

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته‌ی مهندسی معدن گرایش استخراج مواد معدنی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد استخراج مواد معدنی

ارزیابی اثرات ابعادی و اثرات محیطی بر تحلیل پایداری شیب دیواره معادن

روباز (مطالعه موردی: دیواره بلوک تکتونیکی ۱ معدن سنگ آهن چغارت)

نگارنده: حسین زبرجدی دانا

اساتید راهنما:

دکتر رضا خالوکاکائی

دکتر رامین رفیعی

استاد مشاور:

دکتر علیرضا یاراحمدی بافقی

بهمن ۱۳۹۶

شماره: ۹۹۲۰۸۹
تاریخ: ۹۶/۱۲/۱۲

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

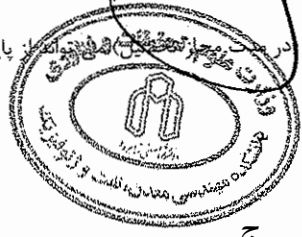
با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد آقای حسین زبرجدی دانا با شماره دانشجویی ۹۴۰۸۷۸۴ رشته مهندسی معدن گرایش استخراج معدن تحت عنوان «ارزیابی اثرات ابعادی و اثرات محیطی بر تحلیل پایداری شیب دیواره معادن روباز (مطالعه موردی: دیواره بلوک نکتونیکي ۱ معدن سنگ آهن چغارت)» که در تاریخ ۱۳۹۶/۱۱/۱۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با درجه: تمتع) مردود
 نوع تحقیق: نظری عملی

امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	استاد	دکتر رضا خالوکاکنی	۱- استاد راهنمای اول
	استادیار	دکتر رامین رفیعی	۲- استاد راهنمای دوم
	دانشیار	دکتر علیرضا یاراحمدی	۳- استاد مشاور
	استادیار	دکتر مهدی نوروزی	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استاد	دکتر محمد عطایی	۵- استاد ممتحن اول
	دانشیار	دکتر فرهنگ سرشکی	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر علیرضا عرب امیری
 تاریخ و امضاء و مهر دانشکده: ۹۶/۱۲/۱۲

تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر در صورت تصویب هیأت داوران می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).



تقدیم به

پدر و مادرِ دلسوز و مهربانم؛ که وجودشان مایه
آرامش، دلگرمی و امید زندگی این حقیر است.

سپاسگزاری

از همه زحمات دلسوزانه اساتید گرامی، پروفسور خالوکاکائی، دکتر رفیعی و دکتر یاراحمدی و همچنین دوستان عزیزی که بنده را در تدوین این پایان نامه یاری نمودند، سپاسگزاری می کنم. امید است، قدردان زحمات ایشان بوده و پاسخگوی شایسته ای برای کمک های بی دریغشان باشم.

تعهدنامه

اینجانب حسین زبرجدی دانا دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته استخراج مواد معدنی دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع «ارزیابی اثرات ابعادی و اثرات محیطی بر تحلیل پایداری شیب دیواره معادن روباز (مطالعه موردی: دیواره بلوک نکتونیک ۱ معدن سنگ آهن چغارت)» تحت راهنمایی دکتر رضا خالوکاکائی و دکتر رامین رفیعی متعهد می شوم:

- پژوهش‌های 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 می‌باشد و مقالات مستخرج با نام دانشگاه صنعتی شاهرود و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده‌اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این 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:

امضاء دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

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

چکیده

تحلیل پایداری شیب یکی از مهم‌ترین مسائل در مهندسی معدن و ژئوتکنیک است. نادیده گرفتن اهمیت این مسائل می‌تواند منجر به خسارات قابل توجهی در زمینه ایمنی و اقتصاد شود. انتخاب روش مناسب تحلیل پایداری شیب نیازمند درک صحیحی از چگونگی تأثیر عوامل مختلف بر روی نتایج و خروجی تحلیل‌ها است. با وجود توسعه روش‌های سه‌بعدی، اکثر تحلیل‌های پایداری شیب به صورت دوبعدی با در نظر گرفتن فرض‌های ساده‌سازی انجام می‌شوند در صورتی که این تحلیل‌ها تأثیرات تحلیل‌های واقعی‌تر سه‌بعدی را نادیده می‌گیرند. همین موضوع سبب اختلاف بین نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی می‌شوند. در مطالعات زیادی به اختلاف نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی پرداخته شده است که از این اختلاف با عنوان «اثر سه‌بعدی» یاد می‌شود. عوامل متعددی در میزان اثر سه‌بعدی در پایداری شیب مؤثر هستند. در این پژوهش اثر سه‌بعدی ناشی از پارامترهایی نظیر هندسه واقعی پیت، تندی شیب و اندازه ابعاد مش با عنوان «اثرات ابعادی» و اثر سه‌بعدی ناشی از پارامترهایی نظیر تغییر خواص ژئومکانیکی (چسبندگی و زاویه اصطکاک) و میزان درزه‌داری با عنوان «اثرات محیطی»، با توجه به ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در راستای اهداف پژوهش، از نرم‌افزارهای عددی تفاضل محدود FLAC و FLAC3D و نرم‌افزارهای عددی المان مجزای UDEC و 3DEC برای مدل‌سازی و تحلیل پایداری شیب بلوک تکتونیک ۱ در دو پیت قدیم (شیب تند) و جدید (شیب ملایم) معدن سنگ‌آهن چغارت استفاده شده است. در ابتدا به منظور ارزیابی اثر تغییر اندازه ابعاد مش بر روی نتایج هر یک از تحلیل‌ها، ارزیابی اثر سه‌بعدی ناشی از در نظر گرفتن هندسه واقعی و اثر اندازه مش و همچنین تعیین یک اندازه ابعاد مش مناسب برای تحلیل‌های بعدی، چندین تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی پیوسته صورت گرفت. در مرحله بعد تعدادی تحلیل پیوسته در جهت ارزیابی اثر تغییر خواص ژئومکانیکی بر روی نتایج هر یک از تحلیل‌ها و ارزیابی اثر سه‌بعدی ناشی از تغییر خواص ژئومکانیکی انجام شد. به منظور بررسی تأثیر میزان درزه‌داری محیط بر اثر سه‌بعدی و نتایج هر یک از تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی، چندین تحلیل ناپیوسته دوبعدی و سه‌بعدی با میزان

درزه‌داری متفاوت اجرا شد. نتایج بدست آمده، تفاوت معناداری را بین ضرایب ایمنی تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی نشان می‌دهند. از بین عوامل بررسی‌شده، تغییر زاویه اصطکاک، به خصوص در شیب ملایم بیشترین تأثیر را در تغییرات نتایج و اثر سه‌بعدی دارند.

کلمات کلیدی: اثر سه‌بعدی، پایداری شیب، اثرات ابعادی، اثرات محیطی، معادن روباز، تحلیل‌های

پیوسته، تحلیل‌های ناپیوسته

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

- 1- *Assessment of Dimensional Effects & Media Effects in Continuous Slope Stability Analysis of Open-Pit Mines* (در مرحله داوری)

فهرست مطالب

۱- فصل اول: کلیات	۱
۱-۱- مقدمه	۲
۲-۱- بیان مسئله	۳
۳-۱- ضرورت انجام پژوهش	۵
۴-۱- اهداف پژوهش	۶
۵-۱- روش پژوهش	۶
۶-۱- ساختار پایان نامه	۷
۲- فصل دوم: مروری بر پیشینه پژوهش	۹
۱-۲- مقدمه	۱۰
۲-۲- پیشینه ارزیابی اثر سه بعدی ناشی از اثرات ابعادی و اثرات محیطی	۱۰
۳-۲- جمع بندی	۲۱
۳- فصل سوم: مبانی نظری	۲۵
۱-۳- مقدمه	۲۶
۲-۳- عوامل تاثیرگذار بر نتایج تحلیل های پایداری شیب	۲۶
۳-۳- تحلیل های دوبعدی و سه بعدی	۲۷
۴-۳- اثرات ابعادی بر اثر سه بعدی	۳۰
۱-۴-۳- اثر هندسه	۳۰
۲-۴-۳- اثر مش	۳۳

- ۳-۵- اثرات محیطی بر اثر سه بعدی ۳۴
- ۳-۵-۱- اثر آب زیرزمینی ۳۴
- ۳-۵-۲- اثر تغییر خواص مقاومتی ۳۵
- ۳-۵-۳- اثر میزان درزه‌داری ۳۵
- ۳-۶- تحلیل‌های پیوسته و ناپیوسته ۳۶
- ۳-۷- جمع بندی ۳۸
- ۴- فصل چهارم: مطالعه موردی ۳۹
- ۴-۱- مقدمه ۴۰
- ۴-۲- معرفی معدن سنگ آهن چغارت ۴۰
- ۴-۳- وضعیت زمین‌شناسی منطقه ۴۰
- ۴-۴- توپوگرافی و روش استخراج ۴۲
- ۴-۵- بلوک‌های تکتونیکی ۴۵
- ۴-۶- عوامل ساختاری ۴۵
- ۴-۶-۱- برداشت و دسته‌بندی درزه‌ها ۴۶
- ۴-۶-۲- تحلیل آماری ۴۶
- ۴-۷- جمع بندی ۴۸
- ۵- فصل پنجم: مدل‌سازی و تحلیل نتایج ۵۱
- ۵-۱- مقدمه ۵۲
- ۵-۲- فرض‌های تحلیل ۵۲

۵۴	۳-۵- تحلیل‌های پیوسته.....
۵۵	۱-۳-۵- اثر اندازه ابعاد مش.....
۶۸	۲-۳-۵- اثر تغییر خواص ژئوتکنیکی.....
۷۴	۴-۵- تحلیل‌های ناپیوسته.....
۷۵	۱-۴-۵- اثر میزان درزه‌داری.....
۹۰	۵-۵- جمع‌بندی.....
۹۳	۶- فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهاد.....
۹۴	۱-۶- نتیجه‌گیری.....
۹۵	۲-۶- پیشنهاد.....
۹۷	۷- منابع.....

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۲: پلات‌های شکست معدن طلای استرالیای غربی ۲۳
- شکل ۱-۳: تقسیم‌بندی شیب‌ها بر اساس تغییر انحنای در راستای عمودی و افقی ۳۱
- شکل ۲-۳: نمونه‌ای از یک معدن روباز با پیچیدگی‌های هندسی ۳۲
- شکل ۳-۳: تقسیم‌بندی محیط توده‌سنگ بر اساس میزان درزه‌داری ۳۷
- شکل ۱-۴: موقعیت جغرافیایی معدن چغارت و راه‌های دسترسی به آن ۴۱
- شکل ۲-۴: مقطع طولی زمین‌شناسی معدن سنگ‌آهن چغارت در سال ۱۳۷۲ ۴۲
- شکل ۳-۴: محدوده نهایی پیت قدیم ۴۳
- شکل ۴-۴: محدوده نهایی پیت جدید ۴۴
- شکل ۵-۴: تصویر ماهواره‌ای از پیت جدید معدن سنگ‌آهن چغارت در سال ۱۳۹۶ ۴۴
- شکل ۶-۴: محدوده بلوک بندی تکتونیکی محدوده معدن چغارت ۴۶
- شکل ۷-۴: خطوط برداشت درزه در بلوک‌های مختلف معدن چغارت ۴۷
- شکل ۸-۴: کنترل تمرکز درزه‌ها و تفکیک آن‌ها در بلوک تکتونیکی ۱ ۴۷
- شکل ۱-۵: مدل هندسی بلوک تکتونیکی ۱ و مقطع AB در الف) پیت قدیم و ب) پیت جدید .. ۵۶
- شکل ۲-۵: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در مقطع AB پیت قدیم با اندازه ابعاد مش درشت ۵۹
- شکل ۳-۵: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در مقطع AB پیت قدیم با اندازه ابعاد مش ریز ۵۹
- شکل ۴-۵: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در مقطع AB پیت قدیم با اندازه ابعاد بسیار ریز ۵۹
- شکل ۵-۵: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در مقطع AB پیت جدید با اندازه ابعاد مش درشت ۶۰

- شکل ۵-۶: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در مقطع AB پیت جدید با اندازه ابعاد مش ریز
 ۶۰.....
- شکل ۵-۷: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در مقطع AB پیت جدید با اندازه ابعاد مش بسیار
 ریز ۶۰.....
- شکل ۵-۸: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در بلوک تکتونیکی ۱ پیت قدیم با اندازه ابعاد
 مش درشت ۶۳.....
- شکل ۵-۹: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در بلوک تکتونیکی ۱ پیت قدیم با اندازه ابعاد
 مش ریز ۶۳.....
- شکل ۵-۱۰: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در بلوک تکتونیکی ۱ پیت جدید با اندازه ابعاد
 مش درشت ۶۴.....
- شکل ۵-۱۱: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در بلوک تکتونیکی ۱ پیت جدید با اندازه ابعاد
 مش ریز ۶۴.....
- شکل ۵-۱۲: تغییرات ضریب ایمنی در مقابل تغییرات اندازه ابعاد مش ۶۶.....
- شکل ۵-۱۳: تغییرات اثر سه بعدی در مقابل تغییرات اندازه ابعاد مش ۶۸.....
- شکل ۵-۱۴: تغییرات ضریب ایمنی در مقابل تغییرات زاویه اصطکاک ۷۰.....
- شکل ۵-۱۵: تغییرات FOS_{3D}/FOS_{2D} در مقابل تغییرات زاویه اصطکاک ۷۱.....
- شکل ۵-۱۶: تغییرات ضریب ایمنی در مقابل تغییرات چسبندگی ۷۳.....
- شکل ۵-۱۷: تغییرات اثر سه بعدی در مقابل تغییرات چسبندگی ۷۴.....
- شکل ۵-۱۸: مقطع AB پیت قدیم با میزان درزه داری ۱۰٪ ۷۷.....
- شکل ۵-۱۹: مقطع AB پیت قدیم با میزان درزه داری ۱۵٪ ۷۷.....
- شکل ۵-۲۰: مقطع AB پیت قدیم با میزان درزه داری ۲۰٪ ۷۷.....
- شکل ۵-۲۱: مقطع AB پیت جدید با میزان درزه داری ۱۰٪ ۷۸.....

- شکل ۵-۲۲: مقطع AB پیت جدید با میزان درزه‌داری ۱۵٪ ۷۸
- شکل ۵-۲۳: مقطع AB پیت جدید با میزان درزه‌داری ۲۰٪ ۷۸
- شکل ۵-۲۴: سطح شکست احتمالی مقطع AB پیت جدید در درزه‌داری ۱۰٪ و اندازه ابعاد مش ۱۰ متر ۸۱
- شکل ۵-۲۵: سطح شکست احتمالی مقطع AB پیت جدید در درزه‌داری ۱۵٪ و اندازه ابعاد مش ۱۰ متر ۸۱
- شکل ۵-۲۶: سطح شکست احتمالی مقطع AB پیت جدید در درزه‌داری ۲۰٪ و اندازه ابعاد مش ۱۰ متر ۸۱
- شکل ۵-۲۷: سطح شکست احتمالی مقطع AB پیت قدیم در درزه‌داری ۱۰٪ و اندازه ابعاد مش ۱۰ متر ۸۲
- شکل ۵-۲۸: سطح شکست احتمالی مقطع AB پیت قدیم در درزه‌داری ۱۵٪ و اندازه ابعاد مش ۱۰ متر ۸۲
- شکل ۵-۲۹: سطح شکست احتمالی مقطع AB پیت قدیم در درزه‌داری ۲۰٪ و اندازه ابعاد مش ۱۰ متر ۸۲
- شکل ۵-۳۰: تغییرات ضریب ایمنی دوبعدی شیب تند در درزه‌داری های مختلف نسبت به تغییر اندازه ابعاد مش ۸۳
- شکل ۵-۳۱: تغییرات ضریب ایمنی دوبعدی شیب ملایم در درزه‌داری های مختلف نسبت به تغییر اندازه ابعاد مش ۸۳
- شکل ۵-۳۲: تغییرات ضریب ایمنی سه‌بعدی شیب تند در درزه‌داری های مختلف نسبت به تغییر اندازه ابعاد مش ۸۵
- شکل ۵-۳۳: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در بلوک تکتونیکی ۱ پیت قدیم در تحلیل ناپیوسته ۸۶

شکل ۵-۳۴: تغییرات ضریب ایمنی سه‌بعدی شیب ملایم در درزه‌داری‌های مختلف نسبت به تغییر

اندازه ابعاد مش ۸۷

شکل ۵-۳۵: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در بلوک تکتونیکی ۱ پیت جدید در تحلیل

ناپیوسته ۸۸

شکل ۵-۳۶: مقایسه ریزش اتفاق افتاده در بلوک تکتونیکی ۱ پیت قدیمی با تحلیل ناپیوسته

سه‌بعدی پیت قدیم ۸۹

فهرست جداول

- جدول ۱-۲: خلاصه‌ای از پژوهش‌های پیشین ۲۲
- جدول ۱-۴: ویژگی‌های آماری دسته درزه بلوک تکتونیکی ۱ ۴۸
- جدول ۱-۵: مشخصات هندسی مقطع AB در پیت‌های قدیم و جدید ۵۶
- جدول ۲-۵: مشخصات هندسی بلوک تکتونیکی ۱ در پیت‌های قدیم و جدید ۵۶
- جدول ۳-۵: خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ بلوک تکتونیکی ۱ ۵۷
- جدول ۴-۵: ضرایب ایمنی حاصل از تحلیل‌های دوبعدی در اندازه ابعاد مش مختلف ۵۸
- جدول ۵-۵: ضرایب ایمنی حاصل از تحلیل‌های سه‌بعدی در اندازه ابعاد مش مختلف ۶۱
- جدول ۶-۵: اثر سه‌بعدی به دست آمده در اندازه ابعاد مش مختلف ۶۷
- جدول ۷-۵: تغییرات ضریب ایمنی در اثر تغییر زاویه اصطکاک ۶۹
- جدول ۸-۵: تغییرات اثر سه‌بعدی در اثر تغییر زاویه اصطکاک ۷۱
- جدول ۹-۵: تغییرات ضریب ایمنی در اثر تغییر چسبندگی ۷۲
- جدول ۱۰-۵: تغییرات اثر سه‌بعدی در اثر تغییر چسبندگی ۷۳
- جدول ۱۱-۵: خصوصیات هندسی و آماری دسته درزه‌های اصلی بلوک تکتونیکی ۱ ۷۶
- جدول ۱۲-۵: خصوصیات ژئومکانیکی دسته درزه‌های اصلی بلوک تکتونیکی ۱ ۷۶
- جدول ۱۳-۵: ضرایب ایمنی حاصل از تحلیل‌های دوبعدی تحلیل‌های ناپیوسته با توجه به میزان درزه‌داری ۷۹
- جدول ۱۴-۵: ضرایب ایمنی حاصل از تحلیل‌های سه‌بعدی تحلیل‌های ناپیوسته با توجه به میزان درزه‌داری ۸۴
- جدول ۱۵-۵: اثر سه‌بعدی ناشی از تغییر میزان درزه‌داری ۹۰

فصل اول

کلیات

۱-۱- مقدمه

مسائل مرتبط با پایداری شیب یکی از مهم‌ترین مسائل موجود در مهندسی معدن، عمران و ژئوتکنیک در هر دو زمینه پژوهش و کاربرد هستند. چنین مسائلی باید با در نظر گرفتن جنبه‌های مختلف مسئله، دقت کافی و با استفاده از روش‌های مناسب مورد تحلیل و ارزیابی قرار گیرند. امروزه، با کم شدن منابع معدنی نزدیک به سطح و پیشرفت تجهیزات استخراج، عمق معادن روباز در حال افزایش است. با افزایش عمق معدن کاری در معادن روباز، ارتفاع دیواره‌ها زیاد می‌شود و متعاقب آن بحث پایداری و کنترل ایمنی معدن اهمیت خاصی پیدا می‌کند؛ رخ دادن شکست دیواره‌ها در این حالت تأثیر قابل توجه‌ای بر عملیات معدن کاری خواهد داشت. از این رو، نادیده گرفتن اهمیت این مسائل می‌تواند منجر به خسارات جبران‌ناپذیری در زمینه ایمنی کارکنان و تجهیزات و از دست رفتن زمان، تولید و در نتیجه سرمایه شود. در تحلیل پایداری دیواره‌های بلند نسبت به دیواره‌های کوتاه، عوامل ویژه دیگری مانند شرایط تنش در پیت، تأثیر فشار آب زیرزمینی و تنش مؤثر، شرایط زمین‌شناسی، به ویژه وجود ساختارهای اصلی و کنترلی زمین‌شناسی، هندسه پیت و انحنای آن نیز دخیل هستند. برای طراحی دیواره‌های بزرگ، به دلیل تنوع مواد با رفتارهای مختلف و عوارض ساختاری متعدد، داده‌های اندک و پیچیدگی‌های هندسی، عموماً روش‌های عددی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

۱-۲- بیان مسئله

روش‌های مختلفی برای تحلیل مسائل پایداری شیب وجود دارند، از جمله: روش‌های تحلیلی، روش‌های تجربی و روش‌های عددی. روش‌های عددی را می‌توان به روش تعادل حدی^۱ (LEM)، روش المان محدود^۲ (FEM)، روش تفاضل محدود^۳ (FDM)، روش المان مجزا^۴ (DEM) و غیره تقسیم‌بندی کرد. همه این روش‌ها، قابلیت اجرا با رویکردهای دوبعدی و سه‌بعدی را دارند؛ علاوه بر این می‌توان این روش‌ها را به دو دسته «پیوسته»^۵ و «ناپیوسته»^۶ نیز تقسیم کرد. با توجه به روش و رویکرد انتخابی، نتایج تحلیل‌ها می‌توانند متفاوت باشند. بر این اساس، چندین عامل مهم در خروجی تحلیل‌های مسائل پایداری شیب دخیل هستند و با توجه به شرایط مختلف، هر کدام از آن‌ها می‌توانند به صورت بالقوه تأثیرات قابل توجه‌ای را در نتایج داشته باشند.

اغلب تحلیل‌های مسائل پایداری شیب در دو بعد و تحت فرض‌های کرنش صفحه‌ای انجام می‌شوند، در صورتی که توزیع میدان تنش و جابجایی در مسائل فیزیکی عموماً حالت سه‌بعدی دارند. برای بررسی دقیق‌تر میدان تنش-تغییر شکل، تحلیل‌های سه‌بعدی کارایی بیشتری دارند و نتایج نزدیک به واقعیت را ارائه می‌کنند. البته در بعضی مسائل، تحلیل سه‌بعدی چندان لزومی ندارد. این مسائل شامل مواردی است که بتوان فرض‌های ساده‌سازی دوبعدی (کرنش صفحه‌ای، تنش صفحه‌ای و تقارن محوری) را در آن‌ها در نظر گرفت.

تحلیل سه‌بعدی، به دلیل در نظر گرفتن هندسه سه‌بعدی و شرایط مرزی واقعی، یک مدل واقعی‌تر را فراهم می‌کند. به همین دلیل، در سال‌های اخیر استفاده و توسعه روش‌های تحلیل سه‌بعدی شیب‌ها به یک موضوع محبوب در بین مهندسان ژئوتکنیک تبدیل شده است. زمانی که بعد یک مسئله سه‌بعدی

^۱ Limit Equilibrium Method

^۲ Finite Element Method

^۳ Finite Difference Method

^۴ Discrete Element Method

^۵ Continuous

^۶ Discontinuous

برای تحلیل به دو بعد کاهش پیدا می‌کند، دقت نتایج و اختلاف نتایج بین تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی، با توجه به روش‌های مختلف انتخابی تغییر می‌کند. تحلیل سه‌بعدی مسائل پایداری شیب زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که هندسه پیچیده وجود داشته باشد. معادن روباز همیشه دارای هندسه مقعر هستند و این مسئله، به دلیل یکسان نبودن هندسه مقاطع دوبعدی در محل‌های مختلف دیواره معدن، انتخاب مقطع مناسب جهت تحلیل دوبعدی را دشوار می‌کند. تحلیل‌های دوبعدی در شرایط به‌خصوص نسبت به تحلیل‌های سه‌بعدی مزیت‌هایی دارند اما با همه این مزیت‌ها، شکست‌های رخ داده در شیب‌ها به‌صورت سه‌بعدی هستند و هر چه شرایط هندسی، خصوصیات مقاومتی و شرایط مرزی توده مورد بررسی پیچیده‌تر باشد، نتایج تحلیل دوبعدی نسبت به تحلیل سه‌بعدی اختلاف بیشتری خواهد داشت. انتخاب محیط مناسب جهت تحلیل و همچنین پارامترهای دخیل در ویژگی‌های مختلف محیط انتخاب‌شده (مانند آب زیرزمینی، خواص ژئومکانیکی، همسان‌گردی، همگنی، میزان درزه‌داری و ...) نیز در نتایج به‌دست‌آمده تأثیر خواهند داشت. تمام مسائل تحلیل پایداری دیواره به نوعی شامل ناپیوستگی‌ها در مقیاس‌های مختلف هستند. زمانی که توده‌سنگ تقریباً یکپارچه باشد و عوارض غالبی در توده‌سنگ وجود نداشته باشد، محیط به صورت پیوسته معادل در نظر گرفته شده و تحلیل پیوسته انجام می‌شود. در صورت وجود عوارض ساختاری اصلی و کنترلی تحلیل با روش‌های ناپیوسته انجام می‌شود. معیار اصلی در انتخاب بین مدل پیوسته و ناپیوسته شدت درزه‌داری و ابعاد مسئله مورد مطالعه است.

پژوهش حاضر مسئله تحلیل پایداری شیب با توجه به در نظر گرفتن پارامترهای مؤثر در اختلاف بین نتایج تحلیل‌های پایداری شیب دوبعدی و سه‌بعدی (اثر سه‌بعدی) در پایداری شیب دیواره‌های معادن روباز بزرگ را بررسی می‌کند. به این منظور، تأثیر در نظر گرفتن هندسه واقعی شیب، تندی شیب و اندازه ابعاد مش با عنوان «اثرات ابعادی» و همچنین تأثیر خواص ژئومکانیکی توده‌سنگ و میزان درزه‌داری با عنوان «اثرات محیطی» ارزیابی خواهد شد.

۱-۳- ضرورت انجام پژوهش

با گذشت زمان و پیشرفت تجهیزات و رشد اقتصادی، ذخایری که پیش از این در اعماق بیشتری قرار داشتند و امکان استخراج آنها تا چند سال قبل وجود نداشت، بازطراحی و آماده استخراج به روش روباز شده‌اند. با افزایش عمق معدن کاری روباز، ارتفاع دیواره‌ها نیز افزایش یافته و نقش پایداری در طراحی، اجرا و پیش‌بینی احتمال شکست، بیشتر از پیش می‌شود. از این رو، برای پیش‌بینی و جلوگیری از خطرات احتمالی در چنین شرایطی، لازم است که از روش‌های تحلیل مسائل پایداری شیب متناسب با شرایط موجود استفاده شود.

مسائل پایداری شیب نیز مانند اکثر مسائل ژئوتکنیکی به داده‌ها وابسته هستند. ویژگی‌های توده‌سنگ‌ها و ساختارهای زمین‌شناسی دارای عدم قطعیت هستند و متعاقباً داده‌های برداشت‌شده نیز قطعی و ثابت نیستند. این مسئله شناخت محیط توده‌سنگ و بررسی رفتارهای آنها را دشوار و پیچیده می‌کند. علاوه بر این نوع روش انتخابی متناسب با شرایط مسئله نیز به صورت قابل توجهی در نتایج تحلیل‌ها تأثیر دارد. از این رو باید با توجه به پارامترهای مختلف درگیر در مسئله، از جمله جنس محیط سنگی، ویژگی‌ها و پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ، هندسه مسئله و ... مناسب‌ترین تحلیل را برای شرایط مورد نظر انتخاب کرد.

با وجود روش‌های متنوع و افزایش دسترسی به نرم‌افزارهای گوناگون تحلیل پایداری شیب سه‌بعدی، اکثریت قریب به اتفاق مسائل پایداری شیب به صورت دوبعدی و بدون در نظر گرفتن فرض‌های مناسب و یا تأثیری که تحلیل واقع‌گرایانه‌تر سه‌بعدی می‌تواند داشته باشد، تحلیل می‌شوند. حتی زمانی که استفاده از تحلیل‌های دوبعدی مناسب نیست، تحلیل سه‌بعدی به ندرت انجام می‌گیرد. همان طور که در بخش قبلی اشاره شد، نتایج تحلیل‌های سه‌بعدی نسبت به نتایج تحلیل‌های دوبعدی متفاوت است و این تفاوت می‌تواند با توجه به شرایط هندسی و محیطی مسئله، بیشتر و یا کمتر شود. از این رو، نیاز

به تعدیل نتایج حاصل از تحلیل دوبعدی و نزدیک کردن آن‌ها به نتایج واقعی‌تر سه‌بعدی با استفاده از در نظر گرفتن اثرات ابعادی و محیطی احساس می‌شود.

در مجموع، شناخت بهتر شرایط محیطی و ابعادی مسئله و پارامترهای مربوط به آن‌ها و همچنین میزان تأثیرگذاری هر کدام از این پارامترها به انتخاب بهترین گزینه (یکی از بهترین گزینه‌ها) در شرایط مختلف و در نتیجه کاهش خطر ناپایداری در طراحی شیب دیواره‌های معادن روباز بزرگ کمک خواهد کرد.

۱-۴- اهداف پژوهش

اهداف کلی این پژوهش به صورت زیر تقسیم‌بندی می‌شوند:

- ارزیابی اثرات ابعادی در محیط‌های پیوسته با توجه به اثر اندازه مش، اثر انحنا و اثر تندی شیب؛
 - ارزیابی اثرات محیطی در محیط‌های پیوسته با توجه به اثر خصوصیات مقاومتی (زاویه اصطکاک و چسبندگی)؛
 - ارزیابی اثرات محیطی در محیط‌های ناپیوسته با توجه به اثر میزان درزه‌داری و مقایسه تحلیل‌های پیوسته و ناپیوسته؛
 - ارزیابی اثرات ابعادی در محیط‌های ناپیوسته با توجه به اثر اندازه ابعاد مش و اثر تندی شیب.
- باید توجه داشت که ارزیابی اثرات پارامترهای مختلف بر اثر سه‌بعدی می‌توانند به صورت مجزا و یا در تعامل با دیگر پارامترها صورت گیرند. به عنوان مثال، معمولاً اثر تندی شیب بر اثر سه‌بعدی در تعامل با دیگر پارامترها (مخصوصاً اثر خصوصیات مقاومتی) در نظر گرفته می‌شوند.

۱-۵- روش پژوهش

با توجه به اهداف این پژوهش، تحلیل پایداری شیب بلوک شماره ۱ معدن سنگ‌آهن چغارت در دو پیت قدیم و جدید، با استفاده از رویکردهای دوبعدی و سه‌بعدی پیوسته و ناپیوسته صورت گرفت و نتایج بدست‌آمده، برای ارزیابی اثرات ابعادی و اثرات محیطی با هم مقایسه شدند. معیار مقایسه نتایج تحلیل‌ها، ضرایب ایمنی و سطوح شکست احتمالی به‌دست‌آمده است. به این منظور فعالیت‌های زیر

انجام شده‌اند:

۱- بررسی سابقه علمی موضوع و جمع‌آوری اطلاعات موردنیاز

۲- بازدید از منطقه و بررسی داده‌های موجود در گزارش‌های طرح

۳- تحلیل ساختاری ناپیوستگی‌های منطقه و مشخص کردن تعداد دسته درزه‌های موجود

۴- مدل‌سازی سه‌بعدی هندسی پیت‌های قدیم و جدید معدن، تهیه مقاطع دوبعدی و مدل‌سازی

ناپیوستگی‌ها

۵- تحلیل پایداری شیب به وسیله مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی پیوسته در بلوک تکتونیکی ۱

معدن

۶- تحلیل پایداری شیب به وسیله مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی ناپیوسته در بلوک تکتونیکی ۱

معدن

۷- مقایسه نتایج به‌دست‌آمده در حالت‌های مختلف و تعیین اثرات پارامترهای ابعادی و محیطی

۸- تهیه گزارش پایانی، ارائه پایان‌نامه و دفاع از پایان‌نامه

۱-۶- ساختار پایان‌نامه

پژوهش حاضر به ۶ فصل تقسیم‌بندی شده است. در فصل اول به بیان کلیات مسئله از قبیل بیان تعریف مسئله، ضرورت انجام تحقیق و روش انجام آن پرداخته شده است. در فصل دوم مروری بر مطالعات مهم در زمینه بررسی اثر سه‌بعدی در تحلیل پایداری شیب انجام شده و نتایج برخی از این مطالعات آورده شده است. در فصل سوم خلاصه‌ای از مبانی نظری مرتبط با تفاوت تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی، تفاوت تحلیل‌های پیوسته و ناپیوسته و عوامل تأثیرگذار در اختلاف نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی ارائه شده است. در فصل چهارم جهت آشنایی بیشتر و بهتر با مطالعه موردی انتخاب‌شده، موقعیت جغرافیایی، اطلاعات زمین‌شناسی، مطالعات آماری و دلایل انتخاب مطالعه موردی مورد بحث قرار گرفته است. در فصل پنجم مدل‌سازی‌های پیوسته و ناپیوسته در راستای اهداف پژوهش و با استفاده

از داده‌های مطالعه موردی انتخابی صورت گرفته و به تحلیل و تفسیر نتایج به دست آمده پرداخته شده است. در انتها و در فصل ششم نتیجه‌گیری کلی از پژوهش صورت گرفته و پیشنهادهایی برای مطالعات بعدی ارائه شده است.

فصل دوم

مروری بر

پیشینه پژوهش

۲-۱- مقدمه

در حدود ۶ دهه اخیر مطالعات زیادی بر روی تأثیر پارامترهای مختلف بر روی پایداری شیب سه‌بعدی (شیب واقعی) و تفاوت بین نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی انجام شده است. از تفاوت بین نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی با عنوان «اثر سه‌بعدی» یاد می‌شود. از آنجایی که در طول این مدت بیشتر تحلیل‌های پایداری شیب با استفاده از روش‌های دوبعدی صورت گرفته است، مساله تأثیر پارامترهای مؤثر بر پایداری شیب سه‌بعدی و نادیده گرفتن برخی از این پارامترها در تحلیل‌های رایج دوبعدی، مد نظر بسیاری از محققان بوده است. در اکثر مطالعات صورت گرفته در این زمینه از عواملی نظیر هندسه سه‌بعدی شیب، نوع انحنا و شعاع انحنای شیب، تندی شیب و ... به عنوان پارامترهای دخیل در میزان اثر سه‌بعدی یاد شده است. علاوه بر این، مطالعات زیادی نیز در زمینه بررسی تأثیر ویژگی‌های محیطی توده‌سنگ نظیر وجود ناپیوستگی‌ها، تغییر خواص مقاومتی، وجود آب زیرزمینی و ... بر پایداری شیب و اثر سه‌بعدی صورت گرفته است. در راستای اهداف این پژوهش، پیشینه موضوع بررسی اثر سه‌بعدی از دو نقطه نظر اثرات ابعادی و اثرات محیطی ارائه خواهد شد.

