



پایان نامه کارشناسی ارشد
مهندسی استخراج معدن

عنوان:

تحلیل پایداری شیروانی مشرف به نیروگاه گتوند علیا از دیدگاه پدیده سقوط بلوک‌های سنگی

تهیه و تدوین:

جواد احمدی

اساتید راهنما:

دکتر سید رحمان ترابی

دکتر محمد عطایی

استاد مشاور:

دکتر سید محمد اسماعیل جلالی

از این پایان‌نامه، تا زمان دفاع، مقاله‌ای با عنوان بررسی نتایج مدل‌سازی پدیده سقوط‌سنگ با روش توده‌ای-کلوخه‌ای *RocFall* و روش المان مجزای PFC^{2D} ، مطالعه موردی: دیواره مشرف به نیروگاه گتوند علیا در سومین کنفرانس مکانیک سنگ دانشگاه امیر کبیر پذیرفته شده است.

تیرماه ۱۳۸۶

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیم به

پدر و مادر عزیزم

که با زحمات بی دریغ خود، راه آموختن را برای من هموار کردند

تشکر و قدردانی

سپاس و ستایش خدای را که همیشه مرا مورد لطف و عنایت خود قرار داده تا با یاری خود و بزرگان عرصه علم طی طریق کنم و هم اکنون این تحقیق را به پایان برسانم. از این رو ضمن تقدیر و تشکر از این عزیزان، توفیق روزافزون ایشان را از خداوند متعال خواستارم.

بدین وسیله از زحمات اساتید محترم آقایان دکتر سید رحمان ترابی و دکتر محمد عطایی و استاد مشاور دکتر سید محمد اسماعیل جلالی که با رهنمودهای ارزشمندشان مرا در انجام هر چه بهتر این پایان نامه یاری فرمودند تشکر و سپاسگزاری می‌نمایم.

همچنین از استادان داور آقایان دکتر نادری و دکتر سرشکی و معاونت محترم فنی شرکت مهندسی سپاسد جناب آقای مهندس محمد به دلیل حمایت‌هایشان از این پایان نامه و مهندس آقارضا کارشناس محترم شرکت مهندسی مهتاب قدس به دلیل کمک و راهنمایی در انجام این مهم، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

در پایان از کلیه دوستان و عزیزانی که مرا در انجام این پایان نامه یاری نمودند، به خصوص آقایان مهندس احمد آریافر و مهندس رضا روکی صیمانه سپاسگزارم و آرزوی موفقیت برای ایشان دارم.

چکیده

یکی از مباحث پایداری شیب‌های سنگی، تحلیل پایداری بلوک‌های سنگی منفصل و یا معلق واقع بر شیب‌ها و دامنه‌ها است که تحت عنوان کلی "سقوط سنگ" (*Rock Fall*) نامیده می‌شود. با توجه به اهمیت سازه‌های موردنظر برای احداث در مناطق کوهستانی، پایداری‌سازی این بلوک‌ها و یا مقابله با خطرات ناشی از آن‌ها می‌تواند از اهمیت به‌سزائی در طراحی و یا جانمائی این سازه‌ها برخوردار باشد. مجموعه سد و نیروگاه آبی گتوند علیا در ۲۵ کیلومتری شمال شهرستان شوشتر بر روی دو سازند آگاجاری و بختیاری واقع شده و تحلیل‌های انجام گرفته بر روی دیواره پرشیب مشرف به شمال نیروگاه با توجه به وجود ناپیوستگی‌های قائم و افقی در ترازهای بالای این دیواره مؤید پتانسیل بالای ایجاد سقوط سنگ می‌باشد. بدین منظور رفتار مکانیکی این توده‌سنگ‌ها پس از جدایش و حین سقوط در طول مسیر به سمت پایین با استفاده از نرم‌افزار *PFC* با روش عددی المان مجزا صورت گرفته است. در این روش بلوک‌های سنگی منفصل به وسیله مجموعه‌ای از عناصر کروی و هم‌شکل و مجزا برای حرکت روی دیواره در نظر گرفته می‌شود. رفتار مکانیکی توده سنگ در این مدل، از طریق حرکت هر ذره و میان‌کنش در نقاط تماس آنان با استفاده از معادلات حرکت توصیف می‌شود. نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهد لزوم برنامه‌ریزی برای کاهش خسارات ناشی از سقوط سنگ در این محدوده و یا جلوگیری از سقوط به وسیله تثبیت و تحکیم این توده‌سنگ‌ها امری اجتناب ناپذیر خواهد بود.

واژگان کلیدی: نیروگاه برق آبی گتوند، روش تحلیل پایداری، شبیه‌سازی سقوط سنگ، روش

عددی المان مجزا، نرم‌افزار *PFC*

۱.....	تقدیم
ب.....	تشکر و قدردانی
ج.....	چکیده
د.....	فهرست مطالب
ح.....	فهرست جداول
ط.....	فهرست اشکال

فصل اول: کلیات طرح

۲.....	۱-۱ مقدمه
۴.....	۲-۱ مروری بر مطالعات انجام شده
۶.....	۳-۱ ضرورت انجام تحقیق و اهداف پایان نامه
۷.....	۴-۱ سازماندهی پایان نامه
۸.....	۵-۱ جدول زمان بندی مراحل انجام تحقیق

فصل دوم: موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه

۱۱.....	۱-۲ موقعیت جغرافیایی طرح سد و گتوند علیا
۱۳.....	۲-۲ کلیات مجموعه پروژه سد و نیروگاه گتوند
۱۳.....	۳-۲ وضعیت زمین ریخت شناسی
۱۵.....	۴-۲ وضعیت زمین شناسی منطقه
۱۷.....	۵-۲ وضعیت زمین ساختاری منطقه
۱۸.....	۶-۲ وضعیت هیدرولوژی ساخت گاه سد و نیروگاه گتوند

فصل سوم: برداشت و بررسی پارامترهای مؤثر بر ناپایداری شیب منطقه

۳-۱	مقدمه	۲۰
۳-۲	جمع‌آوری و تهیه اطلاعات	۲۲
۳-۳	محدودیت‌های شرایط مطالعاتی ناپیوستگی‌ها	۲۲
۳-۴	کلیات شرایط ژئوتکنیکی و توپوگرافی محدوده مورد بررسی	۲۳
۳-۵	برداشت ناپیوستگی‌ها در محدوده مورد مطالعه	۲۶
۳-۶	مشخصات مکانیکی و فیزیکی سیستم درزه‌داری منطقه	۲۵
۳-۶-۱	راستای نسبی	۲۸
۳-۶-۲	فاصله‌داری	۲۸
۳-۶-۳	زبری و موج‌داری سطح	۲۹
۳-۶-۴	نوع و میزان مواد پرکننده	۲۹
۳-۶-۵	دهانه بازشدگی	۳۰
۳-۶-۶	وجود آب در ناپیوستگی‌ها	۳۰
۳-۶-۷	هوازدگی	۳۲
۳-۷	تعیین اندازه بلوک‌های ناپایدار موجود و طبقه‌بندی آن‌ها	۳۲

فصل چهارم: بررسی روش تحلیل پایداری و سقوط سنگ منطقه

۴-۱	مقدمه	۳۵
۴-۲	انتخاب مدل دینامیکی المان مجزا در تحلیل پایداری بلوک‌ها	۳۶
۴-۳	مشخصات زلزله طرح	۳۷
۴-۴	پارامترهای رفتاری مورد نیاز برای تحلیل مدل	۳۹
۴-۵	هندسه مدل و شرایط مرزی	۴۰
۴-۶	پاسخ لرزه‌ای مدل	۴۱
۴-۷	مکانیسم حرکت سنگ و مدهای ریزش	۴۳

۴-۸	مدل شبیه‌سازی تحلیلی و آماری پدیده سقوط سنگ منطقه	۴۵
۴-۸-۱	مقدمه‌ای بر نرم‌افزار <i>Rocfall</i>	۴۵
۴-۸-۲	مبنای فرضیات در تئوری <i>Rocfall</i>	۴۶
۴-۸-۳	مبنای حرکت توده‌سنگ و مدهای ریزش در <i>Rocfall</i>	۴۷
۴-۹	تأثیر سرعت زاویه‌ای در شبیه‌سازی رفتار بلوک	۵۰
۴-۱۰	مقاطع عرضی محدوده مورد مطالعه	۵۱
۴-۱۱	شبیه‌سازی مسیر بلوک‌سنگی محدوده مورد مطالعه توسط <i>Rocfall</i> ^{4.03}	۵۳
۴-۱۱-۱	مقطع شماره ۴	۵۳
۴-۱۱-۲	مقطع شماره ۶	۵۵
۴-۱۱-۳	مقطع شماره ۷	۵۷
۴-۱۱-۴	مقطع شماره ۹	۵۹
۴-۱۲	نتیجه شبیه‌سازی تحلیلی رفتار سقوط سنگ منطقه	۶۱
۴-۱۳	محدودیت شبیه‌سازی در <i>Rocfall</i>	۶۱

فصل پنجم: بررسی روش عددی سقوط سنگ منطقه

۵-۱	مقدمه	۶۳
۵-۲	معرفی نرم‌افزار شبیه‌سازی عددی <i>PFC</i>	۶۵
۵-۳	مفهوم دینامیک ذرات در شبیه‌سازی سقوط سنگ	۶۶
۵-۴	توپوگرافی و مقاطع عرضی سه‌بعدی محدوده مورد مطالعه	۶۹
۵-۴-۱	شبیه‌سازی محدوده نیروگاه توسط <i>Surfer</i>	۶۹
۵-۴-۲	مدل کردن مقاطع عرضی سه‌بعدی در <i>PFC</i> ^{3D}	۷۳
۵-۵	پارامترهای ورودی مورد نیاز برای شبیه‌سازی <i>PFC</i>	۷۴
۵-۶	نتایج شبیه‌سازی عددی مسیر بلوک سنگی توسط <i>PFC</i> ^{3D}	۷۶

فصل ششم: ارائه روش اجرایی برای مقابله با پدیده سقوطسنگ منطقه

- ۶-۱ مقدمه ۸۲
- ۶-۲ مقایسه نتایج شبیه‌سازی دو روش تحلیلی و عددی سقوطسنگ منطقه ۸۳
- ۶-۳ ارائه روش اجرایی برای مقابله با پدیده سقوطسنگ منطقه ۸۳

فصل هفتم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات

- ۷-۱ نتیجه‌گیری ۹۰
- ۷-۲ پیشنهادات ۹۴
- منابع و مأخذ ۹۶
- پیوست الف ۱۰۰
- پیوست ب ۱۰۵
- پیوست ج ۱۰۸
- پیوست د ۱۱۴

فهرست جداول

صفحه

جدول ۱-۱ خصوصیات چندین برنامه کامپیوتری برای شبیه‌سازی و تحلیل پدیده سقوط سنگ	۴
جدول ۲-۱ جدول زمان‌بندی مراحل انجام پایان‌نامه	۹
جدول ۱-۳ مشخصات ناپیوستگی محدوده نیروگاه در کنگلومرای بختیاری	۲۸
جدول ۱-۴ پارامترهای استفاده شده در مدل‌سازی	۳۹
جدول ۱-۵ شاخص‌های مکانیکی سنگ بکر در ساخت‌گاه سد و نیروگاه گتوند	۷۴
جدول الف- ۱ داده‌های مربوط به ناپیوستگی‌های برداشت شده مربوط به لایه کنگلومرائی بالای تراز ۳۸۰ متر	۱۰۰
جدول الف- ۲ داده‌های مربوط به ناپیوستگی‌های برداشت شده مربوط به لایه کنگلومرائی بالای تراز ۲۸۰ متر	۱۰۲
جدول الف- ۳ داده‌های مربوط به ناپیوستگی‌های برداشت شده مربوط به لایه کنگلومرائی پایین تراز ۲۸۰ متر	۱۰۳
جدول ب- ۱ ضرایب ارتجاعی نرمال و مماسی مورد استفاده در نرم‌افزار <i>Rockfall</i> ^{4.03}	۱۰۵
جدول الف- ۳ داده‌های مربوط به ناپیوستگی‌های برداشت شده مربوط به لایه کنگلومرائی پایین تراز ۲۸۰ متر	۱۰۳

فهرست اشکال

صفحه

شکل ۱-۲ تصویر ماهواره‌ای موقعیت طرح سد و نیروگاه گتوند علیا.....	۱۱
شکل ۲-۲ نمایی کلی از پروژه سد و نیروگاه گتوند علیا و منطقه مورد مطالعه.....	۱۲
شکل ۱-۳ نمای شماتیکی از برداشت ناپیوستگی‌ها به روش خط برداشت.....	۲۱
شکل ۲-۳ نمایی از محدوده مورد مطالعه.....	۲۴
شکل ۳-۳ برداشت ناپیوستگی‌ها در سه خط پیمایش.....	۲۵
شکل ۴-۳ ناپیوستگی‌های برداشت شده در امتداد خط پیمایش ۱ مربوط به لایه کنگلومرانی بالای تراز ۳۸۰ متر.....	۲۶
شکل ۵-۳ ناپیوستگی‌های برداشت شده در امتداد خط پیمایش ۲ مربوط به لایه کنگلومرانی بالای تراز ۲۸۰ متر با جهت شیب ۳۱۵ درجه برای شیروانی.....	۲۶
شکل ۶-۳ ناپیوستگی‌های برداشت شده در امتداد خط پیمایش ۲ مربوط به لایه کنگلومرانی بالای تراز ۲۸۰ متر با جهت شیب ۲۱۶ درجه برای شیروانی.....	۲۷
شکل ۷-۳ ناپیوستگی‌های برداشت شده در امتداد خط پیمایش ۳ مربوط به لایه کنگلومرانی تراز ۲۵۰ متر.....	۲۷
شکل ۸-۳ نمودار فاصله‌داری درزه‌های منطقه.....	۲۹
شکل ۹-۳ فاصله دهانه بازشدگی ناپیوستگی‌های منطقه.....	۳۰
شکل ۱۰-۳ تأثیر وجود آب به عنوان عامل ناپایداری و حرکت توده سنگ.....	۳۲
شکل ۱۱-۳ تقسیم‌بندی بلوک‌های موجود منطقه به صورت شماتیک.....	۳۳
شکل ۱-۴ نمودار سرعت- زمان به کار گرفته شده در مدل‌سازی.....	۳۸
شکل ۲-۴ هندسه مدل و شمای یک بلوک بحرانی.....	۴۰
شکل ۳-۴ نمایش حرکت بلوک پس از اعمال نیروی زلزله.....	۴۱
شکل ۴-۴ جابجایی افقی بلوک پس از اعمال نیروی زلزله.....	۴۲
شکل ۵-۴ جابجایی قائم بلوک پس از اعمال نیروی زلزله.....	۴۲
شکل ۶-۴ حالات مختلف مد ریزش برای یک بلوک سنگی.....	۴۴
شکل ۷-۴ تأثیر سرعت زاویه ای در مسیر حرکت سنگ در <i>Rocfall</i>	۵۰

- شکل ۴-۸ مقاطع عرضی بر روی نقشه توپوگرافی محدوده مورد مطالعه..... ۵۲
- شکل ۴-۹ شبیه‌سازی مسیر بلوک‌سنگ منفصل در مقطع شماره ۴ توسط $Rocfall^{4.03}$ ۵۴
- شکل ۴-۱۰ نتایج ۱۰۰۰ بار شبیه‌سازی موقعیت بلوک سنگی در طول مسیر در مقطع شماره ۴..... ۵۴
- شکل ۴-۱۱ شبیه‌سازی مسیر بلوک‌سنگ منفصل در مقطع شماره ۶ توسط $Rocfall^{4.03}$ ۵۶
- شکل ۴-۱۲ نتایج ۱۰۰۰ بار شبیه‌سازی موقعیت بلوک سنگی در طول مسیر در مقطع شماره ۶..... ۵۶
- شکل ۴-۱۳ شبیه‌سازی مسیر بلوک‌سنگ منفصل در مقطع شماره ۷ توسط $Rocfall^{4.03}$ ۵۸
- شکل ۴-۱۴ نتایج ۱۰۰۰ بار شبیه‌سازی موقعیت بلوک سنگی در طول مسیر در مقطع شماره ۷..... ۵۸
- شکل ۴-۱۵ شبیه‌سازی مسیر بلوک‌سنگ منفصل در مقطع شماره ۹ توسط $Rocfall^{4.03}$ ۶۰
- شکل ۴-۱۶ نتایج ۱۰۰۰ بار شبیه‌سازی موقعیت بلوک سنگی در طول مسیر در مقطع شماره ۹..... ۶۰
- شکل ۵-۱ نمایی از پیوند بین المان‌ها و قوانین برخورد بین آن‌ها در محیط PFC ۶۶
- شکل ۵-۲ برخورد بین دو المان و یک المان و دیوار..... ۶۷
- شکل ۵-۳ سیکل حرکتی المان‌ها بر اساس برخورد و جابجایی بین آن‌ها..... ۶۸
- شکل ۵-۴ شبیه‌سازی محدوده نیروگاه با استفاده از نرم‌افزار $Surfer$ ۷۱
- شکل ۵-۵ شبیه‌سازی مقاطع عرضی سه‌بعدی محدوده مورد مطالعه با استفاده از نرم‌افزار $Surfer$ ۷۲
- شکل ۵-۶ مدل نهایی مقاطع عرضی سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار PFC^{3D} ۷۳
- شکل ۵-۷ مدل‌سازی مقاطع و بلوک بحرانی مقطع شماره ۶ قبل از اجرای فرایند شبیه‌سازی..... ۷۶
- شکل ۵-۸ برخورد بلوک بحرانی با سطح شیب‌دار در حین فرایند شبیه‌سازی..... ۷۷
- شکل ۵-۹ حرکت خرده بلوک‌های جدا شده در طول مسیر در مراحل انتهایی شبیه‌سازی..... ۷۷
- شکل ۵-۱۰ نمودار نیروهای نامتعادل در طی زمان برای بلوک در فرایند شبیه‌سازی..... ۷۹
- شکل ۵-۱۱ نمودار نیروهای برخورد بلوک به سطح در طی زمان در فرایند شبیه‌سازی..... ۷۹
- شکل ۵-۱۲ سرعت یکی از المان‌های برخوردکننده به تأسیسات نیروگاه در راستای محور X در فرایند شبیه‌سازی..... ۸۰
- شکل ۶-۱ نمودار موقعیت انتهایی سنگ پس از ایجاد خاکریز با شیب معکوس برای مقطع ۴..... ۸۴
- شکل ۶-۲ اجرای فرایند شبیه‌سازی با ایجاد خاکریز با شیب معکوس در مقطع ۴..... ۸۴

- شکل ۶-۳ نمودار موقعیت انتهایی سنگ پس از ایجاد خاکریز با شیب معکوس برای مقطع ۶..... ۸۵
- شکل ۶-۴ اجرای فرایند شبیه‌سازی با ایجاد خاکریز با شیب معکوس در مقطع ۶..... ۸۵
- شکل ۶-۵ نمودار موقعیت انتهایی سنگ پس از ایجاد خاکریز با شیب معکوس برای مقطع ۹..... ۸۶
- شکل ۶-۶ اجرای فرایند شبیه‌سازی با ایجاد خاکریز با شیب معکوس در مقطع ۹..... ۸۶
- شکل ۶-۷ اجرای فرایند شبیه‌سازی عددی با ایجاد خاکریز با شیب معکوس در مقطع ۶ با نرم‌افزار *PFC*..... ۸۷
- شکل ۶-۸ توقف بلوک‌ها در خاکریز با شیب معکوس و جلوگیری از پرش آن‌ها..... ۸۸
- شکل ۶-۹ نمودار نیروهای نامتعادل بلوک در فرایند شبیه‌سازی پس از ایجاد سیستم خاکریز..... ۸۸
- شکل د-۱ مدل‌سازی مقاطع و بلوک بحرانی مقطع شماره ۴ قبل از اجرای فرایند شبیه‌سازی..... ۱۱۴
- شکل د-۲ حرکت بلوک بحرانی بر روی سطح شیب‌دار در حین فرایند شبیه‌سازی..... ۱۱۴
- شکل د-۳ برخورد بلوک بحرانی با سطح شیب‌دار در حین فرایند شبیه‌سازی..... ۱۱۵
- شکل د-۴ حرکت خرده بلوک‌های جدا شده در طول مسیر در مراحل انتهایی شبیه‌سازی..... ۱۱۵
- شکل د-۵ نمودار نیروهای نامتعادل در طی زمان برای بلوک در فرایند شبیه‌سازی..... ۱۱۶
- شکل د-۶ نمودار نیروهای برخورد بلوک به سطح در طی زمان در فرایند شبیه‌سازی..... ۱۱۶
- شکل د-۷ مدل‌سازی مقاطع و بلوک بحرانی مقطع شماره ۹ قبل از اجرای فرایند شبیه‌سازی..... ۱۱۷
- شکل د-۸ حرکت بلوک بحرانی بر روی سطح شیب‌دار در تراز بالای ۳۸۰..... ۱۱۷
- شکل د-۹ برخورد بلوک بحرانی بر روی سطح شیب‌دار در حین فرایند شبیه‌سازی..... ۱۱۸
- شکل د-۱۰ حرکت خرده بلوک‌های جدا شده در طول مسیر در مراحل انتهایی شبیه‌سازی..... ۱۱۸
- شکل د-۱۱ نمودار نیروهای نامتعادل در طی زمان برای بلوک در فرایند شبیه‌سازی..... ۱۱۹
- شکل د-۱۲ نمودار نیروهای برخورد بلوک به سطح در طی زمان در فرایند شبیه‌سازی..... ۱۱۹

فصل اول

کلیات طرح

۱-۱ مقدمه

تحلیل پایداری بلوک‌های سنگی منفصل و یا معلق واقع بر شیب‌ها و دامنه‌ها که تحت عنوان کلی "سقوط سنگ"^۱ نامیده می‌شود امروزه سبب شده است تا بسیاری از مهندسين و طراحان به پیش‌بینی رفتار این پدیده در شیب‌ها روی آورند.

پدیده سقوط سنگ، یکی از خطرهای بالقوه و معمول در شیب‌های سنگی واقع در ساخت‌گاه‌های کوهستانی می‌باشد که بر اثر آن بسیاری از جاده‌ها، بزرگراه‌ها و زیرساخت‌های مشرف به شیب‌های سنگی در معرض خرابی‌های شدید قرار می‌گیرند [۱]. علت عمده ایجاد سقوط سنگ‌ها معمولاً جدایش بلوک‌های سنگی از توده سنگ مادر، تحت تأثیر عواملی نظیر افزایش فشار منفذی آب در محل درزه و ترک‌های ناشی از جریان آب باران در داخل سنگ‌ها، فرسایش مصالح، تغییر شرایط تعادل نیروها در اثر وقوع زمین‌لرزه و عوامل دینامیکی، فرایندهای سریع یخ‌زدن و آب شدن، هوازگی یا تجزیه شیمیائی سنگ و ... می‌باشد [۲]. شناخت عوامل ایجاد سقوط سنگ، مکانیسم حرکت سنگ، معادلات حرکت و پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی و مدل‌کردن رفتار سنگ از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در محدوده نیروگاه سد گتوند علیا نیز، ترکیبی از شرایط خاص توپوگرافی و زمین‌شناسی سبب ایجاد نواحی با پتانسیل سقوط سنگ شده است که با توجه به اهمیت این سازه لازم است پایداری این توده‌سنگ‌ها آنالیز و راه‌کارهای مقابله با خطرات ناشی از آنها تعیین شود.

^۱ -Rock Fall

تحلیل پایداری و شبیه‌سازی رفتار بلوک‌های مشرف به گود نیروگاه در حین حرکت به سمت پایین، مبتنی بر استفاده از روش المان مجزا^۱ می‌باشد. روش المان مجزا یکی از روش‌های عددی محیط‌های ناپیوسته است که در سال ۱۹۷۱ توسط کاندال^۲ ابداع شد. لذا به نظر می‌رسد که این روش انتخاب مناسبی برای مدل‌سازی دینامیکی منطقه درزه‌دار موردنظر باشد [۳]. تحلیل پایداری اولیه با توجه به وجود درزه و گسل‌ها در ترازهای بالای شیب توسط نرم‌افزار *UDEC* که یک نرم‌افزار دوبعدی است و قابلیت بالائی در تحلیل استاتیکی و دینامیکی محیط‌های ناپیوسته دارد، صورت گرفته است و انتخاب مناسبی برای مدل‌سازی دینامیکی منطقه درزه‌دار مورد نظر می‌تواند باشد. نتایج این تحلیل مؤید پتانسیل ریزش بلوک‌های سنگی مشرف به نیروگاه است. در مرحله بعد تعیین هندسه شیب، اندازه و شکل بلوک‌های سنگی، پارامترهای مکانیکی سطح شیب نظیر ضریب اصطکاک و ضریب جذب انرژی و همچنین احتمال خرد شدن بلوک سنگی به تکه‌های کوچک‌تر در هنگام حرکت، برای شبیه‌سازی رفتار مکانیکی این توده‌سنگ‌ها پس از جدایش و حین سقوط در طول مسیر به سمت پایین با استفاده از نرم‌افزار *PFC*^۳ و با روش عددی المان مجزا صورت گرفته است.

نتایج حاصل از این مدل نشان می‌دهد که لزوم برنامه‌ریزی برای کاهش خسارات ناشی از پدیده سقوط‌سنگ در این محدوده و یا جلوگیری از سقوط به وسیله روش خاکریز با شیب معکوس برای توده‌سنگ‌ها امری اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. همچنین ارائه راه‌کار اجرایی برای جلوگیری از خسارات جدی ریزش این بلوک‌ها بر روی سازه نیروگاه مورد بحث قرار گرفته است.

^۱ - Distinct Element Method

^۲ -Cundall

^۳ -Particle Flow Code

۱-۲ مروری بر مطالعات انجام شده

از اوایل دهه ۱۹۸۰ مدل‌های دوبعدی زیادی برای شبیه‌سازی آماری و عددی پدیده سقوطسنگ ایجاد شده‌اند که در اکثر این مدل‌ها، رفتار توده‌سنگ بر اساس معادلات حرکت شبیه‌سازی شده‌اند و نتایج با داده‌های تجربی مورد مقایسه قرار گرفته‌اند. امروزه مدل‌های سه‌بعدی برای شبیه‌سازی سقوطسنگ طراحی شده‌اند که نیاز به داده‌های منطقه‌ای، زمین‌شناسی و توپوگرافی بیشتری برای اجرای مدل توزیع‌شده فضایی دارند [۴]. به طور کلی، روش‌های شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی سقوطسنگ را می‌توان به روش‌های تحلیلی و عددی تقسیم‌بندی نمود.

شبیه‌سازی روش‌های تحلیلی اکثراً بر مبنای روش توده‌ای-کلوخه‌ای و یا روش جسم صلب پایه‌ریزی شده‌اند. در بعضی از روش‌های تحلیلی نیز از روش ترکیبی مثل روش توده‌ای-کلوخه‌ای برای شبیه‌سازی سقوط آزاد و روش جسم صلب برای شبیه‌سازی چرخش، جهش و بازگشت سنگ استفاده شده است. در همین زمینه چندین برنامه کامپیوتری برای شبیه‌سازی سقوطسنگ به روش‌های تحلیلی و آماری ایجاد و برای مناطق مختلف مورد آزمایش و بررسی قرار گرفته‌اند که در جدول ۱-۱ خصوصیات این برنامه‌های کامپیوتری درج شده است [۱].

جدول ۱-۱ خصوصیات چندین برنامه کامپیوتری برای شبیه‌سازی و تحلیل پدیده سقوطسنگ [۱]

Year	Author(s)	Program name	Dimensions	Approach	Probabilistic
1976	Piteau and Clayton	Computer Rockfall Model	2-D	Lumped mass	Partly
1982-86	Bozzolo and Pamini	SASS-MASSI	2-D	Hybrid	Yes
1985	Bassato et al.	Rotolamento Salto Massi	2-D	Lumped mass	No
1987	Descouedres and Zimmermann	Eboul	3-D	Rigid body	No
1989-91	Pfeiffer and Bowen Pfeiffer et al.	CRSP	2-D	Hybrid	Yes
1990	Kobayashi et al.	—	2-D	Rigid body	No
1991-95	Azzoni et al.	CADMA	2-D	Hybrid	Yes
1991	Scioldo	Rotomap	3-D	Lumped mass	No
1998	Stevens	RocFall	2-D	Hybrid	Yes
1999	Paronuzzi and Artini	Mobyrock	2-D	Lumped mass	Yes
2000	Jones et al.	CRSP4.0	2-D	Hybrid	Yes
2002		STONE	3-D	Lumped mass	Yes

مبنای روش‌های عددی برای شبیه‌سازی سقوطسنگ، روش المان مجزا است. در این روش، یک توده‌سنگ به صورت مجموع المان‌های مجزا فرض می‌شود. حرکت هر یک از این المان‌ها در طول شیب به صورت جداگانه بررسی می‌شود [۵]. نرم‌افزار *PFC* از مجموعه نرم‌افزارهای *ITASCA* برای شبیه‌سازی عددی پدیده سقوطسنگ در سال ۱۹۹۸ ایجاد شده است که نسبت به دیگر برنامه‌های شبیه‌سازی سقوطسنگ نتایج قابل قبول‌تری ارائه می‌دهد. کشورهای کانادا، ایالات متحده، ایتالیا، چین و ژاپن به دلیل موقعیت خاص کوهستانی و ایجاد بزرگراه‌ها و سازه‌های مهم و حیاتی در این موقعیت‌ها و بروز خطرات ناشی از پدیده سقوطسنگ، بیشتر به بررسی و تحلیل در این زمینه پرداخته‌اند [۶]. در ایران نیز به دلیل شرایط خاص زمین‌شناسی و توپوگرافی، وقوع پدیده سقوطسنگ سبب خسارات جدی در راه‌ها و زیرساخت‌های کوهستانی شده است [۲].

سقوطسنگ‌ها به‌ویژه در مناطق سنگی پرشیب و با سطوح ضعیف فراوان و عمدتاً در امتداد پهنه‌های فعال گسلی به چشم می‌خورند. بر اساس تجارب به دست آمده، دامنه‌هایی با شیب بیش از ۳۵ درجه شیب‌های مستعد برای وقوع سقوطسنگ می‌باشند [۷].

به منظور ارزیابی پتانسیل رخداد سقوطسنگ در محدوده شیب‌های مشرف به سازه نیروگاه مطالعات اولیه ناپایداری توسط شرکت مهندسی مشاورین مه‌اب قدس به صورت گزارش اولیه ارائه شده است. برای تحلیل پتانسیل سقوط و شبیه‌سازی طول مسیر ریزش‌سنگ و همچنین بررسی راه‌کارهای اجرایی مقابله با خطرات احتمالی، این پروژه به صورت کامل و جامع انجام شده است.

۱-۳ ضرورت انجام تحقیق و اهداف پایان نامه

در حال حاضر درزه‌های موجود در قسمت بالای شیب و بروز بعضی ناپایداری‌ها در ساخت‌گاه نیروگاه و نقاط هم‌جوار نگرانی‌هایی را برای مسئولان اجرایی طرح به وجود آورده است. هدف از انجام این پایان‌نامه در مرحله اول، بررسی درزه‌های ایجاد شده در آن و بلوک‌های احتمالی ناشی از این درزه‌ها و شبیه‌سازی رفتار مکانیکی بلوک‌های منفصل با استفاده از روش‌های تحلیلی و عددی است. سپس در مرحله بعدی چگونگی پایداری‌سازی و ارائه روش کم‌هزینه و اجرایی پایداری، مورد بررسی قرار گرفته شده است. مهم‌ترین کاربرد این پایان‌نامه ارائه روش پایداری به مسئولان طرح برای اجرایی کردن آن به خاطر حفظ موقعیت نیروگاه می‌باشد.

از آنجایی که روش‌های تحلیلی در طراحی شیب‌های با ارتفاع زیاد توأم با ساده‌سازی شرایط مرزی و مکانیک حاکم بر مسأله می‌باشد، به نظر می‌رسد استفاده از این روش‌ها در شیب‌های پیچیده و با ارتفاع زیاد از دقت کافی برخوردار نمی‌باشد. لذا استفاده از روش‌های عددی به‌عنوان روش‌های پیشرفته پایداری و شبیه‌سازی این پدیده به جامعه مهندسين معرفی شده است.

همچنین این پایان‌نامه به توسعه کاربرد نرم افزار *PFC* در این زمینه و به طور کلی معرفی بیشتر پدیده *Rock Falling* کمک خواهد کرد. مطالعه این تحقیق، کمک مؤثری به موارد مشابه‌ای که در آن‌ها احتمال پدیده سقوط سنگ وجود دارد، خواهد بود.

۴-۱ سازماندهی پایان نامه

پایان نامه حاضر مشتمل بر هفت فصل می باشد. فصل اول تحت عنوان کلیات طرح که شامل مقدمه، مروری بر مطالعات انجام شده، ضرورت انجام تحقیق و اهداف پایان نامه، سازماندهی و جدول زمان بندی مراحل انجام تحقیق آورده شده است.

در فصل دوم، موقعیت جغرافیایی طرح، کلیات مجموعه پروژه و مختصری از وضعیت زمین ریخت شناسی، زمین شناسی، زمین ساختاری و هیدرولوژی ساخت گاه سد و نیروگاه مورد بررسی قرار گرفته است. در فصل سوم، به جمع آوری و تهیه اطلاعات مربوط به ناپیوستگی های منطقه و تحلیل کاملی از وضعیت این ناپیوستگی ها پرداخته شده است.

در فصل چهارم، ابتدا با توجه به مشخصات زلزله طرح به تحلیل دینامیکی پایداری بلوک های بحرانی در سطح شیب دار پرداخته شده و نتایج این تحلیل دینامیکی آورده شده است. سپس با توجه به مکانیسم ریزش و اندازه بلوک های منطقه، شبیه سازی تحلیلی و آماری سقوط سنگ محدوده مورد مطالعه با نرم افزار *RocFall* انجام شده است و نتایج و محدودیت های این شبیه سازی بیان شده است. در فصل پنجم این پایان نامه شبیه سازی سقوط سنگ با توجه به تحلیل عددی و دینامیکی، توسط نرم افزار *PFC* انجام گرفته شده و نتایج این شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفته شده است.

فصل ششم نیز با توجه به نتایج و مقایسه دو شبیه سازی تحلیلی و عددی روش های اجرایی پایداری و جلوگیری از خسارات به تأسیسات نیروگاه بیان شده است.

در فصل هفتم نتیجه گیری و پیشنهادات این تحقیق آورده شده است.

۱-۵ جدول زمان بندی مراحل انجام تحقیق

- مراحل انجام تحقیق در پایان نامه حاضر مشتمل بر کارهایی است که در طی ۲۰ ماه به سرانجام رسیده است. مهم ترین این موارد را به صورت زیر می توان اشاره کرد:
- ۱- بررسی سابقه علمی موضوع و مطالعات انجام شده در این زمینه در داخل و خارج کشور
 - ۲- گردآوری مطالب و منابع علمی درباره پدیده سقوطسنگ و روش های تحلیل آن
 - ۳- بازدید از منطقه و برداشت مشخصات ناپیوستگی های منطقه و اطلاعات مکانیک سنگی لازم
 - ۴- آنالیز و تحلیل ناپیوستگی منطقه با استفاده از نرم افزار *Dips*
 - ۵- تحقیق و مطالعه بر روی روشهای تحلیلی پایداری شیب سنگی و تهیه نرم افزار *RocFall*
 - ۶- تهیه مقاطع دوبعدی و سه بعدی محدوده مورد مطالعه با استفاده از نرم افزارهای *Surfer* و *AutoCad* برای ورودی دو نرم افزار شبیه سازی پدیده سقوطسنگ
 - ۷- بررسی نوع ریزش ممکن در منطقه و استفاده از روش عددی برای پایداری یا عدم پایداری در این زمینه با استفاده از اطلاعات به دست آمده
 - ۸- انجام مطالعه بر روی روش عددی مناسب برای تحلیل دقیق تر و انتخاب نرم افزار *PFC*
 - ۹- آشنایی با زبان برنامه نویسی نرم افزار *PFC* و تدوین برنامه شبیه سازی پدیده سقوطسنگ منطقه
 - ۱۰- مقایسه دو روش تحلیلی و عددی و نتیجه گیری راجع به مناطق بحرانی برای سقوطسنگ
 - ۱۱- ارائه طرح اجرایی پایدارسازی و پیشنهاداتی در این زمینه
 - ۱۲- تدوین پایان نامه و دفاعیه
- جدول زمان بندی و تدوین پایان نامه حاضر را می توان در یک نگاه به صورت جدول ۱-۲ بیان کرد:

ID	پایان نامه در یک نگاه	Duration
1	بررسی سابقه علمی موضوع و مطالعات انجام شده در این زمینه در داخل و خارج کشور	3.5 mons
2	مردآوری مطالب و منابع علمی درباره پدیده سقوط سنگ و روشهای تحلیل آن	4.5 mons
3	بازدید از منطقه و برداشت مشخصات ناپیوستگیهای منطقه / اطلاعات مکانیک سنگی لازم	15 days
4	انتالیز و تحلیل ناپیوستگی منطقه با استفاده از نرم افزار Dips	3 mons
5	تحقیق و مطالعه بر روی روشهای تحلیلی پایداری شبیب سنگی و تهیه نرم افزار RocFall	4.5 mons
6	تهیه مقاطع دو بعدی و سه بعدی محدوده مورد مطالعه با استفاده از نرم افزارهای Surfer , AutoCad برای ورودی نرم افزار شبیه سازی پدیده سقوط سنگ	3 mons
7	بررسی نوع ریزش ممکن در منطقه و استفاده از روش عددی برای پایداری یا عدم پایداری در این زمینه با استفاده از اطلاعات به دست آمده	2 mons
8	انجام مطالعه بر روی روش عددی مناسب برای تحلیل دقیق تر و انتخاب نرم افزار PFC	3 mons
9	آشنایی با زبان برنامه نویسی نرم افزار PFC و تدوین برنامه شبیه سازی پدیده سقوط سنگ منطقه	5.5 mons
10	مقایسه دو روش تحلیلی و عددی و نتیجه گیری راجع به مناطق بحرانی برای سقوط سنگ	2.5 mons
11	ارائه طرح اجرایی پایدارسازی و پیشنهاداتی در این زمینه	3 mons
12	تدوین پایان نامه و دفاعیه	3.5 mons

۲-۲ کلیات مجموعه پروژه سد و نیروگاه گتوند

رودخانه کارون مهم‌ترین و پرآب‌ترین رودخانه کشور و همچنین پراهمیت‌ترین تأمین‌کننده انرژی برق آبی در ایران است. به همین دلیل بسیاری از سدهای مهم و بزرگ کشور در مسیر این رودخانه احداث شده‌اند، که یکی از این سدها نیز سد گتوند می‌باشد.

سد از نوع سنگ ریزه‌ای با هسته رسی با ارتفاع ۱۷۸ متر و طول تاج ۷۶۰ متر و تراز تاج سد ۲۴۴ متر از سطح دریا می‌باشد. عرض تاج سد ۱۵ متر و حداکثر عرض سد در پی ۱۰۷۵ متر می‌باشد. حجم بدنه سد ۲۶/۶ میلیون متر مکعب و حجم کل مخزن سد ۴۵۳۲ میلیون متر مکعب در حداکثر تراز بهره‌برداری می‌باشد. بیشترین و کمترین سطح تراز آب در مخزن سد ۲۳۴ و ۱۸۵ متر از سطح دریا می‌باشد. ظرفیت نصب نیروگاه ۱۰۰۰ مگاوات و از نوع سطحی است که به وسیله چهار عدد توربین ۲۵۰ مگاواتی از نوع فرانسویس با محور عمودی تأمین خواهد شد. البته در طرح توسعه، ظرفیت نیروگاه به ۲۰۰۰ مگاوات افزایش خواهد یافت [۱۰].

برای مرحله اول با نیروگاه ۴ واحدی ۲ رشته تونل و برای توسعه نیروگاه به ۸ واحد ۴ رشته تونل اصلی آب‌بر طراحی شده است که پس از انشعاب در مخازن فشارشکن (۴ مخزن فشارشکن برای حالت توسعه) در مجموع ۸ رشته تونل تحت فشار به قطر داخلی ۷ متر، واحدهای نیروگاه ۲۰۰۰ مگاواتی را تغذیه خواهند کرد [۱۰].

