

صلى الله عليه وسلم



دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک

رشته‌ی مهندسی معدن گرایش مکانیک سنگ

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

طراحی و پایدارسازی ترانشه‌های سنگی دارای سطوح ناپیوستگی - مطالعه

موردی قطعه ۱ آزادراه تهران-شمال

نگارنده:

علی اکبر برجی

استاد راهنما:

دکتر شکر اله زارع

استاد مشاور:

دکتر مرتضی جوادی

تیر ۱۳۹۷

تقدیم به

پیشگاه یگانه مولود کعبه عشق

که تنها جلوه‌ای از پرتو وجودش عدالت بود که با نسیم آن انسانیت انسان را قوام بخشید و

به جرگه هستی مزه عدالت را چشاند.

سپاسگزاری

حمد و سپاس بی‌کران خداوند عالم را سزااست که به انسان دانایی و دانش را عطا فرمود تا از آن در جهت زندگی متعالی بهره‌بردار و خدای متعال را سپاس‌گزارم که مسیر زندگی‌ام را مسیر تعالی و پیشرفت قرارداد و در سراسر مسیر زندگی‌ام الطاف بی‌کرانش را دریغ نفرمود. تشکر و قدردانی کمترین عمل برای **پدر و مادر** عزیزم است که همواره مشوق و حامی من در عرصه‌های زندگی بودند. از همسر و فرزندم که همواره سختی‌های زیادی در مسیر تکامل پروژه تحمل کردند سپاس‌گزارم. سپاس و ستایش شایسته‌ی معلمان بی‌ادعا و توانایی است که دانش و بصیرت این کشور از وجود پربرکت و نورانی‌شان است. در اینجا شایسته است از راهنمایی‌ها و هدایت‌های اساتید ارجمند دانشگاه صنعتی شاهرود بالأخص از جناب آقای دکتر زارع و دکتر جوادی کمال تشکر و قدردانی رادارم که مرا در مسیر موردعلاقه‌ام قرار داده و با ارائه دیدگاه‌های خود مرا راهنمایی فرمودند. در ضمن از همه‌کسانی که در این مسیر مرا یاری کردند سپاس‌گزارم.

تعهدنامه

اینجانب **علی اکبر برجی** دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مکانیک سنگ دانشکده معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با موضوع **طراحی و پایدارسازی ترانشه-های سنگی دارای سطوح ناپیوستگی- مطالعه موردی قطعه ۱ آزادراه تهران-شمال تحت راهنمایی دکتر شکر اله زارع متعهد می شوم:**

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام **دانشگاه صنعتی شاهرود** و یا **Shahrood University of Technology** به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافت های 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، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

در گذشته تحلیل پایداری ترانسه‌های سنگی معمولاً با روش‌های گرافیکی یا محاسبات دستی انجام می‌گرفت، اما امروزه روش‌های متنوعی برای تحلیل پایداری ترانسه‌های سنگی وجود دارد که لازم است با توجه به شرایط منطقه و نوع شکست بالقوه روش تحلیل مناسب انتخاب شود.

هم‌چنین به دلیل پایین بودن میزان تنش در قسمت‌های کم‌عمق زمین مانند ترانسه‌ها، رفتار توده سنگ در این اعماق به‌وسیله‌ی ناپیوستگی‌ها کنترل می‌شود، بنابراین برای مطالعه در مورد این ناپایداری‌ها، مطالعه و بررسی رفتار برشی ناپیوستگی‌ها لازم و ضروری است. هم‌چنین برای تحلیل، طراحی و پیش‌بینی عملکرد سازه‌هایی که در داخل و یا بر روی توده‌سنگ‌ها ساخته می‌شوند، نیازمند درک صحیح ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ از قبیل مقاومت، تغییر شکل‌پذیری، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی می‌باشد.

در این تحقیق پایداری ترانسه‌های سنگی قطعه ۱ آزادراه تهران-شمال با استفاده از روش المان مجزای سه‌بعدی مورد مطالعه قرار می‌گیرد و جهت تحلیل پایداری، ابتدا مشخصات هندسی دسته‌درزه‌ها تعیین شد و با استفاده از نتایج آزمایش‌هایی که قبلاً انجام شده بود و انجام آزمایش‌های تکمیلی خواص مقاومتی و مکانیکی توده سنگ و درزه‌ها تعیین شد و سپس برای مشخص کردن رفتار کلی توده سنگ تحلیل‌هایی با استفاده از نرم‌افزار slide انجام گرفت در مرحله بعد مدل هندسی و مکانیکی ترانسه در نرم‌افزار 3DEC ساخته شد و پایداری ترانسه در وضعیت‌های مختلف بررسی گردید. ترانسه در شرایط عادی با توجه به روش‌های مختلف تحلیل پایداری پایدار بوده ولی در شرایط هوازگی و کاهش مقاومت برشی توده‌سنگ، ناپایدار می‌باشد که پایدارسازی آن باید با تقویت توده-سنگ و نصب نگهداری لازم انجام شد.

واژگان کلیدی: تحلیل پایداری، رفتار برشی ناپیوستگی‌ها، ترانسه سنگی آزادراه تهران-شمال،

مدل‌سازی عددی، 3DEC

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

طراحی و پایدارسازی ترانسه‌های سنگی دارای سطوح ناپیوستگی مطالعه موردی قطعه ۱
آزادراه تهران - شمال، پنجمین کنگره سالانه بین المللی عمران، معماری و توسعه شهری،
اردیبهشت ۱۳۹۶، دانشگاه شهید بهشتی

فهرست عناوین

صفحه	عنوان
❖ فصل اول: کلیات	
۲	۱-۱ مقدمه.....
۳	۲-۱ سابقه موضوع.....
۵	۳-۱ ضرورت انجام تحقیق.....
۶	۴-۱ روش تحقیق.....
۸	۵-۱ ساختار پایان نامه.....
❖ فصل دوم: مبانی نظری و سابقه تحقیق	
۱۰	۱-۲ مقدمه.....
۱۰	۲-۲ انواع اصلی شکست در شیب‌های سنگی.....
۱۲	۳-۲ روش تجربی.....
۱۳	۱-۳-۲ بررسی رده‌بندی RMR در پایداری ترانشه‌های سنگی.....
۱۵	۲-۳-۲ بررسی رده‌بندی SMR در پایداری ترانشه‌های سنگی.....
۱۸	۳-۳-۲ بررسی رده‌بندی CSMR در پایداری ترانشه‌های سنگی.....
۱۹	۴-۳-۲ مطالعه موردی روش تجربی.....
۲۰	۴-۲ روش سینماتیکی.....

۲۲.....۱-۴-۲ مطالعه موردی روش سینماتیکی

۲۴.....۵-۲ روش تعادل حدی

۲۶.....۱-۵-۲ مطالعه موردی روش تعادل حدی

۲۷.....۶-۲ روش عددی

۲۸.....۱-۶-۲ کلیات و اصول روش های عددی

۲۹.....۲-۶-۲ روش های عددی برای مدل سازی توده سنگ های پیوسته و ناپیوسته

۳۴.....۳-۶-۲ مطالعه موردی روش های عددی

۳۷.....۷-۲ جمع بندی

❖ فصل سوم: معرفی مطالعه موردی، برداشت های میدانی و نتایج آزمایشگاهی

۴۲.....۱-۳ مقدمه

۴۲.....۲-۳ شرح مسیر و مشخصات آزادراه تهران - شمال

۴۵.....۳-۳ خصوصیات کلی زمین شناسی مسیر آزادراه تهران - شمال

۴۶.....۱-۳-۳ ساختار تکتونیکی

۴۷.....۲-۳-۳ خصوصیات سنگ شناسی

۵۰.....۴-۳ معرفی ترانشه مورد مطالعه

۵۰.....۱-۴-۳ زمین شناسی ساختاری ترانشه مورد مطالعه

۵۴.....۵-۳ بررسی پارامترهای مکانیکی و رفتاری درزه

۵۵.....۶-۳ آزمایش‌های مکانیک سنگ

۵۶.....۱-۶-۳ آزمایش بار نقطه‌ای

۵۷.....۲-۶-۳ تعیین مقاومت برشی مستقیم نمونه‌ها

۵۹.....۷-۳ تحلیل نتایج آزمایش برش مستقیم

۶۳.....۸-۳ تاثیر مقیاس بر رفتار درزه‌ها

۶۳.....۹-۳ معیار بارتن

۶۴.....۱۰-۳ مقایسه نتایج معیار بارتن با نتایج آزمایش برش مستقیم

۶۵.....۱۱-۳ اجمع‌بندی

❖ فصل چهارم: تحلیل پایداری به روش‌های تجربی و سینماتیکی و تعادل حدی

۶۸.....۱-۴ مقدمه

۶۸.....۲-۴ روش تجربی (SMR)

۶۹.....۱-۲-۴ خلاصه نتایج مربوط به محاسبه اندیس SMR برای ریزش واژگونی

۷۰.....۲-۲-۴ خلاصه نتایج مربوط به محاسبه اندیس SMR برای ریزش گوه‌ای

۷۱.....۳-۲-۴ خلاصه نتایج مربوط به محاسبه اندیس SMR برای ریزش صفحه‌ای

۷۱.....۳-۴ تشخیص نوع شکست با استفاده از تصاویر استریو گرافیک

۷۳.....۱-۳-۴ تحلیل سینماتیکی شکست صفحه‌ای

۷۵.....۲-۳-۴ تحلیل سینماتیکی شکست گوه‌ای

۷۹.....	۳-۳-۴ تحلیل سینماتیکی شکست واژگونی.....
۸۱.....	۴-۴ تحلیل پایداری با استفاده روش تعادل حدی.....
۸۱.....	۱-۴-۴ تحلیل شکست گوه‌ای با نرم‌افزار Swedge.....
۸۴.....	۲-۴-۴ تحلیل شکست صفحه‌ای با نرم‌افزار Rocplan.....
۸۶.....	۳-۴-۴ شرایط لازم برای شکست دایره‌ای.....
۸۶.....	۴-۴-۴ محاسبه ضریب ایمنی کلی ترانشه.....
۸۹.....	۵-۴ جمع‌بندی.....

❖ فصل پنجم: تحلیل پایداری به روش عددی

۹۲.....	۱-۵ مقدمه.....
۹۲.....	۲-۵ انتخاب روش عددی.....
۹۳.....	۳-۵ روند مدل‌سازی ترانشه.....
۹۴.....	۴-۵ تفسیر نتایج در نرم‌افزار 3DEC.....
۹۵.....	۵-۵ تحلیل بلوکی.....
۹۶.....	۶-۵ مدل‌سازی ترانشه با نرم‌افزار 3DEC.....
۹۶.....	۱-۶-۵ تعریف هندسه مدل.....
۹۷.....	۲-۶-۵ انتخاب مدل رفتاری مناسب برای بلوک سنگ و ناپیوستگی.....
۹۸.....	۳-۶-۵ اعمال شرایط مرزی و آغازین.....

- ۱۰۰.....ایجاد تعادل اولیه در مدل.....۴-۶-۵
- ۱۰۲.....تحلیل لغزش گوه‌ای در ترانسه.....۷-۵
- ۱۰۴.....تحلیل پایداری ترانسه با مدل انعطاف‌پذیر.....۸-۵
- ۱۰۷.....پایدارسازی ترانسه.....۹-۵
- ۱۱۲.....تحلیل حساسیت پارامترهای مقاومت برشی درزه.....۱۰-۵
- ۱۱۴.....جمع‌بندی.....۱۱-۵

❖ فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادها

- ۱۱۶.....نتیجه‌گیری.....۱-۶
- ۱۱۸.....پیشنهادها.....۲-۶

فهرست شکل‌ها

فصل دوم

- ۱-۲ استریو گرام پتانسیل لغزش گوه‌ای در بلوک B_1 در ترانشه جاده تنگه قیر..... ۲۳
- ۲-۲ لغزش گوه‌ای شکل در ترانشه‌های جاده تنگه قیر..... ۲۳
- ۳-۲ نمایش استریو گرافیکی ناپیوستگی‌ها و ارتباط آن با ترانشه‌ها در محدوده‌ی مختلف..... ۲۴
- ۴-۲ تحلیل شرایط کلی پایداری با استفاده از روش تعادل حدی..... ۳۳

فصل سوم

- ۱-۳ موقعیت جغرافیایی آزادراه تهران - شمال..... ۴۳
- ۲-۳ قطعه‌های مختلف منطقه یک آزادراه تهران - شمال..... ۴۴
- ۳-۳ تقسیم‌بندی مسیر آزادراه تهران - شمال..... ۴۵
- ۴-۳ نگاره قطبی ناپیوستگی‌های برداشت‌شده..... ۵۱
- ۵-۳ دسته‌درزه انتخاب‌شده با بیشترین تمرکز در سطح..... ۵۲
- ۶-۳ نمایی از وضعیت زمین‌شناسی و سطوح ناپیوستگی در ترانشه موردبررسی..... ۵۳
- ۷-۳ بخشی از نمونه‌های اولیه..... ۵۵
- ۸-۳ وسیله قالب‌گیری نمونه‌ها و نمونه قرار گرفته در مخلوط گچ و سیمان..... ۵۷
- ۹-۳ نمونه‌های آماده‌شده در آزمایشگاه..... ۵۸
- ۱۰-۳ دستگاه آزمایش برش مستقیم..... ۵۹
- ۱۱-۳ نمودار تنش برشی - جابجایی برشی..... ۶۰
- ۱۲-۳ نمودار تنش برشی در تنش نرمال‌های مختلف..... ۶۱
- ۱۳-۳ همبستگی نتایج حاصل از معیار بارتن با نتایج حاصل از آزمایش..... ۶۴

فصل چهارم

- ۱-۴ انواع شکست در ترانسه سنگی.....۷۳
- ۲-۴ هندسه پله برای وقوع شکست صفحه‌ای.....۷۴
- ۳-۴ تحلیل سینماتیکی شکست صفحه‌ای با نرم‌افزار Dips.....۷۵
- ۴-۴ شرایط هندسی برای شکست گوه‌ای و تصاویر استریونت آن.....۷۷
- ۵-۴ تحلیل سینماتیکی شکست گوه‌ای با نرم‌افزار Dips.....۷۸
- ۶-۴ انواع شکست واژگونی.....۷۹
- ۷-۴ تحلیل سینماتیکی شکست گوه‌ای با نرم‌افزار Dips.....۸۰
- ۸-۴ نمای کلی خروجی حاصل از پایداری گوه‌ای در حالت بارگذاری استاتیک.....۸۳
- ۹-۴ نمای کلی خروجی حاصل از پایداری گوه‌ای در حالت بارگذاری شبه استاتیک.....۸۳
- ۱۰-۴ نمای کلی خروجی حاصل از پایداری صفحه‌ای در حالت بارگذاری استاتیک.....۸۴
- ۱۱-۴ نمای کلی خروجی حاصل از پایداری صفحه‌ای در حالت بارگذاری شبه استاتیک.....۸۵
- ۱۲-۴ نمای کلی از بلوک بحرانی با مکانیسم لغزش صفحه‌ای در حالت مسلح به راک بولت.....۸۵
- ۱۳-۴ پارامترهای خروجی توده سنگ از نرم‌افزار Roclab.....۸۷
- ۱۴-۴: نتایج تحلیل پایداری کلی ترانسه: الف) تحلیل استاتیک ب) تحلیل شبه استاتیک.....۸۸

فصل پنجم

- ۱-۵ نمای کلی از ریزش گوه‌ای ترانسه‌های تحکیم شده.....۹۹
- ۲-۵ مدل ایجادشده در 3DEC از ترانسه سنگی برای تحلیل بلوکی.....۱۰۰
- ۳-۵ تاریخچه سرعت در راستای ۷ (تبادل اولیه).....۱۰۱

- ۴-۵ مقطع عمودی از گوه، نمایش بردارهای جابه جایی.....۱۰۱
- ۵-۵ تاریخچه سرعت در راستای z.....۱۰۲
- ۶-۵ مدل سازی ترانسه بدون درزه و لایه بندی.....۱۰۳
- ۷-۵ مدل سازی ترانسه با وارد کردن لایه بندی.....۱۰۳
- ۸-۵: تحلیل پایداری لغزش صفحه ای در حالت استاتیک.....۱۰۵
- ۹-۵: تحلیل پایداری لغزش صفحه ای در حالت دینامیک.....۱۰۶
- ۱۰-۵: خلاصه نتایج تحلیل پایداری برای مقادیر مختلف ظرفیت سیستم راک بولت.....۱۰۷
- ۱۱-۵: نمای شماتیک از نحوه قرارگیری راک بولت در طول سطح شیروانی.....۱۰۸
- ۱۲-۵: خلاصه محاسبات مربوط به آرایش و تعداد بولت برای قطرهای مختلف.....۱۰۹
- ۱۳-۵: هزینه اجرای راک بولت ها در کل ترانسه برای بولت با قطرهای مختلف.....۱۱۰
- ۸- پایداری سازی ترانسه با تقویت موضعی.....۱۱۱
- ۹-۵ نمودار جابه جایی در راستای y در نقطه (۳۰،۳۰،۳۰) روی سطح ترانسه.....۱۱۱
- ۱۱-۵ تاثیر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی درزه روی حداکثر جابه جایی گوه.....۱۱۲
- ۱۲-۵ تاثیر پارامتر چسبندگی درزه روی حداکثر جابه جایی گوه.....۱۱۳
- ۱۳-۵ تاثیر پارامتر k_n درزه روی حداکثر جابه جایی گوه.....۱۱۳
- ۱۴-۵ تاثیر پارامتر k_s درزه روی حداکثر جابه جایی گوه.....۱۱۴

فهرست جداول

صفحه

شماره عنوان

فصل دوم

- ۱-۲ مقادیر فاکتور تعدیل مربوط به جهت‌گیری‌های مختلف درزه‌ها..... ۱۶
- ۲-۲ مقادیر فاکتور تعدیل مربوط به روش حفاری..... ۱۷
- ۳-۲ رده‌بندی‌های مختلف پایداری ترانشه‌ها بر اساس مقادیر SMR..... ۱۷
- ۴-۲ روش‌های نگهداری پیشنهادی برای محدوده تغییرات مقادیر SMR..... ۱۸
- ۳-۲ محاسبه ضریب λ ۱۹
- ۶-۱ کاربرد و محدودیت روش تجربی..... ۳۸
- ۷-۲ کاربرد و محدودیت روش سینماتیکی..... ۳۸
- ۸-۲ کاربرد و محدودیت روش تعادل حدی..... ۳۹
- ۷-۲ کاربرد و محدودیت روش عددی..... ۳۹

فصل سوم

- ۱-۳ جهت داری دسته درزه‌های اصلی و لایه‌بندی..... ۵۲
- ۲-۳ مقاومت فشاری حاصل از روش بار نقطه‌ای (سنگ بکر)..... ۵۵
- ۳-۳ مقاومت فشاری حاصل از روش بار نقطه‌ای (سنگ هوازده)..... ۵۶

فصل چهارم

۱-۴ ارزیابی RMR ترانسه..... ۶۹

۲-۴ خلاصه نتایج مربوط به محاسبه اندیس SMR برای ریزش واژگونی..... ۶۹

۲-۴ خلاصه نتایج مربوط به محاسبه اندیس SMR برای ریزش صفحه‌ای..... ۷۰

۳-۴ خلاصه نتایج مربوط به محاسبه اندیس SMR برای ریزش گوه‌ای..... ۷۱

فصل پنجم

۱۳-۵ خواص مواد استفاده شده در ترانسه..... ۱۰۰

فصل اول

کلیات

۱-۱ مقدمه

در بسیاری از فعالیت‌های مهندسی، اجرای ترانشه‌های سنگی امری ضروری است. علاوه بر ترانشه-های سنگی ساخت بشر، پایداری ترانشه‌های طبیعی نواحی کوهستانی نیز اهمیت زیادی دارد که ممکن است مسیر بزرگراه و خطوط ریلی در دامنه چنین ترانشه‌هایی قرار بگیرد. به دلیل اینکه هر ترانشه‌ای دارای هندسه و مواد تشکیل‌دهنده‌ی خاص خود است، شرایط لازم برای پایداری ترانشه‌های سنگی با توجه به نوع پروژه و پیامد گسیختگی متفاوت است. منظور از پایداری یعنی ایستایی ترانشه با درجه اطمینان قابل قبول و ناپایداری ترانشه به معنی حرکت و جابجایی آن است. تعریف ناپایداری ترانشه به کاربرد آن بستگی دارد. برای مثال، برای اجرای شیب در کنار یک بزرگراه پر رفت‌وآمد، باید پایداری کلی شیب برقرار باشد و خطوط رفت‌وآمد نیز در مسیر سقوط سنگ‌ها قرار نگیرد. هم‌چنین، به‌کارگیری سیستم‌های پایدارسازی نظیر مهارسنگ لازم است و برای جلوگیری از آسیب ناشی از انفجار، این عملیات بایستی کنترل شده باشد. (سیدرضا طاهری، ۱۳۹۳)

ارزیابی پدیده‌ی شکست و جابه‌جایی شیب‌ها مشتمل بر مکانیسم‌های پیچیده‌ای بوده که باعث شده است مساله پایداری‌ها یکی از مهم‌ترین و پیچیده‌ترین مسائل مهندسی مکانیک سنگ و خاک گردد. پیشرفت در زمینه رایانه و توسعه الگوریتم‌های مختلف برای بررسی وضعیت تنش- تغییر شکل‌ها در محیط‌های مختلف، موجب شده است که روش‌های عددی جایگاهی ویژه را در مکانیک سنگ بیابند، به‌نحوی که امروز به صورت جز لاینفکی از مطالعات مکانیکی سنگی گردیده‌اند. تحلیل‌های عددی در مراحل اولیه طراحی و اجرای یک پروژه مهندسی عمران، مهندسی مکانیک، معدن و ... صورت گرفته و با پیشرفت پروژه و گذشت زمان به سمت تحلیل‌هایی تغییر می‌یابند که مختص پروژه هستند.

محدوده‌ی مطالعاتی از دهانه‌ی شمالی تونل ۱۱۵ (کیلومتر ۲۰+۲۰۳ تا کیلومتر ۲۱+۴۵) آزادراه تهران- شمال هست که این منطقه با عبور از تونل کن، سولقان، امامزاده عقیل و تونل تالون و دره لانیز به سهراهی شهرستانک می‌رسد. ترانشه‌های سنگی موجود با شیب بیش از ۴۵ درجه، در چند

ناحیه ناپایدار بوده و ریزش کرده است. لغزش بلوک‌های سنگی مسیرهای ارتباطی را تحت تاثیر قرار می‌دهد و ممکن است این حوادث موجب تلفات جانی و اقتصادی زیادی شود، بنابراین، بررسی دقیق‌تر مکانیسم ناپایداری و بهینه‌سازی سیستم پایدارسازی از موضوعات اساسی در این پروژه بوده و علاوه بر این، شرایط میدانی خاص این پروژه مانند توازی همگن درزه‌ها، صیقلی بودن سطح درزه‌ها و... بر اهمیت موضوع افزوده که در نتیجه در این پایان‌نامه بر روی این موضوع تمرکز شده است.

۱-۲ سابقه تحقیق

در این قسمت به‌طور خلاصه به‌مرور تحقیقات مشابه پرداخته می‌شود تا علت و لزوم پرداختن به تحقیق حاضر روشن گردد. گسیختگی در ترانشه‌های سنگی به شکل سقوط سنگ، زمین‌لغزش و ناپایداری کلی رخ می‌دهد. این گسیختگی‌ها با تحمیل هزینه‌های مستقیم برای خارج کردن مصالح فروریخته و پایدارسازی و هزینه‌های غیرمستقیم گوناگونی همراه‌اند. در سال ۱۹۶۳، زمین‌لغزش وینت^۱ در ایتالیا خسارت اقتصادی فراوانی به بار آورده و منجر به مرگ بسیاری شد. در طی این رویداد، حجم آب زیادی به شکل موج از روی تاج سد گذشت که سبب ویرانی پنج روستا و مرگ حدود دویست نفر گردید (Kiersch, 1963) مولر^۲، در سال ۱۹۶۸ برای نخستین بار با بررسی ناپایداری‌های مشرف به دریاچه سد معروف وینت ایتالیا چرخش بلوک‌های سنگی طبیعی را مطرح نمود (Muller, 1968). در ادامه اشبای^۳ در سال ۱۹۷۱ بر مبنای مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و تئوری، معیار ساده‌ای برای ارزیابی شکست صفحه‌ای و واژگونی ارائه داد و این محقق اولین بار نام واژگونی را برای چرخش بلوک‌های سنگی ارائه داد (Ashby, 1971).

پایتیو^۴ در سال ۱۹۷۲ از اولین کسانی می‌باشد که در مورد اهمیت ساختار در پایداری ترانشه‌های سنگی در میان محققین مختلف بحث کرده است و پیشنهاد کرد که اصل تعیین‌کننده در پایداری

^۱ Vaiont

^۲ Muller

^۳ Ashby

^۴ Piteau

ترانشه‌های سنگی وجود ناپیوستگی در ساختمان توده‌سنگ می‌باشد و مقاومت ذاتی سنگ تاثیر کمتری دارد (Piteau, 1972)

در سال ۱۹۷۹ کاندال^۱ و استرک^۲ با توسعه روش المان مجزا برای پایداری ترانشه گام مهمی در این راستا برداشت. به‌منظور بررسی فرآیندهای شکست و مکانیسم ترانشه‌های سنگی درزه‌دار، روش المان مجزا (Different Element Method) DEM را انتخاب کرد. چون ظرفیت مدل‌سازی مواد ناهمگن و ناپیوسته و روش محاسبه کارآمد تغییر شکل‌های بزرگ را داشت و ارتباط رفتاری بین دو مکانیسم ماکروسکوپی و میکروسکوپی را نشان می‌داد.

اما سرآغاز اصلی پژوهش‌ها در زمینه بهینه‌سازی تسلیح ترانشه‌های سنگی توسط یانگ^۳ در سال ۲۰۰۶ ارائه شده است. این محقق مطالعات فوق را بر روی ترانشه سنگی در چین با ارتفاع ۱۶۵ متر در حین اجرای پروژه انجام داد. در پروژه مورد مطالعه این محقق طی عملیات حفر و مسلح کردن ترانشه سنگی تغییراتی در هندسه ترانشه، توده‌های سنگ و خواص آن به وجود آمده بود که این تغییرات باعث ناپایداری بعضی از مناطق ترانشه سنگی مورد نظر شده بود. بنابراین مناطقی که ناپایدار شده بودند نیاز به تسلیح بیشتر داشتند. مناطق بحرانی با توجه به خواص ژئومکانیکی لایه‌ها و اندازه‌گیری تغییر مکان مناطق مختلف در محل شناسایی شده و مسلح سازی این مناطق با تراکم بیشتری صورت گرفت. در نهایت در پروژه فوق میزان تراکم اجزای تسلیح کننده در مناطق ناپایدار افزایش یافت (Yang, 2006)

در سال ۱۳۸۱ یازرلو و همکاران به بررسی پایداری ترانشه‌های گود نیروگاه کوه‌رنگ ۲ با استفاده از روش‌های تعادل حدی و روش‌های عددی پرداختند که با استفاده از مشخصات تنش و کرنش مواد تشکیل‌دهنده شیب، توزیع تنش و جابه‌جایی در شیب را به دست آوردند که از رابطه الاستو پلاستیک موهر - کلمب به‌عنوان رابطه بنیانی توصیف‌کننده تنش - کرنش مصالح تشکیل‌دهنده ترانشه‌ها استفاده

^۱ Cundall

^۲ Strack

^۳ Yang

شد و استفاده از میل‌مهاری^۱ جهت تقویت پای شیب‌ها به‌خصوص در ترازهای پایین‌گود که بستر سنگی وجود دارد به‌منظور اطمینان بیشتر، پیشنهاد شد.

فردلند^۲ و همکاران در سال ۲۰۱۱ طراحی و تحلیل پایداری ترانشه معدن کوستا مالی کروپ^۳ باهدف تحلیل اثرات هوازگی در طراحی و تحلیل پایداری ترانشه با استفاده از مدل‌سازی عددی انجام دادند. تمرکز مطالعات او بررسی اثر لایه‌های ضعیف نازک و هوازده بر پایداری ترانشه بوده که نتایج مدل‌سازی عددی او نشان داد که زاویه کلی ترانشه معدن ۳۷٫۵ درجه می‌باشد ولی برای لایه ضعیف به علت تاثیر در مقاومت برشی موثر لایه، زاویه ترانشه باید در حدود ۲۰-۲۳ درجه کاهش یابد.

۳-۱ ضرورت انجام تحقیق

مخاطرات محیطی ممکن است که منشا انسانی یا طبیعی داشته باشد و یا ناشی از تاثیر متقابل بین انسان و محیط باشند، برخی از آنها نیز به ساخت‌وسازهای بشری (از جمله جاده، مناطق مسکونی و...) همراه شوند و تولید خسارت کنند، تبدیل به بحران می‌شوند جاده‌ها جزئی از توسعه تمدن بوده و زیربنای فعالیت‌های اقتصادی و زندگی مدرن را تشکیل می‌دهند. ناپایداری در ترانشه سنگی، بسته به نوع آن و مقدار انرژی حرکتی توده‌های ناپایدار می‌تواند خسارات قابل توجه و جبران‌ناپذیری را به محیط اطراف آن وارد آورد. علاوه بر آن حرکت یک توده ناپایدار به اشکال مختلف، می‌تواند به حرکت توده‌های دیگر منجر شود که انرژی بیشتری داشته و در نتیجه پایداری و ایمنی کل محیط موردنظر را به خطر اندازد. دیگر تهدیدی که در ترانشه‌های سنگی مرتبط با پروژه‌های مهندسی عمران، معدن، محیط‌زیست و... وجود دارد، پتانسیل‌های تغییر شکل‌های تدریجی است که به گذشت زمان به حرکت‌های سریع تبدیل می‌شوند.

در بررسی وضعیت این‌گونه توده‌های ناپایدار و در بیشتر مواردی که در حوزه مکانیک سنگ

¹ anchoring

² Fredlund

³ Questa Molycrop

می‌باشند، دانش تجربی و قضاوت مهندسی نقش‌های اساسی را ایفا می‌کنند. پیشرفت در زمینه رایانه و توسعه الگوریتم‌های مختلف برای بررسی وضعیت تنش- تغییر شکل‌ها در محیط‌های مختلف، موجب شده است که روش‌های عددی جایگاهی ویژه را در مکانیک سنگ بیابند. ناپایداری دامنه‌ها و لغزش‌های سنگی همواره از خطرات اصلی در مسیر جاده‌ها در مناطق کوهستانی بوده و خسارت‌های جانی و مالی فراوانی را به همراه داشته است. در این پژوهش به دلیل وقوع این پدیده (لغزش سنگی) در آزادراه تهران- شمال (قطعه ۱) به تحلیل پایداری ترانشه‌های سنگی دارای سطوح ناپیوستگی پرداخته می‌شود. مهم‌ترین نقطه ضعف یک توده سنگ، شکستگی‌ها و سطوح ناپیوستگی است، که در فرآیند تحلیل توده‌های سنگی مورد تحلیل قرار می‌گیرد. بنابراین رفتار مکانیکی توده سنگ‌های درزه‌دار، به میزان زیادی از رفتار سطوح ناپیوستگی و شکستگی‌ها می‌باشد. ارزیابی پایداری دامنه‌های درزه‌دار، بدون در نظر گرفتن نقش این سطوح ضعف، تحلیلی غیرواقعی خواهد بود.

قطعه ۱ آزادراه تهران- شمال بخشی از آزادراه تهران- شمال است که قرار است شهر تهران را به شهرهای غربی استان مازندران متصل کند و جایگزین مسیر جاده چالوس به سمت شمال می‌شود که با اجرای آن صرفه‌جویی قابل توجهی در مصرف سوخت، استهلاک و وقت مسافران می‌شود، در این مسیر با توجه شرایط ویژه زمین ساختاری (توازی همگن درزه‌ها، صیقلی بودن سطوح درزه تاو ...) و وقوع چند ریزش گوه‌ای، بررسی موضوع با روش‌های جدید تحلیلی و عددی دارای اهمیت بسیار زیادی هست.

۴-۱ روش تحقیق

امروزه، دامنه گسترده‌ای از ابزارهای تحلیل پایداری دیواره‌های شیب‌دار، هم برای شیب‌های سنگی و هم شیب‌های مخلوط خاکی، سنگی وجود دارد که از روش تعادل حدی در شیب‌های ساده نامحدود و گسیختگی صفحه‌ای تا روش‌های عددی مانند اجزای محدود (Finite Element)، تفاضل محدود (Finite Difference) و ... است.

اولین گام در مرحله شناسایی مقدماتی پروژه، با توجه به ضروریات آن، شناسایی نواحی با خواص زمین شناسایی یکسان انجام شد. مرحله بعدی برداشت داده‌های زمین‌شناسی که مهم‌ترین بخش آن، اطلاعات مربوط به زمین‌شناسی ساختمانی هست که در این تحقیق ابتدا درزه نگاری انجام شده و وضعیت ناپیوستگی‌های منطقه تحلیل گردیده و در نتیجه آن دسته‌درزه‌های اصلی مشخص شده است سپس آزمایش‌های مختلف بر روی سنگ بکر و آزمایش برش مستقیم بر روی درزه‌ها انجام شده و پارامترهای فیزیکی و مکانیکی توده سنگ (مانند چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) تعیین شده است. سپس با استفاده از روش SMR بحرانی‌ترین وضعیت پایداری از نظر ریزش صفحه‌ای، گوه‌ای و واژگونی برای دسته‌درزه‌ها و لایه‌بندی مورد ارزیابی قرار گرفته شد.

بعد از آن با استفاده از روش سینماتیکی امکان وقوع ریزش را در ترانسه بر اساس وضعیت هندسی و پارامترهای مشخصه صفحات ترانسه و شکست پیش‌بینی شده است. در ادامه با استفاده از روش تعادل حدی نیروهای وارد بر سطح شکست را بررسی کرده و با تقسیم نیروهای مقاوم بر نیروهای محرک ضریب ایمنی سطح لغزش محاسبه می‌شود. اگر ضریب ایمنی بزرگ‌تر از یک باشد، توده موردنظر پایدار و اگر کوچک‌تر از یک باشد، ناپایدار است و در حالتی که برابر یک گردد، توده موردنظر حالتی بحرانی یا حدی خواهد داشت.

به منظور مدل‌سازی ترانسه‌های منطقه اطلاعات به دست آمده از مراحل قبل مانند انواع ناپیوستگی و تعیین وضعیت ناپایداری آن‌ها، بررسی امتداد، شیب، فاصله‌داری و تداوم‌یافتگی، زبری و خصوصیات مکانیکی و ذاتی سنگ بکر، مقادیر چسبندگی، ضریب اصطکاک، مقاومت فشاری و برشی و... بر اساس آن مدل‌سازی عددی صورت می‌گیرد. نتایج حاصل از مدل‌سازی تفسیر و تحلیل شده و با نتایج روش‌های سینماتیکی و تحلیلی مقایسه می‌شود در این تحقیق از نرم‌افزار 3DEC که یک نرم‌افزار بر پایه روش المان مجزا بوده، استفاده شده است تا تحلیل پایداری ترانسه‌ها مورد بررسی قرار گیرد. در این تحلیل ابتدا تحلیل بلوکی صلب انجام می‌شود، حرکت صلب بلوک هیچ‌گونه کرنشی درون بلوک

ایجاد نمی‌کند، اما موجب جابجایی بلوک تشکیل‌شده می‌شود، که این جابجایی اغلب در مقیاس بزرگ می‌باشد و برای تشخیص مکانیسم‌های بزرگ ترانشه بسیار مفید می‌باشد. در انتها الگوی پایدارسازی برای ترانشه مورد بررسی پیشنهاد می‌شود.

۵-۱ ساختار پایان‌نامه

این پایان‌نامه در شش فصل تدوین شده است. فصل اول شامل کلیاتی راجع به موضوع، هدف مطالعه و روش تحقیق می‌باشد. در فصل دوم به مبانی و سابقه هریک از روش‌های تحلیل پایداری پرداخته و در آخر فصل محدودیت‌ها و کاربردهای هریک از روش‌ها جمع‌بندی می‌شود. در فصل سوم بعد از معرفی پروژه و زمین‌شناسی آن، نسبت به معرفی آزمایش‌های مکانیک سنگ اقدام می‌شود و در انتها با معیار بارتن مقایسه و سپس جمع‌بندی می‌شود.

در فصل چهارم تحلیل پایداری با روش‌های مختلف تجربی، سینماتیکی، تعادل حدی مورد بررسی قرار می‌گیرد و در فصل پنجم به روش عددی پرداخته می‌شود که در قسمت روش‌های عددی ابتدا سعی شده است که چگونگی ساخت یک مدل عددی به روش المان مجزا تشریح شود. در ادامه به تحلیل صلب از ترانشه‌ها پرداخته شده است. یک چنین تحلیل صلبی می‌تواند اطلاعات جامعی در مورد وضعیت ناپیوستگی‌های عمده را به دست دهد.

روش عددی المان مجزا که بر اساس مفاهیم مکانیک سنگ استوار می‌باشد، به خوبی می‌تواند تاثیر دسته‌درزه‌ها را بر چنین مناطقی آشکار سازد. قابلیت‌های روش المان مجزا این امکان را در اختیار قرار می‌دهد که کمیت و کیفیت پارامترهای مختلف ناپایداری مانند جابجایی، ازهم‌گسیختگی و... را در چنین مواردی مشخص ساخته است و در فصل ششم نتایج و پیشنهادها ارائه می‌گردد.

فصل دوم

مبانی نظری و سابقه

تحقیق

۱-۲ مقدمه

پایداری ترانشه‌ها یکی از مهم‌ترین مسائل در فعالیت‌های عمرانی و معدنی است و تحلیل پایداری ترانشه‌های سنگی به سمت‌وسوی طراحی بنیادی و ایمن ترانشه‌های حفر شده (مانند برش-های جاده‌ای و ...) و با شرایط تعادلی شیب‌های طبیعی جهت داده می‌شود و هرگونه تحلیل نادرست می‌تواند به خسارات جبران‌ناپذیری منجر شود. با توجه به اینکه روش‌های مختلفی در تحلیل پایداری ترانشه‌های سنگی وجود دارد انتخاب بهترین روش برای تحلیل پایداری از اهمیت شایانی برخوردار است چراکه ممکن است انتخاب روش نادرست به نتایج غلط بینجامد. در کشور ما در گذشته به این موضوع اهمیت زیادی داده نمی‌شد، درحالی‌که طی چند سال اخیر توجه گسترده‌ای به این موضوع شده است. در گذشته اکثر طراحی‌ها بر اساس موارد مشابه انجام می‌شد در صورتی‌که هر محیط دارای خصوصیات و پارامترهای رفتاری خاص خود است و طراحی‌ها باید با در نظر گرفتن چنین خواصی انجام گیرد تا بتواند به نتایج قابل قبولی دست یابد درحالی‌که انتخاب روش صحیح پایداری شیب-ها، به محیط و پارامترهای ژئومکانیکی شیب و همچنین انتخاب روش مناسب تحلیل بستگی دارد. امروزه، دامنه گسترده‌ای از ابزارهای تحلیلی پایداری ترانشه‌های سنگی از روش تجربی و تعادل حدی در شیب‌های ساده و گسیختگی صفحه‌ای تا روش‌های عددی مانند اجزای محدود^۱، تفاضل محدود^۲ و ... وجود دارد (داویدیان، ۱۳۸۹). ترانشه‌ها و توده‌های سنگی ناپیوسته و سست همواره در معرض ناپایداری و لغزش‌های موضعی و یا کلی قرار دارند. وجود درزه‌ها و ناپیوستگی‌ها در ترانشه‌های سنگی ناهمگن یکی از دلایل اصلی لغزش و ناپایداری ترانشه‌های سنگی محسوب می‌شود (Singh, 2011).