۲-۲- پیشینه ارزیابی اثر سه‌بعدی ناشی از اثرات ابعادی و اثرات محیطی

یکی از پارامترهایی که در پژوهش‌های پیشین در زمینه اختلاف بین نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی بیش از دیگر پارامترها به آن اشاره شده، اثر هندسه واقعی شیب، به‌خصوص انحنای آن است. در مطالعات صورت گرفته، از نسبت نتایج تحلیل‌های سه‌بعدی بر نتایج تحلیل‌های دوبعدی با عناوین

مختلفی از جمله «اثر سه‌بعدی» و «اثر انتهایی» یاد شده است.

در دهه های ۶۰ و ۷۰ میلادی، تعدادی پژوهش در این زمینه توسط اندرو و ین^۱ (۱۹۶۲)، دنو^۲ (۱۹۶۸)، پیتو و جنینگز^۳ (۱۹۷۰)، هوک و بری^۴ (۱۹۷۷) و کیم و براون^۵ (۱۹۷۷) انجام شد. این پژوهش‌های بیان کردند که پایداری شیب‌های مقعر (با انحنای افقی) نسبت به شیب‌های صاف بیشتر و پایداری شیب‌های محدب نسبت به شیب‌های صاف کمتر است (Xing, 1988).

لفور^۶ و همکاران (۱۹۷۳) تعدادی تحلیل سه‌بعدی برای دیواره‌هایی با نسبت شیب، ۳:۱ و ۶:۱ انجام دادند. برای ارزیابی دقت تحلیل‌های دوبعدی، نتایج به دست آمده از تحلیل‌های سه‌بعدی با نتایج تحلیل‌های دوبعدی مقایسه شدند. مقایسه‌ها نشان داد که نادیده گرفتن اثر انتهایی می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر نتایج ضریب ایمنی (FOS) داشته باشد (Lefebvre et al., 1973).

بالیق و آزوز^۷ (۱۹۷۵) اثرات انتهایی را بر اساس خواص مقاومتی محیط توده شیب بررسی کردند. تحلیل‌ها با در نظر گرفتن یک محیط چسبنده و به کمک نرم‌افزار کامپیوتری (STAB3D) انجام شد. نتایج کاهش ۴۰ درصدی ضریب ایمنی در اثر نادیده گرفتن اثرات انتهایی را نشان داد (Baligh & Azzouz, 1975).

در اوایل دهه ۸۰ میلادی، تمایل به مطالعه مسائل تحلیل پایداری شیب به صورت سه‌بعدی و به همان صورت که در واقعیت است، افزایش یافت. در این سال‌ها مقایسه بین تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی با استفاده از روش‌های تحلیلی و مبانی ریاضی صورت می‌گرفت، به دلیل این که تا آن زمان یک برنامه تحلیل پایداری شیب سه‌بعدی که به صورت گسترده در زمینه ژئوتکنیک مورد استفاده قرار

^۱ Andrew & Yen

^۲ Deno

^۳ Piteau & Jennings

^۴ Hoek & Bray

^۵ Kim & Brown

^۶ Lefebvre

^۷ Baligh & Azzouz

گیرد، در دسترس نبود (Stark & Eid, 1998).

چن^۱ (۱۹۸۱) مجموعه ای از تحلیل‌های پایداری دوبعدی و سه‌بعدی با استفاده از روش‌های تعادل حدی و المان محدود را بر روی شیب‌هایی با حالت شکست انتقالی انجام داد و در نهایت همه نتایج را با هم مقایسه کرد. مقایسه بین ضرایب ایمنی حاصل از تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی در شکست‌های انتقالی نشان داد که برای لغزش‌های انتقالی، نسبت ضریب ایمنی سه‌بعدی به دوبعدی (FOS_{3D}/FOS_{2D}) معمولاً بزرگ‌تر از ۱ است. زمانی که مقدار نسبت عرض به ارتفاع شیب کوچک باشد، اثر سه‌بعدی برای مواد چسبنده قابل توجه‌تر از مواد غیرچسبنده است. نسبت FOS_{3D}/FOS_{2D} در یک لایه ضعیف با شیب تند همیشه کمتر از این نسبت در یک لایه ضعیف با شیب ملایم است (Chen, 1981).

هوک و بری (۱۹۸۱) تجربه خود را در زمینه اثرات انحنا بر پایداری شیب، به صورت زیر خلاصه کردند. زمانی که شعاع انحنای یک شیب مقعر کمتر از ارتفاع شیب است، زاویه شیب می‌تواند ۱۰ درجه کمتر از زاویه پیشنهاد شده توسط تحلیل‌های رایج دوبعدی باشد. با افزایش شعاع انحنا به یک مقدار بزرگ‌تر از ارتفاع شیب، این تصحیح باید کاهش یابد. برای شعاع انحنای بالاتر از دو برابر ارتفاع شیب، می‌توان از زاویه شیب به دست آمده توسط تحلیل‌های رایج دوبعدی بدون اعمال تصحیح استفاده کرد (Hoek & Bray, 1981).

در سال ۱۹۸۳، چن و چامیئو^۲ مطالعه‌ای را در زمینه گسترش روش‌های سه‌بعدی تحلیل پایداری شیب انجام دادند. در این راستا برنامه کامپیوتری LEMIX بر پایه روش تعادل حدی و به منظور ارزیابی پایداری سه‌بعدی لغزش‌های دایره‌ای گسترش یافت. در این مطالعه مشخص شد که اثر سه‌بعدی در شیب‌هایی با طول توده شکست کوچک، قابل توجه‌تر هستند. نتایج به دست آمده از روش برش قابل قبول بود اما مشخص شد که این نتایج همیشه محافظه‌کارانه نیست. برای شیب‌های ملایم، در موادی با چسبندگی داخلی بالا و زاویه اصطکاک پایین، میزان اثر سه‌بعدی قابل توجه‌تر است. در شرایط

^۱ Chen

^۲ Chen & Chameau

به‌خصوص، FOS_{3D} به دست آمده برای مواد غیرچسبنده، ممکن است به مقدار خیلی کمی، کمتر از FOS_{2D} باشد. فشار آب منفذی ممکن است باعث شود که اثر سه‌بعدی، به‌خصوص برای خاک‌هایی با چسبندگی داخلی بالا و زاویه اصطکاک پایین، بزرگ‌تر هم شوند. در تحلیل‌های صورت گرفته، روش‌های المان محدود و تعادل حدی نتایج مشابهی را ارائه دادند (Chen & Chameau, 1983).

اسکمپتون^۱ (۱۹۸۵) بر روی تصحیح سه‌بعدی تحلیل پایداری شیب دوبعدی با استفاده از روش تحلیل برگشتی و پارامتر مقاومت برشی مطالعه کرد. در این مطالعه اعمال تصحیح سه‌بعدی به مقاومت برشی محاسبه شده از تحلیل برگشتی، با استفاده از رابطه (۱-۲) پیشنهاد شده است:

$$\tau = \frac{1}{1 + \frac{KD}{B}} \quad (1-2)$$

که در آن τ مقاومت برشی برگشتی، K ضریب فشار زمین در شکست، D میانگین عمق توده شکست و B میانگین عرض توده شکست است. در این مطالعه همچنین گزارش شده است که فاکتور تصحیح، معمولاً ۵ درصد افزایش مقاومت برشی حاصل از محاسبه برگشتی را نتیجه می‌دهد. اگرچه، این تصحیح ۵ درصدی یک مقدار متوسط است و برای موارد و مواد مختلف تغییر می‌کند (Skempton, 1985).

در سال ۱۹۸۶، لشچینسکی و بیکر^۲ با توجه به اثرات انتهایی، سازوکار شکست را برای شیب‌ها ارائه دادند. سازوکار ارائه شده محدود به مقاطع خاکی همگن و متقارن بود. نتایج حاصل از تحلیل‌های پایداری شیب با این سازوکار حاکی از فقدان اثرات انتهایی در خاک‌های غیرچسبنده و بیشترین اثرات انتهایی در خاک‌های چسبنده بود (Leshchinsky & Baker, 1986).

کاووندیس^۳ (۱۹۸۷) با استفاده از ریاضیات ساده و تعمیم آن‌ها برای محاسبه حداقل FOS_{2D} و FOS_{3D}، نتایجی را در زمینه نسبت ضرایب ایمنی در تحلیل‌های پایداری شیب بدست آورد. نتایج نشان داد که FOS_{3D} یک شیب همیشه بزرگ‌تر از FOS_{2D} همان شیب است. روش‌هایی که در آن‌ها نسبت

^۱ Skempton

^۲ Leshchinsky & Baker

^۳ Cavoundis

FOS_{3D}/FOS_{2D} کوچک‌تر از ۱ می‌شود، یا فاکتورهای نامناسبی را مورد مقایسه قرار می‌دهند و یا به احتمال زیاد شامل فرض‌های ساده‌سازی می‌شوند که جنبه‌های مهم مسئله را نادیده می‌گیرد (Cavoundis, 1987).

ژینگ^۱ (۱۹۸۸) یک روش سه‌بعدی تحلیل پایداری شیب را برای شیب‌های مقعر با استفاده از مفهوم تعادل معرفی کرد. نتایج روش سه‌بعدی، نشان دادند که با کاهش نسبت شعاع انحنا به ارتفاع، پایداری شیب‌های مقعر افزایش می‌یابد و زمانی که ضریب فشار جانبی خاک متفاوت است، تأثیر انحنا بر پایداری شیب‌های مقعر تغییر می‌کند. تأثیر انحنا بر پایداری شیب‌های مقعر با افزایش ضریب فشار جانبی، افزایش می‌یابد. اگرچه این ضریب تأثیر کوچکی بر پایداری شیب‌های صاف دارد. زمانی که نسبت شعاع انحنا به ارتفاع نسبتاً کوچک است، سطح لغزشی از پاشنه شیب‌های مقعر عبور نمی‌کند، بلکه از بالای آن‌ها می‌گذرد (Xing, 1988).

از اواخر دهه ۸۰ و در ادامه طی دهه ۹۰ میلادی، برنامه‌های کامپیوتری مختلفی جهت تحلیل سه‌بعدی پایداری شیب گسترش یافتند. اعتبار نتایج تحلیلی به دست آمده توسط این برنامه‌ها به درجه مطابقت تحلیل با سازوکار محل و موفقیت کاربر در مدل‌سازی هندسه محل و خواص مهندسی در برنامه، بستگی دارد. اکثر برنامه‌ها و روش‌های تحلیل پایداری سه‌بعدی گسترش یافته تا اواخر دهه ۹۰ میلادی، با استفاده از مطالعات پارامتریک (بدون استفاده از مطالعات موردی) مورد ارزیابی قرار گرفتند (Stark & Eid, 1998).

استارک و اید^۲ (۱۹۹۸) مقاله‌ای را ارائه دادند که در آن به عملکرد نرم‌افزارهای تحلیل پایداری شیب سه‌بعدی پرداخته شد. در این مطالعه، چندین تحلیل برگشتی پایداری شیب دوبعدی و سه‌بعدی جهت تعیین زاویه اصطکاک محیط مورد تحلیل صورت گرفت. نتایج نشان داد که تفاوت بین زاویه اصطکاک به دست آمده از تحلیل برگشتی دوبعدی در مقایسه با تحلیل برگشتی سه‌بعدی، می‌تواند به بزرگی ۳۰

^۱ Xing

^۲ Stark & Eid

درصد باشد. تحلیل‌های سه‌بعدی برای طراحی شیب‌هایی با شرایط توپوگرافی، مقاومت برشی و یا فشار آب منفذی پیچیده، مناسب هستند.

در اواخر قرن ۲۰ و با شروع قرن ۲۱ میلادی، کاربرد نرم‌افزارهای کامپیوتری گسترش چشمگیری پیدا کرد و همین موضوع امکان تحلیل‌های پایداری شیب با استفاده از نرم‌افزارهای کامپیوتری را افزایش داد (Stark & Eid, 1998).

آرلانو و استارک^۱ (۲۰۰۰)، مطالعه پارامتریکی در زمینه اهمیت اثرات انتهایی سه‌بعدی و مقایسه تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی صورت انجام دادند. نتایج این مطالعه نشان داد که با کاهش نسبت عرض به ارتفاع شیب FOS_{3D}/FOS_{2D} افزایش می‌یابد. با کاهش زاویه شیب نیز FOS_{3D}/FOS_{2D} افزایش می‌یابد (Arellano & Stark, 2000).

چاف^۲ (۲۰۰۳) بیان کرد که شرایط مرزی می‌تواند بر ضرایب ایمنی محاسبه شده در تحلیل‌های پایداری شیب دوبعدی و سه‌بعدی اثر بگذارد. شرایط مرزی رایج مورد استفاده در تحلیل‌های پایداری شیب دوبعدی و سه‌بعدی، از طریق سازوکارهای تعادل حدی و پیوسته بر اساس فرآیندهای حل، تعریف شده‌اند. یک مسئله نمونه برای نشان دادن اهمیت شرایط مرزی در تحلیل‌های پایداری شیب، در نظر گرفته شد. مثال‌های مورد نظر در این مطالعه، با استفاده از مدل‌های عددی دوبعدی و سه‌بعدی رایج در کاربرد مهندسی، حل شدند. در این مطالعه بیان شد که در صورت تغییر هندسه در جهات مختلف، وجود فشار آب منفذی و یا تغییر خواص مواد محیط مورد بررسی، پیشنهاد می‌شود مسئله با استفاده از یک نرم‌افزار تحلیل سه‌بعدی تحلیل شود (Chugh, 2003).

اید و همکاران^۳ (۲۰۰۶) مقاله‌ای ارائه دادند که هدف آن توسعه جداول پایداری دوبعدی و سه‌بعدی برای شیب‌های حساس به شکست انتقالی بود. این مطالعه با استفاده از مدل کردن شیبی که برای

^۱ Arellano & Stark

^۲ Chugh

^۳ Eid et al.

شبیه‌سازی شرایط محل با توجه به شکل‌گیری توده لغزشی، وزن واحد و مقاومت برشی مواد موجود طراحی شده بود، مطالعه پارامتریک وسیعی صورت گرفت. شیب‌ها تحت شرایط مختلف فشار آب منفذی و نیروهای لرزه‌ای در مطالعه در نظر گرفته شدند. مطالعه اهمیت ویژه و سختی‌های در نظر گرفتن اثرات انتهایی در تحلیل شکست‌های انتقالی شیب‌ها را نشان داد و پیشنهاد کرد که یک روش برای کمی‌سازی و بکارگیری آن‌ها در نظر گرفته شود. در انتها، مثال‌های عددی برای نشان دادن کاربردهای مختلف این جداول ارائه شدند. نتایج حاصل از این کار، مشابه با کارهای قبلی انجام شده بود، با این تفاوت که مبنای بررسی در این مطالعه، جداول پایداری بود. بدون در نظر گرفتن هندسه شیب و مقادیر خواص مواد تشکیل دهنده آن، مقدار FOS_{3D} بزرگ‌تر از FOS_{2D} در مقطع بحرانی توده لغزشی مشابه است؛ همچنین، اثر سه‌بعدی، یعنی مقادیر نسبت FOS_{3D}/FOS_{2D} ، با کاهش نسبت عرض به ارتفاع و همچنین کاهش زاویه شیب، افزایش می‌یابد (Eid et al., 2006).

گریفیث و مارکز^۱ (۲۰۰۷) نتایج تحلیل پایداری حاصل از چند نمونه شیب سه‌بعدی را با استفاده از رویکرد المان محدود الاستوپلاستیک ارائه کردند. نتایج به دست آمده با تحلیل‌های رایج تعادل حدی دوبعدی در یک شیب همگن، اعتبارسنجی شدند و نشان داده شد که FOS_{3D} در این شرایط به FOS_{2D} همگرا می‌شود (Griffiths & Marquez, 2007).

چنگ و لائو^۲ (۲۰۰۸) بر روی تأثیر انحنا بر ضریب ایمنی برای روش‌های تعادل حدی بیشاپ و جانبو با استفاده از سطوح لغزش دایره‌ای، مطالعه‌ای را انجام دادند. آن‌ها نشان دادند که انحنای شیب، نقش بزرگی را ایفا می‌کند و شیب‌های مقعر، مقادیر ضریب ایمنی بیشتر و شیب‌های محدب، مقادیر ضریب ایمنی کمتری را در مقایسه با شیب صاف دارند (Cheng & Lau, 2008).

لی و همکاران^۳ (۲۰۰۹) از تحلیل حدی عددی المان محدود کران بالا و پایین برای ایجاد جداول

^۱ Griffiths & Marquez

^۲ Cheng & Lau

^۳ Li et al.

پایداری برای شیب‌های سه‌بعدی زهکشی نشده همگن و ناهمگن، استفاده کردند. در این پژوهش مشخص شد که استفاده از تحلیل دوبعدی برای تحلیل مسائل سه‌بعدی می‌تواند منجر به تفاوت قابل توجهی در ضرایب ایمنی با توجه به هندسه شیب شود. بر اساس مقایسه نتایج ضریب ایمنی حاصل از تحلیل‌های حدی دوبعدی و سه‌بعدی، ثابت شد که ضریب ایمنی به دست آمده از تحلیل سه‌بعدی بزرگ‌تر از تحلیل دوبعدی خواهد بود. در نتایج این مطالعه نشان داده شد که FOS_{3D}/FOS_{2D} برای شیب‌های یکنواخت زهکشی نشده به بزرگی $1/76$ است و برای شیب‌های خاکبرداری زهکشی نشده زمانی که نسبت عرض به ارتفاع شیب ۵ باشد، مقدار $1/15$ است. تفاوت بین ضرایب ایمنی تخمین زده شده دوبعدی و سه‌بعدی بزرگ‌تر از ۱۵ درصد است که می‌تواند مهم باشد و برای تحلیل بازگشتی یک شیب ریخته شده در عمل، ناچیز نیست (Li et al., 2009).

در چند سال اخیر، با توجه به پیشرفت تکنولوژی و متعاقباً پیشرفت در قابلیت‌های کامپیوتری، استفاده از نرم‌افزارهایی که اساس آن‌ها روش‌های عددی است، محبوبیت قابل توجهی پیدا کرد. اکثراً پژوهش‌های انجام شده در زمینه پایداری شیب (به‌خصوص پایداری شیب معادن روباز) از شروع این دهه تا به کنون با کمک نرم‌افزارهای عددی سه‌بعدی و دوبعدی صورت گرفته است.

ژانگ و همکاران^۱ (۲۰۱۳) یک روش تفاضل محدود سه‌بعدی با تکنیک کاهش مقاومت جهت مطالعه بر روی تأثیر هندسه‌های پیچیده بر روی پایداری شیب از نظر ضریب ایمنی، کنتور کرنش برشی و مش‌های تغییرشکل یافته، انجام دادند. در این مطالعه، مقادیر ضریب ایمنی با در نظر گرفتن هندسه‌های مختلف (شامل خصوصیات انحنای سطح شیب در سه بعد، گوشه چرخیده، قوس چرخیده و شکل چرخیده) مورد مطالعه قرار گرفت. سه شیب (۹۰، ۴۵، ۲۶/۵۷ درجه) و سه شرایط مرزی (نرم-نرم^۲، سخت-نرم^۳، سخت-سخت^۴) به صورت کامل در نظر گرفته شدند. به عنوان یکی از نتایج پژوهش،

^۱ Zhang et al.

^۲ Smooth-Smooth

^۳ Rough-Smooth

^۴ Rough-Rough

مشخص شد که تأثیر سطح خمیده در هر دو سطح شیب با انحنای محدب و مقعر، پایداری شیب سه‌بعدی را در مقایسه با سطح شیب معمول تحت شرایط مرزی نرم-نرم، افزایش می‌دهد اما تفاوت در ضریب ایمنی کمتر از ۳ درصد است. تحت شرایط مرزی سخت-سخت، ضریب ایمنی با تغییر انحنای سطح شیب دار، از بیشترین درجه تحدب تا بیشترین درجه تقعر، افزایش می‌یابد. میزان تفاوت در ضریب ایمنی به صورت کلی تا ۱۱ درصد افزایش می‌یابد. به طور کلی، تأثیر سطح شیب انحنادار در یک شیب تند تأثیر قابل ملاحظه‌تری نسبت به یک شیب ملایم را نشان می‌دهد (Zhang et al., 2013).

اختر و استارک^۱ (۲۰۱۴) از تحلیل‌های پیوسته به منظور محاسبه مقدار مقاومت برشی جانبی در امتداد جوانب تقریباً قائم یک توده لغزشی انتقالی، استفاده کردند. نتایج مطالعه پارامتریک نشان داد که استفاده از ضریب فشار جانبی زمین که بین فشار حالت سکون و محرک است و معیار مقاومت موهر-کولمب، تخمین قابل قبولی از مقاومت برشی جانبی و نسبت FOS_{3D}/FOS_{2D} را فراهم می‌کند. بر اساس این یافته‌ها، جداول تأثیر مقاومت برشی بر نسبت FOS_{3D}/FOS_{2D} برای شیب‌هایی با زاویه و هندسه مختلف نشان داده شد. نتایج حاصل از این پژوهش نشان داد که نسبت‌های FOS_{3D}/FOS_{2D} برای همه زوایای شیب تحلیل شده با فرآیندهای تعادل حدی، المان محدود و تفاضل محدود، بزرگ‌تر از یک هستند. همچنین شیب‌های ملایم‌تر، به دلیل ناحیه جانبی بزرگ‌تر، مقادیر FOS_{3D}/FOS_{2D} بیشتری دارند (Akhtar & Stark, 2014).

کارلسون و ولرسهاوس^۲ (۲۰۱۴) پژوهشی را در زمینه بکارگیری تئوری سطح انتهایی در تحلیل‌های دوبعدی و در نظر گرفتن اثر سه‌بعدی جهت تخمین نتایج تحلیل سه‌بعدی در حفریات، انجام دادند. نتایج نشان داد زمانی که طول کناره‌های شیب حفاری شده بزرگ‌تر از ۸۰ متر است، ضریب ایمنی سه‌بعدی به ضریب ایمنی شیب بلند بی‌نهایت (شیب دوبعدی) نزدیک می‌شود. توجه به این که نیروی مقاوم برشی در سطوح انتهایی تا اندازه‌ی مشخصی افزایش می‌یابد، با افزایش طول، شیب شروع به

^۱ Akhtar & Stark

^۲ Karlsson & Wellershaus

رفتاری مشابه با موارد دوبعدی می کند (Jarl Wellershaus & Karlsson, 2014).

ژانگ و همکاران (۲۰۱۴) مطالعه جامعی را در زمینه مقایسه تحلیل پایداری شیب دوبعدی و سه بعدی برای شیب‌های خاکی غیراشباع انجام دادند. تفاوت بین تحلیل دوبعدی و سه بعدی، بیشتر برای هندسه های مقعر معرفی شده است. برای یک شیب ساده تند، مقدار نسبت FOS_{3D}/FOS_{2D} ، با پارامترهای مقاومت برشی به صورت یکنواخت افزایش نمی یابد. مقدار نسبت FOS_{3D}/FOS_{2D} برای یک شیب تند معمولاً بزرگ تر از مقدار آن در یک شیب ملایم است. افزایش چسبندگی باعث افزایش FOS_{3D}/FOS_{2D} می شود. تأثیر سطح آب زیرزمینی بر تفاوت بین ضرایب ایمنی دوبعدی و سه بعدی بیشتر برای شیب‌های تند معرفی شده است تا شیب‌های ملایم. (Zhang et al., 2014).

آزوکار و هازارد^۱ (۲۰۱۵) رابطه بین انحنای شیب و ضریب ایمنی برای سنگ پیوسته و درزه دار را مورد مطالعه قرار دادند. نتایج نشان داد که در همه موارد FOS_{3D} برای شیب‌های سنگی درزه دار بزرگ تر از FOS_{2D} است. با توجه به منحصر به فرد بودن هر مسئله از نظر خواص و جهت گیری درزه‌ها، ارایه یک مقدار تعدیل FOS_{3D} شیب‌های درزه دار مشکل خواهد بود (Azocar & Hazzard, 2015).

شمس الدین سعید و همکاران (۲۰۱۵)، پژوهشی جهت تحلیل پایداری دیواره‌های معدن مس میدوک توسط کد المان مجزا ($UDEC^2$ و $3DEC^3$) انجام دادند. تحلیل‌های دوبعدی و سه بعدی برای تعیین پارامترهای مقاومت برشی معرف و استفاده آن‌ها در تحلیل و بررسی اختلاف نتایج مورد مطالعه قرار گرفت. آب و فشار آب منفذی در گسل‌ها و درزه‌های اصلی مهم ترین عامل های ناپایدار کننده در این تحلیل‌ها معرفی شدند. ضریب ایمنی پس از زهکشی بین ۲۷ تا ۳۴ درصد بر اساس تحلیل سه بعدی و ۲۰ تا ۲۸ درصد بر اساس تحلیل دوبعدی پایداری شیب، بهبود یافت. تفاوت در ضریب ایمنی در تحلیل‌های پایداری شیب دوبعدی و سه بعدی برای سطح آب زیرزمینی عمیق تر (سطح آب در ارتفاع ۲۵۴۰ در دیواره‌ها) کمتر از ۷ درصد بود؛ این موضوع نشان دهنده این است که در شرایط خاص محیطی

^۱ Azocar & Hazzard

^۲ Universal Distinct Element Code

^۳ Three-Dimensional Distinct Element Code

امکان برابر بودن ضرایب ایمنی دوبعدی و سه‌بعدی و حتی امکان کمتر شدن نسبت FOS_{3D}/FOS_{2D} وجود دارد. نتایج نشان دادند که چگونه تحلیل‌های سه‌بعدی پایداری شیب، اطمینان بیشتری را فراهم می‌کنند و می‌توانند در طراحی شیب‌های معمول، مشارکت داشته باشند (Saeed et al., 2015).

کلس اوغلو^۱ (۲۰۱۵) با استفاده از روش کاهش مقاومت^۲ و روش تفاضل محدود، ضرایب بحرانی که بر یک مساله پایداری شیب سه‌بعدی تأثیر می‌گذارند را مطالعه کرد. در ابتدا، با بکارگیری مطالعات موردی پایداری شیب موجود و مستند، مدل عددی مورد استفاده در این مطالعه اعتبارسنجی شد. سپس، با در نظر گرفتن اثر انحنای شیب، تحلیل‌های مسائل پایداری شیب سه‌بعدی مدل شد. هر کدام از عوامل مؤثر بر پایداری شیب داده شده به صورت جداگانه مطالعه شدند و نتایج مورد بحث قرار گرفتند. نتایج به دست آمده برای شیب‌هایی با نسبت ارتفاع به عرض ۱:۱ و ۲:۱ محاسبه شده است. از آنجایی که شیب‌های مقعر، مزیت محصورشدگی جانبی یا مقاومت فراهم‌شده توسط توده‌های خاک در هر دو طرف توده لغزشی احتمالی را دارند، پایداری این نوع از شیب‌ها بیشتر از شیب‌های صاف است. در این مقاله، این موضوع به صورت جامع مورد بررسی قرار گرفته و تأثیر انحنای شیب به وضوح قابل مشاهده است. یک رابطه گرافیکی نیز بین میزان انحنای شیب و FOS_{3D} پیشنهاد شد. بر اساس رابطه ارائه شده در این مقاله، مقادیر ضریب ایمنی برای شیب‌هایی که انحنای مقعر تندی دارند (شعاع انحنای متوسط کوچک‌تر از بیست متر) ۱۵ تا ۲۵ درصد و برای انحنای مقعر ملایم (شعاع انحنای متوسط بین ۲۰ تا ۹۰)، ۵ تا ۱۰ درصد نسبت به شیب صاف، افزایش یافته است. انحنای شیب، تأثیر قابل توجهی بر پایداری شیب شیب‌های محدب ندارد که این با نظر عموم در مورد پایداری کمتر شیب‌های محدب نسبت به شیب‌های صاف در تناقض است (Kelesoglu, 2015).

سان^۳ و همکاران (۲۰۱۶) طی انجام مطالعه‌ای به کمی‌سازی اثر سه‌بعدی با استفاده از یک پارامتر بی‌بعد مرتبط با شعاع انحنای شیب پرداخته‌اند. در این مطالعه، مجموعه‌ای از نمودارهای پایداری سه‌بعدی

^۱ Kelesoglu

^۲ Strength Reduction Technique

^۳ Sun

ارائه شده است که امکان تخمین ضریب ایمنی شیب‌های خاکی همگن مقعر و محدب را فراهم می‌کند. با تغییر شعاع انحنای شیب مشخص می‌شود که شیب‌های مقعر پایدار تر از شیب‌های صاف هستند ولی شیب‌های محدب پایداری کم‌تری دارند. نتایج تحلیل‌های سه‌بعدی عددی به دست آمده از روش المان محدود و با تکنیک کاهش مقاومت به صورت نمودار نشان داده شده‌اند. این نمودارها به عنوان ابزار ساده‌ای برای تخمین پایداری شیب‌های حفرشده و مصنوعی ارائه شده‌اند. اثر سه‌بعدی در شیب‌هایی خاکی با زاویه اصطکاک و چسبندگی پایین بسیار قابل توجه است (Sun et al., 2016).

واینز^۱ (۲۰۱۶) مطالعه‌ای را به منظور مقایسه تحلیل‌های پایداری شیب دوبعدی و سه‌بعدی در یک معدن روباز انجام داد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان داد که هندسه شیب می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر پایداری دیواره پیت معدن داشته باشد. با توجه به نگهداری اضافی ناشی از محصورکنندگی جانبی حاصل از هندسه مقعر، یک شیب مقعر می‌تواند نسبت به یک شیب صاف پایدارتر باشد. با فرض یک هندسه ایده‌آل و شرایط توده‌سنگ یا خاک همسان‌گرد و همگن، تحلیل‌ها نشان دادند که شیب‌های محدب نسبت به شیب‌های صاف، پایدارتر خواهند بود. اگرچه، در واقعیت، به‌خصوص در جایی که شکست‌های بالقوه به صورت ساختاری کنترل شده باشند، شیب‌های محدب با توجه به کاهش مقاومت جانبی، اغلب پایداری کم‌تری دارند. شکل ۱-۲، شکست در انحنای محدب دیواره معدن و نتایج به دست آمده در تحلیل‌های این مطالعه را نشان می‌دهد (Wines, 2016). خلاصه‌ای از مطالعات صورت گرفته در زمینه اهداف این پژوهش به صورت فهرست‌وار در جدول ۱-۲ آورده شده است.

۲-۳- جمع بندی

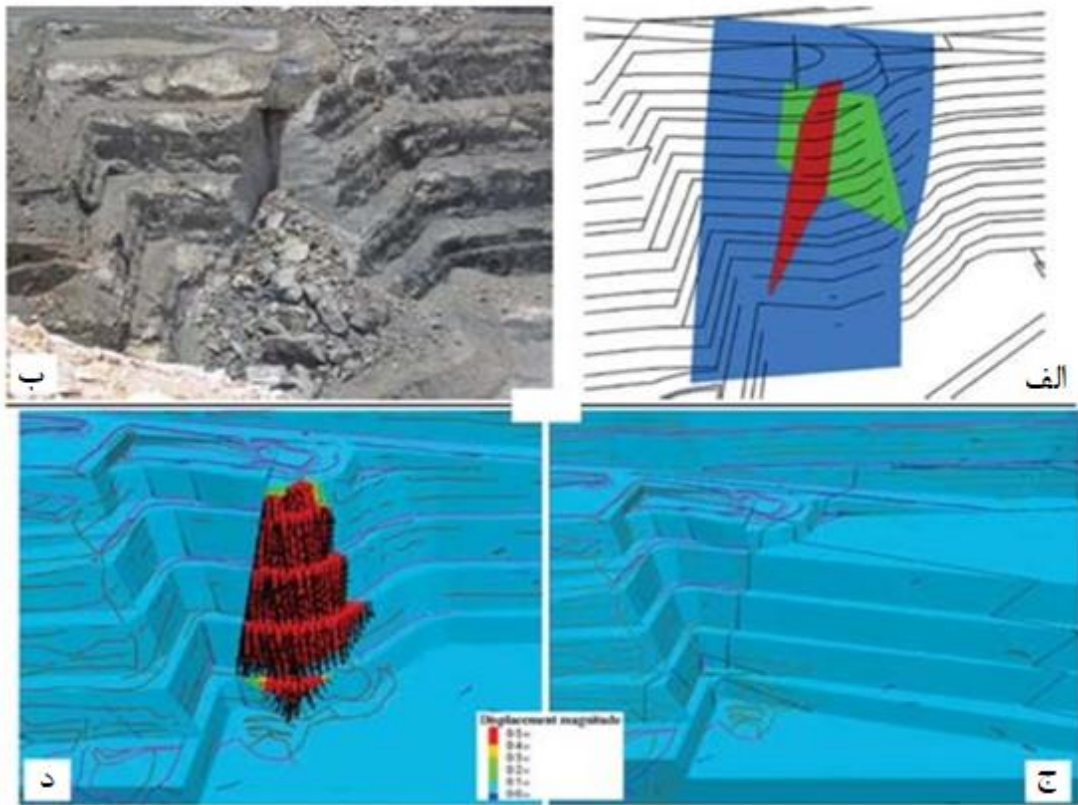
با وجود اهمیت موضوع ارزیابی اثر سه‌بعدی در شیب‌ها که در این فصل نیز به آن اشاره شد، کمبود مطالعه این موضوع در معادن روباز احساس می‌شود. با توجه به اهمیت اقتصادی بالای مسئله پایداری شیب در معادن روباز بزرگ، این پژوهش در راستای ارائه یک درک کلی از نحوه تأثیرگذاری عوامل

^۱ Wines

مختلف بر روی نتایج تحلیل‌های این مسائل انجام شده است.

