کند، تحلیل حساسیت نامیده می‌شود و با استفاده از مقادیر حد بالا و پایین آن پارامترها که برای طراحی بحرانی هستند، انجام می‌گیرد [۳۸].

ارزش تحلیل حساسیت برای پارامترهایی است که تاثیر بیشتری بر پایداری دارند. که در این پروژه مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک در روش عددی با نرم افزار FLAC تغییر داده شد تا تاثیر آن بر ضریب ایمنی تعیین شود. با توجه به مقدار چسبندگی و زاویه اصطکاک برای آندزیت و دیوریت که در جدول ۵-۱۰ بیان شده است، مقدار بقیه پارامترها ثابت و مقدار چسبندگی تغییر داده شد. تغییرات چسبندگی برای مقطع ۲ در تراز اولیه آب زیر زمینی انجام شد و مقدار ضریب ایمنی تعیین شد. نتایج تغییرات ضریب ایمنی در مقطع ۲ با تغییر در مقدار چسبندگی در شکل ۵-۲۸ نشان داده شده است.



شکل (۵-۲۸) تغییرات ضریب ایمنی در مقطع ۲ با تغییرات چسبندگی

سپس مقدار زاویه اصطکاک نیز برای مقطع ۲ تغییر داده شد در صورتی که مقدار بقیه پارامترها ثابت است، تا تاثیر آن بر ضریب ایمنی تعیین شود. در شکل ۵-۲۹ تغییرات ضریب ایمنی با تغییرات زاویه اصطکاک نشان داده شده است. نتایج نشان دهنده رابطه مستقیم بین زاویه اصطکاک و چسبندگی با ضریب ایمنی می باشد، هر چه مقدار زاویه اصطکاک و چسبندگی افزایش یابد مقدار ضریب ایمنی نیز افزایش می یابد و همینطور هر چه مقدار زاویه اصطکاک و چسبندگی کاهش یابد مقدار ضریب ایمنی نیز کاهش می یابد.



شکل (۵-۲۹) تغییرات ضریب ایمنی در مقطع ۲ با تغییرات زاویه اصطکاک

۵-۱۱- اعتبار سنجی پیش بینی‌های مدل سازی

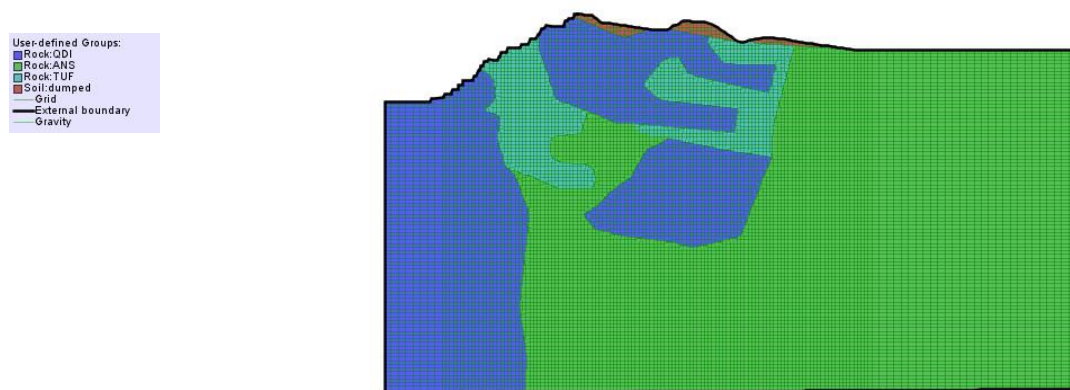
مشکلات مدل سازی همیشه در رابطه با محدودیت داده‌ها مطرح بوده است، به طوریکه این مساله مورد تایید همگان می‌باشد. هر چند که در محیط‌های شهری اختصاص چندین درصد از هزینه پروژه به ویژگی سنجی توده سنگ امری غیر معمول است، در نواحی معدنی این وضعیت به شکلی محدودتر مرسوم می‌باشد. در اغلب پروژه‌های عمرانی و معدنی، به علت هزینه بالای ویژگی سنجی توده سنگ، طراحی با کسب کمترین اطلاعات انجام می‌شود و این مساله موجب طراحی‌های محتاطانه می‌گردد [۱۵].