۲-۲ انواع اصلی شکست بلوک در شیب‌ها

وقوع ناپایداری در شیب‌های سنگی، معمولاً به دلیل ایجاد عدم تعادل بین نیروهای وارد بر توده در راستای سطح شیب ایجاد می‌شود. عامل حرکت بلوک، نیروی جاذبه و دلیل حرکت، قرارگرفته بلوک

¹ Finite element

² Finite difference

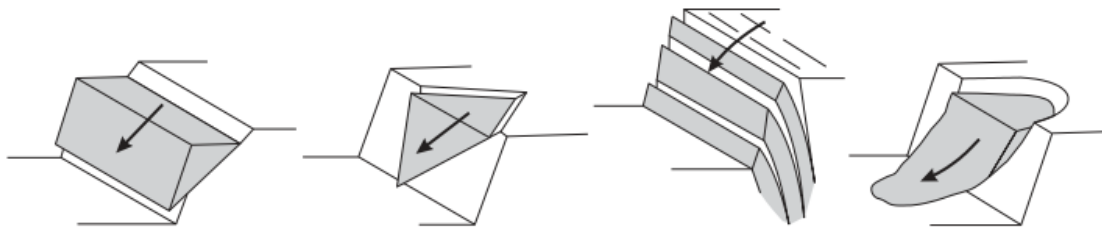
در یک حالت ناپایدار است. در حقیقت، نیروهای وارد بر یک بلوک بر روی یک سطح شیب‌دار را می‌توان به دو بخش نیروهای مقاوم در برابر جابه‌جایی و نیروهای ایجادکننده جابه‌جایی تقسیم کرد. هرگونه تغییر در این تعادل و بیشتر شدن نیروهای ایجادکننده نسبت به نیروهای مقاوم در برابر جابه‌جایی باعث ایجاد ناپایداری و وقوع ریزش می‌شود. عدم تعادل در این نیروها باعث بروز انواع مختلفی از ناپایداری شده که بر اساس نوع عدم تعادل نیروها، مکانیسم مختلفی از ریزش مطابق شکل ۴-۱ خواهد بود (شریعت جعفری و همکاران، ۱۳۷۵).

الف) شکست دایره‌ای^۱ در سنگ خیلی ضعیف

ب) شکست واژگونی^۲ در سنگ قوی حاوی شیب درزه در جبهه شیب

ج) شکست گوه‌ای^۳ در دو ناپیوستگی متقاطع

د) شکست صفحه‌ای^۴ در سنگ حاوی درزه خارج از جبهه شیب



شکل ۱- انواع اصلی شکست بلوک در شیب‌های سنگی (شریعت جعفری و همکاران، ۱۳۷۵)

در این فصل کلیات تحلیل پایداری شیب‌های سنگی برحسب دقت روش در چهار بخش تجربی، سینماتیکی، تعادل حدی و عددی مورد بررسی قرار می‌گیرد، سپس به مقایسه بین چهار روش پرداخته می‌شود.

¹ Direct Failure
² Toppling Failure
³ Wedge Failure
⁴ Plan Failure

۲-۳ روش تجربی

در روش تجربی رده‌بندی توده‌سنگ شاکله اصلی طراحی ترانشه‌های سنگی بوده و به‌طور وسیع در مهندسی سنگ به‌کار گرفته شده است. در سال‌های اخیر، رده‌بندی روده‌سنگ کاملاً عمومی شده و در طراحی‌های عملی استفاده می‌گردد و به تجربه ثابت شده است که اگر رده‌بندی یک توده‌سنگ به‌دقت صورت گیرد، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار موثر در طراحی‌ها به‌کار گرفته شود و در بسیاری از پروژه‌ها، رده‌بندی پایه و اساس طراحی سازه‌های پیچیده می‌باشد. هدف اصلی استفاده از روش‌های تجربی (بر اساس رده‌بندی‌های توده‌سنگ) ساده‌سازی و مدیریت مجهولات است. در هر سیستم طبقه‌بندی کمی، کمترین امتیاز به ضعیف‌ترین توده سنگ و بیشترین امتیاز به توده سنگ بسیار خوب داده می‌شود بنابراین در یک طبقه‌بندی، هر پارامتر نقش مهمی در تغییر امتیازها بازی می‌کند و بسیاری از طبقه‌بندی‌ها در هر دو شرایط سنگ ضعیف و سنگ بسیار خوب، دقت کافی برخوردارند اما ممکن است در شرایط سنگ متوسط، اعتبار آن‌ها کم شود. باید پذیرفت که هیچ طبقه‌بندی به‌تنهایی برای تعیین تمام پارامترهای سنگ کار آیی ندارد بنابراین تجربه، مبنایی برای طبقه‌بندی پارامترهای سنگ هست. مجهولات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی را می‌توان به‌طور موثری با استفاده از رده‌بندی‌های مناسب مشخص نمود، بنا به دلایل زیر، استفاده از سیستم‌های رده‌بندی کمی توده سنگ در کشورهای مختلف به‌کاررفته و نتایج رضایت‌بخشی را در برداشته است:

(الف) ارتباط بهتری را بین زمین‌شناسان، طراحان و مهندسان فراهم می‌آورد.

(ب) با مشاهدات، تجربه و قضاوت مهندسان منطبق گردیده و درعین حال به‌صورت یک سیستم رده‌بندی کمی و مؤثر پایه‌گذاری شده است.

(ج) مهندسان اعداد را بر توصیف ترجیح می‌دهند، بنابراین یک سیستم رده‌بندی کمی جهت ارزیابی جامع از کیفیت توده‌سنگ کاربرد قابل‌توجهی دارد.

(د) رده‌بندی ابزار کمکی برای نظم دادن به علم می‌باشد

رده‌بندی توده سنگ به‌طور موفقیت‌آمیزی در تونل‌سازی و معدنکاری زیرزمینی مورد استفاده قرار گرفته است و برخی از رده‌بندی از جمله رده‌بندی که به‌وسیله بنیادسکی و رومانو ابداع شده است، برای ترانسه‌های سنگی نیز پیشنهاد شد (اجل لوئیان، ۱۳۸۲).

۲-۳-۱ رده بندی RMR در پایداری شیروانی‌های سنگی

در سال ۱۹۷۳ بنیادسکی رده‌بندی ژئومکانیکی یا سیستم رده‌بندی توده سنگ (RMR) برای اولین بار در انجمن تحقیقات علمی و صنعتی (CSIR) آفریقای جنوبی و بر اساس تجربیاتش در تونل‌های کم‌عمق اجرا شده در سنگ‌های رسوبی معرفی شد. از آن زمان به بعد این رده‌بندی دچار چندین تغییر اساسی شده است: کاهش پارامترهای رده‌بندی از ۸ مورد به ۶ مورد (سال ۱۹۷۴)، تعدیل رده‌بندی و کاهش ابزارهای نگهدارنده پیشنهاد شده (سال ۱۹۷۵) و غیره. بنابراین زمانی که مقادیر RMR نقل می‌شوند ذکر نسخه‌ای که استفاده می‌گردد مهم است. در این پایان‌نامه به رده‌بندی ژئومکانیکی گزارش شده از بنیادسکی (۱۹۸۴) اشاره می‌شود. شش پارامتر زیر برای هر واحد ساختاری تعیین می‌گردد:

۱- مقاومت فشاری تک‌محوری ماده سنگ (سنگ بکر)

۲- شاخص کیفی سنگ (RQD)

۳- فاصله ناپیوستگی‌ها^۱

۴- وضعیت ناپیوستگی‌ها

۵- وضعیت آب زیرزمینی

۶- جهت‌یابی ناپیوستگی‌ها^۲

امتیازات پنج پارامتر بالا (۱-۵) از جدول‌های ارائه شده توسط بنیادسکی با هم جمع می‌شوند تا

RMR پایه به دست آید (RMR_{basic}).

¹ Joint Spacing

² Joint Orientation

مقاومت سنگ بکر یکی از پارامترهای ورودی روش RMR است و تنها عاملی است که به‌طور محدود به پایداری ترانشه‌های سنگی دخالت دارد که در اغلب آن‌ها شکست به مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها مربوط می‌شود، بستگی دارد، برخی اوقات در نتیجه وجود تعداد زیادی از ناپیوستگی‌ها در سنگ‌های شکسته شده، یک توده سنگ مقاومت سنگ بکر پایینی دارد، با این وجود هدف از انضمام مقاومت سنگ بکر در رده‌بندی ترانشه‌ها، به دست آوردن شاخصی از مقاومت سنگ دیواره ناپیوستگی‌هاست.

پارامتر RQD و فاصله‌داری ناپیوستگی که مربوط به خصوصیات توده سنگی باشد که شکل و اندازه بلوک‌ها را مشخص می‌کنند، این پارامترها برای تحلیل پایداری ترانشه‌ها نیز بسیار مفید می‌باشند بنابراین این دو پارامتر به‌عنوان پارامترهایی با مقادیر معنی‌دار در طبقه‌بندی توده سنگ، خصوصا برای ترانشه‌های ایجادشده در توده‌های سنگی با درزه‌های نزدیک به هم، مورد توجه خاص قرار می‌گیرند.

وضعیت ناپیوستگی شامل مواردی از قبیل زبری، تداوم، مواد پرکننده، بازشدگی و درجه هوازدهی است. در مورد ترانشه‌های سنگی تداوم ناپیوستگی تاثیر قابل توجهی بر روی پایداری و رده‌بندی RMR دوام را به‌عنوان یک عامل کمی مورد محاسبه قرار می‌دهد. همچنین اثرات هوازدهی بر روی وضعیت ناپیوستگی‌ها و فاصله‌داری آن‌ها و نحوه‌ی عملکرد هوازدهی که خصوصیات منطقه‌ای از توده سنگ را در محدوده خاصی تغییر می‌دهد. در طول عمر یک ترانشه ایجادشده، هوازدهی‌هایی که در آینده رخ خواهد داد، ممکن است بروز ناپایداری در ترانشه گردد. بنابراین پارامتر وضعیت ناپیوستگی که در رده‌بندی RMR ملحوظ می‌شود، عامل بسیار مهمی در پایداری ترانشه می‌باشد.

در مورد پارامتر آب زیرزمینی، فشار آب از طریق کاهش مقاومت برشی سطوح گسیختگی محتمل و همچنین فشار آب جمع شده در ترک‌های کششی یا شکاف‌های نسبتا قائم با افزایش نیروهای لغزنده، سبب کاهش پایداری می‌گردد. تغییر میزان رطوبت در برخی سنگ‌ها به‌ویژه شیل، سبب

تسریع هوازدگی و کاهش مقاومت سنگ می‌شود. بنابراین پارامتر آب زیرزمینی، که در رده‌بندی RMR لحاظ می‌شود، عامل بسیار مهمی در پایداری ترانشه می‌باشد.

روش RMR که بیشتر شرایط ساختمانی بر رفتار توده سنگ حاکم هست اما به این نکته باید توجه شود که بایستی مطمئن شد یک پارامتر دو بار در آنالیز ساختارهای سنگی و تخمین امتیاز توده سنگ مورد محاسبه قرار نگیرد، برای مثال اگر جهت‌یابی دسته‌درزه‌ها در آنالیز پایداری ترانشه‌های سنگی بررسی شده است، نبایستی آن را برای RMR مجدداً محاسبه کرد بنابراین در روش‌های بعدی RMR_{basic} به‌عنوان پایه روش‌ها در نظر گرفته شد. این روش برای تحلیل پایداری ترانشه توسط چند محقق مورد استفاده قرار گرفته است

۲-۳-۲ رده بندی SMR در پایداری شیب‌های سنگی

در سال ۱۹۸۵ رومانا به منظور بررسی پایداری شیب‌های سنگی یک سیستم امتیاز توده شیب (SMR) را پیشنهاد نمود. در این روش پس از تعیین RMR_{basic} ، فاکتورهای تعدیل ارتباط شیب-درزه از آن کاسته و فاکتور مربوط به روش حفاری به آن اضافه می‌گردد.

$$SMR = RMR_{basic} - (F_1 \cdot F_2 \cdot F_3) + F_4 \quad \text{رابطه ۲-۱}$$

که RMR_{basic} مطابق روش بنیادسکی، از مجموع امتیازات مربوط به پنج پارامتر (مقاومت فشاری تک‌محوری، RQD، شرایط و فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها و وضعیت آب‌های زیرزمینی) تعیین می‌گردد. F_1 ، F_2 و F_3 فاکتورهای تعدیل با توجه شیب و امتداد درزه نسبت به شیب و امتداد شیب می‌باشد و F_4 فاکتور تصحیح مربوط به روش حفاری می‌باشد. این فاکتورها به صورت زیر تعریف شده‌اند:

F_1 : به موازی بودن امتداد درزه‌ها و امتداد شیب بستگی دارد. مقدار F_1 بین ۰/۱۵ تا ۱ تغییر می‌کند. در مواردی که زاویه بین صفحه درزه بحرانی و سطح ترانشه بیش از ۳۰ درجه و احتمال شکست بسیار کم است این مقدار برابر ۰/۱۵ می‌باشد، درحالی‌که وقتی هر دو موازی باشند این مقدار به ۱ می‌رسد. (اجل لوئیان، ۱۳۸۲)

F_2 : به زاویه شیب درزه (β_j) در شکست صفحه‌ای اشاره می‌کند. این عامل هم بین ۰/۱۵ تا ۱ تغییر می‌کند. اگر شیب درزه بحرانی کمتر از ۲۰ درجه باشد مقدار F_2 برابر ۰/۱۵ می‌باشد و زمانی که شیب درزه بیش از ۴۵ درجه باشد مقدار این پارامتر ۱ خواهد بود. در شکست واژگونی، F_2 برابر ۱ خواهد بود.

F_3 : نشان‌دهنده ارتباط بین سطح شیب و شیب درزه است. در شکست صفحه‌ای، F_3 نشانگر احتمال ظاهر شدن درزه‌ها در سطح ترانشه است و در شکست واژگونی، نامساعد بودن وضعیت به مجموع شیب درزه‌ها و شیب ترانشه بستگی دارد. مقادیر ضرایب تصحیح F_1 ، F_2 و F_3 برای جهت‌گیری‌های مختلف درزه‌ها در جدول ۱-۲ آورده شده است.

جدول ۱-۲: مقادیر فاکتور تعدیل مربوط به جهت‌گیری‌های مختلف درزه‌ها (اجل لوئیان، ۱۳۸۲)

بسیار نامساعد	نامساعد	متوسط	مساعد	بسیار مساعد	نوع شکست ترانشه	
$5 <$	۱۰-۵	۲۰-۱۰	۳۰-۲۰	$30 >$	$ \alpha_j - \alpha_s $ $ \alpha_j - \alpha_s $ $- 180$ $ \alpha_i - \alpha_s $	P T W
۱/۰	۰/۸۵	۰/۷۰	۰/۴۰	۰/۱۵	F_1	P/W/T
$45 >$	۴۰-۳۵	۳۵-۳۰	۳۰-۲۰	$20 <$	$ \beta_j $ $ \beta_i $	P W
۱/۰	۰/۸۵	۰/۷۰	۰/۴۰	۰/۱۵	F_2	P/W
۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	۱/۰	F_2	T
$-10 <$	$(-10) - 0$	۰	۱۰-۰	$10 >$	$ \beta_j - \beta_s $ $ \beta_i - \beta_s $	P W
..	..	> 120	۱۲۰-۱۱۰	$110 <$	$ \beta_j + \beta_s $	T
-۶۰	-۵۰	-۲۵	-۶	۰	F_3	P/W/T

توجه: P: شکست صفحه‌ای، T: شکست واژگونی، W: شکست گوه‌ای، α_s : امتداد شیب، α_j : امتداد

درزه، α_i : امتداد خط فصل مشترک، β_s : شیب ترانشه، β_j : شیب درزه، β_i : شیب خط فصل

مشترک

F_4 : مربوط به تصحیح روش حفاری است. این عامل شامل شیب طبیعی یا حفاری شیب‌ها به روش‌های پیش شکافی، آتش‌کاری ملایم، آتش‌کاری ضعیف و حفاری مکانیکی است. (نحوه امتیازدهی F_4 در جدول ۲-۲ ارائه شده است)

جدول ۲-۲: مقادیر فاکتور تعدیل مربوط به روش حفاری (اجل لوئیان، ۱۳۸۲)

مقدار F_4	روش حفاری
۱۵	شیب طبیعی
۱۰	پیش شکافتی
۸	آتش‌کاری آرام
۰	آتش‌کاری نرمال یا حفاری مکانیزه
-۸	آتش‌کاری ضعیف

رومانا (۱۹۸۵)، بر اساس مقادیر مختلف SMR، چگونگی پایداری شیب‌ها را به ۵ رده تقسیم کرده در جدول ۳-۲ توصیف شده است.

جدول ۳-۲: رده‌بندی‌های مختلف پایداری ترانشه‌ها بر اساس مقادیر SMR (اجل لوئیان، ۱۳۸۲)

شماره رده	I	II	III	IV	V
مقدار SMR	۲۰-۰	۴۰-۲۱	۶۰-۴۱	۸۰-۶۱	۱۰۰-۸۱
توصیف توده‌سنگ	بسیار بد	بد	معمولی	خوب	بسیار خوب
پایداری	کاملاً ناپایدار	ناپایدار	به‌طور جزئی پایدار	پایدار	کاملاً پایدار
گسیختگی‌ها	شکست صفحه‌ای بزرگ یا دایره‌ای	صفحه‌ای یا گوه‌ای بزرگ	صفحه‌ای یا گوه‌ای در امتداد برخی از درزه‌ها	بعضاً شکست گوه‌ای	بدون شکست
احتمال گسیختگی	۰/۹	۰/۶	۰/۴	۰/۲	۰

امتیاز SMR به‌طور موفقیت‌آمیزی برای پهنه‌بندی زمین‌لغزش‌ها در نواحی سنگی به کاررفته است.

در محل‌هایی که مقدار SMR، کمتر از ۴۰ می‌باشد، مطالعات دقیق‌تری می‌بایست صورت گیرد، زیرا

در چنین مناطقی جان و مال ساکنین آن در خطر بوده و باید شیب‌ها را پایدار نمود. در غیر این صورت، یک زاویه برش قابل اطمینان باید انتخاب گردد تا مقدار SMR به ۶۰ برسد.

روش‌های اصلاحی بسیاری جهت نگهداری یک شیب به کار برده می‌شود. هم مطالعه در جزئیات و هم تجربیات خوب مهندسی، هر دو جهت پایداری یک ترانشه لازم است. سیستم‌های رده‌بندی فقط می‌توانند به تکنیک‌های معمولی اشاره نمایند که محدوده تغییرات SMR، برای هر گروه از روش‌های نگهداری به صورت زیر است:

جدول ۲-۴: روش‌های نگهداری پیشنهادی برای محدوده تغییرات مقادیر SMR (اجل لوئیان، ۱۳۸۲)

مقادیر SMR	نوع نگهداری پیشنهادی
۱۰۰-۶۵	بدون نگهدارنده، لق گیری
۷۵-۳۰	بولت گذاری، مهار گذاری
۶۰-۲۰	شاتکریت، بتن
۳۰-۱۰	احداث دیواره، حفاری مجدد

۲-۳-۳ رده‌بندی CSMR در پایداری ترانشه‌های سنگی

در سال ۲۰۰۴ توماس^۱ و همکاران به منظور بررسی پایداری شیروانی‌های سنگی سیستم امتیاز توده شیب پیوسته (CSMR) را پیشنهاد نمودند (Tomas, 2006).

رابطه CSMR در حالت کلی مانند رابطه SMR است که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\text{CSMR} = \varepsilon \cdot \text{RMR}_{\text{basic}} - \lambda \cdot F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 + F_4 \quad \text{رابطه ۲-۳}$$

در رابطه CSMR تعدیلات F_1 ، F_2 و F_3 از یک تابع پیوسته به دست می‌آید و مقادیرشان دقیق‌تر و منحصر به فرد است. ضریب ε وابسته به مقدار شیب (H) هست و از رابطه زیر به دست می‌آید.

^۱ Tomas

ضریب λ (بدون بعد) از جدول ۲-۳ به دست می‌آید. (صابری منصور، ۱۳۹۲)

$$\varepsilon = 0.57 - \frac{34.4}{H}$$

رابطه ۲-۴

جدول ۲-۵- محاسبه ضریب λ (صابری منصور، ۱۳۹۲)

λ	وضعیت درزه
۱	گسل، درزه پر شده با رس
۰/۸-۰/۹	بستر مسطح، درزه‌های بزرگ- مقیاس کنده شده
۰/۷	اتصال بین درزه‌ها مقاوم باشد

۲-۳-۴ مطالعه موردی روش‌های تجربی

یومارو^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از روش RMR^۲، SMR^۳، CSMR^۴ و تحلیل سینماتیکی به تحلیل پایداری ترانشه‌های سنگی در فاصله ۲۰ کیلومتری بین رودراپرایاگ^۵ و آگاست میونا^۶ واقع در کوهستان‌های هیمالیا پرداختند. بر اساس مشاهدات میدانی و تغییرات زمین‌شناسی و شرایط ژئوتکنیکی، پنج مکان با روش CSMR برای تحلیل پایداری ترانشه و همچنین از تحلیل سینماتیکی برای ارزیابی انواع شکست و مکان‌های پتانسیل شکست پنج مکان استفاده شد. نتایج حاصل از آن نشان داد رده‌بندی توده‌سنگ‌ها ابزار بسیار مهمی برای ارزیابی خصوصیات توده‌سنگ‌ها به‌ویژه برای شناسایی مکان‌های آسیب‌پذیر شیروانی هست. روش طبقه‌بندی CSMR به نظر می‌رسد به ویژگی‌های شیروانی حساس‌تر باشد و بازده ارزش امتیاز بهتری نسبت به SMR است. نتایج حاصل از CSMR تطابق نزدیک‌تری با مشاهدات میدانی دارد. این روش ممکن است برای بررسی سریع شیروانی مفید باشد (Umaro, 2011).

¹ Umaro

² Rock mass rating

³ Slop mass rating

⁴ Countinuous Slop mass rating

⁵ Rudraprayag

⁶ Agastmuni

ماهان تا^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۶ برای ارزیابی پتانسیل شکست ترانشه‌های سنگی بزرگراه لوه‌ری^۲ در کوهستان هیمالیا واقع در هند در شش مقطع با استفاده از روش SMR مطالعاتی را انجام دادند. در مقاطع L₁، L₄، L₃، L₅ رده‌بندی معمولی، L₂ رده‌بندی خوب، L₆ در رده‌بندی بد قرار گرفت. البته شرایط ژئوتکنیکی و هندسی هم در شکست نقش دارند و امکان شکست‌های بزرگ در مقطع‌های در رده‌بندی معمولی هم وجود دارد. در آخر مشاهدات میدانی و مدل‌سازی عددی نشان داد نتایج روش SMR از انطباق زیادی برخوردار است در ترانشه‌های سنگی که دو یا سه دسته‌درزه اصلی وجود دارد بارزتر است (Mahanta, 2016).

۲-۴ روش سینماتیکی

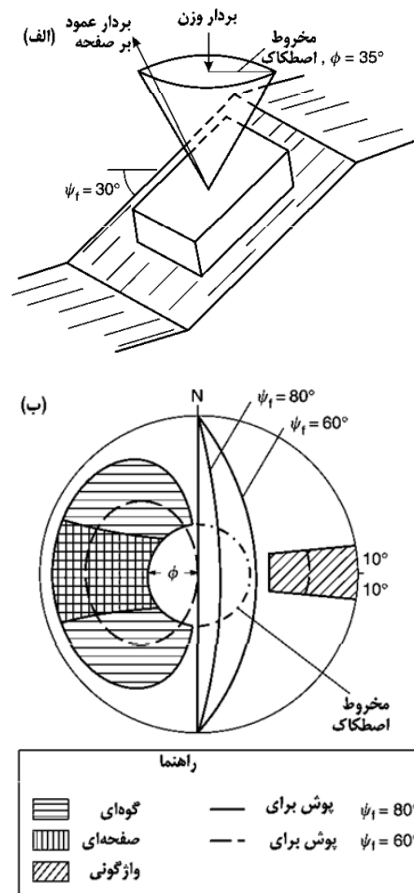
روش سینماتیکی از جمله روش‌های کیفی است و با استفاده از آن می‌توان پتانسیل ناپایداری یک ناحیه را در هر مقیاس، به صورت کلی بررسی نمود. روش سینماتیکی روشی مبتنی بر هندسه شیب و هندسه ناپیوستگی هاست که با ترسیم ظاهری، هندسی و بر روی دایره استرونت، امکان وقوع ریزش را در شیب بر اساس وضعیت هندسی و پارامترهای مشخصه صفحات شیب و شکست پیش‌بینی می‌شود. در روش سینماتیکی بعد از برداشت تمام ناپیوستگی‌ها، صفحات بر روی استرونت ترسیم می‌شود و با توجه به روش‌های موجود جهت پیش‌بینی نوع شکست احتمالی عمل می‌شود. روش سینماتیکی اولین بار توسط مارکلند در سال ۱۹۷۲ تشریح شد و یکی از روش‌های سینماتیکی تست مارکلند هست که روشی ساده برای پیش‌بینی اولیه شکست از انواع صفحه‌ای، گوه‌ای و واژگونی می‌باشد. (داودیان، ۱۳۸۹)

در روش مخروط اصطکاکی علاوه بر تعیین امکان‌پذیری سینماتیکی انواع شکست در استریونت، می‌توان شرایط پایداری یک بلوک را نسبت به انواع لغزش مورد بررسی قرار داد. در این روش، تحلیل پایداری بر اساس اطلاعاتی از نظر هندسی (شیب و امتداد شیب) و با این فرض که مقاومت برشی

¹ Mahanta

² Luhri

سطح لغزش تنها ناشی از اصطکاک بوده و چسبندگی صفر، انجام می‌گیرد. بلوک روی سطح شیب‌دار با زاویه اصطکاک ϕ بین بلوک و شیب (شکل ۲-۱-الف) در صورتی ثابت می‌ماند که بردار نیروی عمود بر سطح، درون مخروط اصطکاک قرار گیرد. زمانی که تنها نیروی وزن بر بلوک اثر کند، قطب صفحه در راستای عمود بر سطح است. بنابراین بلوک زمانی پایدار است که قطب صفحه درون دایره اصطکاک واقع شود. پوش‌ها در شکل ۲-۱-ب مکان قطب صفحاتی را نشان می‌دهد که بلوک ناپایدار تشکیل می‌دهد. پوش‌ها برای زاویه شیب 60° و 80° درجه رسم شده است. مطابق شکل با افزایش شیب، پوش‌های شکست بزرگ‌تر شده و ناپایداری شیب افزایش می‌یابد. همچنین با کاهش زاویه اصطکاک، پوش‌ها بزرگ‌تر می‌شوند. پوش‌ها همچنین نشان‌دهنده این هستند که تحت شرایط بارگذاری ثقلی، ناپایداری در شرایط هندسی محدود اتفاق می‌افتد. (داودیان، ۱۳۸۹)



شکل ۲-۱-الف- مفهوم مخروط اصطکاک در تحلیل پایداری ساده: الف، مخروط اصطکاک نسبت به بلوک قرار گرفته روی سطح شیب‌دار (ب) تصویر استریو گرافیک مخروط اصطکاک. (قزوینیان، ۱۳۸۲)

تنها پارامتر رفتاری مرتبط با توده سنگ مقدار زاویه اصطکاک داخلی هست. با توجه به مشخصات هندسی و مقدار زاویه اصطکاک داخلی بر روی استرونت، محدوده بحرانی قرار گیرد، امکان وقوع شکست در آن صفحه وجود دارد (داودیان، ۱۳۸۹).

در اکثر تحلیل‌های پایداری ترانشه‌های سنگی اولین روش مورد استفاده روش سینماتیکی می‌باشد. با توجه به این که این روش به‌غیر از مشخصات هندسی، پارامترهای مربوط به خواص فیزیکی و ژئومکانیکی در نظر گرفته نمی‌شود ممکن است به نتایج درستی نرسد، لذا استفاده از این روش فقط در تحلیل‌های اولیه و با ریسک‌پذیری بالا انجام می‌شود و به همین دلیل طراحی‌ها و برنامه‌ریزی‌های کلی بر اساس نتایج حاصل از این روش انجام نمی‌گیرد (داودیان، ۱۳۸۹). که با توجه به این موضوع در این پژوهش به ذکر دو نمونه اکتفا می‌شود.

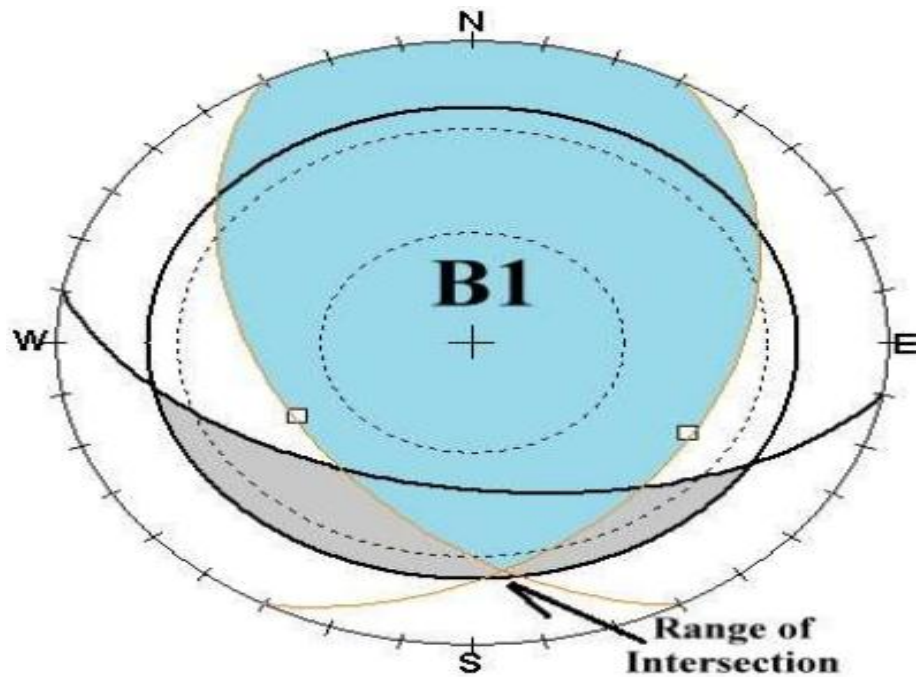
۲-۴-۱ مطالعه موردی روش سینماتیکی

شمسی و همکاران در سال ۱۳۹۳ یک نقطه پرخطر از ترانشه‌های سنگی جاده تنگه قیر با استفاده از روش سینماتیکی به تحلیل پایداری آن پرداختند. جاده مورد نظر، در ۳۵ کیلومتری شمال شهر ایلام قرار گرفته و دارای طول حدود ۳۳ کیلومتر می‌باشد و در محور ایلام- کرمانشاه قرار دارد که از نظر پایداری ترانشه‌های جاده در محدوده مورد مطالعه با امتیاز ۵۹ طبق روش RMR، ترانشه در حد سنگ‌های متوسط قرار می‌گیرد (شمسی، ۱۳۹۳).

تحلیل استریوگرافیک بر روی شکستگی‌های موجود در سنگ‌های این ناحیه دلالت بر حضور مجموعه‌ای از بلوک‌های سنگی (B_1) در داخل ترانشه جاده است (شکل ۲-۱) که در آن ترانشه جاده تنگه قیر که دارای شیب ۵۰ درجه و دایره اصطکاکی ۲۵ درجه ترسیم شده است. هرچند این بلوک‌های سنگی در فصول بارندگی ریزش‌های محدودی را در مسیر ایجاد می‌کند، اما این احتمال وجود دارد که در شرایط رویداد زمین‌لرزه‌های بزرگ و بارگذاری لرزه‌ای بر روی آن‌ها ریزش‌های شدید رخ دهد (داودیان، ۱۳۸۹).

بر اساس تحلیل‌های انجام‌شده محدوده مورد مطالعه در مسیر جاده تنگه قیر در شرایط رویداد

زمین‌لرزه‌های نیرومند، دارای پتانسیل لغزش گوه‌ای می‌باشد. به منظور پایدارسازی آن، پیشنهاد شد در محل‌های موردنظر، تاسیسات نگهدارنده از جمله راک بولت و انکر بولت و ... بر روی دامنه‌های ناپایدار اجرا گردد (شمسی، ۱۳۹۳).

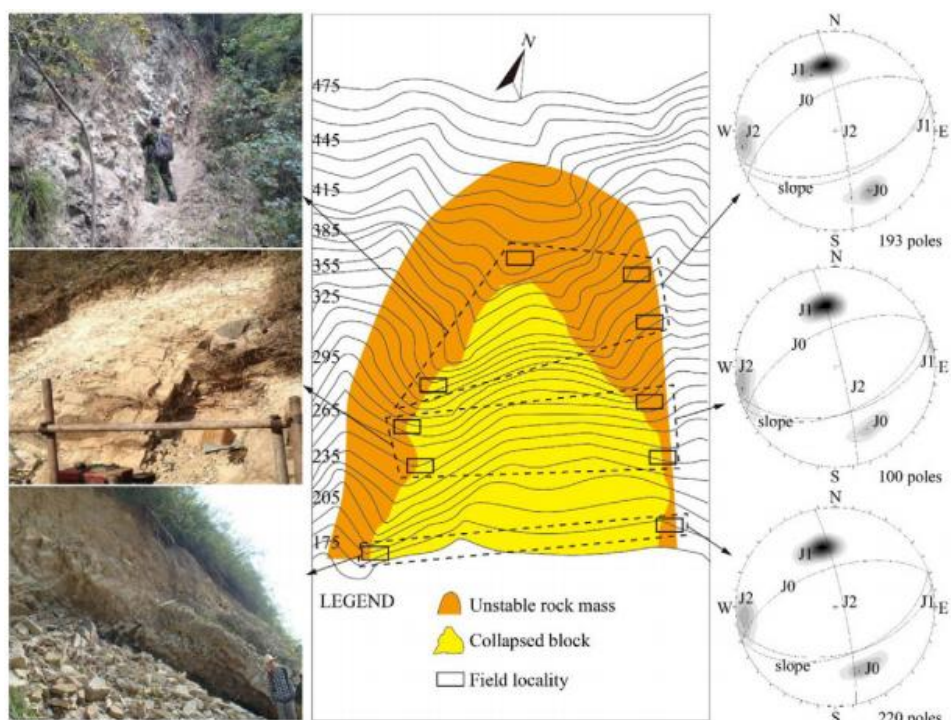


شکل ۱-۲: استریو گرام پتانسیل لغزش گوه‌ای در بلوک B_1 در ترانشه جاده تنگه قیر (شمسی، ۱۳۹۳).



شکل ۲-۲: لغزش گوه‌ای شکل در ترانشه‌های جاده تنگه قیر (شمسی، ۱۳۹۳).

هوانگ و همکاران در سال ۲۰۱۶ به تحلیل پایداری ترانشه‌های سنگی کنار رودخانه یانگ تسه کیانگ در چین با استفاده از بررسی دقیق زمین‌شناسی در محل و شناسایی چینه‌بندی (قسمت میانی یک چینه‌بندی سخت از جنس سنگ‌آهک و در قسمت پایین ترانشه بین سنگ‌آهک و گل‌ولای با شیل می‌باشد) ، برداشت‌های شیب و امتداد درزه‌ها انجام شد. این ترانشه به لحاظ زمین‌شناسی ساختاری دارای دسته‌درزه‌های ناممتد می‌باشد (Huang, 2016).



شکل ۲-۳: نمایش استریو گرافیکی ناپیوستگی‌ها و ارتباط آن با ترانشه‌ها در محدوده‌ی مختلف (Huang, 2016)

آن‌ها توانستند احتمال آسیب‌پذیری صفحه‌ای و واژگونی در ترانشه‌های سنگی محدوده مورد نظر را شناسایی کرده و با استفاده از روش‌های عددی اطلاعات دقیق‌تری را به دست آوردند (Huang, 2016).

۲-۵ روش تعادل حدی

طراحی ترانشه باید شامل تحلیلی باشد که توزیع نیروهای ناشی از ثقل و فشار آب را شامل شود و با مقاومت موجود توده سنگ مقایسه شود و با مقاومت موجود توده سنگ مقایسه شود. یکی از روش‌های انجام چنین آنالیزی روش تعادل حدی است. اساس این روش مقایسه نیروهای برشی در

آستانه لغزش روی یک سطح لغزش معین با نیروهای مقاوم در برابر برش روی همین سطح می‌باشد.

در این روش از تقسیم نیروهای مقاوم به نیروهای مخرب فاکتور ایمنی به دست خواهد آمد. اگر این فاکتور بزرگ‌تر از یک باشد، توده موردنظر پایدار و اگر کوچک‌تر از یک باشد، ناپایدار است و در حالتی که برابر یک گردد، توده موردنظر حالتی بحرانی یا حدی خواهد داشت.

برای توده بالقوه ناپایداری که بر روی یک ناپیوستگی با شرایط مشخص قرار دارد، تحلیل با روش تعادل حدی ساده است و با تعیین پارامترهای موردنیاز بر روی سطح موردنظر، ضریب پایداری بر روی سطح موردنظر محاسبه می‌گردد. ولی اگر سطح لغزش مشخص نباشد، سطوح لغزش مختلفی به‌عنوان سطح مختلفی به‌عنوان سطح لغزش فرض شده و پس از محاسبه ضریب پایداری آن‌ها، سطحی که کمترین ضریب پایداری را دارد به‌عنوان محتمل‌ترین سطح لغزش در نظر گرفته می‌شود.

مقدار فاکتور ایمنی به‌دست‌آمده در این روش، مربوط به تمام سطح لغزش بوده و نمی‌توان مقدار فاکتور ایمنی را برای یک ناحیه خاص از سطح مشخص ساخت، این یکی از بزرگ‌ترین ضعف‌های روش تعادل حدی است. بنابراین ممکن است فاکتور ایمنی کل سطح شیب‌دار بزرگ‌تر از یک شود درحالی‌که ممکن است در نقطه شروع لغزش فاکتور ایمنی کمتر از یک باشد.

روش تعادل حدی عموماً در شکست‌های قوسی و در محیط‌های پیوسته مانند خاک کاربرد دارد اما در مواردی خاص مانند شکست روی خاک سفت یا سنگ، شیب‌های نزدیک به قائم و ... می‌توان سطح شکست را صفحه‌ای فرض کرد به دلیل اینکه اکثر پارامترهای موثر در شکست و همچنین پارامترهای خاک و سنگ در این روش لحاظ می‌شود، این روش کاربردی وسیعی در تحلیل پایداری ترانشه‌ها دارد و حتی بر مبنای این روش نرم‌افزارهایی مانند swedge و... طراحی شده است. (داویدیان، ۱۳۸۹)

اولین روش در سال ۱۹۳۶ توسط فلنیوس برای سطح لغزش دایره‌ای بیان گردید که تحت عنوان روش معمولی یا روش سودی شناخته می‌شود سپس در سال ۱۹۵۵ بیشاب با معرفی رابطه جدیدی

برای بیان نیروی نرمال پایه، روش قبلی را اصلاح نمود. بعد از آن محققین مختلف همچون جانبو^۱ (۱۹۵۴)، مورگن استرن- پرایس^۲ (۱۹۶۵)، اسپنسر^۳ (۱۹۶۷)، سارما^۴ (۱۹۷۳)، چو^۵ (۱۹۸۶)، آبراسان^۶ و همکاران (۲۰۰۲)، کران^۷ (۲۰۰۴) با در نظر گرفتن فرضیات مختلف در خصوص نیروهای داخلی بین قطعات، روشهای تعادل حدی را توسعه دادند. تمامی روشهای تعادل حدی بر اساس فرضیات مشخص در مورد نیروهای داخلی بین قطعات (نیروهای نرمال و نیروهای برشی) می‌باشند و تفاوت اصلی این روش‌ها در چگونگی تعریف این نیروها و یا فرضیات می‌باشد.

در سالیان اخیر پیشرفت‌های قابل ملاحظه‌ای در برنامه‌های کامپیوتری که با روش تعادل حدی کار می‌کنند انجام گرفته است، موارد زیر از جمله این پیشرفت‌ها محسوب می‌شود (آقایی فرد، ۱۳۸۴)

(۱) گسترش روش‌های تعادل حدی سه‌بعدی مانند SD- Slop و Clara.