۳-۲ وضعیت زمین ریخت‌شناسی

دره محل احداث سد و نیروگاه آبی گتوند علیا از اشکال زمین‌ریختی مرکب می‌باشد که در شکل‌گیری آن فرایندهای دینامیکی درونی و بیرونی دخالت داشته‌اند. پیر شدن حوضه رسوبی به وسیله مواد آواری و برخاستن تدریجی تاقدیس‌های دو طرف در چین‌خوردگی ملایم این حوضه مؤثر بوده است. برش عرضی دره نمایان‌گر پرتگاه‌هایی است که بر فراز شیب ملایم رسوبات سست زیرین،

با ضخامت کمتر قرار گرفته‌اند. تناوب سنگ‌های سخت و رسوبات سست کنگلومرای بختیاری یکنواختی دامنه را متأثر ساخته و اثر فرسایش پلکانی روی دیواره ساحل چپ و بر فرازهایی از ساحل راست دیده می‌شود. شیب ملایم طبقات رخنمون‌های سنگی سخت پرتگاه‌هایی پر شیب با زاویه قرار تند را ایجاد کرده است. پرتگاه‌ها در محدوده طرح، گسترش زیادی دارند و شبکه آبراهه‌ها در پیشانی آن‌ها به صورت هلالی به سمت عقب توسعه یافته و سیمای دندان‌داری را نشان می‌دهند. عدم تقارن نیم‌رخ عرضی در کنگلومرای بختیاری انعکاسی از عملکرد فرایندهای درونی و بیرونی متفاوت در دامنه ساحل راست می‌باشد. عرض دره در محل محور پیشنهادی در تراز ۹۰ متر از سطح دریا برابر با ۱۲۰ متر و در تراز تاج سد حدود ۶۶۰ متر می‌باشد [۸].

جابجایی عناصر روی دامنه ساحل به صورت سقوط سنگ‌ها و ریزش‌های ناگهانی بوده است. سقوط سنگ‌ها حاصل جدایش قطعات یا تکه‌های بزرگ از دیواره سنگی است که در پای ارتفاعات به حالت تعادل می‌رسند. این عناصر به صورت مخروط‌های واریزه‌ای و با حرکت در دامنه‌ها و مجاری، به صورت آبشست در پای دامنه بر روی هم انباشته شده و اشکال ثابتی با زاویه قرار کم تشکیل می‌دهند. فرایند حمل مواد بر سطح دامنه به دلیل دگرشکلی و شیب کم دامنه از نظر سرعت و گسترش متغیر می‌باشد. سقوط سریع سنگ‌ها و ریزش در حجم زیاد، به‌صورت بهمن سنگ‌ها و حرکات توده‌ای بزرگ در این دامنه دیده می‌شود [۸].

گسترش یک دیواره پرشیب از تراز ۲۸۵ تا ۳۹۰ متر و تغییرات شیب دامنه در آن، بیان‌گر عملکرد فرایندهای درونی متفاوت و تظاهر آن به‌صورت فرایندهای بیرونی است. بر فراز این دیواره، لایه‌بندی بر خصوصیات ساختاری حوزه رسوبی منطبق نمی‌باشد زیرا بر روی سنگ‌های سست که از آب اشباع شده‌اند، جابجایی صورت گرفته و حرکت چرخشی را به توده لغزنده تحمیل کرده است که با خارج شدن بلوک‌ها از مرکز ثقل همراه بوده است.

آبراهه‌ها در این مجموعه، کم‌عمق و فصلی می‌باشند و در زمان‌های بارش به‌صورت زهکش طبیعی آب را به سرعت بسمت جریان دائمی کارون تخلیه می‌کنند. فعالیت آبهای جاری چه به شکل جریان دائمی رودخانه کارون و چه به‌صورت شبکه آبراهه‌ها به‌صورت طغیان‌های گل‌آلود سیلاب‌ها، خشک‌رودها و سفره‌های سطحی، امکان جابجایی قطعات ریز و بزرگ را میسر می‌سازد. حفره‌ها و غارهایی به‌صورت مجاری با مقطع ورودی مدور، کم‌عمق و غیر مرتبط در اثر انحلال و در نتیجه تأثیر الگوی تخلخل و ساختار سازند بختیاری، در جای جای محدوده طرح ایجاد شده است [۸].

۲-۴ وضعیت زمین‌شناسی منطقه

سنگ بستر محدوده طرح از سازندهای آغاجاری و بختیاری و روباره‌های محدوده از نهشته‌های واریزه‌ای و نهشته‌های رودخانه‌ای (آبرفت) می‌باشند. مواد آواری حاصل از بالاآمدگی تدریجی و رسوب‌گذاری آنها در محیط‌های نوع دریاچه‌ای و خلیج دهانه‌ای سازند آغاجاری را ایجاد کرده است. لیتولوژی کلی سازند آغاجاری تناوبی است از ماسه‌سنگ‌های آهک‌دار خاکستری تا قهوه‌ای‌رنگ با رگه‌های گچ و مارن‌های قرمز، لای سنگ و گل‌سنگ که با مرز تدریجی روی سازند میشان قرار گرفته و برخورد دگرشیب با سازند بختیاری دارد. اصولاً در بیشتر رخنمون‌هایی که در کنار کارون باقی مانده‌اند شیب این سازند بین ۵۵ تا ۶۷ درجه و جهت شیب بین ۱۵۰ تا ۱۷۵ درجه متغیر است [۱۰].

سازند بختیاری مجموعه‌ای است متشکل از کنگلومرای آهکی و چرت‌دار که به‌طور متناوب میان لایه‌ها، ماسه‌سنگ و گل‌سنگ داشته و به‌صورت دگر شیب روی رسوبات سری فارس قرار می‌گیرد. این سازند در محدوده طرح سد و نیروگاه گتوند شامل کنگلومرا و میان لایه‌های رس سنگ لای دار و ماسه‌سنگی می‌باشد. کنگلومراها به رنگ خاکستری و دارای لایه‌بندی خشن و ضخیم می‌باشند [۱۰].

روباره‌ها نیز در محدوده محور سد و نیروگاه مشتمل است بر نهشته‌های عهد حاضر که به دو گروه نهشته‌های واریزه‌ای و رودخانه‌ای (آبرفت) قابل تفکیک می‌باشند. نهشته‌های واریزه‌ای در اثر گسترش ذرات و قطعات سنگ بستر که در اثر هوازدگی شکل گرفته و بر اثر نیروی ثقل جدا شده‌اند، تشکیل یافته‌اند و نهشته‌های رودخانه‌ای بر اثر فرسایش مجدد دشت‌های آبرفتی حاصل از کنده شدن بخش‌هایی از سازند بختیاری تشکیل شده‌اند و رسوبات آنها آرایش اتفاقی از قطعات سنگی در حد قله‌سنگ و شن می‌باشد و از نظر اجزاء تفاوت محسوسی با کنگلومرای سازند بختیاری ندارند.

پی سد و نیروگاه نیز بر روی سازند آغاچاری قرار دارد که از رسوبات ریزدانه شامل ماسه‌سنگ، رس سنگ، لای سنگ و گل سنگ تشکیل شده است. لایه‌ها از خیلی نازک تا نسبتاً ضخیم دیده می‌شوند. ماسه‌سنگ‌ها که از دانه‌های آهکی و سیلیسی تشکیل شده‌اند، عموماً به رنگ خاکستری روشن تا تیره تغییر می‌کنند. ۷۰٪ دانه‌ها آهکی و ۳۰٪ سیلیسی است که با سیمان آهکی دربرگرفته شده‌اند و اندازه دانه‌ها از ریزدانه تا درشت‌دانه متغیر می‌باشد. بیشترین ضخامت لایه‌های ماسه‌سنگی ۵ متر می‌باشد. لای سنگ‌ها به طور متناوب با گل سنگ‌ها و ماسه سنگ‌ها قرار گرفته و از ضخیم‌لایه تا بسیار نازک‌لایه متغیر می‌باشد. گل سنگ‌ها به رنگ قرمز تیره تا قهوه‌ای تیره بوده و به صورتی نامنظم در مجاورت هوا و با کاهش رطوبت می‌شکنند [۱۰].

لایه‌های ماسه‌سنگ نیز با ضخامت خیلی نازک تا نسبتاً ضخیم (حدود ۵ متر) دیده می‌شود و شاخص کیفی آنها در حد خوب می‌باشد. ، ناپیوستگی‌های سازند آغاچاری دارای مشخصات شیب و جهت شیب ۷۵/۲۰۵، ۴۷-۳۵ / ۸۰-۷۷، ۷۵/۳۳۵ درجه می‌باشند که به ترتیب دارای فاصله‌داری ۳۰ تا ۵۰ سانتی‌متر، ۷۵ سانتی‌متر تا ۲ متر و حدود ۲ متر و بازشدگی در حدود ۱ تا ۳ میلی‌متر و بدون پرشدگی مشخص می‌باشند [۱۱].

۲-۵ وضعیت زمین‌ساختاری منطقه

در محدوده ساختگاه سد و نیروگاه گتوند، برخورد سازندهای بختیاری و آغاچاری در تراز ۱۲۰ متر از سطح دریا بوده و سازند بختیاری در اغلب جاها به صورت دگر شیبی روی سازند آغاچاری قرار گرفته و ارتفاعات منطقه را ایجاد کرده است [۱۱].

دو تاقدیس محلی در این محدوده وجود دارد. اولین تاقدیس در محل سد با اثر محوری شرقی-غربی قرار گرفته و از عوارض ساختاری مهم می‌باشد و گستردگی آن از بالادست تا پایین‌دست ساختگاه می‌باشد. دومین تاقدیس با اثر محوری شمال‌غرب به جنوب‌شرق گسترده شده است و به دلیل عملکرد فرآیندهای درازمدت و خاصیت شکل‌پذیری سازند آغاچاری ایجاد شده است. در محدوده ساختگاه سد در سازند بختیاری دو دسته شکستگی اصلی گسترش دارند. یک دسته با راستای شرقی-غربی که نقش اساسی در شکل‌گیری عوارض دره در هر دو ساحل دارد و دسته دیگر شمالی-جنوبی است. شکستگی‌های شرقی-غربی از نوع کششی هستند، ناپیوستگی‌ها پرشیب بوده و فاصله آن‌ها از زیاد تا خیلی زیاد تغییر کرده و تداوم آن‌ها بسیار زیاد است. سطوح ناپیوستگی‌ها ناهموار و دیواره آن‌ها هوازده می‌باشد. بازشدگی‌ها از باز تا خیلی باز متغیر بوده و با مواد غیرچسبنده حاصل از خردشدگی سازند بختیاری پر شده‌اند. زاویه سطوح شکستگی در برخورد با واحدهای ریزدانه متغیر بوده و به صورت شکستگی‌های برشی تظاهر می‌کنند.

شکستگی‌های شمالی-جنوبی از نوع برشی می‌باشد و مشخصات آن شبیه مشخصات شکستگی‌های شرقی - غربی می‌باشد. سطح شکستگی در هر دو شکستگی مواج بوده که با تغییر جهت شیب همراه می‌باشد این دو دسته درزه نقش اصلی در ایجاد پرتگاه‌ها و واریزه‌ها در هر دو ساحل دارند [۱۱].

۲-۶ وضعیت هیدرولوژی ساخت‌گاه سد و نیروگاه گتوند

بررسی آب‌های زیرزمینی و روان آب‌های سطحی به عنوان بخشی از چرخه هیدروژئولوژی که توسط فرایندهای زمین‌شناسی کنترل می‌شود حائز اهمیت است. کیفیت فیزیکی و شیمیایی آب‌های زیرزمینی متأثر از کیفیت نزولات جوی است که در حین عبور از درون سنگ‌ها تغییر می‌کند. آب در تماس با کانال‌های مختلف و در حین نفوذ و انتقال به سفره مراحل تکاملی خود را طی می‌نماید.

حداکثر تراز آب زیرزمینی در فصول بارانی در محدوده ساحل چپ سد ۱۷۰ متر از سطح دریا می‌رسد که در فصول خشک با کاهشی در حدود ۱۰ متر تا تراز ۱۶۰ متر از سطح دریا پایین می‌آید. ولی بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده در فصول بارانی در گمانه‌های اکتشافی $UG308$ و $UG310$ که در مجاورت محدوده مورد مطالعه حفاری شده‌اند، سطح آب زیرزمینی در این ناحیه در تراز تقریبی ۲۰۰ تا ۲۲۰ متر می‌باشد که حدوداً منطبق بر تراز سطح تماس سازندهای آغاجاری و بختیاری است. شیب سفره‌های آب زیرزمینی به سمت شمال می‌باشد و در مقاطع موازی مسیر رودخانه شیب ملایم و به سمت پایین دست در جریان است. در مورد ساحل راست نیز حداکثر تراز آب زیرزمینی در فصول بارانی به تراز ۱۶۰ متر از سطح دریا و در فصول خشک به تراز ۱۵۰ متر از سطح دریا می‌رسد. شیب حداکثر سفره‌های آب زیرزمینی به سمت جنوب می‌باشد که در مقاطع موازی مسیر رودخانه شیب ملایم است [۱۲].

فصل سوم

برداشت و بررسی پارامترهای
مؤثر بر ناپایداری شیب منطقه

۳-۱ مقدمه

یکی از مباحث مهم زمین‌شناسی مهندسی که در مورد توده‌های سنگی مطرح است بررسی پایداری بودن شیب‌های سنگی می‌باشد. تثبیت مطمئن شیب‌ها یا تغییر پروژه به علت ناپایداری احتمالی معمولاً فوق‌العاده پرهزینه یا تقریباً ناممکن می‌باشد. همچنین تعیین نوع ریزش، محل ریزش و اندازه بلوک‌های سنگی منفصل از سطح شیب‌دار سبب شده است تا تحلیل پایداری شیب‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد و به صورت دقیق‌تر مورد بررسی قرار گیرد.

وجود ناپیوستگی‌هایی همانند درزه‌ها در توده‌سنگ، بر تغییر شکل‌پذیری و مقاومت برشی توده‌سنگ تأثیر زیادی می‌گذارد. در سنگ‌های سخت که دارای درزه‌های با فاصله‌داری نسبتاً کم به عنوان مثال یک متر هستند، رفتار مکانیکی توده‌سنگ بیشتر تابع رفتار درزه‌هاست تا رفتار سنگ بکر [۱۳]. بنابراین برای طراحی سازه‌های زیرزمینی و تعیین پایداری شیب‌های سنگی، استفاده از پارامترهای مناسب مقاومت برشی ضروری است.

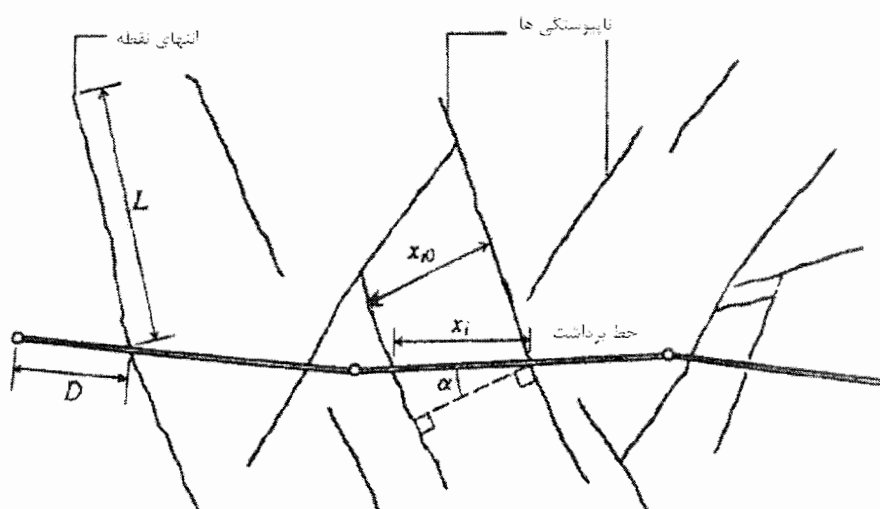
شکل شکست بسته به همگن یا ناهمگن بودن مصالح دیواره شیب‌دار ممکن است منظم یا نامنظم باشد. اگر مصالح تشکیل دهنده دیواره ناهمگن باشد سطح شکست به صورت بخشی از یک کره یا بیضوی است در صورتی که سطح شکست نامنظم است که مصالح یا لایه‌های ساختاری ناهمگن بوده و سطوح ناپیوستگی توده‌سنگ را تحت تأثیر قرار دهند [۷].

از این رو برای تهیه نقشه‌های مربوط به توزیع ناپیوستگی‌های منطقه می‌توان از روش خط برداشت^۱ استفاده کرد. در این روش تعدادی خطوط یا مسیرهای مستقیم روی سطح توده سنگ انتخاب می‌شود و برداشت اطلاعات مربوط به کلیه درزه‌های متقاطع با این امتداد انجام می‌شود. این مسیر مستقیم یک خط برداشت تلقی شده و شماره‌گذاری می‌شود و موقعیت آن شامل مختصات، امتداد و همچنین نوع سنگ یا تشکیلات در فرم‌های مربوطه ثبت می‌شود. در شکل ۱-۳ نمای شماتیکی از برداشت ناپیوستگی‌ها به روش خط برداشت نشان داده شده است [۱۲]. ارائه اطلاعات به دست آمده از بررسی ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی معمولاً به دو روش مختلف صورت می‌پذیرد:

۱- پیاده کردن بر روی نقشه به نحوی که نوع، خصوصیات فیزیکی، جهت و موقعیت هر یک از وجوه ساختمانی تعیین شده باشد.

۲- استفاده از روشهای آماری و نشان دادن هیستوگرام فراوانی نسبی هر یک از خصوصیات

ناپیوستگی‌های موجود در سرتاسر منطقه مورد مطالعه [۱۲].



شکل ۱-۳ نمای شماتیکی از برداشت ناپیوستگی‌ها به روش Scanline [۱۲]

۳-۲ جمع آوری و تهیه اطلاعات

مراحل برداشت و جمع آوری اطلاعات مربوط به تحلیل پایداری شامل موارد زیر خواهد بود:

۱. تعیین شیب‌ها و بلوک‌های دارای پتانسیل ناپایداری و تعیین سازه‌ها و محدوده احتمالی متأثر از ناپایداری

۲. برداشت ناپیوستگی‌های عمده در محدوده مورد مطالعه به منظور تعیین اندازه محتمل و شکل بلوک‌های سنگی. همچنین به منظور تعیین گوه‌های سنگی ناپایدار لازم است موقعیت و وضعیت ناپیوستگی‌های عامل این گوه‌ها تعیین شود.

۳. تعیین حجم و وزن بلوک‌های ناپایدار موجود و طبقه‌بندی آنها.

۴. تعیین پارامترهای فیزیکی و مکانیکی شیب‌ها و بلوک‌های سنگی و مشخصات هندسی بلوک‌های سنگی.

۳-۳ محدودیت‌های شرایط مطالعاتی ناپیوستگی‌ها

با توجه به محدودیت‌های موجود ناشی از شرایط مطالعاتی و اجرایی طرح و همچنین وضعیت توپوگرافی ناحیه تحت بررسی و با در نظر گرفتن دامنه گسترده تغییرات پارامترهای تأثیرگذار، انجام این تحلیل به طور گسترده‌ای بر قضاوت مهندسی استوار خواهد بود. عمده‌ترین محدودیت‌های موجود عبارتند از:

الف) عدم انجام مطالعات ژئوتکنیکی (آزمایش‌های سنگ، حفر گمانه، برداشت‌های زمین‌شناسی) در مراحل قبلی مطالعات.

ب) عدم دسترسی آسان به شیب‌های فوقانی به منظور بررسی مشخصات ژئوتکنیکی و جمع آوری

اطلاعات برای تحلیل دقیق‌تر

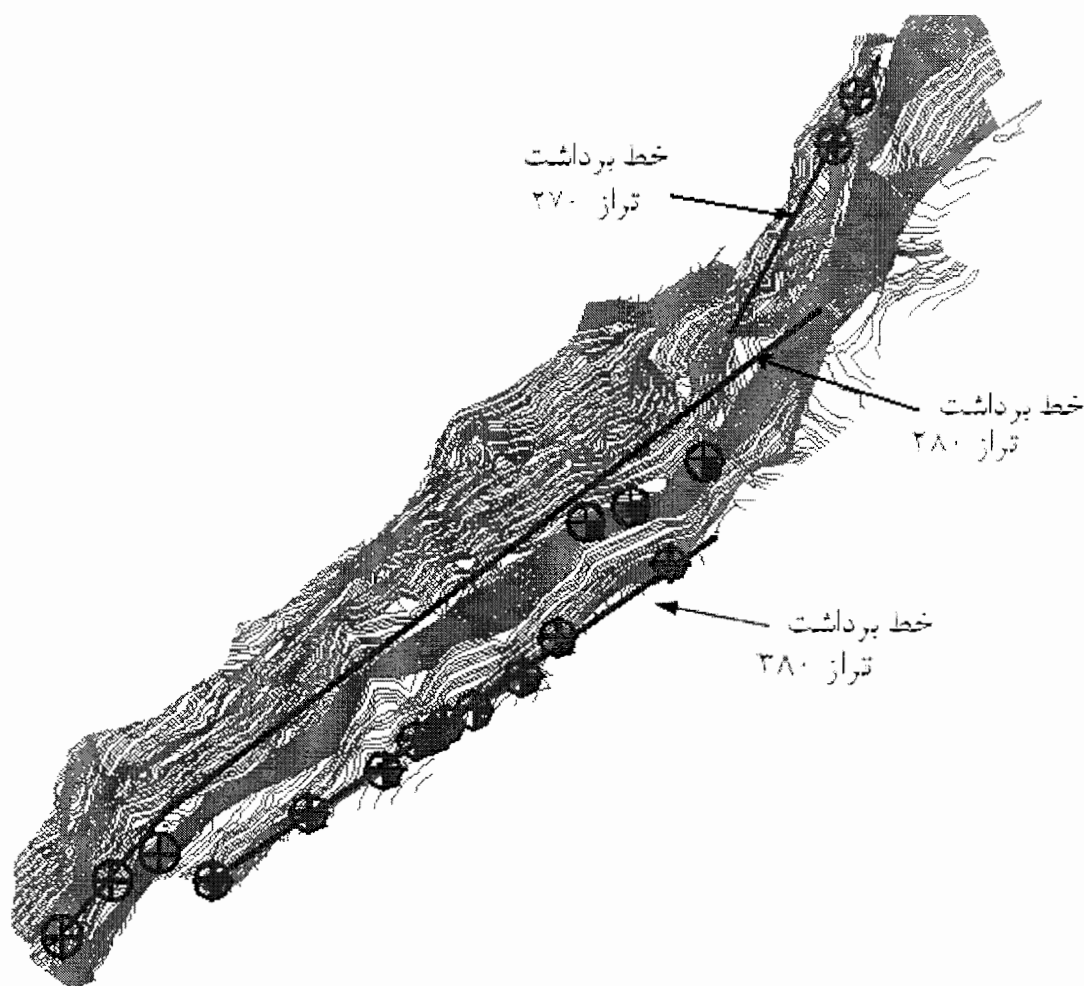
پ) پراکندگی بلوک‌ها و وجود شرایط متفاوت در بخش‌های مختلف در محدوده مورد مطالعه
ت) وجود پوشش مواد واریزه‌ای و هوازده در ترازهای میانی و پائینی و عدم امکان مشاهده شرایط
توده‌سنگ‌ها در این نواحی
برای برداشت و مدل کردن محدوده مورد مطالعه و فائق آمدن بر این محدودیت‌ها از برداشت‌های
تفضیلی و نقشه‌های تراز استفاده شده است.

۳-۴ کلیات شرایط ژئوتکنیکی و توپوگرافی محدوده مورد بررسی

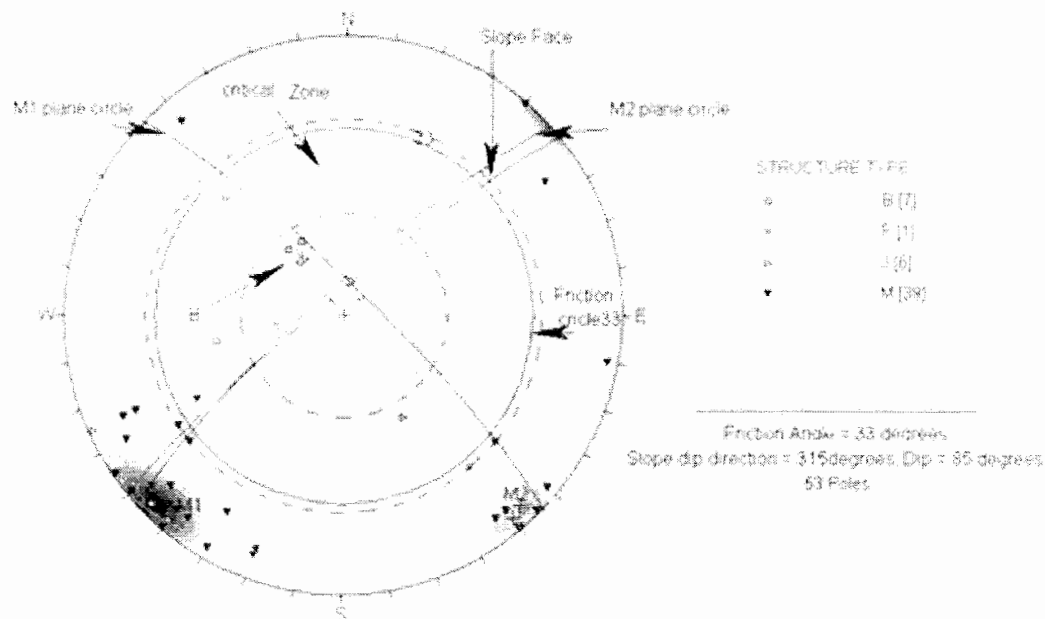
شکل شماره ۳-۲ نشان‌دهنده نمای کلی از موقعیت شیب‌ها و محل احداث نیروگاه
می‌باشد. به طور کلی محدوده مورد مطالعه (مشخص شده با دو خط عمودی) از چهار لایه افقی
کنگلومرای بختیاری با ضخامتی در حدود ۲۰ تا ۴۰ متر تشکیل شده است که منبع اصلی ایجاد
بلوک‌های سنگی می‌باشند. شیب‌های طبیعی در این ناحیه عمدتاً متأثر از ناپیوستگی‌های اصلی و
تقریباً عمودی می‌باشند. در قسمت تحتانی این توده کنگلومرا سازند آغاچاری قرار دارد (تراز تقریبی
۲۰۰ متر) که تشکیل دهنده شیب‌های واقع در ترازهای پائین‌تر می‌باشد. سطح این شیب‌ها عمدتاً
پوشیده از بلوک‌های سنگی کنگلومرائی است که از ترازهای بالائی منتقل شده‌اند. این امر خود مؤید
پتانسیل بالای سقوط سنگ می‌باشد. شستشوی این مواد توسط آب‌های جاری سبب خالی شدن
قسمت‌های پائینی لایه‌های کنگلومرائی و بازشدگی درزه‌های شرقی-غربی موجود در لایه کنگلومرا
تحت وزن این لایه‌ها می‌گردد. اتصال این درزه‌ها با ناپیوستگی‌های دیگر موجود در ناحیه مورد نظر،
در نهایت سبب ایجاد بلوک‌ها و گوه‌های سنگی ناپایدار می‌شود.

۳-۵ برداشت ناپیوستگی‌ها در محدوده مورد مطالعه

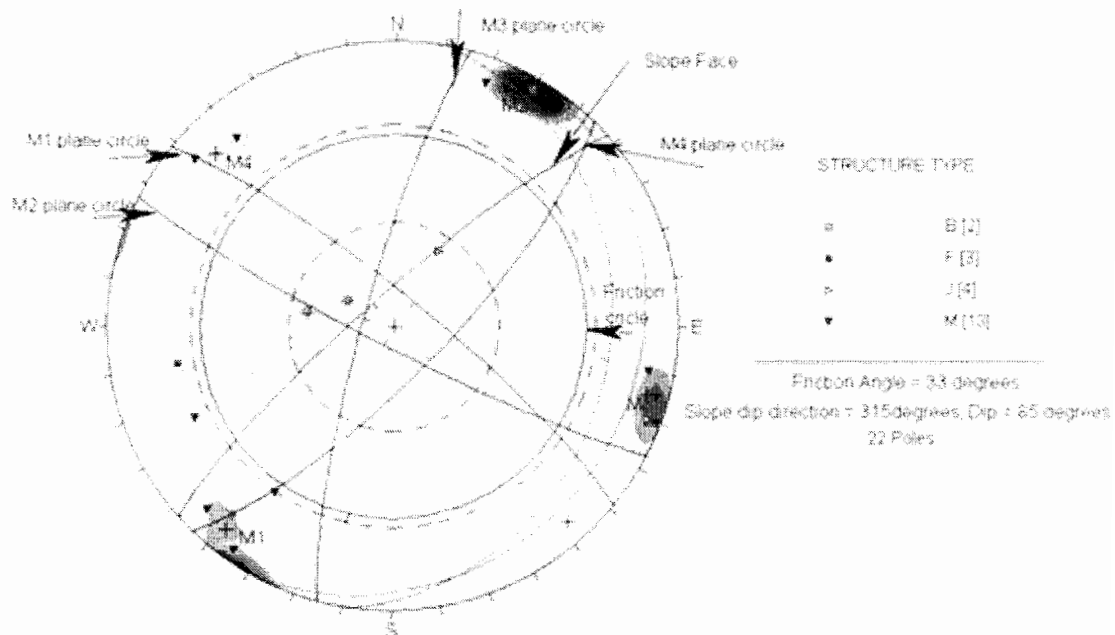
ناپیوستگی‌های موجود در محدوده مطالعه به دلیل عدم دسترسی به کلیه نقاط مورد نظر تنها در سه مسیر و در ترازهای مطابق شکل ۳-۳، به منظور ارزیابی پتانسیل ایجاد بلوک‌های جدید و تعیین شکل و ابعاد احتمالی آن‌ها، برداشت شده است. شکل‌های ۳-۴ تا ۳-۷ نشان دهنده تصاویر استریوگرافی این برداشت‌ها در امتداد این سه خط پیمایش می‌باشند. اطلاعات خام این برداشت‌ها در پیوست ۱ ارائه شده است. نتایج این برداشت‌ها نشان می‌دهد که بیشترین بلوک‌های بحرانی ایجاد شده در ترازهای فوقانی می‌باشد که با توجه به سه دسته درزه اصلی عمده در این محدوده ایجاد می‌شوند.



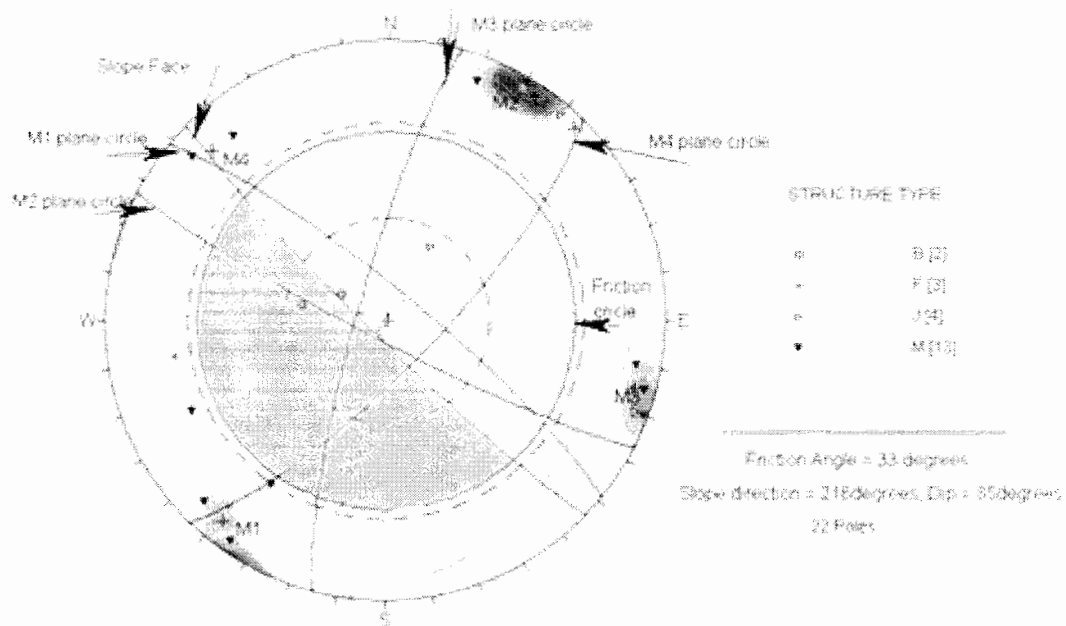
شکل ۳-۳ برداشت ناپیوستگی‌ها در سه خط پیمایش



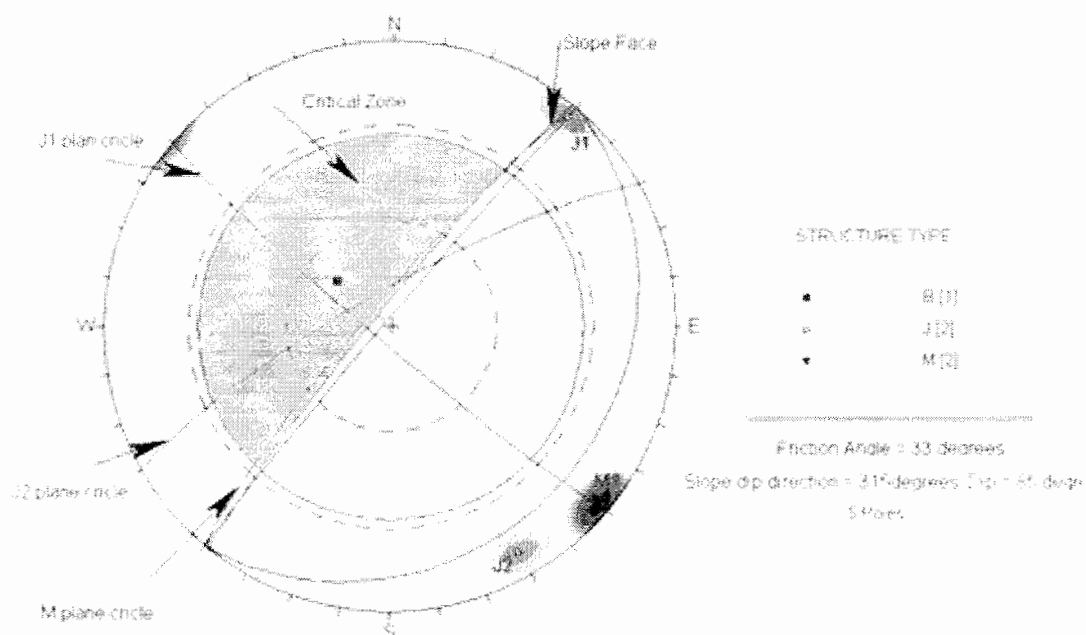
شکل ۳-۴ ناپیوستگی‌های برداشت شده در امتداد خط پیمایش ۱ مربوط به لایه کنگلومرانی بالای تراز ۳۸۰ متر



شکل ۳-۵ ناپیوستگی‌های برداشت شده در امتداد خط پیمایش ۲ مربوط به لایه کنگلومرانی بالای تراز ۲۸۰ متر با جهت شیب ۳۱۵ درجه برای شیروانی



شکل ۳-۶ ناپیوستگی‌های برداشت شده در امتداد خط پیمایش ۲ مربوط به لایه کنگلومرانی بالای تراز ۲۸۰ متر با جهت شیب ۲۱۶ درجه برای شیروانی



شکل ۳-۷ ناپیوستگی‌های برداشت شده در امتداد خط پیمایش ۳ مربوط به لایه کنگلومرانی تراز ۲۵۰ متر

۳-۶-۲ مشخصات مکانیکی و فیزیکی سیستم درزه‌داری منطقه

ویژگی‌هایی از ناپیوستگی که تأثیر آنها بر خواص مهندسی توده سنگ مورد انتظار می‌باشد عبارتند: از راستای نسبی^۱، فاصله داری^۲، پایداری^۳، زبری^۴، اندازه دهانه^۵، مواد پرکننده^۶، تعداد سری‌ها و اندازه بلوک. به همین جهت در زیر به بررسی ویژگی‌های دسته درزه‌های اصلی و تأثیرگذار بر شکل بلوک‌های ناپایدار منطقه پرداخته شده است [۱۳].

۳-۶-۱-۱ راستای نسبی: عبارتست از وضع ناپیوستگی در فضا با تعیین شیب و جهت شیب صفحه ناپیوستگی. راستای نسبی ناپیوستگی‌ها تأثیر تعیین‌کننده‌ای در تمایل به ناپایداری، به دلیل احتمال سقوط بلوک‌های سنگی و یا لغزش روی صفحه ناپیوستگی خواهد داشت. راستای متقابل ناپیوستگی‌ها نسبت به یکدیگر، تعیین‌کننده شکل بلوک‌هایی است که توده سنگ به آن تقسیم شده است [۱۳]. شیب و جهت شیب درزه‌ها و لایه‌بندی، براساس اطلاعات موجود و تصاویر استریونت از سیستم درزه‌داری در محدوده نیروگاه در جدول ۳-۱ نمایش داده شده است.

جدول ۳-۱ مشخصات ناپیوستگی محدوده نیروگاه در کنگلومرای بختیاری

شیب	جهت شیب	دسته ناپیوستگی
۵	۱۶۸	لایه بندی
۸۵	۳۱۵	شیب
۸۹	۲۲۱	J۱
۸۴	۴۳	J۲
۸۹	۱۳۳	J۳

۳-۶-۲-۱ فاصله‌داری: فواصل ناپیوستگی‌های متوالی از یکدیگر در امتداد یک خط را فاصله‌داری گویند که در واقع بیان‌گر تعداد یا میزان فراوانی ناپیوستگی در واحد طول و اندازه بلوک‌ها است [۱۳].

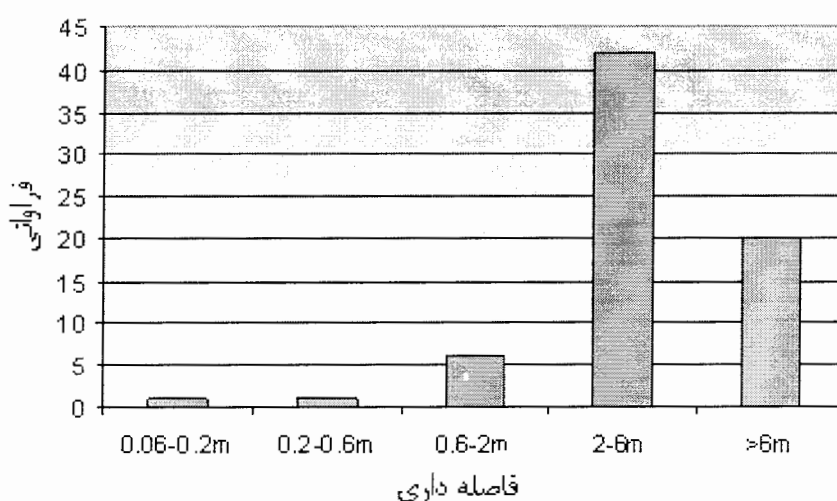
۱- Orientation
۵- Aperture

۲- Spacing
۶- Filling

۳- Persistence

۴- Roughness

سری‌های متعدد نزدیک به هم ناپیوستگی‌ها موجب ایجاد وضعیت چسبندگی ضعیف در توده سنگ می‌شود در حالی که ناپیوستگی‌های با فاصله زیاد بیش‌تر احتمال به وجود آمدن وضعیت تشکیل بلوک‌ها را دارند. وضعیت فاصله‌داری ناپیوستگی‌های منطقه به صورت آماری در شکل ۳-۸ ترسیم شده است. از آنجائی که ناپیوستگی‌ها نسبت به هم با فاصله زیاد قرار گرفته‌اند، وجود آن‌ها را در شکست توده سنگ و ایجاد بلوک بیشتر نمایان می‌سازد.