شکست زمانی به وقوع می‌پیوندد که تنش‌ها از مقاومت توده سنگ تجاوز کند. ملاحظات زیادی در تغییرات طبیعی تنش‌های درجای پیش از معدنکاری و شرایط زمین شناسی، خواص تغییر شکل پذیری و مقاومت وجود دارد. این مساله موجب عدم قطعیت در صحت پیش بینی‌های تنش و مقاومت می‌گردد. علاوه بر این مدل عددی مورد استفاده نظیر الاستیک، غیر الاستیک یا، همیشه موجب تقریب‌هایی در ارائه رفتار توده سنگ واقعی می‌گردد. مواد زمین شناسی طبیعتاً بسیار غیر یکنواخت هستند. ضروری است که اعتبار پیش بینی‌های مدل مورد تایید قرار گیرد [۱۵].

در این پروژه برای اعتبار سنجی روش تعادل حدی از روش تحلیل Spencer استفاده شده است. در روش عددی نیز به منظور انجام تحلیلی دقیق از وضعیت پایداری دیواره معدن باید از تطابق مدل عددی ساخته شده با شرایط حاکم بر شیب مطمئن بود. که از اطلاعات پیت کارنت معدن استفاده شد.

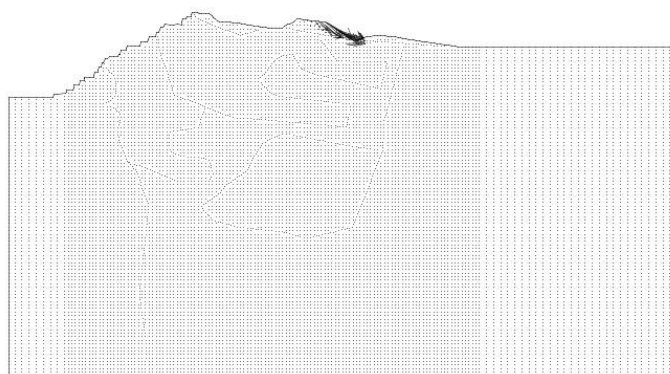
برای اطلاع از صحت نتایج انجام شده در معدن مس میدوک مقطع ۱ برای صحت سنجی انتخاب شده است. در روش تعادل حدی برای بررسی صحت سنجی، روش تحلیل Spencer انتخاب شد. مقدار ضریب ایمنی در مقطع ۱ با روش تحلیل Spencer برابر با ۱/۰۱ شد که در همین مقطع با روش تحلیل GLE/Morgnstern-price برابر با ۰/۹۹ شد.

در روش عددی نیز برای صحت سنجی از اطلاعات معدن در بهمن ماه سال ۱۳۹۸ در مقطع ۱ استفاده شد. مقطع ۱ معدن طبق مراحل شبیه سازی و تحلیل پایداری که در FLAC بیان شده است، مدل سازی شد و مقدار ضریب ایمنی تعیین شد. در شکل ۵-۳۰ مقطع ۱ کارنت در FLAC نشان داده شده است. مقدار ضریب ایمنی در این مقطع برابر با ۱/۵۴ شد که در شکل ۵-۳۱ نشان داده شده است.



شکل (۵-۳۰) مقطع ۱

Step 43033
Factor of Safety 1.54
Boundary plot
Velocity vectors
max vector = 4.098E-02