(۲) گسترش روش‌های تعادل حدی

(۳) توانایی اعمال انواع مختلف نگهدارنده‌ها

(۴) تلفیق برنامه‌های تعادل حدی دوبعدی با جریان آب زیرزمینی با روش المان محدود و تحلیل و

بررسی تنش‌های ناشی از وجود آب

۲-۵-۱ مطالعه موردی روش تعادل حدی

سینگ^۸ و همکاران در سال ۲۰۱۳ به ارزیابی پایداری ترانشه‌های سنگی واقع در ۲۰ کیلومتری ایالت اوتاراکنند در هند در رشته‌کوه‌های هیمالیا با استفاده از روش تعادل حدی پرداختند. این منطقه از نظر تکتونیکی فعال و تحت تاثیر بارش‌های سنگین و برای ساخت و گسترش آن از انفجار کنترل نشده استفاده شده است. آن‌ها بر اساس مشاهدات میدانی و تغییرات زمین‌شناسی و شرایط

¹ Jambo

² Morgenstern- price

³ Spencer

⁴ Sarma

⁵ Chuo

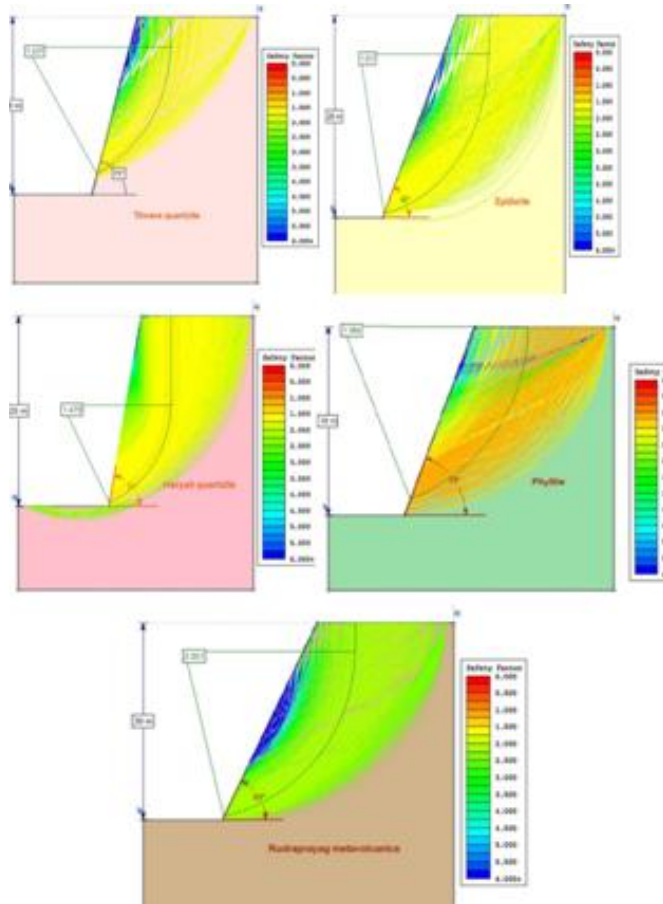
⁶ Abrasan

⁷ Karan

⁸ Singh

ژئوتکنیکی، پنج مکان را برای مطالعه دقیق و روش تعادل حدی انتخاب کردند که خروجی محاسبات

در شکل‌های زیر نمایش داده شده است (singh,2013)



شکل ۲-۵- تحلیل شرایط کلی پایداری با استفاده از روش تعادل حدی (singh,2013)

این تحلیل و مقایسه آن با روش‌های عددی درک عمیقی از پایداری ترانسه‌های سنگی ارائه داد و

کمک به شناسایی دامنه‌های بالقوه آسیب‌پذیر کرد.

۲-۶ روش‌های عددی

روش سینماتیک و تعادل حدی به هندسه ساده شیب و شرایط بارگذاری اولیه محدود می‌شود و

هم‌چنین دید مختصری نسبت به مکانیسم شکست ترانسه به ما می‌دهد ولی بیشتر مسائل پایداری

ترانسه شامل ارتباط پیچیده بین هندسه ترانسه، ناهمسانگردی مواد، رفتارهای غیرخطی، تنش‌های

برجا و... می‌باشد که برای نمایش این محدودیت‌ها روش‌های مدل‌سازی عددی برای حل تقریبی

مساله پیشرفت کرده است، زیرا به دلیل مجهولات بسیار، نمی‌توان به شیوه‌های متعارف حل کرد.

۲-۶-۱ کلیات و اصول روش عددی

بدون توجه به روش عددی مشکل عمده این است که سنگ یک ماده زمین‌شناختی طبیعی است، و بنابراین بیشتر از شناسایی مراحل ساخت و تشکیل سنگ، تشخیص ویژگی‌های فیزیکی و یا خواص مهندسی آن مهم می‌باشد. توده سنگ تا درجه زیادی ناپیوسته، ناهمسانگرد، ناهمگن و غیر الاستیک می‌باشد. توده سنگ‌ها توسط حرکات پویای پوسته بالایی زمین مانند، جابجایی‌های تکتونیکی، بالآمدگی یا فرورفتگی زمین، چرخه‌های یخ زدن و امواج همیشه تحت تنش و بارگذاری پیوسته‌اند. توده سنگ هم‌چنین یک محیط متخلخل شکسته می‌باشد که دربرگیرنده سیالات به شکل گاز یا مایع مانند آب، نفت، گاز طبیعی و هوا تحت شرایط پیچیده تنش برجا، حرارت و فشار سیال می‌باشد. ترکیب پیچیده مولفه‌های آن و تاریخچه بلندمدت تشکیل توده سنگ، موجب می‌شود که سنگ در بازنمایی‌های محاسباتی پروسه مدل‌سازی عددی به‌عنوان یک ماده دشوار (مشکل‌آفرین) نقش بازی کند.

در رابطه با ناپیوستگی عمومی طبیعت توده سنگ، باید گفت علاوه بر ناپیوستگی‌های ایجادشده توسط حفاری دارای شکستگی‌های از پیش موجود و گذرنده از میان آن می‌باشد. هرچند که این شکستگی‌ها از طریق مراحل مختلف زمین‌شناسی در سنگ حضور یافته‌اند، تشکیل آن‌ها توسط اصول مکانیکی کنترل می‌شود. یکی از کارهای مهم در مدل‌سازی عددی در مکانیک سنگ توانایی توصیف چنین ناپیوستگی‌های مکانیکی در مدل کامپیوتری می‌باشد- به‌صورت واضح و یا مفهومی- که اصطلاحاً مفهوم‌سازی و یا ادراک مواد خوانده می‌شود (Harrison, 2000).

بازنمایی بسنده توده سنگ در مدل‌های محاسباتی، ضبط چنین شکستگی‌هایی و ضبط چنین شکستگی‌هایی و طبیعت کاملاً ناپیوسته، ناهمگن و غیر الاستیک توده سنگ، افزون بر پی آمدهای مهندسی، بایستی که بتوان خصوصیات پیش رو را در پروسه مفهوم‌سازی مدل جاسازی کرد. بنابراین مدل‌سازی مکانیک سنگ و طراحی مهندسی سنگ هم دانش بوده و هم هنر. آن‌ها بر مفاهیم علمی استوار بوده اما نیازمند داورهای تجربی می‌باشند که با تجارب جمع‌آوری‌شده در طی مراحل طولانی

پشتیبانی می‌شوند. رفتارهای مختلف نیازمند روش‌های متفاوت ارزیابی و یا محاسبات برای طراحی مناسب است.

۲-۶-۲ روش‌های عددی برای مدل‌سازی توده‌سنگ پیوسته و ناپیوسته

در مدل‌سازی عددی مسائل مهندسی برخی مسائل را می‌توان با شمار محدودی از مولفه‌ها به صورت یک مدل ارائه کرد (Jing 2003). رفتار چنین مولفه‌هایی به خوبی شناخته شده است و یا اینکه می‌توان آن‌ها را به صورت مستقل و از راه محاسباتی به دست آورد. رفتار یکپارچه و سراسری سیستم را می‌توان با تعریف روابط مشترک میان مولفه‌های ویژه (المان‌ها) به دست آورد. این امر معمولاً نیازمند به‌کارگیری معادلات جزئی می‌باشد تا اینکه بتوان رفتار سیستم را در نقاط پهنه توصیف کرد. چنین سیستم‌هایی پیوسته نام دارند و درجه آزادی محدودی خواهند داشت. برای حل چنین مسائل پیوسته‌ای با روش‌های عددی و توسط کامپیوتر، پهنه مساله عموماً به شمار معینی از زیر بخش‌ها (المان‌ها) تقسیم می‌شود که درجه آزادی محدودی داشته و رفتار آن‌ها با توصیفات ریاضی ساده‌تری تقریب زده می‌شود. زیر بخش‌ها می‌بایست که هم معادلات دیفرانسیلی حاکم را ارضا کنند و هم شرایط پیوستگی در وجهای مشترک با المان‌های همسایه را. این موضوع را گسسته‌سازی^۱ یک محیط پیوسته نام دارد.

پیوستگی موردنظر یک مفهوم ماکروسکوپی می‌باشد و فرض پیوستگی این مفهوم را در بر دارد که در تمامی نقاط درون پهنه، مواد نمی‌توانند پاره یا شکسته شده و به قطعات کوچک‌تری تقسیم شوند. تمام نقاطی که در حالات پیشین در همسایگی یک نقطه معین در درون پهنه می‌باشند در مراحل بعدی تغییر شکل و یا انتقال نیز در همسایگی همان نقطه باقی خواهند ماند. هرچند که در مقیاس میکروسکوپ یک همگی مواد سیستم‌های گسسته بوده اما نمایش مولفه‌های میکروسکوپی گسسته از نظر محاسباتی سنگین بوده و در عمل نیازی به آن نیست (Jing 2003)

¹ discretizing

مولفه های منفرد (المان) یک سیستم گسسته معمولاً به عنوان پیوسته در نظر گرفته می شوند. اگر که مولفه ها خودشان همگن نباشند و یا شکسته باشند، مانند توده سنگ شکسته شده، از طریق پروسه همگن سازی مولفه ها به دست می آیند. بنابراین مفهوم پیوستگی و ناپیوستگی دقیق نیست و نسبی می باشد و بسته به مقیاس مساله تفاوت خواهد کرد. این امر به ویژه در مسائل مکانیک سنگی بیشتر دیده می شود. برای نمونه یک بلوک سنگی با نواحی شکسته شده بزرگ می تواند در مدل کامپیوتری به عنوان یک مولفه از چندین بلوک در نظر گرفته شود، اما بلوک خود نیز ممکن است که شمار زیادی از شکستگی های کوچک تر را دربرداشته باشد که در صورت سنگین بودن مساله به سادگی نمی توانند به سادگی نمایش داده شوند. برای دستیابی به ویژگی های پیوسته هم ارز چنین بلوکی می بایست همگن سازی تابعی از هندسه سیستم های در بردارنده شکستگی ها و ویژگی های فیزیکی سنگ بکر و شکستگی ها می باشد.

توده سنگ های شکسته پوسته بالایی زمین یک سیستم گسسته می باشد. برای چنین هندسه هایی راه حل فرم بسته ای وجود ندارد و برای حل مسائل عملی می بایست که روش های عددی را به کاربرد. بر اساس فرضیات اساسی علم مواد، روش های عددی متفاوتی برای سیستم های گسسته و پیوسته توسعه یافته است.

معمول ترین روش های عددی به کاررفته در مکانیک سنگ به شرح زیر می باشند (Jing, 2003):

روش های پیوسته

- روش تفاضل محدود (FDM)
- روش المان محدود (FEM)
- روش المان مرزی (BEM)

روش های ناپیوسته

- روش المان مجزا (DEM)
- روش شکستگی مجزا (DFN)

مدل‌های هیبریدی گسسته/ پیوسته

• ترکیب FEM/BEM

• ترکیب BEM/DEM

• ترکیب FEM/DEM

و دیگر مدل‌های ترکیبی

روش FDM یک تقریب مستقیم از معادلات مشتقات جزئی می‌باشد که با جایگذاری مشتقات جزئی با تفاوت‌ها در شبکه‌های منظم یا نامنظم سراسر پهنه مسئله به دست می‌آید. بنابراین معادلات مشتقات جزئی اصلی را به یک دستگاه معادلات جبری در قالب عبارات مجهول در نقاط شبکه‌ای تبدیل می‌کند. حل معادلات دستگاه با وارد ساختن شرایط اولیه و مرزی شروع می‌شود. این روش قدیمی‌ترین عضو خانواده روش‌های عددی می‌باشد، و به صورت گسترده‌ای به کار برده شده و اساس رهیافت‌های DEM می‌باشد.

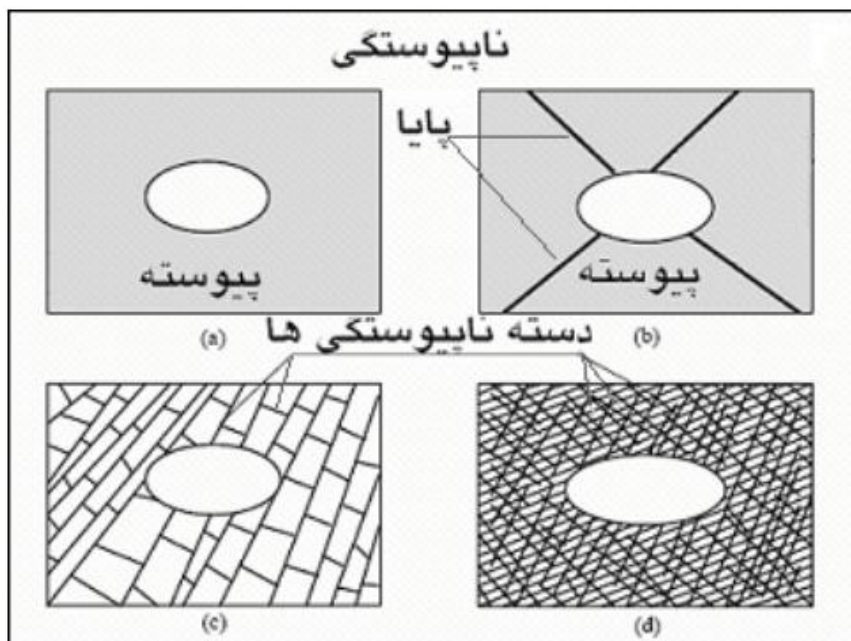
روش FEM نیازمند تقسیم کردن پهنه مساله به زیر بخش‌های (المان‌های) کوچک‌تر و با شکل استاندارد (مثلث، مربعی، چهار گوش و ...) همراه با تعداد معینی گره در رئوس و یا جوانب، می‌باشد. توابعی، عموماً چند جمله‌ای، به کار می‌روند تا رفتار معادلات مشتقات جزئی را در سطوح المانی تقریب زده تا اینکه معادلات جبری محلی نماینده المان‌ها را تولید کنند. سپس بر اساس روابط مکانی میان گره‌ها و المان‌ها، معادلات جبری محلی المان‌ها را تولید کنند. سپس بر اساس روابط مکانی میان گره‌ها و المان‌ها، معادلات المانی محلی در یک دستگاه معادلات جبری کلی گردآوری می‌شوند که پس از وارد ساختن شرایط اولیه و مرزی، حل آن‌ها اطلاعات مورد نیاز برای حل مسئله را به دست خواهد داد. این رویکرد (FEM)، به دلیل انعطاف‌پذیری آن در رویارویی با ناهمگنی مواد، شرایط غیرخطی و مرزی، بیشترین روش به کار رفته در مهندسی امروزه می‌باشد که دارای برنامه‌های کامپیوتری اقتصادی و توسعه یافته زیادی همراه با قدرت محاسباتی فراوان، مواد تعریف شده پیچیده و کاربری آسان می‌باشد. (این رویکرد همچنین اساسی برای DEM به شمار می‌آید).

از سوی دیگر BEM نیازمند گسسته سازی تنها در مرز پهنه مساله می باشد بنابراین ابعاد مساله کاهش یافته و تا اندازه زیادی داده های ورودی مورد نیاز را کاهش می دهد. در سطوح گسسته سازی یکسان BEM از دقت بیشتری نسبت به FEM و FDM برخوردار است. همچنین در این روش به دلیل استفاده از راه حل های اساسی معادلات مشتقات جزئی، برای شبیه سازی پهنه های بزرگ نامحدود مناسب ترین روش می باشد.

تکنیک DEM برای مدل سازی یک محیط ناپیوسته در مقایسه با سه روش دیگر نسبتاً نوین بوده و به صورت ویژه ای بر کاربرد در پهنه های شکسته یا مناطق زمین شناسی ذره ای تمرکز یافته است. ماهیت DEM بازنمایی محیط شکسته شده به عنوان مجموعه ای از بلوک های شکل گرفته با شکستگی های متصل به هم در پهنه مساله می باشد، و معادلات حرکت این بلوک ها را با آشکار سازی پشت سرهم تماس میان بلوک ها، حل می کند. بلوک ها می توانند صلب یا تغییر شکل پذیر باشند همراه با گسسته سازی از نوع FDM و یا FEM. جابجایی های بزرگ ناشی از حرکت بدنه صلب بلوک های ویژه، بازشدگی شکستگی و گسستگی کامل در DEM آسان بوده اما در FEM یا BEM غیر ممکن می باشد. یک اختلاف مهم میان روش های پیوسته و ناپیوسته نوع برخورد با شرایط سازگاری جابجایی می باشد. در روش های پیوسته، سازگاری جابجایی می باید حتماً میان المان های داخلی برقرار باشد، که برای موارد FDM و BEM به طور خودکار صورت می گیرد، اما برای FEM با ثابت نگه داشتن لیست اتصال میان گره - المان و همسان سازی درجه توابع شکل میان المان های همسایه صورت می گیرد. اما در DEM نیازی نیست که شرط سازگاری میان بلوک ها برقرار باشد برای تماس های نقطه ای یا شکستگی ها جانشین می شود.

حذف کامل حرکت صلب بدنه و تغییر شکل پیوسته بلوک هایی مشخص معمولاً در DEM پذیرفته شده است. حرکت صلب بدنه هیچ کرنشی درون بلوک ایجاد نمی کند. بنابراین یک سیستم پیوسته تنها بازتاب تغییر شکل مواد سیستم می باشد و یک سیستم گسسته اصولاً بازتاب جابجایی عضو (مولفه یا واحد) سیستم می باشد.

انتخاب روش گسسته یا پیوسته به فاکتورهای مساله- ویژه بسیاری وابسته است اما به طور موثری وابسته به مقیاس و هندسه سیستم شکسته می باشد. شکل ۲-۴ شیوه انتخاب دیگری در مورد شرایط شکستگی گوناگون در مسائل مکانیک سنگ را نشان می دهد. تکنیک های پیوسته می بایستی که برای توده سنگ های بدون شکستگی و یا با شکستگی کم به کار رود، در مورد دوم ویژگی های رفتاری هم ارز آن از طریق پروسه همگن سازی به دست خواهد آمد (شکل ۲-۴ a و ۲-۴ d). در صورتی که جدایش کامل نباشد، تکنیک های پیوسته را می توان بکار برد (شکل ۲-۴ b)



شکل ۲-۴: وضعیت های مختلف برای انتخاب روش عددی پیوسته یا ناپیوسته (Jing, 2003)

رهیافت ناپیوسته بیشتر برای توده سنگ های نسبتاً شکسته کاربرد خوبی دارد، و یا برای هنگامی که شمار شکستگی ها برای سیستم پیوسته با المان های ناپیوستگی خیلی زیاد باشد و یا اینکه جابجایی های در مقیاس بزرگ برای برخی بلوک ها ممکن باشد. (شکل ۲-۴ b)

روش پیوسته باید برای توده سنگ هایی که بدون شکستگی هستند یا شکستگی بسیار دارند استفاده می شود. روش گسسته مناسب برای توده سنگ شکسته است که در آن شکستگی کمتر از

شرایط محیط شبه پیوسته با خواص معادل است یا امکان جابه‌جایی بلوک‌های مجزا در مقیاس بزرگ وجود دارد.

هیچ روشی دارای برتری مطلق نسبت به روش دیگر نمی‌باشد. اما برخی کاستی‌های ذاتی یک روش را می‌توان با ترکیب مدل‌های گسسته- پیوسته جبران کرد، که این شیوه اصطلاحاً هیبرید نام دارد. مدل‌سازی سنگ‌های شکسته نیازمند روش‌های عددی و برنامه‌های کامپیوتری با کار آیی بالا هست، به‌ویژه در مورد شرایطی مانند شکستگی‌ها، ناهمگنی مواد، تراکنش با جریان سیال و اثرات مقیاس. در اغلب موارد محدودیت برای استفاده از یک روش وجود دارد، که برای آماده کردن ارائه بسنده از بیشتر ویژگی‌های و پروسه‌های قابل توجه در عمل از روش‌های هیبریدی یا پروسه‌های چندگانه استفاده می‌شود. مواقعی است ترانسه سنگی شامل چندین دسته‌درزه باشد که مکانیسم گسیختگی را کنترل می‌کنند، جهت بررسی تاثیر این ناپیوستگی‌ها در رفتار مدل، مدل‌سازی ناپیوسته مناسب‌تر است.

۲-۶-۳ مطالعات موردی روش عددی

در سال ۲۰۰۴ تحلیل پایداری استاتیک و دینامیک برای یک ترانسه ۷۰۰ متری در غرب نروژ با استفاده از یک مدل‌سازی عددی پیوسته انجام شد. هدف از مدل‌سازی برآورد حجم توده‌سنگ که به‌طور بالقوه می‌تواند تحت نیروهای تاثیر استاتیک و دینامیک قرار بگیرد. سه مورد برای رفتار ترانسه سنگی شبیه‌سازی شده است در حالت استاتیک خشک، استاتیک اشباع، شبه استاتیک (بارگذاری پویا) انجام شد. حالت استاتیک خشک برای حالتی است که تنها نیروی گرانشی بر توده سنگ وارد می‌شود و تنش در توده سنگ ایجاد می‌شود شبیه‌سازی شد و حالت استاتیک اشباع برای زمانی است که ترانسه هوازده شده و زاویه اصطکاک داخلی کاهش پیدا کرده است و حالت بارگذاری پویا برای زمان وقوع زلزله شبیه‌سازی شد. نتایج حاصل از آن در حالت خشک بیشترین جابه‌جایی ۲۱ سانتی‌متر بوده در بعضی از قسمت ترانسه و در حالت استاتیک اشباع ترانسه ناپایدار بوده و جابه‌جایی بیش از ۱۰۰ سانتی‌متر بوده و در حالت بارگذاری پویا بعد از چند ثانیه لایه‌های بالایی سقوط می‌-

کنند. در این مقاله یک تصویر از چگونگی تاثیر خواص ژئومکانیکی توده-سنگ بر روی ترانشه و پیش-بینی رفتار ترانشه تحت نیروهای محیطی و زلزله انجام شد در صورتی که با مدل سازی دقیق عددی می توان رفتار روشن تری از ترانشه به دست آورد.

در سال ۱۳۸۵ منجزی و همکاران طراحی شیب پایدار دیواره معدن سونگون با استفاده از روش عددی و نرم افزار فلک استفاده گردید. با توجه به خردشدگی شدید توده سنگ در اکثر محدوده معدن مس سونگون، و با توجه به اینکه یکی از کاربردهای مدل سازی پیوسته در جاهایی است که توده سنگ بسیار خردشده و درزه دار باشد، در این تحقیق از مدل سازی پیوسته و روش تفاضل محدود استفاده شده است. برای بررسی پایداری دیواره ها، ۵ مقطع عمودی به گونه ای که پوشش مناسبی را برای کلیه قسمت های معدن ایجاد کنند، در نظر گرفته شد. تحلیل پایداری برای مقاطع فوق در شرایط بارگذاری استاتیکی برای زوایای مختلف انجام گردید و سپس با استفاده از روش های آماری رابطه ای بین زاویه شیب و ضریب ایمنی در هر مقطع به دست آمد. در این تحقیق با توجه به خصوصیات ژئومکانیکی سنگ های تشکیل دهنده معدن، ضرایب ایمنی برای پایداری دیواره ها، معادل ۱,۲ در نظر گرفته شد و با توجه به نقش برخی از عوامل مانند زهکشی در تغییر پارامترهای مقاومتی توده سنگ، آنالیز حساسیت برای چسبندگی و زاویه اصطکاک صورت گرفت.

در سال ۱۳۸۶ افشاریان و همکاران به طراحی و تحلیل پایداری ترانشه های شرقی معدن چادرملو واقع در ۱۲۰ کیلومتری شمال شرق یزد پرداختند. طراحی اولیه ترانشه های این معدن توسط یک شرکت آلمانی در سال ۱۹۹۰ انجام شد. آن ها بر اساس اطلاعات حفاری (۱۹۷۴) و یک مدل ساده طراحی، زاویه شیب پله ها را ۷۰ و شیب کلی را ۵۴,۷ درجه پیشنهاد کرده است. با توجه به پیچیدگی زمین شناسی و تکتونیک معدن چادرملو و عمیق تر شدن پیت، انجام مطالعات دقیق تر و شیب نهایی بهینه مورد توجه قرار گرفت. برای این امر مدل سازی مقاطع مورد نیاز توسط نرم افزارهای فلک صورت پذیرفته و شیب نهایی بهینه با تحلیل وضعیت فعلی و تغییر شیب تا رسیدن به ضریب ایمنی ۱,۳ انجام گردید که نتایج به دست آمده به شرح زیر می باشد:

اولا- زاویه شیب بهینه برای تک پله‌ها ۵۵ درجه و شیب کلی ۴۰ درجه به دست آمد که با توجه شیب ۳۷ و ۴۸ درجه فعلی، ۳ درجه افزایش و ۸ درجه کاهش شیب دیواره نهایی را خواهیم شد. ثانيا- در مناطقی که گسیختگی‌های بالقوه به وسیله ساختارها کنترل می‌شوند، باید جهت ساختارهای کوچک که ممکن است منتج به ریزش‌های در مقیاس پله‌ای شوند برداشت‌شده و طراحی پله متناسب با آن به‌روز شود الگوهای انفجاری، مورد بررسی دقیق قرار گرفته و اصلاح شوند. در حال حاضر برای ایجاد دیواره نهایی نیز از روش‌های معمول انفجار استفاده می‌گردد درحالی‌که می‌بایست از انفجار کنترل‌شده استفاده شود. (افشاریان، ۱۳۸۶)

فردلند^۱ و همکاران در سال ۲۰۱۱ طراحی و تحلیل پایداری ترانشه معدن کوستا^۲ باهدف تحلیل اثرات هوازگی در طراحی و تحلیل پایداری ترانشه با استفاده از مدل‌سازی عددی انجام دادند. تمرکز مطالعات او بررسی اثر لایه‌های ضعیف نازک و هوازده بر پایداری ترانشه بوده که نتایج مدل‌سازی عددی او نشان داد که زاویه کلی ترانشه معدن ۳۷٫۵ درجه می‌باشد ولی برای لایه ضعیف به علت تاثیر در مقاومت برشی موثر لایه، زاویه ترانشه باید در حدود ۲۰-۲۳ درجه کاهش یابد (Fredlund, 2003).

Huang و همکاران در سال ۲۰۱۶ به تحلیل پایداری ترانشه‌های سنگی کنار رودخانه یانگ تسه کیانگ در چین با استفاده از بررسی دقیق زمین‌شناسی در محل و تست‌های آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی انجام شد. این ترانشه به لحاظ زمین‌شناسی ساختاری دارای دسته‌درزه‌های ناممتمد می‌باشد. در قسمت میانی یک چینه‌بندی سخت از جنس سنگ آهک و در قسمت پایین ترانشه بین سنگ آهک و گل‌ولای با شیل می‌باشد. از آنجاکه نوسانات دوره‌ای سطح آب رودخانه، باعث نرمشان ترانشه در قسمت پایین ترانشه و یا حتی باعث شکست صفحه‌ای یا واژگونی می‌شود. بنابراین از روش المان مجزا (DEM) روند شکست صفحه‌ای و واژگونی شبیه‌سازی شد.

¹ Fredlund

² Questa Molycrop

نتایج حاکی از آن بود که برای جلوگیری از فرسایش آب در قسمت پایین ترانشه می‌تواند یک‌راه موثر در پیشگیری از لغزش در منطقه مورد مطالعه می‌باشد. آن‌ها بیان کردند هدف از پروژه، مدل‌سازی لغزش‌ها و تجزیه و تحلیل بیشتر از خصوصیات لغزش و مکانیسم شکست می‌باشد. از محدودیت‌های پروژه یکی عدم قطعیت از نظر اندازه بلوک و پارامترهای دیگر در مدل‌سازی دوبعدی در حالی که در حالت سه‌بعدی یک‌روند واقعی‌تر از لغزش سنگ ارائه می‌کند. دیگری در نظر نگرفتن پارامترهایی نظیر زبری، موجدار بودن درزه‌ها، تداوم و ... می‌باشد (Huang, 2016).

۷-۲ جمع‌بندی

در این فصل مبانی روش‌ها و کاربرد و محدودیت‌ها بررسی شد. هیچ روشی دارای برتری مطلق نسبت به روش‌های دیگر نمی‌باشد اما در انتخاب روش باید محدودیت و کاستی و مزایا و کاربرد هر روش را در نظر گرفته و روش یا روش‌های مناسب را برای تحلیل پایداری ترانشه‌های سنگی در نظر گرفت. از مهم‌ترین مراحل تحلیل پایداری ترانشه انتخاب روش مناسب برای تحلیل پایداری آن می‌باشد. با توجه به مطالب گفته‌شده و مقایسه روش‌های ذکر شده می‌توان متناسب با هدف، پارامترها و تجهیزات در دسترس روش مناسب برای تحلیل پایداری ترانشه‌های سنگی انتخاب کرد. در اینجا کاربردها و محدودیت‌های روش‌های مختلف در جدول‌های ۲-۶، ۲-۷، ۲-۸، ۲-۹ آورده شده است.

جدول ۲-۶: کاربرد و محدودیت روش تجربی

تجربی	
کاربردها	محدودیت‌ها
در این روش اگر رده‌بندی یک توده‌سنگ به‌دقت صورت گیرد، می‌تواند به‌عنوان یک ابزار نیرومند در طراحی‌های اولیه به کار گرفته شود	در این روش ساختار زمین‌شناسی فقط و فقط یک مولفه طبقه‌بندی است که ممکن است تاثیر خاصی نداشته باشد درحالی‌که در حال حاضر مشخص شده است که تاثیر ناپیوستگی‌های معین بر پایداری بایستی به‌صورت مستقیم در تحلیل پایداری منظور شود
یک سیستم رده‌بندی کمی جهت ارزیابی جامع از کیفیت توده‌سنگ کاربرد قابل توجهی دارد	در مورد شیب‌هایی که در وضعیت بحرانی قرار دارند، با توجه به ریسک‌پذیری بالا از این روش نمی‌توان استفاده کرد.
تحلیل پایداری در این روش بسیار ساده است	فقط در طراحی‌های اولیه می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد

جدول ۲-۷: کاربرد و محدودیت روش سینماتیکی

سینماتیکی	
کاربردها	محدودیت‌ها
پارامترهای موردنیاز به‌سادگی قابل اندازه‌گیری است	در طراحی‌های اولیه می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد
تحلیل پایداری در این روش بسیار ساده است	ارزیابی ابتدایی و سطحی از سطح لغزش بحرانی می‌دهد
نتایج حاصل از آن قابلیت تلفیق و استفاده در روش‌های دیگر مانند تعادل حدی دارد	در مورد شیب‌هایی که در وضعیت بحرانی قرار دارند، با توجه به ریسک‌پذیری بالا از این روش نمی‌توان استفاده کرد.
با مطالعه اجمالی دیدی کلی و ابتدایی و سریع از پتانسیل لغزش می‌دهد	به‌جز هندسه شیب پارامترهای رفتاری دیگر توده سنگ در نظر نمی‌گیرد.

جدول ۲-۸: کاربرد و محدودیت روش تعادل حدی

روش تعادل حدی	
کاربردها	محدودیت‌ها
ارزیابی کلی از پایداری با استفاده از مفهوم ضریب اطمینان برای سطوح لغزش بحرانی می‌دهد	در این روش فرض می‌شود تمام نیروها از مرکز ثقل بلوک و بدون ایجاد گشتاور اعمال می‌شود
استفاده و تحلیل پایداری در این روش ساده است	قابلیت مدل کردن مکانیسم‌های پیچیده رفتاری و تغییر شکل خزشی وجود ندارد
به جز هندسه شیب پارامتر مهم آب زیرزمینی و فشار آب منفذی در نظر گرفته می‌شود.	امکان نمایش تغییر شکل و حرکت بلوک‌ها نسبت به هم در این روش وجود ندارد

جدول ۲-۹: کاربرد و محدودیت روش عددی

روش عددی		
روش	کاربردها	محدودیت‌ها
پیوسته (المان محدود، تفاضل محدود)	قابل کاربرد در تغییر شکل و شکست، قابلیت مدل کردن مکانیسم‌های پیچیده رفتاری، مدل‌سازی تغییر شکل خزشی، مدل‌سازی بارگذاری دینامیک	نیازمند به کاربر بامهارت و تجربه بالا، حافظه سخت‌افزاری و زمان، آنالیز حساسیت پیچیده
ناپیوسته (المان مجزا)	قابل کاربرد در تغییر شکل و حرکت بلوک‌ها نسبت به هم، مدل‌سازی رفتار پیچیده سنگ و ناپیوستگی نسبت به هم، مدل‌سازی بارگذاری دینامیک و ...	نیازمند به کاربر بامهارت و تجربه بالا، نیاز به شبیه‌سازی پارامترهای ناپیوستگی (فاصله-داری، تداوم و...)، محدودیت داده‌های ورودی درزه (سختی نرمال و برشی)
روش ترکیبی	قابلیت شبیه‌سازی جدایش درزه‌ها و سنگ‌های لایه‌ای و ...	توانایی حافظه بالا، ترکیبی از داده‌های ورودی بالا

فصل سوم:

معرفی مطالعه موردی،

برداشت های میدانی و نتایج

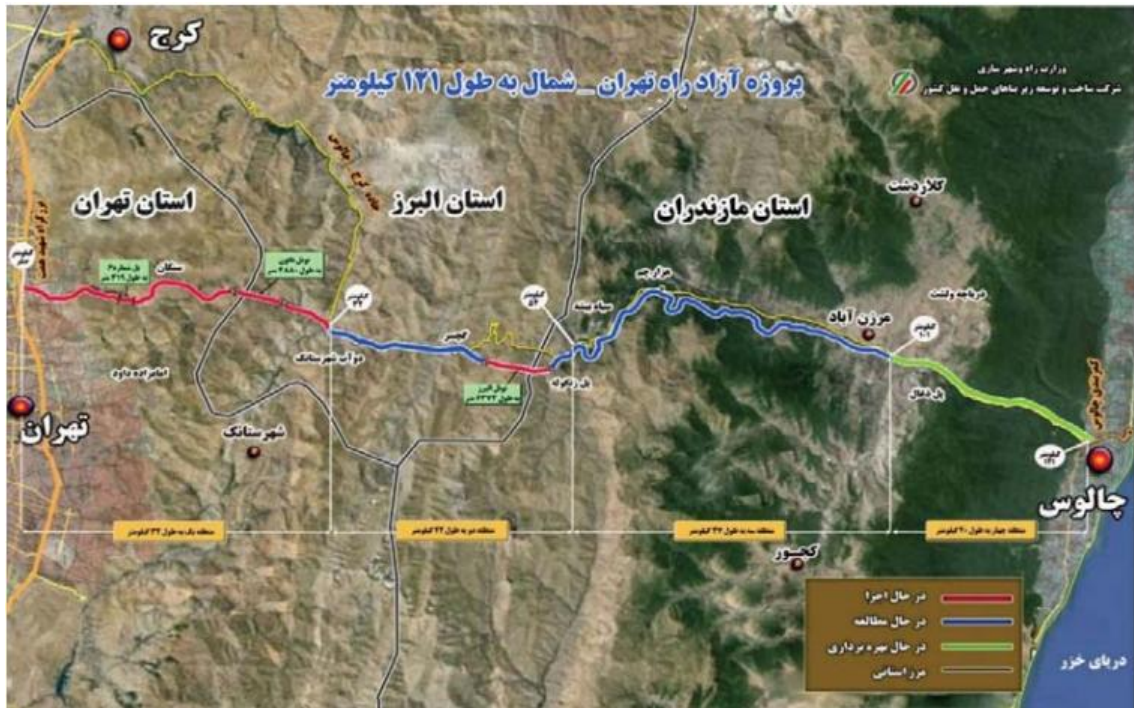
۱-۳ مقدمه

در این فصل معرفی طرح از جمله موقعیت ترانشه، زمین‌شناسی عمومی منطقه، زمین‌شناسی ساختاری محدوده مورد بررسی، بررسی پارامترهای مکانیکی و رفتاری درزه، آزمایش‌های مکانیک سنگی مانند آزمایش بار نقطه‌ای و تعیین مقاومت برشی نمونه‌ها، تحلیل نتایج آزمایش برش مستقیم، معیار بارتن، مقایسه نتایج معیار بارتن با نتایج آزمایش برش مستقیم، تاثیر مقیاس بر رفتار درزه‌ها و در آخر جمع‌بندی ارائه شده است.

۲-۳ شرح مسیر و مشخصات آزادراه تهران - شمال

آزادراه تهران - شمال بخشی از آزادراه سراسری شمال - جنوب است که کوتاه‌ترین مسیر ارتباطی دریای خزر با خلیج فارس را ایجاد نموده و در ترانزیت منطقه نقش عمده‌ای بر عهده دارد. مسیر ۱۲۱ کیلومتری آزادراه تهران - شمال با ۱۷۸ تونل دوقلو (رفت و برگشت)، ۸۲ پل بزرگ (رفت و برگشت) جمعاً به طول حدود ۱۳ کیلومتر و حجم عملیات خاکی (مجموع عملیات خاک برداری و خاک ریزی) حدود ۴۲ میلیون مترمکعب، از تقاطع غیر هم‌سطح با بزرگراه ۷۶ متری شهید همت و بزرگراه آزادگان شروع و در امتداد دره کن پس از گذشتن از گذشتن حاشیه روستای سولقان به تدریج از منطقه کوهستانی توچال عبور کرده و سپس توسط تونل‌های بلند تالون به طول ۵ کیلومتر این رشته کوه را قطع نموده و در دامنه‌های شمالی آن در منطقه دو آب شهرستانک قرار می‌گیرد.

پس از آن، مسیر به موازات جاده قدیم کرج - چالوس امتداد می‌یابد و در دره سرهنگ وارد تونل‌های بلند البرز به موازات جاده قدیم کرج - چالوس امتداد می‌یابد و در دره سرهنگ وارد تونل‌های بلند البرز به طول ۶/۴ کیلومتر شده و در پل زنگوله خارج می‌شود. سپس با عبور از ارتفاعات البرز به موازات جاده موجود کرج - چالوس با گذر از کنار شهر مرزن‌آباد تا شهر چالوس ادامه یافته و در نهایت با یک تقاطع غیر هم‌سطح به کمربندی چالوس - تنکابن متصل می‌گردد. در شکل ۱-۳ پلان مسیر آزادراه تهران - شمال نشان داده شده است. (گزارش پروژه آزادراه تهران - شمال)



شکل ۳-۱: موقعیت جغرافیایی آزادراه تهران - شمال (گزارش پروژه آزادراه تهران - شمال)

این آزادراه با کوتاه کردن فاصله تهران - چالوس از حدود ۲۰۰ به ۱۲۱ کیلومتر، میانگین زمان مسافرت را از ۴/۵ ساعت به ۱/۵ ساعت کاهش خواهد داد. میانگین سرعت در آزادراه حدود ۸۸ کیلومتر در ساعت است. ظرفیت این آزادراه در شرایط مناسب روزانه معادل ۲۵۰۰۰ خودروی سبک و سنگین خواهد بود. این آزادراه دارای دو خط عبور در هر باند (در فرازهای تند ۳ خط عبور) می باشد. حداکثر شیب طولی ۰/۶٪، حداقل شعاع قوس ها در اکثر مسیر ۴۵۰ متر است.

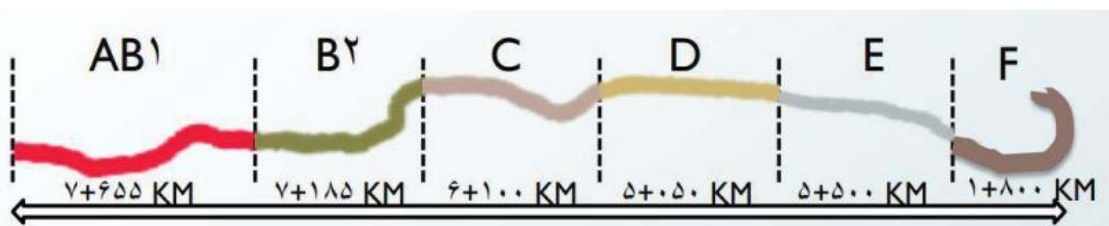
از مهم ترین اهداف و مزایای احداث این آزادراه می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- سفری ایمن و مطمئن به سواحل دریای خزر
- گسترش و توسعه محور شمال - جنوب
- دستیابی سریع به کشورهای آسیای میانه
- کوتاه شدن راه و بالا رفتن کیفیت مسی
- کاهش خسارت های مالی و جانی

- توسعه اقتصادی و فرهنگی سواحل دریای خزر
- ایجاد فرصت‌های شغلی و جاذبه‌های توریستی

با هدف بهره‌برداری سریع‌تر از آزادراه و به‌منظور بهینه‌سازی زمان بهره‌برداری و هزینه‌های احداث مسیر آزادراه به چهار منطقه تقسیم‌بندی گردیده است تا با احداث هریک از مناطق به‌صورت مستقل و در ترکیب با راه موجود، بخشی از مشکلات ترافیکی و ترددی مسیر را حل گردد.

