

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده : علوم زمین
گروه : زمین شناسی زیست محیطی

پهنه بندی خطر ریزش سنگی در شهر شاهرود

کژال حیدری

استاد راهنما :
دکتر ناصر حافظی مقدس

استاد مشاور
دکتر رمضان رمضانی اومالی

پایان نامه تحصیلی جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

تابستان ۱۳۸۸

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده : علوم زمین
گروه : زمین شناسی زیست محیطی

پایان نامه کارشناسی ارشد خانم کژال حیدری

تحت عنوان: پهنه بندی خطر ریزش سنگی در شهر شاهرود

در تاریخ توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی و با درجه مورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	اساتید مشاور	امضاء	اساتید راهنما
	نام و نام خانوادگی : دکتر رضانی اومالی		نام و نام خانوادگی : دکتر ناصر حافظی مقدس
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :

امضاء	نمایندة تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
	نام و نام خانوادگی :		نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :
			نام و نام خانوادگی :

تقديم به

روح بزرگوار پدرم

دستان پر مهر مادرم و برادران عزيزم

تقدیر و تشکر

همتم بدرقه راه کن ای طایر قدس
که درازست ره مقصد و من نو سفرم
با سپاس از ایزد منان که بر این بنده ناچیز خویش منت نهاده تا گام در راه کشف ذره‌ای کوچک از
کهکشان بی کران علم و دانش گذارد. از زحمات بی دریغ و دلسوزانه استاد راهنمای گرانقدر و عزیزم
جناب آقای دکتر ناصر حافظی مقدس که مرا در انجام مراحل مختلف این تحقیق راهنمایی و ارشاد
نموده‌اند، تشکر و قدر دانی می‌نمایم و برای ایشان آرزوی تندرستی و موفقیت روز افزون دارم.
بنده پیر مغنم که ز جهلم برهاند
پیر ما هر چه کند عین عنایت باشد
همچنین از استاد گرامی جناب آقای دکتر رمضان رضانی اومالی نیز که مشاور این تحقیق بودند،
سپاسگزارم.

از لطف و کمک استاد گرانقدر جناب آقای دکتر محمد فاروق حسینی تشکر و قدر دانی می‌نمایم. از
دوستان عزیزم سرکار خانم‌ها مهندس زهرا پور رحیم نجف آبادی، مرضیه نیکنامی، زینب آقایی،
مهری باقر کاظمی، بصیری و قفاری و آقایان مهندس رضا نعیمی، مرتضی رحیمی، رضا ثوابی، اکبر
نورافکن، ارسطو مینویی و حسین شریفی که به راستی تبلور مهر و عطوفتند و در مراحل مختلف
انجام این تحقیق یاری بخشم بودند، خالصانه سپاسگزار و ممنونم و از درگاه حق برایشان آرزوی
سربلندی و شادکامی می‌نمایم.

تنش درست و دلش شاد باد و خاطرش خوش
که دست دادش و یاری ناتوانی داد
همچنین از جناب آقای دکتر کرمی ریاست محترم دانشکده علوم زمین، جناب آقای دکتر فردوست
نماینده محترم تحصیلات تکمیلی و کارشناسان محترم دانشکده زمین شناسی، جناب آقایان شاه
حسینی، میرباقری، خانعلی زاده و سرکار خانم سعیدی به جهت مساعدت‌های ایشان قدردانی می-
نمایم.

در پایان از خانواده عزیزم؛ پدر بزرگوارم که همواره مشوق من در پیمودن راه علم و دانش بود و مادر و
براداران گرامی‌ام که همیشه پشتیبان من بوده‌اند و همچنین عموی گرانقدرم جناب آقای خسرو
حیدری و تمامی دوستان دیگر نیز که هر کدام به نحوی در انجام این تحقیق کمک نموده‌اند و نام آنها
در اینجا نمی‌گنجد سپاسگزاری می‌نمایم.

دانشجو تأیید می نماید که مطالب مندرج در این پایان نامه (رساله) نتیجه تحقیقات خودش می باشد و در صورت استفاده از نتایج دیگران مرجع آن را ذکر نموده است.

کلیه حقوق مادی مترتب از نتایج مطالعات، آزمایشات و نوآوری ناشی از تحقیق موضوع این پایان نامه (رساله) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد .

شهریور ۱۳۸۸

چکیده

ریزش سنگی یکی از انواع ناپایداری‌های دامنه‌ای است که در اکثر مناطق کوهستانی دنیا رخ می‌دهد. سرعت بالا و وقوع ناگهانی از جمله تفاوت‌های ریزش سنگی نسبت به دیگر انواع ناپایداری‌های دامنه‌ای می‌باشد. به همین دلیل ویرانگرترین حرکت‌های توده‌ای به شمار می‌آیند و باعث از بین رفتن جان انسانها و ایجاد خسارات سنگین به تاسیسات، مناطق مسکونی، جاده‌ها، مزارع و . . . می‌شوند. به دلیل گستردگی ریزش‌های سنگی و همچنین خطرات بالای آن، در چند دهه اخیر مطالعات و کارهای زیادی در زمینه بررسی و تحقیق روی این پدیده انجام گرفته است. در کشورمان ایران نیز این روند نوپا ولی رو به افزایش است. با توجه به گستردگی مناطق کوهستانی کشور و سوابقی که در مورد خسارات ناشی پدیده ریزش سنگی وجود دارد، انجام مطالعات بیشتر در این زمینه ضروری است. در این تحقیق به طور موردی پایداری دامنه‌های سنگی ارتفاعات تپال در شمال غربی شهر شاهرود مورد تحلیل قرار گرفته و پدیده ریزش سنگی شبیه سازی شده است. نظر به اینکه عوامل زیادی از جمله ویژگی‌های اقلیمی محل، سنگ شناسی منطقه، وضعیت ساختاری شامل گسلش‌های مهم و اصلی محل و دسته درزه‌های مختلف در هر محل، از عوامل تاثیر گذار بر وقوع ریزش سنگی و حتی نحوه ریزش قطعات هستند؛ جهت بررسی دقیق زمین شناسی محل نقشه زمین شناسی منطقه در مقیاس ۱/۱۰۰۰۰ تهیه شده و مطالعات درزه نگاری شامل برداشت موقعیت و خصوصیات برشی درزه‌ها در ۱۲ مقطع انجام گرفته است. با استفاده از این داده‌ها ناپایداری دامنه‌ای به دو روش استریوگرافیک توسط نرم افزار Dips 5.103 و شبیه سازی تعادل حدی توسط نرم افزار Swedge 4.078 مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این روش‌ها حاکی از پایداری دامنه‌های سنگی محل در شرایط استاتیک و ناپایداری آنها در شرایط دینامیک است. در صورت وقوع شرایط بحرانی یعنی بارش‌های شدید و متوالی و وقوع زلزله- های شدید قطعات سنگی دامنه به شدت ناپایدار خواهند بود و خطری جدی برای مناطق پایین دست خود ایجاد خواهند کرد. همچنین مکانیسم ریزش سنگی با استفاده از نرم افزار Rocfall 4.039 شبیه سازی شده است. در بخش آخر نتایج شبیه سازی مکانیسم ریزش در نرم افزار Arc GIS 9.3 به صورت پهنه‌های خطر با درجات مختلف از لحاظ شدت نشان داده شده است. با رسم نقشه کاربری اراضی در منطقه مطالعاتی و روی هم اندازی آن با نقشه پهنه بندی خطر مناطق در معرض خطر مشخص شده‌اند. در روشی محافظه کارانه این مناطق شامل جاده سلامتی، مزار شهدای گمنام و جاده دسترسی به آن، حدود نیمی از پارک آزادی، هتل جهانگردی، بخش‌هایی از مناطق مسکونی پایین دست جاده سلامتی، بخش‌هایی از مجتمع تفریحی آبشار و جاده کاج و حواشی آن در محدوده خطر قرار گرفته‌اند. در بخش آخر پیشنهادهایی جهت کاهش خطر و ریسک ناشی از وقوع ریزش سنگی ارائه گردیده است.

کلمات کلیدی: ریزش سنگی، شاهرود، درزه نگاری، تحلیل ناپایداری، پهنه بندی.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

- حیدری ک.، حافظی مقدس ن.، رمضانی اومالی ر.، (۱۳۸۷)، ارزیابی پتانسیل ریزش سنگی در شمال شهر شاهرود، دوازدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، اهواز.
- حیدری ک.، حافظی مقدس ن.، رمضانی اومالی ر.، (۱۳۸۸)، پهنه بندی خطر ریزش سنگی در شمال شهر شاهرود، ششمین کنفرانس زمین شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

فهرست مطالب

صفحه	عنوان
	فصل اول
	کلیات
۲	۱-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه.....
۲	۲-۱- هدف و ضرورت مطالعه حاضر.....
۴	۳-۱- روش انجام مطالعات.....
۶	۴-۱- اختصاصات عمومی منطقه مطالعاتی.....
۶	۱-۴-۱- آب و هوا و اقلیم منطقه.....
۷	۲-۴-۱- زمین شناسی عمومی منطقه.....
۹	۱-۲-۴-۱- زمین ریخت شناسی منطقه.....
۹	۲-۲-۴-۱- چینه شناسی عمومی منطقه مورد مطالعه.....
۱۱	۳-۲-۴-۱- وضعیت ساختاری.....
۱۲	۴-۲-۴-۱- لرزه خیزی.....

فصل دوم

ناپایداری دامنه‌ای، پهنه بندی خطر و مدیریت ریزش‌های سنگی

۱۴	۱-۲- مقدمه.....
۱۴	۲-۲- ناپایداری دامنه‌ای.....
۱۵	۱-۲-۲- عوامل ناپایداری دامنه ای.....
۱۵	۲-۲-۲- طبقه بندی ناپایداری‌های دامنه ای.....
۱۸	۳-۲- ریزش سنگی.....
۲۰	۴-۲- مکانیسم ریزش سنگی.....
۲۶	۵-۲- تحلیل پایداری دامنه.....
۲۸	۱-۵-۲- مطالعات درزه نگاری.....
۲۹	۱-۱-۵-۲- مقاومت برشی سطح درزه.....
۳۳	۲-۱-۵-۲- زبری سطح درزه.....
۳۶	۳-۱-۵-۲- مقاومت فشاری دیواره درزه.....
۳۷	۳-۱-۵-۲- زاویه اصطکاک پایه.....
۳۹	۴-۱-۵-۲- دانسیته.....
۴۱	۲-۵-۲- تحلیل استریوگرافیک پایداری دامنه.....
۴۱	۳-۵-۲- تحلیل پایداری با نرم افزار Swedge.....
۴۶	۶-۲- معرفی نرم افزار Rocfall.....
۵۲	۱-۶-۲- تاثیر سرعت زاویه‌ای بر مسیر ریزش سنگی.....
۵۳	۲-۶-۲- محدودیت شبیه سازی در Rocfall.....
۵۳	۷-۲- مدیریت و پهنه بندی خطر ریزش سنگی.....
۵۴	۱-۷-۲- روش‌های کیفی.....