جدول ۱-۲: خلاصه‌ای از پژوهش‌های پیشین

ردیف	پژوهشگر	سال	موضوع	نتایج پژوهش
۱	Chen	1981	بررسی نتایج تحلیل‌های پایداری شیب دوبعدی و سه‌بعدی	اثر سه‌بعدی در اکثر تحلیل‌ها بزرگتر از ۱ است. اثر سه‌بعدی برای مواد چسبنده قابل توجه‌تر است.
۲	Hoek & Bray	1981	ارزیابی اثر شعاع انحنا شیب مقعر بر تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی پایداری شیب	با افزایش نسبت شعاع انحنا به ارتفاع شیب، FOS _{2D} و FOS _{3D} به هم نزدیک می‌شوند.
۳	Stark & Eid	1998	بررسی عملکرد نرم‌افزارهای تحلیل پایداری شیب سه‌بعدی	تفاوت زاویه اصطکاک حاصل از تحلیل برگشتی دوبعدی نسبت به سه‌بعدی، می‌تواند به بزرگی ۳۰ درصد باشد.
۴	Cheng & Lau	2008	بررسی تأثیر انحنا بر ضریب ایمنی در روش‌های تعادل حدی پایداری شیب	شیب‌های مقعر، مقادیر ضریب ایمنی بیشتر و شیب‌های محدب، مقادیر ضریب ایمنی کمتری را در مقایسه با شیب صاف دارند.
۵	Zhang et al	2013	مطالعه بر روی تأثیر هندسه‌های پیچیده بر روی پایداری شیب	تأثیر سطح شیب انحنا دار در یک شیب تند نسبت به یک شیب ملایم بیشتر است.
۶	Azocar & Hazzard	2015	بررسی رابطه بین انحنا شیب و ضریب ایمنی برای سنگ درزه‌دار	FOS _{3D} برای شیب‌های سنگی درزه‌دار بزرگ‌تر از FOS _{2D} است.
۷	Wines	2016	مقایسه تحلیل‌های پایداری شیب دوبعدی و سه‌بعدی در معادن روباز	یک شیب مقعر نسبت به یک شیب صاف پایدارتر است. در شرایط توده همسان‌گرد و همگن، شیب‌های محدب نسبت به شیب‌های صاف، پایدارتر هستند، مگر در توده‌های درزه دار.



شکل ۱-۲: پلات های شکست معدن طلای استرالیای غربی (ژوئن ۲۰۱۱). الف) تصویر از سطوح ناپیوستگی های اصلی کنترل کننده شکست؛ ب) تصویر شکست در انحناى محدب دیواره معدن؛ و ج) منحنی های تراز جابجایی با فرض شیب بدون انحنا در محل شکست؛ و د) منحنی های تراز جابجایی در مدل تحلیل برگشتی 3DEC (Wines, 2016)

فصل سوم

مبانی نظری

۳-۱- مقدمه

در این فصل، مبانی نظری مرتبط با اهداف پژوهش حاضر، شامل معرفی عوامل مهم و تاثیرگذار بر تفاوت‌های بین نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی و اثر سه‌بعدی در پایداری شیب، مقایسه بین تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی پایداری شیب، بررسی نقش اثرات ابعادی و محیطی بر تغییرات اثر سه‌بعدی در شیب‌ها و مقایسه بین تحلیل‌های پیوسته و ناپیوسته ارائه شده است.

۳-۲- عوامل تاثیرگذار بر نتایج تحلیل‌های پایداری شیب

روش‌های مختلفی برای تحلیل پایداری شیب وجود دارند، از جمله: روش‌های تحلیلی، تجربی، عددی و غیره. این روش‌ها، قابلیت اجرا با رویکردهای دوبعدی و سه‌بعدی را دارند. از آنجایی که روش‌های تحلیل پایداری شیب، دارای مبنای تئوری و رابطه‌بندی ریاضی متفاوتی هستند، نتایج حاصل از هر یک از این روش‌ها می‌تواند متفاوت باشد. از طرفی با توجه به این که فرض‌های به کارگرفته شده در هر یک از رویکردهای مورد استفاده در این روش‌ها، یعنی رویکردهای دوبعدی و سه‌بعدی، متفاوت هستند. نتایج حاصل از رویکردهای دوبعدی و سه‌بعدی هر کدام از روش‌های انتخابی برای تحلیل پایداری شیب نیز یکسان نبوده و دارای اختلاف خواهند بود. از اختلاف بین نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی با عنوان «اثر سه‌بعدی» یاد می‌شود و به صورت نسبت FOS_{3D}/FOS_{2D} تعریف می‌شود. اثر سه‌بعدی می‌تواند ناشی از تغییر در چندین پارامتر مختلف باشد که با توجه به شرایط مسئله، تغییر در هر یک از آن‌ها، می‌تواند تأثیرات بالقوه قابل توجهی را در نتایج به وجود بیاورد.

بر اساس مطالعات پیشین و با توجه به اهداف پژوهش حاضر، عوامل مهم و تاثیرگذار بر تفاوت‌های بین نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی و اثر سه‌بعدی در پایداری شیب را می‌توان به صورت زیر تقسیم‌بندی کرد:

- **روش انتخابی:** روش تعادل حدی، روش المان محدود، روش تفاضل محدود، روش المان مجزا و غیره.
 - **اثرات ابعادی:** پارامترهای مرتبط با هندسه شیب، مانند پیچیدگی‌های هندسی، انحنای شیب (نوع و شعاع انحنای)، تندی شیب و نسبت ابعادی شیب (نسبت عرض به ارتفاع شیب) و همچنین شکل و اندازه مش (المان) انتخابی در تحلیل‌ها.
 - **اثرات محیطی:** شرایط آب زیرزمینی (سطح آب زیرزمینی و فشار آب منفذی)، خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ، همسان‌گردی/ناهمسان‌گردی، همگنی/ناهمگنی، میزان درزه‌داری محیط توده‌سنگ و غیره.
- شرایط اولیه:** شرایط مرزی و تنش‌های برجا و غیره.

۳-۳- تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی

با وجود گسترش روش‌های سه‌بعدی، اکثر تحلیل‌های پایداری شیب با استفاده از روش‌های دوبعدی و با در نظر گرفتن فرض‌های ساده‌سازی دوبعدی و با نادیده گرفتن تأثیرات تحلیل‌های واقعی‌تر سه‌بعدی انجام می‌شوند (Griffiths & Marquez, 2007). این امر دلایل متفاوتی دارد:

۱. در اکثر موارد، تحلیل‌های دوبعدی تخمین‌های محافظه‌کارانه‌تری را نسبت به تحلیل‌های سه‌بعدی ارائه می‌دهند، یعنی ضریب ایمنی دوبعدی (FOS_{2D}) اغلب کوچک‌تر از ضریب ایمنی سه‌بعدی (FOS_{3D}) است (Stark & Eid, 1998; Griffiths & Marquez, 2007; Leong & Rahardjo,)

بیان کرد که تخمین‌های محافظه‌کارانه به دلیل نادیده گرفتن اثرات انتهایی شیب در تحلیل‌های دوبعدی است و با توجه به گریفیث و مارکز^۲ (۲۰۰۷)، نتایج تحلیل‌های دوبعدی تنها زمانی محافظه‌کارانه خواهند بود که بدبینانه‌ترین مقطع در تحلیل سه‌بعدی (مقطعی که شرایط در آن بحرانی‌تر از مقاطع دیگر است) جهت تحلیل دوبعدی انتخاب شود. اگرچه، نتایج محافظه‌کارانه تحلیل‌های دوبعدی به صورت عام قابل قبول نیست چراکه امکان وجود ترکیب خاصی از خصوصیات مواد و هندسه پیچیده وجود دارد که می‌تواند منجر به سازوکار و تخمین بحرانی‌تر سه‌بعدی می‌شود (Lefebvre et al., 1973; Griffiths & Marquez, 2007).

۲. تحلیل‌های پایداری شیب دوبعدی در مقایسه با تحلیل‌های سه‌بعدی راحت‌تر اجرا می‌شوند، به دقت بسیار بالا در مدل‌سازی و اجرا نیاز ندارند و همیشه به یک ضریب ایمنی همگرا می‌شوند (Shen & Karakus, 2013)؛ در حالیکه، ورود اطلاعات داده‌ها و تفسیر خروجی‌ها و نتایج در تحلیل‌های سه‌بعدی بسیار پیچیده و سخت‌تر از تحلیل‌های دوبعدی است.

در طرف مقابل، تحلیل‌های سه‌بعدی مزایای زیادی در زمینه بکارگیری و مدل‌سازی واقعی‌تر هندسه، شرایط مرزی، وضعیت آب زیرزمینی، وضعیت تنش‌های برجا و ... را دارند. در نظر گرفتن همه شرایط ذکر شده باعث افزایش دقت نتایج می‌شود و درک بهتری از سازوکار شکست را فراهم می‌کند (Griffiths & Marquez, 2007; Shen & Karakus, 2013; Wines, 2016).

تحلیل‌های سه‌بعدی پایداری شیب، اهمیت خود را در شرایطی نشان می‌دهند که انتخاب یک روش دوبعدی با فرض کرنش صفحه‌ای برای اجرای تحلیل‌ها مناسب نباشد، طبیعت هندسی و محیطی شیب بسیار پیچیده باشد و یا این تحلیل‌ها برای محاسبه برگشتی پارامترهای مقاومتی یک شیب ریخته‌شده، مورد استفاده قرار گیرند (Chakraborty & Goswami, 2016; Wines, 2016). به طور کلی، مسائل

^۱ Lefebvre

^۲ Griffiths & Marquez

پایداری شیب از نظر انتخاب تحلیل دوبعدی یا سه‌بعدی به دو گروه زیر تقسیم می‌شوند (Wines, 2016؛ ایران‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۵):

۱. تحلیل‌های سه‌بعدی ضروری نیست و تحلیل‌های دوبعدی نمایش معقول و قابل قبولی از مسئله را فراهم می‌کنند. این مسائل شامل مواردی است که در نظر گرفتن فرض‌های ساده‌سازی (کرنش صفحه‌ای، تنش صفحه‌ای و مدل متقارن) مناسب باشد. مثالی از این موارد، شامل تحلیل پایداری دیواره‌های بلند با انحنای کم، تحلیل پایداری مقطع تونل در فاصله زیاد از جبهه‌کار، پنل‌های جبهه‌کار طولانی، مقاطع چاه‌ها و مسائل مشابه می‌شود.
۲. تحلیل‌های دوبعدی در نمایش ماهیت سه‌بعدی مسائل ناتوان است و نتایج غیر واقعی ارائه می‌کنند. در چنین شرایطی، ارزیابی وضعیت تنش-کرنش توسط تحلیل‌های سه‌بعدی کارآمد، دقیق و واقع‌گرایانه‌تر خواهد بود. در مسائل معدنی و ژئومکانیکی، مواردی وجود دارد که باید به صورت سه‌بعدی مدل شوند و فرض‌های دوبعدی برای آن‌ها قابل اعمال نیست؛ به عنوان مثال، نواحی نزدیک به ورودی تونل‌ها و کارگاه‌های استخراج، جبهه‌کار تونل‌ها، کارگاه‌های معدنی، پیت‌هایی با شکل پیچیده و شعاع انحنای زیاد و غیره، باید با استفاده از روش‌های سه‌بعدی تحلیل شوند. در مجموع، در ابتدای تحلیل مسائل شیب معادن روباز برای درک سازوکار کلی ناپایداری، مدل‌سازی به صورت دوبعدی انجام می‌شود. به طور کلی در شرایط زیر تحلیل‌های سه‌بعدی توصیه می‌شوند (ایران‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۵؛ Hoek & Bray, 1981):

- اختلاف زیاد بین امتداد ساختارهای زمین‌شناسی اصلی با امتداد مقطع مورد نظر
- اختلاف زیاد بین زاویه محور ناهمسانگردی مواد با امتداد مقطع مورد نظر
- وجود چندین واحد زمین‌شناسی در راستای مقطع مورد نظر
- توزیع تنش‌های اصلی منطقه موازی یا عمود بر شیب مورد نظر نباشد

هندسه پیچیده دیواره

۳-۴- اثرات ابعادی بر اثر سه‌بعدی

۳-۴-۱- اثر هندسه

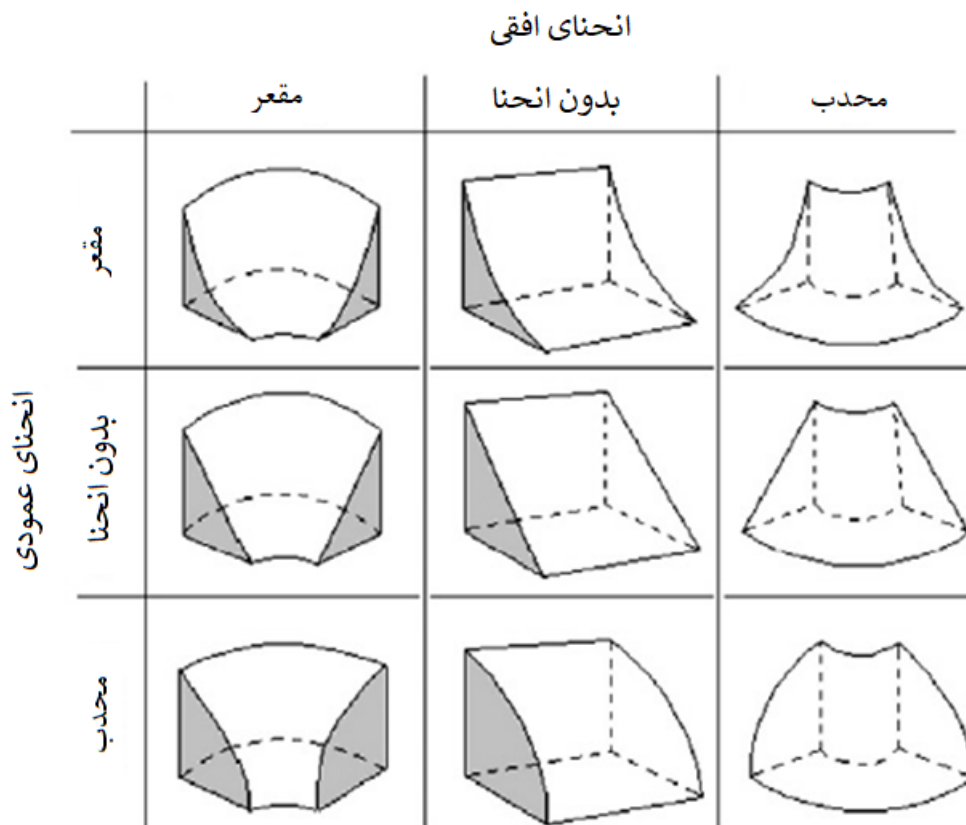
پژوهش‌های بسیاری، تأثیر قابل توجه در نظر گرفتن هندسه واقعی بر پایداری شیب را نشان داده‌اند. در واقع، با توجه به فرض‌های هندسی مورد استفاده در تحلیل‌های دوبعدی، هندسه سه‌بعدی و واقعی شیب، اولین عاملی است که در تفاوت بین نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی معرفی می‌شود.

۳-۴-۱-۱- انحنای شیب

بسیاری از مطالعات نشان داد که هندسه شیب‌ها تأثیر قابل توجهی بر پایداری دارد. شکل ۳-۱ انواع انحنای موجود در شیب‌ها را نشان می‌دهد. به دلیل فرض‌های کرنش صفحه‌ای در تحلیل‌های دوبعدی، هیچ‌گونه انحنای افقی در هندسه شیب وجود نخواهد داشت. در واقع می‌توان گفت در این نوع تحلیل‌ها سطح شیب در جهت عمود بر مقطع مورد نظر به صورت صاف در نظر گرفته می‌شود. اگرچه، در اکثر شیب‌های طبیعی و ساخت بشر انحنای سه‌بعدی وجود دارد و از این رو تحلیل‌های پایداری شیب دوبعدی اغلب با این شرایط سازگار نیستند. شیب‌های سه‌بعدی انحنادار در مهندسی عمران و ژئوتکنیک اغلب در شیب‌های طبیعی، مانند شیب طبیعی کوه‌ها پدیدار می‌شوند اما مسئله انحنای شیب در مهندسی معدن، به‌خصوص در پیت‌های معادن روباز همیشه وجود دارد (Hoek & Bray, 1981; Cała, et al., 2011; Zhang et al., 2011; Totonchi et al., 2012; 2007; Wu et al., 2010; Stianson Jeldes & Drumm, 2013; Sharma, 2013; Zhang et al., 2014; Azocar & Hazzard, 2015; Kelesoglu, 2015; Chaudhary et al., 2016; Sun et al. 2016).

علاوه بر انحنای افقی، امکان وجود انحنای عمودی نیز در شیب‌ها وجود دارد. شیب‌هایی با انحنای عمودی با تحلیل‌های دوبعدی نیز قابل بررسی هستند اما مطالعات کمی در زمینه ارزیابی تأثیر این نوع انحنای بر پایداری شیب وجود دارد (Jeldes, 2013; Sharma, 2013).

تأثیر انحنای محدب بر پایداری شیب کمتر از تأثیر انحنای مقعر است. از این‌رو، تفاوت بین نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی، اغلب برای شیب‌های مقعر معرفی شده است (Zhang et al., 2013).



شکل ۱-۳: تقسیم‌بندی شیب‌ها بر اساس تغییر انحنای در راستای عمودی و افقی (Valeriano et al. 2009)

پیت معادن روباز همیشه شامل هندسه شیب مقعر با انحنای افقی خواهند بود. در یک پیت بلند و باریک، دیوارها در هر بخش انتهایی پیت، مقعر خواهند بود. در یک پیت دایره‌ای شکل، اساساً همه دیوارها مقعر خواهند بود. هندسه محدب نیز در شیب‌های طبیعی و پیت‌های روباز وجود دارد. هندسه محدب، اغلب در پیت‌ها با توجه به دلایلی مانند توزیع پیچیده ماده معدنی، حضور رمپ‌های پرپیچ‌وخم و مشکلات مربوط به حرکت آرام در یک کات‌بک^۱ جدید درون دیوارهای موجود، به وجود می‌آیند (Wines, 2016). شکل ۲-۳، نمونه‌ای بسیار مناسب برای نمایش پیچیدگی‌های هندسی یک معدن روباز است. قطعاً در این نوع پیت، تحلیل‌های دوبعدی توانایی ارائه یک مدل واقعی به همراه نتایج مناسب را نخواهند داشت.

^۱ Cutback



شکل ۳-۲: نمونه‌ای از یک معدن روباز با پیچیدگی‌های هندسی (David Maisel, 2007)

انحنای مورد بررسی در این پژوهش، انحنای افقی است. انحنای عمودی به وسیله تحلیل‌های دوبعدی نیز قابل تحلیل هستند اما بررسی این نوع انحنای در این پژوهش پوشش داده نمی‌شود.

۳-۴-۱-۲- تندی شیب

یکی از عواملی که معمولاً در مقایسه پایداری شیب‌ها و همچنین بررسی اثر سه‌بعدی تحلیل‌های پایداری شیب مورد ارزیابی قرار می‌گیرد، تندی شیب است. معمولاً مقدار نسبت FOS_{3D}/FOS_{2D} برای یک شیب تند، بزرگ‌تر از مقدار آن در یک شیب ملایم معرفی شده است (Zhang et al., 2014). تندی

شیب در اغلب موارد در مطالعات پارامتری و در تعامل با دیگر عوامل دخیل در نتایج تحلیل‌ها، به خصوص در تعامل با اثرات محیطی، در نظر گرفته می‌شود. به عنوان مثال نسبت FOS_{3D}/FOS_{2D} در یک لایه ضعیف با شیب تند همیشه کمتر از این نسبت در یک لایه ضعیف با شیب ملایم است (Chen, 1981). با افزایش چسبندگی، مقدار نسبت FOS_{3D}/FOS_{2D} افزایش می‌یابد؛ و تأثیر سطح آب زیرزمینی بر تفاوت بین مقادیر FOS_{3D} و FOS_{2D} برای شیب‌های تند بیشتر از شیب‌های ملایم معرفی شده است (Zhang et al., 2014). علاوه بر این تأثیر تندی شیب در تعامل با اثر هندسه نشان می‌دهد که اثر سه‌بعدی در یک شیب انحنادار با شیب تند قابل ملاحظه‌تر از یک شیب انحنادار با شیب ملایم است (Zhang et al., 2013).

۳-۴-۲- اثر مش

تحلیل‌های مختلف نشان داده اند که نتایج به دست آمده از تحلیل‌های پایداری شیب، به‌خصوص در روش تفاضل محدود، به اندازه ابعاد و شکل انتخابی مش حساسیت دارند. انتخاب اندازه ابعاد مش می‌تواند منجر به تخمین دست بالا و یا دست پایین نتایج شود. در تحلیل‌های عددی، دقت نتایج به تعداد گره‌های معرف سیستم فیزیکی مدل شده بستگی دارد (Li et al., 2014). به طور کلی، اندازه مش‌های ریزتر (تعداد بیشتر نواحی تعریف‌شده در واحد طول) منجر به نتایج دقیق‌تری می‌شود اما در این حالت موضوع توان پردازشی کامپیوتر در دسترس و زمان مورد نیاز برای تحلیل نیز باید در نظر گرفته شود. طبق نظر ژانگ و همکاران (۲۰۱۳)، اندازه ابعاد مش ریزتر، ضرایب ایمنی پایین‌تری را ارائه می‌کنند. معمولاً، اندازه پیشنهادی برای ابعاد مش بین یک-دهم تا یک-سی‌ام ارتفاع شیب مورد تحلیل است (Zhang et al., 2013; Ashford & Sitar, 2001).

علاوه بر این شکل و نسبت ابعادی مش (نسبت طول به عرض مش) نیز بر دقت نتایج تأثیر دارد. در نرم‌افزارهای عددی، مانند $FLAC^2$ ، بیشترین دقت زمانی حاصل می‌شود که مش‌ها به صورت مربعی

^۱ Node

^۲ Fast Lagrangian Analysis of Continua

باشند (Itasca, 2001). البته شکل مش‌ها در ضریب ایمنی به دست آمده تأثیری ندارد اما می‌تواند شکل سطح شکست احتمالی را تغییر دهد (Zhang et al., 2013).

از آنجایی که اندازه ابعاد مش در ضریب ایمنی تأثیرگذار است، این پارامتر به عنوان یک اثر ابعادی بر اثر سه‌بعدی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

۳-۵- اثرات محیطی بر اثر سه‌بعدی

محیط توده‌سنگ دارای عدم قطعیت‌های بسیاری است. با وجود تنوع در روش‌های مختلف برداشت، آزمایش و تخمین داده‌های محیط‌های سنگی، امکان مواجهه با شرایط ناشناخته در توده‌سنگ وجود دارد. از این رو، یکی دیگر از تصمیم‌های مهم در تحلیل پایداری شیب، به خصوص پایداری دیواره‌های معادن روباز، این است که با توجه به شرایط محیط توده‌سنگ چه رویکردی باید جهت تحلیل پایداری مورد استفاده قرار گیرد.

ویژگی‌های محیطی توده‌سنگ می‌تواند تحت تأثیر عوامل متعددی از قبیل وجود ناپیوستگی‌ها، وجود آب زیرزمینی، تغییر خواص در محل‌های مختلف (ناهمگنی)، تغییر خواص در جهت‌های مختلف (ناهمسان‌گردی)، خواص مقاومتی در مقیاس‌های مختلف و ... قرار گیرد. هر کدام از این عوامل ذکر شده پتانسیل تغییر در نتایج تحلیل‌ها را دارند. در این مطالعه، به اثر سه‌بعدی ناشی از پارامترهای محیطی، «اثرات محیطی» می‌گوییم. برای درک بهتر نحوه و میزان تأثیرگذاری اثرات محیطی، در ادامه راجع به چند عامل مرتبط با آن بحث می‌شود.

۳-۵-۱- اثر آب زیرزمینی

وجود آب زیرزمینی و فشار آب منفذی از مهم‌ترین پارامترهای نامتعادل‌کننده در تحلیل‌های پایداری شیب معرفی شده‌اند، به طوری که معمولاً جهت ارائه یک قضاوت مهندسی مناسب در تحلیل‌ها، باید فرض خشک و یا مرطوب بودن محیط تعیین شود. وجود آب باعث تغییر در خواص مقاومتی توده‌سنگ می‌شود. تحلیل‌های مختلفی به منظور ارزیابی اثر این عوامل در تفاوت نتایج تحلیل‌ها صورت گرفته

است (Chen & Chameau, 1983; Cheng & Lau, 2014; Saeed et al., 2015). تأثیر آب زیرزمینی بر تفاوت بین ضرایب ایمنی دوبعدی و سه‌بعدی بیشتر برای شیب‌های تند معرفی شده است (Zhang et al., 2014). اثر زهکشی باعث بهبود هر دوی ضرایب ایمنی دوبعدی و سه‌بعدی می‌شود. علاوه بر این، تأثیر وجود آب زیرزمینی بر کاهش اختلاف بین تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی در سطوح آب زیرزمینی بالاتر، بیشتر از آب زیرزمینی در سطوح پایین‌تر است (Saeed et al., 2015).

۳-۵-۲- اثر تغییر خواص مقاومتی

خواص مقاومتی توده‌سنگ نیز نقش مهمی را در نتایج تحلیل پایداری بازی می‌کنند. تغییر خواص مقاومتی (برای مثال تغییر زاویه اصطکاک و چسبندگی در اثر افزایش یا کاهش سطح آب زیرزمینی) یا خطا در محاسبه پارامترهای مربوطه می‌تواند موجب تغییر در نتایج به دست آمده شود. این اعتقاد وجود دارد که در اکثر موارد، FOS_{3D} بیشتر از FOS_{2D} خواهد بود؛ یعنی اثر سه‌بعدی معمولاً بزرگ‌تر از ۱ است (Cavoundis, 1987). نقش اساسی اثرات محیطی در شرایط ویژه و خاص پررنگ‌تر می‌شود، برای مثال در صورتی که ترکیب به‌خصوصی از خواص مقاومتی توده‌سنگ و شرایط آب زیرزمینی وجود داشته باشد، اثر سه‌بعدی می‌تواند برابر و یا حتی کمتر از ۱ شوند (Chen & Chameau, 1983; Saeed et al., 2015).

۳-۵-۳- اثر میزان درزه‌داری

تفاوت اصلی بین سنگ بکر و توده‌سنگ، حضور ناپیوستگی‌ها است. امکان حضور ناپیوستگی‌های بزرگ، مانند گسل‌ها و درزه‌ها در شرایط مختلف متفاوت است، اما با اطمینان می‌توان گفت که تمام مسائل تحلیل پایداری شیب به نوعی شامل ناپیوستگی‌ها در مقیاس‌های مختلف هستند (Hoek & Bray, 1981). اساساً، ناپیوستگی‌ها می‌توانند کنترل‌کننده سازوکار شکست احتمالی در مسائل، مانند شکست صفحه‌ای، شکست گوه‌ای، شکست واژگونی و حتی شکست قاشقی باشند. از این رو شناخت ساختارهای بحرانی و کنترلی در هر مسئله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. از مهم‌ترین ناپیوستگی‌ها

که نوع و خواص محیط توده‌سنگ را نیز مشخص می‌کنند، دسته درزه‌ها هستند. با توجه به چگالی درزه‌ها، محیط را می‌توان به انواع پیوسته، پیوسته-ناپیوسته، ناپیوسته و پیوسته معادل تقسیم‌بندی کرد؛ این تقسیم‌بندی به انتخاب تحلیل مناسب با محیط توده‌سنگ کمک می‌کند (شکل ۳-۳).

در راستای اثر ناپیوستگی‌ها بر روی نسبت ضرایب ایمنی سه‌بعدی به دوبعدی، هوک و بری (۱۹۸۱) بر روی اثر سه‌بعدی در شکست‌های گوه‌ای پژوهش کردند و پیشنهاد دادند که اگر تحلیل دوبعدی بر روی فصل مشترک درزه‌های تشکیل دهنده گوه صورت گیرد، با توجه به رابطه زیر می‌توان FOS_{2D} را به FOS_{3D} تبدیل کرد:

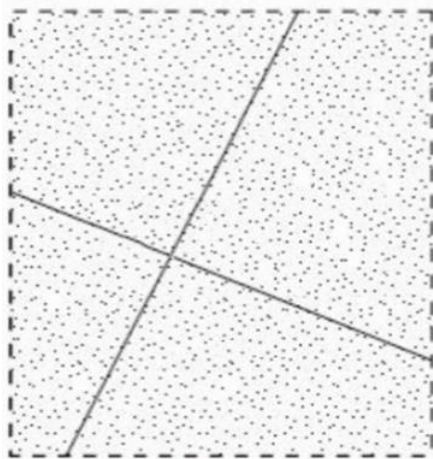
$$K = \frac{\sin \beta}{\sin \frac{\xi}{2}} \quad \beta \geq \frac{\xi}{2} \quad (۳-۱)$$

که در آن K ضریب گوه، β زاویه فصل مشترک گوه با افق و ξ نیم‌ساز زاویه بین دو صفحه متقاطع گوه است (Hoek & Bray, 1981).

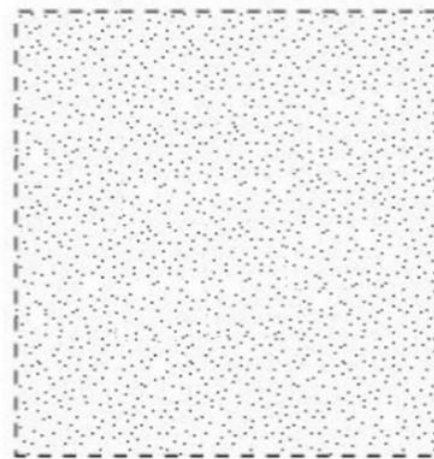
۳-۶- تحلیل‌های پیوسته و ناپیوسته

قابلیت مدل کردن ناپیوستگی‌ها (دسته درزه، بزرگ درزه، گسل و شبکه ناپیوستگی‌های مجزا) تمایز اصلی بین تحلیل‌های پیوسته و ناپیوسته است. همان‌گونه که اشاره شد، میزان درزه‌داری یک محیط معیار اصلی انتخاب محیط معرف جهت تحلیل است.

اضافه کردن درزه به مدل، مهم‌ترین بخش تحلیل‌های ناپیوسته است. مدل کردن تمامی ناپیوستگی‌ها در یک شیب بزرگ، غیر ممکن است. ممکن است برای تعداد محدودی از پله‌ها، این عمل قابل انجام باشد ولی برای شیب‌های بزرگ این طور نیست. از این رو، بیشتر توده‌سنگ‌ها توسط یک محیط معادل پیوسته (کاهش خواص مقاومتی و الاستیک سنگ بکر با در نظر گرفتن تأثیر ناپیوستگی‌ها)، مدل‌سازی می‌شوند و درزه‌هایی که در سازوکار رفتاری توده‌سنگ تأثیر بحرانی تری دارند، فیلتر می‌شوند. این کار با تشخیص درزه‌هایی مستعد لغزش و یا جدایش صورت می‌گیرد (Hustrulid et al., 2001).



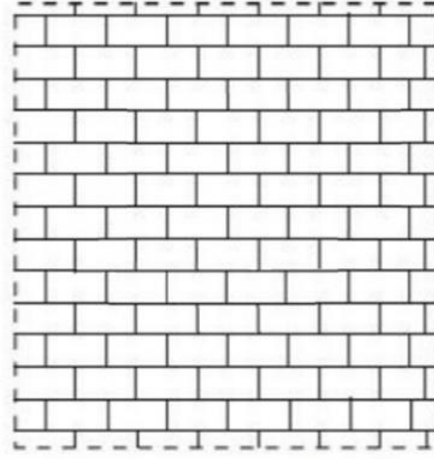
پیوسته-ناپیوسته



پیوسته



پیوسته معادل



ناپیوسته-پیوسته

شکل ۳-۳: تقسیم‌بندی محیط توده‌سنگ بر اساس میزان درزه‌داری (ایران‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۵)

هیچ مرز مشخص و یا قانون از پیش تعیین شده‌ای برای انتخاب بین یک محیط به صورت پیوسته و یا ناپیوسته وجود ندارد؛ اما معمولاً زمانی که توده‌سنگ یکپارچه و سالم باشد، عوارض غالبی در توده‌سنگ نباشد و توده‌سنگ به شدت درزه‌دار باشد (به گونه‌ای که رفتار توده مشابه خاک باشد) فرض محیط معادل و تحلیل پیوسته، منطقی است. در طرف مقابل، در صورت وجود عوارض ساختاری تأثیرگذار مانند گسل‌های متعدد و درزه‌های اصلی با تداوم طولی زیاد، و شیب‌هایی که رفتار آن‌ها با ناپیوستگی‌ها کنترل می‌شود، مدل‌سازی ناپیوسته کارآیی بهتری دارد (ایران‌نژاد و همکاران، ۱۳۹۵).

معمولاً برای تحلیل پایداری سراسری، در ابتدا فرض می‌شود که محیط توده‌سنگ بدون ناپیوستگی است. بنابراین، بسیاری از تحلیل‌ها با مدل‌های پیوسته شروع می‌شوند. اگر نتایج تحلیل پایداری شیب

مورد نظر با استفاده از رویکرد پیوسته نشان دهند که شیب دارای پایداری قابل قبولی است، جهت مشخص کردن میزان تعامل ساختارهای اصلی و تخمین دقیق‌تر رفتار شیب باید تحلیل‌های ناپیوسته صورت بگیرند. در صورتی که تحلیل‌های پیوسته نشان دهد که شیب ناپایدار است، انجام تحلیل‌های ناپیوسته توجیهی ندارد (Hoek & Bray, 1981).

علاوه بر این یک پیشنهاد تجربی نیز این است که، اگر در توده‌سنگ بیش از سه دسته درزه داشته باشد، تحلیل پایداری با فرض محیط پیوسته معادل انجام می‌شود. ولی هنگامی که شیب سنگی شامل چندین دسته درزه است و این دسته درزه‌ها کنترل‌کننده مکانیزم شکست باشند، استفاده از روش مدل‌سازی ناپیوسته، توصیه می‌شود (Hoek & Bray, 1981).

۷-۳- جمع بندی

تأثیر پارامترهای ابعادی و محیطی بر نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی کاملاً مشخص است. توانایی تحلیل‌های سه‌بعدی در مدل کردن واقعی‌تر جنبه‌های مختلف یک مسئله غیر قابل انکار است. با این حال، تحلیل‌های سه‌بعدی پایداری شیب در معادن روباز رایج نیست. در این بین، در نظر گرفتن اثر انحنای مقعر شیب می‌تواند ضرایب ایمنی بالاتری را به دست آورد اما طراحان معمولاً این اثر را در نظر نمی‌گیرند. یکی از دلایل بی‌میلی طراحان به در نظر گرفتن تأثیرات انحنای شیب‌های مقعر، این است که درصد حضور ناپیوستگی‌ها، اغلب این اثرات را خنثی می‌کنند. اگرچه، برای شیب‌های سنگی توده‌ای، یا شیب‌هایی با طول اثر درزه نسبتاً کوتاه، اثرات مثبت تأثیر انحنای شیب نباید نادیده گرفته شود، به خصوص در معادن روباز که مزایای اقتصادی زیاد کردن زاویه شیب‌ها، می‌تواند قابل توجه باشد. با این حال و با توجه به اهمیت بررسی این موضوع در معادن روباز، پژوهش‌های کمی در زمینه بررسی عوامل مؤثر بر تفاوت بین نتایج تحلیل‌های پایداری شیب دوبعدی و سه‌بعدی در معادن روباز صورت گرفته است. در ادامه و در فصل «مدل‌سازی و تحلیل نتایج» به این موضوع نیز پرداخته خواهد شد.