شکل (۵-۳۱) بردارهای سرعت در مقطع ۱

۵-۱۲- نتیجه گیری

محاسبه ضریب ایمنی بهترین فاکتور برای تحلیل پایداری شیب کلی می‌باشد. که در این پروژه از روش تعادل حدی و روش عددی برای تحلیل پایداری شیب استفاده شده است. استفاده از روش عددی نیز مشکلات و محدودیت‌هایی نیز دارد. برای اطمینان از درستی نتایج روش عددی ملزم به اندازه‌گیری‌های دقیق از خواص مصالح و پارامترهای ژئوتکنیکی مورد نیاز در معادله رفتاری مورد استفاده صورت گیرد. همچنین با توجه به اینکه روش‌های عددی نیاز به فرمول بندی پیچیده‌تر و کامپیوترهای ابر قدرت و زمان بیشتری برای تحلیل دارد، قادر به ارائه رفتار واقعی‌تر شیب‌ها می‌باشد. روش تعادل حدی به علت سهولت کاربرد و همچنین به دلیل سابقه زیاد و تجربه طولانی به کارگیری آنها، به شدت مورد توجه محققین بوده و به صورت گسترده مورد استفاده قرار گرفته‌اند. با توجه به گسترش علوم محاسبات عددی و قابل دسترس شدن نرم افزارهای کامپیوتری و ژئوتکنیکی، استفاده از روش‌های تفاضل محدود و اجزاء محدود بیشتر شده است. روش‌های عددی نیز پیچیده‌تر از روش تعادل حدی می‌باشد. با توجه به نتایج به دست آمده از روش تعادل حدی و روش عددی مشاهده شد که اختلاف بین نتایج ضریب ایمنی می‌تواند به دلیل استفاده از معیارهای مختلف در دو روش تحلیل باشد. در روش‌های تعادل حدی و روش عددی با در نظر گرفتن ضریب ایمنی کمتر از $\frac{1}{3}$ مقاطع ناپایدار، پایدار شدند. در روش تعادل حدی مقاطع ۱، ۲، ۳، ۴، ۵ و ۷ ناپایدار بود

که با اصلاح شیب این مقاطع پایدار شدند، در روش عددی نیز مقاطع ۴،۱ و ۷ ناپایدار بودند. همچنین با کم کردن ارتفاع آب زیرزمینی نسبت به کف معدن مقدار ضریب ایمنی افزایش پیدا کرده که می توان مقاطع ناپایدار را پایدار کرد. با بررسی تاثیر پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک بر ضریب ایمنی مشخص شد که با افزایش زاویه اصطکاک و چسبندگی، ضریب ایمنی نیز افزایش می یابد.

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادات

۶-۱- نتیجه گیری

در این پژوهش به بررسی تحلیل پایداری شیب معدن میدوک با استفاده از روش تعادل حدی و روش عددی پرداخته شده است و نتایج زیر حاصل شد که به اختصار به آن‌ها اشاره می‌شود.

(۱) مقدار ضریب ایمنی $1/3$ به عنوان حداقل مقدار ضریب ایمنی پایدار در مقاطع معدن در نظر گرفته شد.

(۲) در روش تعادل حدی مقاطع ناپایدار، با کم کردن زاویه شیب کلی پایدار شدند.

(۳) تفاوت نتایج ضریب ایمنی در روش‌های عددی و تعادل حدی می‌تواند به دلیل استفاده از معیارهای مختلف باشد.

(۴) با کم کردن ارتفاع آب زیرزمینی نسبت به کف معدن نیز مقدار ضریب ایمنی تا حدودی افزایش پیدا می‌کند و می‌تواند موثر در افزایش ضریب ایمنی باشد.

(۵) با بررسی تاثیر چسبندگی و زاویه اصطکاک بر ضریب ایمنی مشخص شد هرچه چسبندگی و زاویه اصطکاک افزایش یابد، مقدار ضریب ایمنی نیز افزایش می‌یابد.

۶-۲- پیشنهادات

در پایان پروژه تحلیل پایداری شیب معدن میدوک نیز پیشنهاداتی برای مطالعات آتی ارائه می‌شود که به آن‌ها اشاره می‌شود.

(۱) با توجه به اهمیت پایداری شیب در ایمنی معادن روباز، می‌توان از روش‌های تحلیل دقیق‌تر مثل مدل‌سازی سه بعدی برای اطمینان بیشتر از نتایج تحلیل انجام گیرد.