منطقه یک: این منطقه حدفاصل تهران- دوآب شهرستانک به طول ۳۲ کیلومتر می‌باشد و از تقاطع بزرگراه آزادگان و بزرگراه شهید همت شروع و با عبور از مناطق تونل کن، سولقان، امامزاده عقیل و تونل تالون و در دوآب شهرستانک به منطقه دو متصل می‌شود. اجرای تنها این قسمت که طول آن تقریباً ۳۲ کیلومتر بوده و احداث آن در اولویت می‌باشد، موجب می‌شود قسمتی از راه فعلی که از طریق کرج- چالوس می‌گذرد حذف‌شده و مسیر فعلی حدود ۶۰ کیلومتر کوتاه‌تر می‌شود. به‌منظور بهره‌برداری سریع‌تر از منطقه یک، شرکت آزادراه تهران-شمال آن را به چند قطعه تقسیم‌بندی کرده و به‌صورت مستقل به پیمانکاران طرح واگذار کرده است. در شکل ۲-۳ قطعه‌های مختلف منطقه یک به همراه طول آن‌ها نشان داده شده است.



شکل ۲-۳: قطعه‌های مختلف منطقه یک آزادراه تهران- شمال (گزارش پروژه آزادراه تهران- شمال)

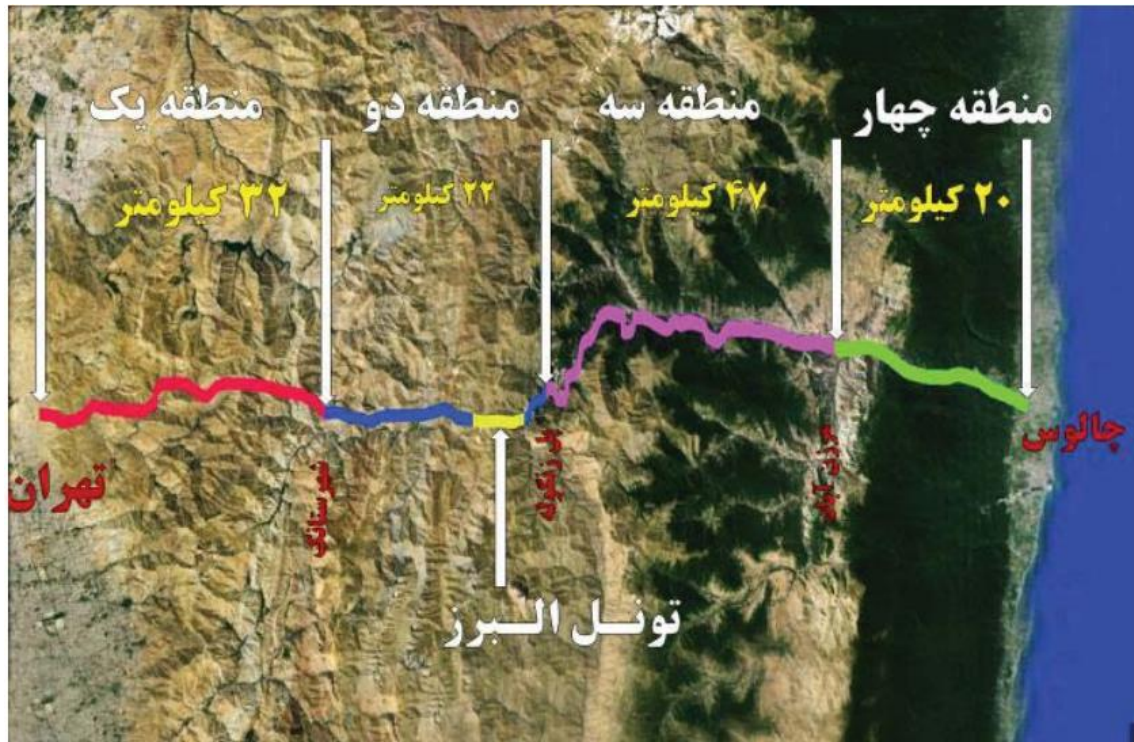
منطقه دو: این فاصله حدفاصل دوآب شهرستانک- پل زنگوله به طول تقریبی ۲۲ کیلومتر می‌باشد که تونل‌های البرز به طول ۶۴۰۰ متر در این منطقه قرار می‌گیرد. با اجرای این قسمت، طول مسیر جاده فعلی کرج- چالوس حدود ۵ کیلومتر کوتاه می‌شود.

منطقه سه: این منطقه حدفاصل پل زنگوله- سهراهی دشت نظیر به طول ۴۷ کیلومتر می باشد.

منطقه چهار: این منطقه حدفاصل سهراهی دشت نظیر- چالوس به طول ۲۰ کیلومتر از مرزن آباد

شروع و به کمربندی چالوس- تنکابن ختم می گردد. شکل ۳-۳ تقسیم بندی مسیر آزادراه تهران-

شمال را نشان می دهد.



شکل ۳-۳: تقسیم بندی مسیر آزادراه تهران- شمال (گزارش پروژه آزادراه تهران- شمال)

۳-۳ خصوصیات کلی زمین شناسی عمومی مسیر آزادراه تهران- شمال

مسیر آزادراه تهران- شمال از تشکیلات رسوبی مربوط به دوران های اول و دوم و سوم زمین شناسی

شامل سری رسوبی، آهکی، گچی، نمکی و ... و همچنین تشکیلاتی که منشا آذرین دارند مانند توف

ها عبور می کند.

۳-۳-۱ ساختار تکتونیکی

سلسله جبال البرز، جزئی از قسمت شمالی کوهزایی آلپ- هیمالیا به شمار می‌رود که از کپه داغ در شمال غرب مشهد تا آذربایجان ادامه دارد. این سلسله جبال در شمال تهران، البرز مرکزی نام دارد. چین خوردگی‌های البرز نتیجه دو کوهزایی مهم پرکامبرین و آلپ در کرتاسه می باشد که سازند کرج^۱ در ائوسن و در محیط آب تشکیل یافته و سپس در فازهای بعدی کوهزایی، به صورت چین خورده و گسل درآمده است. شواهد عینی مانند جابجایی گسل‌ها و زمین لرزه‌ها نشان می‌دهد که هنوز در این منطقه کوهزایی به پایان نرسیده است. به این دلیل در شرایط فعلی کوه‌های البرز جنوبی، البرز مرکزی که مسیر آزادراه آن را قطع می‌کند شامل تاقدیس و ناودیس‌های متعددی همراه با گسل‌های بسیار است.

از جنوب به شمال (تهران به سمت دریای خزر) به‌طور کلی پنج منطقه کاملاً متمایز از نظر زمین‌شناسی وجود دارد که عبارت‌اند از:

منطقه ۱ (جنوبی‌ترین بخش): محدوده بین گسل شمال تهران و گسل موشا- فشم متشکل از توف‌ها، گدازه‌ها همراه با شیل مربوط به تشکیلات (سازند) کرج- دوره ائوسن

منطقه ۲ (بخش جنوبی): محدوده بین گسل موشا- فشم و گسل طالقان، متشکل از سری رسوبی دوران‌های اول و دوم زمین‌شناسی

منطقه ۳ (بخش میانی): محدوده بین گسل طالقان و گسل کندوان، متشکل از توف و گدازه و شیل تشکیلات کرج- دوره ائوسن

¹ Karaj Formation

منطقه ۴ (بخش شمالی): محدوده بین گسل کندوان و گسل مکارود، متشکل از سری رسوبی

مربوط به دوران‌های اول و دوم زمین‌شناسی

منطقه ۵ (شمالی‌ترین بخش): محدوده بین گسل مکارود و گسل عظیم البرز، متشکل از

سنگ‌های دوره‌های ژوراسیک و کرتاسه. (گزارش پروژه آزادراه تهران-شمال)

۲-۳-۲ خصوصیات سنگ‌شناسی

منطقه وسیعی از آزادراه تهران-شمال (منطقه ۱ و منطقه ۳) از میان توفها و سازند کرج عبور می‌کند، سازند کرج بخشی از سلسله جبال البرز بوده و شاخص‌ترین واحد سنگی منطقه می‌باشد و قبلاً به اسامی مختلفی از جمله سری سبز(تیتزه^۱ در سال ۱۸۷۷)، طبقات سبز(دلنباخ^۲ در سال ۱۹۶۴) و توفیت‌های سبز البرز(درویش زاده در سال ۱۹۶۴) نام‌گذاری شده است و به علت نزدیکی به تهران و گسترش عظیم آن در منطقه البرز جنوبی، به‌وسیله محققان زیادی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. در سال ۱۹۶۶ توسط ددوال^۳ (که سازند را به‌طور مقطع کامل بررسی کرده است) سازند کرج نامیده شده است. این سازند از مواد آذرین آواری زیردریایی تشکیل شده و همراه آن از یک‌طرف مواد آتشفشانی و نفوذی نظیر گدازه، دایک، سیل، آگلومرا و ... و از طرف دیگر مواد رسوبی نظیر شیل و آهک دیده می‌شود.

آنچه بیش از همه در این سازند اهمیت دارد، همان توف‌های سبز رنگی است که در نتیجه راسب شدن مواد حاصل از آتشفشانی در نزدیکی سطح دریا به وجود آمده است. بعضی از ویژگی‌های این سازند به شرح زیر است :

¹ Titzeh

² Dellenbach

³ Dedual

الف) سن : اغلب زمین شناسان سن این سازند را به دلایل زیادی از جمله بر اساس اطلاعات فسیل‌شناسی بر روی میکرو فسیل‌ها، ائوسن میانی ذکر کرده‌اند.

ب) رنگ : به نظر محققانی که در مورد سازند کرج مطالعه کرده‌اند، عواملی در ایجاد رنگ سبز دخالت داشته که به ترتیب اهمیت عبارت‌اند از :

- محیط احیاکننده‌ای که در هنگام رسوب‌گذاری حاکم بوده است.
- کانی‌های تشکیل‌دهنده آن نظیر کلریت و مونت مورینیت
- نوع سیمان رسوبی که سیلیسی، رسی، آهکی یا شیشه‌ای می‌باشد.
- فشردگی و تراکم رسوبات که در انواع متراکم آن، رنگ تیره و در انواع غیر متراکم آن، رنگ روشن‌تر است.

ج) ضخامت : تاکنون ضخامت دقیقی از این سازند ارائه نشده است و علت این ابهام در تعیین ضخامت را باید در چین‌خوردگی‌ها و عملکرد گسل‌ها و راندگی‌هایی دانست که این سازند را در بر گرفته است. ضخامت این سازند را ایوانو^۱ و هوشمندزاده در سال ۱۹۷۱ بیش از ۱۰۰۰۰ متر، دکتر معتمد در سال ۱۳۶۶، ۵۰۰۰ متر و ددوال ۳۳۰۰ متر تعیین کرده‌اند.

د) تکتونیک : توف‌های البرز به شدت چین‌خورده‌اند و گسل‌ها و شکاف‌های زیادی در آن‌ها وجود دارد. نیروهایی که باعث چین‌خوردگی مختلف این منطقه شده است، سنگ‌های توده نفوذی را نیز مورد تاثیر قرار داده است. محدوده البرز شامل تاقدیس‌های فشرده همراه با ناودیس‌های باز با راستای محوری NWW-SEE است که باعث چین‌های مکرر در منطقه شده است.

¹ Iwao

در منطقه مورد مطالعه انواع درزه‌های طولی، عرضی و برشی دیده می‌شود. درزه‌های برشی در تمام محدوده و درزه‌های طولی و عرضی در محل محورهای چین‌های موجود در منطقه بیشتر قابل مشاهده هستند. درزه‌های برشی بیشترین گسترش را در منطقه دارند، زیرا مقاومت کششی سنگ‌ها به مراتب از مقاومت فشاری آن‌ها کمتر است

ه) **دگرگونی و دیاژنز** : آن بخش از توف‌های سبز البرز که در اعماق زیاد قرار گرفته‌اند، به علت عمق زیاد رسوبات و میزان درجه حرارت و فشار، دگرگونی منطقه‌ای خفیفی در آن‌ها به وجود آمده است.

و) **از نظر آتش‌فشان‌شناسی** : آتش‌فشان‌های ائوسن البرز، تشکیلات وسیع سبز رنگ به وجود آورده است که بیشتر آن از مواد آذرین- تخریبی ساخته شده است و به توف‌های سبز هم نامیده می‌شود. به توف‌هایی که با مواد رسوبی اختلاط یافته‌اند، توفیت گفته می‌شود. شرایط تشکیل توفیت‌های البرز را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد :

۱- مطالعات برخی از قطعات آتش‌فشانی محفوظ مانده در توفیت‌ها، نشان می‌دهد که گدازه سازنده توفیت‌ها از نوع اسیدی تا حد متوسط از جمله داسیت بوده که در واقع از نوع آتش‌فشان‌های انفجاری می‌باشد.

۲- ضخامت و گسترش زیاد این رسوبات نشان‌دهنده تداوم فعالیت انفجاری آتش‌فشان‌های زیردریایی است که به طور متناوب مراحل آرامش نیز داشته است (تفاوت توفیت‌ها با رسوبات آهکی و شیلی) و قطعات آتش‌فشانی حاصل از انفجار به صورت خاکستر در آب پخش شده‌اند و در میان آن‌ها قطعات فلدسپات، کوارتز و بیوتیت نیز دیده می‌شود.

۳- محیط تشکیل توف‌ها دریای کم عمق بوده است. به علت تغییر زیاد ضخامت در این سنگ‌ها می‌توان نتیجه گرفت که دریای مزبور از نظر عمق اختلافات زیادی داشته است. (گزارش پروژه آزادراه

تهران- شمال)

۳-۴ معرفی ترانشه مورد مطالعه

قطعه C از آزادراه تهران- شمال از کیلومتر ۸۴۰+۱۵ تا کیلومتر ۹۴۰+۲۱ به طول کلی ۶ کیلومتر و ۱۰۰ متر می باشد. ترانشه مورد مطالعه به طول ۱۲۰ متر و در حد فاصل کیلومتر ۴۳۰+۲۰ تا کیلومتر ۵۵۰+۲۰ در قطعه C از منطقه یک آزادراه تهران- شمال قرار دارد. میانگین روباره ۴۰ متر، گسل های موجود در منطقه به صورت نرمال است. در این محدوده میانگین سالانه دما ۱۸ درجه سانتی گراد می باشد که بازه دمایی از ۲۵- تا ۴۱ درجه می باشد. میزان بارش ها در بخش های شمالی و جنوبی پروژه بسیار متفاوت است. در بخش جنوبی که ترانشه مورد مطالعه در آن واقع شده است بارش ها اغلب به صورت برف و بیشینه ماهیانه آن ۵۸mm در ماه های آبان، آذر، دی و بهمن می باشد. (گزارش پروژه آزادراه تهران- شمال)

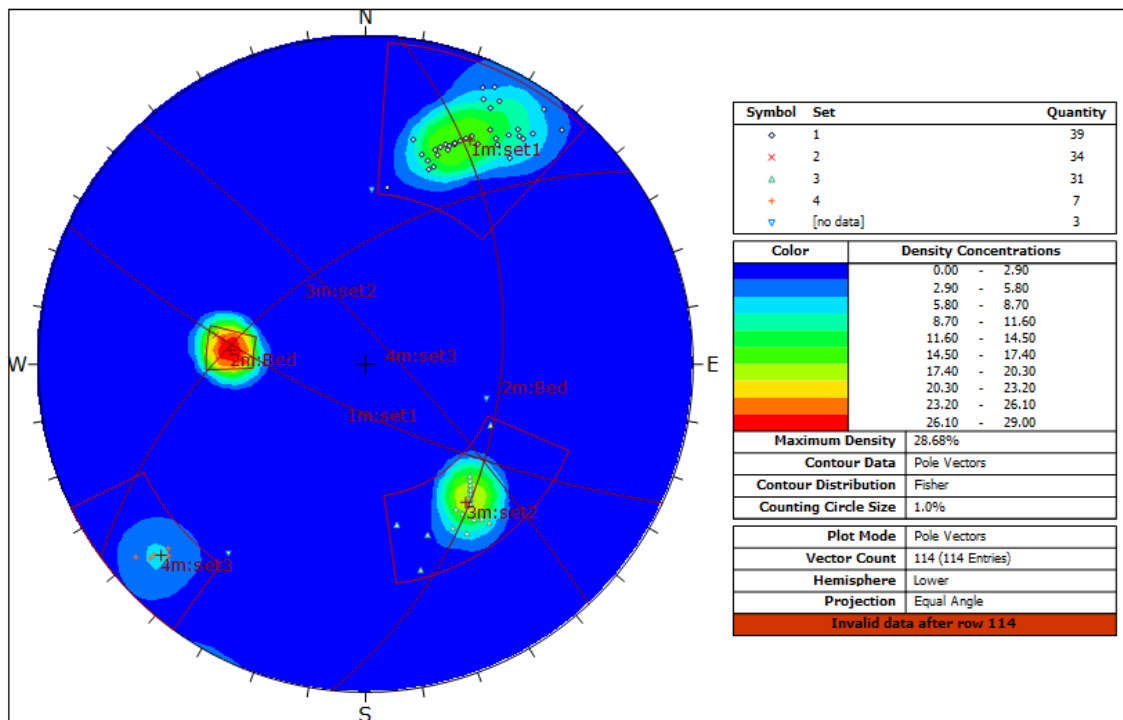
۳-۴-۱ خصوصیات زمین شناسی ساختاری ترانشه مورد مطالعه

به منظور ویژگی سنجی رفتار توده سنگ، برداشت زمین شناسی مهندسی از ترانشه های بعد از دهانه ی شمالی تونل ۱۱۵ (کیلومتر ۲۰۳+۲۰ تا کیلومتر ۲۱+۴۵) انجام شده است. در این تحقیق داده های مورد نیاز مربوط به ورودی نرم افزار Dips پس از برداشت امتداد، شیب، فاصله داری و امتداد یافتگی ناپیوستگی ها توجیه شده است. در این قسمت جهت تشخیص مشخصات سیستم یا سیستم درزه های موجود در منطقه تعداد ۳۹۴ داده سطحی برداشت شده از ترانشه مورد تحلیل قرار گرفته و نتایج حاصل در شکل های زیر آمده است. هم چنین، سطح درزه های سنگ دارای زبری کم بوده و درزه ها بدون پرشدگی هستند البته، سطوح لایه بندی دارای هوازگی و پرکننده از نوع بافت سنگ (هوازده) است.

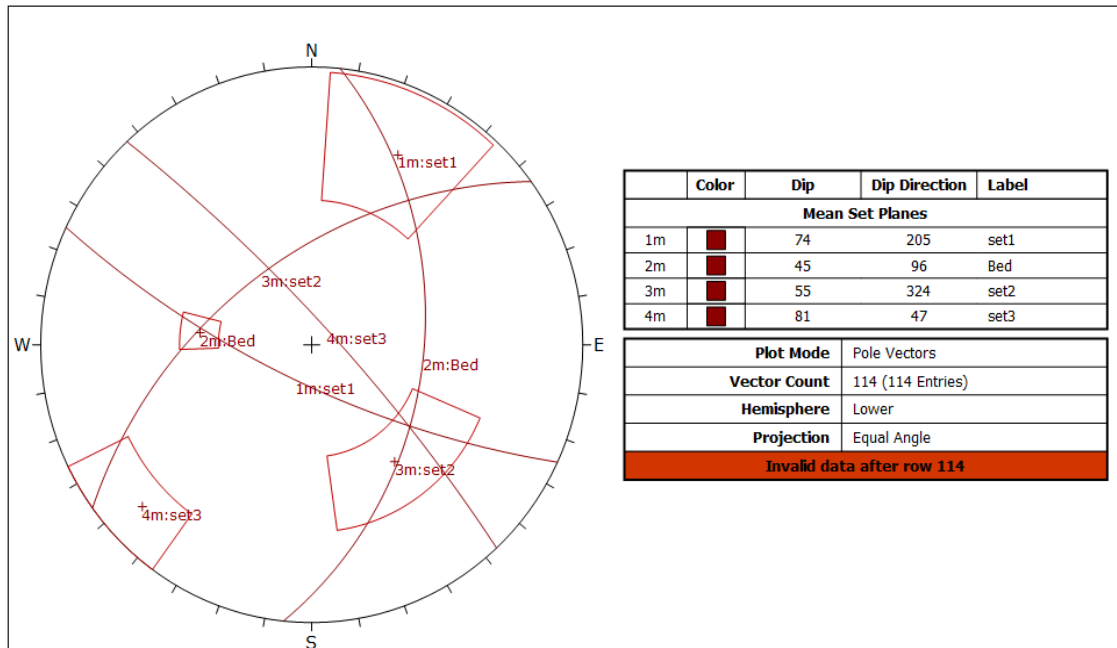
دسته درزه های J_1 ، J_2 ، J_3 دارای فاصله داری از ۵ سانتی متر تا ۴۰ سانتی متر متغیر بوده و به طور متوسط، فاصله داری لایه بندی ۱۲ سانتی متر است.

همچنین، درزه های موجود در هر دسته به طور خاصی با یکدیگر موازی بوده و در هر موقعیت برداشت، به طور محلی درزه ها به طور کامل با هم موازی هستند. البته در طول مسیر، جهت داری و

جهت شیب لایه‌بندی و سه دسته‌درزه اصلی یک تغییر تدریجی را نشان می‌دهد. با توجه به برداشت‌های انجام‌شده و شکل ۳-۳ و شکل ۴-۳، مشخصات جهت‌داری دسته‌درزه‌های J_1 ، J_2 و J_3 و لایه‌بندی (JB_4) در جدول ۱-۳ نشان داده‌شده است. هم‌چنین، هر سه دسته‌درزه موجود در توده‌سنگ در تمامی نواحی به‌صورت سطوح ممتد و بدون اعوجاج قابل مشاهده هستند و مشابه هستند. سطح درزه‌ها نیز تقریباً صاف بوده و زبری سطوح بسیار کم است. هم‌چنین، درزه‌های موجود در هر دسته به‌طور خاصی با یکدیگر موازی بوده و در هر موقعیت برداشت، به‌طور محلی درزه‌ها به‌طور کامل موازی هستند. البته در طول مسیر، جهت‌داری و جهت شیب لایه‌بندی و سه دسته‌درزه اصلی یک تغییر تدریجی را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۴: نگاره قطبی ناپیوستگی‌های برداشت‌شده



شکل ۳-۵: دسته‌درزه‌های انتخاب‌شده با بیشترین تمرکز

جدول ۳-۱: جهت‌داری دسته‌درزه‌های اصلی و لایه‌بندی

نوع عارضه	شیب و جهت شیب شاخص (میانگین)	دامنه تغییرات شیب	دامنه تغییرات جهت شیب
دسته‌درزه J_1	۷۲/۲۲۰	۸۷ تا ۵۴	۲۲۲ تا ۱۷۶
دسته‌درزه J_2	۵۳/۳۲۰	۶۸ تا ۴۱	۳۵۴ تا ۲۸۱
دسته‌درزه J_3	۸۰/۴۶	۸۹ تا ۷۰	۵۵ تا ۳۵
لایه‌بندی (JB_4)	۴۵/۹۶	۵۰ تا ۴۰	۱۰۱ تا ۹۱
سطح ترانشه	۸۵/۴۸	۵۱ تا ۴۶	۸۷ تا ۸۳

لایه‌های سنگی از شیل، رس سنگ و سیلستون و به‌طور عمده از شیل تشکیل شده‌اند. سطح لایه-بندی به‌طور کاملاً صاف بوده (بدون چین‌خوردگی و اعوجاج) و در بسیاری از نواحی به‌صورت یک سطح کاملاً آینه‌ای قابل مشاهده است.

نمای کلی از این درزه‌ها و سطح لایه‌بندی در شکل ۳-۲ نشان داده است.



شکل ۳-۶: نمایی از وضعیت زمین‌شناسی و سطوح ناپیوستگی در ترانشه مورد بررسی

۳-۵ بررسی پارامترهای مکانیکی و رفتاری درزه

مقاومت برشی سنگ و ناپیوستگی‌های سنگی یکی از مهم‌ترین پارامترهای طراحی در مهندسی سنگ می‌باشد. این مقاومت از دو پارامتر چسبندگی و زاویه اصطکاک تشکیل شده است که هر یک از آن‌ها به عوامل متعددی وابسته‌اند. آگاهی از میزان این دو پارامتر در تحلیل پایداری ترانشه‌های سنگی و تحلیل بلوک‌های سنگی ضروری است. عوامل موثر بر مقاومت برشی سنگ شامل هوازدگی، زبری سطح برش، نوع و مقدار پرشدگی، حضور آب در سطح برش و فشار عمودی است. تحلیل رفتار برشی سنگ‌ها مستلزم درک صحیح مبانی نظری شکست برشی و شناخت دقیق مدل‌های رفتاری درز و شکاف‌ها در توده سنگ می‌باشد. صفحه برش معمولاً سطح یک ناپیوستگی مثل درز و ترک، لایه‌بندی، تورق، گسل و یا فصل مشترک سنگ باشد.

تقریباً تمامی سنگ‌ها به‌جز در اعماق بسیار زیاد، به‌طور طبیعی دارای شکستگی‌ها و درزه‌هایی هستند که رفتار مکانیکی آن‌ها اغلب توسط درزه‌های درون سنگ و پارامترهای مربوط به آن نظیر شکل، اندازه، وجود پرکننده، تعداد، نحوه توزیع و مقاومت نقاط تماس بین دیواره‌ها کنترل می‌شود. از آنجاکه در اکثر موارد، شکست سنگ در محل به علت برش است، بنابراین مقاومت برشی به‌عنوان اصلی‌ترین معیار مقاومتی در نظر گرفته می‌شود. در این تحقیق مقاومت برشی مستقیم نمونه‌ها در آزمایشگاه تعیین شد سپس با توجه به اینکه امکان به‌کارگیری تمامی پارامترهای مؤثر بر رفتار برشی درزه در یک معیار و یک مدل رفتاری وجود ندارد، در میان معیارها و مدل‌های رفتاری مختلف در ارتباط با رفتار برشی درزه‌های سنگی سعی شده است مهم‌ترین پارامترهای مؤثر بر رفتار برشی درزه مورد استفاده قرار گیرد که در این میان معیار بارتن به‌عنوان یکی از بهترین معیارها و مدل‌های رفتاری در ارتباط با رفتار برشی درزه‌های سنگی بیان شده است. در این تحقیق به ارزیابی پارامترهای مختلف رفتار برشی که در معیار بارتن مورد استفاده قرار می‌گیرد برای نمونه‌های سنگی ترانشه پرداخته شده است. در آخر نتایج برش مستقیم نمونه‌ها در آزمایشگاه با معیار بارتن مقایسه می‌شود.

۳-۶ آزمایش‌های مکانیک سنگی

به منظور تعیین خصوصیات فیزیکی و مکانیکی درزه‌های ترانشه، آزمایش‌های مکانیک سنگ روی نمونه‌های برداشت‌شده از ترانشه انجام گردید. نمونه‌ها به‌طور تصادفی از رخساره ترانشه‌های سنگی و با توجه به ابعاد درزه‌ها انتخاب گردید و در ابعاد مختلف به آزمایشگاه مکانیک سنگ منتقل شدند. بخشی از نمونه‌های اولیه اخذشده از منطقه در شکل ۳-۵ آورده شده است.



شکل ۳-۷: بخشی از نمونه‌های اولیه

نمونه‌های اخذشده از منطقه ابتدا بایستی به اندازه‌های موردنیاز بریده شوند. برای این منظور ابتدا صفحه برش انتخاب می‌شود. برای آزمایش برش مستقیم ابعاد نمونه‌ها و موقعیت صفحه برش طوری انتخاب می‌شود که تا حد امکان نیاز به آماده‌سازی بیشتر در آزمایشگاه نبوده و برای قالب‌گیری مناسب باشد. صفحه برش باید ترجیحاً مربعی با مساحت حداقل ۲۵۰۰ میلی‌متر مربع باشد. (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰)، از آنجاکه نمونه‌ها به منظور قرارگیری در جعبه برش آماده می‌شدند، طول آن‌ها بایستی حداکثر تا ۷ سانتی‌متر بریده می‌شد.

جهت تعیین پارامتر مقاومت فشاری سنگ بکر و تاثیر هوازدگی بر مقاومت فشاری از آزمایش بار نقطه‌ای و جهت تعیین مقاومت برشی درزه‌ها که بر اساس چسبندگی و زاویه اصطکاک ارائه می‌شود از آزمایش برش مستقیم استفاده گردید.

۳-۶-۱ آزمایش بار نقطه‌ای

مقاومت فشاری تک‌محوری یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که در اکثر پروژه‌های مهندسی سنگ موردنیاز بوده و تعیین می‌گردد اما انجام آزمایش تک‌محوری، مستلزم آماده‌سازی دقیق نمونه و درعین‌حال، نتایج حاصل وابستگی شدیدی به شیوه بارگذاری دارد. به‌منظور تعیین سریع شاخصی برای نشان دادن مقاومت سنگ، آزمایش بار نقطه‌ای پیشنهاد گردید. این آزمایش در مرسوم‌ترین شیوه خود روی مغزه‌های سنگی و به‌صورت قطری انجام می‌گیرد، اما تلاش‌های زیادی صورت گرفته است تا کاربرد این روش برای نمونه‌هایی با شکل دیگر نیز تعمیم داده شود. استفاده از کلوخه‌های سنگی نامنظم برای تعیین مقاومت، در سال ۱۹۸۵ توسط پروتودیاکونوف و بلیکوف^۱ ارائه گردید. نتایج این تحقیقات توسط انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ^۲ به‌صورت دستورالعمل تهیه گردید. در این آزمایش آماده‌سازی نمونه بسیار مختصر بوده و نتایج آزمایش مقاومت بار نقطه‌ای به‌عنوان شاخصی برای طبقه‌بندی ماده سنگ بوده می‌باشد. جهت تعیین پارامتر مقاومت فشاری از آزمایش بار نقطه‌ای روی نمونه‌های برداشت‌شده از ترانشه در دودسته سنگ بکر و سنگ هوازده انجام گردید که در اثر هوازگی مقاومت فشاری به‌شدت کاهش پیدا کرده است. (در ضمن به علت محدود بودن تعداد نمونه‌ها، از هر دسته ۴ یا ۵ نمونه برای مقایسه با یک‌دیگر انتخاب شده است.)

جدول ۳-۳- مقاومت فشاری (MPa) حاصل از روش بار نقطه‌ای (سنگ بکر)

آزمایش	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴	نمونه ۵
بار نقطه‌ای	۷۲	۸۰	۱۰۰	۶۷	۶۸

جدول ۳-۴- مقاومت فشاری (MPa) حاصل از روش بار نقطه‌ای (سنگ هوازده)

آزمایش	نمونه ۱	نمونه ۲	نمونه ۳	نمونه ۴
بار نقطه‌ای	۲۱	۱۵	۳۰	۲۱

^۱ Protodyakonov & Voblikov

^۲ International Society for Rock Mechanics

۳-۶-۲ تعیین مقاومت برشی مستقیم نمونه‌ها

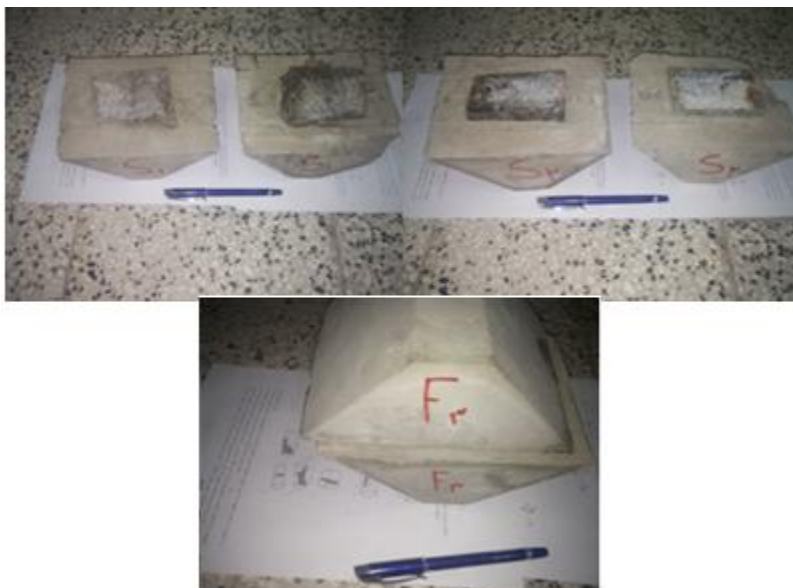
هدف از این آزمایش، مقاومت برشی مستقیم نهایی و ماندگار درزه به صورت تابعی از تنش عمودی اعمال شده بر صفحه برش تعیین می‌گردد. در اینجا برای انجام آزمایش برش مستقیم از استاندارد ASTM D ۵۰۶۷ استفاده شده است (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰)

برای انجام این آزمایش ابتدا بایستی نمونه در داخل قالب مربوطه قرار گرفته و با استفاده از گچ کلاستر و سیمان و سایر مواد قالب‌گیری مقاوم، داخل آن محکم می‌شود. (شکل ۳-۸)



شکل ۳-۸: وسیله قالب‌گیری نمونه‌ها و نمونه قرار گرفته در مخلوط گچ و سیمان

نمونه داخل قالب طوری قرار داده می‌شود که صفحه برش در موقعیت و جهت صحیحی حفظ شود. ماده قالب‌گیری ریخته شده و پس از گیرش، قسمت دیگر نمونه به طریق مشابه قالب‌گیری می‌شود. از هر طرف صفحه برش حداقل ۵ میلی‌متر نباید قالب‌گیری شود. (فهیمی فر و سروش، ۱۳۸۰) به نمونه قالب‌گیری شده فرصت داده می‌شود تا کاملاً خشک شده و استحکام لازم را برای آزمایش به دست آورد. در شکل ۳-۹ چند نمونه قالب‌گیری شده آماده آزمایش برشی نشان داده شده است.



شکل ۳-۹: نمونه‌های آماده‌شده در آزمایشگاه

برای اعمال نیروی برشی و نیروی قائم این دستگاه دارای دو نوع روش اعمال بار است. برای اعمال بارهای قائم از سیستم هیدرولیکی و برای ثابت نگه‌داشتن بار قائم اعمالی از سیستم پنوماتیکی استفاده شده است. پس از قرار دادن نمونه در جعبه برش، برای قرائت جابجایی‌های برشی از گیج مکانیکی با دقت $0/01$ میلی‌متر استفاده شده است. در ابتدا این گیج نصب و کنترل شده و قرائت‌های اولیه بار و جابجایی یادداشت می‌گردد. بار قائم موردنظر به‌طور پیوسته و یکنواخت به نمونه اعمال می‌شود. سیم‌های فلزی که دونیمه نمونه را به یکدیگر متصل نموده‌اند قطع می‌شود سپس نیروی برشی به تدریج افزایش داده می‌شود بهتر است این نیرو را به‌صورت پیوسته و به طریقی که سرعت جابجایی برشی قابل کنترل باشد اعمال گردد.

هر نمونه تحت نیرویی عمود بر سطح ناپیوستگی قرار می‌گیرد (تنش قائم، σ) و ضمن تعیین میزان

جابجایی برشی (δ_s)، نیرو به موازات ناپیوستگی (تنش برشی، τ) اعمال می‌گردد. (شکل ۳-۸)



شکل ۳- ۱۰: دستگاه آزمایش برش مستقیم

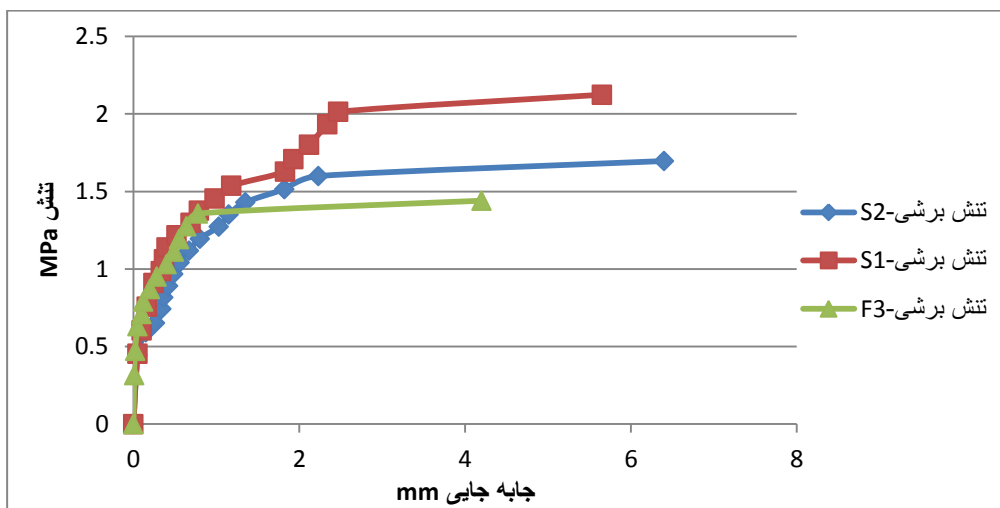
میزان نیروی برشی تا شروع برش افزایش می‌یابد. متناسب با نیروی برشی اعمال شده اندکی جابجایی برشی (افقی) نیز حاصل می‌گردد تا به مقاومت برشی حداکثر برسیم. قرائت جابجایی در چند پله افزایشی مقاومت برشی تا رسیدن به مقاومت برشی حداکثر انجام می‌شود و پس از عبور از مقاومت حداکثر برای اندازه‌گیری مقاومت برشی باقیمانده (ماندگار) ادامه می‌یابد.

در آزمایش‌های انجام‌شده با توجه به استاندارد ASTM، سرعت جابجایی در شروع آزمایش کمتر از ۰/۱ میلی‌متر در دقیقه در نظر گرفته شد. این سرعت در بین مجموعه قرائت‌ها به حداکثر ۰/۶ تا ۰/۷ میلی‌متر در دقیقه افزایش می‌یابد، تا اینکه مقاومت نهایی به‌طور دقیق ثبت گردد.

۳-۷ تحلیل نتایج آزمایش برش مستقیم

نمودار معمول تنش برشی در برابر جابه‌جایی برشی در شکل زیر برای سه نمونه آزمایشی تحت تنش قائم ثابت برای هر نمونه نشان داده شده است. برای جابه‌جایی‌های کوچک، نمونه به شکل الاستیک عمل می‌کند و تنش برشی، به‌صورت خطی افزایش می‌یابد. با عبور از نیروی مقاوم در برابر جابه‌جایی، منحنی، غیرخطی شده و مقاومت به میزان حداکثر خود یعنی مقاومت برشی اوج ناپیوستگی می‌رسد.

بعد از ترسیم منحنی‌های تنش برشی برحسب جابه‌جایی برشی مشخص گردید که منحنی‌های حاصله از این آزمایش‌ها بر روی نمونه‌ها فاقد پیک مشخص بوده و هیچ‌گونه مقاومت برشی حداکثری برای یک جابه‌جایی مشخص قابل‌تصور نیست. پدیده‌ای که به‌طور معمول باید در هنگام وقوع برش در درزه‌ها مشاهده گردد، کاهش مقاومت برش پس از رسیدن به مقاومت حداکثر است که اصطلاحاً نرم شوندگی مقاومت با کرنش^۱ خوانده می‌شود ولی در بعضی از موارد به دلیل سطح صیقلی و نرم بودن سطح درزه، بزرگ بودن نمونه یا بالا بودن مقدار تنش نرمال نسبت به JCS نمودارهای برش فاقد پیک مشخص می‌باشند [۳۶].