فصل چهارم

مطالعه موردی

۴-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی و معرفی کلی مطالعه موردی، وضعیت زمین‌شناسی منطقه، توپوگرافی و روش استخراج، تقسیم‌بندی نواحی مختلف معدن، عوامل ساختاری موجود در منطقه و تحلیل‌های آماری صورت گرفته بر روی آن‌ها پرداخته می‌شود. در انتها، با توجه به مطالب ذکرشده، دلیل انتخاب این مطالعه موردی توضیح داده می‌شود.

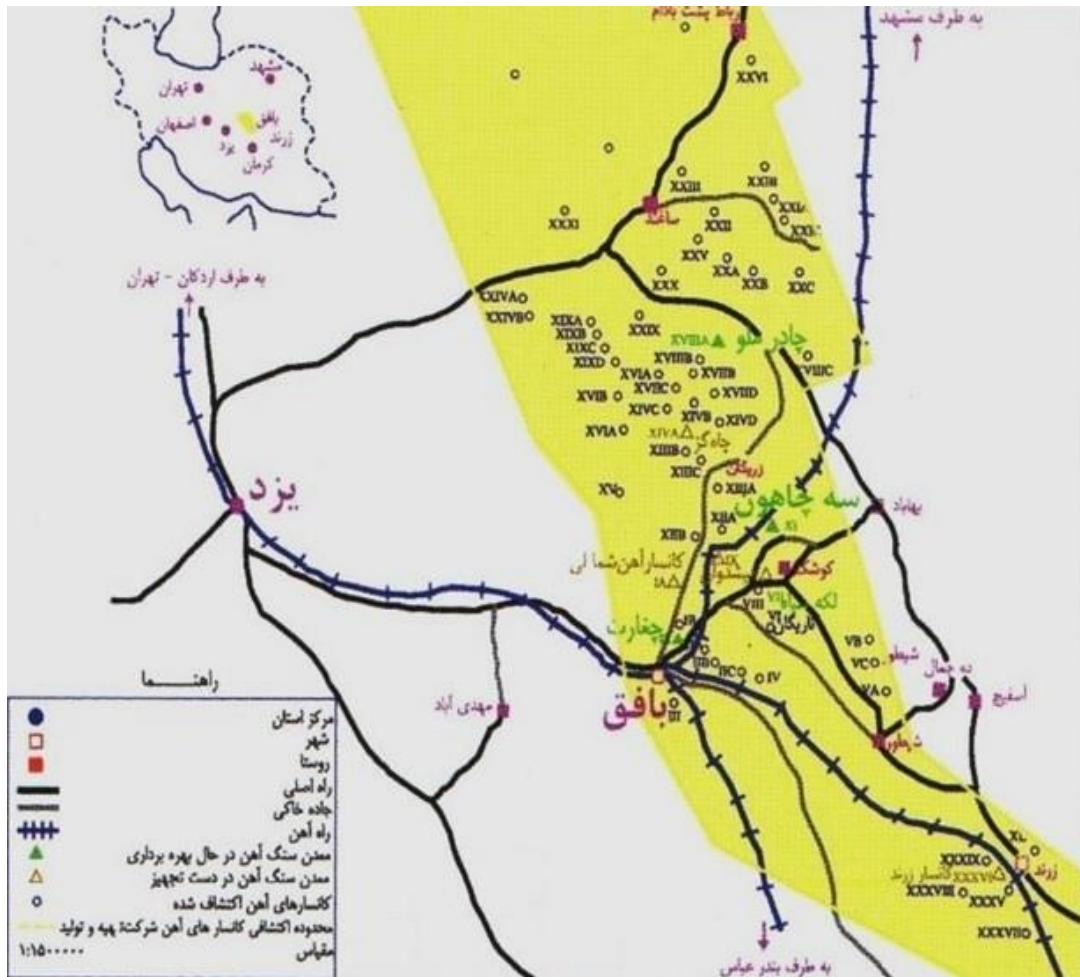
۴-۲- معرفی معدن سنگ آهن چغارت

معدن چغارت در ۱۲ کیلومتری شمال شرقی شهر بافق در مختصات ۳۲ درجه و ۵ دقیقه و ۲۶ ثانیه عرض شمالی و ۵۵ درجه و ۲۹ دقیقه و ۵ ثانیه طول شرقی در حاشیه کویر ایران واقع شده است (شکل ۴-۱). این معدن دارای ذخیره‌ای معادل ۱۷۷/۲ میلیون تن است. عملیات بهره برداری از این معدن در شهریور سال ۱۳۵۰ آغاز شده است. ارتفاع اولیه توده چغارت ۱۲۸۶ متر از سطح دریا و حدود ۱۵۰ متر از سطح منطقه اطراف بوده است. این معدن از طریق راه آهن سراسری به طول ۱۰۰۰ کیلومتر با تهران، ۴۷۰ کیلومتر با ذوب آهن اصفهان و ۶۱۰ کیلومتر از طریق سیرجان به بندرعباس ارتباط دارد.

۴-۳- وضعیت زمین‌شناسی منطقه

کانسار چغارت در سازندهای پرکامبرین ایران مرکزی قرار دارد. سنگ‌های دربرگیرنده کانسار چغارت مجموعه‌ای از سنگ‌های رسوبی، آتشفشانی، فیلیت، شیست‌های منبلور، مرمر و گنایس است که در

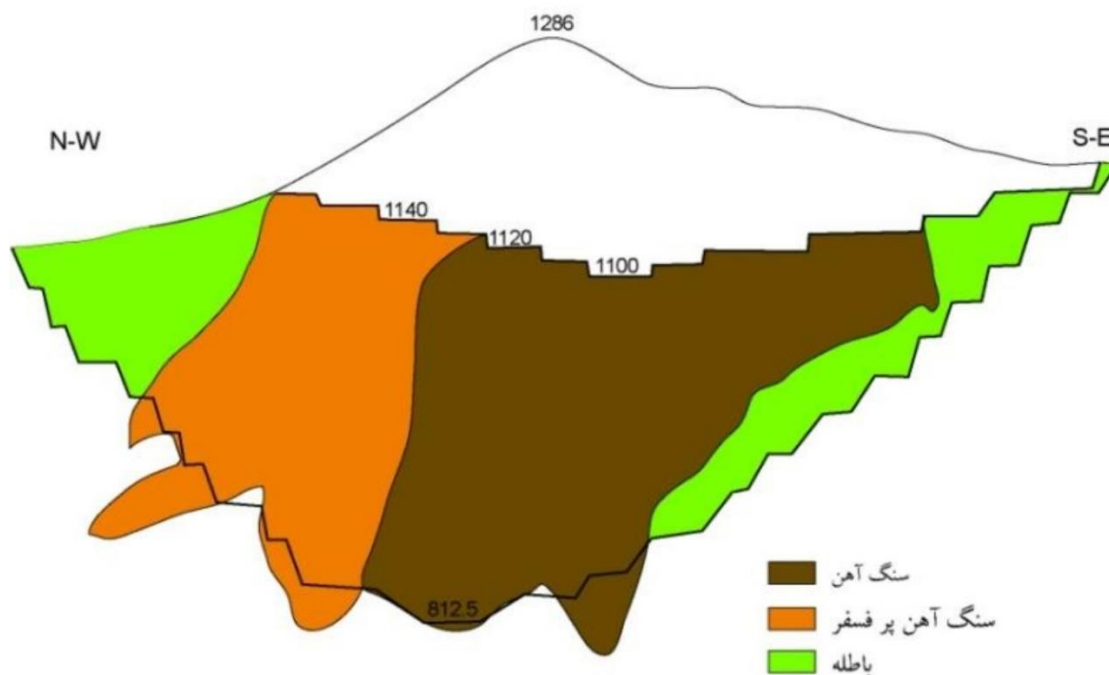
فرهنگ چینه شناسی ایران به عنوان سری مراد شناخته شده‌اند. این مجموعه تحت تأثیر دگرگونی مجاورتی، ناحیه‌ای و متاسوماتیسم قرار گرفته و باعث گردیده تنوع عظیمی از سنگ‌ها در اطراف چغارت به وجود بیاید.



شکل ۴-۱: موقعیت جغرافیایی معدن چغارت و راه‌های دسترسی به آن (یاراحمدی بافقی و همکاران، ۱۳۹۱)

کانسار آهن چغارت از نوع مانیتیت-هماتیت است که به صورت تپه مانند با روند شمال غرب-جنوب شرق تشکیل شده است و تعداد زیادی دایک کانسار و سازندهای اطراف را قطع کرده است. آپاتیت که به عنوان مهم‌ترین کانه مزاحم در کانسار چغارت است به دو شکل بلورهای پراکنده و دایک با ضخامت‌های مختلف در کانسار وجود دارد. با توجه به اینکه نیمی از ذخیره سنگ‌آهن چغارت پرعیار و کم فسفر است، این سنگ‌آهن بدون هیچگونه فرآیند کانه آرایی در کارخانه خردایش و دانه‌بندی چغارت، دانه‌بندی شده و به واحدهای تولید فولاد ارسال می‌شود.

میزان ذخیره باقیمانده در کانسار چغارت از ابتدای سال ۱۳۸۷ در محدوده طرح فعلی استخراجی ۶۸ میلیون تن با متوسط عیار آهن ۵۷/۷ و فسفر ۵۵ درصد است؛ از این ذخیره اشاره شده مقدار ۳۳ میلیون تن سنگ آهن با متوسط عیار آهن ۶۰/۷ درصد با فسفر ۲ درصد است که طبق برنامه طی مدت ۱۰ سال استخراج شد و پس از آن ۳۵ میلیون تن سنگ آهن کم عیار و پرفسفر باقی مانده پس از استخراج در کارخانه تولید کنسانتره چغارت کانه آرایبی و مورد مصرف قرار خواهند گرفت. وضعیت ماده معدنی و سنگ های دربرگیرنده معدن چغارت در مقطع طولی زمین شناسی این معدن در شکل ۴-۲ نشان داده شده است (یاراحمدی بافقی و همکاران، ۱۳۹۱).

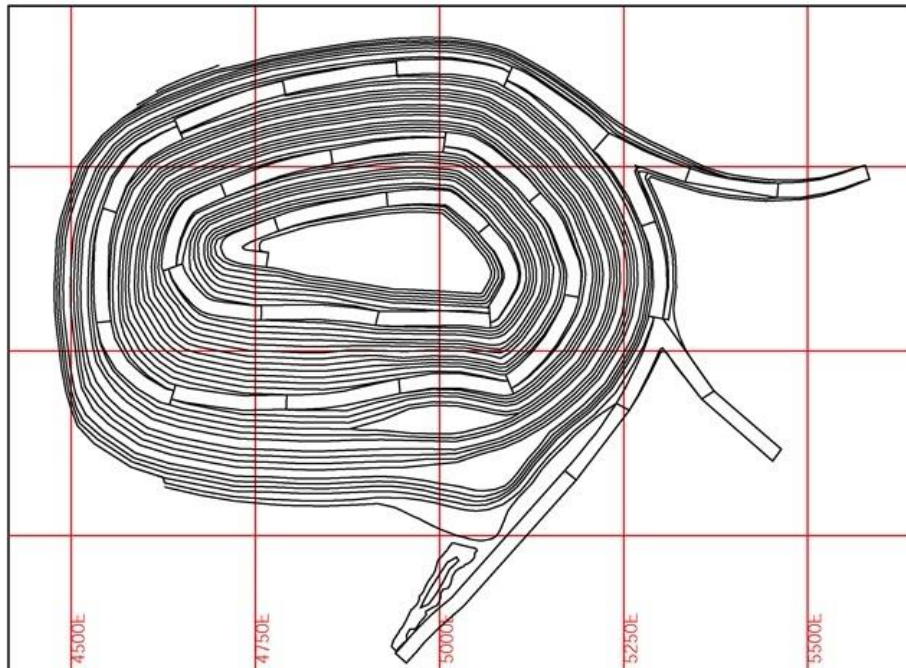


شکل ۴-۲: مقطع طولی زمین شناسی معدن سنگ آهن چغارت در سال ۱۳۷۲ (یاراحمدی بافقی و همکاران، ۱۳۹۱)

۴-۴- توپوگرافی و روش استخراج

توپوگرافی معدن چغارت قبل از استخراج تپه مانند بوده و حدود ۱۵۰ متر از سطح زمین مجاور خود بیرون زدگی داشته است. از نظر مورفولوژی درونی پس از اکتشاف تفصیلی، شکل کانسار چغارت توده گوهمانندی تعیین شده که دهانه این گوه به طرف سطح زمین است به طوری که روش استخراج

معدن را روباز و در محدوده ای با نسبت باطله برداری حدود ۱ : ۰/۷ تعیین نموده‌اند. در شکل ۳-۴ محدوده نهایی مصوب معدن طراحی شده در سال ۱۳۷۳ توسط کارشناسان دفتر طراحی معدن چغارت نشان داده شده است. این محدوده در پژوهش حاضر با عنوان پیت قدیم (شیب تند) ارجاع داده می‌شود (شرکت مهندسی مشاور کاوشگران، ۱۳۹۱).

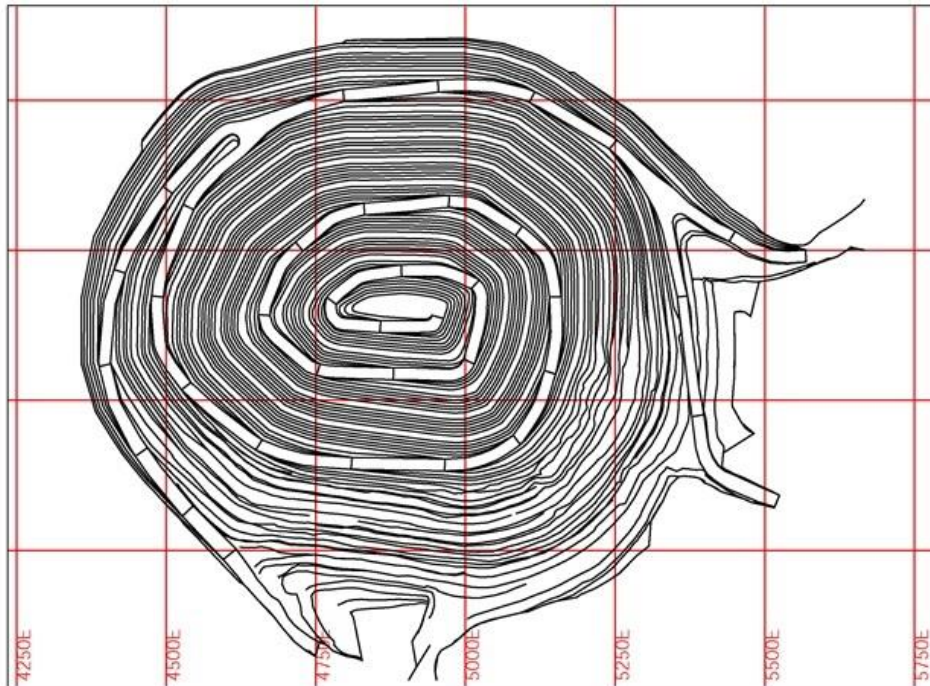


شکل ۳-۴: محدوده نهایی پیت قدیم (شرکت مهندسی مشاور کاوشگران، ۱۳۹۱)

بالاترین تراز این محدوده (لبه بالاترین پله) در ارتفاع ۱۱۵۰ متری و کف آن در ارتفاع ۸۱۲/۵ متری قرار دارد. این معدن در تراز ۱۱۰ متری دارای پله‌های عملیاتی ۱۰ متر و پله‌های نهایی ۳۰ متری بوده و یا عمیق شدن معدن، به علت نیاز به افزایش تولید این پله تا انتهای معدن به ۱۲/۵ متر در پله‌های عملیاتی و ۳۷/۵ متر در پله‌های نهایی افزایش می‌یابد. پله‌های ایمنی هر سه پله یک بار به عرض ۱۰ متر تا ۱۲/۵ متر و جاده‌های ۲۰ متری شیب مورد نظر دیواره‌ها را تامین می‌کنند. با این وضعیت هندسی، زوایای شیب دیواره‌ها حدود ۵۲ درجه است (شرکت مهندسی مشاور کاوشگران، ۱۳۹۱).

پس از اجرای طرح مصوب پیت قدیم، به دلیل وجود ناپایداری‌های موضعی در محدوده معدن و با بررسی‌های میدانی، تحلیل پایداری مجدد دیواره‌ها در دستور کار قرار گرفت و محدوده نهایی جدید

توسط شرکت کاوشگران طراحی شد (شکل ۴-۴) و نسبت باطله‌برداری بیش از دو برابر گردید (نسبت باطله برداری ۱ : ۲/۲۹) که دلیل اصلی افزایش نسبت باطله‌برداری کاهش شیب دیواره های معدن (شیب عملیاتی ۳۸ درجه) است (شرکت مهندسين مشاور کاوشگران، ۱۳۹۱). تصویر ماهواره‌ای پیت فعلی در شکل ۴-۵ آورده شده است.



شکل ۴-۴: محدوده نهایی پیت جدید (شرکت مهندسين مشاور کاوشگران، ۱۳۹۱)



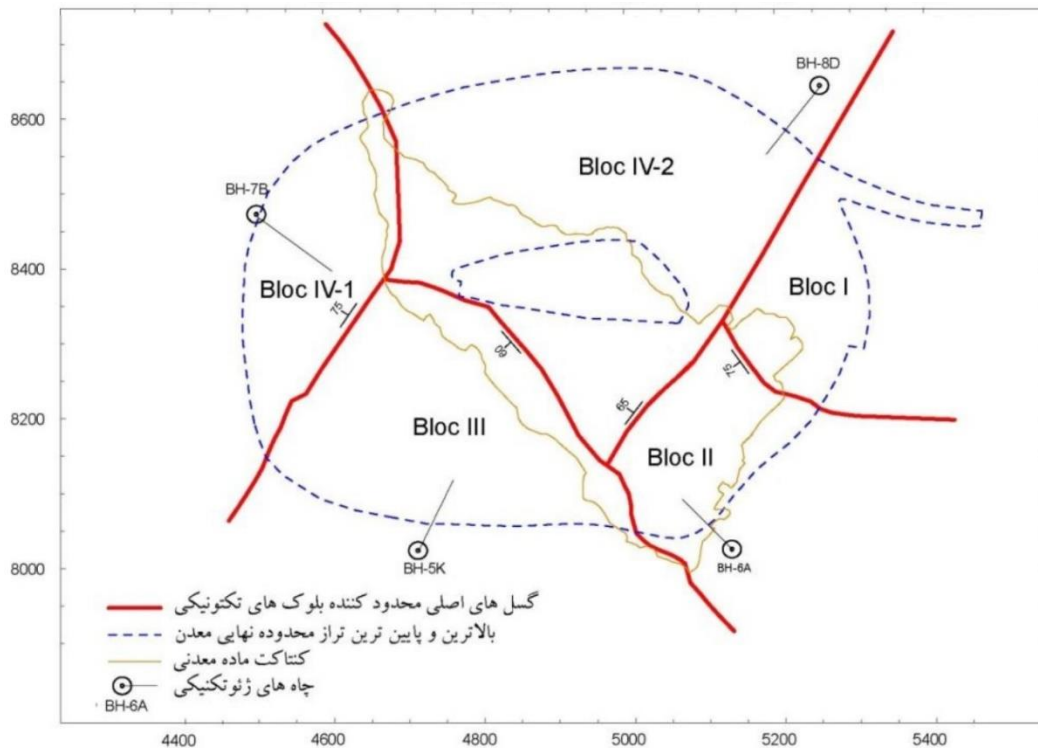
شکل ۴-۵: تصویر ماهواره‌ای از پیت جدید معدن سنگ آهن چغارت در سال ۱۳۹۶

۴-۵- بلوک‌های تکتونیکی

در مطالعات آماری برای کاهش واریانس‌ها و خطاهای شبیه‌سازی معمولاً تفکیک جامعه به جوامع کوچک‌تر با در نظر گرفتن حجم اطلاعات قابل قبول انجام می‌گیرد. در شبیه‌سازی ناپیوستگی‌ها نیز این امر الزامی است. معمولاً فرض تفکیک مناطق همگن آماری بر اساس ساختارهای اصلی فرضی صحیح است و در صورت درست نبودن آن می‌توان مناطق دارای ممان‌های آماری یکسان را مجدداً ترکیب نمود. طبق مطالعات زمین‌شناسی، تکتونیک اولیه و بر اساس گسل‌های اصلی منطقه، توده‌سنگ معدن چغارت به چهار بلوک تکتونیکی تقسیم شده است. بلوک تکتونیکی چهارم خود به دلیل اختلاف برخی از مشخصات به بلوک‌های ۴-۱ و ۴-۲ تقسیم می‌شود. در شکل ۴-۶ موقعیت بلوک‌های تکتونیکی نشان داده شده است. این تقسیم‌بندی بدون در نظر گرفتن دیگر ساختارهای زمین‌شناسی توده‌سنگ مورد نظر است؛ با این حال، احتمال دارد با تحلیل ساختارهای زمین‌شناسی توده‌سنگ مورد نظر، تعداد این تقسیمات (بلوک‌ها) بیشتر یا حتی در مواردی که رفتار و مشخصات این ساختارها به هم نزدیک باشد بعضی از این بلوک‌ها با هم ادغام شده و یک بلوک را ایجاد کنند. در این پژوهش دیواره جنوب شرقی (بلوک تکتونیکی ۱) به عنوان مورد مطالعاتی برای مدل‌سازی و تحلیل‌های مورد نیاز انتخاب شده است (یاراحمدی بافقی و همکاران، ۱۳۹۱).

۴-۶- عوامل ساختاری

پس از گسل‌های اصلی، عوامل ساختاری غالب در توده‌سنگ‌های درزه‌دار، ناپیوستگی‌هایی مانند درزه، لایه‌بندی، شیستوزیته، دگرشیبی و ... هستند که ویژگی‌های آن‌ها در هر یک از مناطق هموزن آماری، در مدل‌سازی هندسی مورد توجه قرار گرفته است. ناپیوستگی‌های مدنظر در این پژوهش دسته‌درزه‌های موجود در بلوک تکتونیکی ۱ است که در ادامه جزئیات مربوط به دسته‌درزه‌های مربوطه ارائه می‌شود.



شکل ۴-۶: محدوده بلوک بندی تکتونیکی محدوده معدن چغارت (یاراحمدی بافقی و همکاران، ۱۳۹۱)

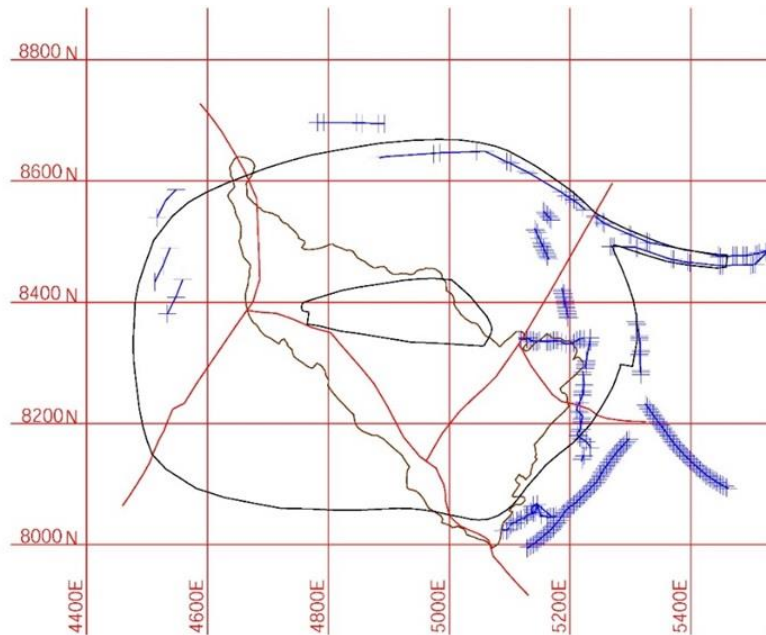
۴-۶-۱- برداشت و دسته‌بندی درزه‌ها

با توجه به داده‌های موجود در گزارش‌های پیشین، تعداد ۶۲۴ درزه از بلوک تکتونیکی ۱ برداشت شده است (شکل ۴-۷). به منظور دسته‌بندی و تفکیک دسته‌درزه‌ها و مشخصات آن‌ها، اطلاعات برداشت‌شده از بلوک تکتونیکی ۱، توسط نرم‌افزار Dips مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. شکل ۴-۸ کنترتور مرکز درزه‌ها و تفکیک آن‌ها در بلوک تکتونیکی ۱ آمده است. بر اساس کنترتورهای تمرکز سه دسته درزه قابل تشخیص است، البته یک تمرکز درزه کم نیز قابل تشخیص است که معمولاً به عنوان دسته درزه مورد توجه قرار نمی‌گیرد. علاوه بر این، تحلیل‌های ساختاری نشان می‌دهند که احتمال وجود شکست گوه‌ای در این بلوک وجود دارد (یاراحمدی بافقی و همکاران، ۱۳۹۱).

۴-۶-۲- تحلیل آماری

در مدل‌سازی عددی ناپیوسته، یکی از ملزومات توابع توزیع و ممان‌های آماری هر یک از ویژگی‌های دسته‌درزه‌ها است. در این بخش مشخصات شیب، جهت شیب و فاصله‌داری هر دسته‌درزه مورد تحلیل

قرار گرفته است.

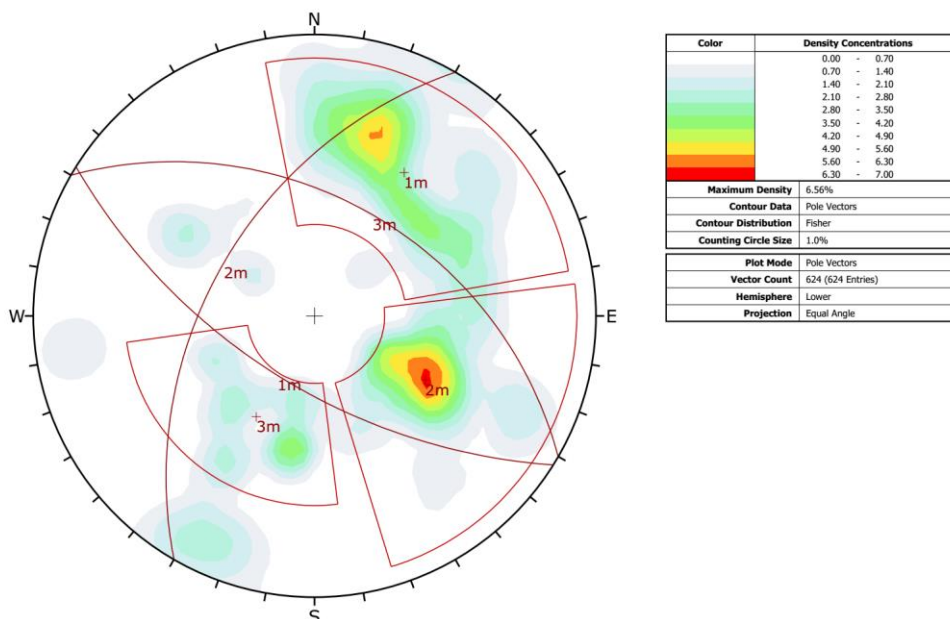


شکل ۴-۷: خطوط برداشت درزه در بلوک های مختلف معدن چغارت (یاراحمدی بافقی و همکاران، ۱۳۹۱)

با استفاده از نرم افزارهای آماری هیستوگرام پارامترهای مورد تخمین، ترسیم و ماهیت توابع توزیع

آن ها مطالعه شده و بررسی نرمال بودن داده ها با آزمون های آماری انجام گرفته است. نتایج مطالعه

آماری دسته درزه های بلوک تکتونیکی ۱ در جدول ۴-۱ آورده شده است.



شکل ۴-۸: کنتور تمرکز درزه ها و تفکیک آن ها در بلوک تکتونیکی ۱

جدول ۴-۱: ویژگی‌های آماری دسته درزه بلوک تکتونیکی ۱ (یاراحمدی بافقی و همکاران، ۱۳۹۱)

دسته درزه ۱			پارامتر
فاصله داری (متر)	امتداد شیب (آزیموت)	شیب (درجه)	
۲۱/۷	۱	۱/۱۳	A-squared
۰/۰۰۵	۰/۰۱۲	۰/۰۰۶	P-value
۰/۹۲۳	۲۹۷/۲۷	۵۰/۹۵۸	میانگین
۰/۹۷۴	۱۷/۳۱	۱۳/۴۶۲	انحراف معیار
۰/۹۴۸	۲۹۹/۴۹	۱۸۱/۲۲	واریانس
۳/۱۸	۰/۱۶۱۲	۰/۳۴۳	چولگی
۱۲/۱	-۰/۲۲۹	-۰/۲۹۹	کشیدگی
دسته درزه ۲			پارامتر
فاصله داری (متر)	امتداد شیب (آزیموت)	شیب (درجه)	
۲۷/۱	۰/۹۹	۰/۸۸	A-squared
۰/۰۰۵	۰/۰۱۳	۰/۰۲۳	P-value
۱/۲۱۷	۲۰۸/۱۱	۶۶/۷۷	میانگین
۱/۳۳	۱۷/۹۴	۱۰/۱۵	انحراف معیار
۱/۷۸	۳۲۱/۷۵	۱۰۲/۹۶	واریانس
۳/۶۹	۰/۲۳۴	۰/۰۸۹	چولگی
۱۹/۹	-۰/۶۴۸	-۰/۸۰۵	کشیدگی
دسته درزه ۳			پارامتر
فاصله داری (متر)	امتداد شیب (آزیموت)	شیب (درجه)	
۸/۷۹	۰/۶۱	۰/۵۷	A-squared
۰/۰۰۵	۰/۱۰۷	۰/۱۳۹	P-value
۱/۲۰۶	۳۱/۵۲	۴۵/۵	میانگین
۱/۱۲۸	۱۴/۱۱	۸/۰۱	انحراف معیار
۱/۲۷۲	۱۹۹/۱۶	۶۴/۲۳	واریانس
۲/۰۹۳	۰/۲۱۷	۰/۱۳۵	چولگی
۴/۰۳	-۰/۲۶۹	-۰/۷۹	کشیدگی

۴-۷- جمع‌بندی

در مجموع و با توجه به مطالب بیان شده، مطالعه موردی حاضر به عنوان گزینه مناسبی برای انجام تحلیل‌های پایداری شیب دوبعدی و سه‌بعدی در راستای اهداف این پژوهش انتخاب شد. دلیل اصلی انتخاب این مطالعه موردی این است که در این معدن، طراحی پیت قدیم بر اساس تحلیل‌های دوبعدی صورت گرفته و در آن تحلیل‌ها دیواره معدن پایدار به دست آمده است (یاراحمدی بافقی و همکاران،

(۱۳۹۱)؛ اما در عمل دیواره‌های این پیت دارای ناپایداری موضعی به‌خصوص در بلوک تکتونیک ۱ بوده است. تحلیل‌های گذشته بدون در نظر گرفتن اثر سه‌بعدی مناسب صورت گرفته بود؛ از این رو، این پژوهش به درک بهتر اثر سه‌بعدی در تحلیل پایداری شیب معادن روباز بزرگ با شرایط و مقیاس مشابه کمک می‌کند. از طرفی بلوک شماره ۱ این معدن در ناحیه ای از پیت قرار گرفته است که بیشترین شعاع انحنای را دارد و همین موضوع می‌تواند در ارزیابی اثر هندسه واقعی و انحنای شیب نیز مفید باشد. علاوه بر این به دلیل ملایم بودن شیب پیت جدید و تند بودن شیب پیت قدیم امکان مقایسه بین این دو نوع شیب نیز وجود دارد. دلایلی که تا به اینجا به آن‌ها اشاره شد، می‌تواند به عنوان «اثرات ابعادی» بر اثر سه‌بعدی در شیب دیواره معدن در نظر گرفته شوند.

مشخصه دیگری که باعث مناسب بودن این مطالعه موردی می‌شود، تعداد دسته درزه و همچنین میزان درزه‌داری محیط توده‌سنگ بلوک تکتونیک ۱ این معدن است. پژوهش‌های پیشین پیشنهاد می‌کنند که در صورت وجود بیش از سه دسته درزه اصلی در محیط توده‌سنگ می‌توان آن محیط را به صورت پیوسته معادل در نظر گرفت و تحلیل‌ها باید با استفاده از روش‌های تحلیل پیوسته انجام شوند؛ در غیر این صورت (کمتر از سه دسته درزه) باید تحلیل‌ها را به صورت ناپیوسته انجام داد. به علاوه، در شرایط درزه‌داری بسیار بالا نیز فرض محیط پیوسته معادل پیشنهاد می‌شود. از آنجایی که تعداد دسته‌دازه‌های اصلی بلوک مورد نظر سه دسته درزه است و میزان درزه‌داری نیز متوسط است، این بلوک در شرایط بین فرض محیط معادل پیوسته و محیط ناپیوسته قرار می‌گیرد. به همین خاطر این مطالعه موردی گزینه مناسبی برای بررسی اثر میزان درزه‌داری در نتایج تحلیل‌ها و همچنین اثر درزه‌داری بر اثر سه‌بعدی است. با توجه به اهداف پژوهش، میزان درزه‌داری و خواص مقاومتی توده‌سنگ به عنوان «اثرات محیطی» بر اثر سه‌بعدی در شیب دیواره معدن مورد بررسی قرار می‌گیرند.

در این مطالعه اثرات ابعادی در دو پیت قدیم (شیب تند) و جدید (شیب ملایم) بررسی خواهد شد و عوامل مختلف تأثیرگذار در نتایج نیز مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. هدف از این ارزیابی‌ها، به دست آوردن یک دید کلی در مورد تفاوت نتایج در حالات مختلف تحلیل پایداری شیب معادن روباز و شناسایی

عوامل بحرانی‌تر است. در فصل بعدی به توضیح اثر سه‌بعدی، اثرات محیطی و اثرات ابعادی پرداخته شده است.

فصل پنجم

مدلسازی و تحلیل

نتایج

۵-۱- مقدمه

به منظور تحلیل پایداری شیب، نرم‌افزارهای المان مجزای دوبعدی و سه‌بعدی UDEC و 3DEC برای اجرای تحلیل‌ها در محیط ناپیوسته و نرم‌افزارهای تفاضل محدود FLAC و FLAC3D برای اجرای تحلیل در محیط‌های پیوسته انتخاب شدند که همه این نرم‌افزارها برای تعیین ضریب ایمنی از روش کاهش مقاومت استفاده می‌کنند. مجموعه تحلیل‌های صورت گرفته در این پژوهش با در نظر گرفتن تأثیر هندسه واقعی، اندازه مش و تندی شیب (در تعامل با دیگر عوامل)، به عنوان اثرات ابعادی و تأثیر تغییر خصوصیات مقاومتی توده‌سنگ (زاویه اصطکاک و چسبندگی داخلی) و میزان درزه‌داری، به عنوان اثرات محیطی بر تفاوت نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی با توجه به ضرایب ایمنی و سطوح شکست احتمالی به دست آمده صورت گرفته است.