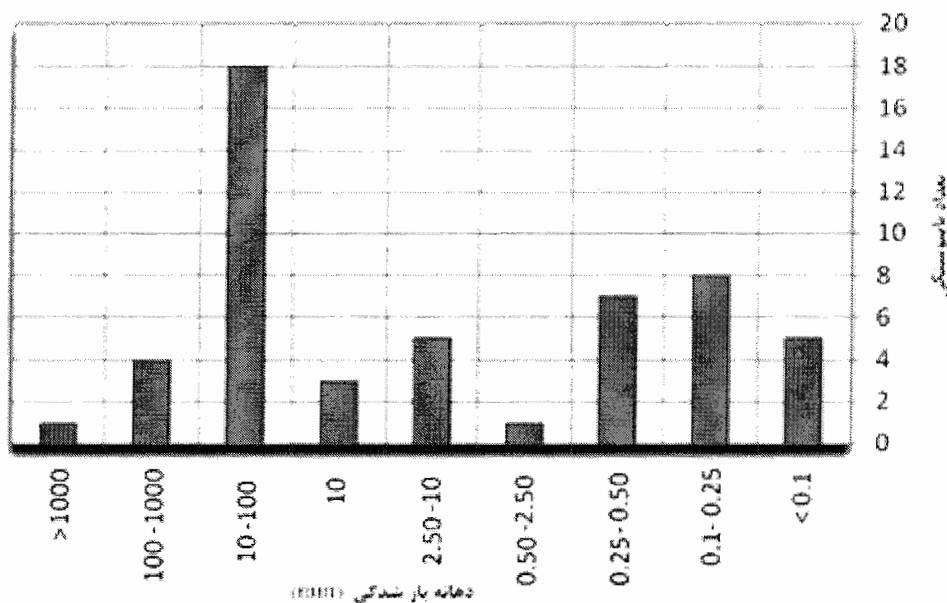
شکل ۳-۸ نمودار فاصله‌داری درزه‌های منطقه

۳-۶-۳- زبری و موج‌داری سطح: اندازه ناهمواری‌ها یا میزان موج‌داری سطح نسبت به صفحه اصلی آن. زبری بر مقاومت برشی به ویژه در ناپیوستگی‌های جابجا نشده و متصل (مثلاً ناپیوستگی‌های پر نشده) تأثیر می‌گذارد [۱۳]. زبری درزه محدوده مورد مطالعه به صورت مشاهده‌ای و با مقایسه مقطع درزه با مقاطع استاندارد، ناهموار و زیر تشخیص داده شده است.

۳-۶-۴- نوع و میزان مواد پرکننده: مواد سست و هوازده مانند ماسه، رس، سنگ‌های تکتونیزه و غیره که دیواره‌های سنگی مجاور ناپیوستگی را از هم جدا می‌سازد و معمولاً ضعیف‌تر از سنگ مادر است. با افزایش ضخامت مواد پرکننده، مقاومت درزه‌ها کمتر می‌شود [۱۴].

در بعضی مواقع مواد پرکننده مثل سیمان عمل می‌کنند که در این وضعیت می‌توان از وجود درزه صرف‌نظر کرد. به طور کلی مواد پرکننده تأثیر به‌سزایی در مقاومت برشی ناپیوستگی‌ها دارد [۱۴].

۳-۶-۵- دهانه بازشدگی: دهانه عبارت است فاصله عمودی مابین دیواره‌های سنگی مجاور یک ناپیوستگی که در آن فضای مابین دیواره‌ها با هوا یا آب پر شده است. دهانه و تغییرات فضایی وضعیت آن بر مقاومت برشی ناپیوستگی و نفوذپذیری یا هدایت هیدرولیکی ناپیوستگی و توده‌سنگ تأثیر می‌گذارد [۱۳]. فاصله دهانه ناپیوستگی‌های منطقه از خیلی کم تا خیلی عریض در نوسان است که این مسأله بیانگر نفوذ آب به درون ناپیوستگی‌ها و افزایش فشار منفذی آب در آنها می‌شود. با توجه به اطلاعات داده‌های برداشت در پیوست ۱، فاصله دهانه ناپیوستگی‌ها در شکل ۳-۹ نشان داده شده است.

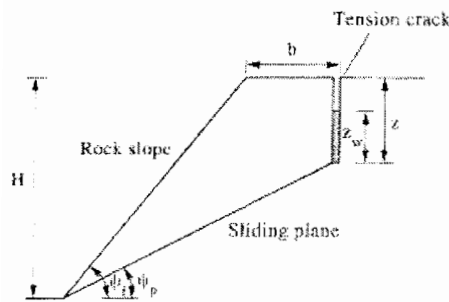


شکل ۳-۹ فاصله دهانه بازشدگی ناپیوستگی‌های منطقه

۳-۶-۶- وجود آب در ناپیوستگی‌ها: حضور آب در درزه‌ها باعث کاهش تنش نرمال وارد بر صفحه درزه می‌شود و سبب تضعیف پارامترهای مقاومت برشی می‌شود [۱۴]. درون درزه‌های برداشت شده در محدوده مورد مطالعه آبی وجود ندارد. ولی در مواقع بارش باران‌های فصلی تند، آب در درون درزه‌ها قرار می‌گیرد که سبب بازشدگی بیشتر و می‌توان آن را به عنوان یکی از عوامل ناپایداری

به شمار آورد. خروج آب از محل تماس لایه‌های کنگلومرایی با میان لایه‌های ریزدانه در فصل خشک سال نیز ادامه دارد که این امر مؤید ایجاد فرسایش در لایه‌ها می‌باشد. با توجه به موارد فوق می‌توان نفوذ آب‌های سطحی به داخل ناپیوستگی‌ها و شسته شدن مواد پرکننده، این ناپیوستگی‌ها را به عنوان عمده‌ترین عامل تشکیل بلوک‌های ناپایدار با گذشت زمان به شمار آورد. به طوری که بزرگی نواحی شسته‌شده موجود دلالت بر جریان قابل ملاحظه آب در درزه‌های باز طی زمان گذشته می‌کند. به عنوان مثال می‌توان به درزه‌های شسته شده عمود بر سطح شیب اشاره نمود [۱۵].

وجود دو مسیر جریان آب با سطح آبرگیری نسبتاً محدود در محدوده مورد مطالعه، که باعث هدایت جریان آب‌های سطحی به سمت دامنه و فرسایش مواد ضعیف‌تر می‌شود سبب ایجاد و سقوط بلوک‌های سنگی بزرگی در این ناحیه شده است. با توجه به شواهد موجود و مشخصات توده کنگلومرایی، نفوذ آب‌های سطحی به داخل توده سنگ و جریان آن‌ها در ناپیوستگی‌های موجود را می‌توان به عنوان مهم‌ترین عامل تشکیل بلوک‌های سنگی و به عنوان یکی از عوامل محرک لغزش این بلوک‌ها برشمرد. همچنین بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده (فصل زمستان) در گمانه‌های اکتشافی $UG308$ و $UG310$ که در مجاورت محدوده مورد مطالعه حفاری شده‌اند سطح آب زیرزمینی در این ناحیه در تراز تقریبی ۲۰۰ تا ۲۲۰ متر می‌باشد، که کمابیش منطبق بر تراز سطح تماس آغاجاری و بختیاری است. از این‌رو تأثیر این عامل بر ایجاد و جدایش بلوک‌های سنگی کنگلومرایی از اهمیت کمتری نسبت به آب‌های سطحی برخوردار می‌باشد. از طرفی باید توجه داشت که هرگونه افزایش سطح آب زیرزمینی در این ناحیه در اثر عواملی نظیر آب‌گیری سد و عملکرد تونل‌های آب‌بر نیروگاه می‌تواند سبب ایجاد جریان آب در ناپیوستگی‌های موجود و توسعه فشار منفذی در ترازهای پایین ۲۸۰ و در نهایت ناپایداری دامنه‌های کنگلومرایی در این ناحیه شود. شکل ۳-۱۰ چگونگی تأثیر آب را به عنوان عامل ناپایداری و حرکت توده‌سنگ نشان می‌دهد [۱۵].



$$SF = \frac{c'(H-z) \csc \psi_p + (W \cos \psi_p - U - V \sin \psi_p) \tan \phi'}{V \cos \psi_p + W \sin \psi_p}$$

Where:

SF = فاکتور ایمنی

c' = چسبندگی مؤثر

φ' = زاویه اصطکاک

ψ_p = شیب صفحه لغزش

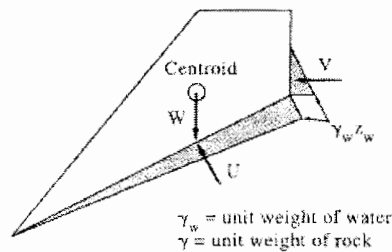
W = وزن بلوک

U = نیروی حاصل از فشار آب که رویه بالا عمل می کند

V = نیروی حاصل از فشار آب درون ترک گسی

H = ارتفاع شیب

z = عمق ترک گسی



شکل ۳-۱۰ تأثیر وجود آب به عنوان عامل ناپایداری و حرکت توده سنگ [۷]

۳-۶-۷- هواز دگی: هواز دگی سطح درزه ها نیز عاملی برای تضعیف پارامترهای مقاومت برشی

می باشد.

۳-۷ تعیین اندازه بلوک های ناپایدار موجود و طبقه بندی آنها

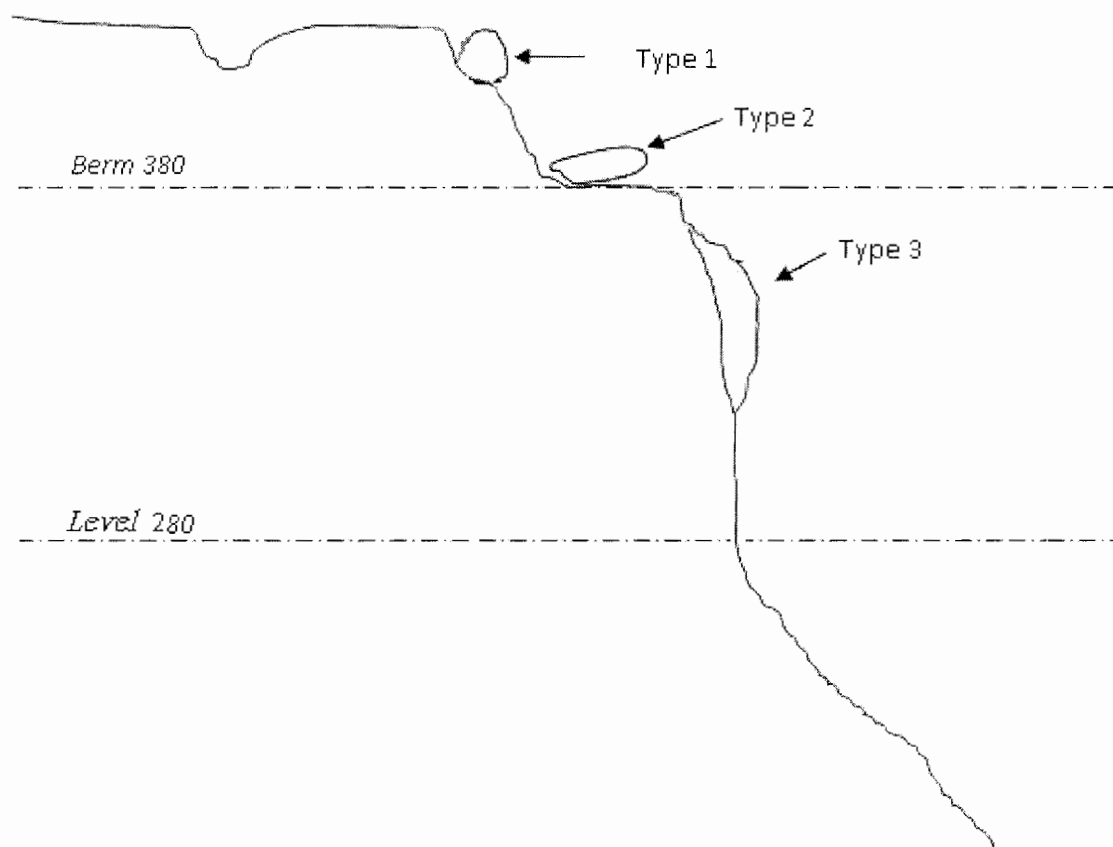
بر اساس نوع وضعیت ناپیوستگی ها در منطقه و به علت وجود دسته درزه های تحت قائم و تحت افق، بلوک های سنگی شکلی از سنگ بستر در ترازهای بالای دیواره جدا شده و به صورت معلق و با پتانسیل ریزش زیادی قرار گرفته اند. ابعاد این بلوک های سنگی متأثر از راستای نسبی دسته های متقاطع ناپیوستگی ها نسبت به همدیگر و نیز فاصله بندی هر کدام از این دسته هاست. بلوک هایی که در پایین تراز ۳۸۰ درجه قرار دارند، دارای بعد ارتفاع بین ۸ تا ۱۰ متر هستند. بلوک هایی که در لبه صخره در شیب ایجاد شده اند دارای بعد ارتفاع ۴ تا ۵ متر هستند. با به دست آوردن حجم بلوک و معین بودن جرم حجمی توده سنگ (2500 Kg/m^3)، وزن بلوک محاسبه می شود.

با توجه به مطالعات انجام شده بر روی ناپیوستگی‌ها در بخش قبلی می‌توان بلوک‌های سنگی موجود در ناحیه مورد مطالعه را، با توجه به شکل هندسی و وضعیت فعلی پایداری آنها به سه دسته زیر تقسیم کرد. شکل ۱۱-۳ نشان‌دهنده این تقسیم‌بندی به صورت شماتیک می‌باشد.

الف) بلوک‌های ناپایدار واقع بر لبه صخره (تیپ ۱)

ب) بلوک‌های قرار گرفته بر سطح برم ۳۸۰ (تیپ ۲)

پ) بلوک‌های ناشی از ترک‌های کششی (تیپ ۳)



شکل ۱۱-۳ تقسیم‌بندی بلوک‌های موجود منطقه به صورت شماتیک

فصل چهارم

بررسی روش تحلیل پایداری
و سقوط سنگ منطقه

۴-۱ مقدمه

وجود ناپیوستگی‌ها در توده سنگ، سبب مجزا کردن بلوک‌های سنگ از همدیگر می‌شوند. بلوک‌هایی که بر یک سطح آزاد سنگ متکی هستند همواره آمادگی لازم برای لغزیدن و حرکت بر روی سطح شیب‌دار را دارند و موجبات ناپایداری نسبی آنها را فراهم می‌سازند. نیروی لازم برای این حرکت در نتیجه تجزیه نیروی ثقل زمین بر روی سطح شیب‌دار تأمین می‌شود [۱۳]. نیروی جاذبه زمین در نتیجه تجزیه نیروی وزن بر روی دامنه، سبب اعمال یک "مؤلفه پایین‌سو" به مواد موجود در دامنه می‌شود. از طرفی نیروهای القائی با افزایش نیروهای محرک می‌توانند موجب چیرگی این نیروها بر نیروهای مقاوم در برابر لغزش شده و انواع حرکات دامنه‌ای را ایجاد نمایند. یکی از مهم‌ترین نیروهای القایی در طبیعت زمین‌لرزه‌ها هستند که با اعمال شتاب‌های افقی و عمودی به مواد موجب برهم‌زدن تعادل نسبی آنها می‌شوند. تأثیر زمین‌لرزه بر ناپایداری شیب‌ها تنها به اعمال نیروهای اینرسی اضافی در توده خلاصه نمی‌شود. از آثار مهم دیگر زمین‌لرزه می‌توان به تضعیف ناپیوستگی در حین بارگذاری زمین‌لرزه و افزایش فشارهای منفذی اشاره کرد. همچنین وجود فعالیت‌های زمین‌ساختی و گسل‌خوردگی‌های ناشی از زمین‌لرزه در درازمدت در یک منطقه، شرایط را برای ایجاد شکستگی‌های عمومی و کاهش مقاومت و افزایش مقدار آب که خود موجب ایجاد ناپایداری شیب‌ها می‌شوند، فراهم می‌سازد [۷].

تحلیل پایداری بلوک‌ها با توجه تأثیر زمین‌لرزه به عنوان نیروی القایی منطقه با روش المان مجزا انجام گرفته است. نتایج این تحلیل مؤید ناپایداری بلوک‌ها و برهم زدن تعادل نسبی آنها با اعمال بار لرزه‌ای با شتاب افقی به مواد است. تعیین نوع ریزش، محل ریزش و اندازه بلوک‌های سنگی جدا شده از سطوح شیب‌دار سبب شده است تا تحلیل ناپایداری شیب‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد. تغییرپذیری در هندسه و توپوگرافی شیب، عدم شناخت صحیح شرایط اولیه، تعیین دقیق مقادیر پارامترهای مورد نیاز و روش‌های مورد استفاده برای تحلیل حرکت، شکل و مسیر سنگ پیش‌بینی دقیق سقوط سنگ‌ها را با مشکلاتی روبرو ساخته است. کاربرد آمار و احتمال در تحلیل شبیه‌سازی سقوط سنگ‌ها سبب ارائه روش‌های قابل قبول و مؤثری برای غلبه بر این مشکلات شده است. شبیه‌سازی تحلیلی مسیر سقوط بلوک‌های سنگی دیواره مشرف به نیروگاه توسط نرم‌افزار *Rocfall* انجام گرفته شده است. تحلیل و نتایج این شبیه‌سازی در این فصل به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته شده است.

۴-۲ انتخاب مدل دینامیکی المان مجزا در تحلیل پایداری بلوک‌ها

یکی از روش‌های تحلیل عددی که جهت محیط‌های پیوسته و ناپیوسته سنگی کاربرد فراوان دارد، روش المان مجزا است. روش المان مجزا در سال ۱۹۷۱ توسط کاندال^۱ ابداع شد. در روش المان مجزا ناپیوستگی‌ها به عنوان شرایط مرزی بلوک عمل می‌کنند. در حال حاضر این روش با توجه به ماهیت ناپیوسته بودن محیط‌های سنگی روش کاملاً مناسبی برای بررسی تغییر شکل و شکست توده‌های سنگی می‌باشد. این روش به تدریج توسعه یافت و نرم‌افزار *UDEC* بر اساس آن طراحی و تهیه شد. نرم‌افزار *UDEC* یک نرم‌افزار دوبعدی است که قابلیت بالایی در تحلیل استاتیکی و دینامیکی محیط‌های ناپیوسته دارد. لذا برای مدل‌سازی دینامیکی منطقه درزه‌دار و تحلیل پایداری بلوک‌های مورد نظر انتخاب مناسبی به نظر می‌رسد.

در همین راستا تحلیل پایداری بلوک‌های مشرف به گود نیروگاه مبتنی بر استفاده از روش المان مجزا و با کمک نرم‌افزار المان مجزا *UDEC* انجام شده است. نتایج خروجی آن بیان‌گر آن است که اعمال بار لرزه‌ای با شتابی معادل $0.26g$ ، موجب برهم زدن تعادل نسبی آن‌ها شده و بلوک‌های بحرانی به حالت ناپایدار درآمده‌اند و به سمت پایین حرکت می‌کنند.

۳-۴ مشخصات زلزله طرح

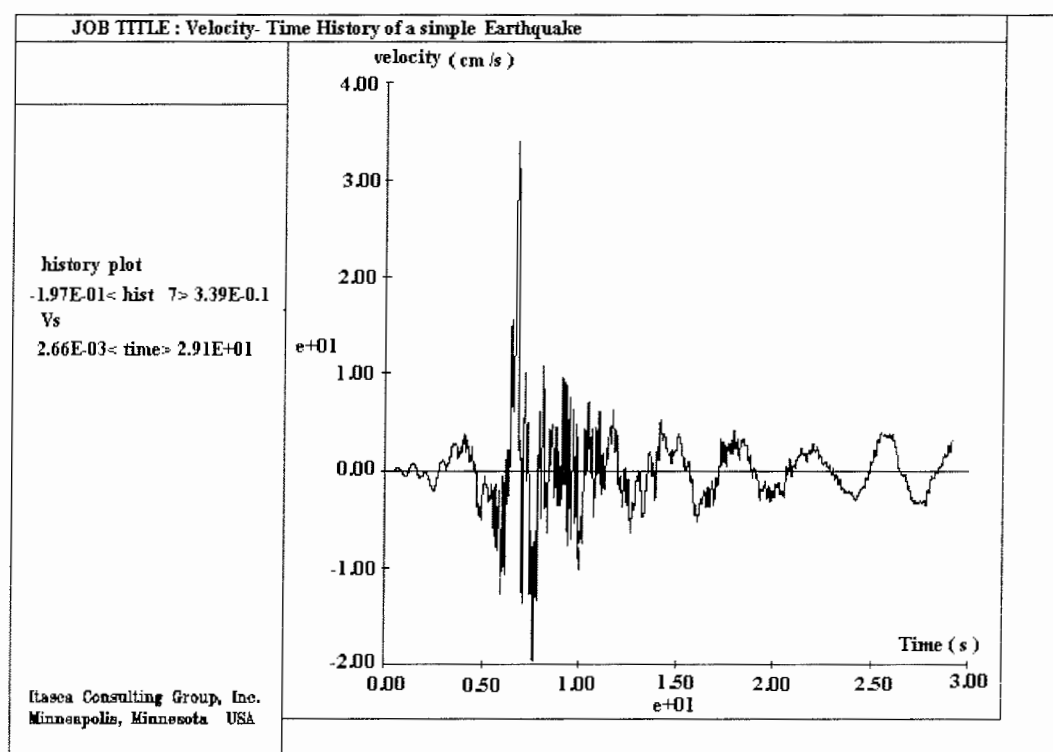
زمین‌لرزه‌ها به عنوان مهم‌ترین نیروی القایی در طبیعت همواره با اعمال شتاب‌های افقی و عمودی به مواد موجب برهم‌زدن تعادل نسبی آن‌ها می‌شوند و با ناپایدار ساختن مواد خصوصاً در دامنه‌های مرتفع و پرشیب سبب اعمال نیروهای القایی به مواد شده و موجب تحریک لغزش‌های قدیمی و بروز انواع زمین‌لغزش‌ها از جمله سقوط سنگ می‌شوند [۷].

بر اساس مطالعات انجام‌شده در محدوده‌ای به شعاع ۲۰۰ کیلومتر در اطراف طرح سد و نیروگاه گتوند، دوره بازگشت زلزله‌هایی با بزرگی $6/5$ ، $6/8$ ، 7 ریشتر برابر با ۵۰، ۱۰۰، ۲۵۰ سال است. از نظر لرزه‌خیزی، منطقه متأثر از زلزله‌های رخ داده در زاگرس چین‌خورده می‌باشد. گسل مسجد سلیمان که در نزدیکی محدوده واقع شده است با توان لرزه‌ای بالایی که دارد (حدود $7/57$ ریشتر) خطرناک‌ترین گسل منطقه می‌باشد و در صورت فعالیت، قادر است شتابی معادل $0.29g$ به محل طرح سد وارد سازد [۱۱].

برای تحلیل پایداری لرزه‌ای بلوک‌های مشرف به گود نیروگاه از زلزله مبنای طراحی^۱ (*DBE*) استفاده شده است. زلزله مبنای طرح زمین لرزه‌ای است که حداقل یک بار در مدت عمر مفید سازه روی می‌دهد. پس از تعیین توان لرزه‌خیزی ساخت‌گاه در طی تحلیل خطر زلزله، تاریخچه زمانی آن به گونه‌ای تدوین شده است که بیشترین انطباق را با شرایط لرزه زمین‌ساخت منطقه دارد.

۱- Design Base Earthquake (DBE)

اصلاح شتاب‌نگاشت‌های واقعی یکی از ساده‌ترین روش‌هایی است که مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش شتاب‌نگاشت ثبت شده در زلزله‌ای که بیشترین انطباق را با شرایط ساخت‌گاه داشته، انتخاب شده است. در شکل ۴-۱ نمودار سرعت-زمان به کار گرفته شده در مدل‌سازی آورده شده است و همانطور که مشاهده می‌شود قدر مطلق بیشینه سرعت $33/9$ سانتی‌متر بر ثانیه می‌باشد. نتایج حاصل از روش احتمالات نشان می‌دهد که شدت زلزله و شتاب مبنای طرح به ترتیب $7/08$ ریشتر و $0/26$ g می‌باشد. این نمودار از بخش مربوطه طرح گتوند به دست آمده است [۱۵].



شکل ۴-۱ نمودار سرعت-زمان به کار گرفته شده در مدل‌سازی [۱۵]

۴-۴ پارامترهای رفتاری مورد نیاز برای تحلیل مدل

برای تحلیل پایداری با استفاده از روش المان مجزا، مشخصات ذاتی توده سنگ و ناپیوستگی‌های مربوط به آن از قبیل وزن مخصوص، مدول حجمی، مدول الاستیسته، ضریب اصطکاک و چسبندگی نیاز است [۳]. در نرم افزار *UDEC* برای انجام تحلیل دینامیکی از معیارهای مختلفی با توجه به شرایط مسئله انتخاب و استفاده می‌شود. در مدل مورد نظر تنش برجا منطقه‌ی مورد تحلیل، براساس وزن روباره اعمال و در نظر گرفته شده است.

همچنین با در دست داشتن پارامترهایی از قبیل مدول یانگ و نسبت پواسون می‌توان مدول حجمی و مدول برشی را از روابط ۱-۴ به دست آورد [۲۲].

$$K = \frac{E}{3(1-2\nu)}, \quad G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad \text{روابط ۱-۴}$$

که در آن K مدول بالک، G مدول برشی، E مدول یانگ و ν نسبت پواسون می‌باشد.

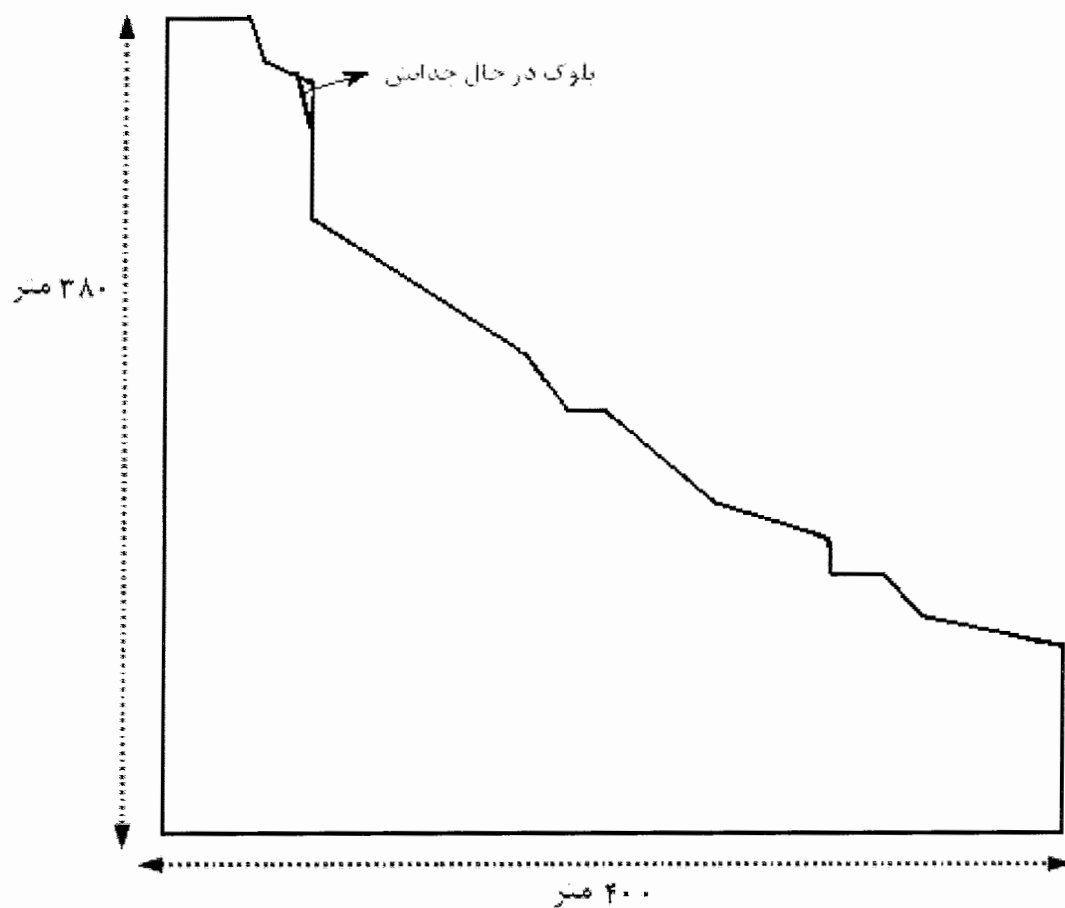
پارامترهای رفتاری ماده سنگ و درزه استفاده شده در مدل در جدول ۱-۴ درج شده است.

جدول ۱-۴ پارامترهای استفاده شده در مدل سازی

درزه		ماده سنگ				
چسبندگی درزه MPa	زاویه اصطکاک درزه (درجه)	جرم حجمی (Kg/m^3)	نسبت پواسون ν	مدول یانگ GPa	مدول برشی GPa	مدول بالک GPa
۰/۲	۳۳	۲۵۰۰	۰/۲۵	۶	۲/۴	۴

۴-۵ هندسه مدل و شرایط مرزی

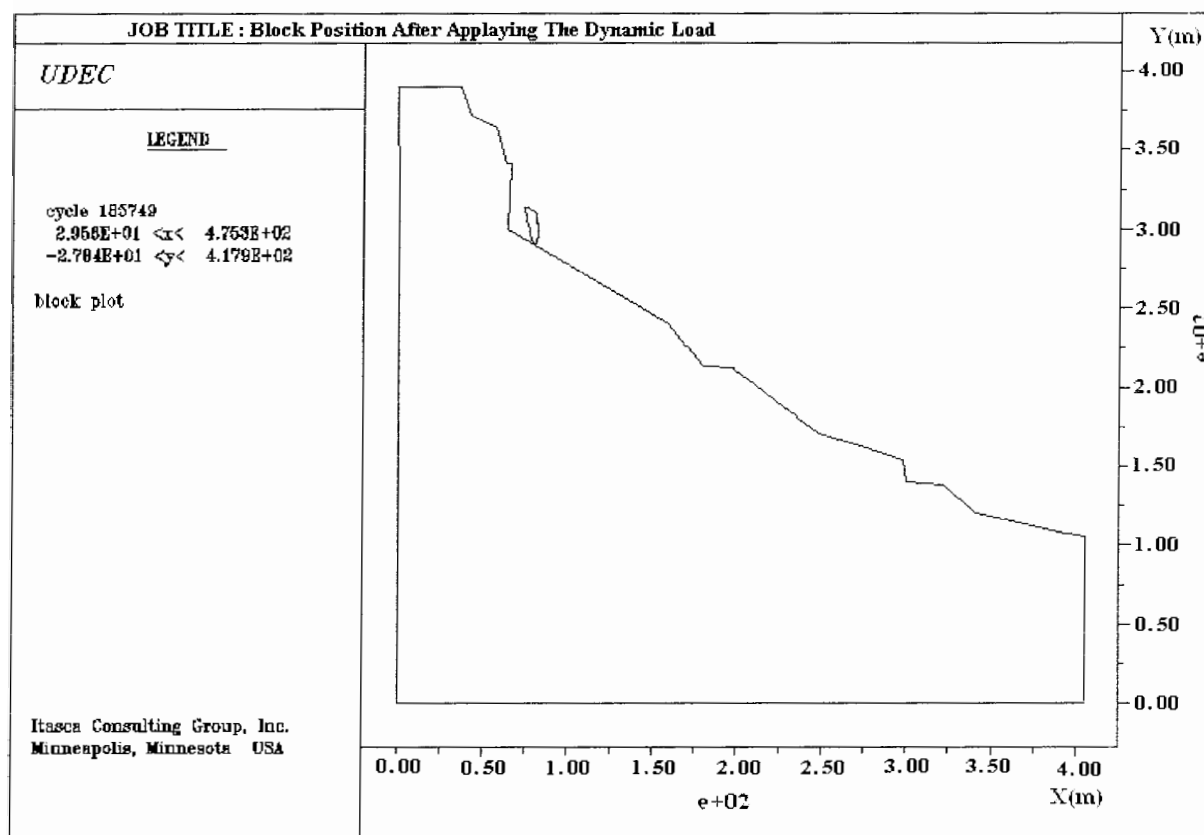
مدل ساخته شده دارای عرض ۴۰۰ متر و ارتفاع ۳۸۰ متر می‌باشد. در شکل ۲-۴ مدل ساخته شده *UDEC* در محدوده گود نیروگاه نشان داده شده است. در مدل مورد نظر بحرانی‌ترین بلوک موجود در سطح شیب مدل شده است. برنامه پس از حل استاتیکی، به تعادل رسیده و با تغییر شرایط مرزی و اعمال بار لرزه‌ای آماده حل دینامیکی می‌شود. بارگذاری لرزه‌ای به صورت سرعت حرکت موج به مرز سمت چپ مدل اعمال می‌شود.



شکل ۲-۴ هندسه مدل و شمای یک بلوک بحرانی

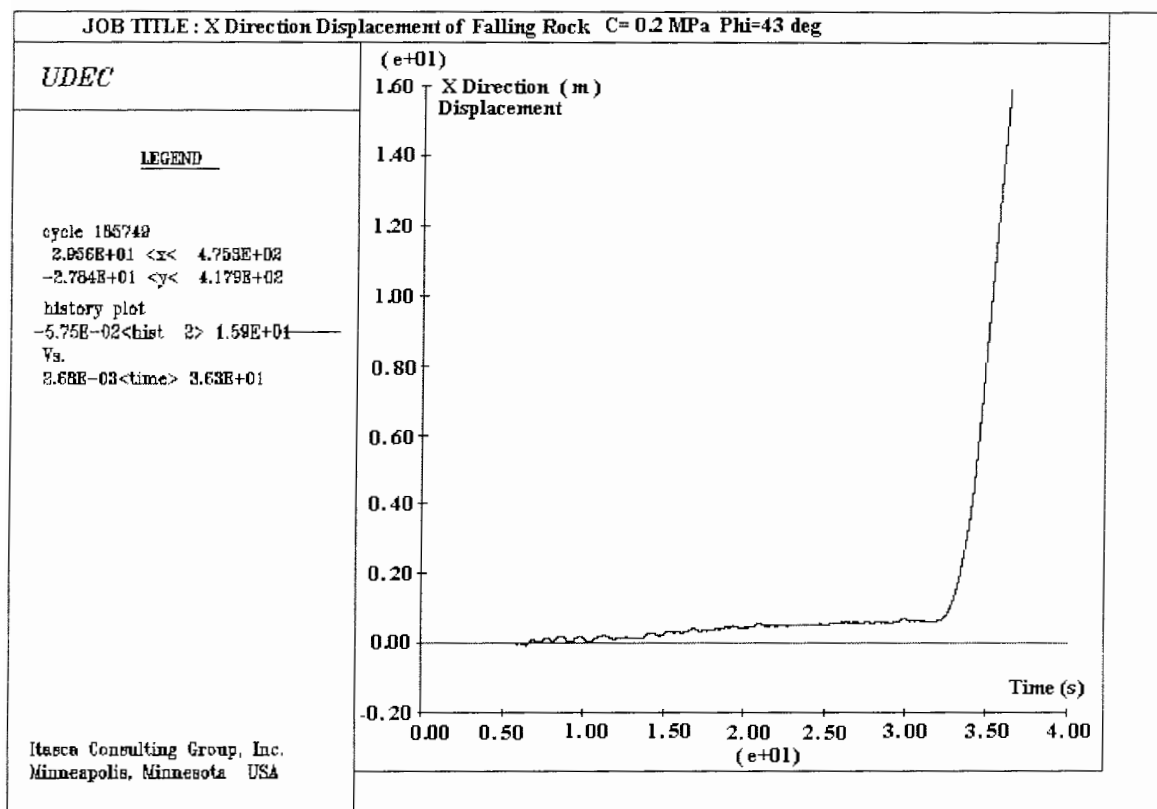
۴-۶ پاسخ لرزه‌ای مدل

قبل از آغاز تحلیل دینامیکی، جابجائی گره‌ها صفر شد تا نتایج حاصل از بارگذاری لرزه‌ای بهتر مشخص شود. همانطور که در شکل ۳-۴ مشاهده می‌شود در اثر اعمال نیروی زلزله بلوک مورد نظر کاملاً از دیواره جدا شده و به پائین شیب می‌لغزد. مقدار جابجائی افقی و قائم بلوک هنگام برخورد به پای شیب در اشکال ۴-۴ و ۵-۴ آورده شده است. لازم به ذکر است که حداکثر مقدار جابجائی مدل در اوج بارگذاری زلزله یعنی بازه زمانی بین ۵ تا ۱۰ ثانیه روی می‌دهد. با توجه به نتایج مذکور، عدم پایداری بلوک‌های مورد بررسی در شرایط زلزله مبنای طراحی^۱ به خوبی مشهود است.

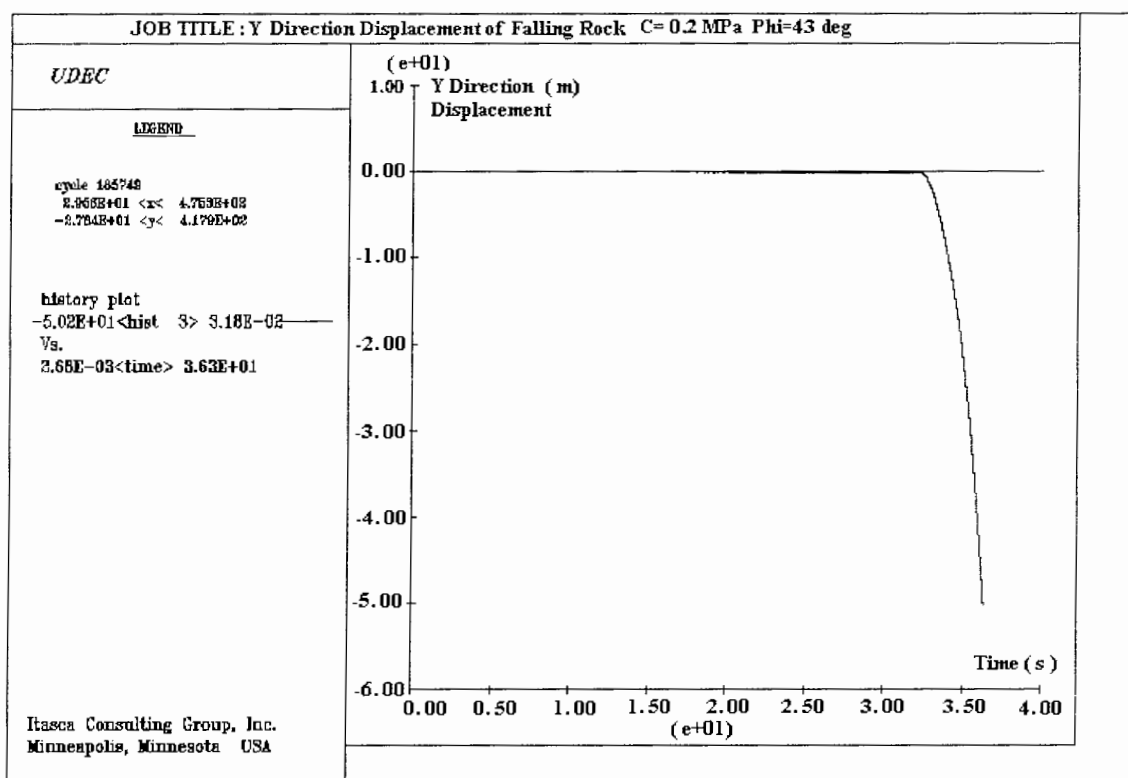


شکل ۳-۴ نمایش حرکت بلوک پس از اعمال نیروی زلزله

۱- Design Base Earthquake (DBE)



شکل ۴-۴ جابجایی افقی بلوک پس از اعمال نیروی زلزله



شکل ۴-۴ جابجایی قائم بلوک پس از اعمال نیروی زلزله

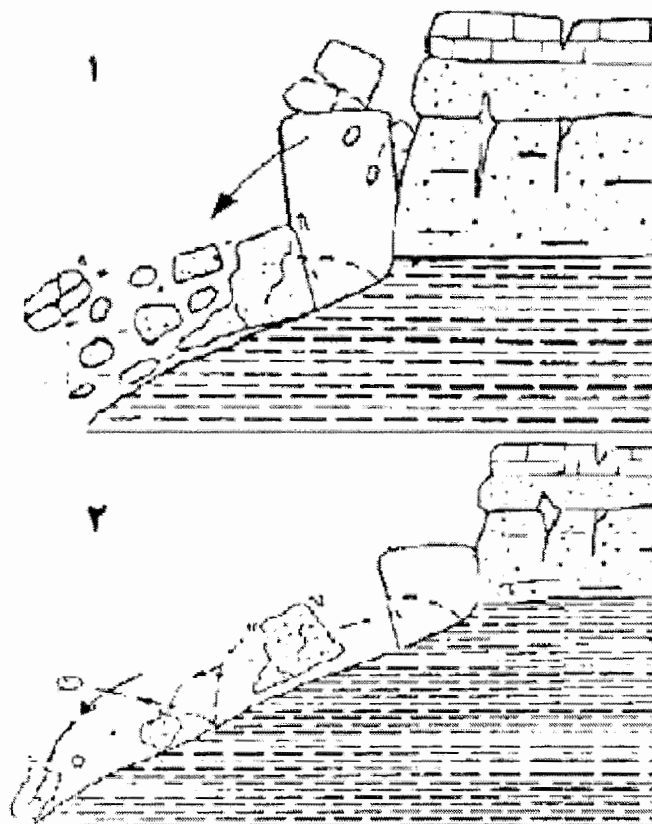
۴-۷ مکانیسم حرکت سنگ و مدهای ریزش

پدیده سقوط سنگ یک سیستم مکانیکی پیچیده‌ای است که به راحتی نمی‌توان رفتار آن را در فضا و زمان به درستی پیش‌بینی کرد. توده سنگ یا بلوک منفصل که با لغزش، چرخش یا سقوط از یک صخره شیب‌دار شروع به حرکت می‌کند، در طول مسیر به صورت جهش یا چرخش در شیروانی‌ها به سمت پایین حرکت می‌کند و زمانی که بلوک انرژی کافی خود را بر اثر ضربات مکرر یا اصطکاک از دست می‌دهد، در فاصله چند متری از دامنه شیروانی متوقف می‌شود [۶]. در حقیقت، رفتار سنگ بعد از جدا شدن از سطح شیروانی، ترکیبی از چهار فاز مختلف و اصلی از جمله لغزش، سقوط آزاد، چرخش و جهش قرار می‌گیرد. لغزش اغلب به حالت اولیه سقوط سنگ محدود می‌شود که در فواصل کوتاهی رخ می‌دهد (از یک سانتی‌متر تا چند متر) و معمولاً دارای سرعت کم، اصطکاک بالا و کاهش قابل توجهی انرژی همراه است [۱].