(۲) تعیین دقیق‌تر شرایط هیدرولوژیکی و ساخت مدل هیدروژئولیکی و اعمال شرایط هیدروژئولوژی واقعی - تر، مطابق با مدل هیدرولوژی کمک شایانی به انجام تحلیل‌های دقیق پایداری شیب خواهد نمود.

(۳) در نظر گرفتن تاثیر آلتراسیون بر روی خصوصیات ژئومکانیکی که منجر به نتایج دقیق‌تر تحلیل پایداری شیب می‌شود.

مراجع

- [1] Adila N. Samir N. Lazar K. Resad H. (2013) "Numerical Methods in Analysis of Slope Stability," Int. J. Sci. Eng. Investig., vol. 2, pp 41–48.
- [۲] فرنیاس. (۱۳۹۷)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "تحلیل پایداری شیب دیواره شرقی معدن سنگ آهن چاه گز به روش های تجربی و عددی"، وزارت علوم تحقیقات و فناوری مجتمع آموزش عالی زرنند.
- [۳] نظری ا. (۱۳۹۷)، پایان نامه کارشناسی ارشد "تحلیل پایداری شیب معدن سنگ آهن شمس آباد"، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [4] Cheng Y. Lau C. (2013), "Slope Stability Analysis and Stabilization New Methods and Insight, Taylor & Francis e-Library". International Journal of Science and Engineering Investigations, 2(14), pp 41–48.
- [5] US Army corps of engineers, (2003), "Engineering and Design Slope Stability".
- [6] Adila N. Samir N, and M A. (2005), "Estimation of slope stability at pit mine 'Moscanica' Zenica using computer," Rudarski radovi 1/2005, RTB Bor, pp. 44–49.
- [7] Adila N. Samir N. Ibrahim L. (2005), "Analysis of the overall slope stability on pit mine 'Moscanica' in Zenica with methods Bishop and Morgenstern – Price," Proceedings 37th IOCM, Technical faculty at Bor University of Belgrade and Copper Institute Bor, pp. 28–34.
- [8] Petri R. Stein W. (2012), "Opencast mine slopes – Stability of slopes in opencast lignite mines, North Rhine-Westphalia," World of Mining-Surface & Underground, vol 64, Germany, pp. 114–125
- [9] Martens P. Katz T. Ahmad S, Fuchsschwanz M. (2011), "Investigations on stabilization of hard coal waste dump in Vietnam," World of Mining-Surface & Underground, vol 63, Germany, pp. 265–274.
- [10] P Moore. (2009), "The harder they fall," Mining Magazine, pp. 36–39.
- [۱۱] ترک آباد ح. (۱۳۹۴)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "تعیین پایداری دیواره نهایی معادن روباز"، دانشکده معدن، دانشگاه یزد.
- [۱۲] جمالی جهرمی م. (۱۳۸۶)، "تحلیل پایداری شیب دیواره نهایی معدن مس میدوک به کمک روش عددی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [13] Ashutosh K. Dhananjai V. Rahul T and TN S. (2013), "A Review on Numerical Slope Stability Analysis," International Journal of Science, Engineering and Technology Research, vol 2, pp 1315–1320.

[۱۴] اصانلو م. (۱۳۸۹)، "روش های استخراج معادن سطحی"، چاپ اول، انتشارات صنعتی امیرکبیر، جلد دوم، تهران.

[15] Duncan C. Wyllie, (2018) "Rock Slope Engineering Civil and Mining", Civil Appl edited by Civil Applications Fifth Edition.

[16] Abbas J. (2014), "Slope Stability Analysis Using Numerical Method", Journal of Applied Sciences, PP 846–859.

[17] Sjöberg J. (1999), PhD thesis, "Large scale slope stability in open pit mining," Lulea University of Technology, .

[18] Duncan C. Wyllie, (2005) "Rock Slope Engineering Civil and Mining", Civil Appl edited by Civil Applications 4th Edition.

[۱۹] مارک ک. (۱۳۸۳) "طراحی و برنامه ریزی معادن روباز" ترجمه خدایاری علی اصغر و یآوری مهدی، چاپ اول، دانشگاه صنایع و معادن ایران، تهران.