۵-۲- فرض‌های تحلیل

به منظور اجرای تحلیل‌های پایداری شیب دوبعدی و سه‌بعدی در بلوک تکتونیک ۱ در پیت قدیمی و پیت جدید معدن سنگ‌آهن چغارت و در راستای مدل‌سازی عددی بلوک مورد نظر فرض‌های زیر در نظر گرفته شده است.

الف: عدم وجود آب زیرزمینی. وجود آب زیرزمینی قطعاً از موثرترین عوامل در پایداری دیواره‌های معدن و همچنین نتایج به دست آمده از تحلیل‌های پایداری شیب است. طبق گزارش‌های پیشین و تحلیل‌های پارامتریک صورت گرفته در منطقه مورد مطالعه مشخص شده است که در صورت وجود آب

زیرزمینی ضریب ایمنی به میزان زیادی کاهش خواهد یافت اما عدم توجه کافی به وجود آب در گزارش‌های قبلی به‌خصوص در گزارش‌های تحلیل پایداری باعث شده که اطلاعات مورد نیاز حتی به صورت ناقص هم در این زمینه وجود نداشته باشد. علاوه بر این، سیستم زهکشی در درون پیت موجود است و همین امر می‌تواند تا حدودی به صحت فرض خشک بودن دیواره‌ها کمک کند.

اشاره به این نکته ضروری است که فرض عدم وجود آب زیرزمینی در همه مطالعات به عنوان فرضی غیرمحافظة کارانه در نظر گرفته می‌شود. با توجه به دلایل ذکر شده و همچنین هدف اصلی پژوهش که ارائه یک دید کلی در زمینه ارزیابی برخی از پارامترهای ابعادی و محیطی دخیل در میزان اثر سه‌بعدی پایداری شیب معادن روباز است، اثر وجود آب زیرزمینی در این پژوهش بررسی نخواهد شد.

ب: نادیده گرفتن اثر حفاری مرحله‌ای. در برخی از تحلیل‌های پایداری شیب، رویکرد حفاری مرحله به مرحله برای تحلیل پایداری شیب اتخاذ می‌شود. دلیل این امر این است که وجود روباره‌های موجود پیش از حفاری شیب، میدان‌های تنش در منطقه را تغییر داده و پایداری شیب نهایی را تحت تأثیر قرار خواهد داد. هدف این پژوهش تحلیل پایداری سراسری شیب دیواره بلوک تکتونیکی ۱ (پایداری شیب نهایی) با تمرکز بر ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی به دست آمده است؛ از این رو و با توجه به ماهیت روش استخراج روباز، روباره‌های موجود در بالای پیت نهایی به صورت مرحله‌ای حفاری خواهند شد و به دلیل زمان طولانی در رسیدن به شیب نهایی، مخصوصاً در معادن روباز بزرگ، تنش‌های حاصله از روباره به تعادل خواهند رسید و اثرات آن‌ها کمتر از قبل خواهد بود.

برای اطمینان از فرض اتخاذشده، تعداد محدودی تحلیل با در نظر گرفتن حفاری مرحله‌ای صورت گرفت و نتایج به دست آمده نشان داد که اعمال حفاری مرحله‌ای تأثیری در ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی به دست آمده در پایداری شیب بلوک مورد نظر ندارد. به همین دلیل، از در نظر گرفتن مراحل حفاری در تحلیل‌ها خودداری شد.

پ: استفاده از محیط پیوسته معادل در تحلیل‌های پیوسته. با توجه به نکاتی که در بخش‌های قبل اشاره شد، معمولاً در شرایط درزه‌داری بالا و وجود بیش از سه‌دسته درزه ی اصلی و کنترل

کننده مکانیزم شکست، پیشنهاد شده است که محیط به صورت پیوسته معادل در نظر گرفته شود؛ این کار با کاهش خواص مقاومتی و الاستیک سنگ بکر با در نظر گرفتن تأثیر ناپیوستگی‌ها صورت می‌گیرد. مطالعه موردی حاضر شامل سه دسته درزه اصلی با میزان درزه‌داری متوسط می‌شود. در این حالت تعداد دسته درزه‌ها و میزان درزه‌داری به گونه‌ای است که فرض پیوسته بودن محیط می‌تواند مورد بحث باشد. از این رو، برای بررسی مناسب بودن فرض محیط پیوسته معادل در مطالعه موردی حاضر، خواص سنگ بکر بلوک مورد تحلیل با استفاده از نرم‌افزار RockLab به خواص توده‌سنگ تبدیل شد و در تحلیل‌های پیوسته مورد استفاده قرار گرفت.

ت: استفاده از محیط ناپیوسته- پیوسته در تحلیل‌های ناپیوسته. با توجه به نکات اشاره شده در بحث تحلیل‌های ناپیوسته، امکان مدل کردن همه درزه‌ها در درون یک مدل عددی وجود ندارد؛ به همین دلیل، تنها درصدی از درزه‌ها می‌توانند به مدل وارد شوند. در تحلیل‌های ناپیوسته صورت گرفته در این پژوهش، از محیط ناپیوسته- پیوسته استفاده شده است. در این نوع محیط، علاوه بر وارد کردن درزه‌ها، برای فضای بین درزه‌ها، یک محیط تغییرشکل پذیر (مانند تحلیل‌های پیوسته) در نظر گرفته شده است.

به همین منظور، تحلیل‌های صورت گرفته و نتایج آن‌ها را به دو گروه تحلیل‌های پیوسته و تحلیل‌های ناپیوسته تقسیم و در نهایت نتایج همه تحلیل‌ها را با هم مقایسه شده است.

۵-۳- تحلیل‌های پیوسته

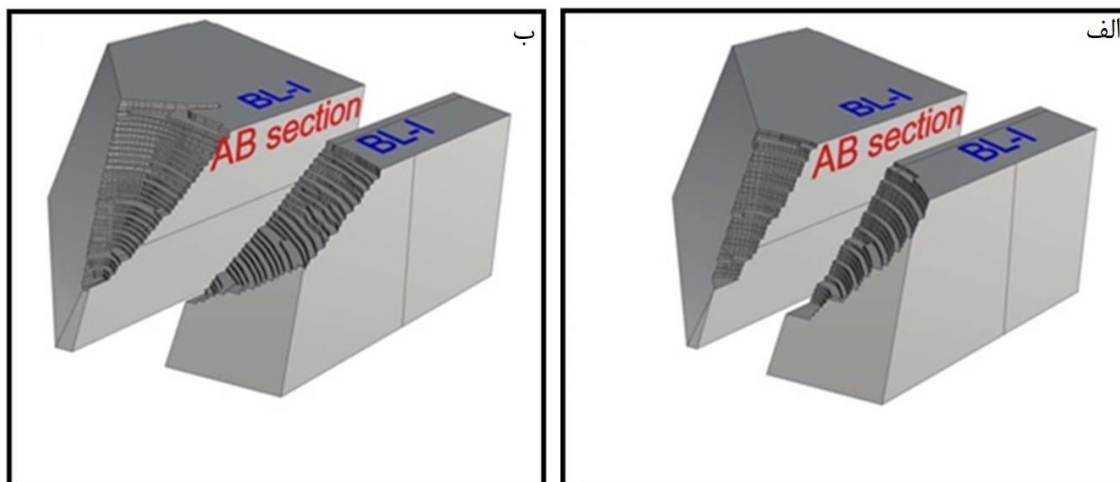
به منظور اجرای تحلیل‌های پیوسته دوبعدی از نرم‌افزار FLAC و برای تحلیل‌های پیوسته سه‌بعدی از نسخه سه‌بعدی این نرم‌افزار یعنی FLAC3D استفاده شد. نرم‌افزارهای FLAC2D و FLAC3D از روش تفاضل محدود برای تحلیل مسائل ژئوتکنیکی استفاده می‌کنند و برای تخمین ضریب ایمنی روش کاهش مقاومت (SRT) را به کار می‌گیرند. روش کاهش مقاومت یکی از رایج‌ترین روش‌های مورد استفاده در محاسبه ضریب ایمنی و تحلیل پایداری شیب است.

۵-۳-۱- اثر اندازه ابعاد مش

در مرحله اول، چندین تحلیل پایداری شیب دوبعدی و سه‌بعدی با هدف ارزیابی اثر اندازه مش بر روی نتایج تحلیل صورت گرفت. از آنجایی که اندازه مش تأثیر بسزایی بر روی دقت نتایج و سرعت اجرای تحلیل‌ها دارد، هدف فرعی این تحلیل‌ها تشخیص اندازه مناسب مش برای اجرای تحلیل‌های بعدی بود، به‌گونه‌ای که هم دقت کافی وجود داشته باشد و هم زمان اجرای برنامه‌ها بسیار زیاد نشود. به منظور اهداف مقایسه‌ای، در تحلیل نتایج مقطع AB و بلوک تکتونیک‌ی ۱ در پیت قدیمی به عنوان «شیب تند» و در پیت جدید به عنوان «شیب ملایم» مورد بررسی قرار می‌گیرد (شکل ۵-۱).

تحلیل‌های دوبعدی بر روی مقطع AB بلوک تکتونیک‌ی ۱ در هر دو شیب تند و ملایم و تحلیل‌های سه‌بعدی بر روی بلوک تکتونیک‌ی ۱ نیز در هر دو شیب تند و ملایم انجام شدند (شکل ۵-۱). بلوک مورد نظر از نظر هندسی مقعر است. راستای مقطع AB غربی-شرقی و در محل بیشترین انحنای پیت است. خصوصیات هندسی مقطع AB و بلوک تکتونیک‌ی ۱ به ترتیب در جدول ۵-۱ و جدول ۵-۲ آورده شده است. ارتفاع بلوک تکتونیک‌ی ۱ و مقطع AB در تحلیل‌ها ۵۰۰ متر و شعاع انحنای بلوک تکتونیک‌ی ۱ در شیب تند ۱۸۰ متر و در شیب ملایم ۳۳۰ متر است؛ اندازه شعاع انحناها از روی تعریف شعاع انحنای مقعر ارائه شده در بخش‌های قبل به دست آمده است.

محدوده ابعاد مش‌ها برای تحلیل‌های دوبعدی از 3×3 مترمربع تا 40×40 متر مربع و برای تحلیل‌های سه‌بعدی $5 \times 5 \times 5$ مترمکعب تا $40 \times 40 \times 40$ مترمکعب انتخاب شد. حد پایین ابعاد مش با توجه به توان پردازشی تجهیزات در دسترس و حد بالای آن با توجه به نسبت پیشنهادی مطالعات پیشین (Ashford & Sitar, 2001; Li et al., 2014) در نظر گرفته شده است. در جدول ۵-۳، پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ بلوک تکتونیک‌ی ۱ آورده شده است.



شکل ۱-۵: مدل هندسی بلوک تکتونیکی ۱ و مقطع AB در الف) پیت قدیم و ب) پیت جدید

جدول ۱-۵: مشخصات هندسی مقطع AB در پیت‌های قدیم و جدید

مقطع AB	ارتفاع (m)	عرض (m)	زاویه شیب (درجه)	مساحت مقطع (m ²)
پیت قدیم	۵۰۰	۷۵۰	۵۲	۲۷۴×۱۰^۳
پیت جدید	۵۰۰	۱۱۰۰	۳۸	۴۰۴×۱۰^۳

جدول ۲-۵: مشخصات هندسی بلوک تکتونیکی ۱ در پیت‌های قدیم و جدید

بلوک تکتونیکی ۱	شعاع انحنا (m)	زاویه شیب (درجه)	حجم بلوک (m ³)
پیت قدیم	۱۸۰	۵۲	۳۲۴×۱۰^۶
پیت جدید	۳۳۰	۳۸	۶۴۸×۱۰^۶

جدول ۳-۵: خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ بلوک تکتونیکی ۱ (پاراحمدی بافقی و همکاران، ۱۳۹۱)

چگالی (kg/m^3)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	مدول حجمی (GPa)	مدول برشی (GPa)
۲۷۰۰	۰/۱۶۹	۳۵	۹/۳۳	۵/۶

ضرایب ایمنی به دست آمده از تحلیل‌های مقطع AB در شیب‌های تند و ملایم در جدول ۴-۵ آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با کاهش اندازه ابعاد مش‌ها FOS_{2D} در هر دو شیب تند و ملایم کاهش می‌یابد. تفاوت نتایج ضرایب ایمنی در محدوده بین مش‌های ۳×۳ متر مربع و ۴۰×۴۰ متر مربع، میزان تغییرات ۰/۲۸۱ را در شیب تند و ۰/۱۴۸ را در شیب ملایم نشان می‌دهد. این تغییرات حساسیت کمتر شیب ملایم به تغییر اندازه مش را نشان می‌دهد.

در شکل ۲-۵ تا شکل ۷-۵ مدل‌های ساخته شده و نتایج به دست آمده در تحلیل‌های دوبعدی شیب‌های تند و ملایم را نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در ابعاد مش درشت^۱ (بالای ۲۰ متر) در هر دو شیب تند و ملایم، سطح شکست احتمالی به خوبی دیده نمی‌شود و منحنی‌های کرنش در محدوده وسیعی درگیر شده‌اند (شکل ۲-۵ و شکل ۵-۵). با در نظر گرفتن اندازه ابعاد مش بسیار ریز^۲ (زیر ۵ متر) در هر دو شیب تند و ملایم، تمرکز محاسبات نرم‌افزار، بر روی جزئیات و پیچیدگی‌های هندسی شیب‌ها و پله‌های آن‌ها افزایش یافته و سطح شکست احتمالی و کنتورهای کرنش در نزدیکی پله‌ها به صورت نامنظم تشخیص داده می‌شوند (شکل ۴-۵ و شکل ۷-۵). در مجموع، این نتایج بیانگر عدم توانایی تشخیص مناسب سطح شکست سراسری احتمالی در تحلیل دوبعدی با استفاده از مش‌های بزرگ و بسیار ریز است.

با بررسی جدول ۴-۵، مشاهده می‌شود که FOS_{2D} شیب تند و ملایم، در یک محدوده خاص تغییر نمی‌کند (این تغییر بسیار ناچیز است) و همچنین سطوح شکست احتمالی در این محدوده (شکل ۳-۵

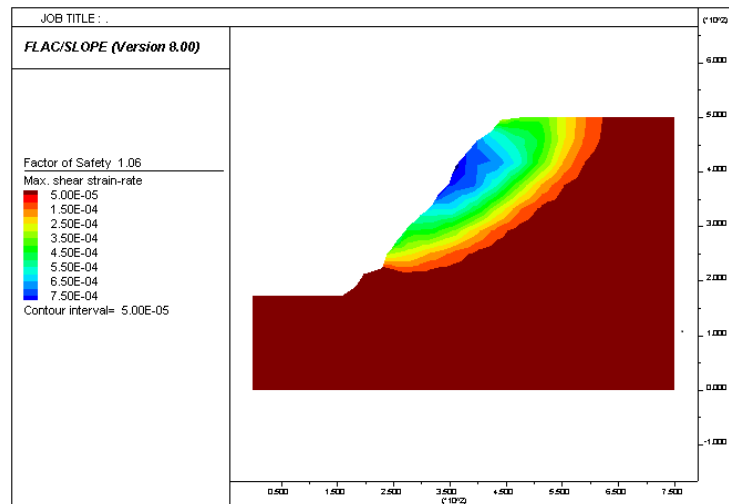
^۱ coarse meshes

^۲ extra fine meshes

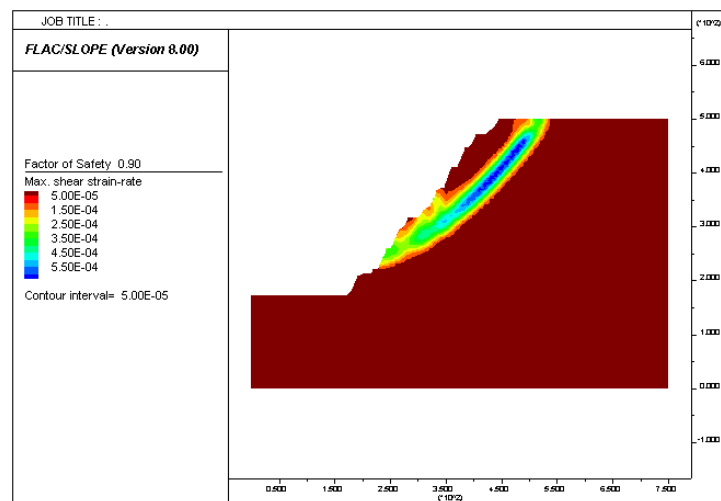
و شکل ۵-۶)، به خوبی قابل تشخیص هستند؛ ابعاد مش در این محدوده، بین ۰/۰۱ تا ۰/۰۳ درصد محیط مقطع دوبعدی در هر دو شیب تند و ملایم است. از این رو، برای اجرای یک تحلیل دوبعدی مناسب پایداری سراسری شیب توصیه می‌شود که نسبت ابعاد مش به محیط شیب در بین محدوده معرفی شده باشد.

جدول ۴-۵: ضرایب ایمنی حاصل از تحلیل‌های دوبعدی در اندازه ابعاد مش مختلف

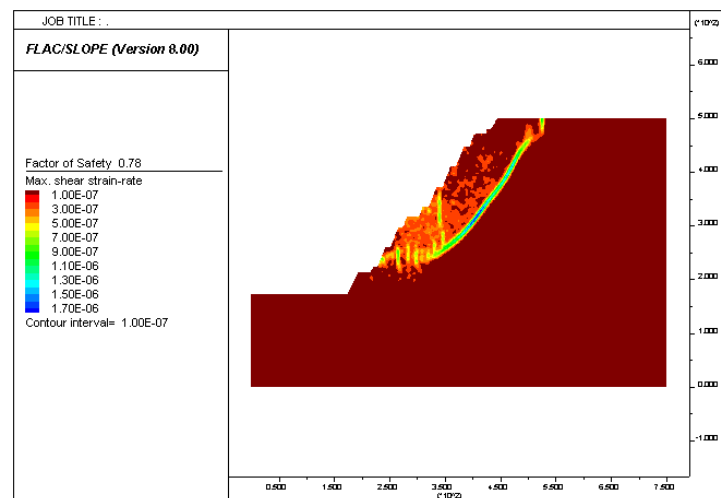
مقطع AB پیت جدید		مقطع AB پیت قدیم	
ضریب ایمنی	ابعاد مش (m×m)	ضریب ایمنی	ابعاد مش (m×m)
۱/۲۲	۳×۳	۰/۷۸	۳×۳
۱/۲۳	۴×۴	۰/۸۱	۴×۴
۱/۲۵	۵×۵	۰/۸۵	۵×۵
۱/۲۶	۶×۶	۰/۸۶	۶×۶
۱/۲۷	۷×۷	۰/۸۷	۷×۷
۱/۲۸	۸×۸	۰/۸۷	۸×۸
۱/۲۸	۹×۹	۰/۹۰	۹×۹
۱/۲۸	۱۰×۱۰	۰/۹۰	۱۰×۱۰
۱/۳۱	۲۰×۲۰	۰/۹۴	۲۰×۲۰
۱/۳۴	۳۰×۳۰	۱/۰۱	۳۰×۳۰
۱/۳۶	۴۰×۴۰	۱/۰۶	۴۰×۴۰



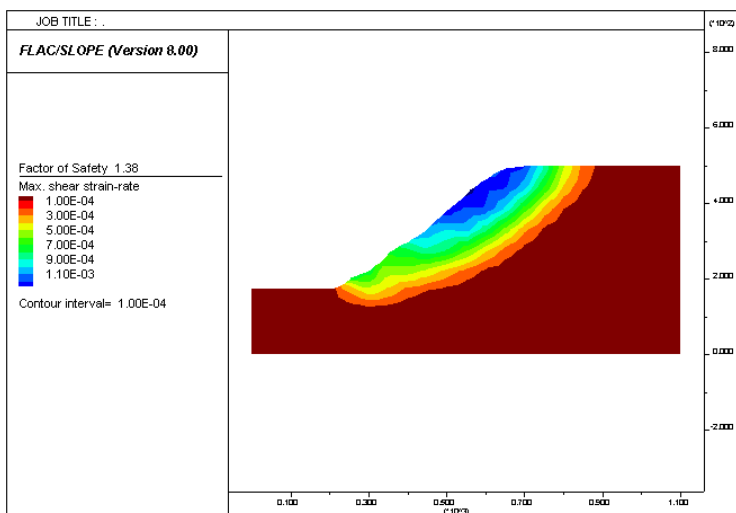
شکل ۵-۲: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در مقطع AB پیت قدیم با اندازه ابعاد مش درشت



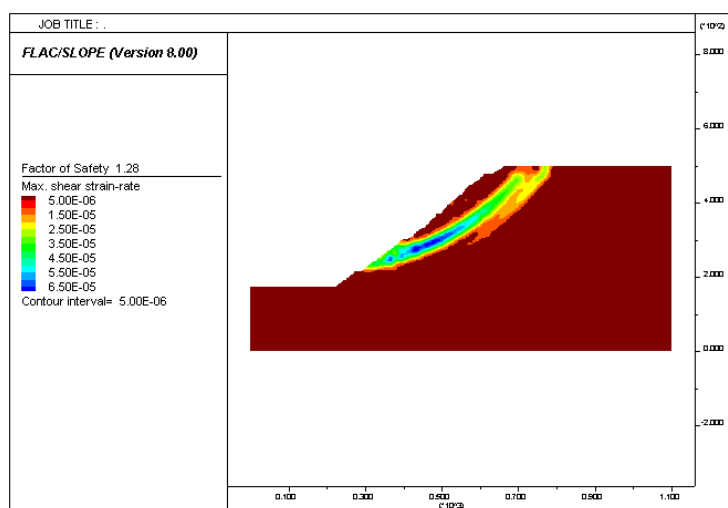
شکل ۵-۳: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در مقطع AB پیت قدیم با اندازه ابعاد مش ریز



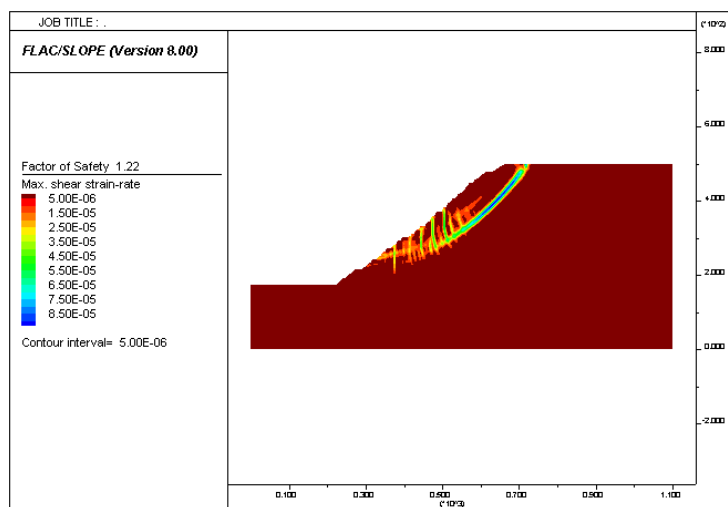
شکل ۵-۴: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در مقطع AB پیت قدیم با اندازه ابعاد بسیار ریز



شکل ۵-۵: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در مقطع AB پیت جدید با اندازه ابعاد مش درشت



شکل ۵-۶: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در مقطع AB پیت جدید با اندازه ابعاد مش ریز



شکل ۵-۷: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در مقطع AB پیت جدید با اندازه ابعاد مش بسیار ریز

ضرایب ایمنی به دست آمده از تحلیل‌های سه‌بعدی در بلوک تکتونیکی ۱ در شیب‌های تند و ملایم در جدول ۵-۵ آورده شده است. مشابه تحلیل‌های دوبعدی با کاهش اندازه ابعاد مش‌ها، FOS_{3D} در هر دو شیب تند و ملایم کاهش می‌یابد اما میزان تغییرات ضرایب ایمنی در تحلیل‌های سه‌بعدی بیشتر از تحلیل‌های دوبعدی است. تفاوت نتایج ضرایب ایمنی در محدوده بین مش‌های ۵×۵×۵ متر مکعب و ۴۰×۴۰ متر مکعب، میزان تغییرات ۰/۳۲ را در شیب تند و ۰/۲۴ را در شیب ملایم نشان می‌دهد؛ مانند تحلیل‌های دوبعدی، در تحلیل‌های سه‌بعدی نیز حساسیت ضریب ایمنی در شیب تند بیشتر از شیب ملایم است.

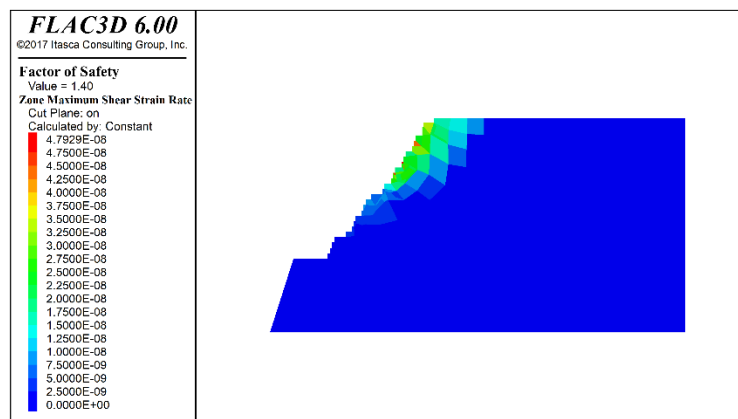
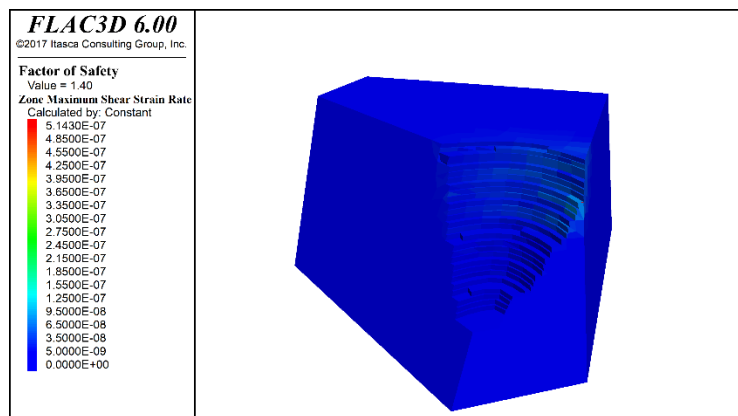
جدول ۵-۵: ضرایب ایمنی حاصل از تحلیل‌های سه‌بعدی در اندازه ابعاد مش مختلف

بلوک تکتونیکی ۱ پیت جدید		بلوک تکتونیکی ۱ پیت قدیم	
ضریب ایمنی	اندازه ابعاد مش (m×m×m)	ضریب ایمنی	اندازه ابعاد مش (m×m×m)
۱/۴۷	۵×۵×۵	۱/۰۸	۵×۵×۵
۱/۴۸	۶×۶×۶	۱/۱۰	۶×۶×۶
۱/۴۹	۷×۷×۷	۱/۱۲	۷×۷×۷
۱/۴۹	۸×۸×۸	۱/۱۳	۸×۸×۸
۱/۵۰	۹×۹×۹	۱/۱۴	۹×۹×۹
۱/۵۱	۱۰×۱۰×۱۰	۱/۱۵	۱۰×۱۰×۱۰
۱/۵۵	۲۰×۲۰×۲۰	۱/۲۳	۲۰×۲۰×۲۰
۱/۶۶	۳۰×۳۰×۳۰	۱/۳۱	۳۰×۳۰×۳۰
۱/۷۱	۴۰×۴۰×۴۰	۱/۴۰	۴۰×۴۰×۴۰

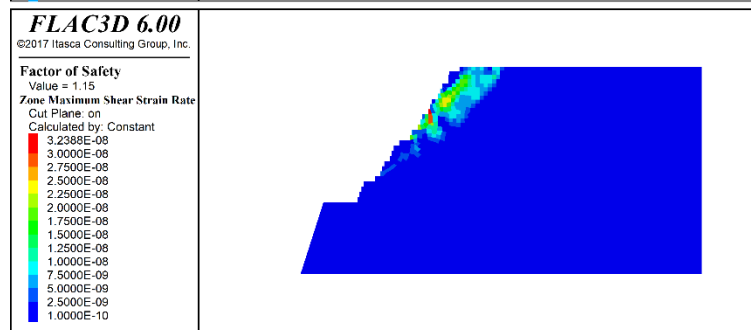
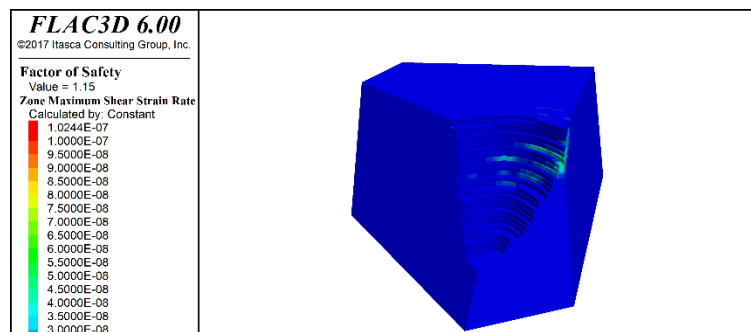
شکل ۵-۸ تا شکل ۵-۱۱، مدل‌های ساخته شده و نتایج به دست آمده در تحلیل‌های سه‌بعدی شیب تند و شیب ملایم را نشان می‌دهد. در شیب تند، در ابعاد مش درشت با گرفتن پلات از مقطع متناظر تحلیل‌های دوبعدی، سطح شکست احتمالی به خوبی مشخص نبود و مانند تحلیل‌های دوبعدی این سطح به صورت پراکنده است و واضح دیده نمی‌شود؛ در نمایش سه‌بعدی نتایج تحلیل پایداری بلوک

تکتونیک‌ی ۱ مرزهای سطح شکست احتمالی بر روی سطح مشخص نیست (شکل ۵-۸). علاوه بر این، در مقایسه مقطع انتخاب شده در تحلیل سه‌بعدی با مقطع متناظر ارائه شده در تحلیل دوبعدی، سطح شکست احتمالی در تحلیل سه‌بعدی پله‌های کمتری را دربر می‌گیرد (شکل ۵-۲ و شکل ۵-۸). در نتایج تحلیل‌های پایداری بلوک تکتونیک‌ی ۱ پیت قدیم با ابعاد مش ریز با گرفتن پلات از مقطع متناظر تحلیل‌های دوبعدی، سطح شکست احتمالی مشخص است و همانند تحلیل‌های دوبعدی این سطح به صورت واضح تری نسبت به ابعاد مش درشت مشخص است؛ بر خلاف تحلیل با مش درشت، در نمایش سه‌بعدی نتایج تحلیل پایداری بلوک تکتونیک‌ی ۱ مرزها و محدوده سطح شکست احتمالی بر روی سطح مشخص است (شکل ۵-۹).

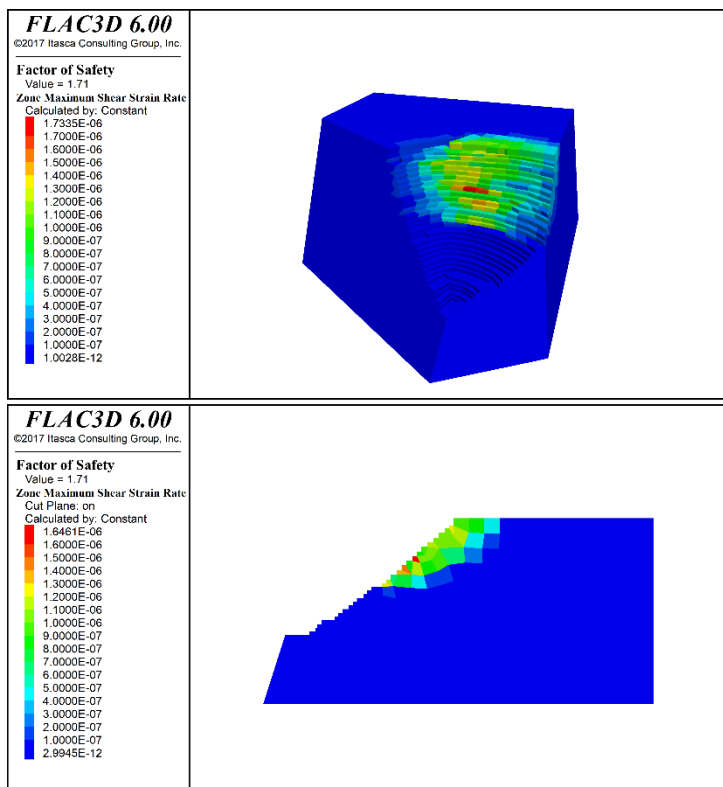
در شیب ملایم، در ابعاد مش درشت با گرفتن پلات از مقطع متناظر تحلیل‌های دوبعدی، سطح شکست احتمالی مشخص است اما مانند تحلیل‌های دوبعدی این سطح به صورت پراکنده است و واضح دیده نمی‌شود؛ در نمایش سه‌بعدی نتایج تحلیل پایداری بلوک تکتونیک‌ی ۱ مرزهای سطح شکست احتمالی بر روی سطح به صورت پراکنده مشخص است (شکل ۵-۱۰). علاوه بر این، در مقایسه مقطع انتخاب شده در تحلیل سه‌بعدی با مقطع متناظر ارائه شده در تحلیل دوبعدی، سطح شکست احتمالی در تحلیل سه‌بعدی پله‌های کمتری را دربر می‌گیرد (شکل ۵-۵ و شکل ۵-۱۰). در نتایج تحلیل‌های پایداری بلوک تکتونیک‌ی ۱ پیت جدید با ابعاد مش ریز با گرفتن پلات از مقطع متناظر تحلیل‌های دوبعدی، سطح شکست احتمالی مشخص است و همانند تحلیل‌های دوبعدی این سطح به صورت واضح تری نسبت به ابعاد مش درشت مشخص است؛ در نمایش سه‌بعدی نتایج تحلیل پایداری بلوک تکتونیک‌ی ۱ مرزها و محدوده سطح شکست احتمالی بر روی سطح مشخص است (شکل ۵-۱۱).