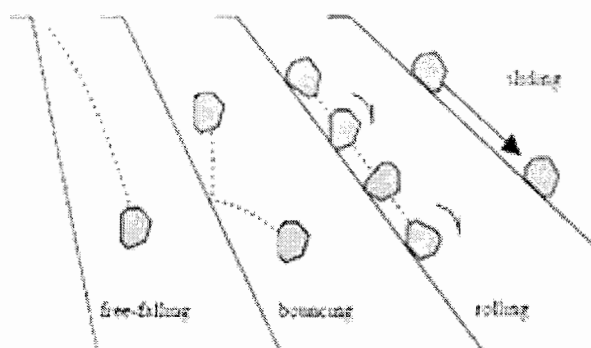
سقوط آزاد بر اثر نیروی جاذبه ایجاد می‌شود. این نوع از حالت حرکت در طول مسیر سهمی شکل خود، در ارتفاع و سرعت‌های خیلی بالا رخ می‌دهد. در سقوط آزاد انرژی پتانسیل به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود [۱].

چرخش نوع دیگری از حرکت در پدیده سقوط سنگ است که برای بلوک‌های استوانه‌ای و کروی در شیروانی‌های محدب شکل که دارای زبری کمی هستند رخ می‌دهد. یک توده سنگ در طول چرخش بسته به شیب و زاویه اصطکاک دینامیکی شیروانی‌ها، دارای سرعت‌های مختلفی است. در فرایند برخورد بلوک‌های سنگی به سطوح شیب‌دار، مسأله جهش سنگ نیز مطرح می‌شود. برخورد سنگ با سطح شیروانی سبب کاهش انرژی، تغییر در جهت حرکت و مسیر پرتابی سنگ می‌شود. برخورد سنگ بسته به خواص مکانیکی خاک و سنگ، زاویه ضربه، جرم و سرعت سنگ ممکن است از حالت الاستیک کامل به پلاستیک کامل تبدیل شود [۶]. در شکل ۴-۶ انواع مدهای ریزش به صورت شماتیک نشان داده شده است.

برای حالاتی که شیب تقریباً قائم باشد مدهای ریزش عموماً به صورت سقوط آزاد و جهش بر روی سطوح شیب‌دار اتفاق می‌افتد و برای حالاتی که شیب به صورت ملایم باشد مدهای ریزش عموماً چرخشی و لغزشی خواهد بود [۱۶].



(الف)



(ب)

شکل ۴-۶ حالات مختلف مد ریزش برای یک بلوک سنگی (الف) شمای کلی از سقوط یک بلوک سنگی [۷]

(ب) مدهای ریزش پدیده سقوط سنگ [۱۶]

۴-۸ مدل شبیه‌سازی تحلیلی و آماری پدیده سقوط سنگ منطقه

۴-۸-۱ مقدمه‌ای بر نرم‌افزار *Rocfall*

نرم‌افزار *Rocfall* یک برنامه تحلیلی-آماري دوبعدی است که توسط استیونز^۱ برای شبیه‌سازی سقوط سنگ ایجاد شده است. این برنامه بر مبنای روش ترکیبی توده‌ای-کلوخه‌ای و روش جسم صلب پایه‌گذاری شده است. استفاده از روش آنالیز احتمالی و متغیرهای تصادفی در پارامترهای جرم، شرایط اولیه و سرعت سنگ و همچنین در پارامترهای ضرایب ارتجاعی، زاویه اصطکاک و موقعیت رئوس شیب‌ها، در شبیه‌سازی این برنامه نتایج آماری مفیدی در اختیار قرار می‌دهد. خروجی‌های این برنامه به صورت منحنی‌ها و نمودارهای توزیع ماکزیمم سرعت، انرژی جنبشی، ارتفاع پرش سنگ و مکان توقف سنگ در سرتاسر طول شیب می‌باشد [۱۷].

برای انجام این تحلیل نیاز به دو پارامتر اساسی ضریب ارتجاعی نرمال^۲ و ضریب ارتجاعی مماسی^۳ می‌باشد. جنس موادی که شیب را تشکیل می‌دهند نسبتاً دارای تغییراتی از رأس تا انتهای شیب هستند. برای در نظر گرفتن خواص مواد شیب، خواص توده سنگ و تعیین چگونگی برخورد سنگ به سطح شیب از اصطلاحی به نام ضریب ارتجاعی و ضریب اصطکاک در شبیه‌سازی سقوط سنگ استفاده می‌شود [۱۸]. ضریب ارتجاعی همچنین در تعیین فاصله حرکت و ارتفاع پرش سنگ‌های در حال سقوط شبیه‌سازی شده نقش به سزایی دارد و محاسبه مقدار دقیق آن نتایج شبیه‌سازی را صحیح‌تر می‌کند [۱۹].

۱- Stevens

۲- Coefficient of normal restitution

۳- Coefficient of tangential restitution

۴-۸-۲ مبنای فرضیات در تئوری *Rocfall*

در این برنامه هر بلوک سنگی به عنوان یک توده یک پارچه مدل می‌شود. این توده‌سنگ‌ها ممکن است یک دایره خیلی کوچک یا یک توده مستطیلی باشند که هیچ برخوردی بین آن‌ها وجود ندارد و تنها برخورد آن‌ها به سطح شیب‌دار یا موانع موجود در شیب‌ها خواهد بود.

۱. جرم سنگ در معادلات محاسبه حرکت سنگ‌ها استفاده نمی‌شود ولی در نتایج محاسبات انرژی جنبشی سنگ تأثیر دارد. این جرم در شروع شبیه‌سازی با یک مقدار معین یا توزیع تصادفی نمونه‌های دارای پتانسیل ریزشی مشخص می‌شود و در طول شبیه‌سازی ثابت می‌ماند.

۲. سنگ‌ها در طول شبیه‌سازی شکسته یا به قسمت‌های مختلف تقسیم نمی‌شوند.

۳. از مقاومت اصطکاکی هوا در محاسبه معادله حرکت صرف‌نظر می‌شود. وجود مقاومت هوا در معادلات، تحلیل‌ها را پیچیده می‌سازد و تأثیر کمی در خروجی شبیه‌سازی دارد.

۴. شیب‌ها به عنوان مدل پیوسته‌ای از قطعات خطی ایجاد می‌شوند که انتهای هر قطعه به قطعه دیگر متصل است. خواص هر قطعه به صورت جداگانه تعریف می‌شود.

این برنامه از سه الگوریتم برای آنالیز و محاسبه حرکت سنگ استفاده می‌کند که عبارتند از الگوریتم ذره، الگوریتم جهش و الگوریتم سقوط. الگوریتم ذره همه پارامترهای شبیه‌سازی را دریافت می‌کند و شرایط اولیه را برای الگوریتم سقوط و الگوریتم جهش فراهم می‌کند. الگوریتم جهش برای محاسبه حرکت سنگ در حالت جهش و الگوریتم سقوط برای محاسبه حرکت، در زمانی که سنگ با سطح شیب‌دار برخورد و به سمت پایین حرکت می‌کند، استفاده می‌شود [۱۶].

از تلاقی خط شیب مقطع مدل شده و مسیر سهمی شکل توده‌سنگ در لحظه برخورد و حل معادله درجه دوم می‌توان سرعت، انرژی و ارتفاع پرش را در هر نقطه تعیین کرد. توده‌سنگ‌هایی که به انتهای مسیر می‌رسند با استفاده از این پارامترها می‌توان برای مقابله با آن‌ها تمهیدات لازم را انجام داد [۱۷].

۴-۷-۳ مبانی حرکت توده سنگ و مدهای ریزش در *Rocfall*

مکانیسم حرکت توده سنگ بعد از جدایش در طول مسیر از قوانین فیزیکی پیروی می کند. شبیه سازی چنین رفتار حرکتی، نیاز به استفاده از معادلات سرعت و انرژی برای توده سنگ دارد. با توجه به سرعت اولیه توده سنگ و برخورد آن با سطح شیروانی، مسیری سهمی شکلی ایجاد می شود که در نهایت پس از چندین برخورد و میرا شدن انرژی در نقطه ای در پایین شیب متوقف می شود. نقطه و زمان برخورد توده سنگ از تلاقی این سهمی و خط شیب از رابطه ۴-۱ محاسبه می شود [۱۷].

معادله پارامتری خط شیب را می توان به صورت زیر نوشت:

$$x - X_1 = u(X_2 - X_1) \quad (۴-۱)$$

$$x - X_1 = u(X_2 - X_1)$$

$$y - Y_1 = u(Y_2 - Y_1) \quad u \in [0,1]$$

که در آن X_1, Y_1 مختصات اولین نقطه از خط و X_2, Y_2 مختصات دومین نقطه از خط می باشد.

معادله پارامتری مسیر سهمی شکل توده سنگ نیز به صورت رابطه (۴-۲) است:

$$x = V_{x0}t + X_0 \quad (۲-۴)$$

$$y = -\frac{1}{2}gt^2 + V_{y0}t + Y_0 \quad t \in [0, \infty]$$

که در آن g شتاب نیروی ثقل معادل 9.81 m/s^2 ، X_0, Y_0 موقعیت اولیه توده سنگ، V_{x0}, V_{y0} سرعت اولیه توده سنگ است.

معادله پارامتری سرعت توده سنگ در هر نقطه به صورت رابطه زیر است [۱۷] و [۲۴]:

$$V_{xB} = V_{x0} \quad (۳-۴)$$

$$V_{yB} = V_{y0} + gt$$

که V_{xB}, V_{yB} سرعت سنگ در هر نقطه در مسیر سهمی شکل قبل از برخورد می باشد. از تلاقی خط شیب و مسیر سهمی شکل توده سنگ در لحظه برخورد و حل معادله درجه دوم می توان سرعت، انرژی و ارتفاع پرش را در هر نقطه تعیین کرد.

این سیکل محاسبات تا زمانی که توده سنگ متوقف نشود تکرار می شود.

$$\left[-\frac{1}{2}g\right]t^2 + [V_{Y0} - qV_{X0}]t + [Y_0 - Y_1 + q(X_1 - X_0)] = 0 \quad (4-4)$$

$$q = \frac{(Y_2 - Y_1)}{(X_2 - X_1)} \quad \text{شیب خط}$$

که در آن می باشد.

از حل معادله درجه دوم فوق زمان برخورد توده سنگ به شیب به صورت رابطه ۴-۵ به دست می آید:

$$t = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad (5-4)$$

$$a = \frac{1}{2}g$$

$$b = V_{Y0} - qV_{X0}$$

$$c = Y_0 - Y_1 + q(X_1 - X_0)$$

مؤلفه های سرعت در راستای عمود و مماس بر شیب قبل از ضربه به صورت زیر محاسبه می شود:

$$V_{NB} = V_{YB} \cdot (\cos \theta) - V_{XB} \cdot (\sin \theta) \quad (6-4)$$

$$V_{TB} = V_{YB} \cdot (\sin \theta) + V_{XB} \cdot (\cos \theta)$$

V_{TB} و V_{NB} به ترتیب سرعت عمودی و سرعت مماس بر شیب می باشند.

سرعت سنگ بعد از ضربه نیز با دخالت ضرایب ارتجاعی به صورت رابطه ۴-۷ محاسبه می شود:

$$V_{NA} = R_N \cdot V_{NB} \quad (7-4)$$

$$V_{TA} = R_T \cdot V_{TB}$$

که در آن $R_T, R_N \in [0,1]$ به ترتیب ضرایب ارتجاعی نرمال و مماسی، V_{TA}, V_{NA} به ترتیب

سرعت عمودی و مماسی توده سنگ بعد از ضربه می باشد.

$$V_{XA} = V_{NA} \cdot (\sin \theta) + V_{TA} \cdot (\cos \theta) \quad (8-4)$$

$$V_{YA} = V_{TA} \cdot (\sin \theta) - V_{NA} \cdot (\cos \theta)$$

که V_{YA}, V_{XA} سرعت سنگ در مسیر سهمی شکل بعد از برخورد می باشد.

انرژی سنگ هم متناسب با سرعت قبل و بعد از ضربه از رابطه ۴-۹ به دست می آید.

$$E_B = \frac{1}{2}mV_B^2 \quad (9-4)$$

$$E_A = \frac{1}{2}mV_A^2$$

E_A, E_B انرژی توده سنگ قبل و بعد از برخورد به سطح شیب‌دار است.

سیکل محاسبات در الگوریتم جهش تا زمانی که شرایط برای جهش توده‌سنگ امکان‌پذیر باشد تکرار می‌شود. زمانی که توده‌سنگ در روی شیب حرکت می‌کند در حالت چرخش قرار می‌گیرد که رفتار این پدیده نیز با توجه به زاویه شیب و زاویه اصطکاک و با قوانین حرکت بیان می‌شود [۱۷]. در حالتی که زاویه شیب بزرگتر از زاویه اصطکاک باشد ($\theta > \phi$) نیروی محرک بیشتر از نیروی پایدار می‌شود و توده سنگ با افزایش سرعت به سمت پایین حرکت می‌کند. در این حالت با توجه به رابطه ۴-۱۰ داریم:

$$V_{EXIT} = \sqrt{V_0^2 - 2sgk} \quad k = \pm \sin \theta - \cos \theta \cdot \tan \phi \quad (10-4)$$

V_{EXIT} سرعت سنگ در هر نقطه در طول شیب، V_0 سرعت اولیه توده سنگ به صورت مماس بر سطح شیب‌دار، s فاصله موقعیت اولیه تا نقطه مورد نظر در شیب (۱) در حالتی که زاویه شیب برابر زاویه اصطکاک باشد ($\theta = \phi$) توده سنگ با سرعت یکنواخت بر روی سطح شیب‌دار حرکت می‌کند.

$$V_{EXIT} = V_0 \quad (11-4)$$

در حالتی که زاویه شیب کوچک‌تر از زاویه اصطکاک باشد ($\theta < \phi$) سرعت توده‌سنگ کاهش می‌یابد و در جایی متوقف می‌شود. فاصله موقعیت اولیه توده سنگ تا نقطه توقف آن با قرار دادن $V_{EXIT} = 0$ در رابطه ۴-۱۰ به دست می‌آید:

$$s = \frac{V_0^2}{2gk} \quad (11-4)$$

که در آن s فاصله موقعیت اولیه توده سنگ تا نقطه توقف می‌باشد.

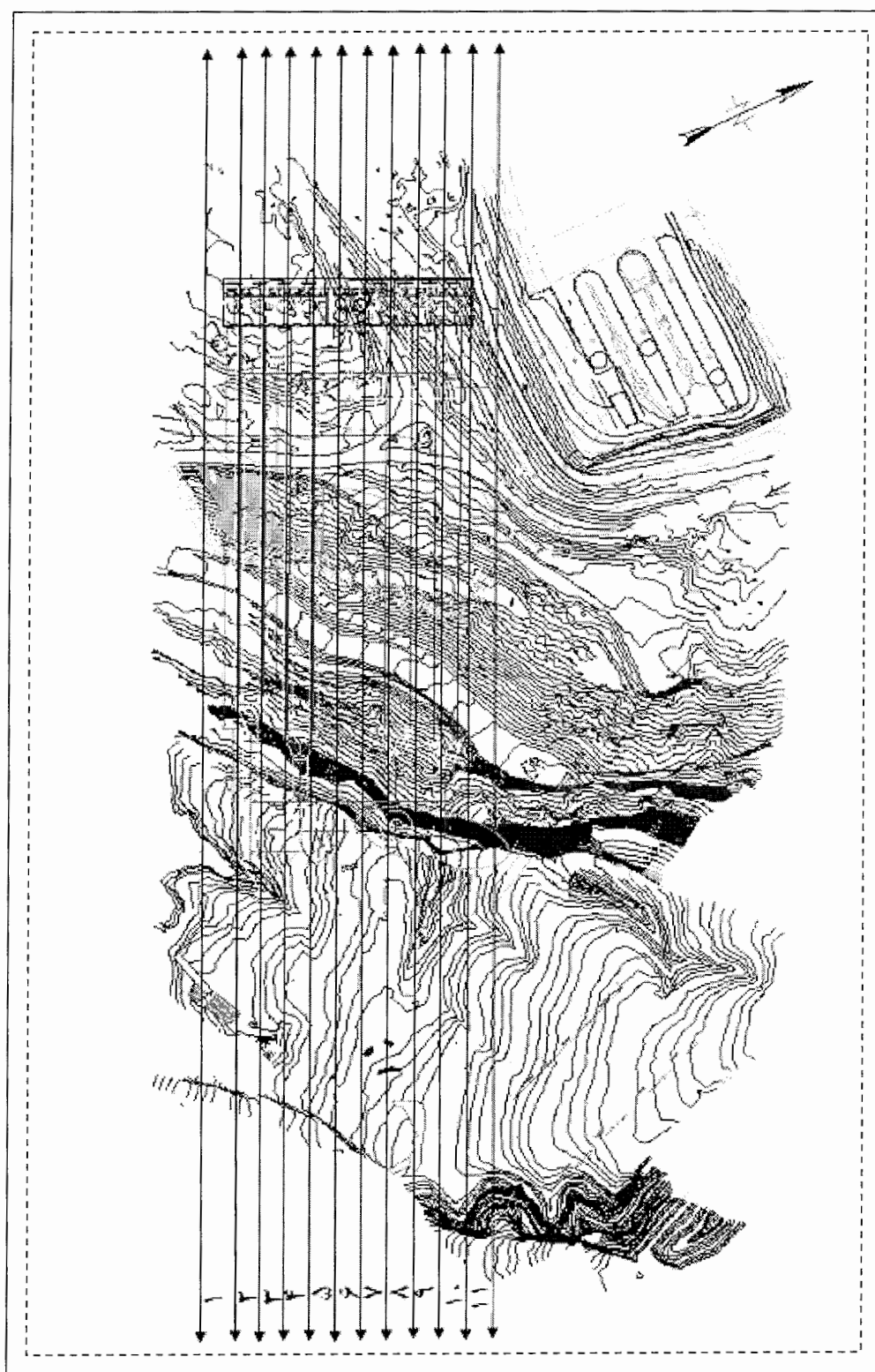
۴-۱۰ مقاطع عرضی محدوده مورد مطالعه

برای مدل کردن هندسه شیب با توجه به وضعیت توپوگرافی، شیب تقریباً قائم دیواره در ترازهای فوقانی، پراکندگی بلوک‌ها و وجود شرایط متفاوت در بخش‌های مختلف محدوده، مقاطع مورد نیاز جهت تحلیل شیب‌ها با استفاده از نقشه‌های توپوگرافی موجود به صورت شکل ۴-۸ ترسیم شده است. مقاطع ترسیم شده با ارتفاع ۳۲۰ متر نسبت به تراز کف نیروگاه و طول تقریبی ۴۵۰ متر تا ساخت‌گاه نیروگاه، دیواره مشرف به نیروگاه را پوشش می‌دهند.

تفاوت در شکل و حجم بلوک‌ها و از طرفی شرایط متفاوت هندسه شیب در این مقاطع سبب شده است تا نتایج شبیه‌سازی برای هر یک به طور جداگانه بررسی شود.

برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار *Rocfall*^{4.03} مقاطعی که بلوک‌های سنگی در آنها پتانسیل ریزش بیشتری دارند، مدل شده‌اند. از بین این مقاطع، مقاطع شماره‌های ۷، ۶، ۴ و ۹ برای این شبیه‌سازی انتخاب و با توجه به شکل بلوک‌هایی که در ترازهای فوقانی آنها وجود دارند نتایج خروجی این شبیه‌سازی به صورت نمودارهای انرژی جنبشی کل و سرعت انتقالی و موقعیت انتهایی بلوک‌های سنگی در طول حرکت برای هریک آورده شده است. به طور کلی محدوده مورد مطالعه از چهار لایه افقی کنگلومرای بختیاری با ضخامتی در حدود ۲۰ تا ۴۰ متر تشکیل شده است.

برای تعیین دو پارامتر ضریب ارتجاعی نرمال و ضریب ارتجاعی مماسی می‌بایست یک سری مطالعات آزمایشگاهی انجام می‌گرفت که به دلیل عدم وجود این داده‌ها و امکانات آزمایشگاهی برای تحلیل مورد نظر از تجربیات موردی ارائه شده توسط سازندگان نرم افزار استفاده شده است. (مقادیر مورد نظر در پیوست شماره ۲ نشان داده شده است). پس از تطابق شرایط توده‌سنگ ساخت‌گاه طرح با توصیه‌های ارائه شده، مقادیر مورد نظر ضرایب ارتجاعی نرمال و مماسی، برای تمام مقاطع به صورت $R_T = 0.185$ و $R_N = 0.35$ در نظر گرفته شده است.



شکل ۴-۸ مقاطع عرضی بر روی نقشه توپوگرافی محدوده مورد مطالعه

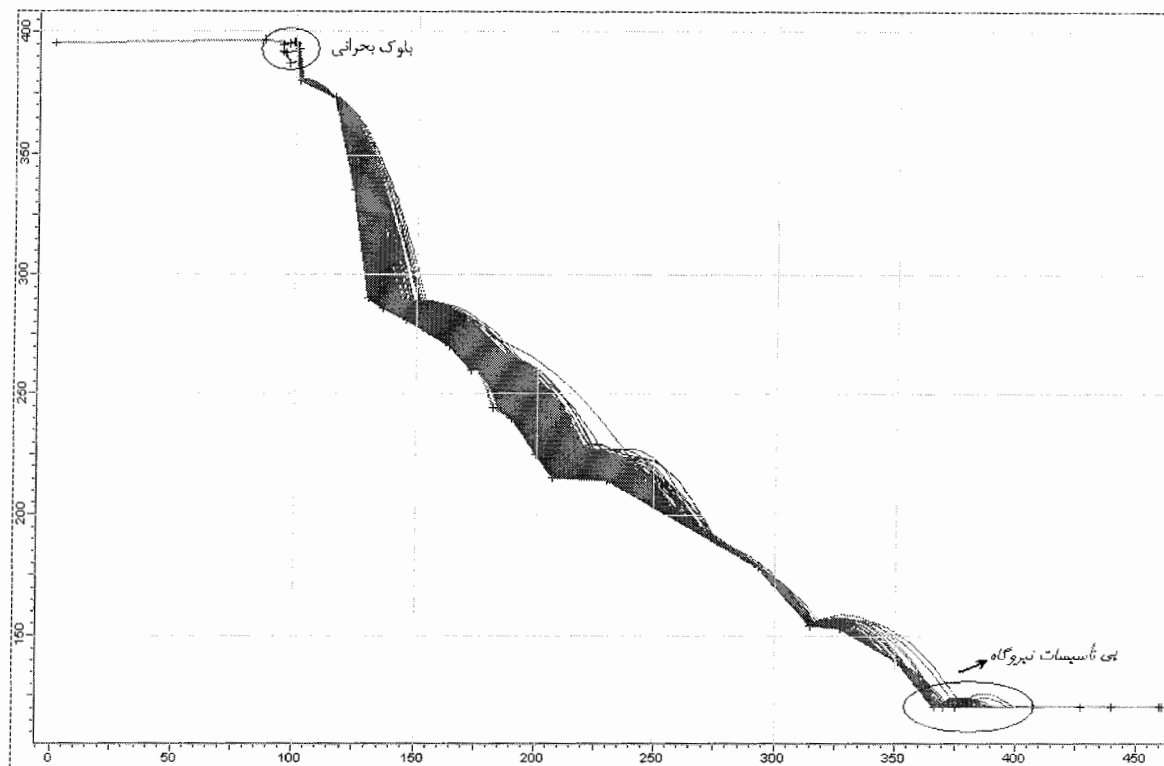
۴-۱۱ شبیه‌سازی مسیر بلوک‌سنگی محدوده مورد مطالعه توسط $Rocfall^{4.03}$

۴-۱۱-۱ مقطع شماره ۴

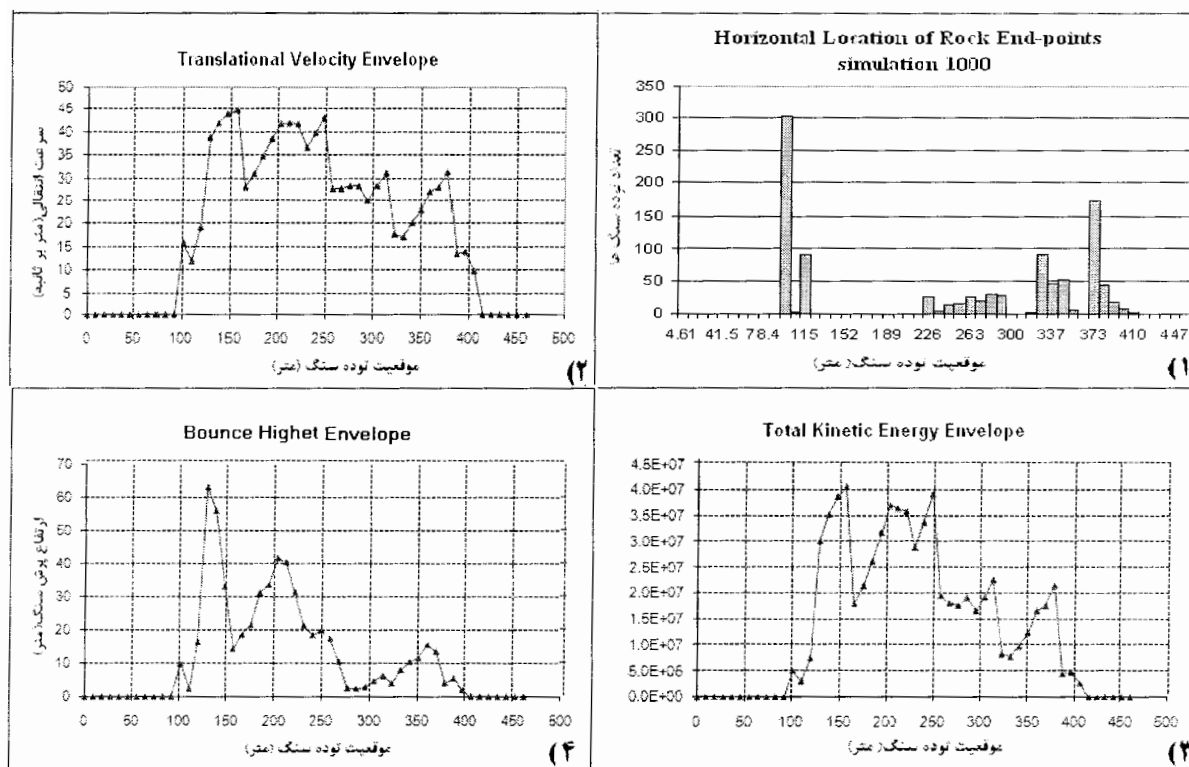
در این مقطع بلوک ناپایدار بحرانی در تراز بالای ۳۸۰ متر بر روی لبه صخره قرار دارد. حجم بلوک مدل شده در این شبیه‌سازی با توجه به وضعیت سه ناپیوستگی معادل $2/5 \times 2 \times 4/5$ متر است. یک لایه ناپیوستگی هم بین این بلوک وجود دارد که آن را به دو بخش ناپایدار تبدیل کرده است. شتاب اولیه برای شروع حرکت $2/6$ متر بر ثانیه معادل شتاب مبنای طرح در شرایط زلزله ($0/26 g$) در نظر گرفته شده است. همچنین در این شبیه‌سازی محاسبه پارامتر سرعت چرخشی برای بلوک بحرانی در طول مسیر، سبب شده است تا ارتفاع پرش سنگ به صورت واقعی‌تری محاسبه شود. نتایج شبیه‌سازی برای این مقطع به صورت چهار نمودار در شکل ۴-۹ آورده شده است.

نمودار ۱ شکل ۴-۱۰ بیان‌کننده نقاط انتهایی بلوک بحرانی است. همان‌طور که از این نمودار استنباط می‌شود توقف برخی از بلوک‌ها در ۱۰۰۰ بار شبیه‌سازی در موقعیت تأسیسات نیروگاه، مؤید پتانسیل ریزش این بلوک بحرانی در این مقطع است. در نمودار ۲ و ۳ ماکزیمم سرعت و انرژی جنبشی از این تعداد شبیه‌سازی به دست آمده است. با توجه به مدهای ریزش و برخورد بلوک در طول مسیر به سطح شیب‌دار، سرعت و انرژی جنبشی آن در موقعیت نیروگاه کاهش یافته و با سرعت میانگین ۱۵ متر بر ثانیه به تأسیسات نیروگاه برخورد می‌کند.

همان‌طور که در نمودار ۴ ارتفاع پرش سنگ نشان داده شده است، بلوک پس از برخورد اولیه به سطح شیب‌دار که با بیشترین ارتفاع پرش همراه است در نقاط دیگر مسیر، به طور قابل ملاحظه‌ای از ارتفاع پرش کاسته می‌شود و نهایتاً با ارتفاع ۵ متر به نیروگاه می‌رسد.



شکل ۴-۹- شبیه‌سازی مسیر بلوک سنگ منفصل در مقطع شماره ۴ توسط $Rocfall^{4.03}$



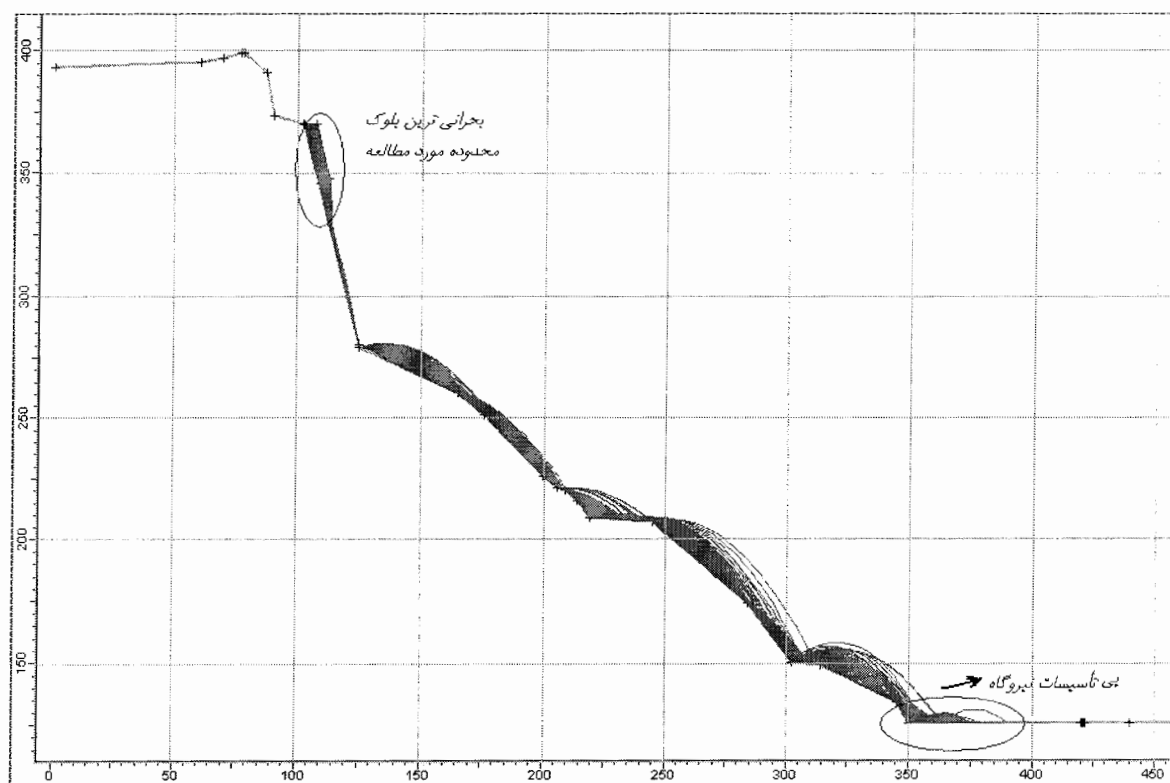
شکل ۴-۱۰- نتایج ۱۰۰۰ بار شبیه‌سازی موقعیت

بلوک سنگی در طول مسیر در مقطع شماره ۴، (۱) نمودار نقاط انتهایی بلوک سنگ، (۲) نمودار سرعت انتقالی سنگ، (۳) نمودار انرژی جنبشی کل، (۴) نمودار ارتفاع پرش سنگ

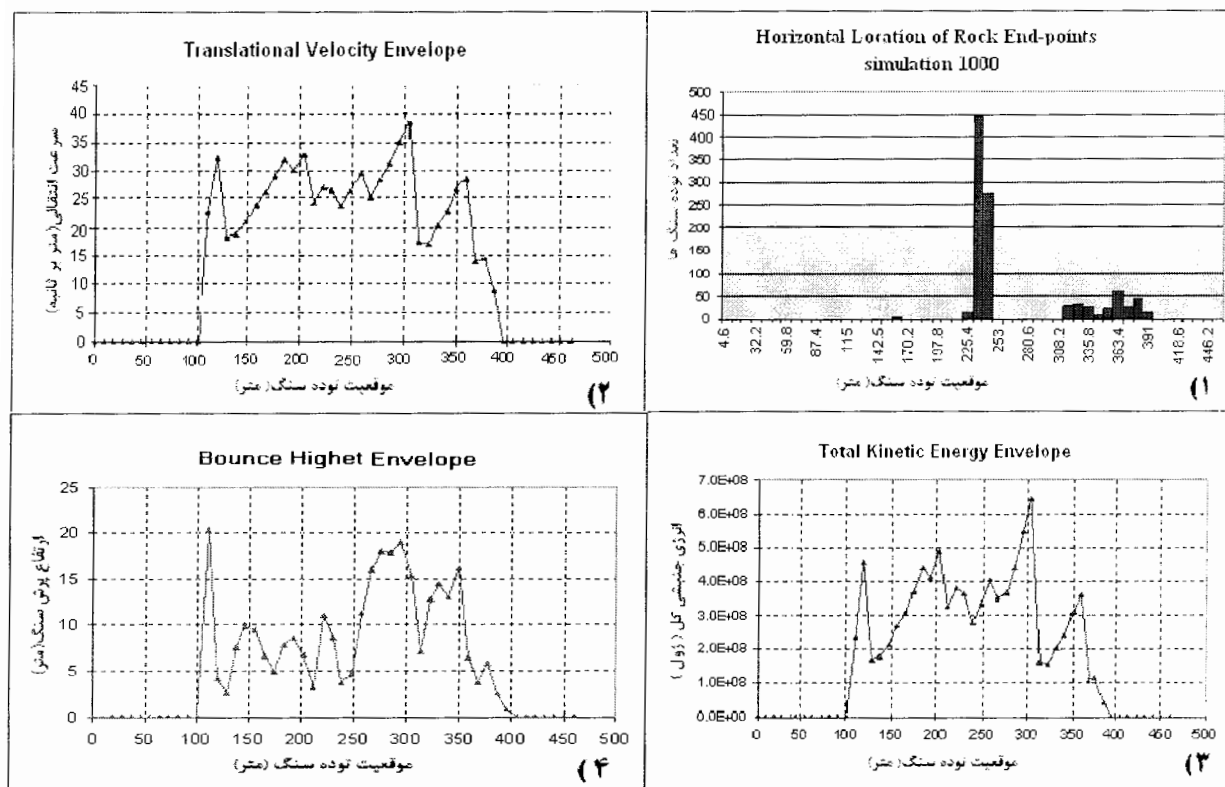
۴-۱۱-۲ مقطع شماره ۶

بلوک ناپایدار بحرانی در مقطع شماره ۶، در تراز بین ۲۸۰ و ۳۸۰ متر واقع در دیواره سطح شیب‌دار توسط سه ناپیوستگی به حجم معادل $3/5 \times 4 \times 9/5$ متر ایجاد شده است. شتاب اولیه برای شروع حرکت این بلوک نیز همانند سایر بلوک‌های بحرانی منطقه $2/6$ متر بر ثانیه معادل شتاب مبنای طرح در شرایط زلزله ($0/26g$) در نظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی نیز محاسبه سرعت چرخشی برای بلوک بحرانی در طول مسیر، سبب شده است تا ارتفاع پرش سنگ به صورت واقعی‌تری محاسبه شود. این بلوک با داشتن حجم زیاد و وضعیت قرارگرفتن با توجه به سه ناپیوستگی که عامل جدایش آن شده‌اند بحرانی‌ترین بلوک محدوده مورد مطالعه است و با حساسیت بیشتری مورد توجه قرار می‌گیرد.

توجه به نمودار ۱ شکل ۴-۱۲ و توقف برخی از بلوک‌ها در ۱۰۰۰ بار شبیه‌سازی در موقعیت تأسیسات نیروگاه، مؤید این امر است که سقوط این بلوک بحرانی در این مقطع سبب خساراتی به تأسیسات نیروگاه می‌شود. در نمودار ۲ و ۳ ماکزیمم سرعت و انرژی جنبشی در این تعداد شبیه‌سازی با توجه به مدهای ریزش و برخورد بلوک در طول مسیر به سطح شیب‌دار دارای نوسان کمی است. بلوک در موقعیت نیروگاه با میانگین سرعت ۱۰ متر بر ثانیه به تأسیسات نیروگاه برخورد می‌کند. در نمودار ۴ از ارتفاع پرش سنگ پس از برخورد مکرر بلوک به سطح شیب‌دار کاسته شده و نهایتاً با میانگین ارتفاع ۵ متر به نیروگاه می‌رسد.