۵۶	 ۲-۷-۲- روش های کمی
۵۶	 ۲-۷-۲- ۱- مدل های تجربی
۵۸	 ۲-۷-۲- ۲- مدل های متکی بر فرآیند
۶۱	 ۲-۷-۲- ۳- مدل های متکی بر GIS
۶۸	 ۲-۷-۳- روش های کاهش خطر
۶۹	 ۲-۷-۳- ۱- روش های اصلاح و تثبیت دامنه
۷۱	 ۲-۷-۳- ۲- انتخاب روش اصلاح دامنه

فصل سوم

مطالعات زمین شناسی و درزه نگاری

۷۵	 ۳-۱- مقدمه
۷۵	 ۳-۲- زمین شناسی محدوده مطالعاتی
۷۸	 ۳-۲-۱- چینه شناسی منطقه مطالعاتی
۸۳	 ۳-۲-۲- وضعیت ساختاری
۸۴	 ۳-۲-۳- لرزه خیزی
۸۵	 ۳-۳- مطالعات درزه نگاری
۸۵	 ۳-۳-۱- مقدمه
۸۶	 ۳-۳-۲- اختصاصات درزه ها

فصل چهارم

تحلیل پایداری و مکانیسم ریزش سنگی در منطقه مورد مطالعه

۹۷	 ۴-۱- مقدمه
۹۷	 ۴-۲- ارزیابی ناپایداری دامنه ای به روش استریوگرافیک
۱۰۳	 ۴-۳- تحلیل ناپایداری گوه ای با استفاده از نرم افزار Swedge 4.078
۱۰۵	 ۴-۳-۱- اثر فشار آب بر احتمال گسیختگی
۱۰۸	 ۴-۳-۲- اثر زلزله بر احتمال گسیختگی
۱۰۸	 ۴-۴- شبیه سازی مکانیسم ریزش سنگی با استفاده از نرم افزار Rocfall 4.078

فصل پنجم

پهنه بندی خطر ریزش سنگی و ارائه راهکارهای کاهش خطر

۱۲۲	 ۵-۱- مقدمه
۱۲۲	 ۵-۲- پهنه بندی خطر ریزش سنگی
۱۲۲	 ۵-۲-۱- تعیین منشاء ریزش سنگی
۱۲۵	 ۵-۲-۲- تعیین محل توقف قطعات ریزشی
۱۲۹	 ۵-۲-۴-۱- روش های پیشنهادی اصلاح دامنه در منطقه مطالعاتی

فصل ششم

نتیجه گیری و پیشنهادها

۱۳۲	 ۱-۶- مقدمه
۱۳۲	 ۲-۶- مطالعات زمین شناسی و درزه نگاری
۱۳۳	 ۳-۶- تحلیل پایداری
۱۳۳	 ۴-۶- شبیه سازی مکانیسم ریزش سنگی
۱۳۴	 ۵-۶- پهنه بندی خطر ریزش سنگی
۱۳۵	 ۶-۶: پیشنهادها
۱۳۶	 منابع

فهرست اشکال

شکل ۱-۱:	موقعیت جغرافیایی و راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه.....	۳
شکل ۲-۱:	موقعیت ارتفاعات مورد مطالعه نسبت به شهر و محل‌های تفریحی.....	۵
شکل ۳-۱:	نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ محدوده چند کیلومتری اطراف منطقه مورد مطالعه.....	۱۰
شکل ۲-۱:	تجزیه نیروی وزن بر روی دامنه.....	۱۴
شکل ۲-۲:	انواع ناپایداری‌های دامنه‌ای: الف) ریزش، ب) واژگونی، ج) لغزش دورانی، د) لغزش صفحه‌ای، ه) لغزش گوه‌ای و ی) گسترش جانبی.....	۱۷
شکل ۳-۲:	ریزش سنگ و مسدود شدن جاده چالوس در تاریخ ۱۳۸۶/۰۱/۲۴.....	۱۹
شکل ۴-۲:	تأثیر زاویه شیب در نحوه انتقال قطعات ریزشی.....	۲۱
شکل ۵-۲:	پرش‌دگی درزه توسط رس و سیلت قابل مشاهده است.....	۲۹
شکل ۶-۲:	آزمایش تنش برشی ناپیوستگی‌ها.....	۳۰
شکل ۷-۲:	آزمایش Patton روی استحکام برشی نمونه‌های دندانه دار.....	۳۱
شکل ۸-۲:	نمودار مقاومت برشی درزه‌ها برای سطح درز کاملاً صاف یا کاملاً زبر.....	۳۱
شکل ۹-۲:	مقاومت برشی در حالت‌های مختلف.....	۳۱
شکل ۱۰-۲:	منحنی بارتون برای تعیین مقاومت برشی ناپیوستگی‌های زبر.....	۳۲
شکل ۱۱-۲:	پروفیل‌های زبری و مقادیر JRC هم ارز با آنها.....	۳۵
شکل ۱۲-۲:	تخمین استحکام فشارشی دیواره درزه از سختی اشمیت.....	۳۷
شکل ۱۳-۲:	تأثیر سرعت زاویه‌ای بر مسیر ریزش.....	۵۲
شکل ۱-۳:	نمایی از پرتگاهی که در اثر عملکرد گسلی که موازی با روند ارتفاعات از داخل سازند لار عبور نموده، به وجود آمده است.....	۷۶
شکل ۲-۳:	دیواره‌های پر شیب سازند لار.....	۷۶
شکل ۳-۳:	نمایی از دشت جلالی در شمال ارتفاعات مورد مطالعه.....	۷۷
شکل ۴-۳:	شهر شاهرود در دامنه جنوبی ارتفاعات مورد مطالعه.....	۷۷
شکل ۵-۳:	واریزهای موجود بر روی دامنه مشرف بر مناطق مسکونی.....	۷۸
شکل ۶-۳:	نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰ منطقه مورد مطالعه.....	۷۹
شکل ۷-۳:	رخنمون سازند شمشک در منطقه مورد مطالعه که متعلق به واحد Js ₂ است.....	۸۰
شکل ۸-۳:	گسل‌های مهم منطقه.....	۸۴
شکل ۹-۳:	موقعیت مقاطع برداشت درزه نگاری در ارتفاعات منطقه مورد مطالعه.....	۸۶
شکل ۱-۴:	موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۱.....	۹۹
شکل ۲-۴:	موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۲.....	۹۹
شکل ۳-۴:	موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۳.....	۹۹
شکل ۴-۴:	موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۴.....	۱۰۰
شکل ۵-۴:	موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۵.....	۱۰۰
شکل ۶-۴:	موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۶.....	۱۰۰
شکل ۷-۴:	موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۷.....	۱۰۱
شکل ۸-۴:	موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۸.....	۱۰۱
شکل ۹-۴:	موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۹.....	۱۰۱