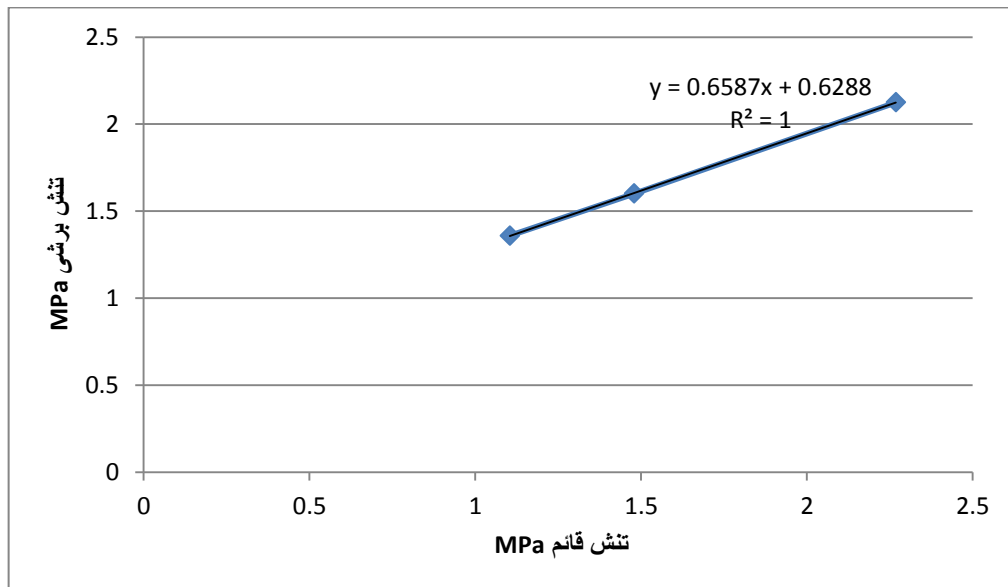
شکل ۳-۱۱: نمودار تنش برشی - جابه‌جایی برشی

با توجه به نمودارهای بالا مقادیر تنش برشی و جابه‌جایی برشی نشان می‌دهد که با فرض مقادیر مختلف برای جابه‌جایی برشی، مقادیر تنش برشی متناسب با افزایش جابه‌جایی افزایش یافته بنابراین اگر مقادیر مقاومت برشی اوج به‌دست‌آمده صرف‌نظر از جابه‌جایی برشی در برابر مقادیر تنش قائم ترسیم کنیم، رابطه شکل ۳-۱۲ به دست می‌آید که به نمودار موهر^۲ معروف بوده و خصوصیات آن به شرح زیر است:

^۱ Softening behavior strain

^۲ Mohr

اولاً این نمودار تقریباً خطی است و شیب آن معادل زاویه اصطکاک اوج سنگ، (Φ_p) است، دوم اینکه نقطه برخورد خط با محور تنش برشی، چسبندگی (c) را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۱۲: نمودارهای تنش برشی- در تنش‌های نرمال مختلف

تنش‌های نرمال باید از 0.5 (MPa) شروع می‌شد تا 1.5 (MPa) مگاپاسکال ادامه پیدا می‌کرد ولی با توجه به صیقلی بودن سطح درزه در این مقدار تنش سطوح روی سنگ روی هم حرکت کرده و سر می‌خوردند لذا از مقدار تنشی شروع شد که سطوح سنگ روی هم ایستا بوده و حرکت نکنند.

با توجه شیب خط پوش مقاومت حداکثر زاویه اصطکاک درزه و عرض از مبدأ آن میزان چسبندگی (C) می‌باشد. (Barton, 1973) با توجه به نمودار بالا مقدار C برابر 0.6 (MPa) و زاویه اصطکاک برابر $33/33$ درجه به دست می‌آید، مقدار چسبندگی 0.6 (MPa) بالا بوده و این نتیجه به علت تنش اعمالی زیاد است که با توجه به محدودیت آزمایشگاهی تنش‌های نرمال بالا باید انتخاب می‌شد ولی در تنش پایین معادل ارتفاع ترانشه چسبندگی بسیار کمی را داشته که می‌توان از آن صرفه نظر کرد و نزدیک صفر می‌باشد.

۳-۸ تاثیر مقیاس بر رفتار درزه‌ها

توده‌های سنگی توده‌هایی غیر همگن بوده و از ناپیوستگی‌ها تشکیل شده‌اند. بنابراین نتایج به دست آمده از آزمون‌های آزمایشگاهی، اغلب به اندازه نمونه و محلی که نمونه‌ها از آن جمع‌آوری شده‌اند بستگی دارد. انتخاب درست مقادیر مقاومت برشی نه فقط به وجود داده‌های آزمایشگاهی بلکه به تفسیر دقیق این داده‌ها مبتنی بر رفتار توده سنگی که ترانشه واقعی را شکل داده وابسته است. به علت طبیعت ناهمگن و ناپیوسته توده‌های سنگی، در نتایج آزمون‌های آزمایشگاهی و برجا که برای تعیین خصوصیات مکانیکی توده‌های سنگی انجام می‌گیرد یک وابستگی به اندازه در رفتار نمونه‌ها دیده می‌شود. تغییر خصوصیات در اثر تغییر اندازه، تاثیر مقیاس^۱ نامیده می‌شود. در اغلب سنگ‌ها افزایش اندازه نمونه باعث کاهش مقاومت سنگ می‌گردد. (Bandis, 1990)

هرچه مقاومت فشاری سنگ‌های دیواره درزه و یا زبری درزه کمتر باشد شدت تاثیر مقیاس کمتر خواهد بود تا جایی که در درزه‌های آینه‌ای^۲ و صفحه‌ای هیچ تاثیر مقیاسی دیده نمی‌شود.

۳-۹- معیار بارتن

مقاومت برشی درزه یک درزه، به مقدار حداکثر تنش برشی که در یک آزمایش برش مستقیم با تنش عمودی ثابت به دست می‌آید اطلاق می‌شود لذا اگر آزمایش در چندین تنش عمودی مختلف انجام می‌شود و برای هر تنش عمودی مقدار این حداکثر به دست آید، از به هم پیوستن این نقاط، پوش مقاومت برشی آن درزه در تنش‌های مختلف می‌تواند ترسیم گردد. پاتون با انجام مجموعه‌ای از آزمایش‌های برش مستقیم بر روی نمونه‌هایی با زبری دندان‌وار منظم تحت تنش‌های قائم مختلف، یک معیار دوخطی برای مقاومت برشی درزه‌ها پیشنهاد نمود که در رابطه (۴-۱) برای حالت لغزش و حرکت دندان‌ها بر روی یکدیگر و رابطه (۴-۲) بریده شدن دندان‌ها ارائه شده است.

¹ Scale effect

² Slickensided

$$\tau = \sigma \tan(\varphi + i) \quad (1-4)$$

$$\tau = c + \sigma \tan(\varphi) \quad (2-4)$$

پس از اینکه پاتون در سال ۱۹۹۶ معیار دوخطی خود را در مورد رفتار برشی سطوح ناپیوستگی‌ها ارائه داد. دید وسیع‌تری نسبت به درزه‌های سنگی و خواص و اثرات آن‌ها در توده سنگ به وجود آمد. از آن پس محققان بسیاری در مورد خصوصیات درزه‌ها و نقش آن‌ها در رفتار توده سنگ به وجود آمد. بارتون مطالعات درزه را دنبال کرد و با آزمایش‌های گوناگون بر روی سنگ‌های مختلف درزه‌دار از جمله سنگ‌آهک و گرانیت در نهایت به این نتیجه رسید که در ترازهای پایین تنش عمودی، برای بررسی مقاومت برشی درزه، زوایای زبری مرتبه دوم هم حائز اهمیت می‌شوند. در صورتی که در تنش‌های عمودی زیاد، زبری مراتب دوم و سوم اهمیت چندانی ندارند. زوایایی که نمایانگر ناهمواری‌های اصلی و عمده سطوح ناپیوستگی هستند، به‌عنوان زبری مرتبه اول در نظر گرفته می‌شوند. پستی و بلندی‌های کوچک که روی سطوح ناپیوستگی و هماهنگ با زبری‌های مرتبه اول وجود دارد و معمولاً زوایای بیشتری نسبت به زبری نوع اول دارند، زاویه زبری مرتبه دوم نامیده می‌شوند. (Barton, ۱۹۷۳) بارتون در نهایت رابطه زیر را برای مقاومت برشی درزه ارائه داد.

$$\tau = \sigma \tan\left(\varphi + JRC \log\left(\frac{JCS}{\sigma}\right)\right) \quad (3-4)$$

در این رابطه JRC ضریب زبری درزه است و معرف مقیاسی از میزان زبری لغزنده است که مقدار آن از صفر تا بیست تغییر می‌کند و متناسب با صاف‌ترین تا زبرترین درزه است. مقدار JRC از مقایسه چشمی شرایط سطح نسبت به پروفیل‌های استاندارد مبتنی بر ترکیب ناهمواری‌های سطح نسبت به پروفیل‌های استاندارد مبتنی بر ترکیب ناهمواری‌های سطح تخمین زده می‌شود.

که JCS مقاومت فشاری درزه و σ تنش موثر قائم سطح ناشی از وزن روباره سنگی است.

در رابطه عبارت $JRC \log\left(\frac{JCS}{\sigma}\right)$ معادل زاویه زبری i در رابطه (۱-۴) می‌باشد. برای تنش‌های

بالا و متناظر با مقاومت سنگ که $\left(\frac{JCS}{\sigma}\right) = 1$ می‌گردد و ناهمواری‌ها از بین می‌رود، مقدار این عبارت

صفر می شود. برای میزان تنش کم، نسبت $(\frac{JCS}{\sigma})$ به سمت بی نهایت میل کرده و مولفه زبری مقاومت برشی، بسیار زیاد می شود. برای این که مقادیر واقعی زبری در طراحی لحاظ شود، میزان نباید از حدود ۵۰ درجه فراتر رود و محدوده مناسب نسبت $(\frac{JCS}{\sigma})$ بین ۳ و ۱۰۰ می باشد.

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{0.02 JRC_0}$$

و

$$JCS_n = JCS_0 \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{0.02 JCS_0}$$

که L_0 اندازه سطح به کار رفته برای تعیین JRC و L_n معرف ابعاد سطح لغزش می باشد.

بایستی توجه نمود مقیاس بندی بر مقادیر JCS و JRC تاثیرگذار می باشد طوری که با افزایش ابعاد ناپیوستگی، مقادیر JCS و JRC به صورت متناظر کاهش می یابند. دلیل این ارتباط آن است که زبری در مقیاس کوچک در مقایسه با ابعاد ناپیوستگی مقدار کمتری دارد. (Bartson, ۱۹۸۳ و Bandis)

۳-۱۰ مقایسه نتایج معیار بارتن با نتایج آزمایش برش مستقیم

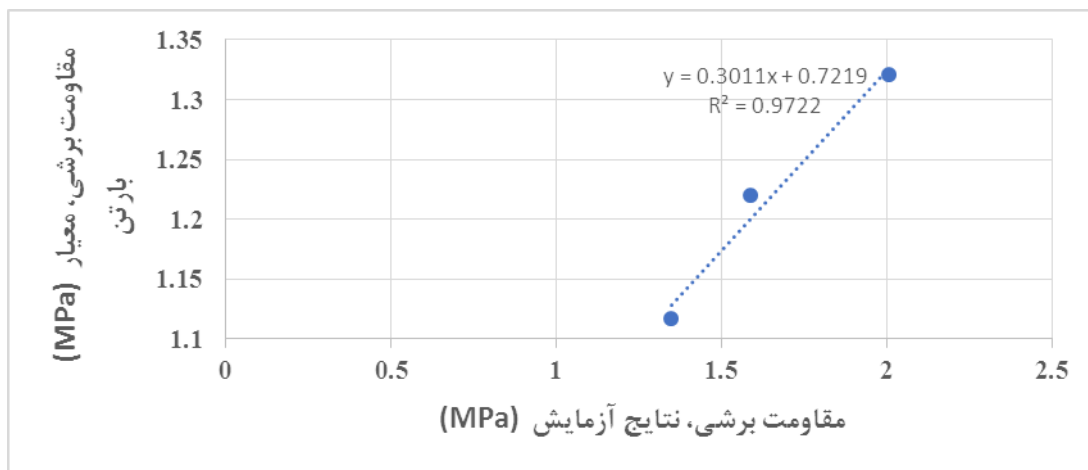
یکی از روش های بررسی رفتار برشی ناپیوستگی ها استفاده از معیارها و مدل های رفتاری می باشد.

شکل ۳-۹ نشان می دهد که معیار بارتن، نتایج حاصل از آزمایش برش مستقیم را با $R^2 = ۰/۹۸$

تخمین می زند. ارزیابی مقاومت برشی به دست آمده از آزمایش برش مستقیم برای سه نمونه، از معیار بارتن استفاده شد که با ضریب همبستگی بالا، تخمین حاصل نتیجه بسیار مناسبی برای معیار بارتن

به حساب می آید. { در ضمن JRC ، ۵ و JCS ۴۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است } گزارش کار

{ آزادراه تهران - شمال }



شکل ۳-۱۳: همبستگی نتایج حاصل از معیار بارتن با نتایج حاصل از آزمایش

۳-۱۱- جمع بندی

با توجه به توضیحات آمده در این فصل، هر سه دسته درزه موجود در توده سنگ در تمامی نواحی به صورت سطوح ممتد و بدون اعوجاج قابل مشاهده هستند. سطح درزه‌ها نیز تقریباً صاف بوده و زبری سطوح بسیار کم است. همچنین، درزه‌های موجود در هر دسته به طور خاصی با یکدیگر موازی بوده و در هر موقعیت برداشت، به طور محلی درزه‌ها به طور کامل موازی هستند. البته در طول مسیر، جهت‌داری و جهت شیب لایه بندی و سه دسته درزه اصلی یک تغییر تدریجی را نشان می‌دهد.

همچنین با توجه به نتایج آزمایشگاهی برش مستقیم و مقایسه نتایج آن با معیار بارتن که ضریب همبستگی بالای ۹۸٪ را نشان می‌دهد، کارایی بالای معیار بارتن در تخمین مقاومت برشی سنگ‌های با سطوح صیقلی و تقریباً آینه‌ای را می‌دهد.

فصل چهارم

تحلیل پایداری به روش های

تجربی و سینماتیکی

و تعادل حدی

۴-۱ مقدمه

برای تحلیل پایداری ترانشه‌های سنگی روش‌های مختلفی ارائه شده است که از جمله آن‌ها می‌توان به روش تجربی، روش سینماتیکی، روش تعادل حدی و مدل‌سازی عددی و ... اشاره نمود. تمامی این روش‌ها با در نظر گرفتن هندسه شیب و ساختارهای موجود در آن و پارامترهای اختصاصی دیگر سعی در تحلیل ترانشه‌های سنگی مورد مطالعه دارند که با توجه به کاربری ترانشه‌های سنگی و امکانات موجود بهترین روش ممکن انتخاب می‌شود. از میان روش‌های ارائه شده مدل‌سازی عددی می‌تواند بهترین نتیجه را در اختیار قرار دهد ولی برای تعریف دقیق نوع مدل‌سازی باید دید اولیه‌ای نسبت به منطقه داشت تا بر اساس نوع شکست‌های موجود و نیز با توجه به پیوسته یا ناپیوسته بودن محیط اقدام به مدل‌سازی کرد. در ترانشه‌های سنگی، ابتدا بر اساس برداشت‌های صحرایی ناپیوستگی‌های صحرایی، ناپیوستگی‌های عمده و مؤثر در وقوع شکست با استفاده از نرم‌افزار دیپس^۱ معرفی می‌شود سپس با توجه به هندسه شیب و پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ نوع شکست احتمالی در ترانشه‌های سنگی تعیین می‌شود. در این فصل با چهار روش تجربی، روش سینماتیکی و تعادل حدی و روش عددی به تحلیل پایداری ترانشه سنگی پرداخته می‌شود.

۴-۲- روش تجربی (SMR)

از دیرباز روش‌های تجربی طبقه‌بندی توده‌سنگ از دیدگاه مهندسی در مسائل کاربردی مورد توجه قرار گرفته است. از مهم‌ترین روش‌های تجربی می‌توان به SMR اشاره داشت که بر پایه اطلاعات منطقی، روش تحلیلی برای تعدیل امتیاز مربوط به شرایط ناپیوستگی در سیستم RMR را ارائه داده است. به منظور بررسی پایداری ترانشه‌های سنگی با روش SMR، در این روش پس از تعیین RMR_{basic} ، فاکتورهای تعدیل ارتباط ترانشه- درزه از آن کاسته و فاکتور مربوط به روش حفاری به آن اضافه می‌گردد.

¹ Dips

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

۱-۴

بر این اساس، مقدار امتیاز توده سنگ (RMR) مطابق جدول زیر محاسبه شده است.

جدول ۱-۴- ارزیابی RMR در ترانشه

پارامتر	مقدار	امتیاز
مقاومت تراکمی تک محوری ماده سنگ (MPa)	۵۰-۲۵	۴
شاخص کیفیت توده سنگ RQD	٪۵۰-٪۲۵	۸
فاصله داری ناپیوستگی ها (mm)	۲۰۰-۶۰	۸
وضعیت ناپیوستگی ها	سطوح سنگ دیواره صاف	۱۰
وضعیت آب زیرزمینی	نمناک	۷
جهت یابی ناپیوستگی ها	-	۰
مجموع	-	۳۷

۴-۲-۱- خلاصه نتایج مربوط به محاسبه اندیس SMR برای ریزش واژگونی

RMR= ۴۰ ، شیب سطح ترانشه: ۴۶ و امتداد سطح ترانشه: ۸۵

جدول ۲-۴- خلاصه نتایج مربوط به محاسبه اندیس SMR برای ریزش واژگونی

نوع عارضه	شیب	جهت شیب	مقادیر ضرایب تصحیح	SMR
دسته درزه (Jset1)	۷۲	۲۰۲	$F_1=۰/۱۵; F_2=۱; F_3=-۲۵; F_4=۰$	۳۳
دسته درزه (Jset2)	۵۳	۳۲۹	$F_1=۰/۱۵; F_2=۱; F_3=-۶; F_4=۰$	۳۶
دسته درزه (Jset3)	۸۰	۴۶	$F_1=۱; F_2=۱; F_3=-۲۵; F_4=۰$	۳۳
لایه بندی JB4	۴۵	۹۶	$F_1=۰/۱۵; F_2=۱; F_3=۰; F_4=۰$	۳۷

- بحرانی ترین وضعیت پایداری از نظر ریزش واژگونی برای دسته درزه J_1 و لایه بندی حادث می شود که برای هر دو ناپیوستگی فوق، مقدار اندیس SMR برابر ۳۳ بوده که برای این محدوده SMR مطابق با جداول تجربی، استفاده از شاتکریت و انکر پیشنهاد شده است.

۲-۲-۴- خلاصه نتایج مربوط به محاسبه اندیس SMR برای ریزش گوه ای

$RMR=40$ ، شیب سطح ترانشه: ۴۶ و امتداد سطح ترانشه: ۸۵

جدول ۳-۴- خلاصه نتایج مربوط به محاسبه اندیس SMR برای ریزش گوه ای

SMR	مقادیر ضرایب تصحیح	جهت شیب	شیب	نوع عارضه
۳۶	$F_1=0/15; F_2=1; F_3=-6; F_4=0$	۳۲۹	۵۳	دسته درزه (Jset2)
۳۱	$F_1=1; F_2=1; F_3=-6; F_4=0$	۹۶	۴۵	لایه بندی JB4
۳۶	$F_1=0/15; F_2=1; F_3=-6; F_4=0$	۳۲	۲۳	خط فصل مشترک JB4 و Jset2

بحرانی ترین وضعیت پایداری از نظر ریزش بلوکی برای دسته درزه J_2 و لایه بندی حادث می شود که برای بلوک های تشکیل شده با این دو ناپیوستگی، مقدار اندیس SMR برابر ۳۱ بوده که برای این محدوده SMR مطابق با جداول تجربی، استفاده از شاتکریت و انکر پیشنهاد شده است.

۴-۲-۳- خلاصه نتایج مربوط به محاسبه اندیس SMR برای ریزش صفحه‌ای

RMR=۴۰، شیب سطح ترانشه: ۴۶ و امتداد سطح ترانشه: ۸۵

جدول ۴-۴- خلاصه نتایج مربوط به محاسبه اندیس SMR برای ریزش صفحه‌ای

نوع عارضه	شیب	جهت شیب	مقادیر ضرایب تصحیح	SMR
دسته درزه (Jset1)	۷۲	۲۰۲	$F_1=۰/۱۵; F_2=۱; F_3=۰; F_4=۰$	۳۷
دسته درزه (Jset2)	۵۳	۳۲۹	$F_1=۰/۱۵; F_2=۱; F_3=-۶; F_4=۰$	۳۶
دسته درزه (Jset3)	۸۰	۴۶	$F_1=۰/۱۵; F_2=۱; F_3=۰; F_4=۰$	۳۷
لایه بندی JB4	۴۵	۹۶	$F_1=۱; F_2=۱; F_3=-۶; F_4=۰$	۳۱

بحرانی‌ترین وضعیت پایداری از نظر ریزش صفحه‌ای برای لایه بندی حادث می‌شود که برای بلوک-های تشکیل شده، مقدار اندیس SMR برابر ۳۱ بوده که برای این محدوده SMR مطابق با جداول تجربی، استفاده از شاکریت و انکر پیشنهاد شده است.

با توجه به نتایج حاصل از بررسی تجربی وضعیت پایداری به روش تجربی SMR، لازم است محاسبات تحلیل پایداری انجام شود. بدین منظور، ابتدا، وضعیت پایداری کلی (در برابر ریزش قاشقی) با استفاده از روش تعادل حدی مورد ارزیابی قرار گرفته، سپس تحلیل پایداری با استفاده از روش المان مجزای سه بعدی انجام می‌گیرد. در نهایت برای هر یک از مکانیسم‌های ناپایداری فوق، مناسب‌ترین سیستم تحکیم نیز پیشنهاد شده است.

۴-۳- تشخیص نوع شکست با استفاده از تصاویر استریو گرافیک

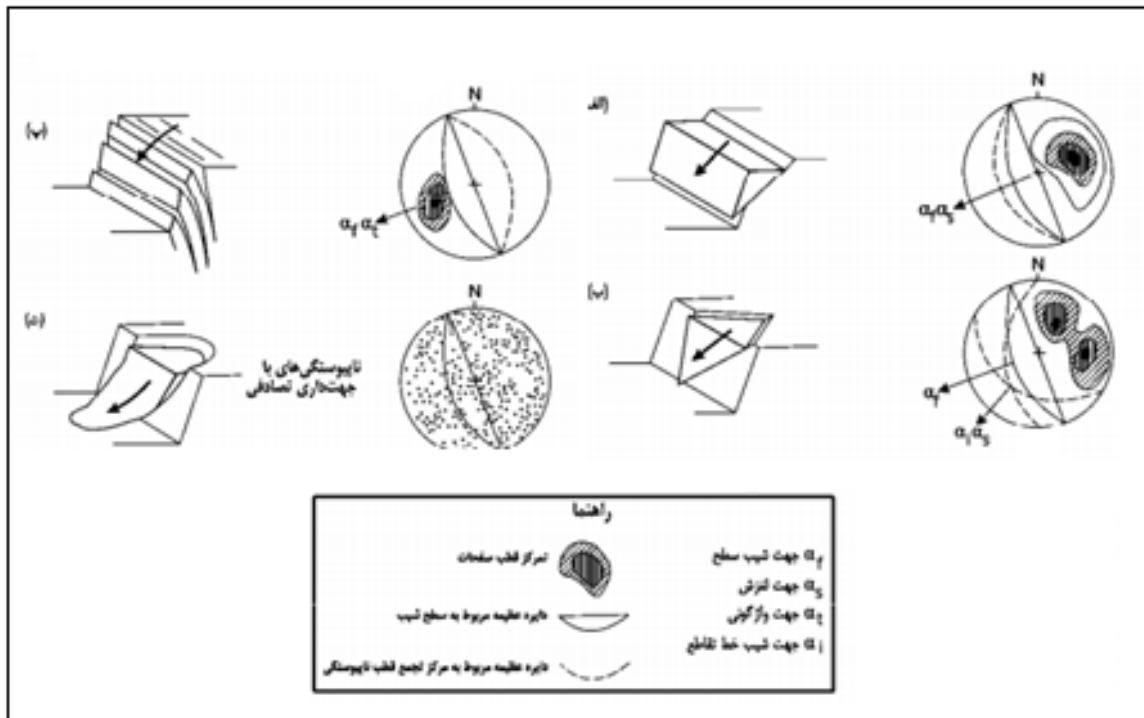
در فصل‌های قبلی، ویژگی‌های زمین‌شناسی ساختمانی موثر که برای پایداری ترانشه سنگی اثرگذار می‌باشند، ارائه شد. این داده‌ها غالباً در سه بعد و به صورت پراکنده وجود دارند. برای

به‌کارگیری این اطلاعات در طراحی، استفاده از روش تحلیلی مناسب در این بخش که بتواند این موارد را لحاظ نماید، الزامی است. بررسی‌های صورت گرفته نشان می‌دهد که نمایش داده‌ها بر روی شبکه استریوگرافیکی، ابزاری ایده‌آل برای این منظور است.

نمایش استریوگرافیکی، این امکان را فراهم می‌کند که اطلاعات سه‌بعدی مربوط به جهت‌گیری ناپیوستگی‌ها به‌صورت دوبعدی ارائه و تحلیل گردند. نمایش استریو گرافیکی یک بعد را حذف می‌کند طوری که در این نمایش، خطوط بیانگر نشانگر صفحات و نقاط نشانگر خطوط می‌باشند. محدودیت مهم نمایش استریو گرافیکی این است که در آن، فقط ارتباط زاویه‌ای خطوط و صفحات در نظر گرفته‌شده و موقعیت یا ابعاد آن‌ها مشخص نمی‌شود. بررسی‌های سینماتیکی، پتانسیل گسیختگی صفحه‌ای، واژگونی و گوه‌ای در ترانشه، با توجه به وضعیت هندسی و ژئومکانیکی ناپیوستگی‌های موردبررسی قرار گرفته است. (شریعت جعفری، ۱۳۷۵)

به‌منظور استفاده از روش استریوگرافیکی در پایداری ترانشه‌های سنگی، ابتدا دسته‌درزه‌های اصلی و دیگر گسستگی‌های موجود در دامنه تعیین و در استریونت پیاده می‌شود سپس تصویر معرف سطح دامنه سنگی یا شیبی که بر اثر حفاری به وجود خواهد آمد، در استریونت رسم می‌شود.

تحلیل استریوگرافیکی زمانی کامل‌تر می‌شود که زاویه اصطکاک سطح شکست نیز در دست باشد. زاویه اصطکاک به‌صورت دایره‌ای که مرکز آن، مرکز استریونت بوده و شعاع آن برابر مقدار زاویه اصطکاک است، رسم می‌شود. چنانچه اشاره شد، از این روش در ارزیابی شکست ترانشه‌های سنگی می‌توان به نحو مؤثری استفاده نمود. (شریعت جعفری، ۱۳۷۵) در شکل ۳-۱ چهار نوع اصلی از شکست شیب‌های طبیعی از قبیل شکست قاشقی، صفحه‌ای، گوه‌ای و واژگونی همراه با اجزا ساختار تشکیل‌دهنده آن‌ها بر روی استریونت نشان داده شده است.



شکل ۴-۱: انواع شکست در ترانشه سنگی: الف) شکست صفحه‌ای ب) شکست گوه‌ای روی دودسته درزه متقاطع
پ) شکست واژگونی ت) شکست دایره‌ای (قزوینیان، ۱۳۸۲)

بنابراین برای استفاده از تصاویر استریو گرافیکی در تحلیل پایداری ترانشه‌های سنگی نیاز به برداشت سطوح ناپوستگی و رخنمون دامنه در منطقه تحت بررسی است. تمامی تحلیل‌ها در این بخش بر اساس داده‌های هندسی جدول ۳-۱ انجام شده است.

۴-۳-۱ تحلیل سینماتیکی گسیختگی صفحه‌ای

گسیختگی صفحه‌ای، ساده‌ترین پتانسیل ناپایداری در ترانشه‌های سنگی می‌باشد. شرایط لازم برای وقوع شکست صفحه‌ای به شرح زیر است:

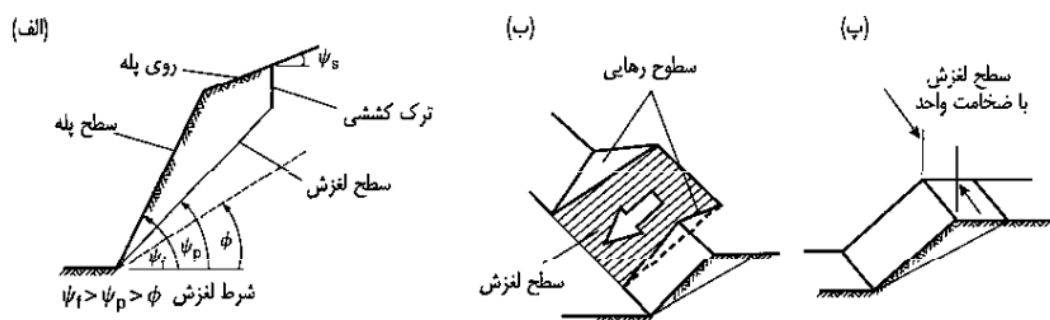
الف- امتداد صفحه لغزش باید موازی یا تقریباً موازی (حداکثر اختلاف جهت امتداد آن‌ها ۲۰ درجه باشد) با صفحه پله باشد.

ب- صفحه لغزنده باید در سطح پله رخنمون داشته باشد و به‌بیان دیگر شیب این صفحه باید کمتر از شیب سطح پله باشد.

پ- شیب صفحه لغزنده باید بیشتر از زاویه اصطکاک باشد.

ت- بخش بالایی سطح لغزش باید به سطح بالایی پله یا ترک کششی منتهی شود.

ث- در جوانب سطح لغزش سطوح رهایی با مقاومت قابل چشم‌پوشی باید وجود داشته باشد. هم‌چنین شکست ممکن است روی صفحه لغزنده‌ای که از گوشه محدب سطح پله عبور می‌کند، اتفاق افتد. (شکل ۲-۳)



شکل ۲-۴: هندسه پله برای وقوع شکست صفحه‌ای (الف): سطح مقطع نمایش‌دهنده صفحه‌های تشکیل‌دهنده صفحه‌ای (ب): سطوح رهایی در دو انتهای شکست صفحه‌ای (پ): سطح لغزش با ضخامت واحد مورد استفاده در تحلیل‌های پایداری (قزوینیان، ۱۳۸۲)

بر اساس شکل ۲-۴، دایره عظیمه دیواره رو به شرق با زاویه ۴۶ درجه و دایره اصطکاکی ۳۳ درجه به‌عنوان دایره کوچک ترسیم می‌شوند.

(نقاط قطبی در داخل منطقه صورتی رنگ نشان‌دهنده پتانسیل لغزش صفحه‌ای می‌باشد.)

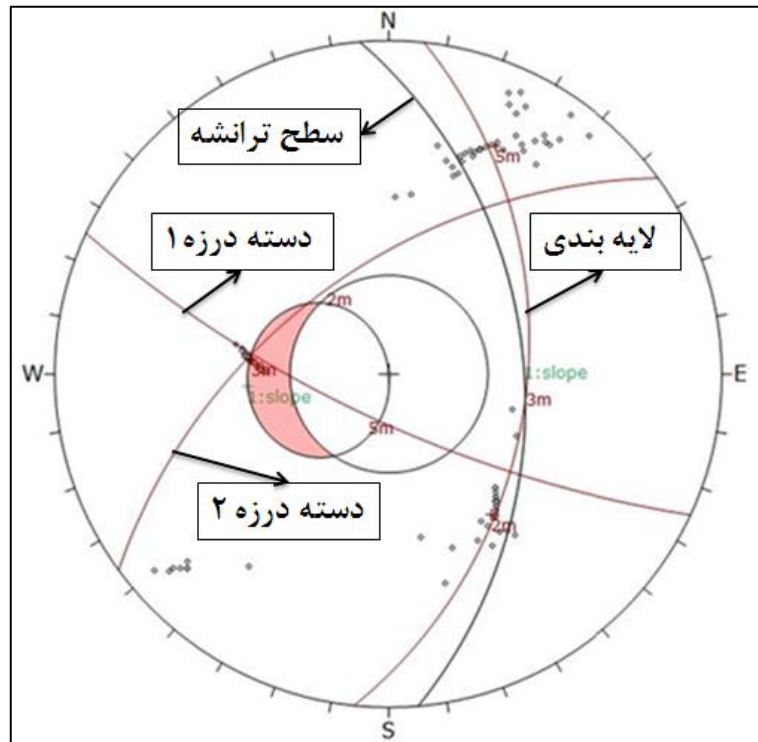
Symbol	Feature
	Pole Vectors

Kinematic Analysis	Planer Sliding		
Slope Dip	46		
Slope Dip Direction	85		
Friction Angle	33'		
	Critical	Total	%
Planar Sliding(All)	20	114	17.54%

colour	Dip	Dip Direction	Leble
User Planes			
	46	85	Slope
Mean Set Planes			
	55	324	
	45	96	
	74	205	

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	114
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Invalid data after row 114



شکل ۳-۴: تحلیل سینماتیکی شکست صفحه‌ای با نرم‌افزار Dips

ارزیابی پایداری با مسیریابی دواير عظیمه و مسیریابی ترانشه و دایره اصطکاکی وقوع گسیختگی صفحه‌ای برای لایه‌بندی ممکن می‌باشد.

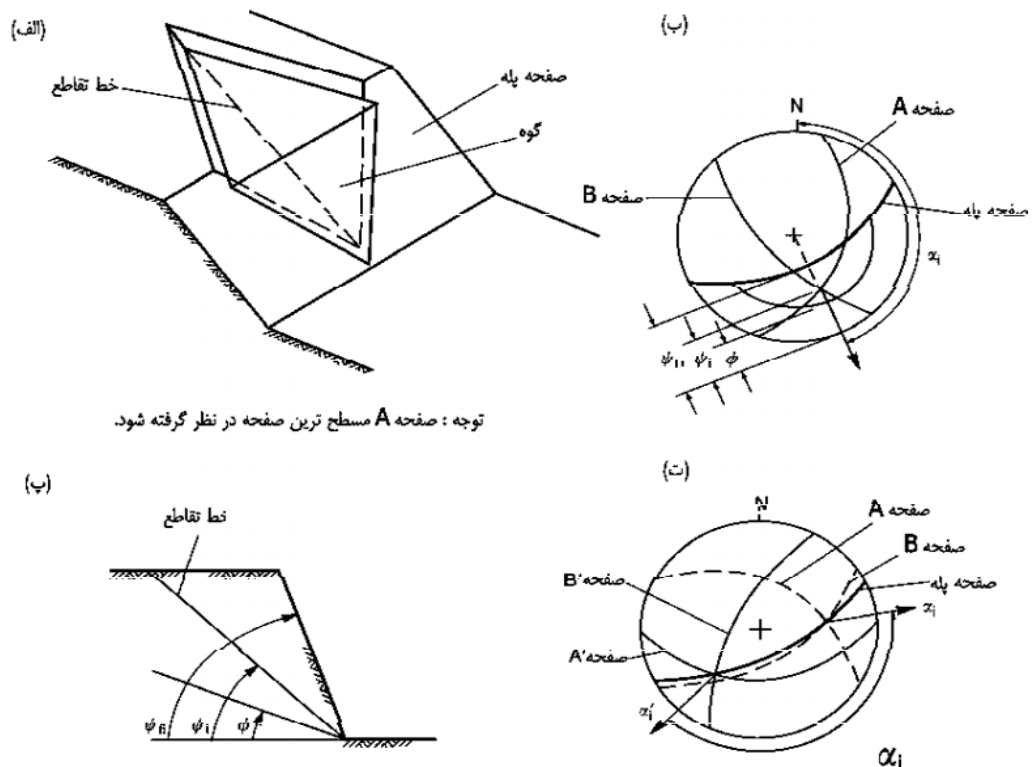
۲-۳-۴ تحلیل سینماتیکی شکست گوه‌ای

یکی دیگر از انواع ناپایداری در ترانشه‌ها، ایجاد گوه سنگی توسط ناپیوستگی مطابق شکل ۳-۴ هست. در اثر تقاطع دسته‌درزه‌ها احتمال ایجاد شکست گوه‌ای وجود دارد.

غالباً ساختمان‌های گوه‌ای شکل به وسیله دو صفحه متقاطع حاصل می‌گردد که شناسایی آن‌ها توسط استریونت ممکن است. در استریونت شکل گوه، جهت یابی خط متقاطع و جهت لغزش استریونت مشخص می‌شود. این اطلاعات به ما کمک می‌کند تا پتانسیل گوه برای لغزش از یک سطح بریده شده تعیین شود.

اصولاً سه سطح شیب‌دار شامل دو سطح ناپیوستگی و سطح رخنمون ترانشه در به وجود آوردن مدل ناپایداری گوه دخیل بوده که با پیاده کردن مشخصات این سطوح شیب‌دار در استریونت می‌توان برآورد نمود که اصولاً احتمال لغزش بلوک گوه‌ای شکل جداشده از شیروانی وجود دارد یا خیر؟ شکست گوه‌ای در مقایسه با شکست صفحه‌ای در دامنه بسیار وسیع‌تری از شرایط زمین‌شناسی و هندسی اتفاق می‌افتد. برای شکست گوه‌ای دسته‌درزه‌های منطقه باید به روش استریو گرافی مورد تحلیل قرار گیرد و پتانسیل لغزش تعیین شود (شریعت جعفری، ۱۳۷۵).

مطالعات میدانی در محدوده مورد بررسی بیانگر آن است که بخش‌هایی از ترانشه‌های حاشیه جاده دارای پتانسیل لغزش گوه‌ای می‌باشد.



توجه: صفحه A مسطح ترین صفحه در نظر گرفته شود.

شکل ۴-۴: شرایط هندسی برای شکست گوه‌ای و تصاویر استریونت آن (قزوینیان، ۱۳۸۲)

هندس گوه برای تحلیل مکانیزم لغزشی در شکل ۴-۳-الف ارائه شده است. بر اساس این هندسه،

شرایط عمومی برای شکست گوه‌ای به شرح زیر است:

الف) تقاطع دو صفحه در صفحه‌ی استریونت با استفاده از یک نقطه با جهت و شیب آن تعریف

می‌شود (شکل ۴-۳-ب).

ب) شیب خط برخورد باید کمتر از شیب پله باشد و ψ زاویه خط تقاطع باید بیشتر از زاویه

اصطکاک میانگین دو صفحه لغزش باشد ($\psi_{fi} > \psi_i > \Phi$)، شکل ۴-۳-ب و ۴-۳-پ)

پ) در صورتی که امتداد خط تقاطع، بین و مطابق شکل ۴-۳-ت باشد، گوه تشکیل شده، پتانسیل

لغزش دارد (شریعت جعفری، ۱۳۷۵).

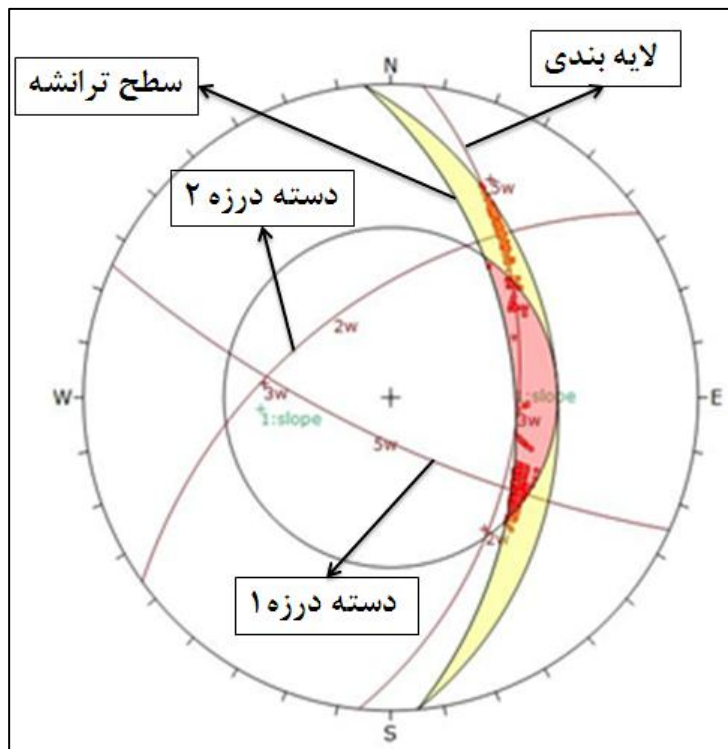
(نقاط قطبی در داخل منطقه صورتی رنگ نشان دهنده گوه تشکیل شده می‌باشد.)