شکل ۴-۱۱- شبیه‌سازی مسیر بلوک سنگ منفصل در مقطع شماره ۶ توسط Rocfall^{4.03}



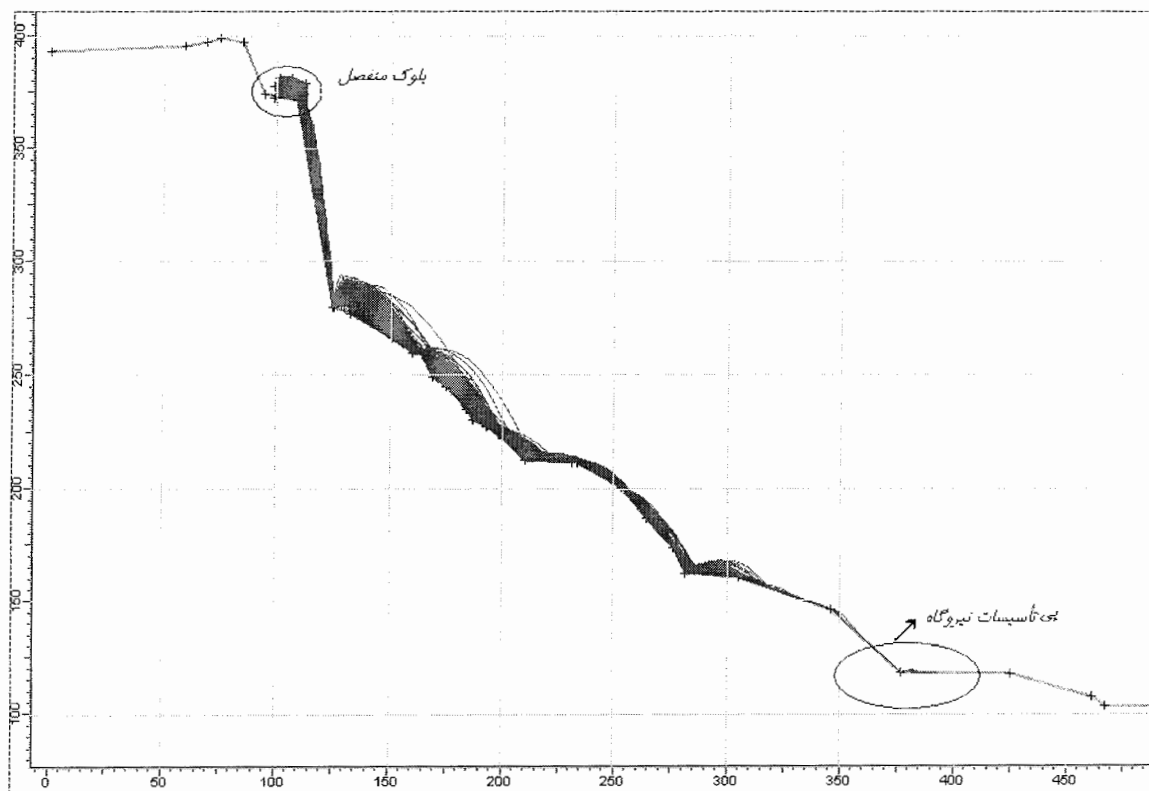
شکل ۴-۱۲- نتایج ۱۰۰۰ بار شبیه‌سازی موقعیت بلوک سنگی در طول مسیر در مقطع شماره ۶، (۱) منحنی نقاط انتهایی بلوک سنگ، (۲) منحنی سرعت انتقالی سنگ، (۳) منحنی انرژی جنبشی کل، (۴) منحنی ارتفاع پرش سنگ

۴-۱۱-۳ مقطع شماره ۷

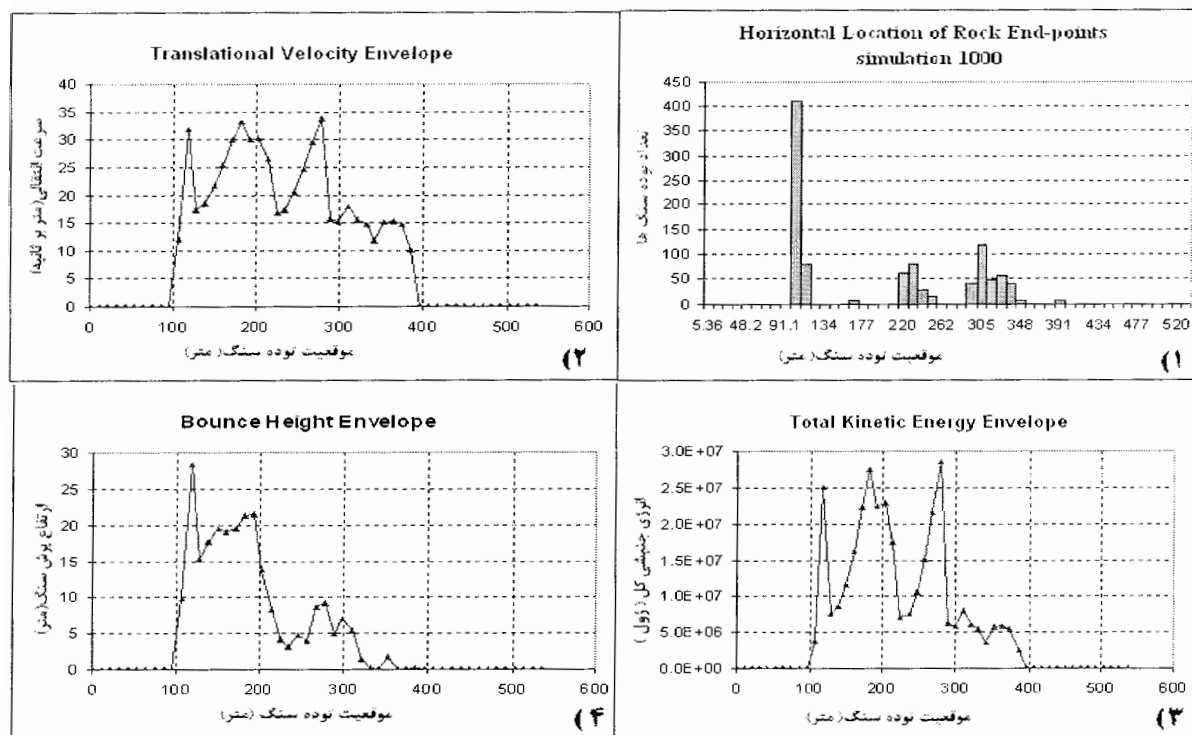
در مقطع شماره ۷، بلوک‌های منفصل از سطح شیب‌دار جدا شده و با اندک جابجایی در تراز ۳۸۰ متر و بر روی لبه دیواره قرار گرفته‌اند. برای شبیه‌سازی در این مقطع، یکی از این بلوک‌ها که از لحاظ سقوط دارای شرایط بحرانی است انتخاب شده است. این بلوک دارای حجمی معادل $3/5 \times 3/5 \times 3/5$ متر است. شتاب اولیه برای شروع حرکت این بلوک نیز همانند سایر بلوک‌های بحرانی منطقه $2/6$ متر بر ثانیه معادل شتاب مبنای طرح در شرایط زلزله ($0/26g$) در نظر گرفته شده است. نمودار ۱ موقعیت انتهایی توقف این بلوک را در ۱۰۰۰ بار شبیه‌سازی با توجه به منفصل بودن و وضعیت قرارگرفتن آن در لبه دیواره نشان می‌دهد. همانطور که از نتایج شبیه‌سازی استنباط می‌شود از سرعت و انرژی بالای بلوک در برخوردهای اولیه با سطح شیب‌دار کاسته شده و بلوک قبل از رسیدن به تأسیسات نیروگاه متوقف شده و خسارت چندانی به بار نمی‌آورد.

در نمودار ۲ و ۳ شکل ۴-۱۴ ماکزیمم سرعت و انرژی جنبشی در این تعداد شبیه‌سازی با توجه به مدهای ریزش و برخورد بلوک در طول مسیر به سطح شیب‌دار نشان داده شده است. بلوک در موقعیت نیروگاه با میانگین سرعت و انرژی جنبشی به ترتیب برابر با ۱۰ متر بر ثانیه و ۱۵ مگا ژول به تأسیسات نیروگاه برخورد می‌کند.

همانطور که در نمودار ۴ شکل ۴-۱۴ مشاهده می‌شود ارتفاع پرش سنگ پس از برخورد مکرر بلوک به سطح شیب‌دار کاسته شده و نهایتاً با میانگین ارتفاع ۵ متر در تراز بالاتر از تأسیسات نیروگاه متوقف می‌شود.



شکل ۴-۱۳- شبیه‌سازی مسیر بلوک سنگ منفصل در مقطع شماره ۷ توسط $Rocfall^{4.03}$



شکل ۴-۱۴- نتایج ۱۰۰۰ بار شبیه‌سازی موقعیت بلوک سنگی در طول مسیر در مقطع شماره ۷، (۱) منحنی نقاط انتهایی بلوک سنگ (۲) منحنی سرعت انتقالی سنگ (۳) منحنی انرژی جنبشی کل (۴) منحنی ارتفاع پرش سنگ

۴-۱۱-۴ مقطع شماره ۹

بلوک ناپایدار بحرانی در این مقطع در تراز بالای ۳۸۰ متر واقع بر دیواره صخره بالایی توسط سه ناپیوستگی به حجم معادل $4/5 \times 3 \times 5/5$ متر ایجاد شده است. شتاب اولیه برای شروع حرکت این بلوک نیز همانند سایر بلوک‌های بحرانی منطقه $2/6$ متر بر ثانیه معادل شتاب مبنای طرح در شرایط زلزله ($0/26 g$) در نظر گرفته شده است. در این شبیه‌سازی نیز محاسبه سرعت چرخشی برای بلوک بحرانی در طول مسیر، سبب شده است تا ارتفاع پرش سنگ به صورت واقعی‌تر محاسبه شود. این بلوک، با توجه به وضعیت سه ناپیوستگی که عامل جدایش این بلوک شده‌اند، به صورت ستونی قرار گرفته شده است.

توقف انتهایی برخی از بلوک‌ها در ۱۰۰۰ بار شبیه‌سازی در موقعیت تأسیسات نیروگاه مؤید این امر است که سقوط این بلوک بحرانی در این مقطع سبب خسارات جزیی در طرف چپ تأسیسات نیروگاه می‌شود. نتایج ماکزیمم سرعت و انرژی جنبشی در شبیه‌سازی در نمودار ۲ و ۳ شکل ۴-۱۶ بیان‌کننده کاهش سرعت و انرژی بلوک در طول مسیر پس از برخورد اولیه به سطح شیب‌دار خواهد بود. میانگین سرعت و انرژی جنبشی بلوک در موقعیت نیروگاه به ترتیب برابر ۱۰ متر بر ثانیه و ۵ مگا ژول به تأسیسات نیروگاه برخورد می‌کند.

در نمودار ۴ نیز ارتفاع پرش سنگ پس از برخورد مکرر بلوک به سطح شیب‌دار کاسته شده و نهایتاً در محل نیروگاه با کمترین ارتفاع پرش خود به تأسیسات برخورد می‌کند.

۴-۱۲ نتیجه شبیه‌سازی تحلیلی رفتار سقوط سنگ منطقه

نتایج شبیه‌سازی در ۴ مقطع، برای بلوک‌های بحرانی انتخاب شده مؤید سقوط بلوک‌ها در شرایط زلزله مبنای طرح در دیواره مشرف به نیروگاه و برخورد آن‌ها به تأسیسات نیروگاه می‌باشد. بلوک‌ها پس از جدایش در برخوردهای اولیه به سطح شیب‌دار و توده‌سنگ‌های منفصلی که از قبل در منطقه وجود دارند، سرعت و انرژی خود را از دست داده و با شدت کمتری نسبت به حالت اولیه حرکت، به تأسیسات نیروگاه می‌رسند. از این رو انجام تمهیدات لازم برای جلوگیری از برخورد بلوک‌ها به نیروگاه امری اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. در فصل ششم، روش جلوگیری از برخورد این بلوک‌ها بیشتر مورد بررسی قرار گرفته است.

۴-۱۳ محدودیت شبیه‌سازی در *Rocfall*

هر چند نتایج شبیه‌سازی رفتار توده‌سنگ در نرم‌افزار *Rocfall* با در نظر گرفتن قوانین و معادلات حرکت بیان شده است و نتایج تحلیلی و آماری مفیدی در اختیار قرار می‌دهد اما محدودیت‌هایی در آن وجود دارد که برای نزدیک کردن رفتار توده‌سنگ به رفتار واقعی باید آن‌ها را مد نظر قرار داد. عدم توجه به تأثیر شکل و نحوه خردایش توده سنگ بر اثر برخورد و ضربه با سطوح دیواره در طول مسیر، عدم انتخاب صحیح و دقیق مقادیر ضرایب ارتجاعی، نادیده‌گرفتن رفتار دینامیکی در شروع حرکت و در طول مسیر و عدم شبیه‌سازی سه‌بعدی رفتار توده‌سنگ سبب شده است تا رفتار عددی و دینامیکی این پدیده بیشتر مورد توجه قرار گیرد. برای بهبود نتایج شبیه‌سازی با این روش و مقایسه آن، رفتار پدیده سقوط سنگ محدوده مورد مطالعه به روش عددی نیز مورد مطالعه قرار گرفته است که در فصل پنجم به طور کامل به آن پرداخته شده است.

۵-۱ مقدمه

امروزه استفاده از روش‌های عددی در مدل‌سازی محیطی ژئومکانیکی (سنگی و خاکی)، یکی از روش‌های رایج مهندسی مکانیک سنگ به شمار می‌رود. در این روش با بررسی اثر نیرو و بارگذاری در تعداد معینی از نقاط محیط، می‌توان میزان تغییر شکل‌های سایر نقاط را به دست آورد. معمولاً روش‌های عددی که در این مدل‌سازی‌ها استفاده می‌شوند عبارتند از: روش المان محدود، روش المان مرزی، روش المان مجزا، روش تفاضل محدود. البته در بعضی موارد روش‌های ترکیبی نیز مورد استفاده قرار گرفته و برنامه‌های مختلفی بر اساس آنها ایجاد شده‌اند [۳].

در حال حاضر روش المان مجزا با توجه به ماهیت ناپیوسته بودن محیط‌های سنگی روش کاملاً مناسبی برای بررسی تغییر شکل و شکست توده‌های سنگی می‌باشد. در این روش توده سنگ به صورت یک محیط ناپیوسته در نظر گرفته می‌شود. بنابراین تأثیر عوارض ساختاری نظیر درزه‌های سنگی، لایه‌بندی، گسل‌ها و انواع ناپیوستگی‌ها قابل بررسی است. وقتی محیط تحت بارگذاری قرار می‌گیرد تغییرات نیرو در سطوح هم‌جوار با زمان شروع شده و معادلات تعادل دینامیکی برای هر المان به صورت تکراری حل می‌شود تا اینکه شرائط مرزی مسأله برآورده شود. در حالت پیشرفته‌تر این روش، المان‌ها می‌توانند دارای هر شکل دلخواهی باشند و همچنین می‌توانند به صورت بلوک‌های صلب یا تغییرشکل‌پذیر در نظر گرفته شوند [۳].

پارامترهای مورد نیاز برای توصیف مصالح و ناپیوستگی‌های توده‌سنگ در این روش باید از دقت بالایی برخوردار باشند و علاوه بر این، پارامترهای ویژه‌ای نظیر ضریب میرایی سیستم از قبل بایستی تعیین شده باشند. زمان محاسبه در این روش نیز در مقایسه با روش‌های دیگر بیشتر است.

در شبیه‌سازی سقوط سنگ به روش المان مجزا، توده‌سنگ به وسیله مجموعه‌ای از المان‌های کروی (در حالت سه‌بعدی) به صورت هم‌شکل و مجزا مدل می‌شوند. این شبیه‌سازی توسط نرم‌افزار *PFC* به سبب استفاده از همین پارامتر برای مدل کردن توده‌سنگ و حرکت دینامیکی این المان‌ها در طول مسیر انجام می‌شود. در این تکنیک، حرکت المان‌ها نسبت به یکدیگر مستقل بوده و ممکن است تنها واکنش بین آنها تماس با یکدیگر باشد. رفتار مکانیکی چنین سیستمی از طریق حرکت هر المان و نیروهای رفتاری درون ذرات در نقاط تماس با استفاده از معادلات حرکت توصیف می‌شود. در این روش توده‌سنگ می‌تواند شکل پیچیده‌ای داشته باشد و در برخورد با سطح شیب‌دار به قطعات کوچک‌تری تبدیل شود و به سمت پایین حرکت نماید. همچنین اندازه حرکت زاویه‌ای سنگ نیز در این روش در نظر گرفته می‌شود. در ادامه این فصل بیشتر به بررسی این موضوع پرداخته شده است [۱۶].

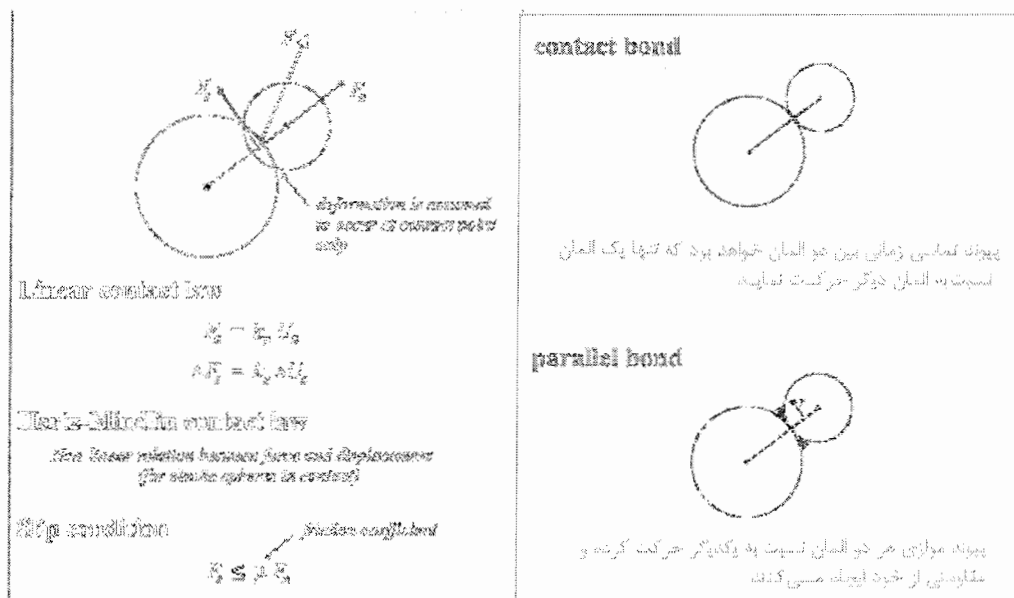
۵-۲ معرفی نرم‌افزار شبیه‌سازی عددی *PFC*

نرم‌افزار *PFC*^۱ (برنامه حرکت ذرات) از مجموعه نرم‌افزارهای گروه *ITASCA* است که اولین بار در سال ۱۹۹۵ برای محیط‌های ناپیوسته تهیه شده است. این برنامه برای مدل کردن حرکت و واکنش بین مجموعه‌ای از المان‌ها با هر اندازه و شکل دلخواه استفاده می‌شوند. استفاده از روش المان مجزا در مبنای کار این نرم‌افزار این امکان را فراهم می‌کند که امواج تنش دینامیکی به صورت مناسب در این مجموعه المان‌ها توزیع شود. المان‌ها به صورت جسم صلب و یک‌پارچه هستند اما در نقاط برخورد با سطح یا مانع، پیوندهای بین آنها جدا شده و شکستگی در این مجموعه المان‌ها ایجاد می‌شود. رفتار ماکروسکوپی المان‌ها مثل جابجایی، آماس و شکستگی برای یک شبیه‌سازی قوی و انعطاف‌پذیر از اهمیت خاصی در این نرم‌افزار برخوردار است. با بارگذاری تحت شرایط دینامیکی بر روی این المان‌ها، به راحتی می‌توان رفتار حرکتی این المان‌ها را مشاهده و تحلیل کرد [۲۰].

این نرم‌افزار با استفاده از زبان برنامه‌نویسی *FISH* در درون خود، این امکان را برای کاربر فراهم می‌کند تا با تعریف توابع و متغیرهای مورد نیاز، شبیه‌سازی را بر اساس شرایط متفاوت مسأله در چندین مرحله انجام دهد و نتایج را مقایسه نماید. تعریف متغیرهای مسأله و دستورات مورد نیاز این برنامه، به صورت فایل *DAT* ذخیره می‌شود. با فراخوانی این فایل شبیه‌سازی اجرا می‌شود و نتایج این شبیه‌سازی به صورت خروجی برنامه نشان داده می‌شود [۲۰]. بخشی از برنامه نرم‌افزار *PFC*^{۲D} که برای مدل کردن مقطع شماره ۲ دیواره نیروگاه مورد استفاده قرار گرفت، در پیوست ج آورده شده است.

۵-۳ مفهوم دینامیک ذرات در شبیه‌سازی سقوط سنگ

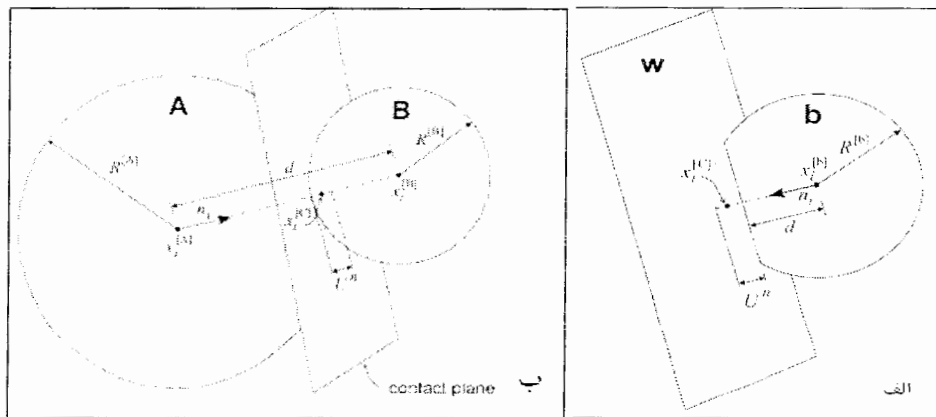
بررسی رفتار مکانیکی توده‌سنگ‌ها به عنوان مجموعه‌ای از المان‌های دایره‌ای و کروی در طی حرکت و عکس‌العمل این ذرات نسبت به یکدیگر و در برخورد با سطح شیب‌دار، نیاز به آشنایی با معادلات و قوانین حرکت-جابجایی مورد استفاده برای شبیه‌سازی مسأله خواهد داشت. المان‌های یک مجموعه برای ایجاد توده‌سنگ، به صورت غیریکنواخت و با توزیع گوس در کنار هم قرار می‌گیرند. پیوند بین المان‌های این مجموعه مواد، می‌توانند به صورت موازی یا تماسی باشند که بر اثر برخورد بین دو المان یا یک المان و یک دیوار، پیوند بین اجزای المان‌ها تغییر می‌کند. پیوند تماسی زمانی بین دو المان خواهد بود که تنها یک المان نسبت به المان دیگر حرکت نماید ولی در پیوند موازی هر دو المان نسبت به یکدیگر حرکت کرده و مقاومتی از خود ایجاد می‌کنند. شکل ۵-۱ شماتیکی از قوانین حرکت و این پیوندها را نشان می‌دهد [۲۰].



شکل ۵-۱ نمایی از پیوند بین المان‌ها و قوانین برخورد بین آن‌ها در محیط PFC [۲۰]

معادلات مورد استفاده برای برخورد بین المان‌ها و یک المان و دیوار در پیوند موازی و پیوند

مماسی در فضای سه‌بعدی با توجه به شکل ۲-۵ می‌توان به صورت زیر بیان کرد:



شکل ۲-۵ برخورد بین دو المان و یک المان و دیوار [۲۰]

المان در حال دارای دو نوع حرکت انتقالی و چرخشی است. حرکت انتقالی آن از رابطه ۱-۵ به دست

می‌آید [۲۵]:

$$F = m(\ddot{x} - g_i) \quad \text{رابطه ۱-۵}$$

که در آن m جرم المان و $\ddot{x}$ شتاب المان در هر لحظه است.

حرکت چرخشی المان نیز از رابطه ۲-۵ به دست می‌آید:

$$M_i = I\dot{\omega}_i = \left(\frac{2}{3}mR^2\right)\dot{\omega}_i \quad \text{رابطه ۲-۵}$$

که در آن I ممان اینرسی حرکت و $\dot{\omega}_i$ شتاب زاویه‌ای حرکت است.

با توجه به نوع حرکت المان، سختی نرمال و برشی به عنوان پارامترهای اساسی در شبیه‌سازی و بر

اساس قانون هرتز-میدلین که از یک رابطه غیرخطی و سهمی شکل پیروی می‌کند از رابطه ۳-۵ و

۴-۵ به دست می‌آید:

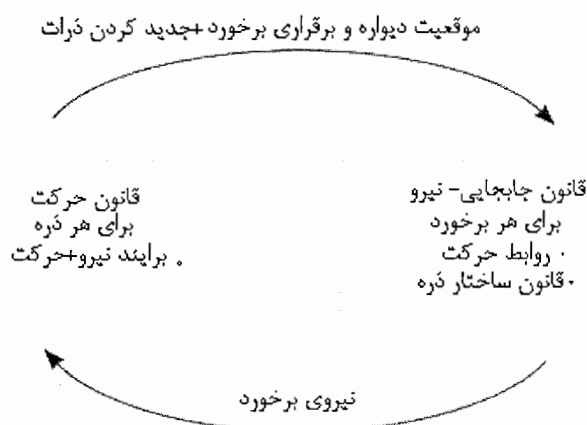
$$K^n = \left(\frac{2G\sqrt{2\tilde{R}}}{3(1-\nu)}\right)\sqrt{U^n} \quad \text{رابطه ۳-۵}$$

$$K^S = \left(\frac{2G^2 3(1-\nu)\tilde{R}}{2-\nu} \right) F_i^{1/3} \quad \text{رابطه ۴-۵}$$

که در این روابط G مدول برشی الاستیک، ν نسبت پواسون، شعاع کره، U مقدار هم‌پوشانی کره است [۲۰].

سیکل محاسبات حرکت المان‌ها در PFC یک الگوریتم زمان-مرحله ای است که نیاز به استفاده مکرر از قانون حرکت در هر المان، قانون نیرو-جابجایی در هر برخورد و هم‌زمان کردن موقعیت دیواره‌ها با سیکل محاسبات دارد. در شروع هر مرحله زمانی، برخورد بین المان‌ها مشخص و موقعیت دیواره‌ها ایجاد می‌شود. سپس با استفاده از قانون نیرو-جابجایی در هر برخورد، نیروهای بین آن‌ها بر اساس حرکت بین دو شی در برخورد و ترکیب مدل مطابقت داده می‌شود. قانون حرکت در هر المان برای مطابقت سازی سرعت و موقعیت براساس برآیند نیروها و لحظه ناشی از نیروهای تماسی و هر نیرو در المان‌ها استفاده می‌شود [۵].

در فرایند شبیه‌سازی سقوط سنگ، با حرکت بلوک در طی مسیر و برخورد آن با سطح شیب‌دار، پیوند بین المان‌ها شکسته شده و به صورت مجموعه المان‌های کوچک‌تر یا المان‌های منفرد به حرکت خود ادامه می‌دهند. جابجایی و حرکت المان‌ها بر اساس برآیند نیروها صورت می‌گیرد. سیکل حرکتی المان‌ها در فرایند شبیه‌سازی در شکل ۳-۵ نشان داده شده است.



شکل ۳-۵ سیکل حرکتی المان‌ها بر اساس برخورد و جابجایی بین آن‌ها [۵]

۴-۵ توپوگرافی و مقاطع عرضی سه‌بعدی محدوده مورد مطالعه

۴-۵-۱ شبیه‌سازی محدوده نیروگاه توسط *Surfer*

یکی از ابزارهای اساسی در شبیه‌سازی پدیده سقوط سنگ، مدل کردن توپوگرافی دقیق شیب محدوده مورد مطالعه است. تغییرپذیری هندسه و توپوگرافی شیب‌ها در فواصل نسبتاً طولانی منطقه بحرانی سقوط سنگ در نواحی کوهستانی، سبب مشکلاتی در شبیه‌سازی‌ها شده است. شکل شیب‌ها معمولاً از نقشه‌های توپوگرافی بزرگ مقیاس، عکس‌های هوایی و یا برداشت‌های تفصیلی از منطقه به دست می‌آید. زبری سطح شیب، تفرع و تحدب، زاویه و طول شیب از فاکتورهای تأثیرگذار در هندسه شیب‌ها محسوب می‌شوند. به منظور تعیین دقیق هر یک از این فاکتورها در شبیه‌سازی سقوط سنگ، طول شیب‌ها به قطعات مختلف تقسیم می‌گردد و خواص هندسی هر یک از این قطعات به طور جداگانه مدل می‌شود. همچنین خواص مواد تشکیل دهنده این شیب‌ها نیز در این قطعات در نظر گرفته می‌شود. بنابراین با مدل کردن دقیق هندسه شیب، فرصتی برای شبیه‌سازی تعداد بیشتری از مسیرهای سقوط سنگ، تعداد ضربات بلوک، محاسبه پارامترهای تغییرپذیر و مسیرهای تکرار شونده به وجود می‌آید.

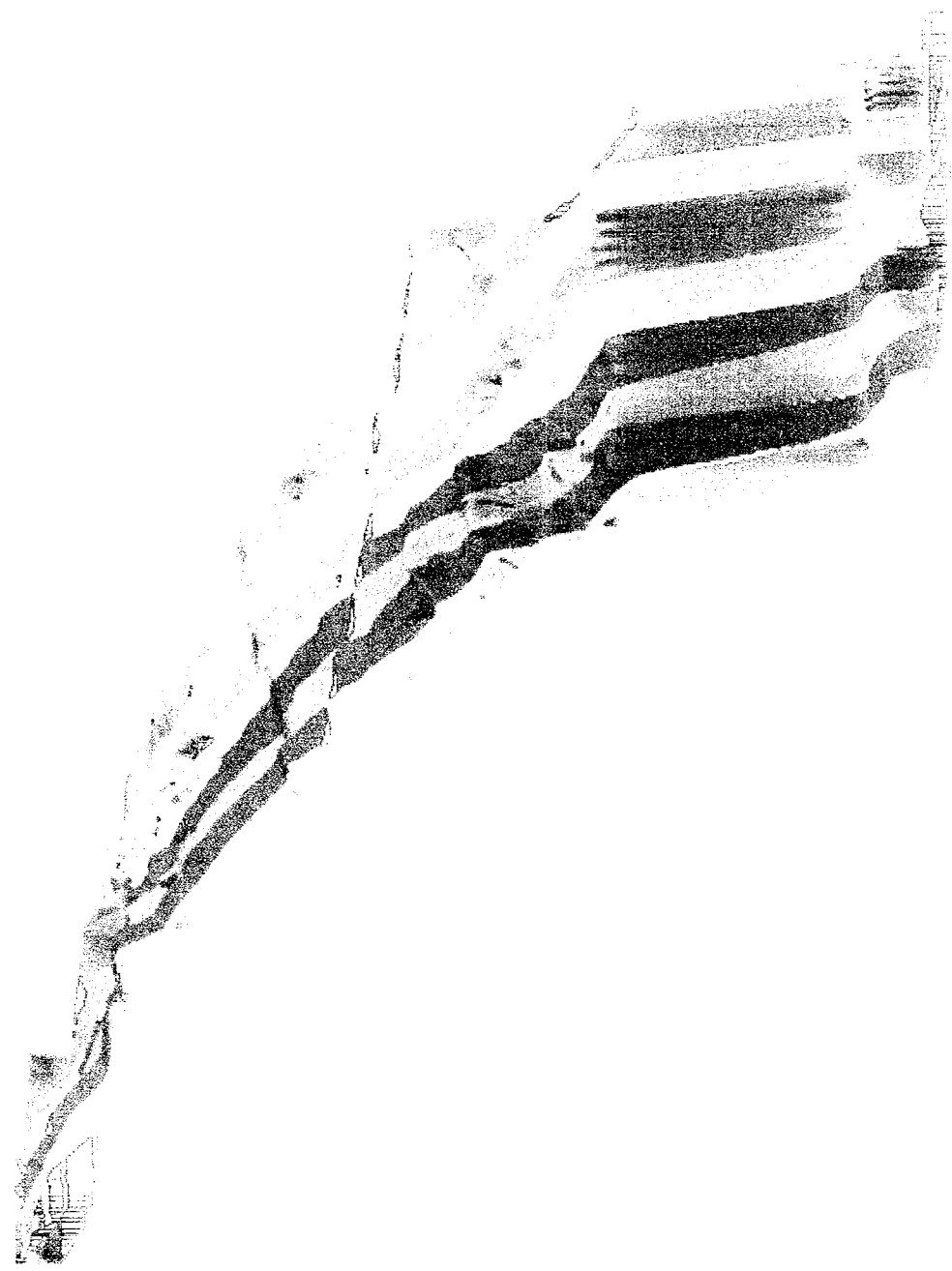
تهیه توپوگرافی دقیق و سه‌بعدی برای مدل کردن دیواره مشرف به نیروگاه در نرم‌افزار *PFC^{2D}* یکی از فرایندهای اساسی و اولیه در شبیه‌سازی رفتار بلوک‌های بحرانی منطقه است. از نتایج برداشت‌های تفصیلی منطقه، به علت پیچیدگی هندسه شیب تقریباً قائم محدوده مورد مطالعه، برای مدل کردن استفاده شده است. برای تهیه هندسه سه‌بعدی دیواره مشرف به نیروگاه، شبیه‌سازی در دو مرحله توسط نرم‌افزار *Surfer* انجام شده است. ابتدا با استفاده از نقشه توپوگرافی منطقه و برداشت‌های تفصیلی، شبیه‌سازی محدوده نیروگاه توسط نرم‌افزار *Surfer* به طور دقیق انجام شده است. در شکل ۴-۵ نمایی از شبیه‌سازی محدوده نیروگاه نشان داده شده است.

سپس برای تهیه مدل سه‌بعدی برای نرم‌افزار PFC^{2D} ، مقاطع عرضی با توجه به معین بودن پتانسیل سقوط سنگ در آن‌ها، با جزئیات بیشتری شبیه‌سازی شده‌اند. برای انطباق و مقایسه نتایج شبیه‌سازی دو روش تحلیلی و عددی، از مقاطع عرضی ترسیم شده بر روی نقشه توپوگرافی فصل چهارم (شکل ۴-۷) استفاده شده است.

در بعضی از موارد موقعیت هر مقطع نسبت به مقطع دیگر به گونه‌ای است که از به هم پیوستن نهایی آن‌ها در فضا، حالت پستی و برآمدگی مشاهده می‌شود. شبیه‌سازی رفتار واقعی بلوک‌های سنگی در طول مسیر به علت پیچیدگی این دیواره، سبب شده است تا مدل کردن این مقاطع در نرم‌افزار *PFC* با نهایت دقت انجام شود. در شکل ۵-۵ مقاطع عرضی شبیه‌سازی شده توسط نرم‌افزار *Surfer* آورده شده است.

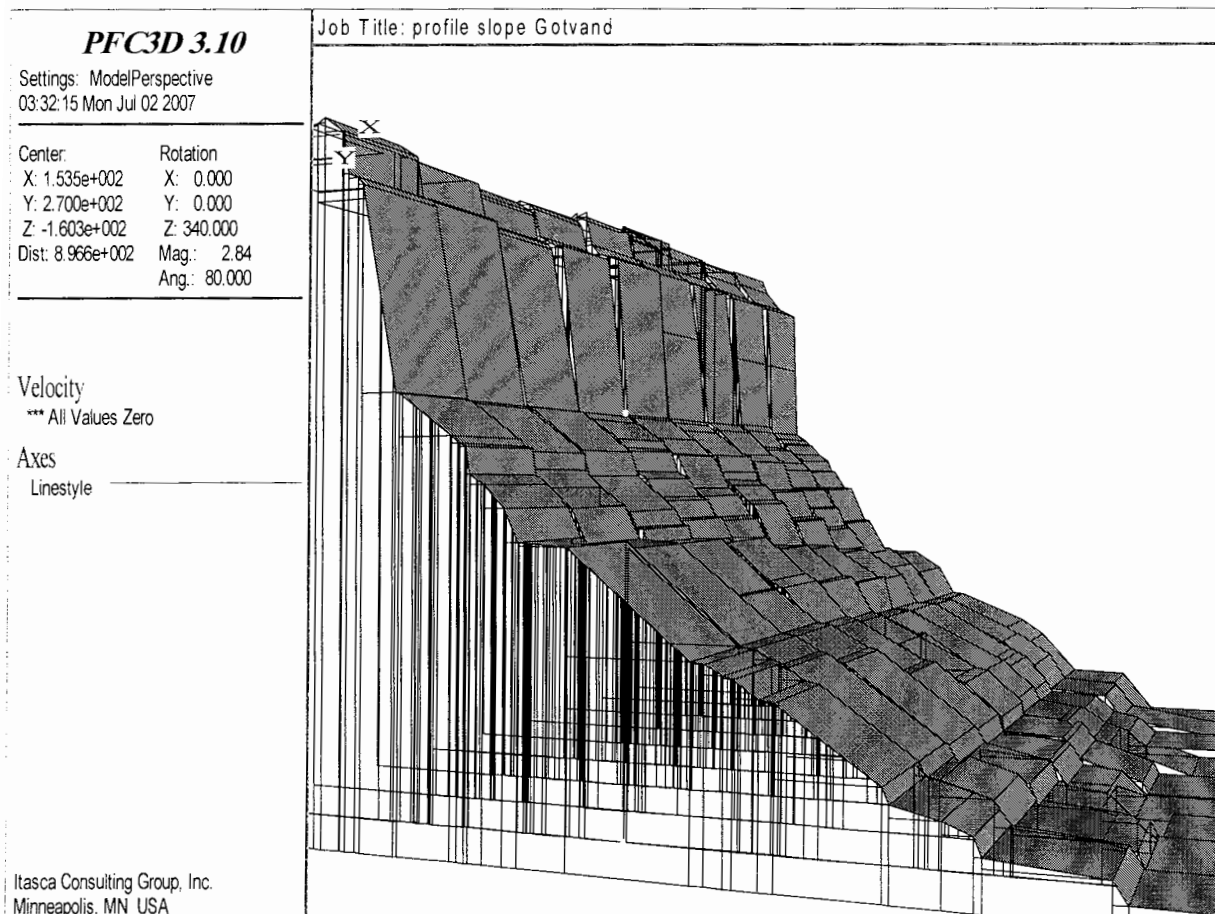


Surface profile of road



۵-۴-۲ مدل کردن مقاطع عرضی سه‌بعدی در *PFC^{3D}*

برای مدل کردن مقاطع عرضی به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار *PFC^{3D}*، باید آن‌ها را به صورت مجموع صفحات در فضا تعریف کرد. این صفحات باید به گونه‌ای مدل شوند که جزئیات کامل مقاطع را پوشش دهند. در نهایت از کنار قرار دادن این مقاطع، محدوده مورد مطالعه مدل می‌شود. هر یک از این مقاطع با ارتفاع ۳۲۰ متر، عرض ۴۵۰ متر و فاصله ۵۰ متر تا مقطع بعدی، محدوده مورد مطالعه را تشکیل می‌دهند. در این مدل، خصوصیات توده سنگ کنگلومرا برای هر یک از صفحات در نظر گرفته شده است. شکل ۵-۳ مدل نهایی مقاطع عرضی را که در نرم‌افزار *PFC^{3D}* برای شبیه‌سازی ایجاد شده است نشان می‌دهد.



شکل ۵-۶ مدل نهایی مقاطع عرضی سه‌بعدی با استفاده از نرم‌افزار *PFC^{3D}*

۵-۵ پارامترهای ورودی مورد نیاز برای شبیه‌سازی در PFC

پارامترهای مورد نیاز برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار PFC از شاخص‌های مکانیکی سنگ بکر در ساخت‌گاه سد و نیروگاه گتوند علیا طبق جدول ۵-۱ استفاده شده است. با توجه به فرمول‌های عددی و قوانین استفاده‌شده در حرکت المان‌ها، تعیین سختی نرمال و برشی برای دیواره و المان‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. بنابراین با توجه به این شاخص‌ها برای سنگ‌های دیواره در ترازهای بالا از خواص توده‌سنگ کنگلومرای بختیاری و در ترازهای پایین و محدوده ساخت‌گاه نیروگاه از خواص توده‌سنگ کنگلومرای آغا‌جاری استفاده شده است.