شکل ۴-۱۰: موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۱۰.....	۱۰۲
شکل ۴-۱۱: موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۱۱.....	۱۰۲
شکل ۴-۱۲: موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۱۲.....	۱۰۲
شکل ۴-۱۳: تاثیر فشار آب بر احتمال گسیختگی در شرایط مختلف.....	۱۰۷
شکل ۴-۱۴: اثر شتاب زلزله بر احتمال وقوع گسیختگی.....	۱۰۸
شکل ۴-۱۵: مسیرهای طی شده در مقطع ۳. با سرعت ۱/۲۱ متر در ثانیه (الف) و با سرعت ۴ متر در ثانیه (ب).....	۱۱۴
شکل ۴-۱۶: بیشترین ارتفاع جهش در مقطع ۳. با سرعت ۱/۲۱ متر در ثانیه (الف) و با سرعت ۴ متر در ثانیه (ب).....	۱۱۴
شکل ۴-۱۷: بیشترین انرژی جنبشی در مقطع ۳. با سرعت ۱/۲۱ متر در ثانیه (الف) و با سرعت ۴ متر در ثانیه (ب).....	۱۱۴
شکل ۴-۱۸: بیشترین سرعت انتقالی در مقطع ۳ با سرعت ۱/۲۱ متر در ثانیه (الف) و با سرعت ۴ متر در ثانیه (ب).....	۱۱۵
شکل ۴-۱۹: مسیرهای طی شده در مقطع ۵ در حالتی که جاده سلامتی وجود دارد (الف) و حالتی که وجود ندارد (ب).....	۱۱۶
شکل ۴-۲۰: مقایسه نقاط توقف قطعات سنگی در مقطع ۵ در حالتی که جاده سلامتی وجود دارد (الف) و حالتی که وجود ندارد (ب).....	۱۱۶
شکل ۴-۲۱: مقایسه انرژی جنبشی کل در مقطع ۵ در حالتی که جاده سلامتی وجود دارد (الف) و حالتی که وجود ندارد (ب).....	۱۱۶
شکل ۴-۲۲: مقایسه انرژی جنبشی انتقالی در مقطع ۵ در حالتی که جاده سلامتی وجود دارد (الف) و حالتی که وجود ندارد (ب).....	۱۱۷
شکل ۴-۲۳: مسیرهای طی شده در مقطع ۱۱ در حالتی که جاده سلامتی وجود دارد (الف) و حالتی که وجود ندارد (ب).....	۱۱۷
شکل ۴-۲۴: مقایسه نقاط توقف قطعات سنگی در مقطع ۱۱ در حالتی که جاده سلامتی وجود دارد (الف) و حالتی که وجود ندارد (ب).....	۱۱۷
شکل ۴-۲۵: مقایسه ارتفاع پرش در مقطع ۱۱ در حالتی که جاده سلامتی وجود دارد (الف) و حالتی که وجود ندارد (ب).....	۱۱۸
شکل ۴-۲۶: مقایسه انرژی کل در مقطع ۱۱ در حالتی که جاده سلامتی وجود دارد (الف) و حالتی که وجود ندارد (ب).....	۱۱۸
شکل ۴-۲۷: مقایسه سرعت انتقالی در مقطع ۱۱ در حالتی که جاده سلامتی وجود دارد (الف) و حالتی که وجود ندارد (ب).....	۱۱۸
شکل ۴-۲۸: مقایسه پهنه بیشترین مسافت در حضور جاده سلامتی و عدم حضور آن.....	۱۲۰
شکل ۵-۱: پهنه بندی خطر ریزش سنگی بر اساس شبیه سازی ریزش سنگی بیشترین مسافت طی شده در هر مقطع توسط قطعات.....	۱۲۶
شکل ۵-۲: پهنه بندی خطر ریزش سنگی در منطقه مورد مطالعه بر اساس شبیه سازی ریزش بزرگترین قطعه سنگ در کل منطقه (به دست آمده از داده‌های صحرایی).....	۱۲۷