[۲۰] دستورالعمل تحلیل پایداری و پایدارسازی شیب ها در معادن روباز، نشریه شماره ۵۳۸

[21] Neil B. Nick B. (2015) "Introducing the Q-slope method and its intended use within civil and mining engineering projects," ISRM Reg. Symp. EUROCK, pp. 157-162.

[22] Neil B. Nick B. (2016), "Empirical slope design for hard and soft rocks using Q-slope", ARM 50th US Rock Mech, / Geomech, Symp, vol. 2, pp. 1301-1308.

[23] Neil B. Nick B. (2017) "The Q-Slope Method for Rock Slope Engineering," Rock Mech. Rock Eng, vol. 50, pp. 3307-3322.

[24] Eberhardt E. (2003) "Rock Slope Stability Analysis – Utilization of Advanced Numerical Techniques," Earth Ocean Sci. UBC, p 41.

[۲۵] حاجی عزیزی م. کیلانه ئی ف. کیلانه ئی پ. (۱۳۹۳)، "مقایسه روش های تعادل حدی در پایداری شیروانی های خاکی"، اولین کنفرانس ملی مکانیک خاک و مهندسی پی، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی تهران.

[26] Babak A. Seyedsaeid A. Javad S. Behrooz A. (2019), "Stability Analysis of Rock Structure in Large Slopes and Open-Pit Mine: Numerical and Experimental Fault Modeling," Rock Mech Rock Eng, PP 4889–4905.

[27] Doug S. Erik E. John C. Boris B. (2001) "Advanced numerical techniques in rock slope stability analysis – applications and limitations", LANDSLIDES – Causes, Impacts and Countermeasures, pp. 615-624.

[28] Jing L and Hudson J. (2002) "Numerical methods in rock mechanics," International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, PP 409– 427.

- [۲۹] صدر نژاد ا. (۱۳۸۰)، "مقدمه ای بر روش اجزاء محدود"، چاپ اول، انتشارات دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی.
- [30] Soren K. Budi G. Sen P. (2014) " Stability analysis of Open pit slope by Finite Difference Method", International Journal of Resarch in Engineering and Technology, pp 326–334.
- [۳۱] داودیان ف. گلیم مقدم ع. (۱۳۸۶) " فرآیند تحلیل پایداری شیب (مزایا، معایب و محدودیت ها)", همایش ملی زلزله و مقاوم سازی ساختمان. دانشگاه آزاد اسلامی واحد بهبهان.
- [32] Richard E. Goodman, (1989) "Introduction to Rock Mechanics", 2nd Edition, New York.
- [33] Kourdey A. Aiheib M and Piguet J. (2001) "Evaluation of Slope Stability by Numerical Methods", 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkeyno, pp 705-710.
- [34] Marek C and Jerzy F, (2003) " Slope stability analysis with numerical and limit equilibrium methods", Computer Methods in Mechanics, June 3–6.
- [35] Adila N. Samir N. Lazar K. Resad H, (2013) " Numerical Methods in Analysis of Slope Stability", International Journal of Science and Engineering Investigations, vol. 2, issue 14.
- [36] Greg Y .Maged M. Ahmed S. Kim D and Peter D, (2018) "Finite Element Analysis of Rock Slope Stability Using Shear Strength Reduction Method," International Congress and Exhibition Sustainable Civil Infrastructures: Innovative Infrastructure Geotechnology GeoMEast, pp 227–235.
- [۳۷] پایگاه ملی داده‌های علوم زمین کشور، بانک اطلاعات مس:
<http://www.ngdir.com/MiningInfo/PCopperMIO.asp>
- [۳۸] بهمنی قائد ح، (۱۳۹۰)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "بررسی امکان بهینه سازی شیب دیواره نهایی معدن میدوک با بکارگیری مفاهیم عدم قطعیت"، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [۳۹] شرکت مجتمع معادن مس میدوک، (۱۳۷۳)، گزارشی از چگونگی شرایط گذشته، حال و برنامه‌های آتی طرح مس میدوک.
- [۴۰] مجتمع مس میدوک، تاریخچه معدن.
- [۴۱] مقصودی گنجه م. پازوکی ع، (۱۳۸۵)، پایان نامه کارشناسی، "مطالعات اکتشافی و ارزیابی ذخیره معدن مس میدوک"، دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [42] Masoud M. Shokrollah Z, (2020) " An application of uncertainty analysis to rock mass properties characterization at porphyry copper mines", Bulletin of Engineering Geology and the Environment, Received: 1 October 2019 /Accepted: 17 February.
- [43] ISRM, (1989) "Rock characterization", Testing and monitoring: ISRM suggested methods. Pergamon Press, Oxford.