جدول ۵-۱ شاخص‌های مکانیکی سنگ بکر در ساخت‌گاه سد و نیروگاه گتوند [۸]

Formation	Rock type	Statistical values	Uniaxial Compressive Strength (MPa)			Tensile Strength (Brazilian) (MPa)	Swelling Pressure (Kg/cm ²)
			Dry	Natural	Saturated	Saturated	-
Aghajari	Claystone & Mudstone	Mean		10.1	7.5	1.71	0.3
		Max.	19.8	16.1	10.5	3.94	0.4
		Min.	9.5	3.9	4.5	0.21	0.2
		St. Dev.	4.3	3.5	4.3	1.03	0.1
		Number	4	8	2	22	2
	Siltstone	Mean	24.5	16.4	13.5	1.90	0.34
		Max.	36.7	47.0	32.8	4.80	0.71
		Min.	14.2	2.5	6.2	0.58	0.14
		St. Dev.	9.0	98	7.5	0.98	0.18
		Number	6	21	20	30	8
	Sandstone	Mean	-	24.0	37	3.24	-
		Max.	-	34.7	66	5.64	-
		Min.	-	13.5	20	0.97	-
		St. Dev.	-	7.9	13	1.43	-
		Number	0	7	19	11	0
Bakhtyari	Conglomerate	Mean	-	32	29	7.30	-
		Max.	-	51	50	4.62	-
		Min.	-	25	18	2.91	-
		St. Dev.	-	9.7	11.3	1.39	-
		Number	0	6	7	4	0

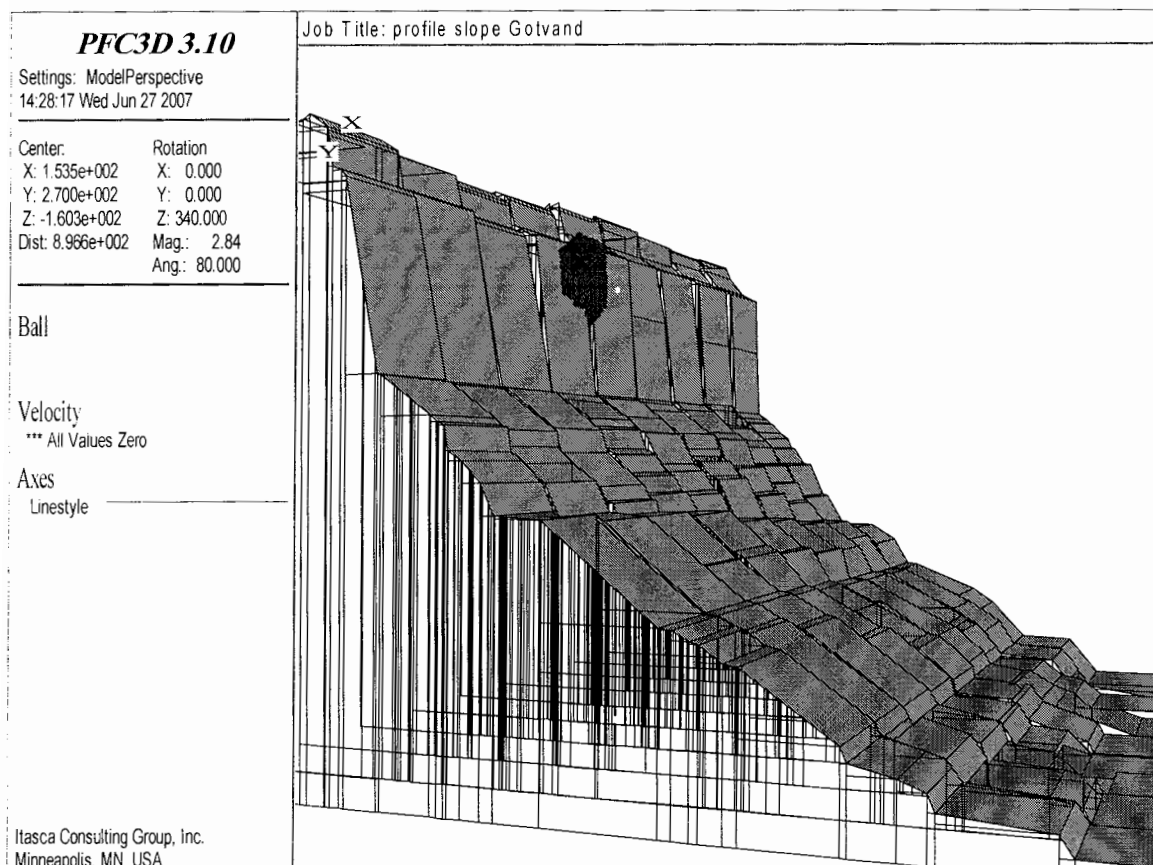
ادامه جدول ۵-۱ شاخص های مکانیکی سنگ بکر در ساختگاه سد و نیروگاه گتوند

formation	Rock type	Statistical values	P wave velocity (m/s)	S wave velocity (m/s)	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Rigidity modulus (GPa)	Bulk modulus (GPa)
Aghajari	Claystone & Mudstone	Mean	2440	1462	12	0.20	5	10
		Max.	4029	2205	32	0.40	12	25
		Min.	1256	821	4	0.11	2	2
		St. Dev.	632	369	9	0.10	4	8
		Number	16	16	8	14	8	8
	Siltstone	Mean	2551	1445	16	0.23	6	14
		Max.	4128	2336	35	0.35	14	25
		Min.	848	536	10	0.07	4	7
		St. Dev.	697	323	7	0.08	3	5
		Number	22	24	11	22	11	11
	Sandstone	Mean	3375	1911	27	0.25	11	20
		Max.	4809	2785	49	0.38	19	32
		Min.	1885	1222	16	0.09	6	10
		St. Dev.	795	444	10	0.09	4	7
		Number	19	16	13	16	13	13
Bakhtyari	Conglomerate	Mean	3708	2126	32.09	0.24	12.68	23.46
		Max.	5165	2974	56.70	0.34	22.64	38.11
		Min.	2620	1744	17.57	0.05	7.03	11.69
		St. Dev.	88892	48337	15.47	0.10	6.30	9.49
		Number	6	6	5	6	5	5

مدل کردن دیواره با توجه به پارامترهایی همچون تعداد صفحات ، ضریب اصطکاک، وزن مخصوص، سختی نرمال و برشی، شیب صفحات و عرض مقطع برای هر مقطع صورت می گیرد. همچنین در تشکیل یک مجموعه (*Cluster*) و بر اساس حجم بلوک، از شعاع های مختلفی برای المان ها استفاده می شود. از مقاومت برشی و نرمال ذره، وزن مخصوص هر المان و ضریب اصطکاک هر المان برای شبیه سازی استفاده شده است.

۵-۶ نتایج شبیه‌سازی عددی مسیر بلوک سنگی توسط PFC^{3D}

برای شبیه‌سازی عددی مسیر بلوک‌های بحرانی، محدوده مورد مطالعه و بلوک‌های بحرانی به طور کامل مدل شده‌اند. فرایند شبیه‌سازی برای بررسی بیشتر مسیر هر یک از این بلوک‌های بحرانی، به طور جداگانه اجرا شده است. بلوک‌های بحرانی که برای این شبیه‌سازی انتخاب شده‌اند بر روی مقاطع شماره ۷،۶،۴ و ۹ واقع شده‌اند. خواص هر یک از المان‌های کروی با توجه به جنس موادی که این بلوک‌ها را تشکیل داده‌اند و همچنین تعداد و اندازه هر یک از المان‌ها نیز با توجه به حجم این بلوک‌ها انتخاب شده است. نتایج شبیه‌سازی برای بحرانی‌ترین بلوک منطقه بر روی مقطع ۶ با توجه به حرکت بلوک‌ها در طول مسیر در شکل‌های ۵-۸ تا ۷-۸ آورده شده است.



شکل ۵-۷ مدل‌سازی مقاطع و بلوک بحرانی مقطع شماره ۶ قبل از اجرای فرایند شبیه‌سازی

PFC3D 3.10

Settings: ModelPerspective
Step 3521 23:30:48 Wed Jun 27 2007

Center:	Rotation
X: 1.535e+002	X: 0.000
Y: 2.700e+002	Y: 0.000
Z: -1.603e+002	Z: 340.000
Dist: 8.966e+002	Mag.: 2.84
	Ang.: 80.000

Ball

Velocity

Maximum = 1.428e+001

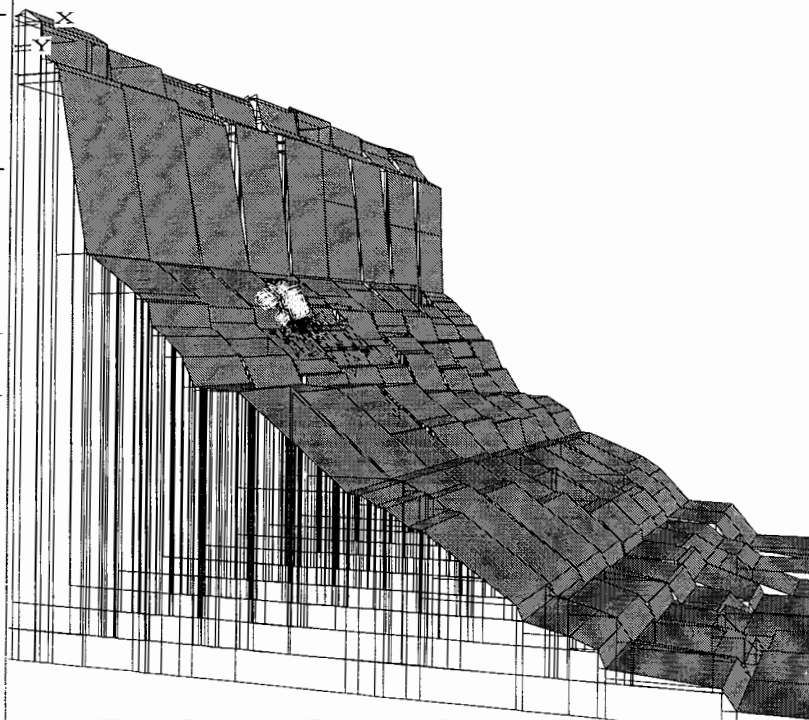
Linestyle

Axes

Linestyle

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, MN USA

Job Title: profile slope Gotvand



شکل ۵-۸ برخورد بلوک بحرانی با سطح شیب‌دار در حین فرایند شبیه‌سازی

PFC3D 3.10

Settings: ModelPerspective
Step 28361 23:21:03 Wed Jun 27 2007

Center:	Rotation
X: 1.535e+002	X: 0.000
Y: 2.700e+002	Y: 0.000
Z: -1.603e+002	Z: 340.000
Dist: 8.966e+002	Mag.: 2.84
	Ang.: 80.000

Ball

Velocity

Maximum = 1.357e+001

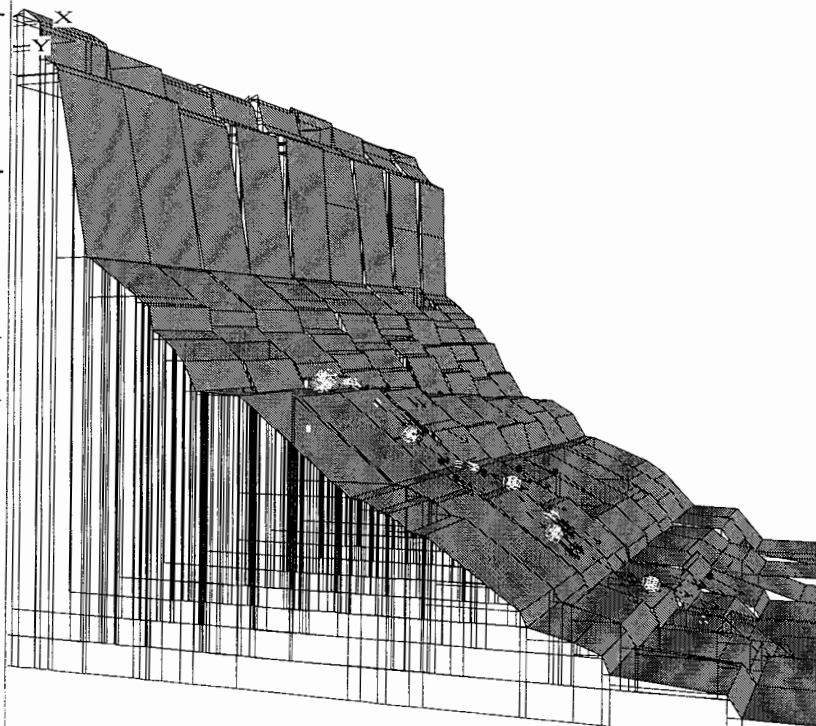
Linestyle

Axes

Linestyle

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, MN USA

Job Title: profile slope Gotvand



شکل ۵-۹ حرکت خرده بلوک‌های جدا شده در طول مسیر در مراحل انتهایی شبیه‌سازی

بلوک پس از اعمال نیروی زلزله با شتاب اولیه $2/6$ متر بر ثانیه و با نیروی ثقل خود به سطح شیب‌دار برخورد می‌کند. بلوک پس از برخورد به سطح، شکسته شده و به قطعه‌های کوچک‌تر یا در واقع به مجموعه المان‌های کوچک‌تر تقسیم می‌شود. حرکت این مجموعه المان‌های کوچک با توجه به مدهای ریزش در طی مسیر صورت می‌گیرد. همچنین سرعت و انرژی آن‌ها در برخوردهای بعدی به سطح شیب‌دار کاهش می‌یابد. برخورد قطعه‌های کوچک‌تر از این بلوک به تأسیسات نیروگاه پس از گذشت زمان کمتر از 60 ثانیه، سبب خساراتی در آن‌ها خواهد شد. در نمودار $5-11$ و $5-12$ به ترتیب ماکزیمم نیروهای نامتعادل و نیروی برخورد بلوک در طی زمان برای المان‌هایی که بلوک را تشکیل داده‌اند نشان می‌دهد. در این نمودارها، ماکزیمم نیرو مربوط به برخورد اولیه بلوک به سطح شیب‌دار است و در طی برخوردهای بعدی این نیرو میرا می‌شود.

سرعت هر یک از المان‌ها و مجموعه المان‌ها^۱ در طی زمان در این فرایند را می‌توان به صورت نمودار نشان داد. در این شبیه‌سازی، سرعت در راستای x یکی از المان‌هایی که به تأسیسات نیروگاه برخورد می‌کند در نمودار $5-13$ نشان داده شده است. همانطور که از این نمودار استنباط می‌شود سرعت المان در برخوردهای مکرر به سطح شیب‌دار نوسان دارد و پس از چندین برخورد سرعت به سمت صفر کاهش می‌یابد و المان متوقف می‌شود.

نمایش تحرک‌پذیری بلوک‌ها در نرم‌افزار *PFC*، این امکان را در فرایند شبیه‌سازی سقوط سنگ به وجود آورده است که به صورت واقعی می‌توان سقوط یک بلوک و شکسته شدن آن را مشاهده کرد. همچنین نتایج خروجی این شبیه‌سازی را می‌توان به صورت فایل *AVI* ذخیره کرد.

نتایج شبیه‌سازی برای بلوک‌های بحرانی بر روی مقاطع دیگر و نمودارهای سرعت و نیروهای نامتعادل در پیوست د آورده شده است.

PFC3D 3.10

Settings: ModelPerspective
Step 22690 00:05:32 Thu Jun 28 2007

Center:	Rotation
X: 1.535e+002	X: 0.000
Y: 2.700e+002	Y: 0.000
Z: -1.603e+002	Z: 340.000
Dist: 8.966e+002	Mag.: 2.84
	Ang.: 80.000

History

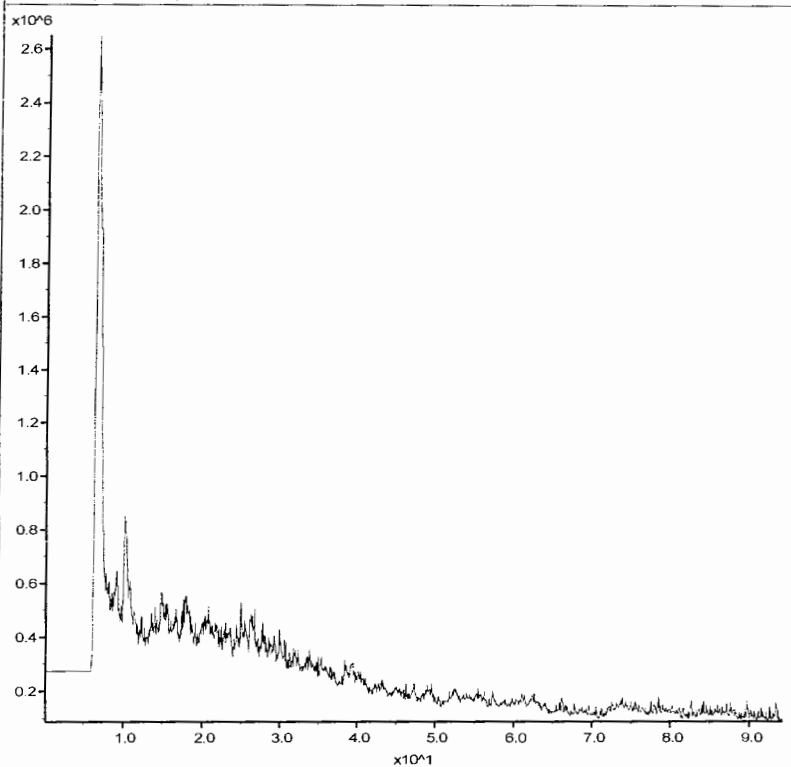
1 Mean Unbalanced Force
Linestyle
8.834e+004 <-> 2.652e+006

Vs.

6 real_time (FISH Symbol)
5.774e-002 <-> 9.429e+001

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, MN USA

Job Title: profile slope Gotvand



شکل ۵-۱۰ نمودار نیروهای نامتعادل در طی زمان برای بلوک در فرایند شبیه‌سازی

PFC3D 3.10

Settings: ModelPerspective
Step 22690 00:11:58 Thu Jun 28 2007

Center:	Rotation
X: 1.535e+002	X: 0.000
Y: 2.700e+002	Y: 0.000
Z: -1.603e+002	Z: 340.000
Dist: 8.966e+002	Mag.: 2.84
	Ang.: 80.000

History

2 Mean Contact Force
Linestyle
2.429e-007 <-> 5.254e+006

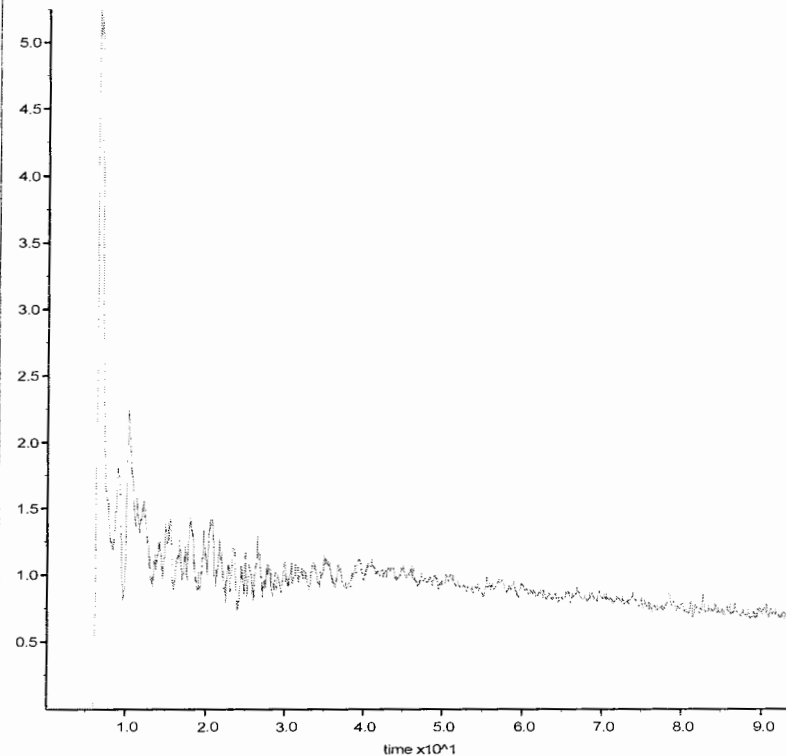
Vs.

6 real_time (FISH Symbol)
5.774e-002 <-> 9.429e+001

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, MN USA

Job Title: profile slope Gotvand

mean contact Force x10^6



شکل ۵-۱۱ نمودار نیروهای برخورد بلوک به سطح در طی زمان در فرایند شبیه‌سازی

PFC3D 3.10
 Settings: ModelPerspective
 Step 22690 00:25:11 Thu Jun 28 2007

Center:	Rotation
X: 1.535e+002	X: 0.000
Y: 2.700e+002	Y: 0.000
Z: -1.603e+002	Z: 340.000
Dist: 8.966e+002	Mag.: 2.84
	Ang.: 80.000

History
 3 Ball 273 X-Velocity
 Linestyle
 -3.020e-001 <-> 3.906e+000

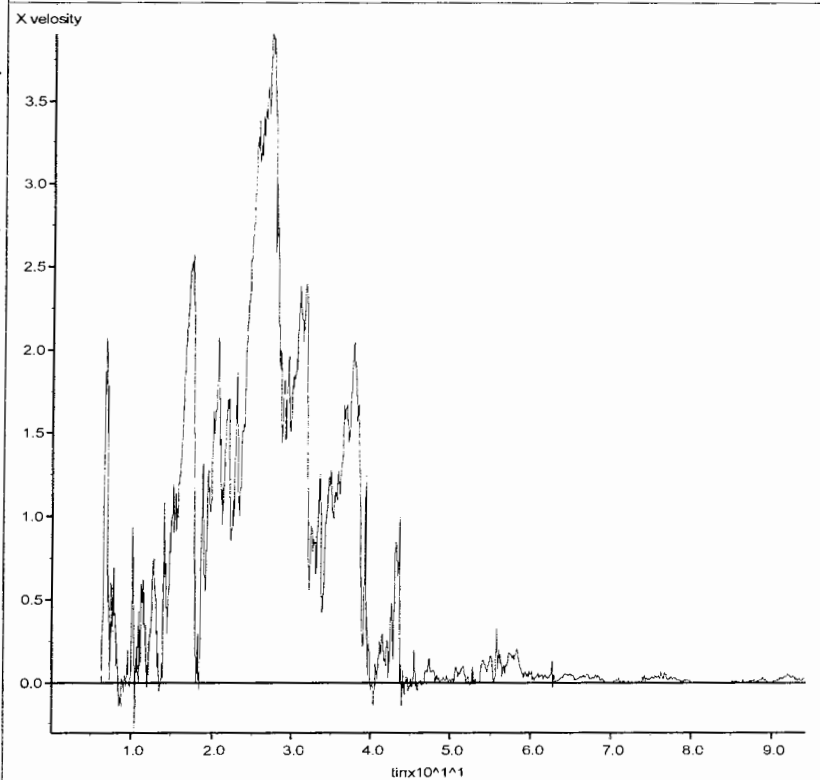
Vs.
 6 real_time (FISH Symbol)
 5.774e-002 <-> 9.429e+001

History
 4 Ball 273 X-Velocity
 Linestyle
 -3.020e-001 <-> 3.906e+000

Vs.
 6 real_time (FISH Symbol)
 5.774e-002 <-> 9.429e+001

Itasca Consulting Group, Inc.
 Minneapolis, MN USA

Job Title: profile slope Gotvand



شکل ۵-۱۲ سرعت یکی از المان‌های برخورد کننده به تأسیسات نیروگاه در راستای محور x در فرایند شبیه‌سازی

فصل ششم

ارائه روش اجرایی برای مقابله
با پدیده سقوط سنگ منطقه

۶-۱ مقدمه

امروزه پدیده سقوط سنگ و جابجایی حجم بزرگی از بلوک‌های سنگی در مناطق کوهستانی و خسارات ناشی از آن‌ها سبب شده است تا روش‌های مقابله با این پدیده با دقت بیشتری انجام گیرد. نتایج فرایند شبیه‌سازی سقوط سنگ برای طراحان و مهندسين این امکان را فراهم کرده است تا با انجام آزمایش بر روی نمونه‌های مشابه، وسایل نگهداری و پایدارسازی برای این پدیده را طراحی نمایند [۵]. با تعیین پارامترهای سرعت، انرژی و پرش بلوک سنگی در طول مسیر می‌توان سیستم مش‌بندی یا چگونگی استفاده از راک‌بالت در موقعیت بلوک ناپایدار را مشخص کرد [۲۱]. همچنین می‌توان از سیستم محافظ سنگی و یا سیستم خاکریز با شیب معکوس نیز استفاده کرد. در این نوع سیستم از وجود خاک‌های تحکیم نیافته برای کاهش سرعت و انرژی بلوک‌های در حال سقوط استفاده می‌شود. سرعت و انرژی بلوک پس از برخورد با خاکریز ایجاد شده میرا می‌شود و مانع خسارت به ساخت‌گاه‌های زیرین خود می‌شود.

در محدوده نیروگاه، به دلیل شیب و ارتفاع زیاد دیواره و محدودیت دسترسی به بلوک‌های بحرانی در ترازهای بالا، استفاده از سیستم طراحی مش‌بندی و یا استفاده از راک‌بالت از نظر اجرایی به دشواری قابل اجرا است. از این رو، سیستم خاکریز با شیب معکوس با توجه به اجرایی و کم هزینه بودن آن پیشنهاد شده است.

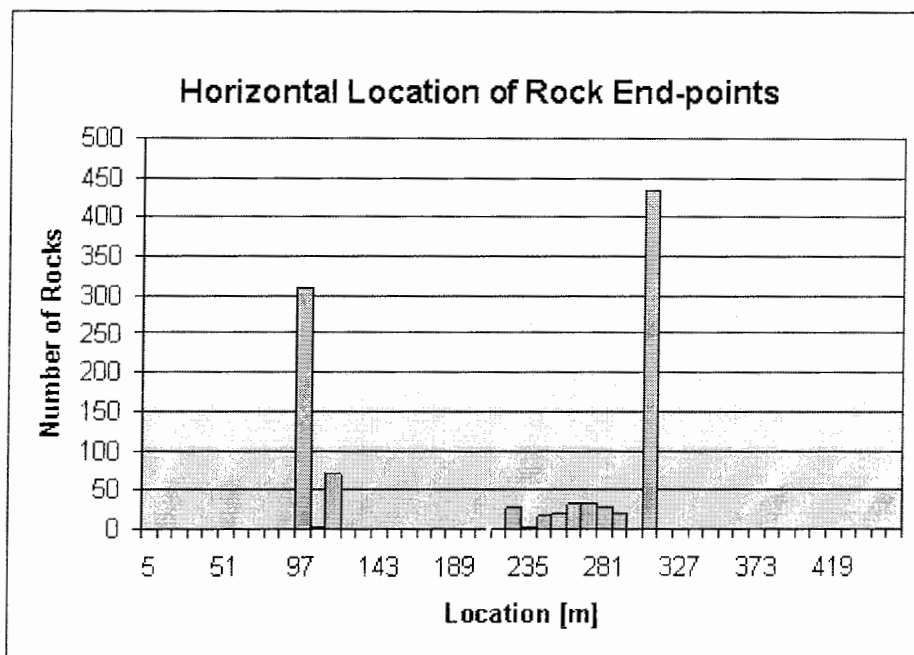
۶-۲ مقایسه نتایج شبیه‌سازی دو روش تحلیلی و عددی سقوط سنگ منطقه

فرایند شبیه‌سازی برای بلوک‌های بحرانی در دیواره مشرف به نیروگاه با استفاده از روش‌های تحلیلی *Rocfall* و عددی *PFC* انجام شده است. نتایج هر دو شبیه‌سازی برای بلوک‌های بحرانی در مقاطع ۴،۶،۷ و ۹ مؤید این مطلب است که بلوک پس از برخورد های متوالی در طی مسیر خود به سمت تأسیسات نیروگاه حرکت کرده و خساراتی به آن وارد می‌کند. رفتار واقعی بلوک در حین سقوط و خردایش آن بر اثر برخورد به سطح شیب‌دار در شبیه‌سازی عددی *PFC*، نتایج به دست آمده از روش تحلیلی را تأیید کرده است. قطعه‌های کوچک تر بلوک‌ها با سرعت میانگین ۵ متر بر ثانیه به تأسیسات نیروگاه برخورد می‌کند.

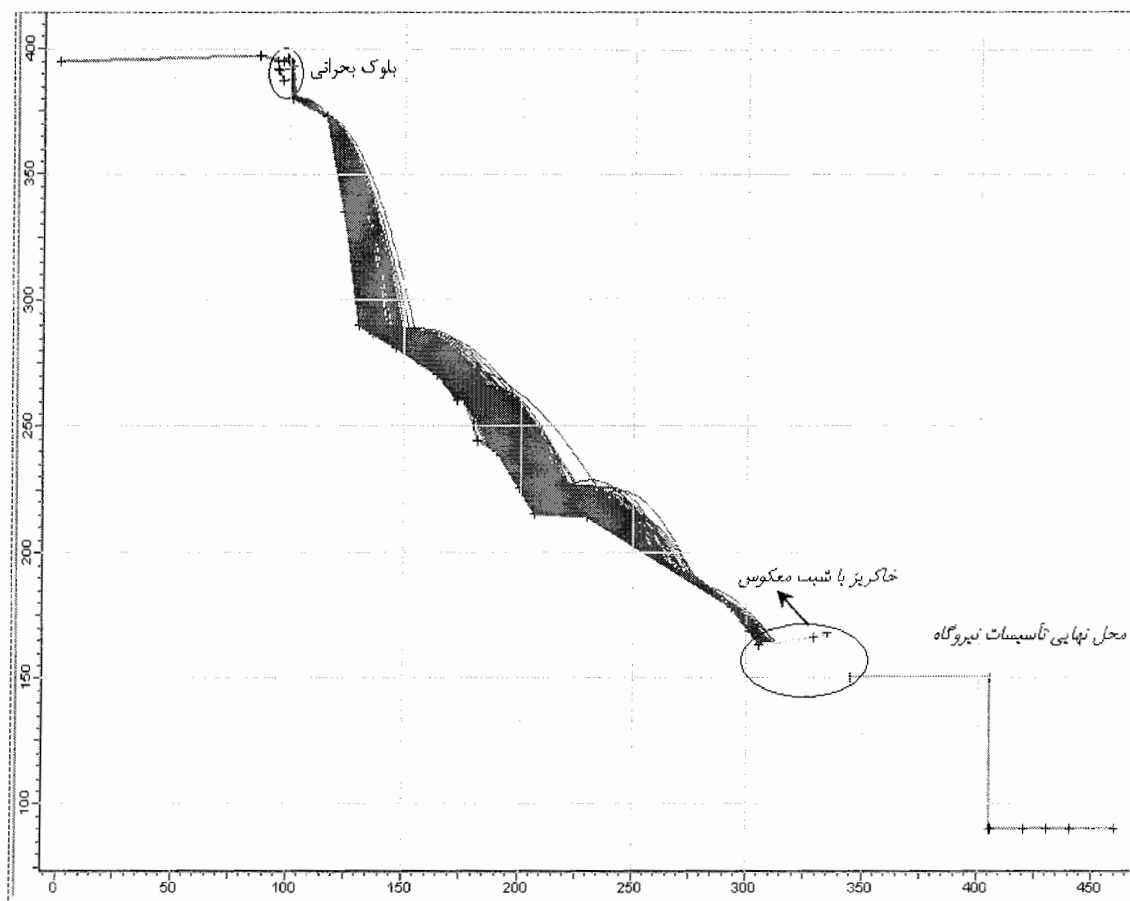
۶-۳ ارائه روش اجرایی برای مقابله با پدیده سقوط سنگ منطقه

در محدوده نیروگاه، به دلیل شیب و ارتفاع زیاد دیواره و محدودیت دسترسی به بلوک‌های بحرانی در ترازهای بالا، روش اجرایی خاکریز با شیب معکوس در تراز ۱۵۰ متر انجام شده است. در این روش، ابتدا موقعیت نهایی تأسیسات نیروگاه تا تراز ۱۵۰ متر با توجه به هندسه شیب مدل شده است. سپس از خواص خاک نرم و تحکیم‌نیافته برای گرفتن سرعت و انرژی بلوک و میرا شدن آن‌ها، به صورت خاکریز با شیب معکوس استفاده شده است. این خاکریز به عرض ۳۵ متر در سرتاسر تراز نهایی تأسیسات نیروگاه با شیب ۵ درجه به سمت بالا ایجاد شده است.

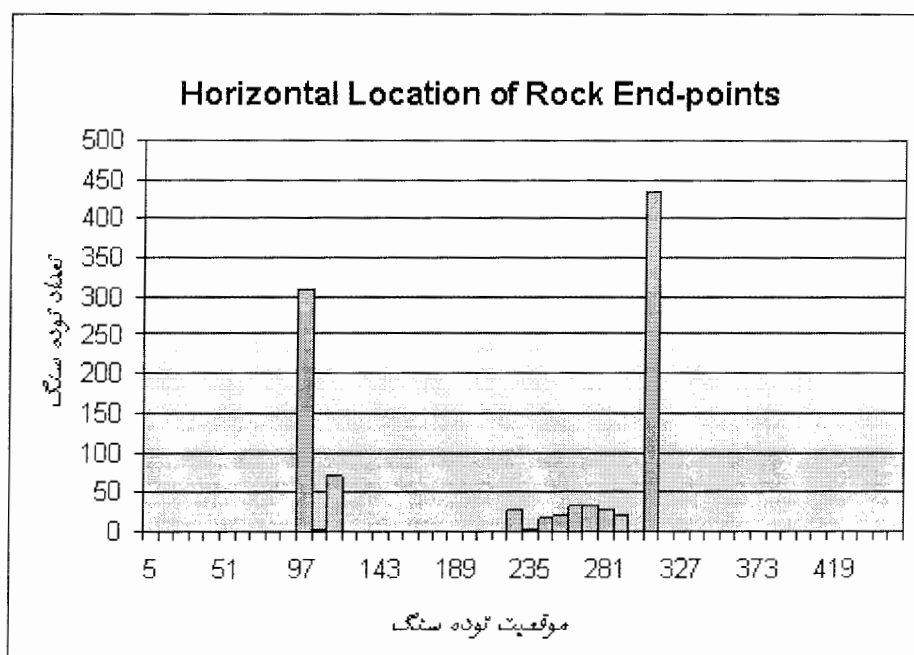
در شبیه‌سازی تحلیلی توسط نرم‌افزار *Rocfall*، خواص خاک با ضرایب ارتجاعی $R_N = 0/1$ و $R_T = 0/3$ در نظر گرفته شده است. با اجرای فرایند شبیه‌سازی برای بلوک‌های بحرانی در مقاطع مختلف، نتایج به دست آمده بیان‌گر آن است که بلوک پس از برخورد به این خاکریز کاملاً میرا شده و متوقف می‌شود. نتایج خروجی این شبیه‌سازی برای مقاطع مختلف در شکل‌های ۶-۱ تا ۶-۶ به طور کامل نشان داده شده است.