فهرست جداول

۸	جدول ۱-۱: آمار سی ساله ایستگاه سینوپتیک شاهرود.....
۱۱	جدول ۲-۱: واحدهای چینہ شناسی در شعاع چند کیلومتری منطقه مورد مطالعه.....
۱۶	جدول ۱-۲: پارامترهای موثر در ناپایداری شیبها
۱۷	جدول ۲-۲: تقسیم بندی ناپایداریهای دامنه‌ای بر مبنای طبقه بندی وارنز (۱۹۷۸).....
۱۸	جدول ۲-۳: تعاریف مختصر در مورد انواع ناپایداری در دامنه‌های سنگی بر اساس طبقه بندی وارنز (۱۹۷۸)...
۲۹	جدول ۲-۴: اختصاصات مهم درزه‌ها که برای بررسی پایداری دامنه در بازدید صحرایی برداشت شوند.....
۴۰	جدول ۲-۵: مقادیر اصطکاک پایه سنگ آهک در تنش‌های قائم مختلف در دو حالت خشک و اشباع.....
۴۲	جدول ۲-۶: چگالی انواع سنگ آهک در شرایط اشباع و خشک.....
۴۳	جدول ۲-۷: تحلیل استریوگرافیک انواع ناپایداری دامنه‌های سنگی.....
۵۷	جدول ۲-۸: تعدادی از سیستم‌های کیفی ارزیابی ریزش‌های سنگی.....
۷۰	جدول ۲-۹: خلاصه روش‌های پایدارسازی دامنه‌ها.....
۷۳	جدول ۲-۱۰: خلاصه‌ای از روش‌های اصلاح و پایدارسازی.....
۸۷	جدول ۳-۱-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۱.....
۸۷	جدول ۳-۱-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۱.....
۸۸	جدول ۳-۲-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۲.....
۸۸	جدول ۳-۲-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۲.....
۸۸	جدول ۳-۳-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۳.....
۸۹	جدول ۳-۳-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۳.....
۸۹	جدول ۳-۴-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۴.....
۸۹	جدول ۳-۴-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۴.....
۹۰	جدول ۳-۵-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۵.....
۹۰	جدول ۳-۵-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۵.....
۹۰	جدول ۳-۶-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۶.....
۹۱	جدول ۳-۶-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع ۶.....
۹۱	جدول ۳-۷-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۷.....
۹۱	جدول ۳-۷-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۷.....
۹۲	جدول ۳-۸-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۸.....
۹۲	جدول ۳-۸-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۸.....
۹۲	جدول ۳-۹-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۹.....
۹۳	جدول ۳-۹-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۹.....
۹۳	جدول ۳-۱۰-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۱۰.....
۹۳	جدول ۳-۱۰-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۱۰.....
۹۴	جدول ۳-۱۱-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۱۱.....
۹۴	جدول ۳-۱۱-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۱۱.....
۹۴	جدول ۳-۱۲-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۱۱.....
۹۵	جدول ۳-۱۲-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۱۲.....

جدول ۴-۱: احتمال گسیختگی گوه بر اثر اعمال نیروهای خارجی و عدم اعمال آنها در حالتی که ترک	
کشی در نظر گرفته نشده است.....	۹۸
جدول ۴-۲-الف: خصوصیات هندسی گوه‌های مقطع شماره ۸.....	۱۰۳
جدول ۴-۲-ب: احتمال گسیختگی گوه‌های مقطع شماره ۸ در شرایط مختلف.....	۱۰۴
جدول ۴-۴: احتمال وقوع گسیختگی در حالات مختلف اعمال نیروهای خارجی و عدم اعمال آنها در حالتی	
که ترک‌های کشی مختلف در نظر گرفته شده است.....	۱۰۵
جدول ۴-۵: خصوصیات مواد تشکیل دهنده دامن که به صورت ورودی نرم افزار هستند.....	۱۰۹
جدول ۴-۶: خصوصیات ریزش سنگی در مقاطع مختلف، در شرایطی که ریزش سنگین‌ترین قطعه سنگ در	
هر مقطع بدون سرعت اولیه، ۱۰۰۰ بار شبیه سازی شده است.....	۱۱۰
جدول ۴-۷: خصوصیات ریزش سنگی در مقاطع مختلف در شرایطی که ریزش سنگین‌ترین قطعه سنگ در هر	
مقطع با سرعت ۱/۲۱ سانتی متر در ثانیه، ۱۰۰۰ بار شبیه سازی شده است.....	۱۱۱
جدول ۴-۸: خصوصیات ریزش سنگی در مقاطع مختلف، در شرایطی که ریزش سنگین‌ترین قطعه سنگ (در	
کل منطقه مورد مطالعه معادل ۲۱۳ تن) با سرعت اولیه معادل ۱/۲۱ متر در ثانیه، ۱۰۰۰ بار شبیه سازی شده	
است.....	۱۱۲

فصل اول

کلیات

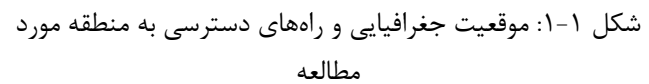
۱-۱- موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه

شهر شاهرود بزرگترین شهرستان استان سمنان، می باشد که از شمال به ارتفاعات سلسله جبال البرز و شهرستان های گنبد کاووس و گرگان، از شرق به شهرستان سبزوار، از جنوب به دشت کویر و استان اصفهان و از مغرب به شهرستان دامغان مرتبط می شود. این شهر در محدوده عرض جغرافیایی $36^{\circ}23'$ تا $36^{\circ}27'$ شمالی و طول جغرافیایی $54^{\circ}55'30''$ تا $55^{\circ}1'30''$ شرقی و ارتفاع ۱۳۸۰ متر از سطح دریا واقع شده است.

شاهرود به لحاظ موقعیت ممتاز و ویژه جغرافیایی و قرار گرفتن بین رشته کوه های البرز و سرزمین های کویری همواره از جمله جاذبه های گردشگری ایران بوده است. مناطق حفاظت شده و پناهگاه حیات وحش خارتوران در جنوب شرقی شاهرود، تپال در شمال شرقی و خوش ییلاق از جمله جاذبه های این شهرستان است. در شکل ۱-۱ موقعیت جغرافیایی و راه های دسترسی به شاهرود نشان داده شده است.