Symbol	Feature
	Pole Vectors

Kinematic Analysis		Wedge Sliding		
Slope Dip		46		
Slope Dip Direction		85		
Friction Angle		33°		
		Critical	Total	%
Wedge Sliding(All)		2172	6313	34.40%

	colour	Dip	Dip Direction	Lable
User Planes				
		46	85	Slope
Mean Set Planes				
		55	324	
		45	96	
		74	205	

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	114
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle
Invalid data after row 114	



شکل ۴-۵ : تحلیل سینماتیکی شکست گوه‌ای با نرم‌افزار Dips

۴-۳-۳ تحلیل سینماتیکی شکست واژگونی

یکی دیگر از پتانسیل‌های ناپایداری در ترانشه‌های سنگی، گسیختگی واژگونی می‌باشد. گسیختگی واژگونی (مطابق شکل ۴-۴) زمانی اتفاق می‌افتد که شرایط زیر برقرار باشد:

۱- شیب سطوح ناپیوستگی در خلاف جهت ترانشه باشد.

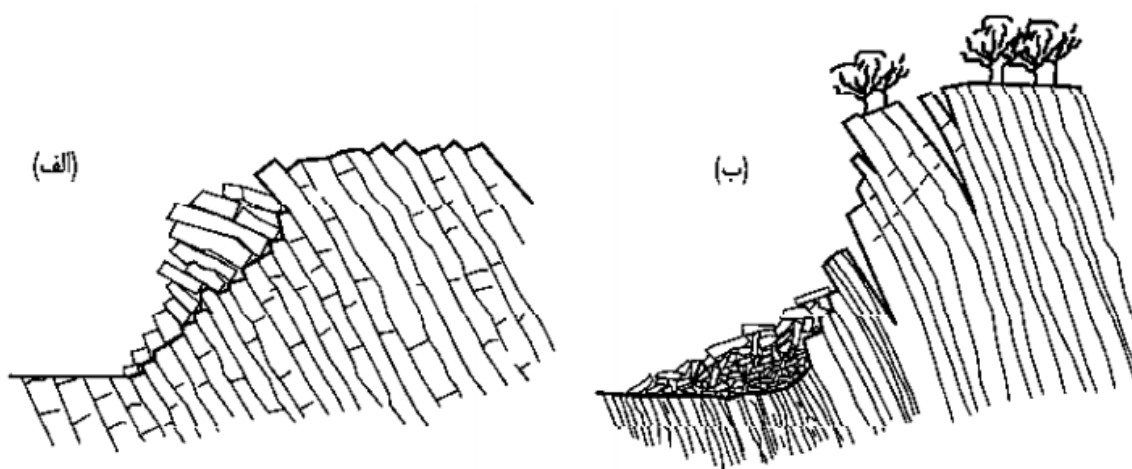
۲- معیار گسیختگی واژگونی (رابطه ۴-۱) برقرار باشد.

$$\psi_f > (\psi_p - 90) + \psi_z \quad \text{رابطه ۴-۱}$$

ψ_f : زاویه رخنمون ترانشه

ψ_p : زاویه سطح ناپیوستگی

ψ_z : زاویه اصطکاک



شکل ۴-۶: انواع شکست واژگونی (الف): واژگونی بلوکی (ب): واژگونی خمشی (قزوینیان، ۱۳۸۲)

مطابق شکل ۴-۵ شکست واژگونی هنگامی اتفاق می‌افتد که قطب سطح ناپیوستگی در داخل ناحیه هاشور خورده قرار بگیرد. به عبارت دیگر شیب سطوح ناپیوستگی باید در خلاف جهت شیب رخنمون باشد. علاوه بر شرایط بالا، واژگونی هنگامی رخ می‌دهد که امتداد لایه‌ها تقریباً موازی امتداد شیروانی باشد (شریعت جعفری، ۱۳۷۵).

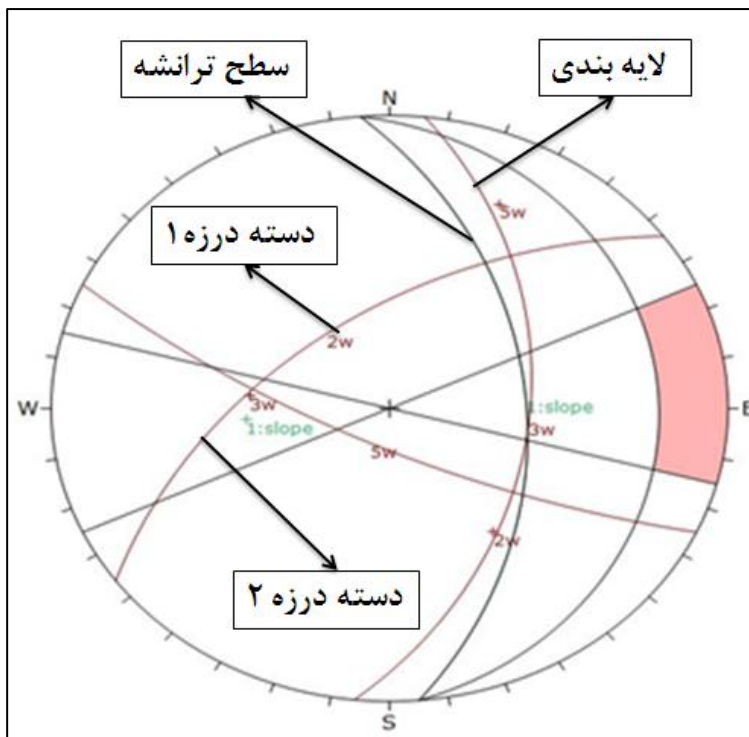
Symbol	Feature
	Pole Vectors

Kinematic Analysis		Direct Toppling		
Slope Dip		46		
Slope Dip Direction		85		
Friction Angle		33°		
		Critical	Total	%
Direct Toppling (All)		0	114	0.00%

	colour	Dip	Dip Direction	Lable
User Planes				
		46	85	Slope
Mean Set Planes				
		55	324	
		45	96	
		74	205	

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	114
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Invalid data after row 114



شکل ۴-۷: تحلیل سینماتیکی شکست واژگونی با نرم افزار Dips

بررسی شرایط میدانی از وضعیت ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ درون‌گیر ترانشه‌های محدوده موردبررسی و تحلیل‌های تجربی و سینماتیکی انجام‌شده نشان می‌دهد که لغزش گوه‌ای و صفحه‌ای یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های ناپایداری در این بخش است. با توجه به اهمیت و تاثیر آن در پایداری ترانشه‌های سنگی به‌منظور بررسی شرایط مربوط به لغزش گوه‌ای در ترانشه‌های موردبحث، تحلیل گوه‌ای با استفاده از نرم‌افزار Swedge و تحلیل صفحه‌ای Rocplane با دقت بیشتری بررسی شده است.

۴-۴ تحلیل پایداری با استفاده روش تعادل حدی

در طراحی نهایی شیب، زمانی که نیاز به داوری در مورد پایداری یا ناپایداری ترانشه می‌باشد، یک ارزیابی کمی در مورد پایداری ترانشه دارای اهمیت فراوان می‌باشد. تعیین پایداری ترانشه از روش‌های مختلفی امکان‌پذیر است اما باوجود تنوع، از نظر مفهوم شبیه به یکدیگرند. یکی از این روش‌ها، روش‌های مبنی بر تعادل حدی می‌باشند. مبنای این روش‌ها، تعادل نهایی نیروهای افقی و یا گشتاورهای وارد بر ترانشه می‌باشد. این روش‌ها، برای تخمینی سریع در تحلیل پایداری ترانشه مناسب بوده و امروز کاربرد فراوانی در ارزیابی پایداری ترانشه‌ها می‌باشند. مهم‌ترین مزیت این روش‌ها، سادگی و سهولت استفاده و تجربه زیاد به‌دست‌آمده در این روش‌ها به دلیل سابقه طولانی آن‌ها است، به‌طوری‌که پس از سال‌ها استفاده از روش‌های تعادل حدی، اعتمادپذیری به این روش‌ها افزایش یافته است.

۴-۴-۱ تحلیل شکست گوه‌ای با نرم‌افزار Swedge

نرم‌افزار Swedge به تحلیل ساختاری پایداری شکست گوه‌ای در ترانشه‌ها، پله‌های معادن سطحی و ... می‌پردازد و یک برنامه سریع و ساده برای آنالیز و برآورد پایداری گوه‌های ایجادشده در

ترانشه‌های سنگی است. این گوه از تقاطع دو سطح ناپیوستگی در پیشانی ترانشه ایجاد می‌شود. برای تحلیل گوه‌ای توسط این نرم‌افزار نیاز به تعیین مشخصات سطوح تشکیل‌دهنده گوه (شیب و جهت شیب) و همچنین خواص ژئومکانیکی سطوح ناپیوستگی (چسبندگی و ضریب اصطکاک) و وزن مخصوص آن انجام‌پذیر است. از بهترین نرم‌افزارها در خصوص تحلیل ساختاری شکست گوه‌ای است در هر شرایطی ضریب ایمنی باید بزرگ‌تر از یک انتخاب شود. دلایل این انتخاب عبارت‌اند از:

۱- احتمال عدم شناسایی عوامل زمین‌شناسی مخرب مانند درزه و شکاف در ترانشه که می‌توانند در پایداری ترانشه تأثیر منفی بگذارند.

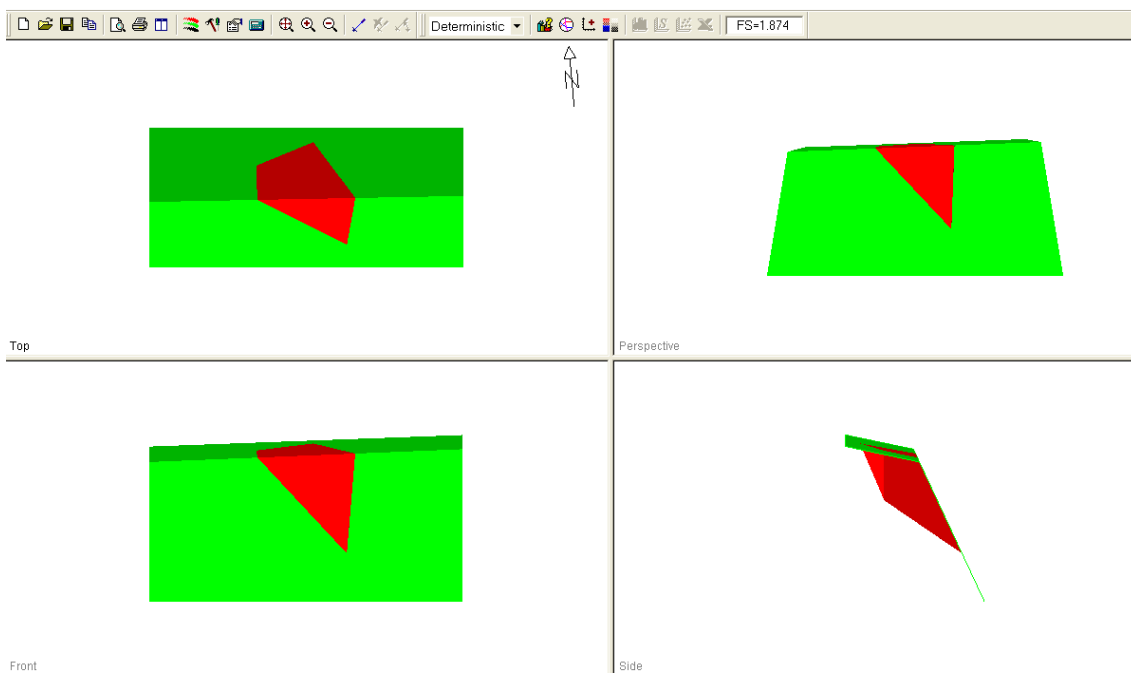
۲- اشتباه در مراحل آزمایش به‌منظور تعیین خواص ژئومکانیکی و ژئوتکنیکی سنگ

۳- امکان متغیر شدن بعضی از خواص سنگ

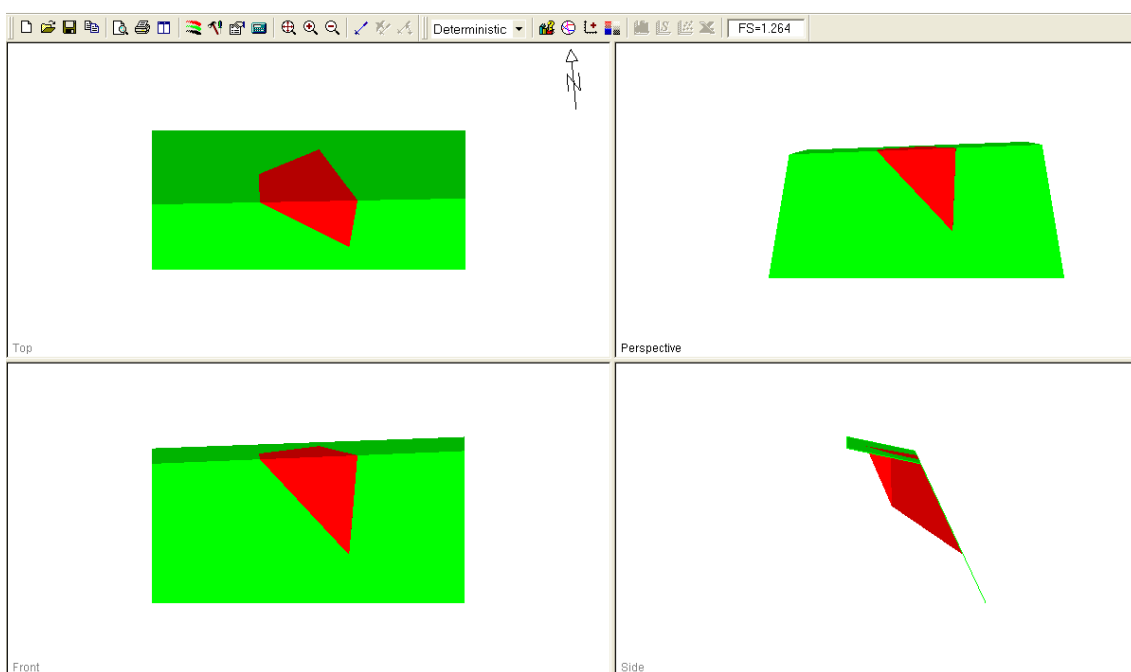
۴- کامل نبودن تئوری‌ها و روش‌های اندازه‌گیری موجود

۵- امکان اشتباه در محاسبات

تحلیل گوه‌ای برای بلوک ناشی از تقاطع سطح لایه‌بندی و دسته‌درزه دوم و بر اساس داده‌های هندسی جدول انجام‌شده است. زاویه اصطکاک درزه سطوح ناپیوستگی نیز به‌طور قطعی ۳۳ درجه لحاظ شده است (بر اساس نتایج آزمایش برش مستقیم). برای سطح ناپیوستگی درزه‌ها چسبندگی صفر و برای لایه‌بندی ۲ تن بر مترمربع در نظر گرفته‌شده است. ارتفاع ترانشه در تحلیل‌ها ۴۰ متر لحاظ شده است. محاسبات برای دو حالت بارگذاری استاتیک و شبه استاتیک (با شتاب g ۰,۲) انجام‌شده است. نمای کلی از گوه تشکیل‌شده برای حالت بارگذاری استاتیک و شبه استاتیک در شکل ۴-۸ و ۴-۹ ارائه‌شده است.



شکل ۴-۸: نمای کلی خروجی حاصل از پایداری گوه‌ای در حالت بارگذاری استاتیک

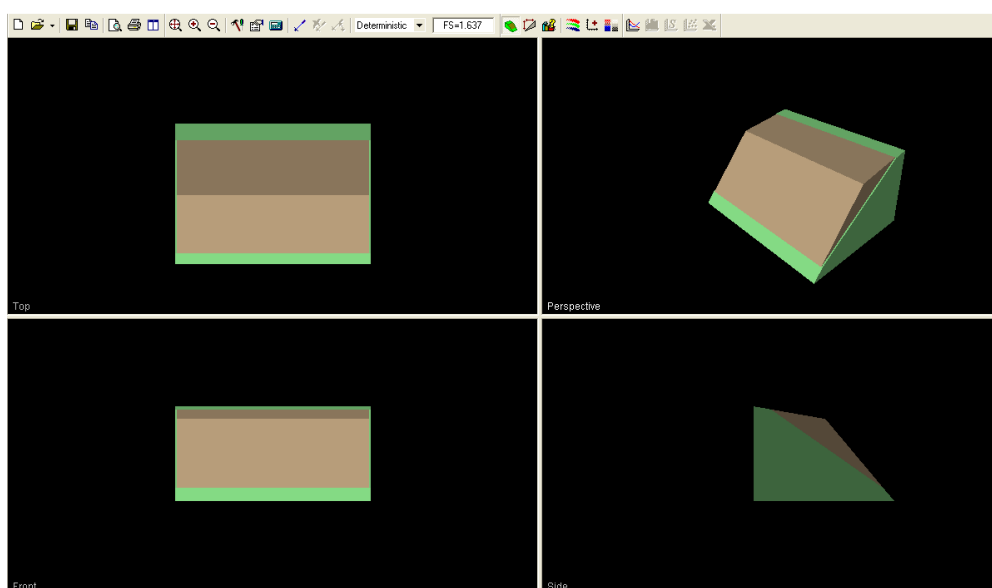


شکل ۴-۹: نمای کلی خروجی حاصل از پایداری گوه‌ای در حالت بارگذاری شبه‌استاتیک

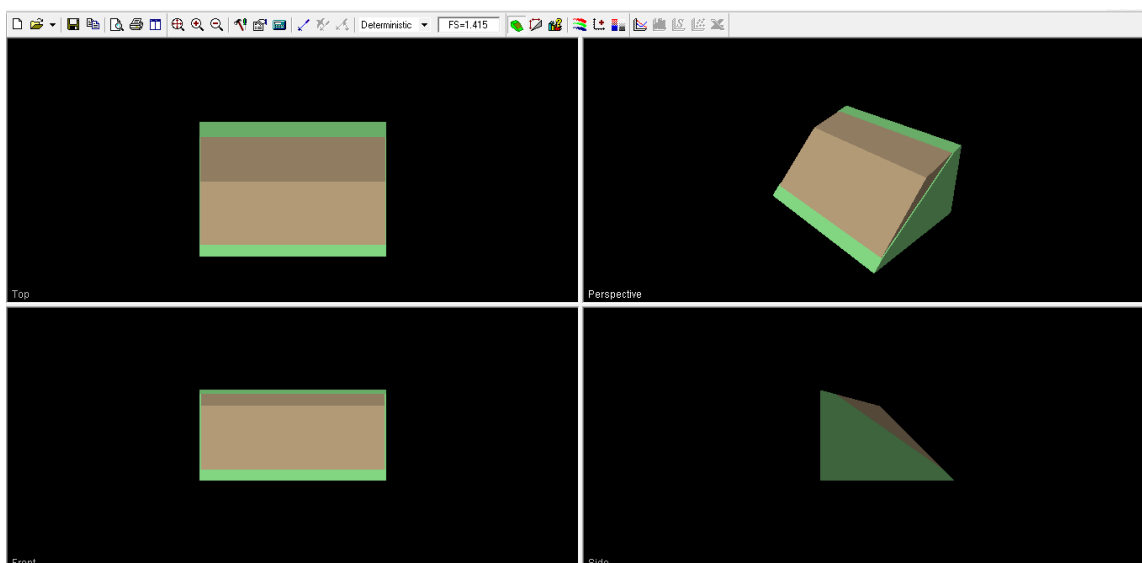
در این روش در مقایسه با روش سینماتیکی شکل گوه تشکیل یافته را می‌توان ترسیم کرد.

۲-۴-۴ تحلیل شکست صفحه‌ای با نرم‌افزار Rocplan

لغزش های صفحه ای، در طول درزه های به شدت درزه شیبدار، صفحات لایه بندی و در امتداد زونهای گسلی اتفاق می افتند. این لغزش هایی اغلب به وسیله حفر ترانشه، فرسایش شیب و یا به وسیله حفاری فعال می شود. زاویه اصطکاک داخلی که با افزایش ناهمواری سطوح لایه بندی افزایش می یابد می تواند به وسیله هوازگی و هم چنین یخ زدن و ذوب شدن، کاهش پیدا کند. بررسی شرایط میدانی از وضعیت ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ درون‌گیر ترانشه‌های محدوده موردبررسی و تحلیل‌های تجربی و سینماتیکی انجام‌شده نشان می‌دهد که لغزش صفحه‌ای یکی از مهم‌ترین مکانیسم‌های ناپایداری در این بخش است. به‌منظور بررسی شرایط مربوط به لغزش صفحه‌ای در ترانشه‌های موردبحث، تحلیل لغزش صفحه‌ای با استفاده از نرم‌افزار Rocplane و برای مقطع بحرانی با بیشترین ارتفاع (۴۰) متر انجام‌شده که در این تحلیل‌ها، سطح لغزش بحرانی مربوط به لایه‌بندی سنگ است. داده‌های هندسی موردنیاز برای محاسبات تحلیل لغزش صفحه‌ای نیز بر اساس داده‌های هندسی جدول انجام‌شده است. زاویه اصطکاک برای سطوح لایه‌بندی لایه‌بندی ۳۳ درجه و مقدار چسبندگی ۲ تن بر مترمربع در نظر گرفته‌شده است.

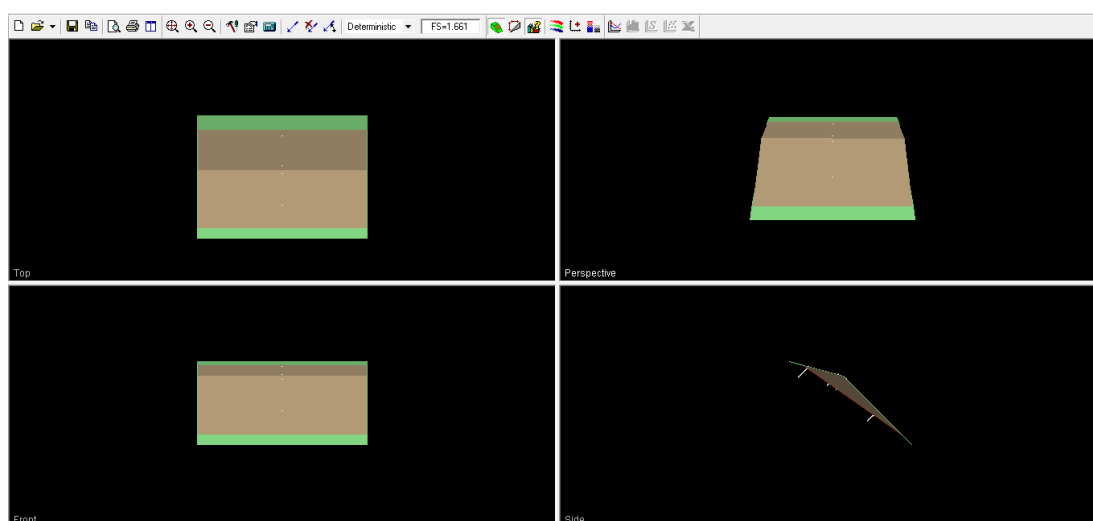


شکل ۲-۴-۱۰: نمای کلی از بلوک بحرانی با مکانیسم لغزش صفحه ای در حالت استاتیک



شکل ۴-۱۱: نمای کلی از بلوک بحرانی با مکانیسم لغزش صفحه ای در حالت شبه استاتیک

مطابق با شکل ۴-۸ ضریب ایمنی در $1/7$ بوده و می توان گفت، ترانشه های مورد بررسی از نظر پایداری در حالت استاتیک پایدار بوده ولی با توجه شرایط آب و هوایی منطقه و هوازدگی ترانشه و کاهش زاویه اصطکاک داخلی و لرزه خیزی منطقه تحلیل شبه استاتیک (با شتاب $g=0.2$) انجام شده که ضریب ایمنی $1/3$ می باشد که باید برای بالا بردن ضریب ایمنی از سیستم تحکیم انکراژ استفاده شود به دلیل اینکه شاتکریت مسلح نقش چندانی در کنترل لغزش صفحه ای نداشته است به عنوان نمونه با افزودن ۴ راک بولت می توان ضریب ایمنی را تا $1/7$ افزایش داد.



شکل ۴-۱۲: نمای کلی از بلوک بحرانی با مکانیسم لغزش صفحه ای در حالت مسلح به راک بولت

۴-۴-۳ شرایط لازم برای شکست دایره‌ای

شکست دایره‌ای به‌طور عمده در توده سنگ‌های خردشده و توده‌های خاکی اتفاق می‌افتد ولی شرایط کلی آن به صورت زیر می‌باشد:

الف) در مواردی که توده سنگ شدیداً خردشده و هوازده باشد، شکست ساختاری وجود ندارد و لغزش در راستای سطحی با کمترین مقاومت برشی رخ می‌دهد.

ب) بلوک‌های خردشده سنگی در یک تلبار، به شکل خاک عمل می‌کنند و در صورتی که ابعاد شیب خیلی بیشتر از ابعاد بلوک‌های سنگی باشد، ریزش دایره‌ای اتفاق خواهد می‌افتد.

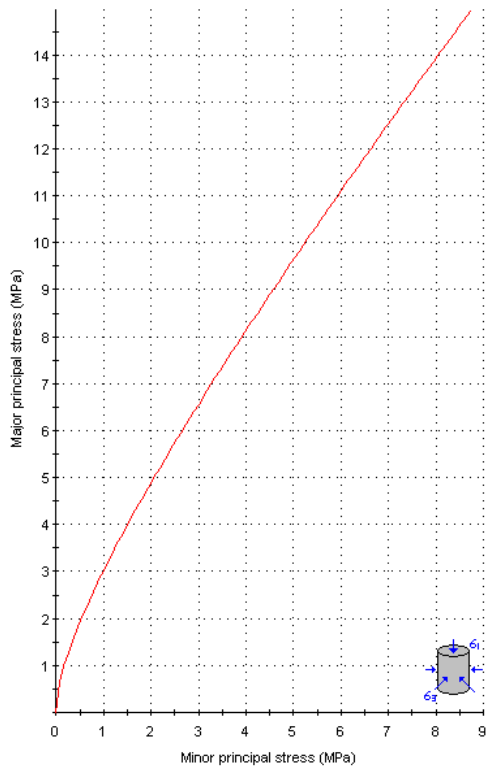
پ) خاک‌های ریزدانه حاوی ماسه، رس و سیلت، حتی در شیب‌های با ارتفاع کم نیز دچار ریزش دایره‌ای می‌شوند.

ت) سنگ‌های شدیداً دگرگون‌شده و هوازده، مثل سنگ‌های دارای ناپیوستگی با فاصله کم و جهت‌داری اتفاقی، مثل برخی از بازالت‌های منجمد شده، دچار شکست دایره‌ای می‌شوند.

۴-۴-۴ محاسبه ضریب ایمنی کلی ترانشه

به منظور ارزیابی پایداری ترانشه‌های مورد بررسی، پایداری کلی ترانشه در مقابل ریزش توده‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در حقیقت، به دلیل درزه‌داری شدید و هوازگی توده سنگ، تحلیل پایداری در مقابل ریزش کلی (مشابه با رفتار مواد پیوسته) انجام شده است. به منظور تحلیل پایداری کلی ترانشه، از روش تعادل حدی (با نرم افزار Slide) استفاده شده که پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ بر اساس نرم افزار Roclab به صورت شکل ۴-۱۲ زیر اعمال شده است.

Analysis of Rock Strength using RocLab

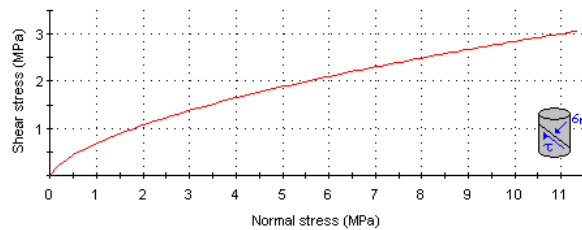


Hoek-Brown Classification
 intact uniaxial compressive strength = 35 MPa
 GSI = 32 mi = 6 Disturbance factor = 0.7

Hoek-Brown Criterion
 mb = 0.143 s = 0.0001 a = 0.520

Mohr-Coulomb Fit
 cohesion = 0.623 MPa friction angle = 12.93 deg

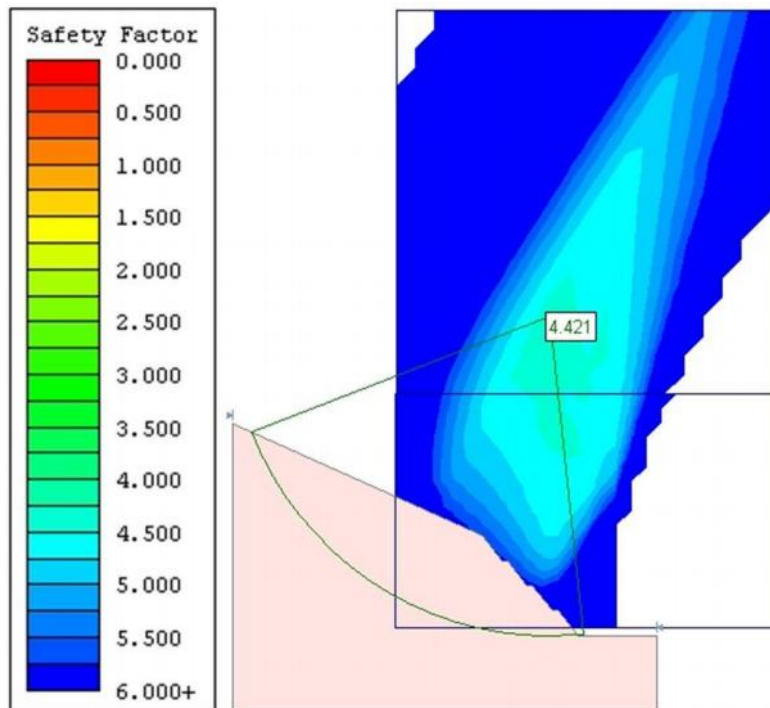
Rock Mass Parameters
 tensile strength = -0.013 MPa
 uniaxial compressive strength = 0.209 MPa
 global strength = 1.565 MPa
 modulus of deformation = 1364.42 MPa



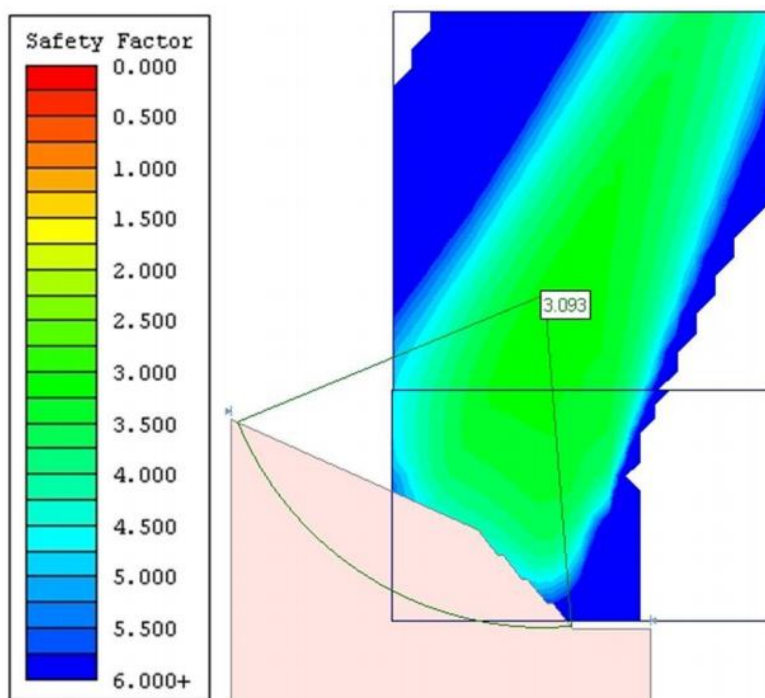
شکل ۴-۱۳: پارامترهای خروجی توده سنگ از نرم افزار Roclab

با توجه به خروجی حاصل از نرم افزار Roclab بر اساس معیار موهر کلمب چسبندگی ۰.۶ و زاویه اصطکاک داخلی ۱۳ درجه می باشد.

تحلیل پایداری برای دو حالت استاتیک و شبه استاتیک (با شتاب مبنای ۰.۲g) انجام شده که خروجی محاسبات در شکل ۴-۱۳ نشان داده شده است. در تحلیل‌های فوق، زاویه شیب پله‌های ترانشه برای ارتفاع بین ۲۵ تا ۴۰ متر در حدود ۴۶ درجه است. شیب و جهت‌داری میانگین ترانشه نیز برای این محدوده معادل به ترتیب ۴۶ و ۸۵ درجه است. حداکثر ارتفاع ترانشه نیز در حدود ۴۰ متر است. مطابق با شکل، ضریب ایمنی در هر دو حالت تحلیل بیش از ۳ بوده و در نتیجه می‌توان گفت، ترانشه‌های مورد بررسی از نظر پایداری کلی مشکل نداشته و سایر مکانیسم‌های ناپایداری برای این ترانشه باید مورد بررسی قرار گیرد.



الف) تحلیل استاتیک



ب) تحلیل شبه استاتیک

شکل ۴-۱۴: نتایج تحلیل پایداری کلی ترانشه: الف) تحلیل استاتیک ب) تحلیل شبه استاتیک

۴-۵ جمع بندی

مجموعه بررسی های صورت گرفته به روش سینماتیکی، بیانگر وجود پتانسیل های ناپایداری صفحه ای و گوه ای در ترانسه های تحت بررسی می باشد. روش سینماتیکی تعیین می کند که امکان انواع ریزش ها محتمل است یا نه و از این جهت، روش کیفی است و در ارزیابی اولیه پایداری استفاده می شود به همین جهت در بررسی های تفصیلی تر از روش تعادل حدی استفاده شد که ضریب ایمنی رابه عنوان معیاری برای پایداری ترانسه بررسی کرده و نتایج آن ارائه شد.

فصل پنجم

تحلیل پایداری به

روش عددی

۵-۱ مقدمه

باید توجه داشت مدل سازی در مکانیک سنگ با دیگر شاخه های علم مکانیک تفاوت دارد، به ویژه در مسائل پایداری ترانشه که درگیر روابط پیچیده ای میان علت و معلول هستند. بنابراین بینش نسبت به ارتباط میان علت و معلول لازم است و علاوه بر این معمولاً تحلیل پایداری ترانشه با داده های محدود و اطلاعات کم از تغییر شکل پذیری سنگ، مقاومت سنگ و آب های زیرزمینی انجام می گیرد و این محدودیت با بررسی صحرایی جزئی حذف می شوند به طوری که در عمل طیف وسیعی از وضعیت ها نسبت به میزان داده های موجود، جهت تحلیل وجود دارد.

۵-۲ انتخاب روش عددی

امروزه روش های متنوعی از تحلیل پایداری ترانشه وجود دارد و هر مهندس طراح می تواند به کمک کامپیوتر شخصی خود، ترانشه های سنگی را تحلیل نماید. با توجه به پیچیدگی های هندسی ترانشه و ... استفاده از مدل سازی عددی مناسب تر است. مدل سازی عددی جانشینی برای فکر کردن نیست، بلکه وسیله کمکی برای فکر کردن است.

در مورد دوبعدی یا سه بعدی بودن مدل، هندسه ترانشه به گونه ای است که مدل های دوبعدی با فرض تقارن یا کرنش صفحه ای نمی تواند بیانگر رفتار آن باشند و بهتر است از مدل های سه بعدی استفاده شود، بنابراین برای بررسی دقیق تر تغییر شکل، تحلیل سه بعدی کار آیی بیشتری دارد و نتایج نزدیک به واقعیت را ارائه می کند. نرم افزار سه بعدی مناسب جهت تحلیل عددی ناپیوسته، نرم افزار 3DEC می باشد. این نرم افزار محصول شرکت ایتاسکا است که بر پایه روش اجزا مجزا که یکی از فن های ناپیوسته است، بنانهاده شده است و دارای قابلیت تحلیل عددی محیط های ناپیوسته به صورت سه بعدی می باشد.

۵-۳ روند مدل سازی ترانسه

به طور کلی در این مرحله نیاز است شناخت کلی از منطقه به دست آورده شود و مدل ساخته شده باید شامل مشخصه های اساسی باشد. در این مرحله لازم است اطلاعاتی در مورد مکانیسم ناپایداری و عوامل آغازگر لغزش کسب شوند زیرا در بسیاری از موارد علت لغزش یک مکانیسم کلیدی است و بنابراین مدل سازی عددی می تواند روی آن به خصوص تمرکز داشته باشد و باید توجه داشت مدل های پیچیده تر که هزینه ارزیابی و بررسی زیادی دارند لزوماً مدل های مناسب تری نیستند و با این گونه مدل ها بهبود چندانی در طراحی یا تشخیص حاصل نمی شود. دو دلیل عمده در مقابل مدل های پیچیده عبارتند از :

۱- محدود بودن داده ها

۲- با وارد کردن جزئیات بیشتر در مدل، کنترل عقلی آن مشکل تر می شود و بدین ترتیب کار آیی مدل کمتر می شود و در مدیریت ریسک باید از عدم قطعیت و خطایی که در این مرحله وجود دارد آگاهی داشت.

در زمین شناسی و ژئوتکنیک کار کردن و تصمیم گیری با داده های اندک متداول است و در طی سال ها روش هایی برای انجام کار با این شرایط مشخص شده است. از این رو در طی ۳ مرحله به تحلیل مدل پرداخته شده است.

مرحله ۱- تحلیل بلوکی : ابتدا کل مدل به صورت صلب آنالیز می گردد.

مرحله ۲- تحلیل انعطاف پذیر : کل مدل با المان های انعطاف پذیر مدل می شود.

مرحله ۳- طراحی سیستم نگهداری : از نتایج مرحله ۲ و با توجه به توضیحاتی که در ادامه خواهد

آمد، بحرانی ترین منطقه به منظور ارائه یک سیستم نگهداری مناسب، مورد تحلیل قرار خواهد گرفت.

۴-۵ تفسیر نتایج در نرم‌افزار 3DEC

چندین شاخص برای ارزیابی وضعیت مدل عددی (پایداری، ناپایداری یا جریان پلاستیک دائمی) در تحلیل‌های استاتیک وجود دارد. در ادامه این شاخص‌ها بررسی می‌شوند.

الف) نیروهای نامتعادل کننده^۱

نیروها برای مرکز هر بلوک صلب یا هر نقطه گرهی بلوک‌های تغییر شکل‌پذیر محاسبه می‌شوند. در تعادل یا جریان پلاستیک پایدار بلوک‌های تغییر شکل‌پذیر، جمع جبری این نیروها تقریباً صفر است. نسبت نیروی نامتعادل کننده به نیروی داخلی را می‌توان با R نشان داد. این نسبت به درصد بیان می‌شود و هرگز مقدار آن به صفر تقلیل نمی‌یابد. به‌رحال مقادیر $0/1$ تا 1 ٪ نیز می‌توانند نشانگر تعادل باشند که به‌دقت موردنیاز بستگی دارد. برای مثال $R = 1$ ٪ برای مراحل میانی تحلیل مناسب است ولی برای به دست آوردن تنش‌های نهایی و توزیع جابه‌جایی و گزارش نهایی آن‌ها بهتر است $R = 0/1$ ٪ در نظر گرفته شود.

باید توجه داشت که مقادیر پایین R ، فقط تعادل نیرو در کل را نشان می‌دهند و ممکن است جریان پلاستیک دائمی، بدون افزایش سرعت رخ دهد. برای تشخیص این شرایط از نشانگرهای دیگری استفاده می‌شود.