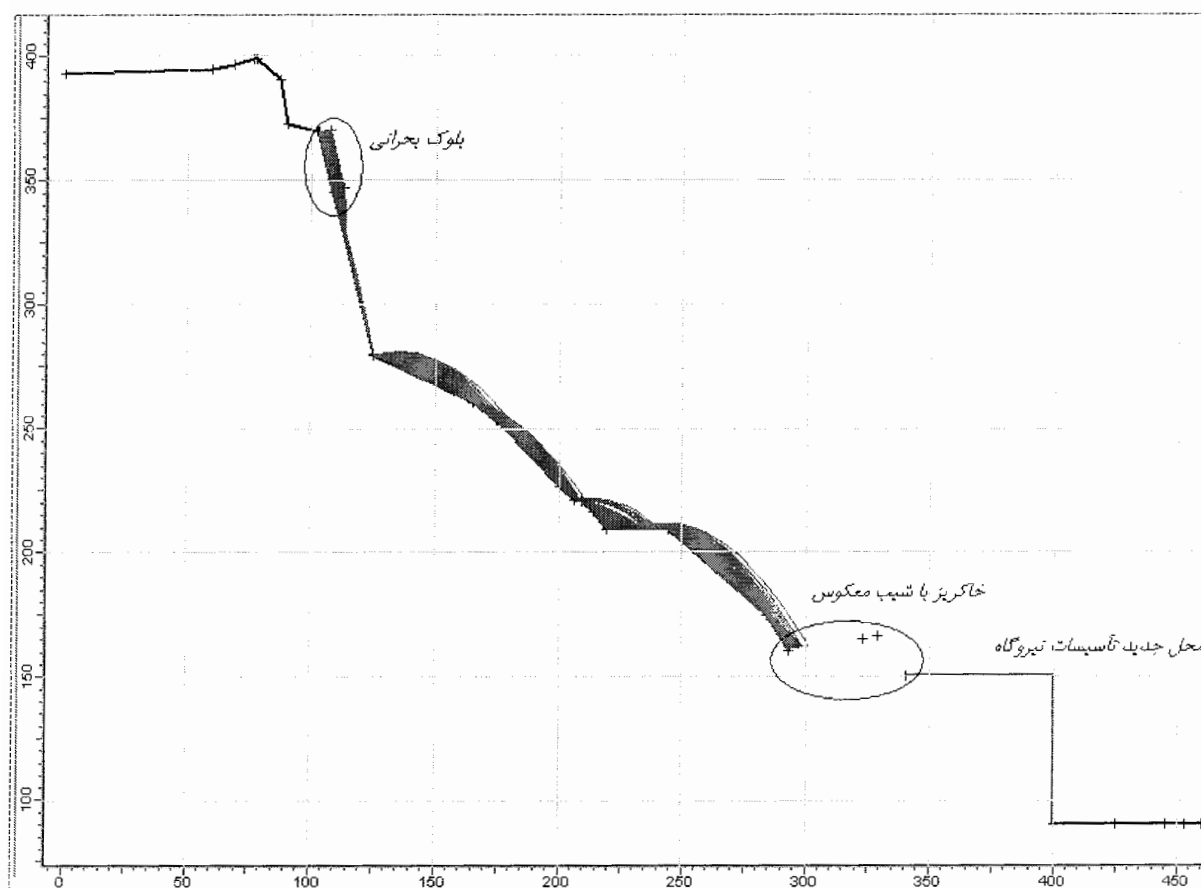
شکل ۶-۱ نمودار موقعیت انتهایی سنگ پس از ایجاد خاکریز با شیب معکوس برای مقطع ۴



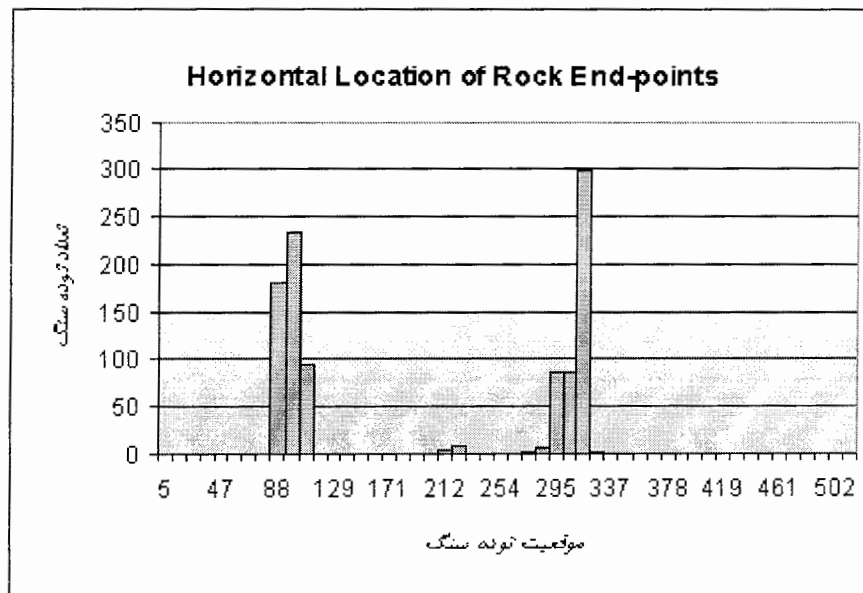
شکل ۶-۲ اجرای فرایند شبیه‌سازی با ایجاد خاکریز با شیب معکوس در مقطع ۴



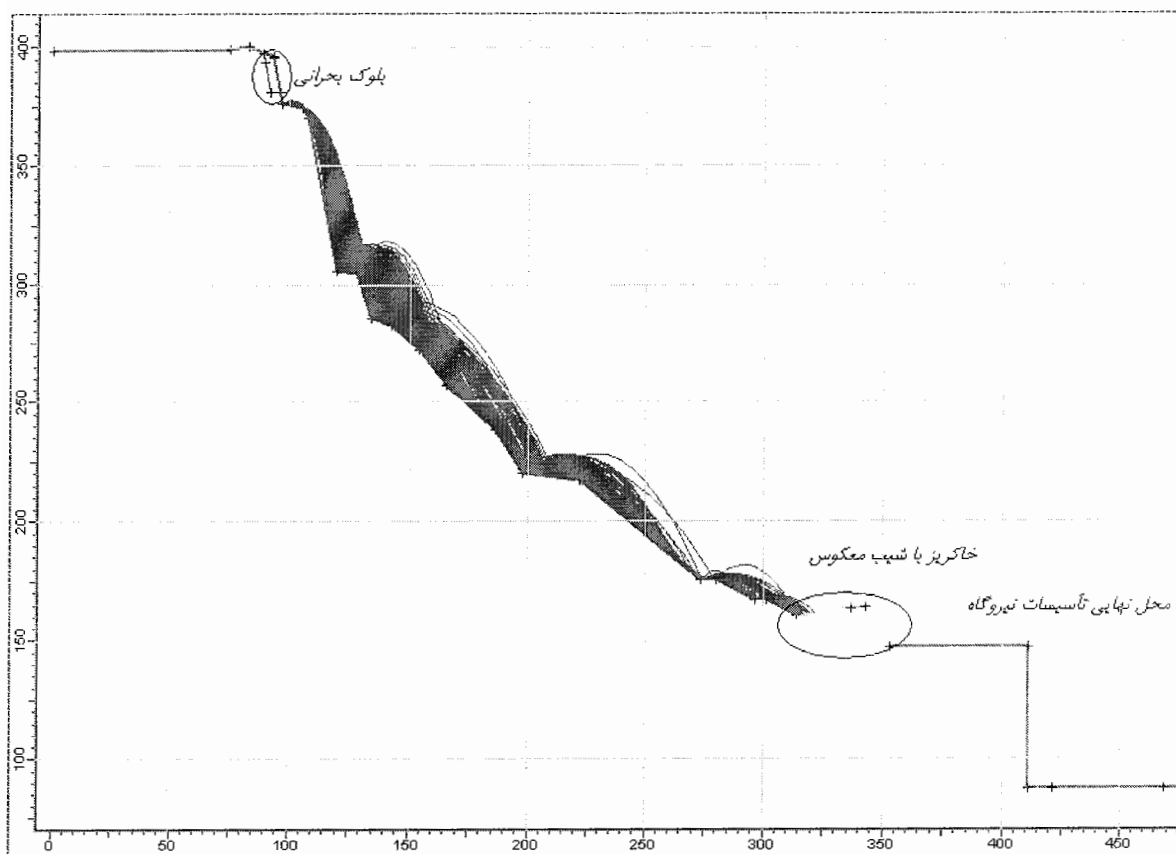
شکل ۶-۳ نمودار موقعیت انتهایی سنگ پس از ایجاد خاکریز با شیب معکوس برای مقطع ۶



شکل ۶-۴ اجرای فرایند شبیه‌سازی با ایجاد خاکریز با شیب معکوس در مقطع ۶

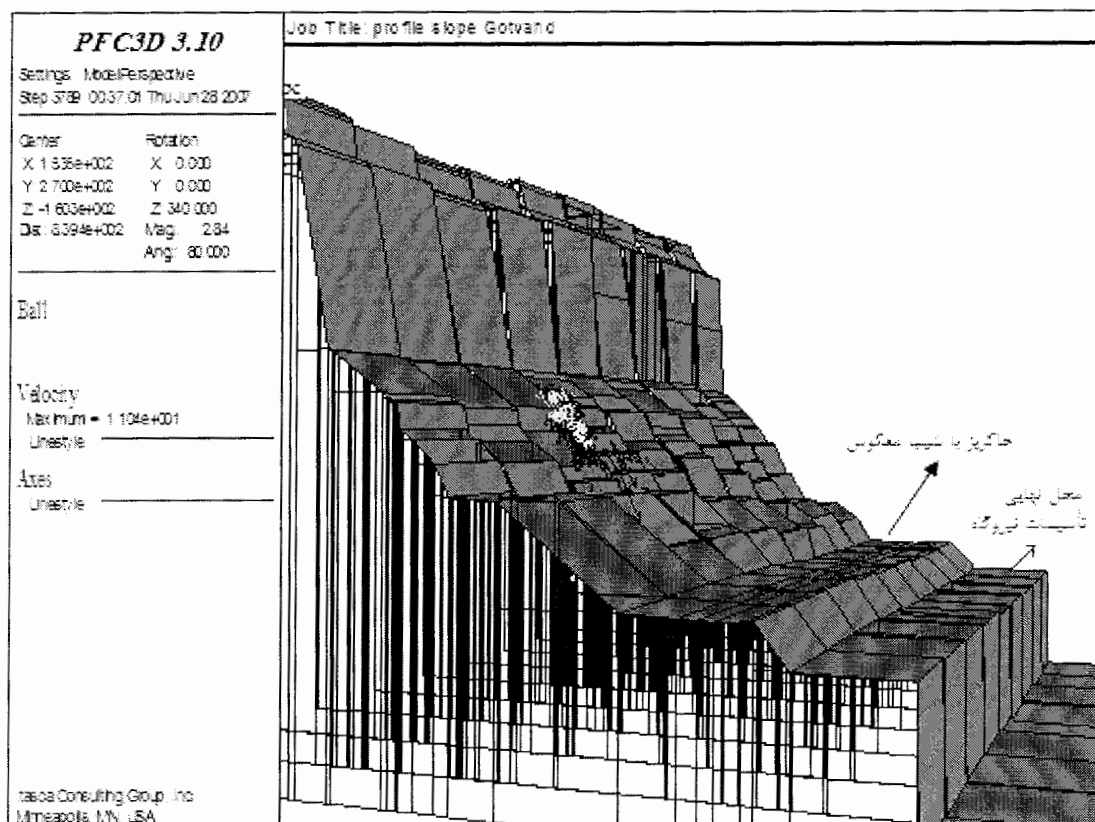


شکل ۵-۶ نمودار موقعیت انتهایی سنگ پس از ایجاد خاکریز با شیب معکوس برای مقطع ۹

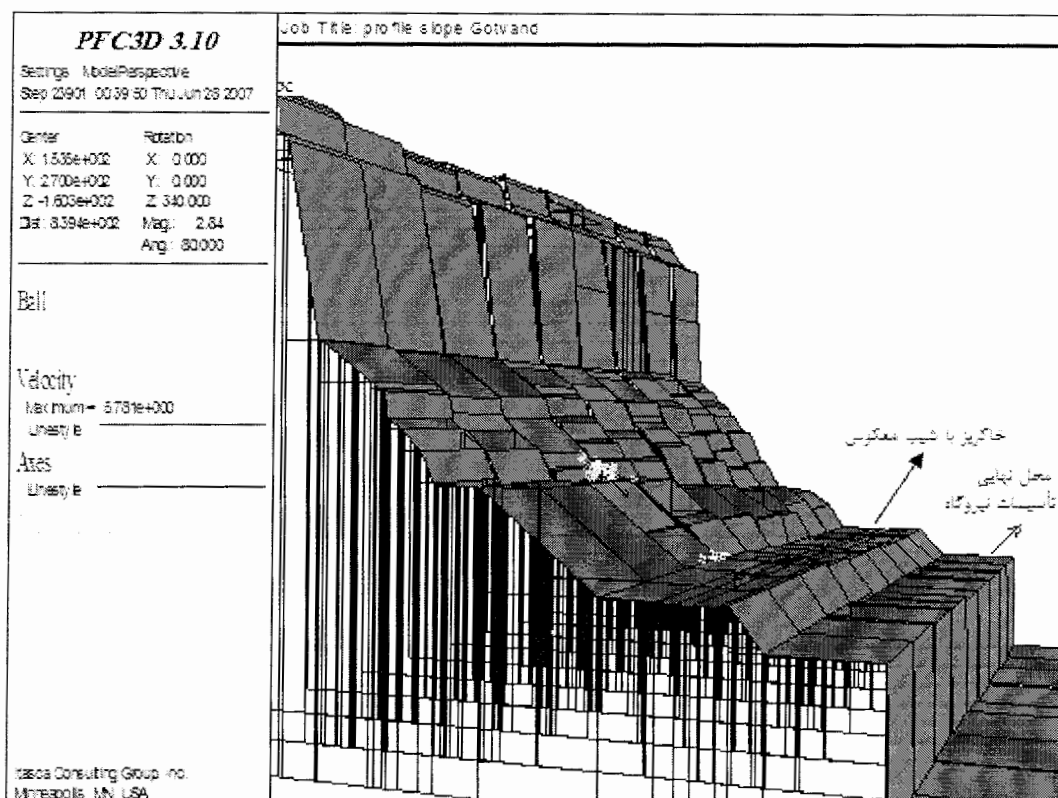


شکل ۶-۶ اجرای فرایند شبیه‌سازی با ایجاد خاکریز با شیب معکوس در مقطع ۹

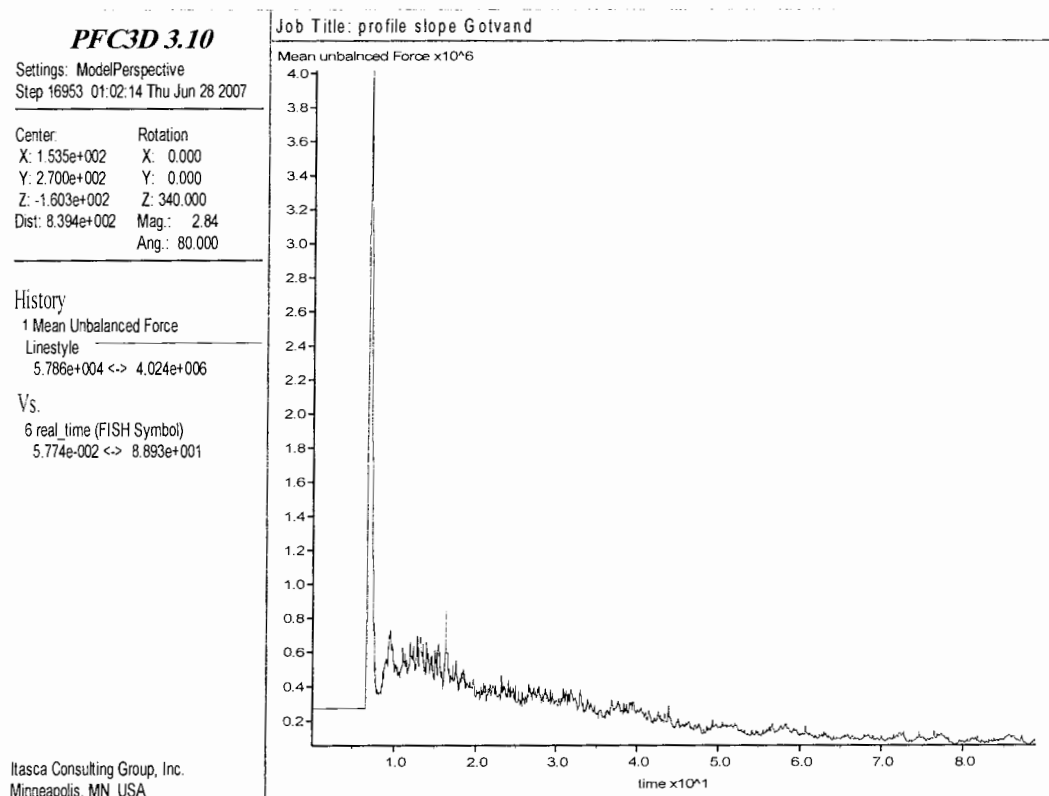
در شبیه‌سازی عددی *PFC* برای روش خاکریز با شیب معکوس و مشاهده نتایج، ابتدا محل نهایی تأسیسات نیروگاه در حالت سه بعدی مدل شده است. سپس در مرحله بعد خاکریز با شیب ۵ درجه به سمت بالا در سرتاسر بالای تأسیسات ایجاد شده است. در این شبیه‌سازی المان‌ها پس از برخورد به این خاکریز و چند پرش کوچک از شدت سرعت و پرش آن‌ها کاسته شده و به تعادل می‌رسند. توقف این المان‌ها در این خاکریز سبب جلوگیری از خسارت به تأسیسات می‌شود. نتایج این شبیه‌سازی نیز در شکل‌های ۶-۷ تا ۹-۶ آورده شده است. این خاکریز برای کنترل بلوک‌های بحرانی و منفصل که در ترازهای فوقانی و دامنه دیواره مشرف به نیروگاه واقع شده‌اند در سرتاسر تراز ۱۵۰ متری ایجاد شده است.



شکل ۶-۷ اجرای فرایند شبیه‌سازی عددی با ایجاد خاکریز با شیب معکوس در مقطع ۶ با نرم‌افزار *PFC*



شکل ۸-۶ توقف بلوک‌ها در خاکریز با شیب معکوس و جلوگیری از پرش آن‌ها



شکل ۹-۶ نمودار نیروهای نامتعادل بلوک در فرایند شبیه‌سازی پس از ایجاد سیستم خاکریز

فصل هفتم

پیشنهادات و نتیجه گیری

۷-۱ نتیجه‌گیری

پدیده سقوطسنگ، یکی از خطرهای بالقوه و معمول در شیب‌های سنگی واقع در ساخت‌گاه‌های کوهستانی می‌باشد که بر اثر آن بسیاری از جاده‌ها، بزرگراه‌ها و زیرساخت‌های مشرف به شیب‌های سنگی در معرض خرابی‌های شدید قرار می‌گیرند. علت عمده ایجاد سقوطسنگ‌ها معمولاً جدایش بلوک‌های سنگی از توده سنگ مادر، تحت تأثیر عواملی نظیر افزایش فشار منفذی آب در محل درزه و ترک‌های ناشی از جریان آب باران در داخل سنگ‌ها، فرسایش مصالح، تغییر شرایط تعادل نیروها در اثر وقوع زمین‌لرزه و عوامل دینامیکی، فرایندهای سریع یخ‌زدن و آب شدن، هوازگی یا تجزیه شیمیائی سنگ و ... می‌باشد.

از اوایل دهه ۱۹۸۰ مدل‌های دوبعدی زیادی برای شبیه‌سازی آماری و عددی پدیده سقوطسنگ ایجاد شده‌اند که در اکثر این مدل‌ها، رفتار توده‌سنگ بر اساس معادلات حرکت شبیه‌سازی شده‌اند. به طور کلی، روش‌های شبیه‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی سقوطسنگ را می‌توان به روش‌های تحلیلی و عددی تقسیم‌بندی نمود. شبیه‌سازی روش‌های تحلیلی اکثراً بر مبنای روش توده‌ای-کلوخه‌ای و یا روش جسم صلب پایه‌ریزی شده‌اند. در بعضی از روش‌های تحلیلی نیز از روش ترکیبی مثل روش توده‌ای-کلوخه‌ای برای شبیه‌سازی سقوط آزاد و روش جسم صلب برای شبیه‌سازی چرخش، جهش و بازگشت سنگ استفاده شده است. مبنای روش‌های عددی برای شبیه‌سازی سقوطسنگ، روش المان مجزا است. در این روش، یک توده‌سنگ به صورت مجموع المان‌های مجزا فرض می‌شود. حرکت هر یک از این المان‌ها در طول شیب به صورت جداگانه بررسی می‌شود.

مجموعه طرح سد و نیروگاه گتوند علیا در ۲۵ کیلومتری شمال شهرستان شوشتر و در حدود ۱۲ کیلومتری بالادست بند تنظیمی بر روی رودخانه کارون در بخش گتوند علیا قرار گرفته است. محدوده نیروگاه سد گتوند علیا نیز، ترکیبی از شرایط خاص توپوگرافی و زمین‌شناسی سبب ایجاد نواحی با پتانسیل سقوطسنگ شده است.

جابجایی عناصر روی دامنه ساحل به صورت سقوط سنگ‌ها و ریزش‌های ناگهانی بوده است. سقوط سنگ‌ها حاصل جدایش قطعات یا تکه‌های بزرگ از دیواره سنگی است که در پای ارتفاعات به حالت تعادل می‌رسند. فرایند حمل مواد بر سطح دامنه به دلیل دگرشکلی و شیب کم دامنه از نظر سرعت و گسترش متغیر می‌باشد. سقوط سریع سنگ‌ها و ریزش در حجم زیاد، به صورت بهمن سنگ‌ها و حرکات توده‌ای بزرگ در این دامنه دیده می‌شود.

وجود ناپیوستگی‌هایی همانند درزه‌ها توده سنگ محدوده، بر تغییر شکل‌پذیری و مقاومت برشی توده سنگ تأثیر زیادی گذاشته است. ناپیوستگی‌های موجود در محدوده مطالعه به دلیل عدم دسترسی به کلیه نقاط مورد نظر تنها در سه مسیر، به منظور ارزیابی پتانسیل ایجاد بلوک‌های جدید و تعیین شکل و ابعاد احتمالی آن‌ها، برداشت شده است. از این رو برای تهیه نقشه‌های مربوط به توزیع ناپیوستگی‌های منطقه از روش خط برداشت استفاده شده است. براساس اطلاعات موجود و تصاویر استریونت از سیستم درزه‌داری در محدوده نیروگاه، سه دسته ناپیوستگی عمده سبب ایجاد بلوک‌های حجیم شده است. همچنین نفوذ آب‌های سطحی به داخل ناپیوستگی‌ها و شسته شدن مواد پرکننده، این ناپیوستگی‌ها را به عنوان عمده‌ترین عامل تشکیل بلوک‌های ناپایدار با گذشت زمان به شمار آورد. به طوری که بزرگی نواحی شسته‌شده موجود دلالت بر جریان قابل ملاحظه آب در درزه‌های باز طی زمان گذشته می‌کند. بنابراین بر اساس نوع وضعیت ناپیوستگی‌ها در منطقه و به علت وجود دسته درزه‌های تحت قائم و تحت افق، بلوک‌های سنگی شکلی از سنگ بستر در ترازهای بالای دیواره جدا شده و به صورت معلق و با پتانسیل ریزش زیادی قرار گرفته‌اند. ابعاد این بلوک‌های سنگی متأثر از راستای نسبی دسته‌های متقاطع ناپیوستگی‌ها نسبت به همدیگر و نیز فاصله‌بندی هر کدام از این دسته‌هاست.

تحلیل پایداری بلوک‌ها با توجه تأثیر زمین‌لرزه به عنوان نیروی القایی منطقه با روش المان مجزا انجام گرفته است. در همین راستا تحلیل پایداری بلوک‌های مشرف به گود نیروگاه مبتنی بر استفاده

از روش المان مجزا و با کمک نرم‌افزار المان مجزا *UDEC* انجام شده است. نتایج خروجی آن بیان‌گر آن است که اعمال بار لرزه‌ای با شتابی معادل $0.26g$ ، موجب برهم زدن تعادل نسبی آن‌ها شده و بلوک‌های بحرانی به حالت ناپایدار درآمده‌اند و به سمت پایین حرکت می‌کنند.

از این رو، ابتدا شبیه‌سازی تحلیلی مسیر سقوط بلوک‌های سنگی دیواره مشرف به نیروگاه توسط نرم‌افزار *Rocfall*^{4.03} انجام گرفته شده است. برای انجام این تحلیل نیاز به دو پارامتر اساسی ضریب ارتجاعی نرمال و ضریب ارتجاعی مماسی است. پس از تطابق شرایط توده‌سنگ ساخت‌گاه طرح با توصیه‌های ارائه شده توسط سازندگان نرم‌افزار، مقادیر مورد نظر ضرایب ارتجاعی نرمال و مماسی، برای تمام مقاطع به صورت $R_N = 0.35$ و $R_T = 0.85$ در نظر گرفته شده است. برای شبیه‌سازی در نرم‌افزار *Rocfall*^{4.03} ۴ مقطع که بلوک‌های سنگی در آنها پتانسیل ریزش بیشتری داشتند، مدل شده‌اند. نتایج شبیه‌سازی در ۴ مقطع، برای بلوک‌های بحرانی انتخاب شده مؤید سقوط بلوک‌ها در شرایط زلزله مبنای طرح در دیواره مشرف به نیروگاه و برخورد آن‌ها به تأسیسات نیروگاه می‌باشد. بلوک‌ها پس از جدایش در برخوردهای اولیه به سطح شیب‌دار و توده‌سنگ‌های منفصلی که از قبل در منطقه وجود دارند، سرعت و انرژی خود را از دست داده و با شدت کمتری نسبت به حالت اولیه حرکت، به تأسیسات نیروگاه می‌رسند. از این رو انجام تمهیدات لازم برای جلوگیری از برخورد بلوک‌ها به نیروگاه امری اجتناب‌ناپذیر خواهد بود.

در مرحله بعد، شبیه‌سازی سقوط‌سنگ به روش عددی المان مجزا، توسط نرم‌افزار *PFC* انجام شده است. برای تهیه هندسه سه‌بعدی دیواره مشرف به نیروگاه، شبیه‌سازی در دو مرحله توسط نرم‌افزار *Surfer* انجام شده است. ابتدا با استفاده از نقشه توپوگرافی منطقه و برداشت‌های تفصیلی، شبیه‌سازی محدوده نیروگاه توسط نرم‌افزار *Surfer* به طور دقیق انجام شده است. سپس برای تهیه مدل سه‌بعدی برای نرم‌افزار *PFC*^{2D}، مقاطع عرضی با توجه به معین بودن پتانسیل سقوط‌سنگ در آن‌ها، با جزئیات بیشتری شبیه‌سازی شده‌اند.

با استفاده از محیط برنامه‌نویسی *Fish*، این مقاطع در نرم‌افزار *PFC* مدل شده‌اند. همچنین بلوک‌های سنگی به وسیله مجموعه‌ای از المان‌های کروی (در حالت سه‌بعدی) به صورت هم‌شکل و مجزا مدل شده‌اند. در فرایند شبیه‌سازی سقوط سنگ با این روش، با حرکت بلوک در طی مسیر و برخورد آن با سطح شیب‌دار، پیوند بین المان‌ها شکسته شده و به صورت مجموعه المان‌های کوچک‌تر یا المان‌های منفرد به حرکت خود ادامه می‌دهند. جابجایی و حرکت المان‌ها بر اساس برآیند نیروها انجام می‌شود.

نتایج شبیه‌سازی برای سقوط بلوک‌های سنگی محدوده توسط نرم‌افزار *PFC* بیان‌گر این مطلب است که برخورد قطعات شکسته شده سنگ (مجموعه المان‌های کوچک) به تأسیسات نیروگاه، سبب خساراتی در آن می‌شود.

بنابراین برای مقابله با این پدیده و ایمن کردن تأسیسات نیروگاه از خطرات ناشی از آن، شبیه‌سازی مجدد با ایجاد خاکریز با شیب معکوس انجام شده است. در این روش از خاک‌های تحکیم نیافته در تراز قبل از تأسیسات نیروگاه با شیب معکوس استفاده شده است. نتایج این شبیه‌سازی نشان می‌دهد که با انجام این روش اجرایی و کم هزینه می‌توان سرعت و انرژی قطعات سنگی قبل از برخورد به تأسیسات نیروگاه را مهار کرد.

۲-۷ پیشنهادات

امروزه شبیه‌سازی پدیده سقوط‌سنگ و مدل‌کردن رفتار بلوک‌های سنگی برای کاهش خسارات ناشی از این پدیده از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. نزدیک کردن فرایند شبیه‌سازی به رفتار واقعی بلوک‌ها در حین سقوط، نیاز به ایجاد نرم‌افزارهای با قابلیت بالا دارد. مجموعه فعالیت‌های انجام شده در این پایان‌نامه برای فرایند شبیه‌سازی سقوط‌سنگ با نرم‌افزار *PFC* سبب شده است تا با شناخت محدودیت‌ها و ارائه راه‌کارهایی برای بهبود آن، تحلیل کاملی از این پدیده در آینده برای مسائل مشابه صورت گیرد. در همین زمینه پیشنهاداتی به شرح زیر می‌توان ارائه داد:

- ۱- در شبیه‌سازی تحلیلی پدیده سقوط‌سنگ با نرم‌افزار *Rockfall*، وابستگی شبیه‌سازی به دو پارامتر ضرایب ارتجاعی نرمال و مماسی و عدم تأثیر شکل و خردایش بلوک سنگی در اثر برخورد به سطح شیب‌دار سبب شده است نتایج واقعی برای شبیه‌سازی به دست نیاید. بنابراین تصحیح عدم وابستگی فرایند شبیه‌سازی به دو پارامتر ضرایب ارتجاعی نرمال و مماسی و تصحیح خردایش بلوک سنگی در اثر برخورد به سطح شیب‌دار در این نرم‌افزار، می‌تواند نتایج بهتری حاصل شود.
- ۲- اجرای فرایند شبیه‌سازی و تعیین نقشه پتانسیل ریزش سنگ برای مناطق با استعداد و تعیین سازه‌های احتمالی موثر از ناپایداری در موارد مشابه قبل از تأسیس ساخت‌گاه در مناطق کوهستانی

- ۳- انجام مطالعات ژئوتکنیکی و آزمایشگاهی بیشتر برای تعیین پارامترهای مورد نیاز نرم‌افزار

PFC و تصحیح محدودیت‌های نرم‌افزار

- ۴- تصحیح محدودیت‌های نرم‌افزار روش عددی *PFC* برای مدل‌کردن مقاطع با افزودن قابلیت

اخذ داده‌ها و ترسیم مقاطع در آن

- ۵- در شبیه‌سازی عددی در نرم‌افزار *PFC*، تأثیر رفتار بلوک‌های در حال سقوط در اثر برخورد به بلوک‌های منفصل که از قبل در مسیر ریزش قرار دارند نادیده گرفته شده است. برای بهبود شبیه‌سازی، این تصحیح نیز باید در نظر گرفته شود.
- ۶- پاک‌سازی شیب مشرف به گود نیروگاه از بلوک‌های منفصل با استفاده از روش‌های آتشکاری کنترل‌شده به طوری که پرتاب سنگ در آنها در جهات خارج از گود نیروگاه طراحی شود.

منابع و مأخذ

- [1]-Federico Agliardi, Fausto Guzzettia, Giovanni Crostab, Riccardo Dettic (2002)
"STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls".
- [۲]-کمک پناه، علی- منتظرالقائم، سعید؛ ۱۳۷۲، "پهنه بندی زمین لغزش در ایران" تألیف، چاپ اول
- [3]-Jing, L. and J. A. Hudson (2002). "Numerical Methods in Rock Mechanics." Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 39: 409-427.
- [4]-F. Agliardi, G.B. Crosta (2003). "High resolution three-dimensional numerical modelling of rockfalls", International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences 40 455-471.
- [5]-F. V. Donzé (2005). "Discrete Element Group for Risk Mitigation", member of the RNVO Research Federation, Natural Hazards and Vulnerability of Structures Federation
- [6]-Masuyuki Ujihira (2002) "Study on the 3-dimensional simulation for rock fall along a slope Relationship between falling behaviors and rock shape". Graduate School of Engineering, Hokkaido University- Syogo Hosoya Civil and Construction Engineering Division, Ueda City, JAPAN
- [۷]-شریعت جعفری، محسن؛ ۱۳۷۵، "زمین لغزش (مبانی و اصول پایداری شیب های طبیعی)" تألیف، چاپ اول
- [۸]-مشانیر، شرکت خدمات مهندسی برق؛ ۱۳۷۹، گزارش تعیین پارامترهای ژئومکانیکی ساخت گاه سد و نیروگاه گتوند علیا(فاز توجیهی)، شرکت توسعه منابع آب و نیروی ایران
- [9]- Googleearth software (2007) "[http:// www.Googleearth.com/gmm](http://www.Googleearth.com/gmm)"
- [۱۰]-مشانیر، شرکت خدمات مهندسی برق؛ ۱۳۷۹، "زمین شناسی عمومی منطقه سد و نیروگاه"، پیوست ۱۶، مطالعات توجیهی سد و نیروگاه گتوند علیا
- [۱۱]-صفری، اباسد؛ ۱۳۸۰، "تحلیل پایداری شیروانی ساحل راست سد گتوند علیا" پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن دانشکده معدن و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود

[۱۲]- ترابی، سید رحمان؛ ۱۳۸۲، "مقدمه ای بر مکانیک سنگ" تألیف، انتشارات دانشگاه شاهرود، تألیف،

چاپ اول

[۱۳]- فاروق حسینی، محمد حسین؛ ۱۳۷۶، "درآمدی بر مکانیک سنگ"، تألیف، چاپ اول

[۱۴]- امیر شاه کرمی، سید عبدالعظیم- تقی پور، سیاوش؛ ۱۳۸۱ "مکانیک سنگ رفتار برشی درزه های

سنگ (پایداری و تغییر شکل پذیری)، انتشارات جهاد دانشگاهی امیرکبیر، تألیف، چاپ اول

[۱۵]- مهتاب قدس، شرکت مشاوره مهندسی، ۱۳۸۳، "گزارش مقدماتی تحلیل پایداری شیب های سنگی"

[16]- Dwayne D. Tannant -School of Mining & Petroleum Eng (2003). " Predictions of Rock Fall Trajectories Using Discrete Element and Lumped Mass Modelling Methods", Depart of Civil & Environ. Eng., University of Alberta, Canada
Proceedings 4th Int. Conference on Computer Applications in the Minerals Industries

[17]-Douglas Stevens (1998). Rockfall : "A Tool For Probabilistic Analysis, Design Of Remedial Measures And Prediction Of Rockfalls", A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master of Applied Science Graduate Department of Civil Engineering University of Toronto.

[18]-K.T. Chaua, , R.H.C. Wonga, J.J. Wub (2002) ."Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impacts" .

[19]-Douglas Stevens (2003). "Determining Input Parameters for a RocFall Analysis", <http://www.rocscience.com/support/pdf/RF-FAQ3.pdf>.

[20]- Vincenzo C.(28th 2002); "Impact of Larg Landslides In the Mountain environment" ,Scientific Report, Feb.

[21]-Szwilski A. B. (2002). "Rock Fall Ratings, Valuation And Data Management Systems For Higheay And Railway Rock Slopes". MARSHALL UNIVERSITY, College of Information Technology and Engineering .

[۲۲]- اجل لوئیان، رسول- محمدی، سید داود؛ ۱۳۸۲، رده بندی توده سنگ (روشی کاربردی در مهندسی

عمران)، تألیف، چاپ اول

- [23]-Evert Hoek, "Analysis of rockfall hazards", chapter 9, Consulting Engineer Inc.
3034 Edgemont Boulevard, North Vancouver, B.C.Canada
- [24]-G. B. Crosta and F. Agliardi (2004). "Parametric evaluation of 3D dispersion of
rockfall trajectories". Dipartimento di Scienze Geologiche e Geotecnologie,
Universit`a degli Studi di Milano, Bicocca, Italy

پیوست الف
جداول برداشت
ناپیوستگی‌ها

جدول الف- ۱ داده‌های مربوط به ناپیوستگی‌های برداشت شده مربوط به لایه کنگلومراتی بالای تراز ۳۸۰ متر

DISCONTINUITY SURVEY DATA

PROJECT: Gotvand Hydroelectric Power Project
Survey Area: Natural Slopes Behind Power House

Sheet 1 of 2

General Orientation of the Slope under Survey:

Dip Direction: 315

Dip: 85

Control Points along Traverse Line:

A B C D E F G H I 4

Coordinates of
Important
Control Points:

Point No	4	A	B	C	D	E	F	G
x	304846	304799	304785	304764	304751	304746	304740	304726
y	3571198	3571167	3571065	3571152	3571137	3571126	3571124	3571111
z	380	377	375	378	380	380	380	380

Control Point	Distance (m) from Control Point towards Last Control Point	Strata	Discontinuity No.	Structure Type	Dip Direction	Dip	Persistence	Spacing	Aperture	Infilling	Roughness	Water	Photographs No.
4	4+4m	Conglomerate	1	M	310	85	5	3	3	1	4	1	
4	4+4m	Conglomerate	2	J	65	88	5	4	2	1	4	1	
4	4+4m	Conglomerate	3	B	80	20	5	4	2	1	4	1	
4	4+8m	Conglomerate	4	F	50	85	5	4	7	5	1	1	
4	4+9m	Conglomerate	5	M	315	88	5	3	3	1	4	1	
4	4+10m	Conglomerate	6	F	320	60	3	3	5	1	4	1	
4	4+20m	Conglomerate	7	M	60	78	5	4	3	5	4	1	
4	4+21m	Conglomerate	8	B	135	50	5	4	2	1	4	1	
4	4+25m	Conglomerate	9	M	55	89	5	4	3	5	4	1	
A	A-6m	Conglomerate	10	J	145	20	5	4	3	5	4	1	
A	A-6m	Conglomerate	11	M	220	89	5	3	3	1	4	1	
A	A+0m	Conglomerate	12	M	45	85	5	5	7	5	4	1	
A	A+4m	Conglomerate	13	J	40	85	5	5	2	1	4	1	
A	A+10m	Conglomerate	14	J	45	85	5	5	2	1	4	1	
A	A+13m	Conglomerate	15	M	40	89	5	5	2	1	4	1	
A	A+15m	Conglomerate	16	J	330	35	3	4	1	1	4	1	
A	A+15m	Conglomerate	17	M	320	89	2	3	5	1	4	1	
B	B-20m	Conglomerate	18	M	320	88	3	4	1	1	4	1	
B	B-12m	Conglomerate	19	M	50	88	4	4	7	5	4	1	
B	B+4m	Conglomerate	20	M	320	80	4	4	7	1	4	1	
B	B+4m	Conglomerate	21	M	65	70	4	5	7	1	4	1	
B	B+10m	Conglomerate	22	M	45	75	4	4	7	5	4	1	
B	B+13m	Conglomerate	23	B	140	25	4	4	1		4	1	
C	C-2m	Conglomerate	24	M	65	75	4	5	7	1	4	1	
C	C+4m	Conglomerate	25	M	65	75	4	5	7	5	4	1	
C	C+10m	Cong. / Silty clay	26	B	140	20	4	5	1	1	4	1	
C	C+15m	Conglomerate	27	M	45	75	5	4	8	5	4	1	
C	C+17m	Conglomerate	28	M	45	88	4	4	7	5	1	1	
C	C+22m	Conglomerate	29	M	140	80	4	4	7	5	4	1	

DISCONTINUITY SURVEY DATA

Sheet 2 of 2

Control Point	Distance (m) from Control Point towards Last Control Point	Strata	Discontinuity No.	Structure Type	Dip Direction	Dip	Persistence	Spacing	Aperture	Infilling	Roughness	Water	Photographs No.
D	D+0m	Conglomerate	30	M	50	87	4	5	7	5	4	1	
D	D+0m	Conglomerate	31	M	323	80	5	4	7	1	4	1	
D	D+2	Conglomerate	32	B	150	25	5	4	4	1	4	1	
E	E-2m	Conglomerate	33	M	55	88	5	4	2	5	4	1	
E	E-2m	Conglomerate	34	M	45	88	4	4	7	5	4	1	
E	E+0m	Conglomerate	35	M	236	75	3	4	6	5	4	1	
E	E+0m	Conglomerate	36	M	56	60	3	4	6	5	4	1	
E	E+0m	Conglomerate	37	M	310	60	4	4	6	5	4	1	
E	E+0m	Conglomerate	38	M	310	85	3	4	5	1	4	1	
F	F-7	Conglomerate	39	M	30	70	3	4	5	4	4	1	
F	F-8	Conglomerate	40	M	50	60	4	4	8	5	4	1	
F	F+0	Cong./ cong.	41	B	190	10	5	5	1		4	1	
F	F+0	Conglomerate	42	M	60	50	4	4	9	5	4	1	
G	G-5	Conglomerate	43	M	280	85	3	5	3	5	4	1	
G	G-10	Conglomerate	44	M	20	78	5	5	8	5	4	1	
G	G+1	Conglomerate	45	M	40	80	4	4	5	10	4	1	
H	H-15	Conglomerate	46	M	320	80	4	4	7	5	4	1	
H	H-8	Conglomerate	47	M	40	80	5	4	7	5	4	1	
H	H-2	Conglomerate	48	M	20	80	5	4	8	5	4	1	
H	H+6	Conglomerate	49	M	42	80	3	4	7	5	4	1	
I	I+0	Conglomerate	50	M	37	80	3	4	7	5	4	1	
I	I-3	Cong. Fine/ Coarse	51	B	78	38	5	5	2	0	4	1	
I	I+1	Conglomerate	52	M	48	80	4	4	7	5	4	1	
I	I-2	Conglomerate	53	M	30	85	4	4	7	5	4	1	
Structure Type		Persistence		Aperture				Infilling					
J	Joint	1	Very Low	<1m	1	Very Tight	< 0.1 mm	1	Clean				
M	Major Joint	2	Low	1-3m	2	Tight	0.1-0.25mm	2	Surface Staining				
F	Fault	3	Medium	3-10m	3	Partly Open	0.25-0.50mm	3	Loam				
B	Bedding	4	High	10-20m	4	Open	0.50-2.50mm	4	Calcite				
S	Shistosity	5	Very High	>20m	5	Mod. Wide	2.50-10mm	5	Silty Gravel/ Gravely Silt				
O	Foliation	Roughness		6	Wide	>10		6	Hydro-Thermals				
	Water			7	Very Wide	1-10cm		7	Oxides				
1	Dry			8	Extremely	10-100cm		8	Breccia				
2	Seepage			9	Cavernous	>1m		9	Sheared				
3	<1 L/ sec			Spacing				1	Close 0.06-0.20m	4	Very Wide 2-6m		
4	1-10 L/ sec							2	Moderate 0.20-0.60m	5	Extremely Wide >6m		
5	10- 100 L/ sec							3	Wide).60-2m				
6	>100 L/ sec												

جدول الف- ۲ داده‌های مربوط به ناپیوستگی‌های برداشت شده مربوط به لایه کنگلومراتی بالای تراز ۲۸۰

DISCONTINUITY SURVEY DATA													
PROJECT: Gotvand Hydroelectric Power Project										Sheet 1 of 1			
Survey Area: Natural Slopes Behind Power House													
General Orientation of the Slope under Survey:						Dip Direction: 315		Dip: 85					
Control Points along Traverse Line:						M		N		P			
Coordinates of Important Control Points:		Point No		M		N		P					
		x		304376.34		304518.30		304556.54					
		y		3570852.64		3570912.9		3570991.32					
		z		303.26		285.23		283.69					
Control Point	Distance (m) from Control Point towards Last Control Point	Strata	Discontinuity No.	Structure Type	Dip Direction	Dip	Persistence	Spacing	Aperture	Infilling	Roughness	Water	Photographs No.
M	M+0	Cong./ Siltstone	1	B	120	15	5	5	1	1	2	2	
M	M+0	Cong-2	2	M	210	85	5	5	3	2	4	1	
M	M+10	Cong-2	3	M	35	85	5	5	2	2	4	1	
M	M+15	Cong-2	4	M	210	80	3	4	3	2	4	1	
M	M+15	Siltstone	5	J	290	84	2	2	1	1	3	1	
M	M+15	Siltstone	6	J	220	85	2	1	1	1	2	1	
M	M+15	Siltstone	7	J	210	25	1	3	1	1	3	1	
M	M+16	Cong-2	8	M	210	88	3	4	7	5	4	1	
M	M+16	Cong-2	9	M	140	75	4	5	2	2	4	1	
M	M+16	Cong-2	10	M	45	80	5	5	7	5	4	1	
M	M+16	Cong-2	11	J	210	85	5	4	9	5	4	1	
N	N+6	Cong-2	12	F	210	85	5		8	9	4	1	
N	N+0	Cong-2	13	F	80	65	5		5	9	2	1	
N	N+20	Cong./ Siltstone	14	B	100	25	5		2	4	4	2	
N	N+20	Cong-2	15	M	290	88	4	4	2	2	4	1	
N	N+26	Cong-2 / Cong-3	18	F	40	75	5		8	9	4	1	
N	N+26	Cong-3	19	M	130	80	5	4	3	5	4	1	
P	P+10	Cong-2	20	M	35	60	5		9	5	4	1	
P	P+20	Cong-2	21	M	65	65	5	4	8	5	4	1	
P	P+40	Cong-2	22	M	200	80	5	5	7	5	2	1	
Structure Type		Persistence		Aperture		Infilling							
J	Joint	1	Very Low <1m	1	Very Tight	< 0.1 mm	1	Clean					
M	Major Joint	2	Low 1-3m	2	Tight	0.1-0.25mm	2	Surface Staining					
F	Fault	3	Medium 3-10m	3	Partly Open	0.25-0.50mm	3	Loam					
B	Bedding	4	High 10-20m	4	Open	0.50-2.50mm	4	Calcite					
S	Shistosity	5	Very High >20m	5	Mod. Wide	2.50-10mm	5	Silty Gravel/ Gravely Silt					
O	Foliation	Roughness		6	Wide	>10	6	Hydro-Thermals					
Water		1	Stepped	7	Very Wide	1-10cm	7	Oxides					
1	Dry	2	Undulating	8	Extremely	10-100cm	8	Breccia					
2	Seepage	3	Planar	9	Cavernous	>1m	9	Sheared					
3	<1 L/ sec	4	Rough	Spacing									
4	1-10 L/ sec	5	Smooth	1	Close	0.06-0.20m	4	Very Wide	2-6m				
5	10- 100 L/ sec	6	Slickensided	2	Moderate	0.20-0.60m	5	Extremely Wide	>6m				
6	>100 L/ sec			3	Wide	0.60-2m							