۱-۲- هدف و ضرورت مطالعه حاضر

افزایش روز افزون جمعیت شهری باعث گسترش چشمگیر مرزهای شهری و احداث جاده ها و مسیرهای ارتباطی جدید شده است. یکی از مسائل مهم در مورد این توسعه، حرکت مرزهای شهری به سمت ارتفاعات و دامنه های کوهستانی می باشد. علت این موضوع علاقه مردم به چشم انداز زیباتر و آب و هوای مناسب تر این مناطق است. به علاوه بسیاری از مسیرهای ارتباطی نیز از مناطق کوهستانی عبور می کند. نواحی کوهستانی ذاتاً مستعد ناپایداری های دامنه ای، از جمله ریزش های سنگی می باشند.



علاوه بر استعداد داری طبیعی منطقه، انجام فعالیت‌های عمرانی بدون مطالعات دقیق زمین شناسی، می‌تواند شرایط را وخیم‌تر نموده و در مواقع بحرانی مثل بارندگی‌های شدید و متوالی و وقوع زلزله، منجر به وقوع حوادث دلخراش و فاجعه‌های انسانی گردد. لذا لازم است مسئولین و برنامه ریزان در راستای فعالیت‌های توسعه‌ای توجه کافی به این خطر طبیعی مبذول دارند. لازمه این امر انجام مطالعات دقیق درزه نگاری، تعیین احتمال گسیختگی و تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی خطر است تا با توجه به آنها اقدامات لازم جهت توسعه آتی مناطق شهری یا بهسازی و حفاظت از نواحی کنونی انجام گیرد. شهر شاهرود از شمال غرب محدود به ارتفاعات تپال است که با روند شمال شرق - جنوب غرب توپوگرافی تندی را ایجاد نموده است. شیب و اختلاف ارتفاع زیاد این کوه‌ها، پتانسیل خطر ریزش در حاشیه شهر را به خصوص در شرایط بارندگی‌های شدید و وقوع زمین لرزه افزایش داده است. هدف از مطالعه حاضر بررسی خطر ریزش سنگی در ارتفاعات حاشیه شمال غربی شهر شاهرود، شبیه سازی مکانیسم ریزش سنگی، تعیین محدوده خطر می‌باشد. همچنین راهکارهای مقابله و حفاظت از مناطق مورد تهدید به اختصار بیان شده است. در شکل ۱-۲ موقعیت ارتفاعات مورد مطالعه نسبت به شهر شاهرود و پارک‌ها و فضای سبز نشان داده شده است.

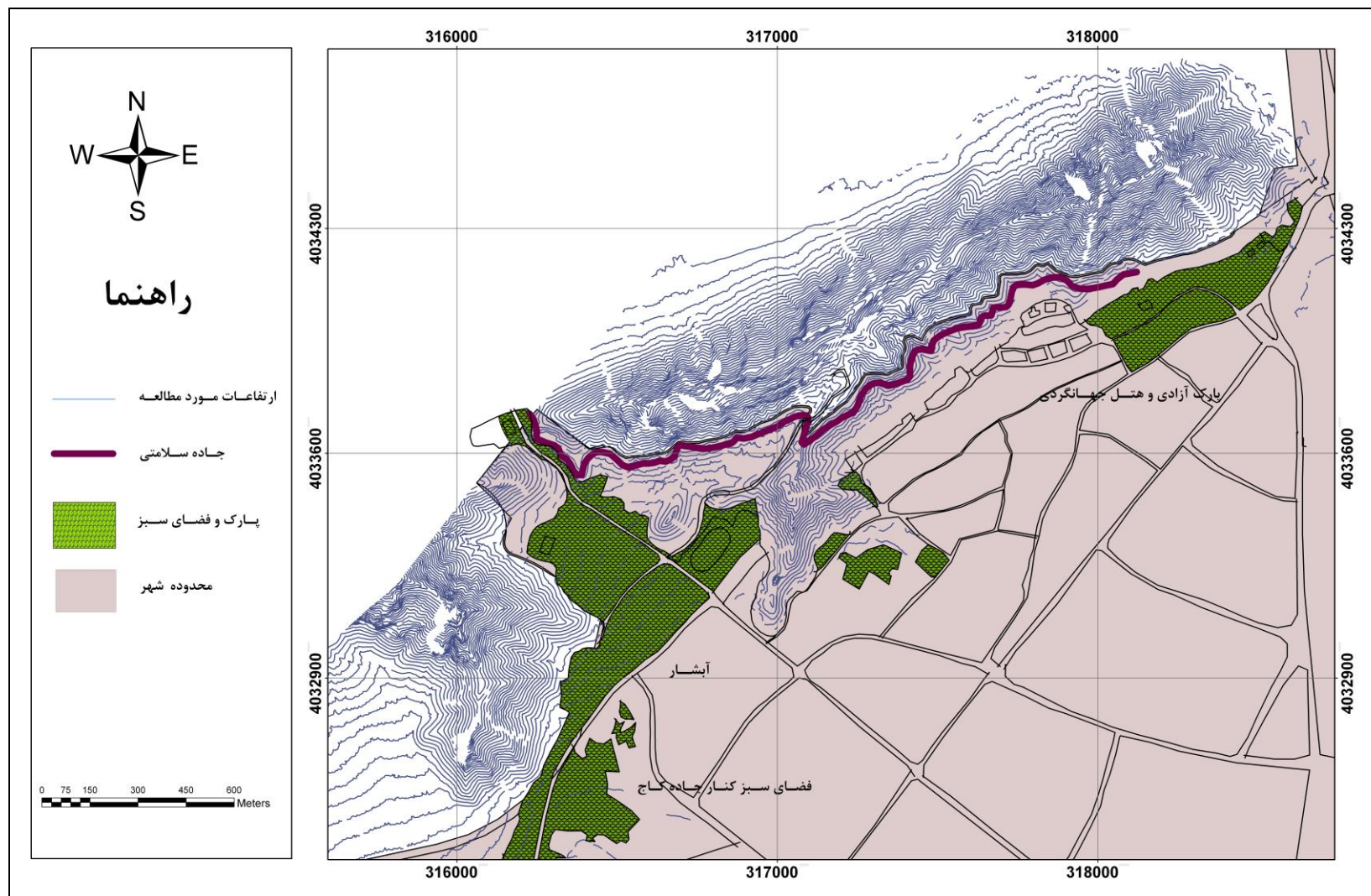
۱-۳- روش انجام مطالعات

در تحقیق حاضر به منظور بررسی ریزش سنگی و پهنه بندی مناطق مورد تهدید، به ترتیب اقدامات زیر انجام گرفت.