ب) سرعت نقاط گرهی/بلوک

در نرم‌افزار تری دک، پارامترهایی از قبیل سرعت، تنش، جابجایی و... برای نقاط گرهی یا مراکز بلوک‌های صلب به ازای هرچند سیکل تعریفی در پَرَوَاجَا ذخیره می‌شود. چنانچه منحنی‌های سرعت ذخیره‌شده نسبت به زمان، در انتها افقی شده باشند بیانگر شرایط پایدار هستند. اگر به سمت صفر همگرا شوند (در مقایسه با مقادیر اولیه)، بیانگر حالت تعادل مطلق هستند. اگر یک منحنی به سمت

^۱Unbalanced force

مقادیر غیر صفر همگرا شود، بیانگر سقوط بلوک یا جریان پلاستیک پایدار در آن قسمت است. چنانچه یک یا چند تا از منحنی‌های سرعت، مقادیر نوسانی داشته باشند مجموعه در حال گذر از شرایط موقت است. اگر بردارهای سرعت دارای ارتباط منطقی باشند و مقادیر بزرگی داشته باشند می‌تواند بیانگر سقوط یا لغزش بلوک‌ها و یا جریان پلاستیک در داخل بلوک‌ها باشد یا مجموعه هنوز در حال تعدیل به صورت الاستیک است.

ج) نشانگر پلاستیک

برای گسیختگی بلوک نشانگر پلاستیک نشان‌دهنده مناطقی است که ملاک شکست را اغنا کرده‌اند. این نشانگر معمولاً برای مشخص کردن جریان پلاستیک به کار می‌رود، اما باید توجه داشت بلوک‌ها می‌توانند بدون جریان پلاستیک نیز تسلیم شوند. برای بررسی مکانیزه گسیختگی باید کل شبکه پلاستیک را در نظر گرفت و با توجه به نمودارها بررسی را کامل‌تر کرد.

د) منحنی‌های مربوط به تاریخچه (هیستوگرام)

در بعضی از مسائل ممکن است به متغیرهای خاصی نیاز باشد که با استفاده از منحنی‌های مربوط به تاریخچه می‌توان در مناطق تعیین‌شده این متغیرها را بررسی کرد.

۵-۵ تحلیل بلوکی

فرضیات به کاررفته در این تحلیل به صورت زیر می‌باشد:

- بلوک‌ها صلب بوده و تحلیل با شرط صلب بودن مواد صورت می‌گیرد.
- بلوک‌ها تنها تحت اثر نیروی گرانش قرار گرفته باشند.
- یک چنین شیوه تحلیل بلوکی باید دارای ویژگی‌های زیر باشد:
- معرف طبیعت باشد.

- توانایی تشخیص ناپیوستگی‌های بحرانی را داشته باشد.
 - مناطق ناپایدار را تشخیص دهد.
 - توانایی تشخیص میزان و نوع نگهدارنده‌ها و تقویت‌کننده‌های مناسب، در صورت تشخیص ناپایداری را داشته باشد.
 - انعطاف‌پذیر باشد تا بتوان تغییرات موردنیاز را در آن انجام داد.
 - پیشگو باشد به این معنی که در تعیین محدوده و تخمینی از مناطق موردنیاز برای تحلیل در مراحل بعدی (مانند تحلیل تنش و تغییر مکان) کمک نماید.
- با توجه به توانایی‌های روش المان مجزا و نرم‌افزار 3DEC، روش تحلیل بلوکی ارائه‌شده در این تحقیق دارای تمامی شرایط بالا می‌باشد، تحلیل صورت گرفته در این مرحله با استفاده از بلوک‌های صلب صورت گرفته است.

۵-۶ مدل‌سازی ترانشه با نرم‌افزار 3DEC

برای مدل‌سازی در نرم‌افزار 3DEC نیاز به طی چند مرحله می‌باشد که به ترتیب هرکدام از مراحل در ادامه تشریح شده است.

۵-۶-۱ تعریف هندسه مدل

اولین قدم در مدل‌سازی انتخاب هندسه مساله است که باید دربرگیرنده محدوده مورد مطالعه و عوامل هندسی تأثیرگذار در رفتار محیط باشد. در مدل‌سازی هندسی توده سنگ، سعی می‌شود ساختارهای اصلی زمین‌شناسی توده سنگ، شناخته‌شده و پارامترهای هندسی آن اندازه‌گیری شوند و با توجه به ویژگی‌ها آن‌ها به بهترین وجه و با بیشترین تطابق با واقعیت مکان‌یابی شوند. بنابراین با شبیه‌سازی ناپیوستگی‌ها و تطابق آن‌ها با توده سنگ، می‌توان یک مجموعه بلوکی را به تصویر کشید و نهایتاً امکان مدل‌سازی مکانیکی و تحلیل پایداری را فراهم نمود. باید به‌اندازه‌ای گسترده باشد که ساختارهای زمین‌شناسی در منطقه مورد بررسی را پوشش دهد و مرزهای خارج از محدوده تأثیر

فعالیت‌های مهندسی قرار گیرد. در تری دک به دو صورت می‌توان مدل هندسی را ایجاد کرد : ۱- به وسیله شکستن یک چند وجهی به چندوجهی های چندگانه ۲- با ایجاد چندوجهی های جداگانه و اتصال آن‌ها به یکدیگر

به منظور عدم تاثیر مرزها بلوکی به عرض ۸۰ متر، طول ۱۲۰، ارتفاع ۵۰ برای مدل‌سازی در نظر گرفته شد. در این مدل به وقوع یک شکست گوه‌ای با لغزش در امتداد صفحات لایه‌بندی و هم صفحات شیب دار و کم عمق شکستگی پی برده شده و حالت شکست گوه‌ای- توسط تحلیل سینماتیکی و با استفاده از نرم افزار Swedge به عنوان مکانیزم اصلی فرو ریختن ترانشه شناسایی گردید.

۵-۶-۲ انتخاب مدل رفتاری مناسب برای بلوک سنگ و ناپیوستگی

تحلیل پایداری ترانشه‌های سنگی درزه‌دار با اعمال مدل‌های ساده بلوک و درزه شروع می‌شود. در اغلب موارد مدل الاستیک برای بلوک‌ها و مدل کلمب برای درزه‌ها استفاده می‌شود. مدل بلوک الاستیک فقط به سه پارامتر چگالی جرمی، مدل برشی و مدل حجمی نیاز دارد. در مدل کلمب هنگام انتخاب مدل رفتاری برای یک تحلیل مهندسی خاص باید دو نکته زیر را در نظر داشت:

۱- ویژگی‌های معلوم ماده‌ای که مدل می‌شود چیست؟

۲- هدف از تحلیل چیست؟

باید بر اساس ویژگی‌ها و خواصی از مواد دربرگیرنده سازه موردنظر باشد که شامل هدف تحلیل باشد. اگر تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در بلوک‌ها نسبت به حرکات درزه کمتر باشد، یک مدل بلوک صلب، برای بلوک سنگ کفایت می‌کند و اگر مدل تماس سطح درزه برای بلوک‌های نزدیک به هم و دارای تماس سطحی مدل لغزش کلمب برای درزه‌ها در نظر گرفته می‌شود. این مدل رفتار خطی حد تسلیم و سفتی درزه را نشان می‌دهد و بر اساس خواص الاستیک سفتی، اصطکاکی، چسبندگی، مقاومت

کششی و ویژگی‌های اتساع معمول در درزه‌های سنگی است. این مدل ضعیف شدگی ناشی از جابه‌جایی درزه را باکم شدن چسبندگی در آغاز شکست برشی را شبیه‌سازی می‌کند.

۵-۶-۳ اعمال شرایط مرزی و آغازین

در تحلیل‌های عددی بخش کوچکی از زمین شامل محدوده مورد مطالعه و تغییرات حین اجرا در آن محدوده در نظر گرفته می‌شود.

به‌منظور شبیه‌سازی محیط باید در مرزهای مدل شرایطی را فراهم کرد که نزدیک‌ترین حالت را با واقعیت مسئله داشته باشد. کف مدل ثابت، مرزهای جانبی در این مدل با توجه اینکه حالت شکست گوه‌ای همراه با لغزش هم در امتداد صفحات لایه بندی-توسط تحلیل سینماتیکی و مشاهدات میدانی- به‌عنوان مکانیزم اصلی فروریختن پایداری ترانشه شناسایی گردید به‌صورت ثابت در نظر گرفته شده است. هم‌چنین برای جلوگیری از واژگونی بلوک‌ها از جناحین، از بلوک‌های صلب در دو طرف ترانشه استفاده شده است و زاویه اصطکاک این بلوک‌ها با ترانشه را صفر در نظر گرفته شده است تا اجازه جابه‌جایی به بلوک‌های شیروانی داده شود. یکی دیگر از ورودی‌های مهم در این بخش تنش برجا (شامل گرانش و تنش ثقلی) است. با توجه به ماهیت لایه ای ساختگاه و نزدیکی ترانشه به سطح زمین انتظار می‌رود که تنش‌های افقی مقداری برابر یا بزرگ‌تر از تنش قائم داشته باشند، از این رو نسبت تنش‌ها برابر ۱ فرض شده است.

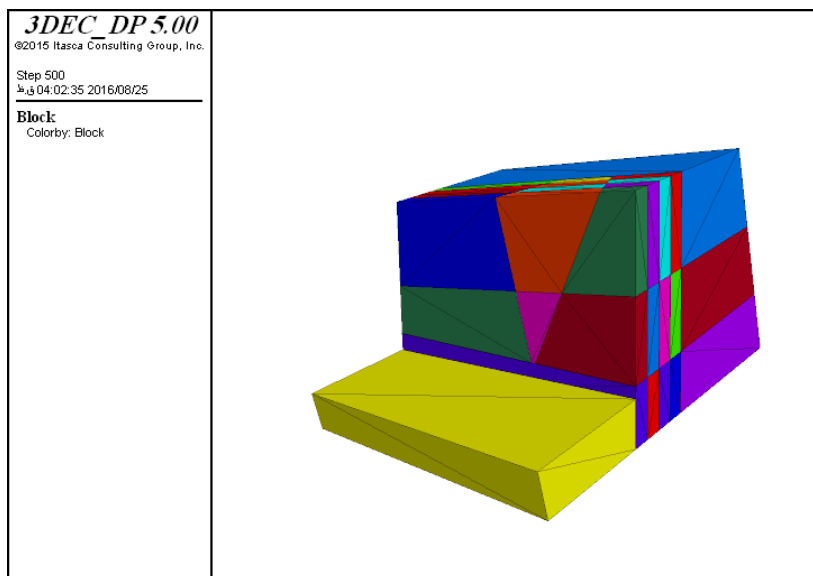
۵-۶-۴ ایجاد تعادل اولیه در مدل

در 3DEC پیش از آن بتوان تغییرات را در مدل به وجود آورد باید آن را به یک وضعیت تعادل نیرویی اولیه رساند. زمانی گفته می‌شود مدل در تعادل است که حداکثر نیروی نامتعادل در مقایسه با نیروهای معرف در مساله کوچک باشد. مقدار کوچک نسبت نیروی نامتعادل به نیروی درونی با درصد بیان می‌شود و هیچ‌گاه به صفر نمی‌رسد. اگر نیروی نامتعادل به مقداری ثابت و غیرصفر نزدیک

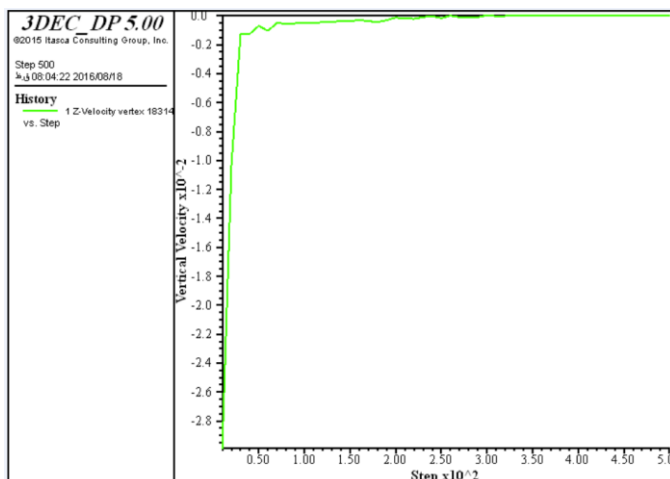
شود، نشان دهنده آن است که لغزش درزه یا شکست بلوک و جریان پلاستیک در حال وقوع است .

[Itasca 2015]

این موضوع یکی از جوانب مهم حل عددی مساله با 3DEC است. در یک تحلیل، در تعادل بودن مدل پیش از اعمال تغییرات بسیار مهم است، برای آنکه مطمئن شویم هیچ نیروی نامتعادل بزرگی در کار نیست، با مشاهده حرکت نقاط مشخصی در توده سنگ مفید خواهد بود. در این مساله سرعت در راستای y از نقطه‌ای در موقعیت $(30, 30, 30)$ بررسی می‌شود. به همین دلیل برای درک تعادل واقعی مدل باید سرعت‌ها و جابه‌جایی‌های مدل مورد بررسی قرار گیرند. سرعت در راستای y در نقطه شاهد $(30, 30, 30)$ در دیواره ترانشه، به‌عنوان اثبات متعادل بودن مدل آورده شده است.



شکل ۵-۱: مدل ایجادشده در 3DEC از ترانشه سنگی برای تحلیل بلوکی



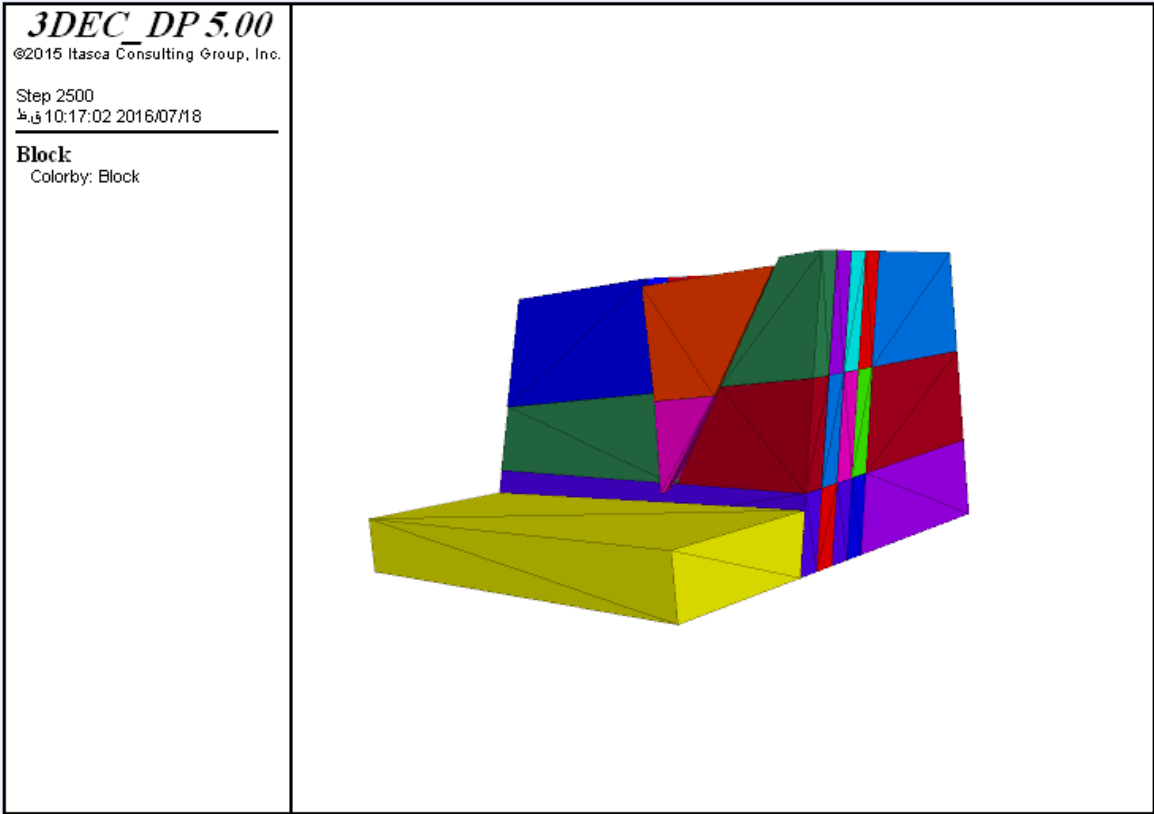
شکل ۵-۲: تاریخچه سرعت در راستای y (تعداد اولیه)

۷-۵ تحلیل لغزش گوه‌ای در ترانشه

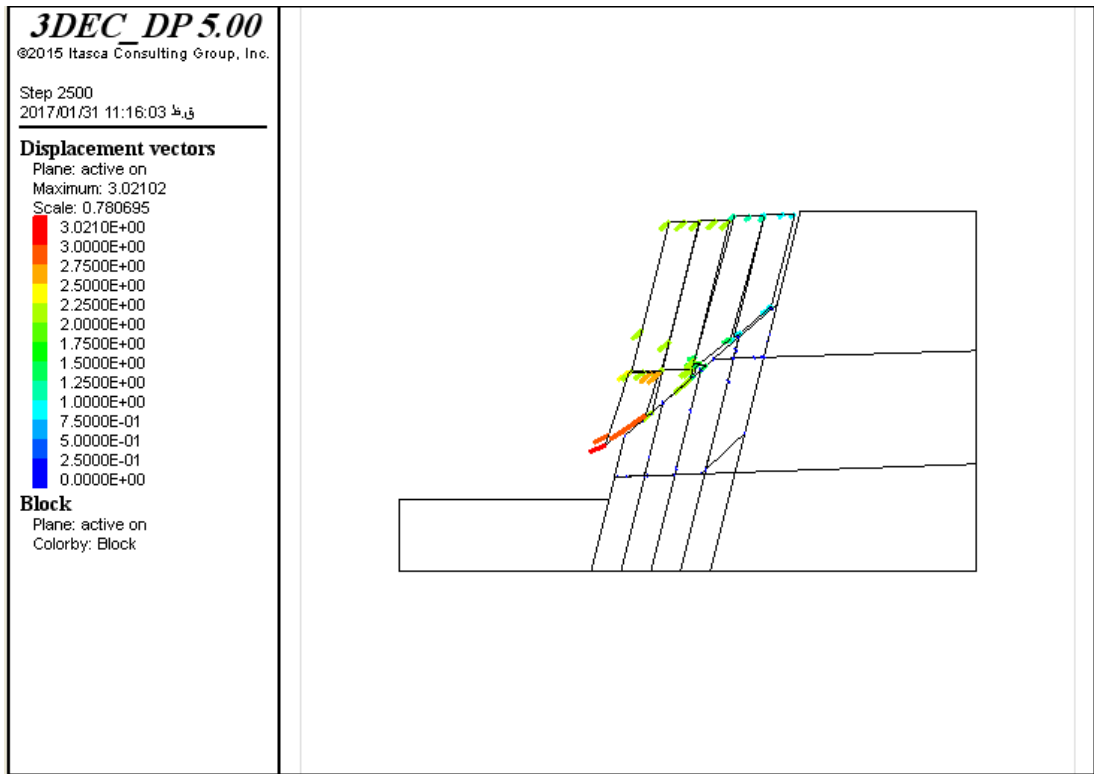
تحلیل لغزش گوهی برای بلوک ناشی از تقاطع سطح لایه‌بندی (JBed4) و دسته‌درزه J2 و بر اساس داده‌های جدول ۴-۲ آورده شده است. زاویه اصطکاک درزه ۳۳ درجه و چسبندگی ۰ لحاظ شده (بر اساس نتایج آزمایش برش مستقیم درزه‌ها انجام شده در آزمایشگاه). چسبندگی لایه‌بندی ۰٫۲ است. (بر اساس گزارش پروژه آزادراه تهران-شمال). صلبیت برشی از شیب شکل ۳-۱۱ و به علت صیقلی بودن سطح درزه‌ها صلبیت نرمال تقریباً دو برابر صلبیت برشی در نظر گرفته شده است. ارتفاع ترانشه-ها در حدود ۴۰ متر لحاظ شده است. در این تحلیل‌ها بلوک‌ها صلب در نظر گرفته شدند و برای درزه‌ها از مدل کلمب استفاده شد. خواص درزه‌ها در مدل المان مجزای سه‌بعدی در جدول زیر آورده شده است. در این حالت بلوک پایدار هست ولی با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه و هوازدگی شدید ترانشه با تضعیف زاویه اصطکاک داخلی گوه جابه‌جا شده و می‌تواند در حالت ناپایدار قرار بگیرد.

جدول ۴-۱۳: مشخصات به‌کاررفته برای ناپیوستگی‌ها در مدل المان مجزا

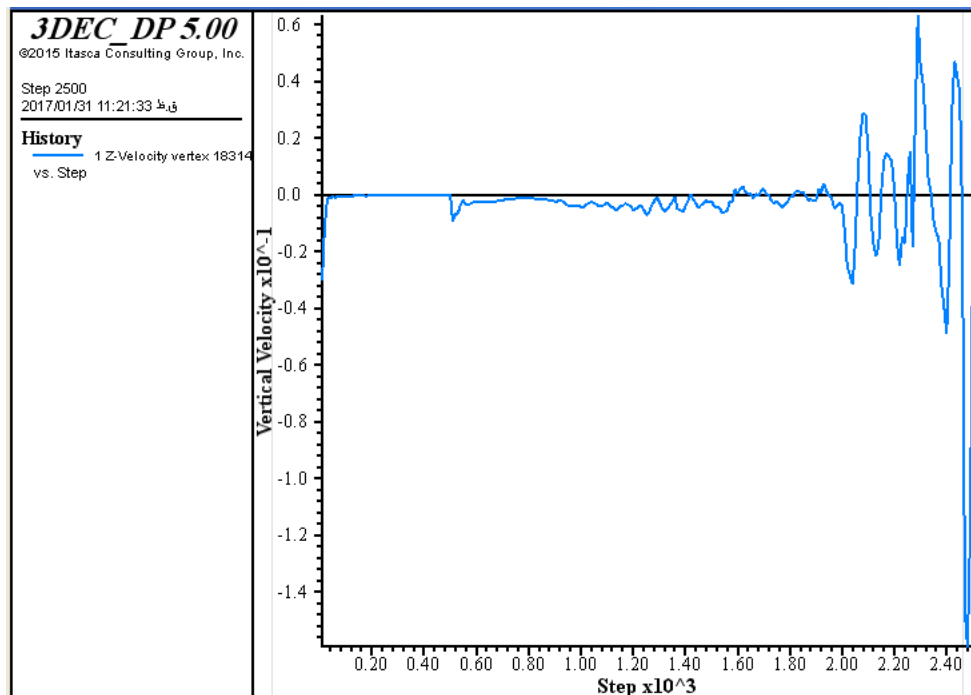
چسبندگی C(MPa)	صلبیت برشی ($\frac{Gpa}{m}$)	صلبیت نرمال ($\frac{Gpa}{m}$)	زاویه اصطکاک داخلی درزه (ϕ) درجه	لیتولوژی
۰/۱۹	۱/۰۵	۲/۹	۳۳	شیل



شکل ۵-۳: تحلیل لغزش گوه‌ای در ترانشه



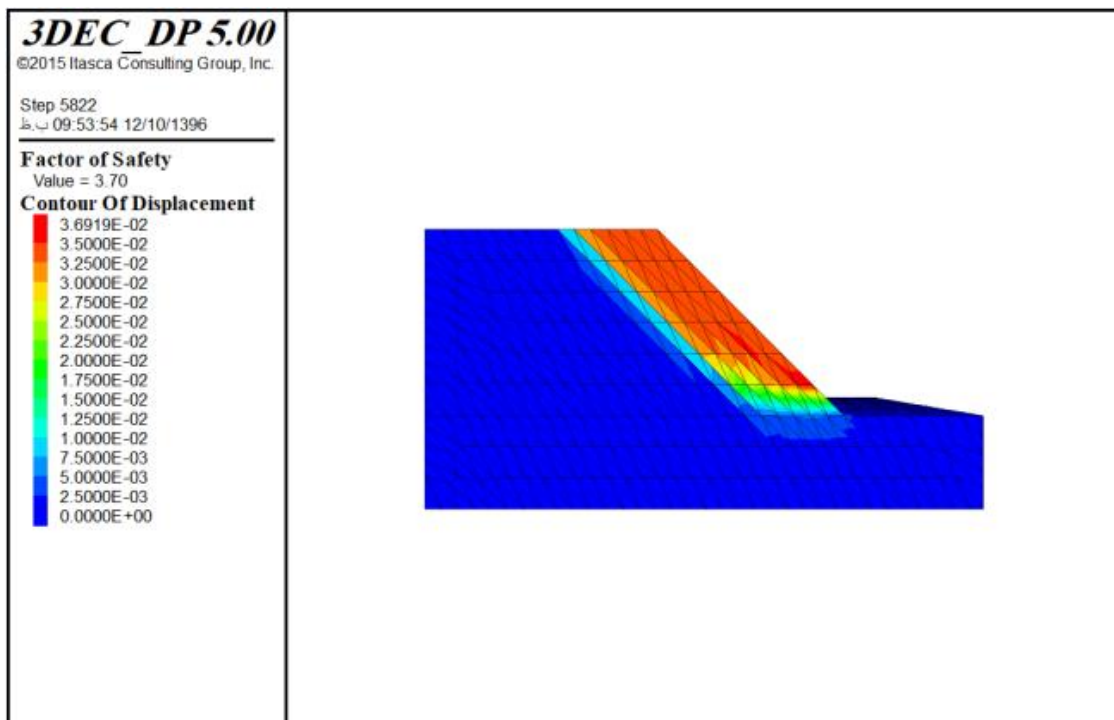
شکل ۴-۵ : مقطع عمودی از گوه، نمایش بردارهای جابه جایی



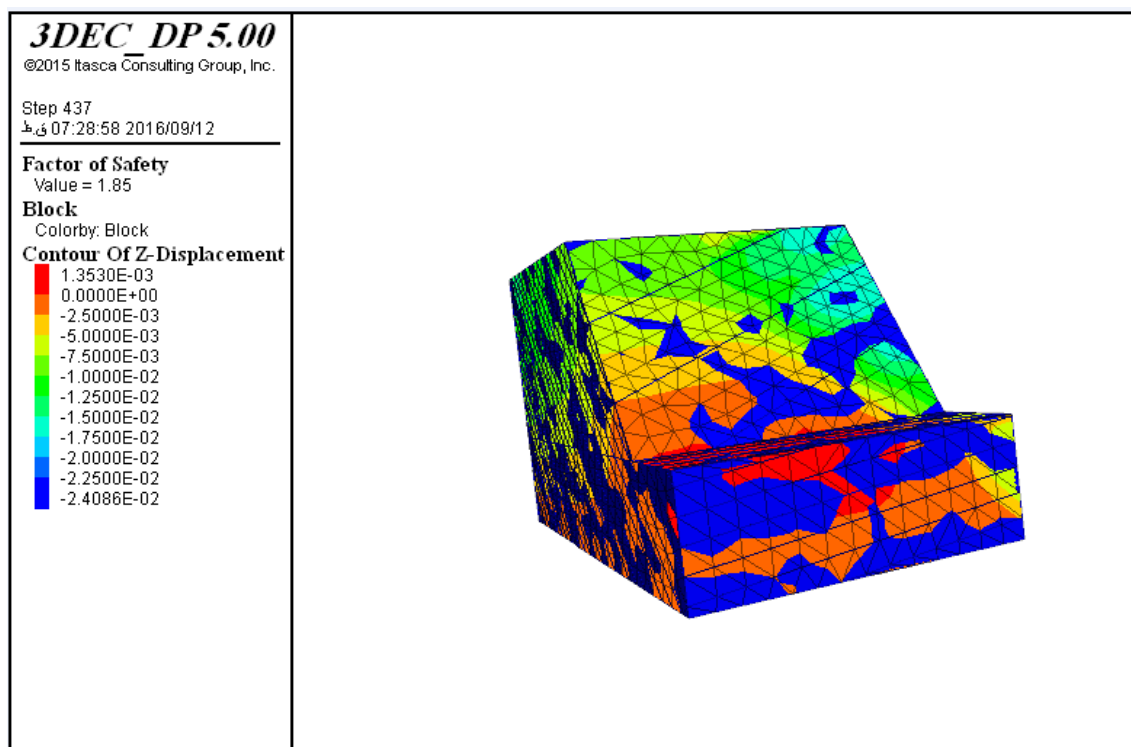
شکل ۵-۵ : تاریخچه سرعت در راستای Z

۵-۸ تحلیل پایداری ترانشه با مدل انعطاف پذیر

همان گونه که قبلاً نیز اشاره شد بهتر است مدل سازی با مجموعه ساده شده ای از پارامترها و شرایط شروع شود. مثلاً مدل الاستیک فرض شود و مقاومت را افزایش می دهیم تا از گسیختگی جلوگیری شود و یا درزه ها صلب فرض شوند. این کارها جهت از جهت تشخیص اشتباهات قبلی در ساخت مدل مفید هستند. بعد از بررسی نتایج وضعیت های ساده تر، مدل با مجموعه پارامترهای بهبود یافته دوباره حل می شود. بدین منظور ابتدا مدل هایی بدون در نظر گرفتن درزه ها ساخته و اجرا شدند و در مراحل بعدی درزه ها در مدل گنجانده شدند. در این تحلیل ها خواص مواد و ناپیوستگی ها مطابق جدول ۴-۱۳ در نظر گرفته شد.



شکل ۵-۶: مدل سازی ترانشه بدون درزه و لایه بندی



شکل ۵-۷: مدل سازی ترانشه با وارد کردن لایه بندی

۵-۹ پایداری سازی ترانشه

ایمنی در حین ساخت و پایداری بلندمدت مواردی هستند که باید در اجرا ترانشه‌های سنگی مورد توجه قرار گیرند. این توجه نیازمند تقویت یا نصب نگهداری در ترانشه مورد نظر است. باید توجه کرد که تقویت و نصب نگهداری دو نقش متفاوت در مهندسی سنگ دارد. تقویت سنگ، همان‌طور که از نامش پیداست برای بهبود مقاومت و یا رفتار تغییر شکل‌پذیری توده سنگ استفاده می‌شود. تقویت سنگ شامل پیچ‌سنگ‌ها و مهاریه‌هاست که داخل سنگ قرار می‌گیرند تا از سست‌شدگی و حرکت بلوک‌های سنگی جلوگیری کنند که در حالت کلی برای توده سنگ‌هایی با مقاومت متوسط مناسب هستند، برای سنگ‌های ضعیف تا خیلی ضعیف کارآمد نیست. در این موارد اغلب از نصب نگهداری استفاده می‌شود. (Hoek, 2006)

روش‌های پایداری سازی را می‌توان در سه دسته کلی تقسیم‌بندی نمود:

الف) کاهش تنش‌های برشی

به‌وسیله انتقال سنگ‌های پوششی و دیواره، از قبیل انتقال سنگ‌ها از قسمت فوقانی، کاهش زاویه شیب، انتقال یا متراکم نمودن کلیه موادی که موجب ناپایداری می‌شود.

ب) افزایش مقاومت برشی سطح لغزش

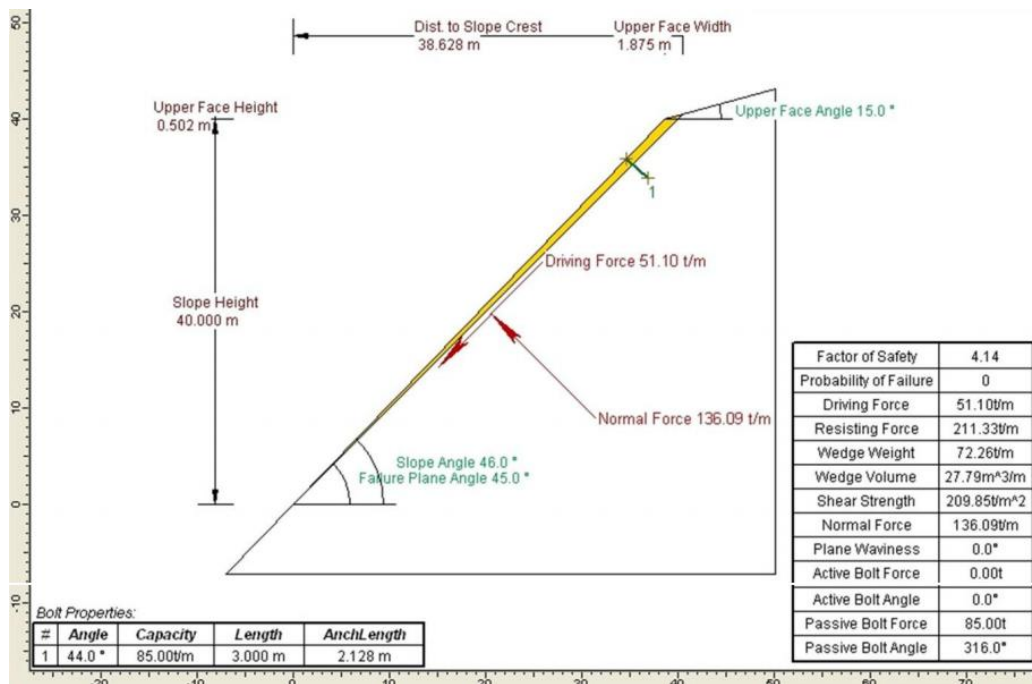
از قبیل تقویت با استفاده از وسایل نگهداری مصنوعی شامل پر کردن منافذ سنگ و زمین، ایجاد تیر سیمانی یا فلزی در سطح ریزش، نصب مهاریه‌ها، انجام عملیات تزریق در سطح لغزش و ...

ج) کاهش زاویه شیب دامنه

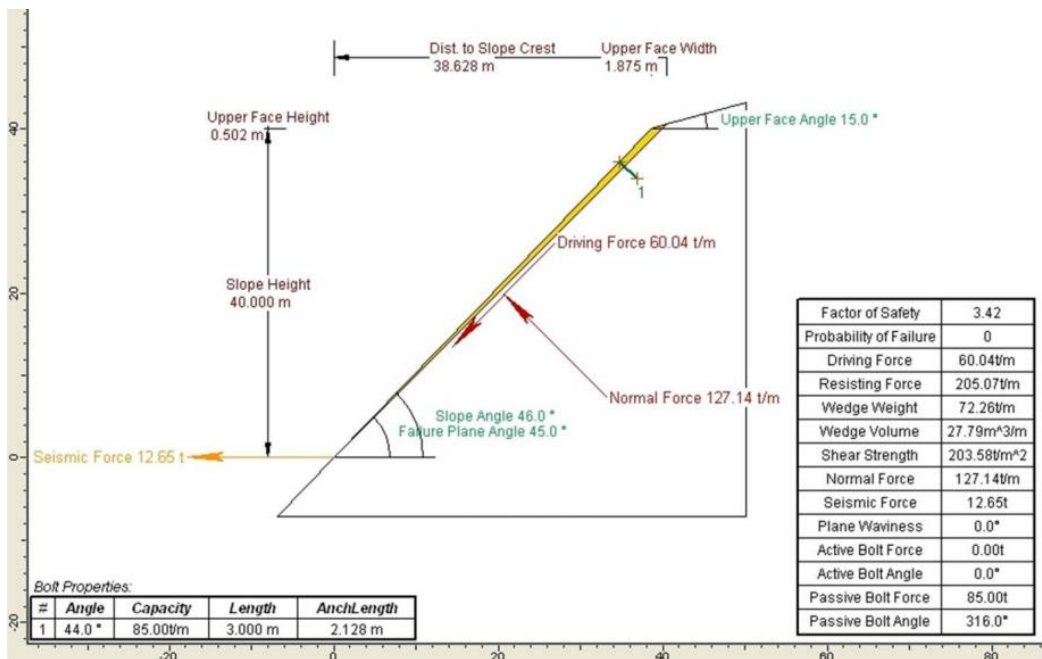
کاهش شیب دامنه در درجه اول برای کاستن از مقدار نیروهای مؤثر در حرکت دامنه انجام می‌شود. از این روش می‌توان هم به‌عنوان پیشگیری و هم در مراحل اولیه یک ناپایداری فعال استفاده کرد.

برای پایدار کردن ترانشه های سنگی ابتدا باید مقاومت توده سنگ تا حد امکان حفظ شده و یا بهبود یابد. یکی از معیارهای ارزیابی پایداری سازه، مقدار جابجایی های رخ داده است. با توجه به مطالب ارائه شده در ادامه سیستم نگهداری مناسب با به کار گیری روش های تجربی و عددی برای پایداری ترانشه های سنگی طراحی می شود.

محاسبات تحلیل پایداری برای لغزش صفحه ای بر اساس تعادل نیروها انجام شده است. نمای کلی از نیروهای مختلف برای هر دو حالت بارگذاری دینامیک و استاتیک با در نظر گرفتن سیستم تحکیم به صورت بولت های سه متری در شکل (۵-۸) نشان داده شده است. این نیروها شامل وزن بلوک در حال لغزش، نیروی کششی بولت، نیروهای اصطکاکی و نیروی معادل اثر زلزله است. هم چنین در شکل (۵-۸)، شکل و ابعاد ترانشه و محتمل ترین بلوک در حال لغزش نشان داده شده است.



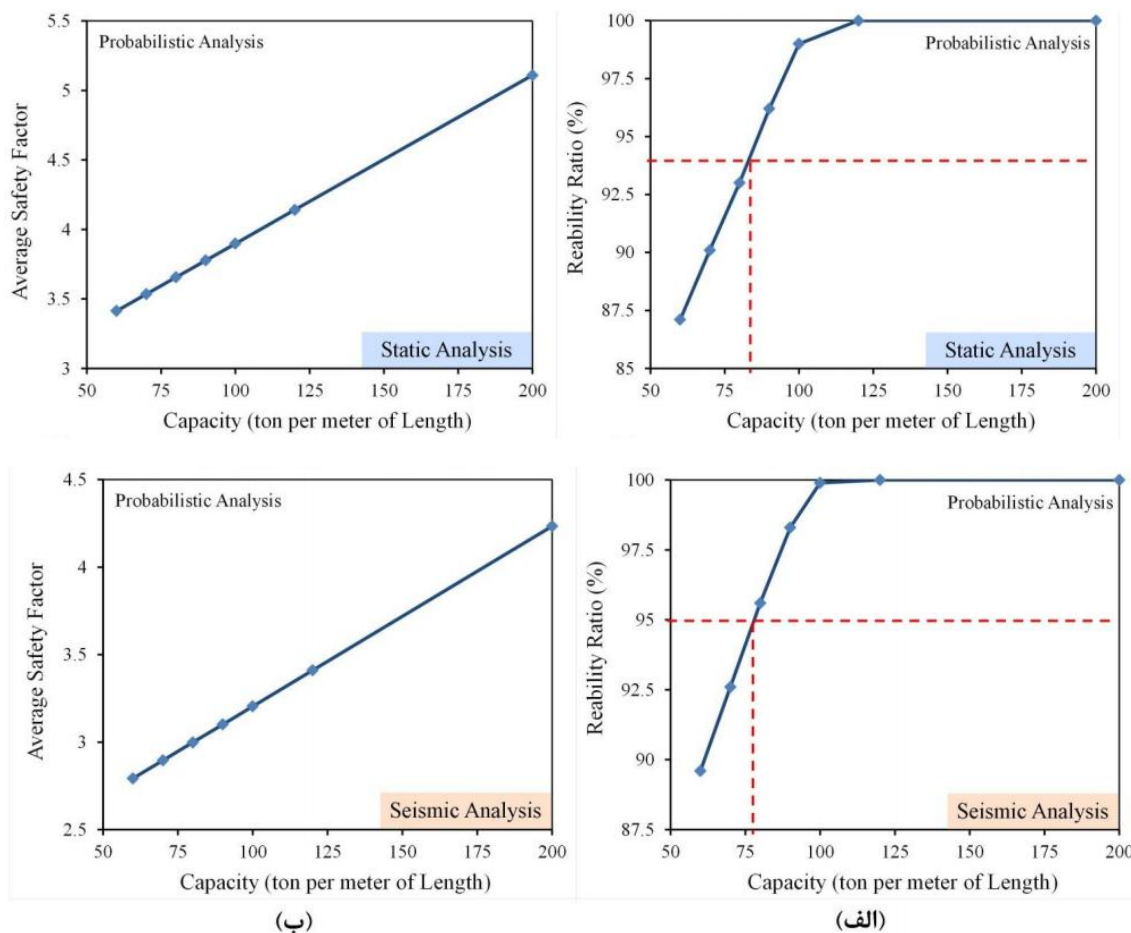
شکل ۵-۸: تحلیل پایداری لغزش صفحه ای در حالت استاتیک



شکل ۵-۹: تحلیل پایداری لغزش صفحه‌ای در حالت دینامیک

برای رسیدن به ضریب ایمنی مناسب در مقابل لغزش صفحه‌ای، لازم است از سیستم تحکیم راک-بولت استفاده شود. به منظور تعیین سیستم راک-بولت مورد نیاز، محاسبات تحلیل پایداری برای مقادیر مختلف ظرفیت باربری راک-بولت انجام شده است. با توجه به اینکه در تحلیل‌های بلوکی به روش احتمالاتی، ابعاد بلوک ریزشی در هریک از آرایش‌های هندسی متفاوت از سایر آرایش‌های هندسی دیگر است، برای انتخاب سیستم مناسب، از مقایسه نتایج مربوط به ضریب قابلیت اطمینان^۱ استفاده شده است. برای هریک از مقادیر مختلف باربری سیستم راک-بولت و بر اساس نتایج حاصل از شبیه‌سازی، مقدار ضریب قابلیت اطمینان با در نظر گرفتن ضریب ایمنی مورد نیاز (برای حالت استاتیک برابر ۱/۵ و برای بارگذاری دینامیکی ۱/۲۵) محاسبه شده است. خلاصه نتایج حاصل از شبیه‌سازی لغزش صفحه‌ای برای ظرفیت‌های مختلف سیستم تحکیم در شکل ۵-۱۰ و به صورت نتایج بارگذاری استاتیک و بارگذاری دینامیک و به دو صورت ضریب قابلیت اطمینان و ضریب ایمنی متوسط ارائه شده است.