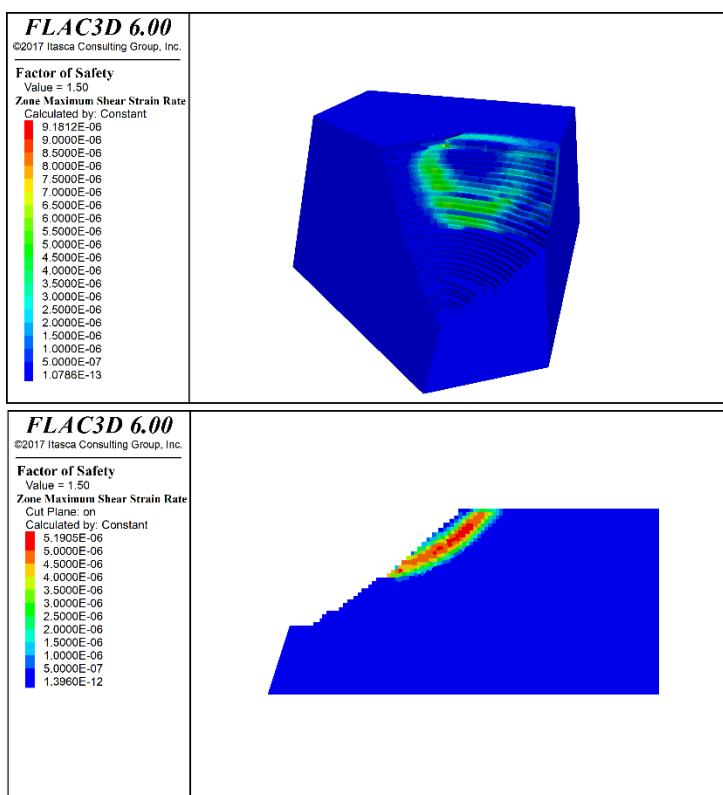
شکل ۵-۸: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در بلوک تکتونیکی ۱ پیت قدیم با اندازه ابعاد مش درشت



شکل ۵-۹: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در بلوک تکتونیکی ۱ پیت قدیم با اندازه ابعاد مش ریز



شکل ۵-۱۰: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در بلوک تکتونیکی ۱ پیت جدید با اندازه ابعاد مش درشت

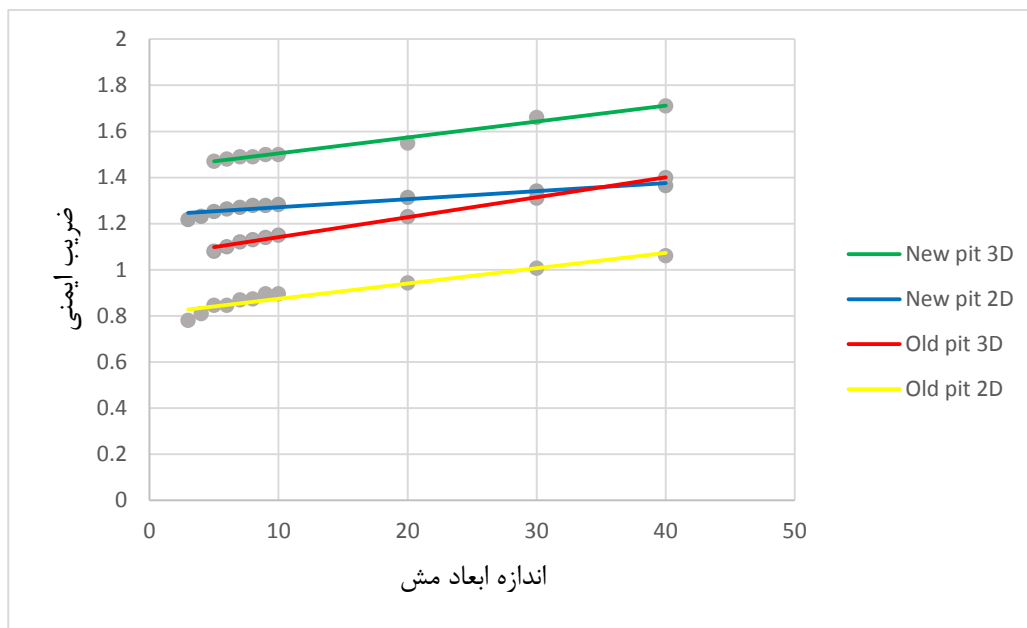


شکل ۵-۱۱: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در بلوک تکتونیکی ۱ پیت جدید با اندازه ابعاد مش ریز

در تحلیل‌های سه‌بعدی، با کاهش اندازه ابعاد مش، ضرایب ایمنی در شیب‌های تند و ملایم به یک عدد مشخص همگرا می‌شوند. این عدد برای شیب تند حدود $1/1$ و برای شیب ملایم حدود $1/5$ است. میزان زمان اجرای تحلیل‌های سه‌بعدی در ابعاد مش ریز بسیار زیاد بود، به طوری که برای مش با ابعاد $5 \times 5 \times 5$ مترمکعب هر کدام از تحلیل‌ها بیش از ۳۰ ساعت به طول انجامید. به همین دلیل برای اجرای تحلیل با مدت زمان معقول و دقت کافی، اندازه مش با ابعاد $10 \times 10 \times 10$ برای هر دو شیب پیشنهاد می‌شود.

در شکل ۵-۱۲، نمودار تغییرات ضریب ایمنی به تغییرات اندازه ابعاد مش در تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی شیب‌های تند و ملایم را نشان داده شده است. به منظور مقایسه بهتر نتایج تحلیل‌ها در شیب تند با نتایج تحلیل‌ها در شیب ملایم و همچنین مقایسه نتایج تحلیل‌های دوبعدی با تحلیل‌های سه‌بعدی، همه تغییرات در یک نمودار آورده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، در هر یک از شیب‌ها، FOS_{3D} در همه اندازه مش‌ها بزرگ‌تر از FOS_{2D} است.

با انتخاب اندازه ابعاد مش درشت (در اینجا بزرگ‌تر از ۳۵ متر)، FOS_{3D} در «شیب تند» بیشتر از FOS_{2D} در «شیب ملایم» می‌شود. در صورتی که درک درستی از مفهوم اثر سه‌بعدی و اختلاف بین نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی پایداری شیب وجود نداشته باشد، ممکن است FOS_{3D} شیب‌های تند و ملایم هم سطح با FOS_{2D} شیب‌های تند و ملایم در نظر گرفته شوند. برای اجتناب از به وجود آمدن سردرگمی در مقایسه نتایج دو راه وجود دارد؛ الف) می‌توان همه تحلیل‌های یک پروژه را تنها با روش دوبعدی یا تنها با روش سه‌بعدی تحلیل کرد؛ ب) برای تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی سطوح ایمنی جداگانه تعریف کرد تا هر روش (دوبعدی یا سه‌بعدی) با سطح ایمنی مخصوص به خود مقایسه و ارزیابی شود.



شکل ۵-۱۲: تغییرات ضریب ایمنی در مقابل تغییرات اندازه ابعاد مش

در جدول ۵-۶، مقادیر نسبت FOS_{3D}/FOS_{2D} (اثر سه بعدی) برای شیب‌های تند و ملایم را در اندازه مش‌های مختلف آورده شده است. با توجه به جدول ۵-۶، روند منظمی در تغییرات اثر سه بعدی برای هیچ یک از شیب‌ها مشاهده نمی‌شود. با این حال، در شیب ملایم و برای اندازه ابعاد مش کوچک‌تر از ۲۰ اثر سه بعدی مقادیر تقریباً یکسانی را نشان می‌دهد که این مقادیر در محدوده ۱/۷ قرار دارند. ثبات مقدار اثر سه بعدی در این حالت می‌تواند به دلیل حساسیت کمتر شیب ملایم به تغییرات اندازه ابعاد مش باشد. اگرچه، با بزرگ‌تر شدن ابعاد مش (بیش از ۲۰) اثر سه بعدی به میزان بیشتری تغییر می‌کند. در شیب تند تغییرات اثر سه بعدی در اندازه ابعاد مش مختلف پراکنده‌تر است اما با این حال، میزان تغییرات زیاد نیست و در محدوده ۱/۲۹ قرار دارد. اختلاف کمترین و بیشترین مقدار اثر سه بعدی در محدوده ابعاد مش ۵ تا ۴۰ برای شیب تند، ۰/۰۵ و برای شیب ملایم، ۰/۰۹ است. البته این مقادیر در محدوده ابعاد مش ۵ تا ۲۰ کمتر نیز می‌شوند، به صورتی که این مقادیر برای شیب تند، به ۰/۰۳ و برای شیب ملایم، به ۰/۰۲ کاهش می‌یابد. مقدار اثر سه بعدی در محدوده اندازه ابعاد مش مناسب پیشنهادی (ابعاد مش ۱۰ متر)، برای شیب تند ۱/۲۸ و برای شیب ملایم ۱/۱۷ است.

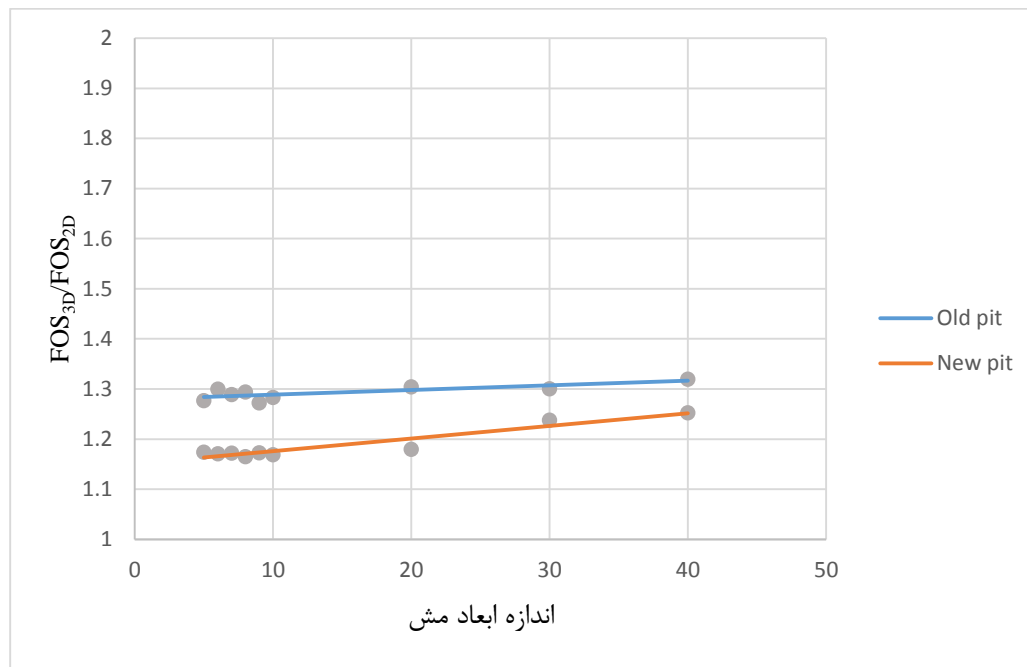
جدول ۵-۶: اثر سه‌بعدی به دست آمده در اندازه ابعاد مش مختلف

بلوک تکتونیکی ۱ بیت جدید		بلوک تکتونیکی ۱ بیت قدیم	
FOS _{3D} /FOS _{2D}	ابعاد مش (m)	FOS _{3D} /FOS _{2D}	ابعاد مش (m)
۱/۱۷	۵	۱/۲۸	۵
۱/۱۷	۶	۱/۳۰	۶
۱/۱۷	۷	۱/۲۹	۷
۱/۱۶	۸	۱/۲۹	۸
۱/۱۷	۹	۱/۲۷	۹
۱/۱۷	۱۰	۱/۲۸	۱۰
۱/۱۸	۲۰	۱/۳۰	۲۰
۱/۲۴	۳۰	۱/۳۰	۳۰
۱/۲۵	۴۰	۱/۳۲	۴۰

نمودار تغییرات نسبت FOS_{3D}/FOS_{2D} در مقابل تغییرات اندازه ابعاد مش در شکل ۵-۱۳ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، اثر سه‌بعدی در شیب تند، در محدوده مشخص شده اندازه ابعاد مش (۵ متر تا ۴۰ متر) از اثر سه‌بعدی در شیب ملایم بیشتر است.

یکی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در انتخاب اندازه ابعاد مناسب مش توان پردازشی کامپیوترهای در دسترس است. برای انجام این پژوهش از یک کامپیوتر با توان پردازشی مناسب استفاده شده است. با استفاده از این تجهیزات امکان اجرای تحلیل‌های سه‌بعدی در اندازه ابعاد مش کوچک نیز فراهم بود. با این حال، زمان اجرای تحلیل‌ها در ابعاد مش ریز بسیار زیاد بود و بیش از ۳۰ ساعت به طول انجامید. به دلیل عدم دسترسی به تجهیزات با توان پردازشی بالا در اکثر پروژه‌ها و زمان‌بر بودن اجرای تحلیل‌ها در ابعاد مش کوچک، باید بر اساس اهمیت پروژه و تجهیزات در دسترس اندازه مش مناسب انتخاب شود. با توجه مقیاس بزرگ مطالعه موردی در این پژوهش و زمان‌های اجرای به دست آمده، به دلیل

اینکه، مقادیر ضریب ایمنی در ابعاد مش کوچک‌تر از ۱۰ متر تغییر چندانی نکرده، ابعاد ۱۰ متر برای تحلیل‌ها مناسب است.



شکل ۵-۱۳: تغییرات اثر سه‌بعدی در مقابل تغییرات اندازه ابعاد مش

۵-۳-۲- اثر تغییر خواص ژئوتکنیکی

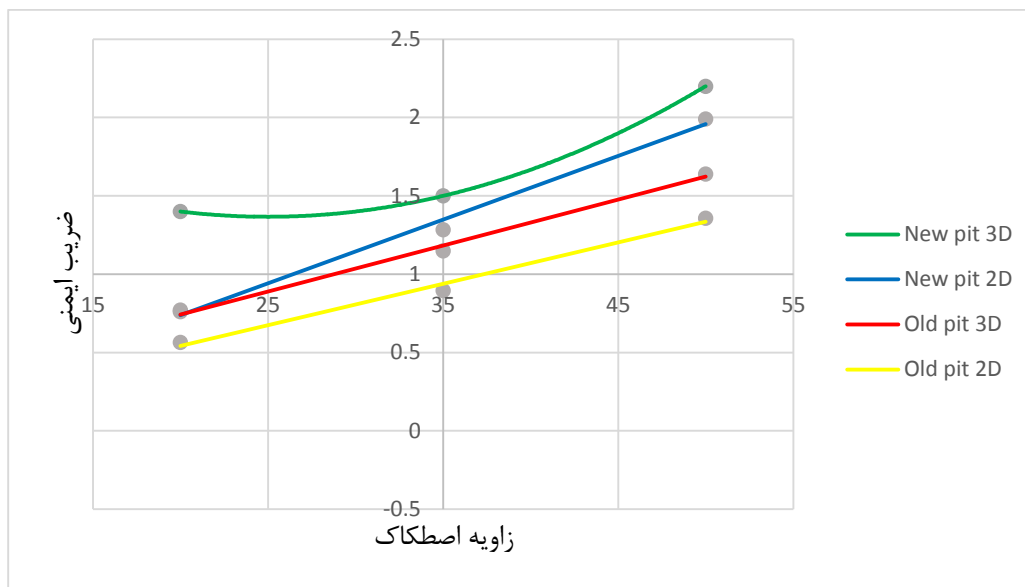
در مرحله آخر تحلیل‌های مربوط به محیط پیوسته، به منظور ارزیابی اثرات محیطی مرتبط با تغییر پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ بلوک ۱ در شیب تند و شیب ملایم، تحلیل حساسیت چسبندگی و زاویه اصطکاک بر روی تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی انجام شد. در هر یک از تحلیل‌ها مقدار زاویه اصطکاک و چسبندگی داخلی به میزان $\pm 30\%$ تغییر داده شد و ضرایب ایمنی به دست آمده ثبت شد. اندازه ابعاد مش در همه تحلیل‌ها ۱۰ متر است.

در جدول ۵-۷، تغییرات FOS_{3D} و FOS_{2D} بر اثر تغییرات زاویه اصطکاک آورده شده است. با توجه به نتایج به دست آمده، تغییرات FOS_{3D} و FOS_{2D} در هر دو شیب تند و شیب ملایم با تغییرات زاویه اصطکاک رابطه مستقیم دارد؛ به عبارت دیگر در همه تحلیل‌ها با افزایش زاویه اصطکاک ضریب ایمنی افزایش می‌یابد. میزان تغییرات در بازه مشخص شده برای تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی شیب تند به

ترتیب ۰/۷۹ و ۰/۸۸ است؛ این میزان برای تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی شیب ملایم به ترتیب ۱/۲۲ و ۰/۸ است. در شکل ۵-۱۴ نمودار تغییرات FOS_{2D} و FOS_{3D} در دو شیب تند و ملایم را با توجه به تغییرات زاویه اصطکاک نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، میزان تغییرات FOS_{2D} و FOS_{3D} در شیب تند و FOS_{3D} در شیب ملایم تقریباً نزدیک به هم هستند ولی تغییرات FOS_{2D} در شیب ملایم حدود ۱/۵ برابر بقیه موارد است. این موضوع حساسیت بسیار بیشتر FOS_{2D} شیب ملایم را به تغییرات زاویه اصطکاک نشان می‌دهد. شیب تغییرات ضریب ایمنی در تحلیل‌های سه‌بعدی شیب ملایم به صورت غیریکنواخت و برای بقیه موارد (تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی شیب تند و تحلیل دوبعدی شیب ملایم) تغییرات به صورت یکنواخت است.

جدول ۵-۷: تغییرات ضریب ایمنی در اثر تغییر زاویه اصطکاک

ضریب ایمنی شیب ملایم		ضریب ایمنی شیب تند		تغییرات زاویه اصطکاک
سه‌بعدی	دوبعدی	سه‌بعدی	دوبعدی	
۱/۴۰	۰/۷۷	۰/۷۶	۰/۵۶	-٪۳۰
۱/۴۲	۰/۹۳	۰/۸۸	۰/۶۵	-٪۲۰
۱/۴۶	۱/۱۰	۱/۰۱	۰/۷۷	-٪۱۰
۱/۵۰	۱/۲۸	۱/۱۵	۰/۹۰	٪۰
۱/۷۲	۱/۴۱	۱/۳۰	۱/۰۴	٪۱۰
۱/۹۶	۱/۶۳	۱/۴۷	۱/۱۹	٪۲۰
۲/۲	۱/۹۹	۱/۶۴	۱/۳۶	٪۳۰



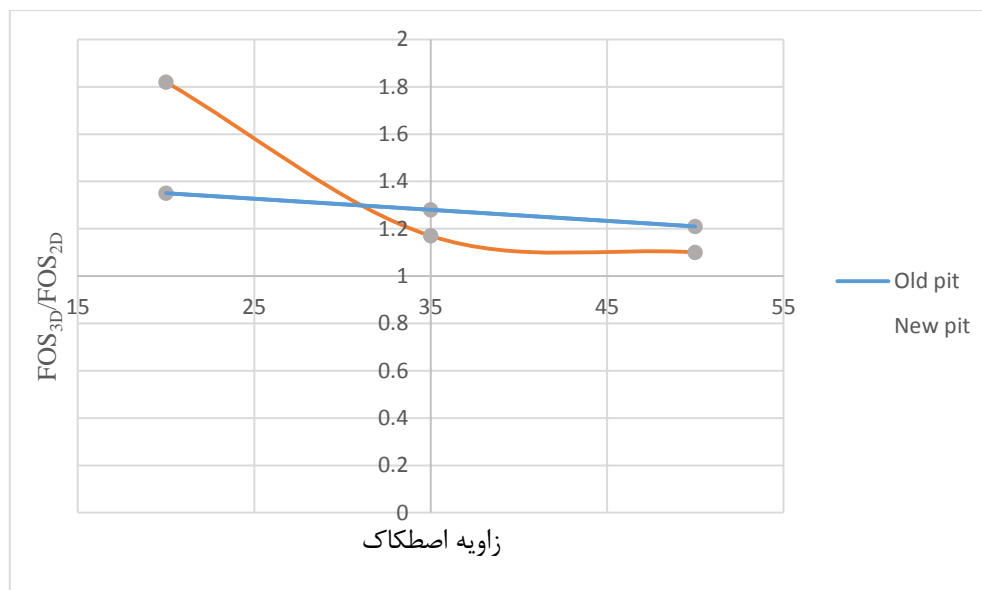
شکل ۵-۱۴: تغییرات ضریب ایمنی در مقابل تغییرات زاویه اصطکاک

تغییرات اثر سه‌بعدی بر اثر تغییر زاویه اصطکاک در جدول ۵-۸ آورده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش زاویه اصطکاک، نسبت FOS_{3D}/FOS_{2D} در هر دو شیب تند و ملایم کاهش می‌یابد. میزان تغییرات در بازه $\pm 30\%$ برای شیب ملایم بسیار قابل توجه‌تر از شیب تند است. با توجه به این نتایج، در زوایای اصطکاک پایین و در شیب ملایم، اختلاف نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی بسیار زیاد است و FOS_{3D} حدود دو برابر FOS_{2D} است. در این حالت خطای تحلیل‌های دوبعدی بسیار بالا خواهد بود و تحلیل‌های سه‌بعدی نتیجه واقعی‌تری را ارائه می‌دهد. در مقابل، در زوایای اصطکاک بالا و در شیب ملایم، اختلاف نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی بسیار کم است و FOS_{3D} تقریباً برابر با FOS_{2D} است. در شکل ۵-۱۵، تغییرات اثر سه‌بعدی در مقابل تغییرات زاویه اصطکاک نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، روند تغییرات (کاهش) اثر سه‌بعدی بر اثر تغییر زاویه اصطکاک در شیب تند، به صورت ملایم و یکنواخت است. در طرف مقابل، این روند در شیب ملایم به صورت غیریکنواخت بوده و تغییرات اثر سه‌بعدی در زاویه اصطکاک‌های پایین، بسیار قابل توجه است. با افزایش زاویه اصطکاک، شیب تغییرات اثر سه‌بعدی در شیب ملایم کاهش می‌یابد؛ به طوری که در زوایای اصطکاک‌های بالا نسبت به زاویه اصطکاک‌های پایین، این تغییرات بسیار کم است. این موضوع،

حساسیت بالای تغییرات اثر سه‌بعدی به «زاویه اصطکاک‌های پایین شیب ملایم» را نشان می‌دهد.

جدول ۵-۸: تغییرات اثر سه‌بعدی در اثر تغییر زاویه اصطکاک

تغییرات زاویه اصطکاک	FOS _{3D} /FOS _{2D} در شیب تند	FOS _{3D} /FOS _{2D} در شیب ملایم
-%۳۰	۱/۳۶	۱/۸۲
-%۲۰	۱/۳۵	۱/۵۳
-%۱۰	۱/۳۱	۱/۳۳
%۰	۱/۲۸	۱/۱۷
%۱۰	۱/۲۵	۱/۲۲
%۲۰	۱/۲۶	۱/۲۰
%۳۰	۱/۲۱	۱/۱



شکل ۵-۱۵: تغییرات اثر سه‌بعدی در مقابل تغییرات زاویه اصطکاک

در جدول ۵-۹، تغییرات FOS_{3D} و FOS_{2D} بر اثر تغییرات چسبندگی آورده شده است. همانند نتایج حاصل از تغییرات زاویه اصطکاک، در همه تحلیل‌ها با افزایش چسبندگی، FOS_{3D} و FOS_{2D} در هر دو شیب تند و شیب ملایم افزایش می‌یابد. میزان تغییرات در بازه مشخص شده برای تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی شیب تند به ترتیب ۰/۱۴ و ۰/۲۴ است؛ این میزان برای تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی

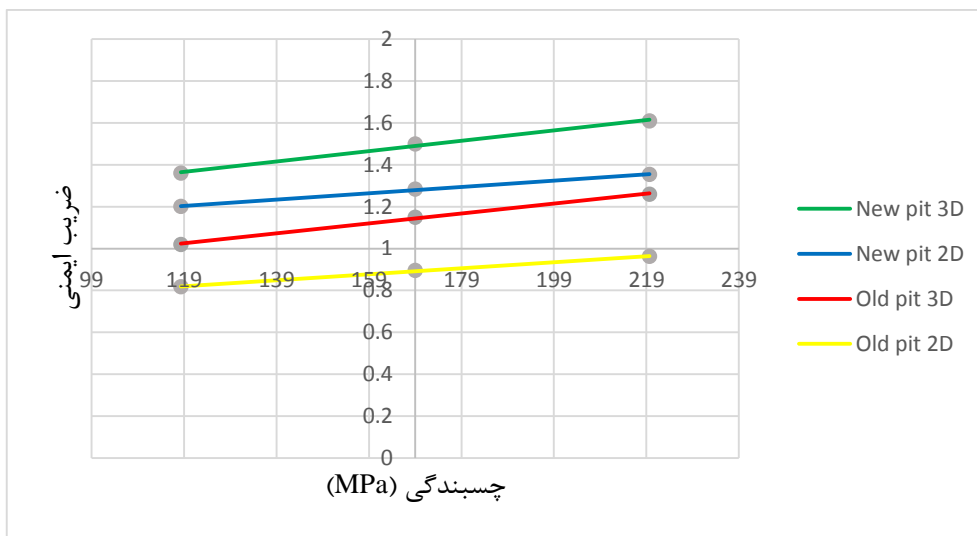
شیب تند به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۲۴ است. میزان این تغییرات نسبت به نتایج حاصل از تغییر در زاویه اصطکاک بسیار کمتر است. شکل ۵-۱۶ نمودار تغییرات FOS_{2D} و FOS_{3D} در دو شیب تند و ملایم را با توجه به تغییرات چسبندگی نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، روند تغییرات FOS_{2D} دو شیب‌های تند و ملایم تقریباً مشابه یکدیگر است. همچنین روند تغییرات FOS_{3D} شیب‌های تند و ملایم نیز مشابه یکدیگر است.

جدول ۵-۹: تغییرات ضریب ایمنی در اثر تغییر چسبندگی

ضریب ایمنی شیب ملایم		ضریب ایمنی شیب تند		تغییرات چسبندگی
سه‌بعدی	دو‌بعدی	سه‌بعدی	دو‌بعدی	
۱/۳۶	۱/۲۰	۱/۰۲	۰/۸۲	-٪۳۰
۱/۴۱	۱/۲۳	۱/۰۶	۰/۸۵	-٪۲۰
۱/۴۶	۱/۲۶	۱/۱۱	۰/۸۸	-٪۱۰
۱/۵	۱/۲۸	۱/۱۵	۰/۹۰	٪۰
۱/۵۴	۱/۳۱	۱/۱۹	۰/۹۲	٪۱۰
۱/۵۶	۱/۳۳	۱/۲۲	۰/۹۵	٪۲۰
۱/۶۰	۱/۳۵	۱/۲۶	۰/۹۶	٪۳۰

تغییرات اثر سه‌بعدی بر اثر تغییر چسبندگی در جدول ۵-۱۰ آورده شده است. همان گونه که مشاهده می‌شود، برخلاف نتایج مربوط به زاویه اصطکاک، با افزایش چسبندگی، اثر سه‌بعدی در هر دو شیب تند و ملایم افزایش می‌یابد. میزان تغییرات در بازه $\pm ۳۰\%$ برای شیب تند و ملایم تفاوت قابل توجهی ندارد (۰/۰۷ برای شیب تند و ۰/۰۶ برای شیب ملایم).

در شکل ۵-۱۷ تغییرات اثر سه‌بعدی نسبت به تغییرات چسبندگی نشان داده شده است. برای هر دو شیب تند و ملایم، روند تغییرات ملایم اثر سه‌بعدی بر اثر تغییر چسبندگی به خوبی مشاهده می‌شود. این روند، بیانگر حساسیت کم تغییرات اثر سه‌بعدی به تغییرات چسبندگی برای هر دو شیب است.

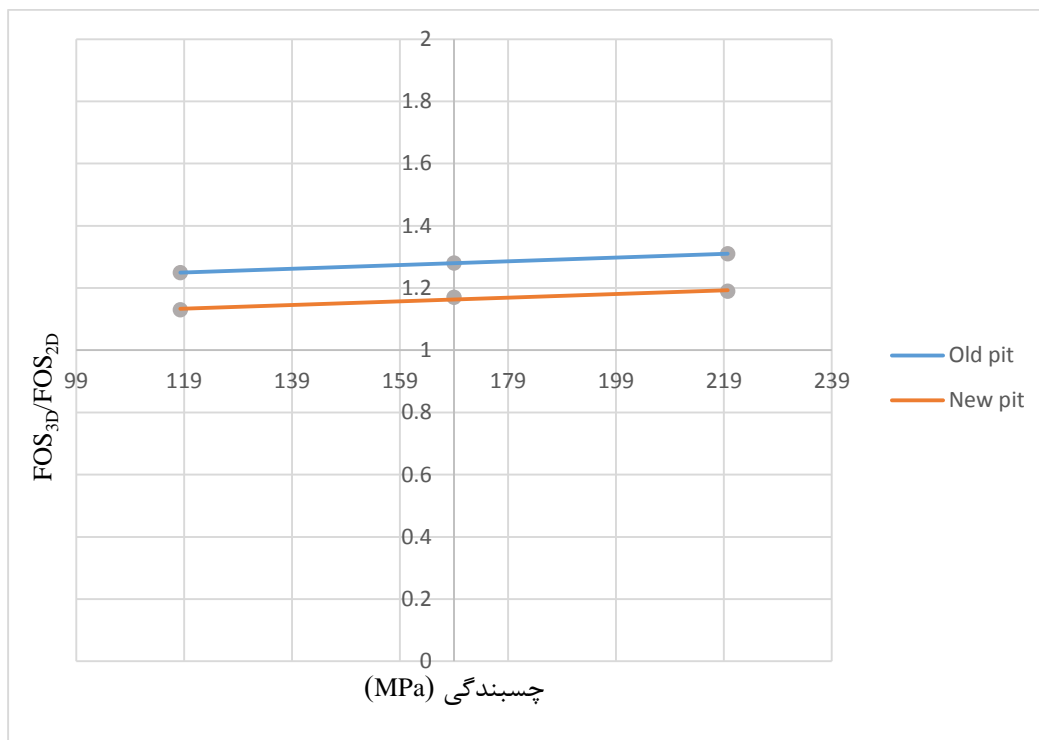


شکل ۵-۱۶: تغییرات ضریب ایمنی در مقابل تغییرات چسبندگی

در شیب تند، میزان تغییرات اثر سه‌بعدی ناشی از تغییر زاویه اصطکاک (۰/۱۵) تفاوت زیادی با میزان تغییرات اثر سه‌بعدی ناشی از تغییر چسبندگی (۰/۰۷) ندارد. این موضوع، نشان‌دهنده حساسیت کم شیب تند به این اثر محیطی است. در مقابل در شیب ملایم، میزان تغییرات اثر سه‌بعدی ناشی از تغییر زاویه اصطکاک (۰/۷۲) با میزان تغییرات اثر سه‌بعدی ناشی از تغییر چسبندگی (۰/۰۶) تفاوت زیادی دارد که بیانگر حساسیت زیاد شیب ملایم به اثر محیطی تغییر زاویه اصطکاک و حساسیت کم شیب تند به اثر محیطی تغییر چسبندگی است.

جدول ۵-۱۰: تغییرات اثر سه‌بعدی در اثر تغییر چسبندگی

تغییرات چسبندگی	FOS _{3D} /FOS _{2D} در شیب تند	FOS _{3D} /FOS _{2D} در شیب ملایم
-%۳۰	۱/۲۴	۱/۱۳
-%۲۰	۱/۲۵	۱/۱۵
-%۱۰	۱/۲۶	۱/۱۶
٪۰	۱/۲۸	۱/۱۷
٪۱۰	۱/۲۹	۱/۱۷
٪۲۰	۱/۲۸	۱/۱۷
٪۳۰	۱/۳۱	۱/۱۹



شکل ۵-۱۷: تغییرات اثر سه بعدی در مقابل تغییرات چسبندگی

اثر سه بعدی در شیب تند در همه حالت‌ها (مرتبط با تغییر چسبندگی و زاویه اصطکاک) به غیر از حالت زاویه اصطکاک‌های پایین از اثر سه بعدی در شیب ملایم بیشتر است. در زاویای اصطکاک پایین، اثر سه بعدی در شیب ملایم بسیار بیشتر از اثر سه بعدی در شیب تند می‌شود. این نتایج اهمیت بالای زاویه اصطکاک در تفاوت بین نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه بعدی، مخصوصاً در شیب‌های ملایم را نشان می‌دهد.

۵-۴- تحلیل‌های ناپیوسته

برای اجرای تحلیل‌ها در محیط ناپیوسته دوبعدی از نرم‌افزار UDEC و برای تحلیل‌ها در محیط ناپیوسته سه بعدی از نسخه سه بعدی این نرم‌افزار یعنی 3DEC استفاده شده است. نرم‌افزارهای UDEC و 3DEC از روش المان مجزا برای تحلیل تحلیل مسائل ژئوتکنیکی استفاده می‌کنند و به دلیل توانایی بالا در مدل کردن ناپیوستگی‌ها، یکی از مناسب‌ترین برنامه‌ها جهت تحلیل پایداری شیب توده سنگ درزه‌دار هستند. این نرم‌افزارها همانند نرم‌افزارهای FLAC2D و FLAC3D، روش کاهش مقاومت را

برای تخمین ضریب ایمنی به کار می‌گیرند. هدف اصلی استفاده از تحلیل‌های ناپیوسته، ارزیابی اثر سه‌بعدی ناشی از میزان درزه‌داری به عنوان یک اثر محیطی است.

۵-۴-۱- اثر میزان درزه‌داری

همان گونه که در فصل قبل اشاره شد، تفاوت بین سنگ بکر و توده‌سنگ در وجود ناپیوستگی‌های محیط سنگی است. اغلب محیط‌های سنگی دارای ناپیوستگی هستند اما امکان مدل کردن همه ناپیوستگی‌ها در درون یک مدل غیرممکن است. از این رو، در این پژوهش به منظور اجرای تحلیل‌های ناپیوسته، ارزیابی اثر سه‌بعدی ناشی از میزان درزه‌داری و ارزیابی اثر سه‌بعدی ناشی از اثرات ابعادی (هندسه واقعی و تندی شیب) در محیط ناپیوسته، تنها درصدی از دسته درزه‌های اصلی مشخص شده در بلوک تکتونیکی ۱ معدن سنگ آهن چغارت به مدل‌های ساخته‌شده دوبعدی و سه‌بعدی ناپیوسته وارد شدند.

در ابتدا و با استفاده از ویژگی‌های آماری ارائه شده در فصل ۴ (جدول ۴-۱) و خصوصیات هندسی ارائه شده در جدول ۵-۱۱، تعدادی تحلیل ناپیوسته دوبعدی به ترتیب با میزان درزه‌داری ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ در اندازه ابعاد مش ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر در دو شیب تند (پیت قدیم) و ملایم (پیت جدید) انجام شد. خصوصیات ژئومکانیکی دسته درزه‌های مذکور در جدول ۵-۱۲ آمده است.

شکل ۵-۱۸ تا شکل ۵-۲۰، مدل‌های ساخته‌شده دوبعدی درزه‌دار (۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ درزه‌داری) شیب تند در اندازه ابعاد مش ۱۰ متر را نشان می‌دهند. شکل ۵-۲۱ تا شکل ۵-۲۳ نیز، مدل‌های دوبعدی درزه‌دار شیب ملایم در اندازه ابعاد مش ۱۰ متر را نشان می‌دهند.