- [44] Hoek E. Brown ET, (1980) “Empirical strength criterion for rock masses”, J Geotech Geoenviron Eng 9:1013–1035.
- [45] Cai M, (2010) “Practical Estimates of Tensile Strength and Hoek – Brown Strength Parameter mi of Brittle Rocks” ,Rock Mech Rock Eng, 43:167–184.
- [46] Marinos P. Hoek E. Marinos V, (2006) “Variability of the engineering properties of rock masses quantified by the geological strength index: the case of ophiolites with special emphasis on tunnelling”, Bull Eng Geol Environ 65:129-142.
- [47] Sonmez H. Ulusay R, (1999) “Modifications to the geological strength index (GSI) and their applicability to stability of slopes”, Int J RockMech Min Sci 36:743-760.
- [48] Hoek E. Carlos Carranza T. Brent C, (2002) "Hoek–Brown failure criterion—2002 edition", Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 267–273.
- [49] Itasca consulting group, (2021) Technical report of geotechnical stability analysis of Miduk Mine.
- [50] Itasca Consulting Group Inc, (2011) "FLAC User Guide, version 7.0" Minneapolis, Minnesota, USA.
- [51] Wang Y. Trevor S and Victor Mwangi B, (2019) "Slope stability of the middle stack of an open pit", Int. J. Sci. Technol. Res., vol. 8, pp. 61-69.

Abstract

Slopes stability analysis is one of the most important issues in mining activities. Any incorrect analysis can lead to irreparable damage. Types of slope stability analysis methods include numerical, limit equilibrium and experimental methods. In this project, limit equilibrium and numerical methods have been used to analyze the slope stability. The limit equilibrium method has been highly regarded by researchers due to its ease of use, long history and long experience of using them. Numerical methods also require more complex formulations, superpowers and more time to analyze, thus being able to provide more realistic slope behavior. SLIDE software was applied in limiting equilibrium method and two dimensions FLAC software was applied in numerical method. In this thesis, the slope stability of Midook copper mine walls has been studied. Since the presence of groundwater is one of the most important factors affecting the stability of open pit mines, the effect of different levels of groundwater on the safety factor was investigated to obtain a good view of this parameter. Seven cross sections perpendicular to the wall surface were selected for analysis in a way to represent all mine walls. The mining environment was considered as an equivalent continuous environment and the accepted stability criterion for the analysis of slope walls, equal to a safety factor of 1.3. The results showed that in the limit balance method, sections 1, 4, 6 and 7 had a safety factor of less than 1.3, and finally, by stabilizing these sections, the optimal slope for sections was proposed. In the numerical method, sections 1, 4 and 7 were unstable. Moreover, in 5 different groundwater levels, level 100, 75, 50, 25 and 0 in relation to the mine floor, the amount of safety coefficient was determined for the sections, and the result indicated that by reducing the height of groundwater in relation to the mine floor, the amount of safety coefficient increases.

Keywords: slope stability, limiting equilibrium analysis, numerical analysis, optimal slope, groundwat



Shahrood University of
Technology

Faculty of Engineering Department of mining Engineering

MSc Thesis in Rock Mechanic Engineering

**Numerical Investigation of Hydro-mechanical Parameters'
Effects on Miduk Copper Mine Slope Stability**

By: Mozhgan Rasouli

Supervisor:

Dr. Zare Shokrollah

2021