الف) مطالعات کتابخانه‌ای و گردآوری مطالب و داده‌های مورد نیاز

ب) تهیه نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰ منطقه با استفاده از عکس‌های هوایی ۱/۱۰۰۰۰ و بازدیدهای

صحرائی



شکل ۱-۲: موقعیت ارتفاعات مورد مطالعه نسبت به شهر و محل‌های تفریحی

ج) انجام مطالعات صحرایی و ارزیابی وضعیت ناپیوستگی‌ها و خصوصیات مقاومتی توده سنگ و درزه‌ها در ۱۲ مقطع و انجام تصحیحات لازم بر روی داده‌های برداشت شده

د) وارد کردن داده‌های جمع آوری شده به نرم افزار Dips 5.103 و انجام تحلیل استریوگرافیک و تعیین نوع ناپایداری محتمل

ه) بررسی و شبیه سازی احتمال گسیختگی گوه‌ای با استفاده از نرم افزار Swedge 4.078

و) بررسی و شبیه سازی مکانیسم ریزش سنگی با استفاده از نرم افزار Rocfall 4.039

ز) تهیه نقشه پهنه بندی خطر ریزش سنگی منطقه مورد مطالعه در محیط نرم افزار Arc GIS 9.3

۱-۴- اختصاصات عمومی منطقه مطالعاتی

خصوصیات طبیعی و ذاتی هر مکان بر نوع و شدت فرآیندهایی که در محل رخ می‌دهند تاثیر قابل توجه و انکار ناپذیری دارند. عوامل زمینه ساز ایجاد ناپایداری و گسیختگی قطعات در دامنه‌های سنگی و کنترل کننده مکانیسم ریزش بسیار متعددند و با هم رابطه متقابل دارند. از جمله این عوامل می‌توان به آب و هوا و اقلیم، خصوصیات زمین شناسی (سنگ شناسی، زمین ریخت شناسی و چینه شناسی)، زمین ساختی و لرزه خیزی منطقه اشاره کرد. در ادامه به هر کدام از این عوامل در منطقه مورد مطالعه به طور مختصر اشاره می‌شود.

۱-۴-۱- آب و هوا و اقلیم منطقه

شاهرود آب و هوای نیمه بیابانی با زمستان‌های سرد و خشک و تابستان‌های معتدل دارد. در این ناحیه رطوبت نسبی پایین است و تبخیر بالقوه از سطح خاک و پوشش نباتی بالغ صورت می‌گیرد. ریزش باران کم و ناچیز بوده و از سالی به سال دیگر متغیر است. این شهر بر طبق طبقه بندی کوپن، جزء اقلیم های

بیابانی و خشک طبقه‌بندی می‌شود. اما اقلیم آن با اقلیم‌های بیابانی عاری از پوشش گیاهی که بارندگی در آن‌ها به ندرت صورت می‌گیرد متفاوت بوده و دارای پوشش گیاهی و زمستان سرد است. بخش اعظم بارندگی آن به صورت رگبارهای تند و موضعی در فصول زمستان و بهار است که باعث طغیان خشک رودها شده و آب را به سرعت از دسترس خارج می‌کند و به سوی کویر مرکزی روانه می‌سازد (مساواتی، ۱۳۷۰).

بر اساس اطلاعات مندرج در جدول ۱-۱ میانگین بارش سالانه شاهرود، ۱۶۶/۶ میلی‌متر و متوسط دمای سالیانه ۱۴/۸ درجه سانتیگراد می‌باشد. باد غالب شاهرود، شمال شرقی است که از اسفند ماه شروع شده و سرعت و شدت آن کم‌کم رو به افزایش گذاشته و در تابستان به حداکثر می‌رسد. باد شمال در بهار و تابستان از حیث سرعت و شدت دارای اهمیت بوده و باد جنوب غرب نیز در زمستان و بهار قابل توجه می‌باشد.

۱-۴-۲- زمین شناسی عمومی منطقه

منطقه مورد مطالعه بخشی از ایالت ساختاری البرز شرقی می‌باشد و نمایانگر عملکرد رویدادهای کوهزایی، خشکی زایی و حرکات زمین ساختی مختلف و در نتیجه چین خوردگی‌ها و گسلش‌های متعدد ناشی از آنها است. کوه‌های منطقه با روند شمال شرقی - جنوب غربی جزئی از رشته کوه‌های البرز شرقی هستند که خود بخشی از قسمت شمالی کوهزایی آلپ-همالیا در آسیای غربی به شمار می‌رود که از شمال به بلوک فرورفته خزر و از جنوب به فلات ایران مرکزی محدود می‌شود (وزیری و همکاران، ۱۳۸۰). افتخارنژاد (۱۳۵۹) البرز شرقی را از البرز مرکزی - غربی جدا می‌داند و عقیده دارد که در طول زمان سیلورین و دونین زیرین گسل عطاری این دو بخش را از یکدیگر جدا نموده است ولی در دونین پایانی بخش البرز شرقی و غربی با ایران مرکزی ارتباط داشته است.