جدول ۵-۱۱: خصوصیات هندسی و آماری دسته درزه‌های اصلی بلوک تکتونیکی ۱

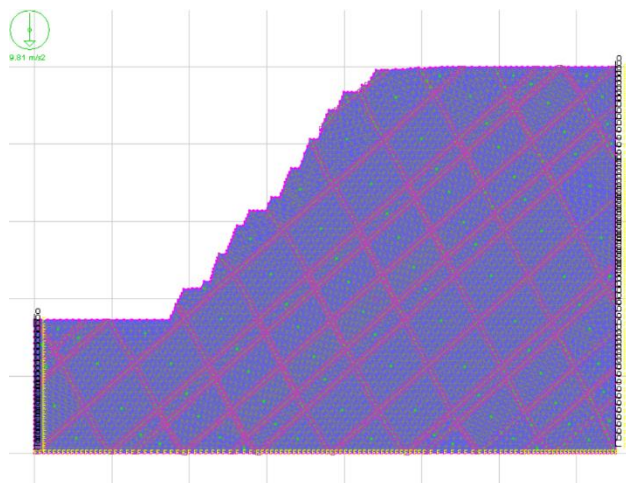
ثابت فیشر	درزه‌داری حجمی P_{32} (m^3)	درزه‌داری خطی P_{10} (m^1)	فاصله‌داری (m)	امتداد شیب	شیب (درجه)	
۲۴/۵۱	۰/۳۹۵	۰/۱۵۵	۶/۴۶	۲۹۷	۵۱	دسته درزه ۱
۵۰/۱	۰/۱۷۶	۰/۱۱۷	۸/۵۲	۲۰۸	۶۷	دسته درزه ۲
۴۰/۶۸	۰/۱۳۱	۰/۱۱۸	۸/۴۴	۳۱	۴۵	دسته درزه ۳

جدول ۵-۱۲: خصوصیات ژئومکانیکی دسته درزه‌های اصلی بلوک تکتونیکی ۱

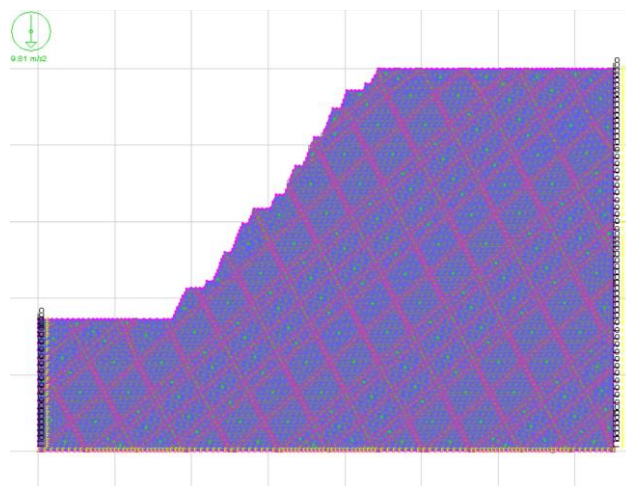
سختی نرمال ($GPam^{-1}$)	سختی برشی ($GPam^{-1}$)	زاویه اصطکاک (درجه)	چسبندگی (MPa)	
۱۴۵/۳	۵۸	۴۰	۰/۰۵	دسته درزه ۱
۱۴۵/۳	۵۸	۴۰	۰/۰۵	دسته درزه ۲
۱۴۵/۳	۵۸	۴۰	۰/۰۵	دسته درزه ۳

نتایج ضرایب ایمنی به دست آمده از تحلیل‌های ناپیوسته دوبعدی به همراه نتایج تحلیل‌های پیوسته دوبعدی در محدوده اندازه ابعاد مش مشابه در جدول ۵-۱۳ نشان داده شده است.

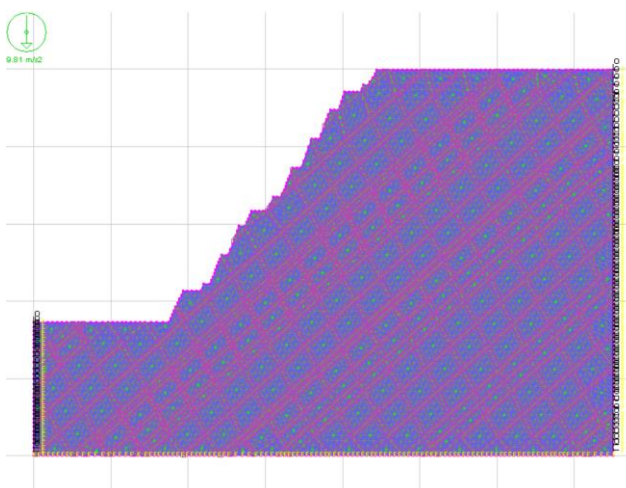
ضرایب ایمنی در تحلیل‌های ناپیوسته در همه موارد (هر دو شیب تند و ملایم در همه درزه‌داری‌ها و همه ابعاد مش) از ضرایب ایمنی در تحلیل‌های پیوسته کمتر است. با افزایش میزان درزه‌داری، اختلاف ضرایب ایمنی تحلیل‌های ناپیوسته در همه موارد بسیار ناچیز است. اختلاف نتایج بین تحلیل‌های پیوسته و ناپیوسته در شیب تند بیشتر از شیب ملایم است و این نشان می‌دهد که حساسیت شیب‌های تند به درزه‌داری بیشتر از شیب‌های ملایم است؛ دلیل این امر می‌تواند ماهیت ریسک پذیرتر شیب‌های تند باشد.



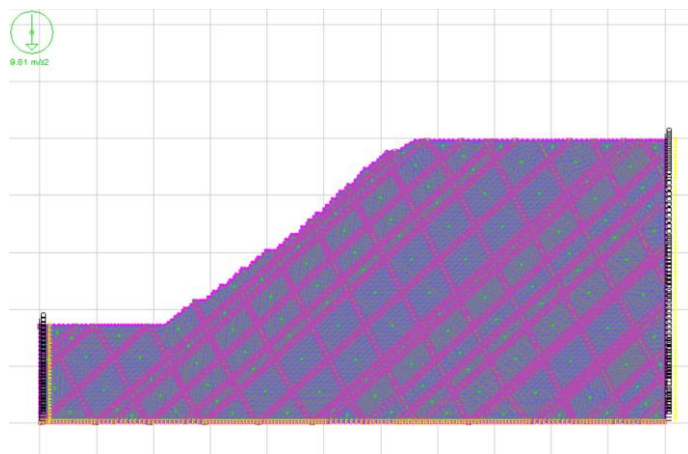
شکل ۵-۱۸: مقطع AB پیت قدیم با میزان درزه‌داری ۱۰٪



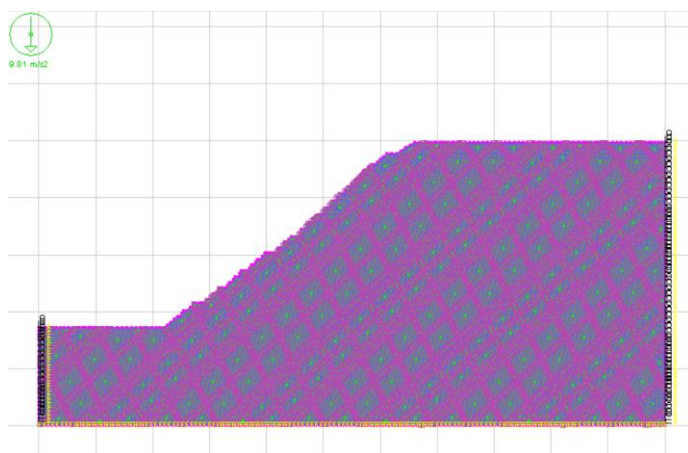
شکل ۵-۱۹: مقطع AB پیت قدیم با میزان درزه‌داری ۱۵٪



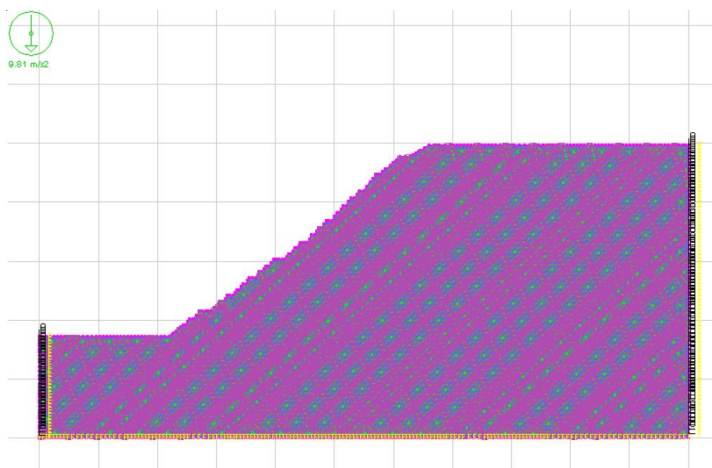
شکل ۵-۲۰: مقطع AB پیت قدیم با میزان درزه‌داری ۲۰٪



شکل ۵-۲۱: مقطع AB پیت جدید با میزان درزه‌داری ۱۰٪



شکل ۵-۲۲: مقطع AB پیت جدید با میزان درزه‌داری ۱۵٪



شکل ۵-۲۳: مقطع AB پیت جدید با میزان درزه‌داری ۲۰٪

جدول ۵-۱۳: ضرایب ایمنی حاصل از تحلیل‌های دوبعدی تحلیل‌های ناپیوسته با توجه به میزان درزه‌داری

درزه‌داری ابعاد مش	٪۰	٪۱۰	٪۱۵	٪۲۰	
۲۰	۰/۹۴	۰/۸۵	۰/۸۶	۰/۸۴	پیت قدیم
۳۰	۱/۰۱	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۸۸	
۴۰	۱/۱	۰/۹۲	۰/۹۱	۰/۹۳	
۱۰	۱/۲۸	۱/۲۶	۱/۲۶	۱/۲۲	
۲۰	۱/۳۴	۱/۳۰	۱/۲۹	۱/۲۹	پیت جدید
۳۰	۱/۳۴	۱/۳۰	۱/۲۹	۱/۲۹	
۴۰	۱/۳۶	۱/۳۳	۱/۳۰	۱/۳۱	

نمونه‌هایی از سطوح شکست احتمالی در تحلیل‌های ناپیوسته (در اندازه ابعاد مش ۱۰ متر) در شیب تند در شکل ۵-۲۴ تا شکل ۵-۲۶ نشان داده شده است. شکل ۵-۲۷ تا شکل ۵-۲۹ نیز، نمونه‌هایی از سطوح شکست احتمالی در تحلیل‌های ناپیوسته (در اندازه ابعاد مش ۱۰ متر) در شیب ملایم را نشان می‌دهند.

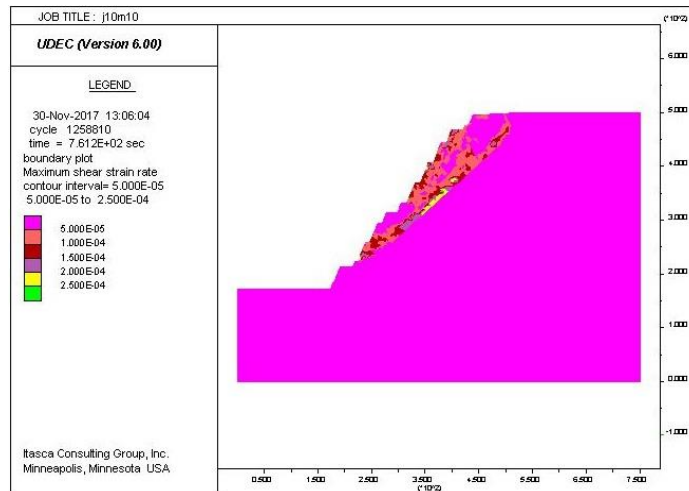
بررسی سطوح شکست احتمالی در تحلیل‌ها نشان می‌دهد که با کوچک‌تر شدن اندازه مش، دقت در تشخیص سطوح شکست احتمالی افزایش می‌یابد اما با افزایش میزان درزه‌داری این دقت کاهش یافته و سطوح شکست به صورت پراکنده و نامشخص دیده می‌شوند. احتمالاً دلیل این امر می‌تواند بیشتر تحلیل‌ها به درزه‌های مدل شده در حالت درزه‌داری بالا است. با اینکه در شیب تند اختلاف ضرایب ایمنی تحلیل‌های پیوسته و ناپیوسته نسبت به شیب ملایم بیشتر است ولی محل و محدوده سطوح شکست احتمالی در تحلیل ناپیوسته شیب تند تقریباً مشابه محل و محدوده سطوح شکست احتمالی تحلیل پیوسته متناظر است؛ با این تفاوت که در تحلیل پیوسته حالت شکست قاشقی دارد ولی در تحلیل ناپیوسته شکست روی سطح درزه رخ می‌دهد.

در طرف مقابل، با اینکه اختلاف ضرایب ایمنی بین تحلیل‌های پیوسته و ناپیوسته در شیب ملایم نسبت به شیب تند غیرقابل ملاحظه است، محدوده سطح شکست در تحلیل‌های ناپیوسته شیب ملایم کوچک‌تر از تحلیل‌های پیوسته متناظر است.

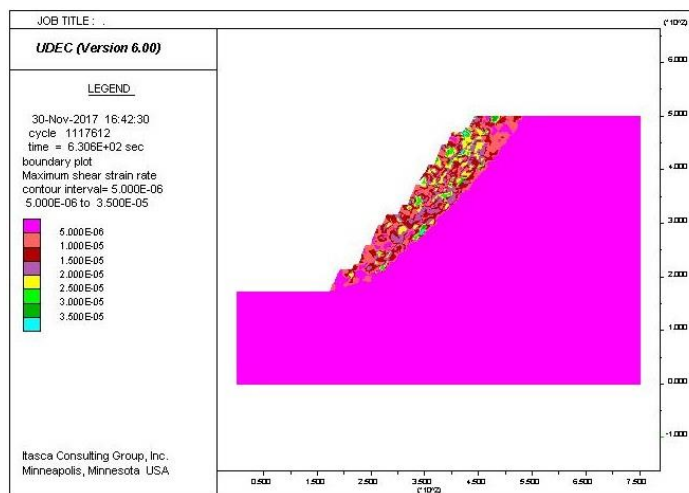
شکل ۵-۳۰، نمودار تغییرات نتایج FOS_{2D} تحلیل‌های ناپیوسته در شیب تند بر اثر تغییر اندازه ابعاد مش و نتایج متناظر آن‌ها در تحلیل‌های پیوسته و شکل ۵-۳۱، تحلیل‌های ناپیوسته در شیب ملایم بر اثر تغییر اندازه ابعاد مش و نتایج متناظر آن‌ها در تحلیل‌های پیوسته را نشان می‌دهند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با افزایش میزان درزه‌داری، نرخ تغییرات ضریب ایمنی در هر دو شیب تند و ملایم به نرخ تغییرات در تحلیل‌های پیوسته تمایل پیدا می‌کند. این مسئله می‌تواند به دلیل یکنواخت‌تر شدن محیط در اثر افزایش میزان درزه‌داری باشد؛ این نتیجه‌گیری، فرض محیط پیوسته در شرایط درزه‌داری بالا را تصدیق می‌کند. اگرچه، در اینجا این فرضیه از نقطه نظر رفتار محیط ناپیوسته در اثر تغییر اندازه ابعاد مش بررسی شده است.

در مرحله بعد، تعدادی تحلیل سه‌بعدی ناپیوسته صورت گرفت. یکی از قابلیت‌های ویژه نرم‌افزار 3DEC، امکان ساخت شبکه شکستگی‌های مجزا (DFN^۱) برای وارد کردن دسته درزه به درون مدل ساخته شده است. شبکه‌های شکستگی مجزا با استفاده از داده‌های آماری دسته درزه‌های بلوک تکتونیکی ۱ ساخته شدند و مدل‌های ناپیوسته با توجه به محدودیت‌ها در میزان وارد کردن درزه به مدل و همچنین توان پردازشی تجهیزات در دسترس، با وارد کردن ۱۰٪ و ۱۵٪ کل درزه‌ها به محیط ایجاد شدند. اندازه مش در توده‌سنگ نیز به ترتیب ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر بود.

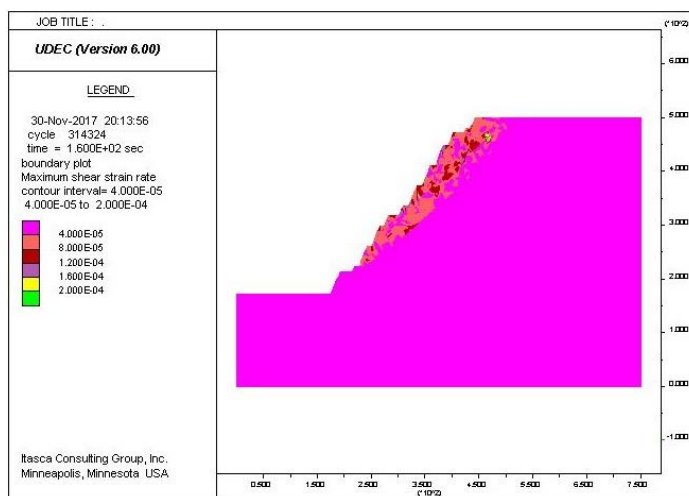
^۱ Discrete Fracture Network



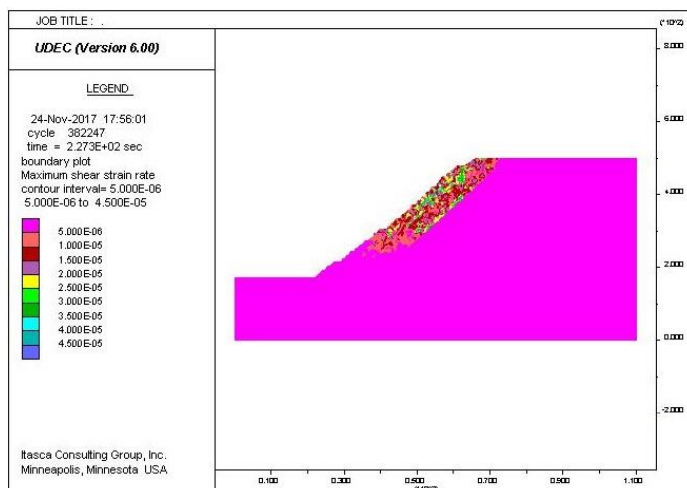
شکل ۵-۲۴: سطح شکست احتمالی مقطع AB پیت جدید در درزه‌داری ۱۰٪ و اندازه ابعاد مش ۱۰ متر



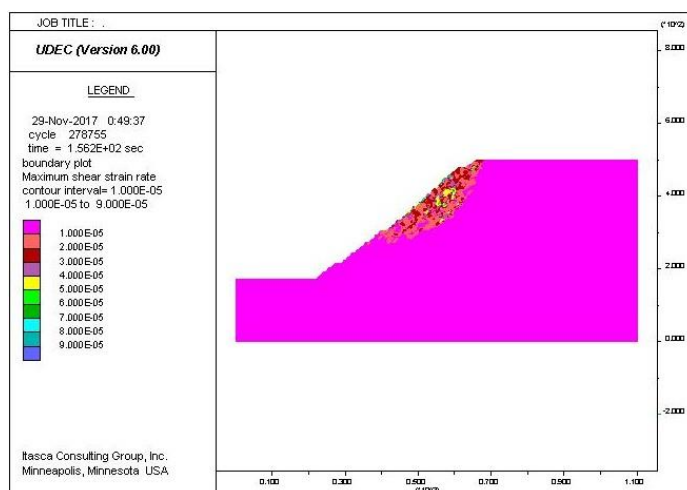
شکل ۵-۲۵: سطح شکست احتمالی مقطع AB پیت جدید در درزه‌داری ۱۵٪ و اندازه ابعاد مش ۱۰ متر



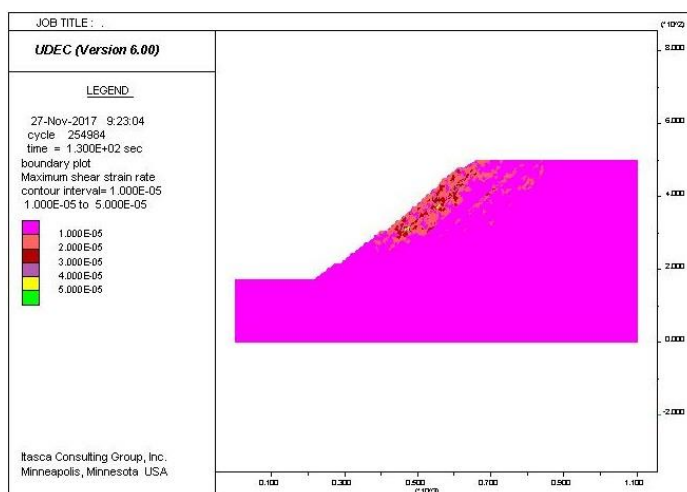
شکل ۵-۲۶: سطح شکست احتمالی مقطع AB پیت جدید در درزه‌داری ۲۰٪ و اندازه ابعاد مش ۱۰ متر



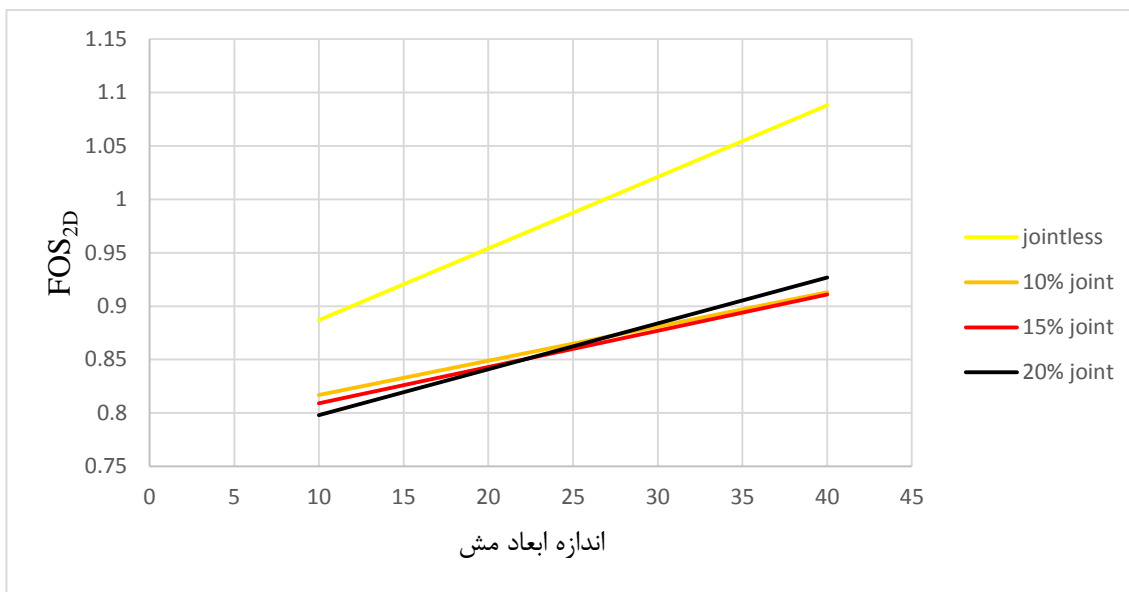
شکل ۵-۲۷: سطح شکست احتمالی مقطع AB پیت قدیم در درزه‌داری ۱۰٪ و اندازه ابعاد مش ۱۰ متر



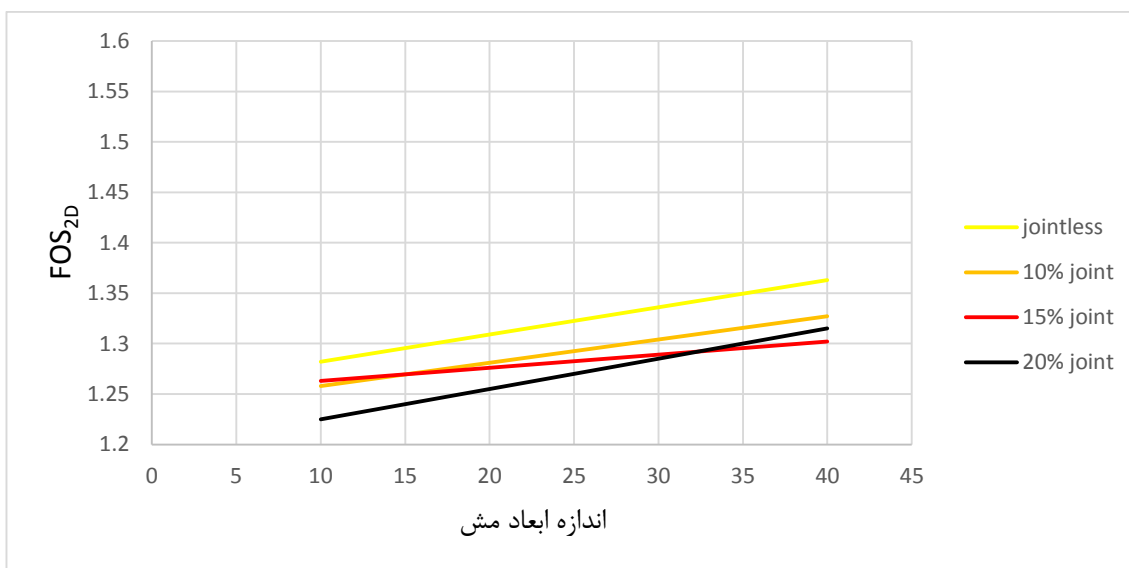
شکل ۵-۲۸: سطح شکست احتمالی مقطع AB پیت قدیم در درزه‌داری ۱۵٪ و اندازه ابعاد مش ۱۰ متر



شکل ۵-۲۹: سطح شکست احتمالی مقطع AB پیت قدیم در درزه‌داری ۲۰٪ و اندازه ابعاد مش ۱۰ متر



شکل ۵-۳۰: تغییرات ضریب ایمنی دوبعدی شیب تند در درزه‌داری های مختلف نسبت به تغییر اندازه ابعاد مش



شکل ۵-۳۱: تغییرات ضریب ایمنی دوبعدی شیب ملایم در درزه‌داری های مختلف نسبت به تغییر اندازه ابعاد مش

نتایج به دست آمده از تحلیل‌های ناپیوسته سه‌بعدی به همراه نتایج تحلیل‌های پیوسته سه‌بعدی در محدوده مشابه در جدول ۵-۱۴ نشان داده شده است. در شیب تند، ضرایب ایمنی در تحلیل‌های ناپیوسته در همه موارد از ضرایب ایمنی در تحلیل‌های پیوسته کمتر است. با افزایش میزان درزه‌داری، اختلاف ضرایب ایمنی تحلیل‌های ناپیوسته در همه موارد بسیار ناچیز است. اختلاف نتایج بین تحلیل‌های پیوسته و ناپیوسته در شیب تند بیشتر از شیب ملایم است و این نشان می‌دهد که

حساسیت شیب‌های تند به درزه‌داری بیشتر از شیب‌های ملایم است؛ دلیل این امر می‌تواند ماهیت ریسک پذیرتر شیب‌های تند باشد.

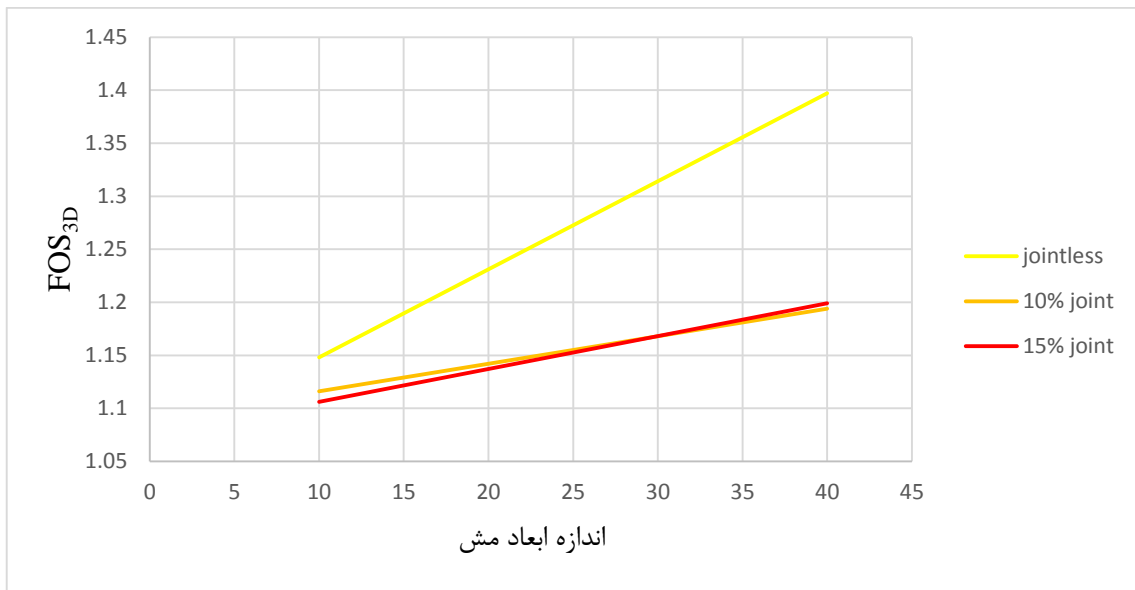
جدول ۵-۱۴: ضرایب ایمنی حاصل از تحلیل‌های سه‌بعدی تحلیل‌های ناپیوسته با توجه به میزان درزه‌داری

٪۱۵	٪۱۰	٪۰	درزه‌داری	
			ابعاد مش	
۱/۱۱	۱/۱۲	۱/۱۵	۱۰	پیت قدیم
۱/۱۳	۱/۱۳	۱/۲۳	۲۰	
۱/۱۷	۱/۱۸	۱/۳۱	۳۰	
۱/۲۰	۱/۱۹	۱/۴۰	۴۰	
۱/۴۸	۱/۴۹	۱/۵۰	۱۰	پیت جدید
۱/۵۰	۱/۵۷	۱/۵۵	۲۰	
۱/۵۱	۱/۶۷	۱/۶۶	۳۰	
۱/۶۰	۱/۷۰	۱/۷۱	۴۰	

با افزایش اندازه ابعاد مش، ضریب ایمنی در هیچ یک از مقادیر درزه‌داری (۱۰٪ و ۱۵٪) تغییر قابل توجهی نمی‌کند. در بازه ابعاد مش در نظر گرفته شده (۱۰ متر تا ۴۰ متر)، ضریب ایمنی تحلیل‌های ناپیوسته شیب تند تنها حدود ۶٪ تغییر می‌کند، در صورتی که مقدار این تغییر در تحلیل‌های پیوسته حدود ۲۲٪ است. این نتایج حساسیت کم شیب تند در تحلیل‌های ناپیوسته به تغییر اندازه ابعاد مش به دلیل محدود شدن فضای مش در اثر حضور درزه‌ها را نشان می‌دهد.

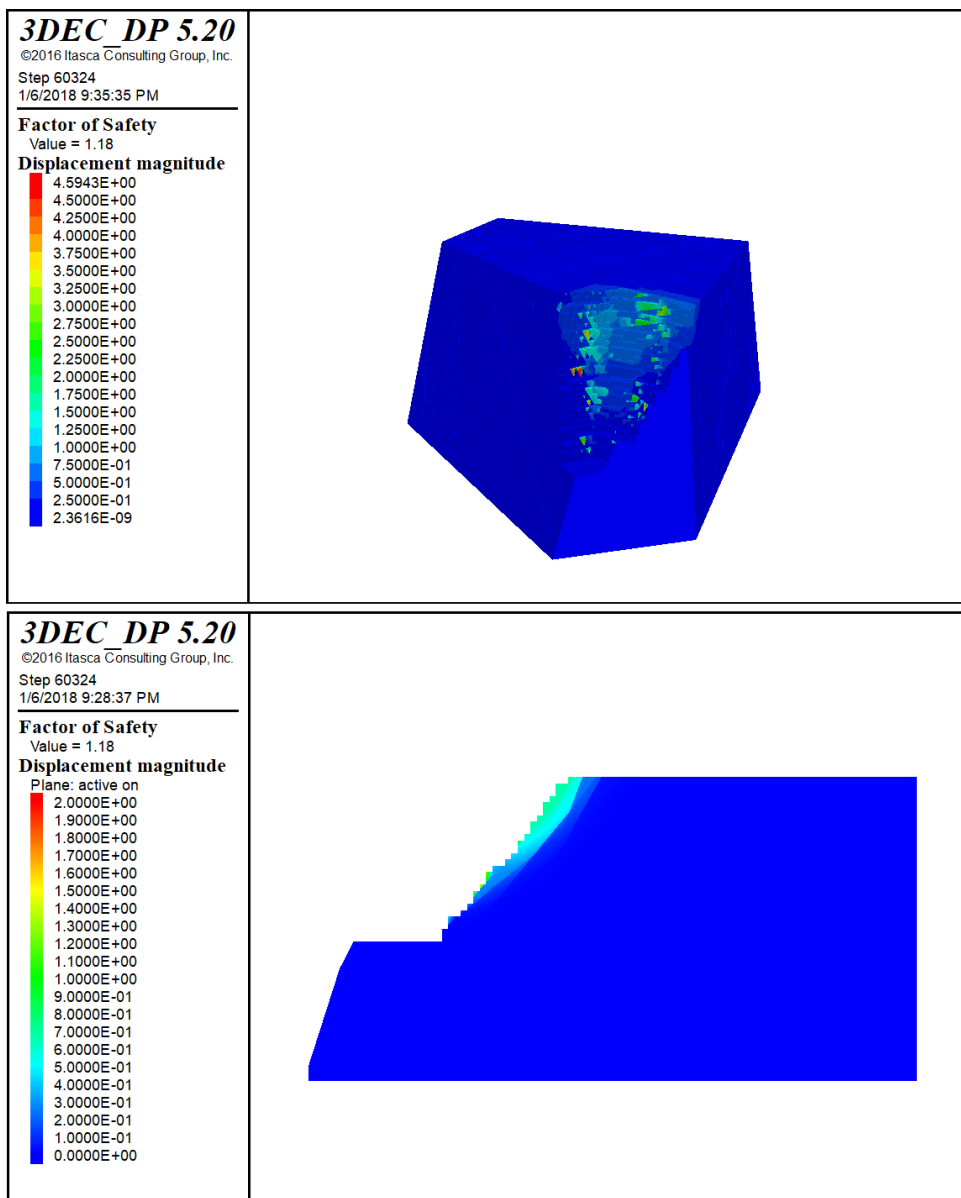
از طرفی با افزایش میزان درزه‌داری از ۰٪ تا ۱۰٪، تغییرات ضریب ایمنی از ۳ تا ۸ درصد برای اندازه‌های مش ریز (۱۰ متر و ۲۰ متر) و ۱۵ تا ۲۲ درصد برای اندازه‌های مش درشت (۳۰ متر و ۴۰ متر) است. با افزایش میزان درزه‌داری از ۱۰٪ تا ۱۵٪، تغییرات ضریب ایمنی در همه موارد به زیر ۱ درصد می‌رسد. این نتایج نشان می‌دهند که افزایش میزان درزه‌داری تأثیری بر میزان ضریب ایمنی به دست

آمده ندارد. برای درک بهتر روند تغییرات، نتایج به صورت نمودار در شکل ۵-۳۲ نشان داده شده است.