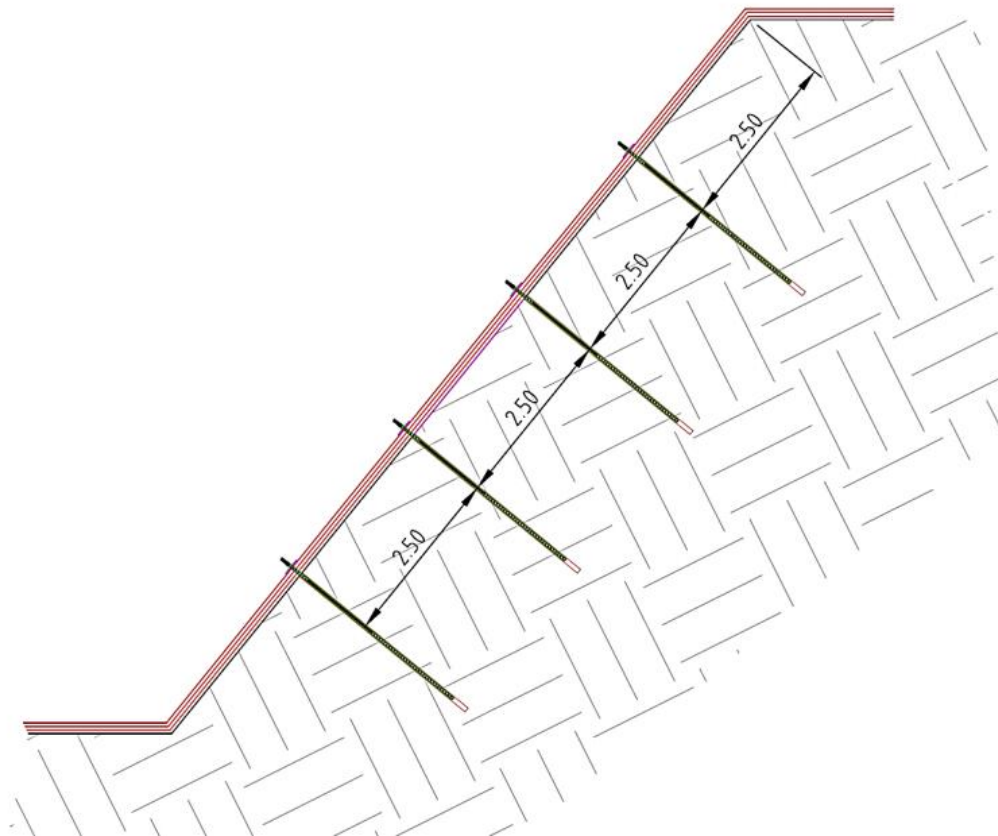
^۱ Reability Ratio



شکل ۵-۱۰: خلاصه نتایج تحلیل پایداری برای مقادیر مختلف ظرفیت سیستم راکبالت (در واحد طول ترانشه) برای بارگذاری استاتیک (شکل بالا) و بارگذاری دینامیک (شکل پایین): الف) ضریب قابلیت اطمینان، ب) ضریب ایمنی متوسط

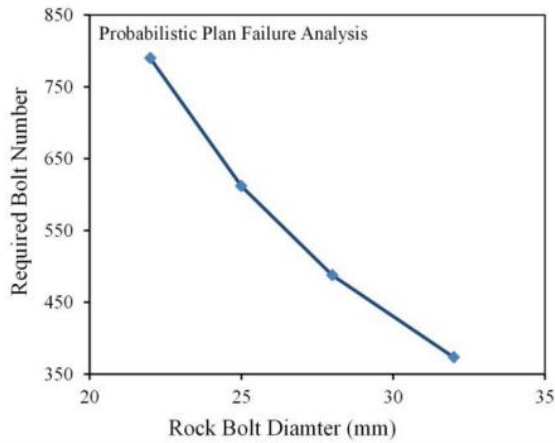
مطابق با شکل ۵-۱۰، برای تحلیل‌های استاتیک، در صورت استفاده از سیستم راکبالت به ظرفیت حدود ۸۵ تن بر متر مربع می‌توان به ضریب قابلیت اطمینان بیش از ۹۵٪ رسید. برای تحلیل‌های مربوط به بارگذاری دینامیک، ظرفیت موردنیاز سیستم راکبالت موردنیاز برای رسیدن به ضریب قابلیت اطمینان بیش از ۹۵٪ در حدود ۹۵ تن بر متر طول ترانشه خواهد بود. همچنین، مقدار ضریب ایمنی متوسط برای سیستم تحکیم پیشنهادی (برای قابلیت اطمینان بیش از ۹۵٪) نیز در محدوده ۲ تا ۳ برابر مقدار استاندارد روش قطعی بوده و از این نظر نیز می‌توان سیستم تحکیم پیشنهادی را تعیین نمود. به طور کلی مقدار ضریب ایمنی متوسط موردنیاز در تحلیل‌های احتمالاتی معمولاً ۲ تا ۳ برابر مقدار استاندارد روش قطعی است.

حداقل ظرفیت موردنیاز برای سیستم بولت در حدود ۸۵ تن بر متر طول ترانسه و مطابق با نتایج مربوط به بارگذاری استاتیکی تعیین شد. در ادامه، لازم است، آرایش سیستم بولت بر اساس این مقدار تعیین شود. با توجه به هندسه پله ترانسه و مطابق شکل ۵-۱۱، برای هر پله ترانسه تعداد ۴ راک بولت با فاصله‌داری ۲/۵ متر بر روی سطح ترانسه گرفته شده است.

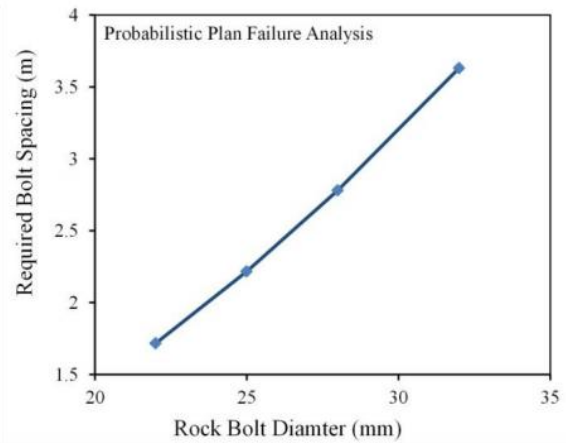


شکل ۵-۱۱: نمای شماتیک از نحوه قرارگیری راک بولت در طول سطح شیروانی

برای بولت با قطرهای مختلف (با در نظر گرفتن ظرفیت نهایی بولت با قطرهای ۲۲، ۲۵، ۲۸، ۳۲ میلی‌متر به ترتیب برابر ۱۵/۲، ۱۹/۶، ۲۴/۶ و ۳۲/۱ تن) نیز انجام شده که نتیجه آن به صورت گراف در شکل ۵-۱۲-الف) نشان داده شده است. مطابق با شکل فاصله داری بولت با قطرهای ۲۲، ۲۵، ۲۸، ۳۲ میلی‌متر به ترتیب برابر با ۱/۷، ۲/۲، ۲/۸ و ۳/۶ متر خواهد بود که بر اساس این فاصله‌داری، تعداد راک بولت موردنیاز برای سیستم تحکیم ترانسه محاسبه شده و نتیجه آن در شکل ۵-۱۲-ب) نشان داده شده است.



ب



الف

شکل ۵-۱۲: خلاصه محاسبات مربوط به آرایش و تعداد بولت برای قطرهای مختلف: الف) فاصله-

داری بولت‌ها در طول ترانشه، ب) تعداد بولت مورد نیاز برای کل ترانشه

بر اساس نقشه‌های طرح مصوب (بعد از واریانت) محاسبه شده که بر اساس این محاسبات، سطح

ناحیه‌ای که باید با راک بولت تقویت شود در حدود ۳۳۹۰ متر مربع خواهد بود.

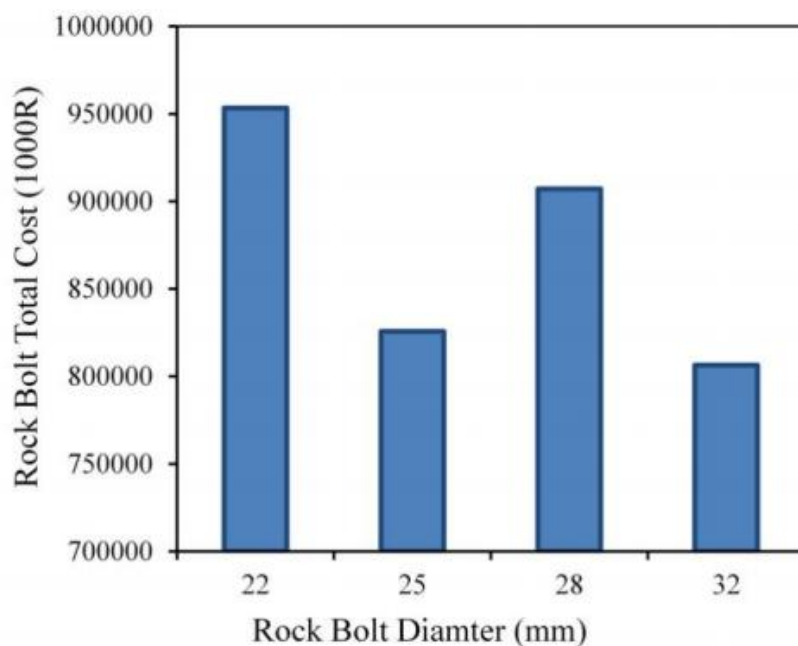
به منظور انتخاب قطر میلگرد و راک بولت‌های مورد نیاز، برآورد هزینه نیز انجام شده و قطر

میلگردهای راک بولت برای طرح تحکیم بر اساس کمینه‌سازی هزینه انجام شده است. محاسبات

هزینه برای اجرای راک بولت با قطرهای مختلف و در طول کل ترانشه بر اساس مقادیر مربوط به

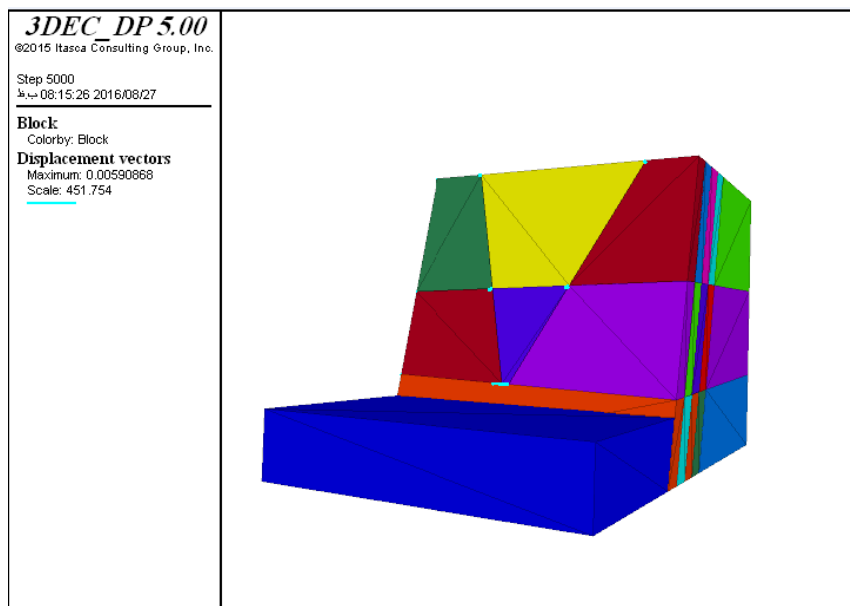
تعداد راک بولت، قطر راک بولت و طول راک بولت و مقادیر ریالی فهرست بها که نتیجه این محاسبات

در شکل ۵-۱۳ ارائه شده است.

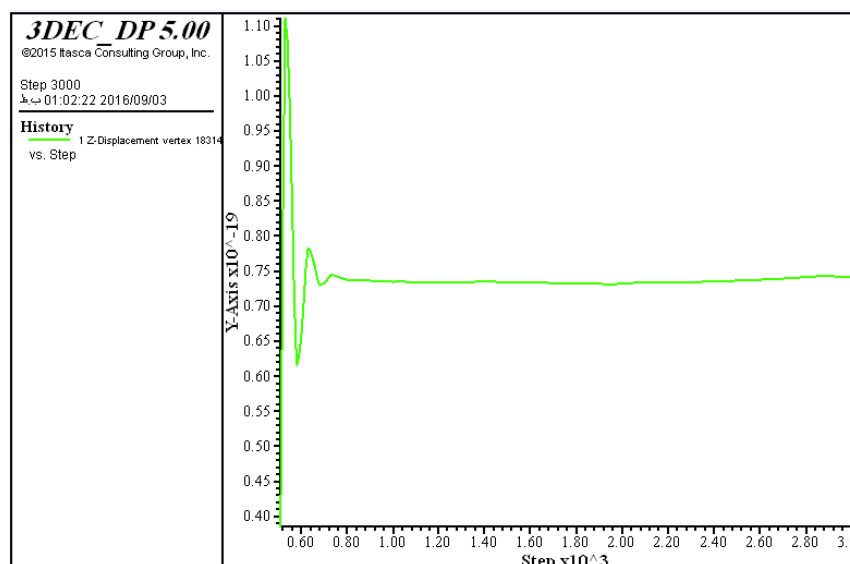


شکل ۵-۱۳: هزینه اجرای راک بولت‌ها در کل ترانشه برای بولت با قطرهای مختلف (۱۰۰۰ ریال)

با توجه به محاسبات انجام شده، سیستم تحکیم راک بولت ترانشه‌های مورد بررسی با مشخصات فنی شامل قطر بولت ۳۲ میلی‌متر، طول میلگرد رزوه شده ۶ متر، بولت به صورت میلگرد آجدار با مقاومت ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، قطر چال ۵۶ میلی‌متر، طول چال ۵/۸ متر (با احتساب ۲۰ سانتی‌متر ته چال) و فاصله‌داری ۲/۵ در ۳/۶ متر (به ترتیب در ارتفاع و طول پله) پیشنهاد می‌شود. برای بررسی نقش راک بولت در میزان جابجایی گوه تشکیل شده با دو راک بولت یکی از محل (۳۰،۴۰،۲۵) تا (۷۰،۴۰،۲۵) و دیگری از محل (۲۵،۲۰،۳۰) تا (۲۵،۲۰،۷۰) نصب می‌شود. هم‌چنین نمودار جابجایی در راستای ۷ نقطه‌ای در سطح شیروانی نشان می‌دهد که حرکت شیروانی با این تقویت‌کننده، محدود شده است



شکل ۵-۱۴: پایدارسازی ترانشه با تقویت موضعی (با دو راک بولت در دو نقطه)



شکل ۵-۱۵: نمودار جابه‌جایی در راستای y در نقطه $(30, 30, 30)$ روی سطح ترانشه

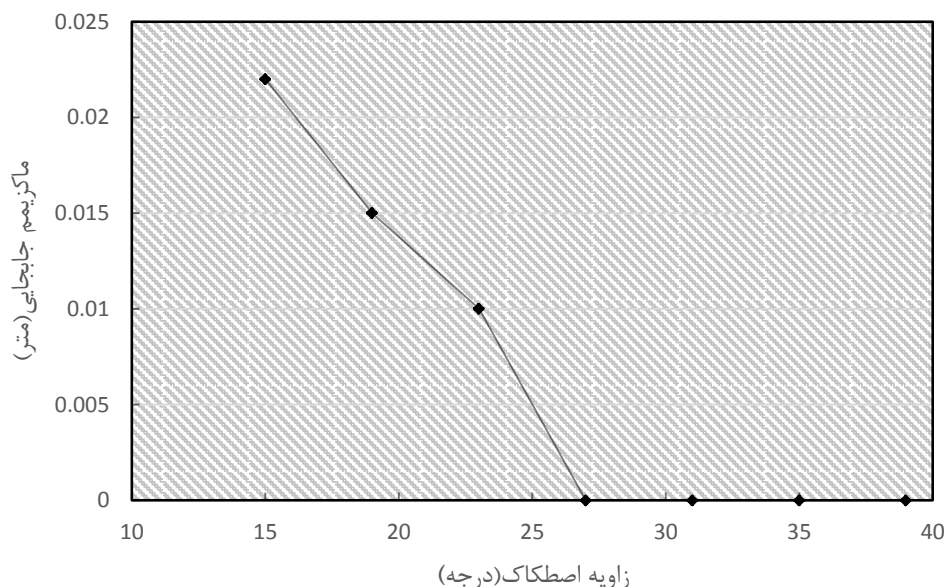
در این مثال هنگامی که اصطکاک درزه کم می‌شود از میرا شوندگی موضعی^۱ استفاده می‌شود که با توجه به هوازدگی شدید ترانشه در اثر تغییرات آب و هوایی منطقه و سرمای شدید و بارندگی زیاد منطقه به واقعیت نزدیک‌تر خواهد بود.

^۱ DAMP local

۵-۱۰ تحلیل حساسیت پارامترهای مقاومت برشی درزه

در مدل های ساخته شده در محیط نرم افزار 3DEC جهت تحلیل پایداری ترانشه های سنگی، خصوصیات ژئومکانیکی و پارامترهای مقاومتی توده سنگ به عنوان داده های ورودی به مدل اعمال می گردد. مهم ترین پارامتر لازم عبارت است از: زاویه اصطکاک داخلی درزه، چسبندگی سطوح درزه، خواص مکانیکی سطوح درزه ها شامل صلبیت نرمال و برشی درزه. لذا تغییر پارامتر مذکور می تواند روی نتایج حاصله تاثیر بگذارد. بدین منظور تاثیر زاویه اصطکاک داخلی سطوح ناپیوستگی ها که از مهم ترین داده های ورودی جهت تحلیل رفتاری توده سنگ می باشد که نتایج حاصل در زیر ارائه می گردد.

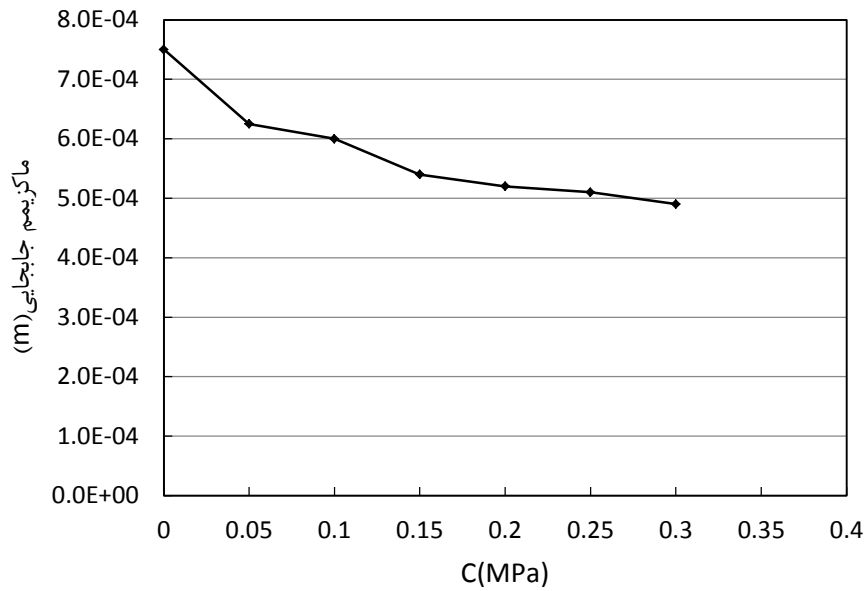
نمودار شکل ۵-۱۰ رابطه خطی را بین مقادیر جابجایی ماکزیمم و زاویه اصطکاک داخلی درزه را نشان می دهد. با افزایش مقادیر ϕ کاهش در مقادیر جابجایی را داریم و کاهش تا زاویه ۲۷ قابل توجه است پس از زاویه ۲۷ درجه با افزایش زاویه اصطکاک کاهش قابل توجهی در جابجایی مشاهده نمی گردد و به سمت مقدار ثابت میل می کند.



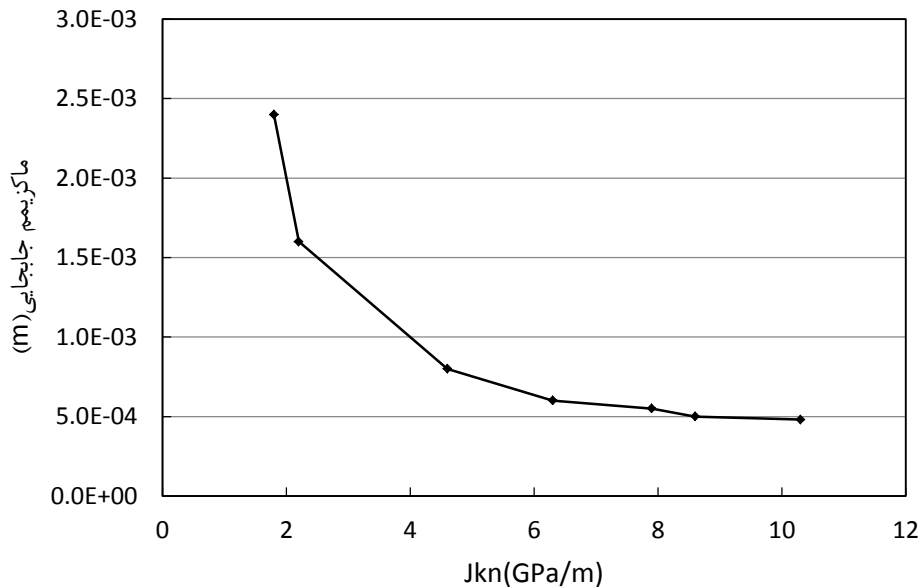
شکل ۵-۱۶: تاثیر پارامتر زاویه اصطکاک داخلی درزه روی حداکثر جابه جایی گوه

اثرات تغییر چسبندگی بر روی مقادیر جابجایی نیز بررسی شد. نمودار شکل مقادیر جابجایی در

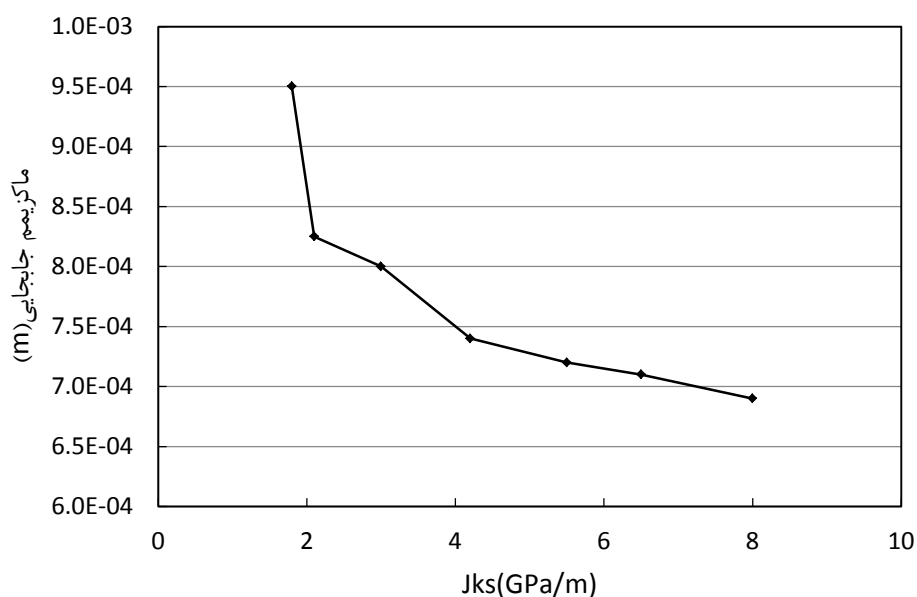
برابر چسبندگی برای مدل ساخته شده را نشان می دهند. همان طور که در نمودارها پیداست با افزایش مقادیر c (چسبندگی) مقدار جابجایی اندازه گیری شده کاهش پیدا می کند.



شکل ۵-۱۷: تاثیر پارامتر چسبندگی درزه روی حداکثر جابه‌جایی گوه



شکل ۵-۱۸: تاثیر پارامتر k_n درزه روی حداکثر جابه‌جایی گوه



شکل ۵-۱۹: تاثیر پارامتر k_s درزه روی حداکثر جابه‌جایی گوه

اثرات مقادیر سختی نرمال و برشی بر مقادیر جابه‌جایی نیز بررسی گردید که مشخص شد مقادیر جابه‌جایی از تغییرات مقادیر k_n و k_s تاثیر می‌پذیرد و نتایج حاصل نشان می‌دهد که شدت اثرات مقادیر k_n نسبت به k_s ، بر مقادیر جابه‌جایی محاسبه‌شده بیشتر است.

۵-۱۱ جمع‌بندی

با توجه به توانایی های روش المان مجزا و نرم افزار 3DEC، در این فصل ابتدا روش تحلیل بلوکی با استفاده از بلوک‌های صلب صورت گرفته است. به دلیل اینکه هدف از این تحلیل دستیابی به یک ارزیابی کلی از وضعیت پایداری نسبی درزه ها و همچنین وضعیت پایداری کلی تکیه گاه ها بوده، از این رو به راحتی می توان چرخش بلوک ها را، مشاهده و بررسی شد، چیزی که در روش های تعادل حدی امکان پذیر نیست. سپس مدل مش‌بندی شد و در یک حالت پایداری کلی ترانشه بدون وارد کردن لایه‌بندی و در حالت بعدی با وارد کردن لایه بندی بررسی شد. سپس پارامترهای اصلی مقاومت برشی تحلیل حساسیت شده و در انتها الگوی پایدارسازی با راک‌بولت و تاثیر راک بولت در جابه‌جایی گوه بررسی شد و طرح پیشنهادی پایدارسازی ترانشه داده شد.

فصل ششم

نتیجه‌گیری و

پیشنهادات

۱-۶ نتیجه‌گیری

۱. در این تحقیق ابتدا درزه نگاری انجام شده و وضعیت ناپیوستگی‌های منطقه تحلیل گردیده و در نتیجه آن سه دسته‌درزه‌های اصلی مشخص شده است که هر سه دسته‌درزه موجود در توده‌سنگ در تمامی نواحی به صورت سطوح ممتد و بدون اعوجاج قابل مشاهده هستند و سطح درزه‌ها نیز تقریباً صاف بوده و زبری سطوح بسیار کم است. هم‌چنین، درزه‌های موجود در هر دسته به طور خاصی با یکدیگر موازی بوده و در هر موقعیت برداشت، به طور محلی درزه‌ها به طور کامل موازی هستند.

۲. با توجه به طبقه بندی توده سنگ انجام گرفته به روش RMR برای توده سنگ هوازده (با توجه به شرایط آب و هوایی منطقه و هوازده‌گی شدید توده‌سنگ) دارای امتیاز ۳۷ بوده و کیفیت توده سنگ ضعیف می باشد.

۳. بحرانی‌ترین وضعیت پایداری از نظر ریزش واژگونی برای دسته‌درزه I_1 و لایه‌بندی حادث می‌شود که برای هر دو ناپیوستگی فوق، مقدار اندیس SMR برابر ۳۶ بوده که برای این محدوده SMR مطابق با جداول تجربی، استفاده از شاتکریت و انکر پیشنهاد شده است. بحرانی‌ترین وضعیت پایداری از نظر ریزش گوه‌ای برای دسته‌درزه I_2 و لایه‌بندی حادث می‌شود که برای بلوک‌های تشکیل شده با این دو ناپیوستگی، مقدار اندیس SMR برابر ۳۴ بوده که برای این محدوده SMR مطابق با جداول تجربی، استفاده از شاتکریت و انکر پیشنهاد شده است. بحرانی‌ترین وضعیت پایداری از نظر ریزش صفحه‌ای برای لایه‌بندی حادث می‌شود که برای بلوک‌های تشکیل شده، مقدار اندیس SMR برابر ۳۱ بوده که برای این محدوده SMR مطابق با جداول تجربی، استفاده از شاتکریت و انکر پیشنهاد شده است.

۴. در سال‌های اخیر نیاز به ساخت سازه‌های سنگی و زیرزمینی نظیر ترانشه، تونل‌ها، پی‌سدها و... افزایش چشمگیری داشته است. از آنجایی که این قبیل سازه‌ها عمدتاً در توده‌های درزه و شکاف دار احداث می‌شوند، مشخصات مکانیکی توده سنگ می‌بایست به طور دقیق

شناسایی گردد. وجود درزه ها می تواند به طور قابل ملاحظه ای بر رفتار مکانیکی توده های سنگی تاثیرگذار باشد. در واقع مهم ترین عاملی که در توده سنگ باعث کاهش مقاومت و افزایش تغییر شکل پذیری می شود درزه هاست. این عامل در شناخت و طبقه بندی توده های سنگی اهمیتی بیشتر از مقاومت و خصوصیات سنگ سالم دارد.

۵. مجموعه بررسی های صورت گرفته به روش سینماتیکی، بیانگر وجود پتانسیل های ناپایداری صفحه ای و گوه ای در ترانشه های تحت بررسی می باشد.

۶. تحلیل پایداری کلی ترانشه (مشابه با رفتار مواد پیوسته) با استفاده از نرم افزار Slide برای دو حالت استاتیک و شبه استاتیک (با شتاب مبنای $0.2g$) با استفاده انجام شده که ضریب ایمنی در هر دو حالت تحلیل بیش از ۳ بوده و در نتیجه می توان گفت، ترانشه های موردبررسی از نظر پایداری کلی مشکل نداشته است.

۷. تحلیل گوه ای با استفاده از نرم افزار Swedge برای بلوک ناشی از تقاطع سطح لایه بندی و دسته درزه دوم و بر اساس داده های هندسی جدول انجام شده که ضریب ایمنی در حالت استاتیکی برابر $1/9$ و در حالت شبه استاتیکی $1/2$ شده است.

۸. تحلیل صفحه ای با استفاده از نرم افزار RocPlane برای سطح لغزش بحرانی مربوط به لایه بندی است. تحلیل بر اساس داده های هندسی جدول انجام شده که ضریب ایمنی در حالت استاتیکی برابر $1/7$ و در حالت شبه استاتیکی $1/3$ شده است.

۹. تحلیل های عددی با بلوک های صلب نسبت به تحلیل با بلوک های انعطاف پذیر، انجام چنین تحلیل هایی در یک پروژه می تواند به خوبی نشان می دهد کدام یک از ناپیوستگی ها دارای شرایط بحرانی تری می باشد.

۱۰. به نظر می آید روش مورد استفاده در برآورد خواص و بررسی رفتار توده سنگ دربرگیرنده ترانشه که تلفیقی از روش های سینماتیکی و روش تعادل حدی و شبیه سازی رفتار آن در محیط معادل درزه دار می باشد و روش عددی، راه کار مناسبی برای انجام تحلیل های پایداری

در غیاب مطالعات دقیق ژئومکانیکی می‌باشد.

۶-۲ پیشنهادها

۱- با توجه به محاسبات انجام شده، سیستم تحکیم راکبولت ترانسه‌های مورد بررسی با مشخصات فنی شامل قطر بولت ۳۲ میلی‌متر، طول میلگرد رزوه شده ۶ متر، بولت به صورت میلگرد آجدار با مقاومت ۴۰۰ کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع، قطر چال ۵۶ میلی‌متر، طول چال ۵/۸ متر (با احتساب ۲۰ سانتی‌متر ته چال) و فاصله‌داری ۲/۵ در ۳/۶ متر (به ترتیب در ارتفاع و طول پله) پیشنهاد می‌شود. لازم به ذکر است فاصله‌داری بولت‌ها بر روی سطح پله‌ها (در راستای ارتفاعی) ۲/۵ متر است که این فاصله‌داری در شکل ۵-۱۱ نیز نشان داده شده است. هم‌چنین برای جلوگیری از هوازگی سطوح ترانسه ۱۰ سانتی‌متر شاتکریت با مشخصات مش نمره ۶ پیشنهاد می‌شود.

۲- باید به‌طور پیوسته با بررسی‌های بیشتر در ترانسه، شناسایی زون‌های ضعیف، آزمایش‌های بیشتر بر روی تاثیر هوازگی و ... بر روی پارامترهای ژئومکانیکی از جمله مقاومت برشی توده سنگ و ... تحلیل‌های پایداری بروز شوند.

منابع

۱. افشاریان آرش و همکاران، ۱۳۸۶، طراحی و تحلیل پایداری ترانشه‌های شرقی معدن چادرملو، پایان نامه کارشناسی ارشد
۲. اجل لوئیان رسول و محمدی داود ، ۱۳۸۲، رده بندی توده سنگ روشی کاربردی در مهندسی عمران، انتشارات دانشگاه امیرکبیر
۳. داودیان فرهاد ، گلین مقدم عمار ، ۱۳۸۹، فرآیند تحلیل پایداری شیب (مزایا، معایب و محدودیت ها)، همایش ملی زلزله و مقاوم سازی ساختمان
۴. صابری منصور ، رضازاده عنبرانی مسعود ، ۱۳۹۲، سیستم نوین طبقه بندی سنگ برای پایداری شیب‌های سنگی، همایش ملی مهندسی عمران کاربردی و دستاوردهای نوین
۵. شمسی حجت ، کنگی عباس ، ۱۳۹۳، آنالیز پایداری لغزش گوه ای در ترانشه های سنگی جاده تنگه قیر در شرایط بار گذاری لرزه ای محور ایلام- کرمانشاه، اولین کنفرانس ملی مهندسی عمران و توسعه پایدار ایران در تهران
۶. شریعت جعفری محسن، ۱۳۷۵، زمین لغزش(مبانی و اصول پایداری شیب‌های طبیعی، انتشارات سازه
۷. گزارش دستورالعمل و طرح تحکیم ترانشه‌های بعد از تونل ۱۵ ، ۱۳۹۵ ، شرکت مهندسی مشاور ره آور
۸. معماریان حسین، ۱۳۷۷، زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، دانشکده فنی، انتشارات دانشگاه تهران
۹. منجزی مسعود و همکاران، ۱۳۸۵، طراحی پایدار دیواره معدن مس سونگون، پایان نامه کارشناسی ارشد

۱۰. قزوینیان عبدالهادی، ۱۳۸۲، تعادل حدی روش مناسب جهت تحلیل پایداری سطوح شیب‌دار،

دوره آموزشی تحلیل و پایدارسازی شیب‌ها

11. Ashby, J. (1971). " Sliding and toppling modes of failure in models and jointed rock slopes. MSc. Thesis. London University, Imperial College.
12. Bhasin, R., & Kaynia, A. M. (2004). Static and dynamic simulation of a 700-m high rock slope in western Norway. *Engineering Geology*, 71(3), 213-226.
13. S.C.Bandis, A.C.Lumsden, N.Baarton. (1983)." Fundamentals of Rock Joints Deformation",*Int.J.Rock Mech .Sci.Vol 20 1983,249-268.*
14. Cundall, P. A., & Strack, O. D. (1979). A discrete numerical model for granular assemblies
Geotechnique, 29(1), 47-65
15. Duncan C. Wyllie, Christopher W.Mah, "Rock slope engineering", civil and mining, 4th ed
16. Einstein, H. H., Veneziano, D., Baecher, G. B., & O'reilly, K. J. (1983, October). The effect of discontinuity persistence on rock slope stability. In *International journal of rock mechanics and mining sciences & geomechanics abstracts* (Vol. 20, No. 5, pp. 227-236). Pergamon
17. Fredlund, M., Thode, R., & Van Zyl, D. (2011). Slope stability model of the Questa rock pile: phase 1n
18. Gu, D., & Huang, D. (2016). A complex rock topple-rock slide failure of an anaclinal rock slope in the Wu Gorge, Yangtze River, China. *Engineering Geology*, 208, 165-180
19. harrison JP, Hudson JA. *Engineering rock mechanics. Part 2: illustrative workable examples*. In: Sarkka P, Eloranta P, editors. Oxford: Pergamon, 2000.

20. Jing L. A review of techniques, advances and outstanding issues in numerical modeling for rock mechanics and rock engineering. In: *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 40, (2003) 283–353
21. Kiersch, G. A. (1963). Vaiont Reservoir Disaster. *Civil Engng*, 34(3), 9-32.
22. Piteau, D. R. (1972). "Engineering geology considerations and approach in assessing the stability of rock slopes", *Bulletn* 653, *Associa of Eng Geol* 9.
23. Peckover, F. L. (1998). "Treatment of rock falls on railway lines. *American Railway Engineering* Washington, DC.
24. Muller, L. (1968). "New consideration of the Vaiont slid. *Felsmechanick und ingenieurgeologie*, 6 (1), 1-91.
25. Muralha, J.D. (1997). "Study of the behavior of discontinuities in rock masses. *Centro de Geotecnica*, report.
26. Singh, R., Umrao, R. K., & Singh, T. N. (2014). Stability evaluation of road-cut slopes in the Lesser Himalaya of Uttarakhand, India: conventional and numerical approaches. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(3), 845-857
27. Tomás, R., Cano, M., Cañaveras, J. C., Cuenca Payá, A., Delgado Marchal, J., Estévez Rubio, A., ... & Antonio, J. (2006). Nuevas funciones continuas para el cálculo del Slope Mass Rating (SMR): aplicación mediante un sistema de información geográfica a los taludes rocosos de una cantera
28. . Yang, Z. F., Zhang, L.Q., Shang, Y.J., Zeng, Q.L., L.H. (2006). "Assessment of the degree of reinforcement demand for rock slope projects-principles and a case example application", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*.

Abstract

In the past, the rock slope stability analysis was usually carried out using graphical method or manual calculations, but today there are various analytical methods for rock slope stability analysis. These methods need to be determined according to the region conditions and the type of potential failure. Also due to the low level stresses in shallow parts of the ground such as slopes, rock mass behavior in these parts is controlled by discontinuities. So to study these instabilities, investigating the discontinuities shear behavior is necessary. Analyzing, designing and predicting the performance of structures which is made inside or top of rock masses, needs proper understanding of the geomechanical properties of the rock mass, including strength, deformability, cohesion and inside friction angle. In this study, the rock slope stability of Tehran-Shomal freeway first part was investigated using 3D diffencial element method. To analyze rock slope stability, at first geometric characteristics of the joint sets were determined using experiment results in references. Next, further experiments were carried out on mechanical properties of rock mass and joints. Then, to determine the overall rock mass behavior, some analyses were performed using Slide software. In the next step, the geometrical and mechanical model of the rock slop were built in the 3DEC software and the the rock slop stability was studied in different situations. Results showed that the rock slop is stable in usual condition considering different stability analysis methods. But in weathering conditions which cause rock mass shear strength reduction, rock slop is unstable. For stabilization of rock slope, the rock mass strengthening and anchor installing are proposed.

Key words: Sustainability analysis, Shear inconsistency behavior, rock slope of Tehran-Shomal Freeway, Numeric modeling, 3DEC



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

**Design and stabilization of rock slop with discontinuity,
case study Tehran-Shomal freeway first part**

**The thesis presented for the degree of Master of Science in
Rock Mechanics Engineering**

By:

Ali Akbar Borji

Supervisor:

Dr. Sh. Zare

Advisor:

Dr. M. Javadi

January 2018