DISCONTINUITY SURVEY DATA

Sheet 1 of 1

Dip Direction:	315
----------------	-----

Dip:	85
------	----

1	2
---	---

Point No	1	2
x	304909.01	304891.96
y	3571401.1	3571364.95
z	246	252.5

[illegible]

جدول ب-۱ ضرایب ارتجاعی نرمال و مماسی مورد استفاده در نرم افزار $Rockfall^{4.03}$ [۱۹]

Rocscience Coefficient of Restitution Table

<i>RN (Normal)</i>				<i>RT (Tangential)</i>				<i>Type</i>
<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Mean</i>	<i>Standard Deviation</i>	<i>Min</i>	<i>Max</i>	<i>Mean</i>	<i>Standard Deviation</i>	
0.370	0.420			0.870	0.920			Hard surface paving
0.330	0.370			0.830	0.870			Bedrock or boulders with little soil or vegetation
0.300	0.330			0.830	0.870			Talus with little vegetation
0.300	0.330			0.800	0.830			Talus with some vegetation
0.280	0.320			0.800	0.830			Soft soil slope with little vegetation
0.280	0.320			0.780	0.820			Vegetated soil slope
		0.315	0.064			0.712	0.116	Limestone face
		0.303	0.080			0.615	0.170	Partially vegetated limestone scree
		0.315	0.064			0.712	0.116	Uncovered limestone blast pile
		0.251	0.029			0.489	0.141	Vegetated covered limestone pile
		0.276	0.079			0.835	0.087	Chalk face
		0.271	0.018			0.596	0.085	Vegetated chalk scree
		0.384	0.133			0.687	0.130	Wood platform slope at 45 degrees was used as a control for the field tests they did.
		0.200				0.530		Dolomitic limestone boulders on rocky surfaces and on talus deposits
		0.100				0.200		Remolded pyroclastic from the terraces situated at the base of the cliff
		0.000				0.240		Impacts on detritus of the fans present at the foot of a rock cliff
		0.393				0.567		Soil
		0.453				0.737		Shotcrete
		0.487				0.910		Rock slope
		0.500				0.950		Bedrock
		0.350				0.850		Bedrock covered by large blocks
		0.300				0.700		Debris formed by uniform distributed elements
		0.250				0.550		Soil covered by vegetation

ادامه جدول ب-۱ ضرایب ارتجاعی نرمال و مماسی مورد استفاده در نرم افزار *Rockfall*^{4.03}

		0.530				0.990	Clean hard bedrock
		0.400				0.900	Asphalt roadway
		0.350				0.850	Bedrock outcrops with hard surface, large boulders
		0.320				0.820	Talus cover
		0.320				0.800	Talus cover with vegetation
		0.300				0.800	Soft soil, some vegetation
0.370	0.420						Smooth hard surfaces and paving
0.330	0.370						Most bedrock and boulder fields
0.300	0.330						Talus and firm soil slopes
0.300	0.330						Talus and firm soil slopes
0.280	0.300						Soft soil slopes
				0.870	0.920		Smooth hard surfaces such as pavement or smooth bedrock surfaces
				0.830	0.870		Most bedrock surfaces and talus with no vegetation
				0.820	0.850		Most talus slopes with some low vegetation
				0.800	0.830		Vegetated talus slopes and soil slopes with sparse vegetation
				0.780	0.820		Brush covered soil slope
		0.530	0.040			0.990	Clean Hard Bedrock
		0.350	0.040			0.850	Bedrock outcrop
		0.320	0.040			0.820	Talus cover
		0.320	0.040			0.800	Talus with vegetation
		0.400	0.040			0.900	Asphalt paving
		0.530	0.040			0.990	Clean Hard Bedrock
		0.350	0.040			0.850	Bedrock outcrop
		0.480	0.190			0.530	Concrete
		0.470	0.300			0.550	Weathered Rock
		0.480	0.000			0.530	Concrete
		0.470	0.000			0.550	Weathered Rock
		0.650	0.000			0.530	Concrete
		1.000	0.000			0.550	Weathered Rock
		0.530	0.040			0.990	Bedrock
		0.500	0.060			0.700	Blockfield
		0.500	0.060			0.650	Blockfield with bushes and small trees
		0.500	0.060			0.500	Blockfield with forest
		0.300	0.060			0.800	Top-soil with vegetation
		0.400	0.040			0.900	Asphalt paving
		0.350	0.040			0.850	Gravel road
		0.500				0.800	Sparsely forested slope is covered by a veneer of very fine weathered talus derived from weak shistose units underlying the limestone cap.
		0.500				0.800	Limestone on bare uniform talus slope formed of basalt fragments with a modal size of 5 cm
		0.700				0.900	rectangular bolder of metamorphosed tuff on bare rock and a steep snow covered shelf

پیوست ج

برنامه‌نویسی در محیط

Fish - PFC^{3D}

مقطع شماره ۲

Fish Programing PFC^{3D}**Example: SECTION 2**

PFC3D Command Window

```

---- *****
---- * All model specific information has been cleared *
---- *****

Pfc3D>
; FNAME: Rockfall.FIS
;
; This problem showing debris disconnected moving down a slope Gotvand.
; Extensive use is made of FISH.
; This problem is set up to allow experimentation with both geometry and properties.
; result instability analysis simulated with PFC3D use distinct element method(DEM).
;
; ----- create an arbitrary mountain slope -----
def mountain
; check for existing balls and kill them
command
del balls
end_command
; ----- check for existing hill, kill it if it exists -----
if mt_start_id > 0
_start_id = mt_start_id
_end_id = mt_end_id
zap_walls
endif

if mt_nodes < 2; keep it tidy
mt_nodes = 2
endif
wall_id = max_wid + 1 ; get starting id for slope
mt_start_id = wall_id ; save it so we can kill the walls
x0 = -60 ; we start at the origin and go right
y0 = 2.1; and down
xtable(1,1) = x0 ; table 1 contains x,y coord pairs
ytable(1,1) = y0 ; table 2 contains slope/convexity data

xtable(1,2)=xtable(1,1)+urand*170
ytable(1,2)=ytable(1,1)-urand*2
_temp=float(xtable(1,2)-xtable(1,1))
xtable(2,2)=(ytable(1,2)-ytable(1,1))/_temp

```

```

xtable(1,3)=xtable(1,2)+urand*14
ytable(1,3)=ytable(1,2)-urand*0.9
_temp=float(xtable(1,3)-xtable(1,2))
xtable(2,3)=(ytable(1,3)-ytable(1,2))/_temp
;
;
;
xtable(1,30)=xtable(1,29)+urand*50
ytable(1,30)=ytable(1,29)-urand*2.5
_temp=float(xtable(1,30)-xtable(1,29))
xtable(2,30)=(ytable(1,30)-ytable(1,29))/_temp

xtable(1,31)=xtable(1,30)+urand*180
ytable(1,31)=ytable(1,30)-urand*9.5*mt_steep
_temp=float(xtable(1,31)-xtable(1,30))
xtable(2,31)=(ytable(1,31)-ytable(1,30))/_temp
loop i (2, mt_nodes+1) ;make plan(segment) wall slpe
if xtable(2,i+1) <= xtable(2,i) then
ytable(2,i) = 0 ; convex at node
else
ytable(2,i) = 1 ; concave at node
endif
endloop
x1 = xtable(1,1)
z1 = ytable(1,1)
x2 = xtable(1,2)
z2 = ytable(1,2)
command
wall id wall_id kn mt_kn ks mt_ks fric mt_fric face &
(x1 480 z1) (x2 480 z2) (x2 540 z2) (x1 540 z1)
endcommand
x1 = xtable(1,1)
z1 = ytable(1,1)
x2 = xtable(1,2)
z2 = ytable(1,2)
command
wall id wall_id kn mt_kn ks mt_ks fric mt_fric face &
(x1 480 z2) (x2 480 z2) (x2 480 -330) (x1 480 -330)
wall id wall_id kn mt_kn ks mt_ks fric mt_fric face &
(x1 540 z2) (x2 540 z2) (x2 540 -330) (x1 540 -330)
endcommand

x1 = xtable(1,i)
z1 = ytable(1,i)
x2 = xtable(1,i+1)
z2 = ytable(1,i+1)
z=(z1)

```

```

command
wall id wall_id kn mt_kn ks mt_ks fric mt_fric face &
(x1 480 z2) (x2 480 z2) (x2 480 -330) (x1 480 -330)
wall id wall_id kn mt_kn ks mt_ks fric mt_fric face &
(x1 480 z) (x2 480 z2) (x1 480 z2)
wall id wall_id kn mt_kn ks mt_ks fric mt_fric face &
(x1 540 z2) (x2 540 z2) (x2 540 -330) (x1 540 -330)
wall id wall_id kn mt_kn ks mt_ks fric mt_fric face &
(x1 540 z) (x2 540 z2) (x1 540 z2)
endcommand
endloop
loop i (2, mt_nodes)
if ytable(2,i) = 0 ; convex, so add segment
x1 = x2
z1 = z2
x2 = xtable(1,i+1)
z2 = ytable(1,i+1)
command
wall id wall_id kn mt_kn ks mt_ks fric mt_fric face &
(x1 480 z1) (x2 480 z2) (x2 540 z2) (x1 540 z1)
endcommand
else ; concave, so add new wall
x1 = xtable(1,i)
z1 = ytable(1,i)
x2 = xtable(1,i+1)
z2 = ytable(1,i+1)
wall_id = wall_id + 1
command
wall id wall_id kn mt_kn ks mt_ks fric mt_fric face &
(x1 480 z1) (x2 480 z2) (x2 540 z2) (x1 540 z1)
endcommand
endif
endloop
x1 = xtable(1,mt_nodes+1) ; make a landing zone
z1 = ytable(1,mt_nodes+1)
x2 = x1 * 1.22
z2 = z1
wall_id = wall_id + 1

command
wall id wall_id kn mt_kn ks mt_ks fric mt_fric face &
(x1 480 z1) (x2 480 z2) (x2 540 z2) (x1 540 z1)
endcommand
mt_end_id = wall_id

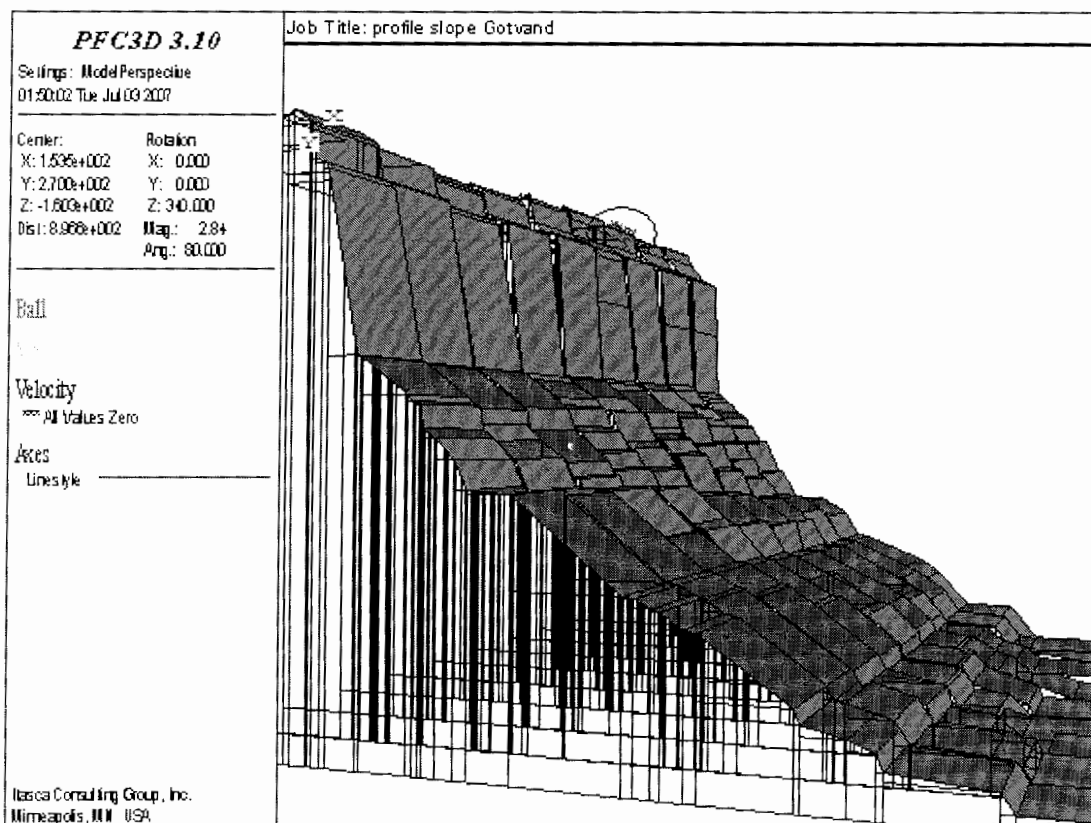
; -----create infinite walls bounding the slope-----
wall_id = wall_id + 101

```

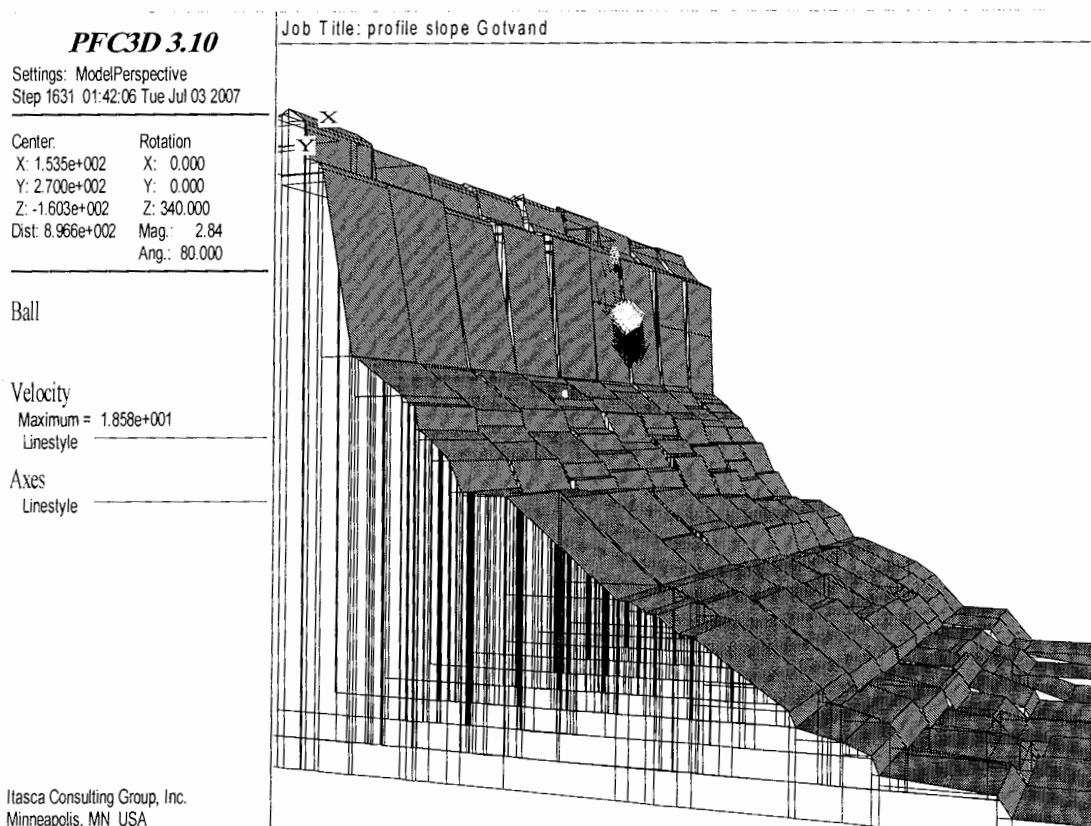
```

command
wall id wall_id kn mt_kn ks mt_ks fric mt_fric origin (0,mt_depth,0) &
normal (0,-1,0)
endcommand
end
;----- zap_walls -----
; FUNCTION : zap_walls
; PURPOSE : This FISH function deletes all walls within a
; given ID range.
; VARIABLES: _start_id -- starting id for range
; _end_id -- ending id for range
; msg -- contains return message string
; USE : a) assign values to _start_id and _end_id
; b) execute zapwalls
;
def zap_walls
_start_id = int(_start_id)
_end_id = int(_end_id)
if _start_id > 0
if _end_id >= _start_id
loop zw_i (_start_id, _end_id)
command
del wall zw_i
endcommand
endloop
msg = 'Walls ID ' + string(_start_id) + ' to '
msg = msg + string(_end_id) + ' deleted.'
else
msg = '_end_id specified less than _start_id'
endif
else
msg = '_start_id must be greater than zero'
endif
zw_i = out(msg)
end
;;
END
return
; EOF: Rockfall.FIS

```



شکل د-۱ مدل سازی مقاطع و بلوک بحرانی مقطع شماره ۴ قبل از اجرای فرایند شبیه سازی



شکل د-۲ حرکت بلوک بحرانی بر روی سطح شیب دار در حین فرایند شبیه سازی (مقطع شماره ۴)

PFC3D 3.10

Settings: ModelPerspective
Step 13302 01:48:02 Tue Jul 03 2007

Center:	Rotation
X: 1.535e+002	X: 0.000
Y: 2.700e+002	Y: 0.000
Z: -1.603e+002	Z: 340.000
Dist: 8.966e+002	Mag.: 2.84
	Ang.: 80.000

History

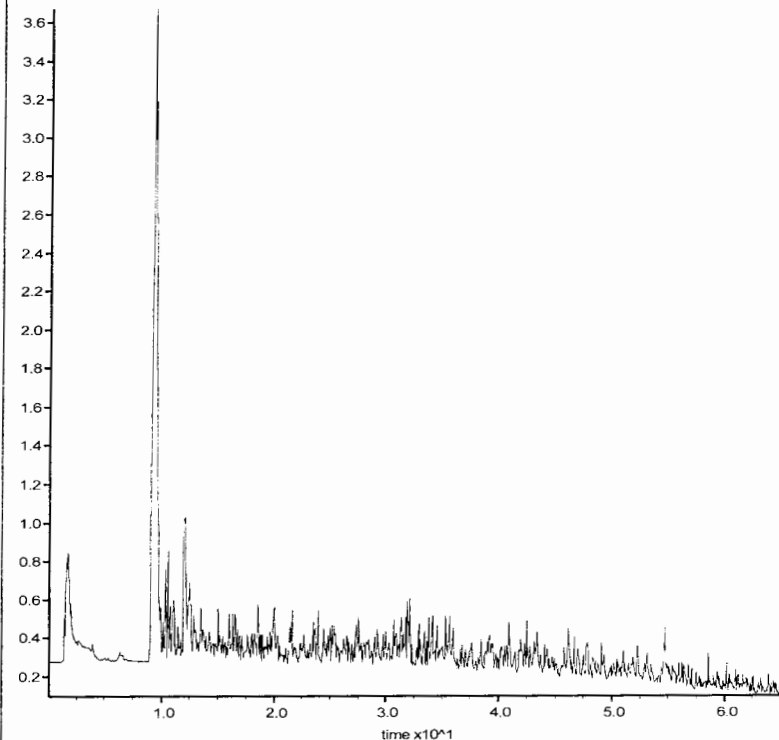
1 Mean Unbalanced Force
Linestyle
9.882e+004 <-> 3.674e+006

Vs.

6 real_time (FISH Symbol)
5.774e-002 <-> 6.559e+001

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, MN USA

Job Title: profile slope Gotvand

Mean Unbalance Force x10⁶

شکل د-۵ نمودار نیروهای نامتعادل در طی زمان برای بلوک در فرایند شبیه سازی (مقطع شماره ۴)

PFC3D 3.10

Settings: ModelPerspective
Step 13302 01:49:25 Tue Jul 03 2007

Center:	Rotation
X: 1.535e+002	X: 0.000
Y: 2.700e+002	Y: 0.000
Z: -1.603e+002	Z: 340.000
Dist: 8.966e+002	Mag.: 2.84
	Ang.: 80.000

History

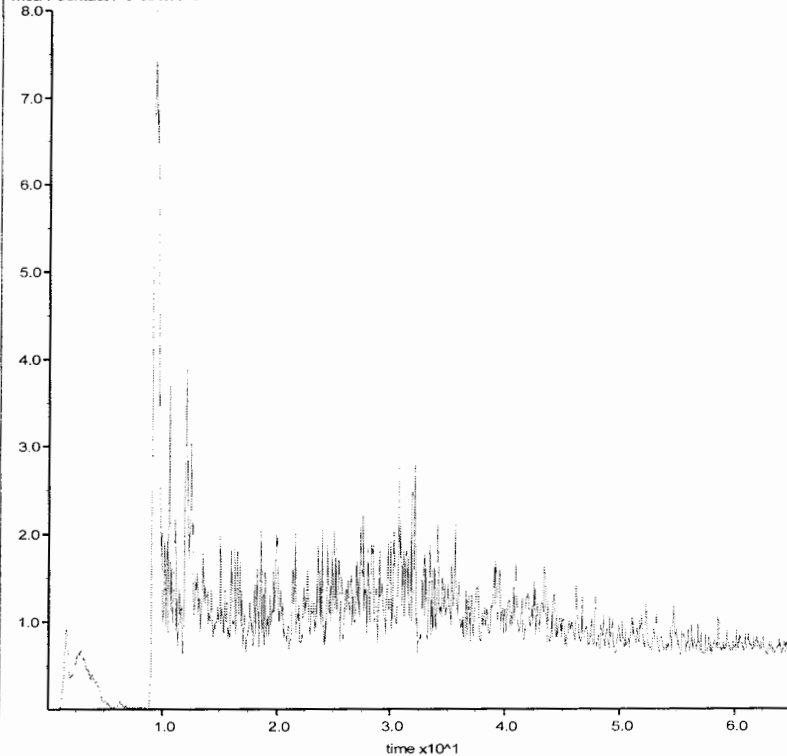
2 Mean Contact Force
Linestyle
4.596e-007 <-> 8.004e+006

Vs.

6 real_time (FISH Symbol)
5.774e-002 <-> 6.559e+001

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, MN USA

Job Title: profile slope Gotvand

Mean Contact Force x10⁶

شکل د-۶ نمودار نیروهای برخورد بلوک به سطح در طی زمان در فرایند شبیه سازی (مقطع شماره ۴)

PFC3D 3.10

Settings: ModelPerspective
23:48:51 Mon Jul 02 2007

Center:	Rotation
X: 1.535e+002	X: 0.000
Y: 2.700e+002	Y: 0.000
Z: -1.603e+002	Z: 340.000
Dist: 8.966e+002	Mag.: 2.84
	Ang.: 80.000

Ball

Velocity

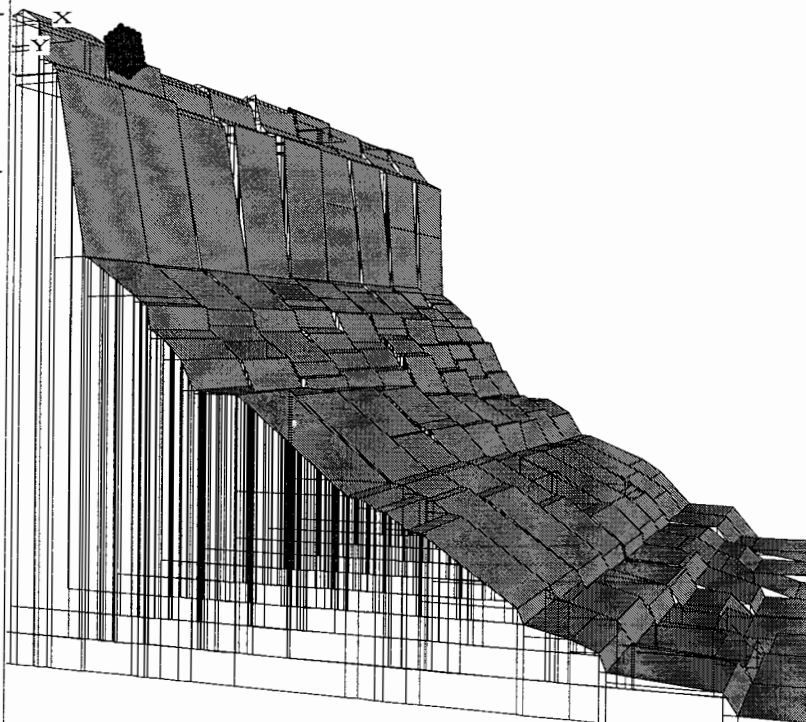
*** All Values Zero

Axes

Linestyle

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, MN USA

Job Title: profile slope Gotvand



شکل د-۷ مدل سازی مقاطع و بلوک بحرانی مقطع شماره ۹ قبل از اجرای فرایند شبیه سازی

PFC3D 3.10

Settings: ModelPerspective
Step 2001 00:12:12 Tue Jul 03 2007

Center:	Rotation
X: 1.535e+002	X: 0.000
Y: 2.700e+002	Y: 0.000
Z: -1.603e+002	Z: 340.000
Dist: 8.966e+002	Mag.: 2.84
	Ang.: 80.000

Ball

Velocity

Maximum = 2.884e+001

Linestyle

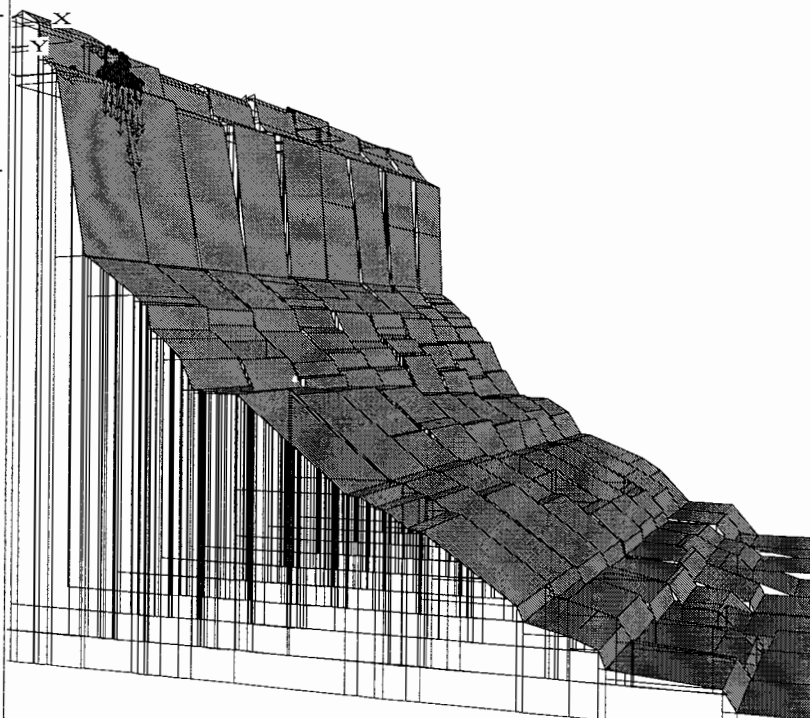
Axes

Linestyle

History

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, MN USA

Job Title: profile slope Gotvand



شکل د-۸ حرکت بلوک بحرانی بر روی سطح شیب دار در تراز بالای ۳۸۰ (مقطع شماره ۹)

PFC3D 3.10

Settings: ModelPerspective
Step 5930 00:13:26 Tue Jul 03 2007

Center:	Rotation
X: 1.535e+002	X: 0.000
Y: 2.700e+002	Y: 0.000
Z: -1.603e+002	Z: 340.000
Dist: 8.966e+002	Mag.: 2.84
	Ang.: 80.000

Ball

Velocity

Maximum = 2.758e+001

Linestyle

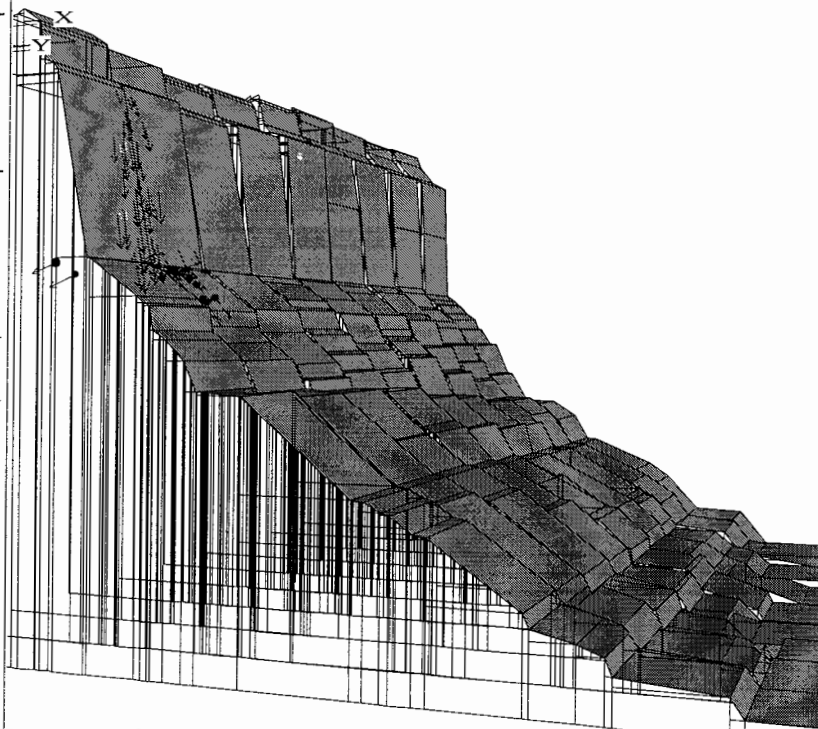
Axes

Linestyle

History

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, MN USA

Job Title: profile slope Gotvand



شکل د-۹ برخورد بلوک بحرانی بر روی سطح شیبدار در حین فرایند شبیه سازی (مقطع شماره ۹)

PFC3D 3.10

Settings: ModelPerspective
Step 32364 00:23:54 Tue Jul 03 2007

Center:	Rotation
X: 1.535e+002	X: 0.000
Y: 2.700e+002	Y: 0.000
Z: -1.603e+002	Z: 340.000
Dist: 8.966e+002	Mag.: 2.84
	Ang.: 80.000

Ball

Velocity

Maximum = 3.087e+001

Linestyle

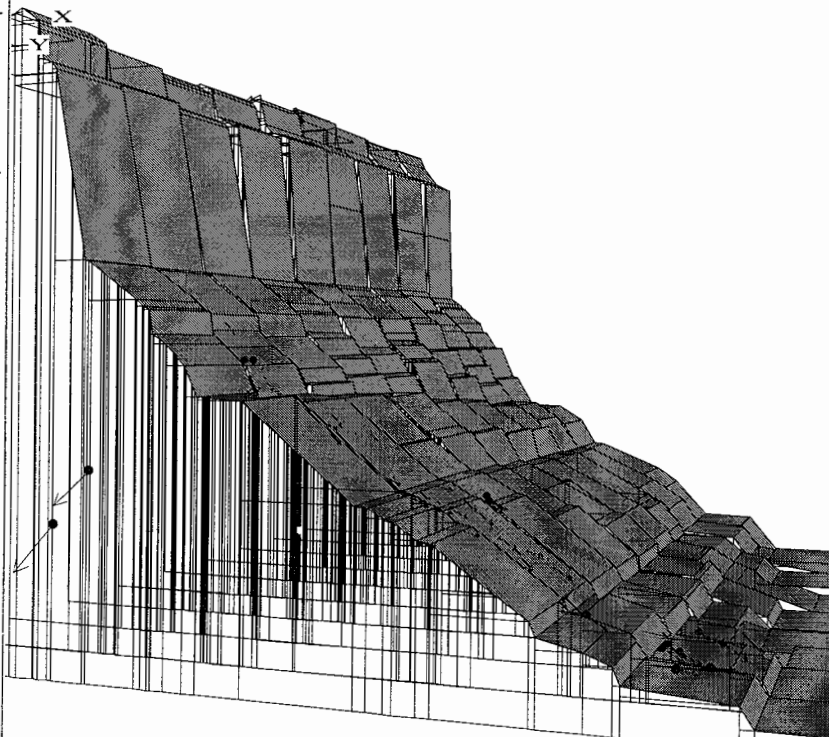
Axes

Linestyle

History

Itasca Consulting Group, Inc.
Minneapolis, MN USA

Job Title: profile slope Gotvand



شکل د-۱۰ حرکت خرده بلوک های جدا شده در طول مسیر در مراحل انتهایی شبیه سازی (مقطع شماره ۹)

PFC3D 3.10
 Settings: ModelPerspective
 Step 39808 01:30:22 Tue Jul 03 2007

Center: Rotation
 X: 1.535e+002 X: 0.000
 Y: 2.700e+002 Y: 0.000
 Z: -1.603e+002 Z: 340.000
 Dist: 8.966e+002 Mag.: 2.84
 Ang.: 80.000

Axes

Linestyle

History

1 Mean Unbalanced Force

Linestyle

2.198e+005 <-> 1.568e+007

Vs.

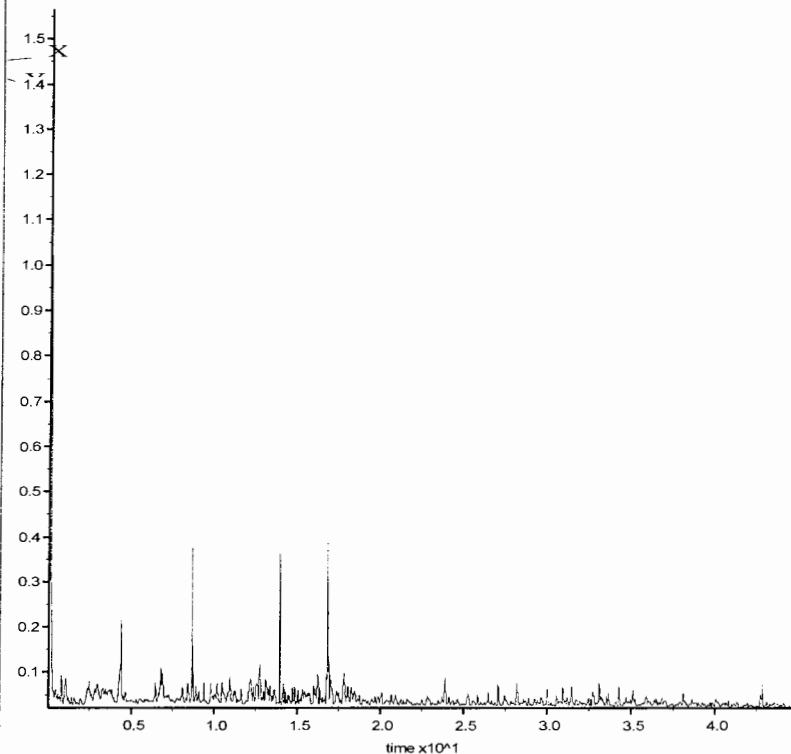
6 real_time (FISH Symbol)

5.639e-002 <-> 4.499e+001

Itasca Consulting Group, Inc.
 Minneapolis, MN USA

Job Title: profile slope Gotvand

Mean unbalance Force x10⁷



شکل د-۱۱ نمودار نیروهای نامتعادل در طی زمان برای بلوک در فرایند شبیه سازی (مقطع شماره ۹)

PFC3D 3.10
 Settings: ModelPerspective
 Step 39808 01:28:57 Tue Jul 03 2007

Center: Rotation
 X: 1.535e+002 X: 0.000
 Y: 2.700e+002 Y: 0.000
 Z: -1.603e+002 Z: 340.000
 Dist: 8.966e+002 Mag.: 2.84
 Ang.: 80.000

Axes

Linestyle

History

2 Mean Contact Force

Linestyle

9.141e+003 <-> 5.605e+007

Vs.

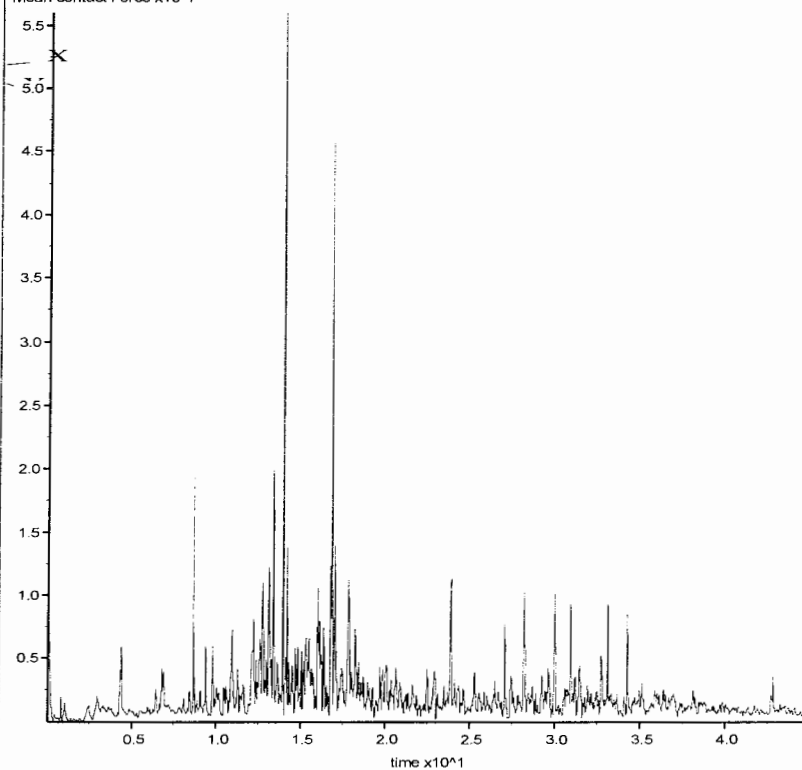
6 real_time (FISH Symbol)

5.639e-002 <-> 4.499e+001

Itasca Consulting Group, Inc.
 Minneapolis, MN USA

Job Title: profile slope Gotvand

Mean contact Force x10⁷



شکل د-۱۲ نمودار نیروهای برخورد بلوک به سطح در طی زمان در فرایند شبیه سازی (مقطع شماره ۹)

Abstract

One of the discussions in the rock slope stabilization is stability analysis of distinct or hanging rock blocks located on sidehill and slope walls so called "Rock Fall". As the importance of these structures in mountainous regions, stabilization of these blocks or encounter to hazards associated with these are necessary in designing and lay out of these structures. Gotvand dam and power plant are located on 25Km of the north of Shoshtar on Bakhtiyari and Aghajari formations. Analysis on steep slope adjacent to the north of power plant represented highly potential of rock fall with respect to vertical and horizontal discontinues on the upper levels of these wells. For this reason, mechanical behavior of rock mass off the slope (after separation) and as falling in its trajectory has been simulated using PFC software with discrete element method. In this method, motion of distinct rock blocks on well was considered using spheroid, uniform and discrete elements. Mechanical behavior of rock mass was described using movement equations and motion of particles and their interactions at the contacts. The model results demonstrated that programming for reducing damages associated with rock fall or prevention of falling by stabilization and consolidation of the rock mass in this region area was essential.

Keywords: Gotvand power plant, Simulation rock block falling, discrete element numeric method, PFC software