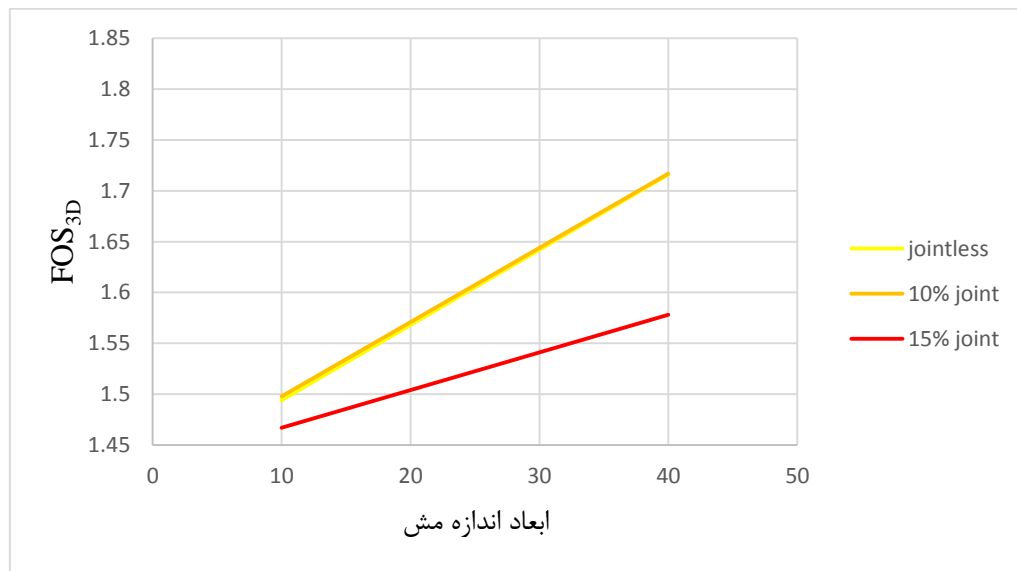
شکل ۵-۳۲: تغییرات ضریب ایمنی سه‌بعدی شیب تند در درزه‌داری‌های مختلف نسبت به تغییر اندازه ابعاد مش

شکل ۵-۳۳: سطح شکست احتمالی تحلیل‌های سه‌بعدی ناپیوسته شیب تند و همچنین مقطع دوبعدی متناظر با تحلیل‌های دوبعدی ناپیوسته مقطع AB شیب تند را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، سطح شکست احتمالی در مقطع دوبعدی، در مقایسه با تحلیل‌های ناپیوسته دوبعدی و همچنین مقطع مشابه در تحلیل‌های سه‌بعدی پیوسته، سازوکار شکست کنترل شده توسط درزه‌ها، به خوبی نشان داده شده است. در پلات سه‌بعدی بلوک تکتونیکی ۱ نیز محدوده سطح شکست احتمالی به همراه ریزش‌های بلوکی موضعی نشان داده شده است. به دلیل تصادفی بودن فرآیند وارد کردن درزه‌ها، در نزدیکی سطح پله‌های پیت، تعدادی بلوک تشکیل شده است؛ بر اساس ماهیت المان مجزای نرم‌افزار 3DEC در جهت تحلیل همه بلوک‌های ایجادشده در مدل، بلوک‌های تشکیل‌شده نزدیک سطح، پس از اجرای تحلیل، به صورت بلوک‌های ریزشی نشان داده می‌شوند. با نادیده گرفتن این بلوک‌ها، ناحیه مستعد لغزش سراسری، در قسمت بالایی و سمت راست پیت به خوبی قابل مشاهده است.



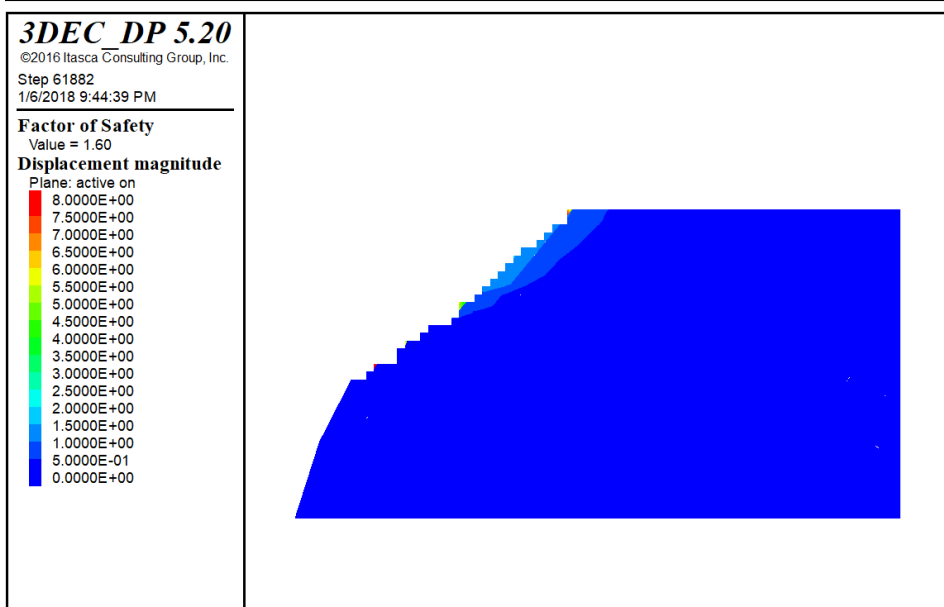
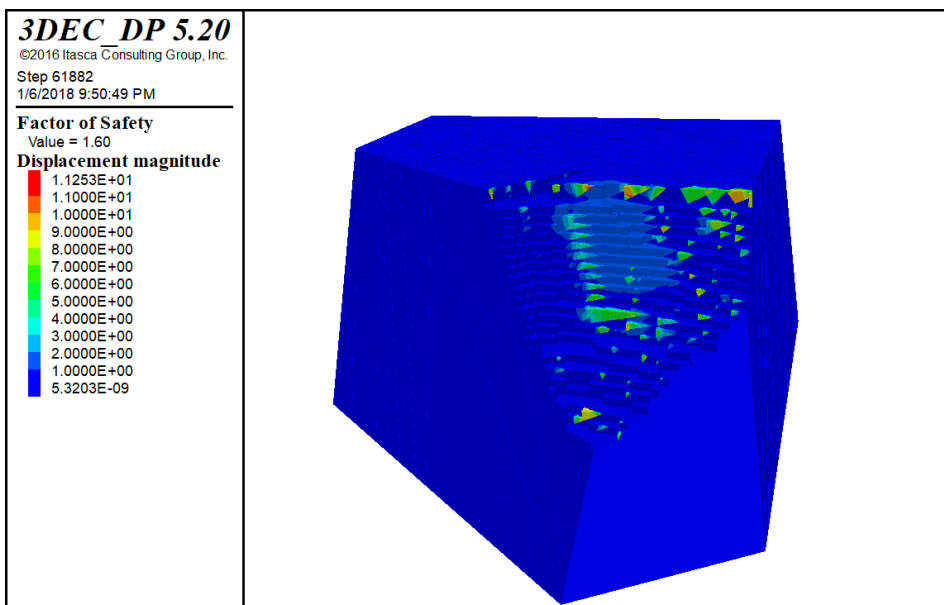
شکل ۵-۳۳: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در بلوک تکتونیکی ۱ پیت قدیم در تحلیل ناپیوسته در شیب ملایم، مقدار و روند تغییرات ضرایب ایمنی تحلیل‌های ناپیوسته در بازه ابعاد مش در نظر گرفته شده (۱۰ متر تا ۴۰ متر) بسیار مشابه نتایج تحلیل‌های سه‌بعدی پیوسته است. علاوه بر این، با افزایش میزان درزه‌داری، تغییرات ضرایب ایمنی نسبت به نتایج تحلیل‌های پیوسته از روند مشخصی پیروی نمی‌کند و به صورت غیریکنواخت است اما در کل تغییرات ضرایب ایمنی قابل توجه نیست. با افزایش میزان درزه‌داری، اختلاف ضرایب ایمنی تحلیل‌های ناپیوسته در همه موارد بسیار ناچیز است. برای درک بهتر روند تغییرات، نتایج به صورت نمودار در شکل ۵-۳۴ نشان داده شده است.

شکل ۳۵-۵ سطح شکست احتمالی تحلیل‌های سه‌بعدی ناپیوسته شیب ملایم و همچنین مقطع دوبعدی متناظر با تحلیل‌های دوبعدی ناپیوسته مقطع AB این شیب را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، سطح شکست احتمالی در مقطع دوبعدی با تحلیل‌های ناپیوسته دوبعدی (مخصوصاً شکل ۲۸-۵) شباهت دارد اما به طور کلی در این مقطع سازوکار شکست کنترل شده توسط درزه‌ها مشخص‌تر است. در پلات سه‌بعدی بلوک تکتونیک ۱ نیز محدوده سطح شکست احتمالی به همراه ریزش‌های بلوکی موضعی نشان داده شده است. مشابه تحلیل‌های شیب تند، با نادیده گرفتن این بلوک‌ها، ناحیه مستعد لغزش سراسری قابل تشخیص است، این ناحیه در قسمت بالایی و میانی پیت قابل مشاهده است.



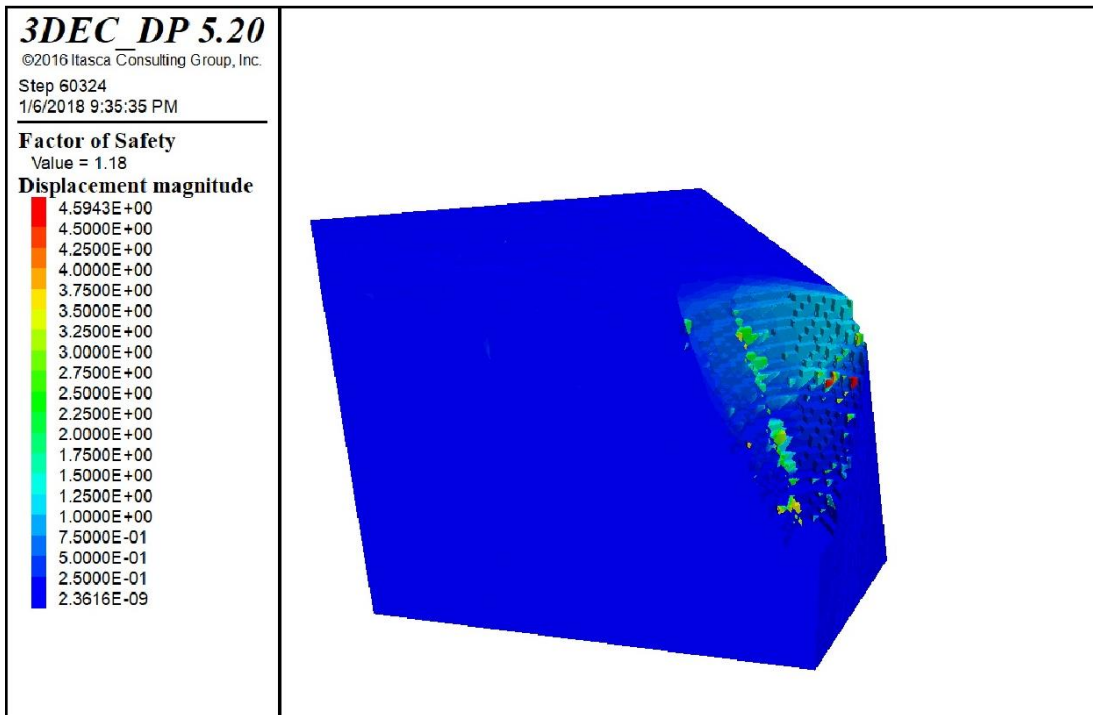
شکل ۳۴-۵: تغییرات ضریب ایمنی سه‌بعدی شیب ملایم در درزه‌داری‌های مختلف نسبت به تغییر اندازه ابعاد مش

شکل ۳۶-۵، ریزش اتفاق افتاده در بلوک تکتونیک ۱ پیت قدیم در مقایسه با تحلیل ناپیوسته سه‌بعدی در این بلوک را نشان می‌دهد. نتایج این تحلیل، تطابق خوبی بین محل و نوع شکست احتمالی به دست آمده در تحلیل ناپیوسته سه‌بعدی و ریزش واقعی را نشان می‌دهد.



شکل ۵-۳۵: ضریب ایمنی و سطح شکست احتمالی در بلوک تکتونیکی ۱ پیت جدید در تحلیل ناپیوسته میزان تغییرات اثر سه‌بعدی ناشی از میزان درزه‌داری شیب‌های تند و ملایم در جدول ۵-۱۵ آورده شده است. اثر سه‌بعدی ناشی از میزان درزه‌داری در تحلیل‌های ناپیوسته شیب تند با هر دو میزان درزه‌داری ۱۰٪ و ۱۵٪ بیشتر از تحلیل‌های متناظر پیوسته است. این موضوع در تحلیل‌های ناپیوسته شیب ملایم با میزان درزه‌داری ۱۰٪ صادق است اما در میزان درزه‌داری ۱۵٪ اثر سه‌بعدی مشابه با تحلیل‌های متناظر پیوسته می‌شود. مقدار میانگین نسبت FOS_{3D}/FOS_{2D} برای شیب تند در درزه‌داری ۱۰٪، مقدار ۱/۳۳ و در درزه‌داری ۱۵٪، مقدار ۱/۳۴ و برای شیب تند در درزه‌داری ۱۰٪، مقدار ۱/۲۴

و در درزه‌داری ۱۵٪، مقدار ۱/۱۸ است.



شکل ۵-۳۶: مقایسه ریزش اتفاق افتاده در بلوک تکتونیک ۱ پیت قدیمی با تحلیل ناپیوسته سه‌بعدی پیت قدیم

جدول ۵-۱۵: اثر سه‌بعدی ناشی از تغییر میزان درزه‌داری

٪۱۵	٪۱۰	٪۰	درزه‌داری	
			ابعاد مش	
۱/۳۹	۱/۳۶	۱/۲۸	۱۰	پیت قدیم
۱/۳۱	۱/۳۳	۱/۳۱	۲۰	
۱/۳۴	۱/۳۵	۱/۳۰	۳۰	
۱/۳۲	۱/۲۹	۱/۲۷	۴۰	
۱/۱۷	۱/۱۸	۱/۱۷	۱۰	پیت جدید
۱/۱۷	۱/۲۳	۱/۱۸	۲۰	
۱/۱۷	۱/۲۸	۱/۲۴	۳۰	
۱/۲۳	۱/۲۸	۱/۲۶	۴۰	

۵-۵- جمع‌بندی

در مجموع با توجه به نتایج به دست آمده، در نظر گرفتن هندسه واقعی در اجرای تحلیل‌ها، تأثیر غیرقابل انکاری در نتایج به دست آمده خواهد داشت. در شرایطی با خواص و مقیاس مشابه با مطالعه موردی انتخاب‌شده در این پژوهش، توجه به تفاوت بین نتایج تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی می‌تواند در انتخاب شیب پایدار مؤثر باشد. علاوه بر این، اندازه ابعاد مش انتخابی نیز در دقت تشخیص سطح شکست احتمالی و میزان ضریب ایمنی تحلیل‌های دوبعدی و سه‌بعدی تأثیرگذار است و همین مسئله، اهمیت انتخاب اندازه ابعاد مش مناسب برای تحلیل‌ها را افزایش می‌دهد.

در شیب‌های ملایم با زاویه اصطکاک پایین، میزان اثر سه‌بعدی زیاد است و امکان به وجود آمدن خطای بالا در چنین شرایطی وجود دارد. در طرف مقابل، در زاویه اصطکاک بالا و چسبندگی پایین،

نتایج FOS_{2D} به FOS_{3D} نزدیک است. میزان تغییرات اثر سه‌بعدی شیب تند به تغییرات خواص ژئومکانیکی کمتر از شیب ملایم است، به همین دلیل در این نوع شیب استفاده از تحلیل‌های سه‌بعدی گزینه مناسب‌تری است.

اجرای تحلیل‌های ناپیوسته به منظور بررسی تعامل ناپیوستگی‌ها در سازوکار شکست احتمالی از اهمیت بالایی برخوردار است، به خصوص در شرایطی که شکست احتمالی توسط این ناپیوستگی‌ها کنترل شود. با توجه به نتایج به دست آمده در این پژوهش، مقادیر FOS_{2D} و FOS_{3D} شیب ملایم، حساسیت کمی به درزه‌داری محیط از خود نشان می‌دهند. البته برای تشخیص بهتر نوع سطح شکست احتمالی (حالت گوه‌ای در این پژوهش)، وارد کردن درزه‌ها به مدل، ضروری است. در طرف مقابل، حساسیت شیب تند به درزه‌داری محیط بیشتر از شیب ملایم است. در این نوع شیب‌ها اجرای تحلیل‌های ناپیوسته توصیه می‌شود.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و

پیشنهاد

۶-۱- نتیجه گیری

با توجه به اهداف پژوهش حاضر، جهت ارزیابی اثر سه بعدی ناشی از اثرات ابعادی و اثرات محیطی در تحلیل‌های پایداری شیب معادن روباز بزرگ، چندین تحلیل دوبعدی و سه بعدی با استفاده از روش‌های پیوسته و ناپیوسته صورت گرفت. نتایج به دست آمده از این تحلیل‌ها به صورت زیر خلاصه می‌شوند.

- در تحلیل‌های دوبعدی، با افزایش اندازه ابعاد مش، ضریب ایمنی افزایش می‌یابد. مقدار تغییرات ضریب ایمنی در شیب تند بیشتر از شیب ملایم است؛ این مسئله، حساسیت بیشتر شیب تند به اندازه مش را نشان می‌دهد. در تحلیل‌های سه بعدی، تغییرات ضریب ایمنی با افزایش اندازه ابعاد مش، روند تغییرات مشابه با تحلیل‌های دوبعدی را نشان می‌دهد، با این تفاوت که میزان تغییرات در تحلیل‌های سه بعدی بیشتر از تحلیل‌های دوبعدی است. در هر دو نوع تحلیل دوبعدی و سه بعدی، در ابعاد مش درشت و همچنین ابعاد مش بسیار ریز، سطح شکست احتمالی به خوبی قابل مشاهده نیست.
- تفاوت بین مقادیر اثر سه بعدی در بازه ابعاد مش مورد تحلیل، زیاد نیست. اثر سه بعدی در شیب تند بیشتر از اثر سه بعدی در شیب ملایم است. مقدار میانگین مقادیر اثر سه بعدی برای شیب تند، مقدار ۱/۲۹ و برای شیب ملایم، مقدار ۱/۱۷ است.
- با افزایش زاویه اصطکاک، FOS_{2D} و FOS_{3D} افزایش می‌یابند. با افزایش میزان چسبندگی نیز FOS_{2D} و FOS_{3D} افزایش می‌یابند. میزان تغییرات ضرایب ایمنی در اثر تغییر زاویه اصطکاک قابل توجه‌تر از میزان تغییرات ضرایب ایمنی در اثر تغییر چسبندگی است.
- با افزایش زاویه اصطکاک، اثر سه بعدی در هر دو شیب تند و ملایم کاهش می‌یابد اما با افزایش چسبندگی، اثر سه بعدی در هر دو شیب تند و ملایم افزایش می‌یابد. میزان تغییرات اثر سه بعدی بر اثر تغییرات زاویه اصطکاک، به خصوص در شیب ملایم، قابل توجه‌تر از تغییرات آن بر اثر تغییرات چسبندگی است.

- افزایش میزان درزه‌داری باعث کاهش ضریب ایمنی می‌شود. میزان تغییرات FOS_{2D} و FOS_{3D} با توجه به درزه‌داری محیط، در شیب تند بیشتر از شیب ملایم است. میزان حساسیت شیب ملایم به درزه‌داری در هر دو تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی کمتر از شیب تند است.
- در تحلیل‌های ناپیوسته، اثر سه‌بعدی در شیب تند بیشتر از اثر سه‌بعدی در شیب ملایم است. مقدار میانگین اثر سه‌بعدی با در نظر گرفتن اثر اندازه ابعاد مش، برای شیب تند در درزه‌داری ۱۰٪، مقدار ۱/۳۳ و در درزه‌داری ۱۵٪، ۱/۳۴ است. مقدار میانگین نسبت FOS_{3D}/FOS_{2D} با در نظر گرفتن اثر اندازه ابعاد مش برای شیب تند در درزه‌داری ۱۰٪، مقدار ۱/۲۴ و در درزه‌داری ۱۵٪، ۱/۱۸ است.
- در مقایسه بین شیب تند و ملایم، با در نظر گرفتن همه پارامترهای ابعادی و محیطی بررسی شده در این پژوهش، اختلاف بین اثر سه‌بعدی در شیب تند و ملایم تقریباً یکسان است (۰/۰۹-۰/۱۲)، به جز در زاویه اصطکاک پایین، که این اختلاف به ۰/۴۶ می‌رسد.
- از بین همه پارامترهای ابعادی و محیطی بررسی شده در این پژوهش، پارامترهای محیطی، به خصوص زاویه اصطکاک، نسبت به دیگر پارامترها تأثیر قابل توجه‌تری بر نتایج تحلیل‌ها دارند.

۶-۲- پیشنهاد

- پیشنهاد می‌شود پیش از اجرای تحلیل‌های پایداری شیب، در مورد اندازه‌ی ابعاد مش مناسب برای مسئله مورد نظر تحقیق شود تا نتایج به دست آمده از دقت کافی برخوردار باشند. اگر هدف از تحلیل پایداری شیب، بررسی پایداری سراسری شیب است و هندسه مسئله دارای پیچیدگی‌های زیادی در نزدیکی سطح حفاری شده باشد، استفاده از ابعاد مش بسیار ریز توصیه نمی‌شود.
- به دلیل کم بودن تفاوت مقدار اثر سه‌بعدی در بازه ابعاد مش درشت تا بسیار ریز، پیشنهاد می‌شود ابتدا یک تحلیل دوبعدی و یک تحلیل سه‌بعدی با ابعاد مش مشابه و اندازه مش درشت (به دلیل سرعت اجرای بالای تحلیل در مش درشت و همچنین محدودیت توان پردازشی رایانه‌های معمول) انجام شود. به این ترتیب، اثر سه‌بعدی برای شیب مورد تحلیل بدست می‌آید. در مراحل بعدی

تحلیل، برای دستیابی به دقت بالاتر، می توان تحلیل های دوبعدی با اندازه مش ریزتر را انجام داد و با اعمال اثر سه بعدی، ضریب ایمنی تحلیل سه بعدی را بدست آورد.

- در شیب های ملایم با زاویه اصطکاک پایین، به دلیل زیاد بودن مقدار اثر سه بعدی و امکان به وجود آمدن خطای بالا، تحلیل های دوبعدی توصیه نمی شوند.

- به دلیل اهمیت بالای پروژه های معدنی، پیشنهاد می شود مطالعات و پژوهش های بیشتری در زمینه ارزیابی دیگر عوامل مؤثر بر نتایج تحلیل های دوبعدی و سه بعدی مانند فشار آب منفذی، همسان گردی/ناهمسان گردی محیط، همگنی/ناهمگنی محیط، شرایط مرزی و همچنین میزان تأثیر این عوامل بر مقدار اثر سه بعدی، در مطالعات موردی معادن روباز و زیرزمینی صورت گیرد.

منابع

ایران نژاد م.، شریفزاده م.، شهریار ک.، مدنی ح.، مرتضوی ع.، ۱۳۹۵، *راهنمای کاربرد روش‌های عددی در طراحی ژئومکانیکی معادن*، ضابطه شماره ۶۵۶، سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور، امور نظام فنی و اجرایی.

شرکت مهندسين مشاور کاوشگران، ۱۳۹۱، *طرح پیت نهایی معدن چغارت*، جلد اول گزارش، ۳۱:۳۵.

یاراحمدی بافقی ع. ر.، امامی میبدی ع.، پورقاسمی م.، امینی ا.، کرم‌پور ح.، معمارزاده ا.، تقوی د.، ابوطالبی م.، ۱۳۹۱، *تعیین قابلیت اعتماد دیواره‌های نهایی معادن سطحی با مطالعه موردی روی دیوره های معدن سنگ آهن چغارت*، طرح پژوهشی، پژوهشکده مهندسی معدن دانشگاه یزد.

Akhtar, K. & Stark, T. D. (2014). *Importance of Side Resistance in a 3D Stability Analysis*. Geotechnical Frontiers 2017: 285-293.

Arellano, D. & Stark, T. D. (2000). *Importance of three-dimensional slope stability analyses in practice*. Slope Stability 2000: 18-32.

Ashford, S. A. & Sitar, N. (2001). *Effect of element size on the static finite element analysis of steep slopes*. International journal for numerical & analytical methods in geomechanics 25(14): 1361-1376.

Azocar, K. & Hazzard, J. (2015). *The Influence of curvature on the stability of rock slopes*. 13th ISRM International Congress of Rock Mechanics, International Society for Rock Mechanics. Montréal, Québec, Canada.

Baligh, M. M. & Azzouz, A. S. (1975). *End effects on stability of cohesive slopes*. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering 101 (ASCE# 11705 Proceeding).

Calá, M. (2007). *Convex & concave slope stability analyses with numerical methods*. Archives of Mining Sciences 52(1): 75-89.

Cavoundis, S. (1987). *On the ratio of factors of safety in slope stability analyses*. Geotechnique 37(2): 207-210.

Chakraborty, A., & Goswami, D (2016). *State of the art: Three Dimensional (3D) Slope-Stability Analysis*. International Journal of Geotechnical Engineering 10(5): 493-498.

- Chaudhary, K. B., Domingos, V. H., Gitirana Jr, G., Fredlund, M., & Lu, H. (2016). *Three-Dimensional Slope Stability: Geometry Effects*. Tailings and Mine Waste Conference'16. Keystone, Colorado, United States.
- Chen, R.-H. J. (1981). *Three-dimensional slope stability analysis*. West Lafayette, Indiana, Purdue University.
- Chen, R. & Chameau, J.-L. (1983). *Three-dimensional limit equilibrium analysis of slopes*. *Geotechnique* 33(1): 31-40.
- Cheng, Y. M., & Lau, C. K. (2014). *Slope stability analysis and stabilization: new methods and insight*. CRC Press..
- Chugh, A. K. (2003). *On the boundary conditions in slope stability analysis*. *International journal for numerical & analytical methods in geomechanics* 27(11): 905-926.
- Chugh, A. K. (2012). *Discussion of Three-dimensional slope stability based on stresses from a stress-deformation analysis*. *Canadian Geotechnical Journal* 49(3): 374-380.
- Maisel, D. (2007). *American Mine*. Retrieved January 19, 2018, from <http://davidmaisel.com/works/american-mine/#4>.
- Duncan, J., & Wright, S. (1980). *The accuracy of equilibrium methods of slope stability analysis*. *Engineering Geology* 16(1-2): 5-17.
- Eid, H. T., Elleboudy, A. M. Elmarsafawi, H. G. & Salama, A. G. (2006). *Stability analysis & charts for slopes susceptible to translational failure*. *Canadian geotechnical journal* 43(12): 1374-1388.
- Griffiths, D. & Marquez, R. (2007). *Three-dimensional slope stability analysis by elasto-plastic finite elements*. *Geotechnique* 57(6): 537-546.
- Hoek, E. & Bray, J. D. (1981). *Rock slope engineering*. CRC Press.
- Hustrulid, W. A., McCarter, M. K., & Van Zyl, D. J. (2001). *Slope stability in surface mining*. SME.
- Itasca, F. (2001). *Fast Lagrangian Analysis of Continua, Theory & Background*. Itasca Consulting Group, Inc, Minneapolis.
- Jarl Wellershaus, S. & Karlsson, A. (2014). *3D-effects in total stability evaluations*. (Unpublished master's thesis). Lund University, Lund, Sweden.
- Jeldes, I. A. & Drumm, E. C. (2013). *Concave Slopes for Improved Stability & Erosion Resistance*. Geo-Congress 2013: Stability & Performance of Slopes & Embankments III.
- Kelesoglu, M. (2015). *The evaluation of three-dimensional effects on slope stability by*

- the strength reduction method*. KSCE Journal of Civil Engineering 20(1): 229-242.
- Lefebvre, G., Duncan, J. M. & Wilson, E. L. (1973). *Three-Dimensional Finite Element Analyses of Dams*. Journal of the Soil Mechanics & Foundations Division 99(7): 495-507.
- Leshchinsky, D. & Baker, R. (1986). *Three-dimensional slope stability: end effects*. Soils & Foundations 26(4): 98-110.
- Li, A., Merifield, R. & Lyamin, A. (2009). *Limit analysis solutions for three dimensional undrained slopes*. Computers & Geotechnics 36(8): 1330-1351.
- Li, E., Zhuang, X., Zheng, W. & Cai, Y. (2014). *Effect of graph generation on slope stability analysis based on graph theory*. Journal of Rock Mechanics & Geotechnical Engineering 6(4): 380-386.
- Leong, E.C. & Rahardjo, H. (2012). *Two & three-dimensional slope stability reanalyses of Bukit Batok slope*. Computers & geotechnics. 42: 81-88.
- Saeed, M. S., Maarefvand, P. & Yaaghubi, E. (2015). *Two & three-dimensional slope stability analyses of final wall for Miduk mine*. International Journal of Geo-Engineering 6(1): 9-22.
- Sharma, R. H. (2013). *Evaluating the effect of slope curvature on slope stability by a numerical analysis*. Australian Journal of Earth Sciences 60(2): 283-290.
- Skempton, A. W. (1985). *Residual strength of clays in landslides, folded strata & the laboratory*. Geotechnique 35(1): 3-18.
- Shen, J. & Karakus M (2013). *Three-dimensional numerical analysis for rock slope stability using shear strength reduction method*. Canadian geotechnical journal 51(2): 164-172.
- Stark, T. D. & Eid, H. T. (1998). *Performance of three-dimensional slope stability methods in practice*. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental engineering 124(11): 1049-1060.
- Stianson, J., Fredlund, D. & Chan, D. (2011). *Three-dimensional slope stability based on stresses from a stress-deformation analysis*. Canadian Geotechnical Journal 48(6): 891-904.
- Sun, C., Chai, J., Xu, Z., & Qin, Y. (2016). *3D Stability Charts for Convex & Concave Slopes in Plan View with Homogeneous Soil Based on the Strength-Reduction Method*. International Journal of Geomechanics 17(5): 34-45.
- Totonchi, A., Askari, F. & Farzaneh, O. (2012). *3D stability analysis of concave slopes in plan view using linear finite element & lower bound method*. Iranian Journal of Science & Technology. Transactions of Civil Engineering 36(C2): 181-194.
- Tutluoglu, L., Öge, I. F. & Karpuz, C. (2011). *Two & three dimensional analysis of a*

- slope failure in a lignite mine*. Computers & geosciences 37(2): 232-240.
- Valeriano, M., Rossetti, D. & Albuquerque, P. (2009). ***TOPODATA: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional***. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto: 1-8.
- Wines, D. (2016). ***A comparison of slope stability analyses in two & three dimensions***. Journal of the Southern African Institute of Mining & Metallurgy 116(5): 399-406.
- Wu, G. X., Ding, J. S., Wang, M., & Liu, X. Y. (2010). ***3D Effect Analysis of Geometrically Complicated High-filled Slope Stability***. ICCTP 2010: Integrated Transportation Systems: Green, Intelligent, Reliable: 3063-3070.
- Xing, Z. (1988). ***Three-dimensional stability analysis of concave slopes in plan view***. Journal of Geotechnical Engineering 114(6): 658-671.
- Zhang, K., Ping, C., Liu, Z. Y., Hu, H. H., & Gong, D. P. (2011). ***Simulation analysis on three-dimensional slope failure under different conditions***. Transactions of Nonferrous Metals Society of China 21(11): 2490-2502.
- Zhang, L., Fredlund, M., Fredlund, D. & Haihua, L. (2014). ***Comparison of 2D & 3D slope stability analyses for unsaturated soil slopes***. Geo Regina 2014, 67th Canadian Geotechnical Conference.
- Zhang, Y., Chen, G., Zheng, L., Li, Y. & Zhuang, X. (2013). ***Effects of geometries on three-dimensional slope stability***. Canadian Geotechnical Journal 50(3): 233-249.

Abstract

Slope stability analysis is one of the most important problems in the mining and geotechnical engineering. Ignoring the importance of this problem can lead to significant losses in terms of safety and economy. Selecting an appropriate method for analyzing the slope stability requires a proper understanding of how different factors influence the outputs of the analyses. Slope stability analyses are mostly performed by two-dimensional (2D) methods with some simplification assumptions. Whereas in the reality, all problems are three-dimensional (3D). In 2D analyses, inappropriate assumptions are used and ignored the effects of the more realistic 3D analysis. This cause differences between 2D and 3D analyses. In various studies, these differences are referred to as “3D-effect”, and are usually represented as the ratio of the 3D factor of safety (FOS_{3D}) to the 2D factor of safety (FOS_{2D}). This study, evaluates 3D-Effect caused by considering the real geometry, steepness of the slope and the changes in the mesh size as “dimensional effects”; and 3D-Effect caused by the changes in the rock mass strength properties (friction angle and cohesion) and the percentage of joints as “media effects”. To the aims of this study, numerical continuous modeling softwares, FLAC and FLAC3D, and numerical discontinuous modeling softwares, UDEC and 3DEC, were used to modeling and analyzing the slope stability of Tectonic Block 1 in old designed (the steep slope) and newly designed (the gentle slope) pits of Choghart Iron Mine. The results of this analyses were compared in terms of factor of safety and potential failure surface. In the first step, several 2D and 3D continuous analyses were performed to evaluating the mesh effect on the results of the analyses, evaluating the 3D-Effect caused by considering the real geometry and the mesh effect, and selecting an appropriate mesh size for the analyses. In the next step, number of analyses were conducted to assessing the effect of the strength parameters’ changes on the each 2D and 3D analyses. In the final step, some 2D and 3D discontinuous analyses were performed to evaluating the joint density effects on the results of the analyses and 3D-Effect. Results showed that the differences between the 2D and 3D analyses are considerable. Among the all considered parameters, the changes in the friction angle, particularly in the gentle slope, has a great influence on the changes in the 2D and 3D results, and also 3D-Effect.

Keywords: 3D-Effect, Slope stability, Dimensional effects, Media effects, Open-pit mines, Continuous analyses, Discontinuous analyses.



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

MSc Thesis in Mineral Exploitation

**Assessment of dimensional effects & media on slope
stability analysis of open pit mines. Case study: Choghart iron
mine NO. 1 tectonic block wall**

By: Hossein Zebarjadi Dana

Supervisors:

Prof. Reza Khalou Kakaie

Dr. Ramin Rafiee

Advisor:

Dr. Alireza Yarahmadi Bafghi

January 2018