جدول ۱-۱: آمار سی ساله ایستگاه سینوپتیک شاهرود

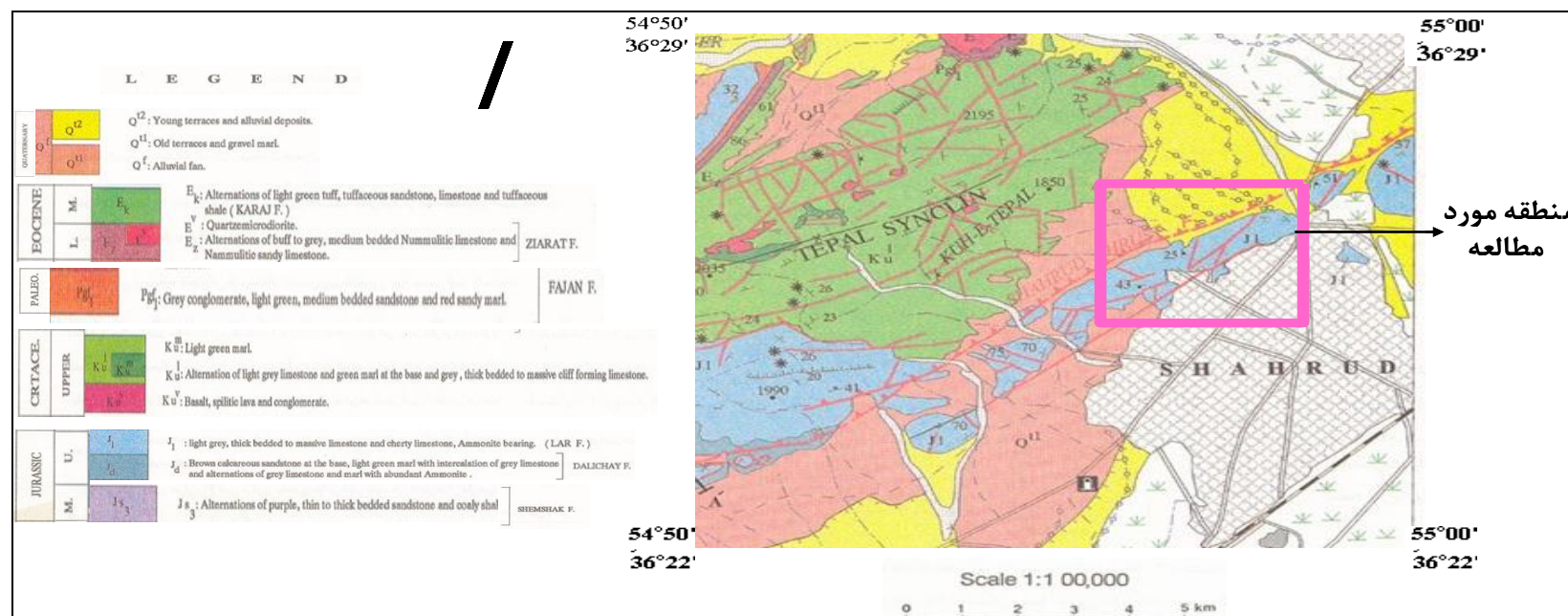
سال آماری	حداقل دمای سالانه (°C)	حداکثر دمای سالانه (°C)	متوسط دمای سالانه (°C)	میانگین بارش سالانه (mm)	میانگین تبخیر و تعرق واقعی (mm)
۱۳۵۸	-۹	۳۹	۱۴/۹	۲۰۷/۶	-
۱۳۵۹	-۱۱	۳۸	۱۳/۸	۲۰۱/۷	-
۱۳۶۰	-۶	۳۹	۱۵/۴	۱۴۱/۲	-
۱۳۶۱	-۱۲/۴	۳۸/۴	۱۳/۶	۱۹۸/۴	-
۱۳۶۲	-۱۱/۶	۴۲	۱۴/۲	۹۶	-
۱۳۶۳	-۱۰/۸	۳۷/۸	۱۳/۷	۱۸۳/۷	-
۱۳۶۴	-۱۰/۶	۳۸/۴	۱۴/۵	۷۸/۷	-
۱۳۶۵	-۹	۳۷/۶	۱۳/۹	۱۸۴	-
۱۳۶۶	-۵/۶	۳۷	۱۴/۶	۱۷۷/۷	-
۱۳۶۷	-۷/۶	۳۷/۸	۱۴/۵	۱۶۱/۹	-
۱۳۶۸	-۱۰	۳۹/۲	۱۴/۵	۱۴۸/۹	-
۱۳۶۹	-۹/۲	۳۸/۴	۱۲/۸	۲۸۵/۵	-
۱۳۷۰	-۱۰/۴	۳۷/۸	۱۳/۹	۲۷۹/۶	-
۱۳۷۱	-۲/۹	۳۸/۴	۱۲/۸	۲۵۸/۵	-
۱۳۷۲	-۸	۳۷	۱۳/۶	۲۲۷/۷	-
۱۳۷۳	-۷/۶	۳۸/۴	۱۵/۰	۱۱۰/۹	-
۱۳۷۴	-۷/۲	۴۰/۸	۱۴/۶	۲۲۷/۸	۶۹/۸
۱۳۷۵	-۸	۳۷/۲	۱۴/۹	۹۲/۸	۱۳۵/۴
۱۳۷۶	-۸/۷	۳۹/۸	۱۵/۳	۱۵۷/۵	۱۵۵/۵
۱۳۷۷	-۷	۴۰	۱۶/۳	۱۳۸/۷	۱۶۵/۰
۱۳۷۸	-۷/۷	۳۷/۸	۱۵/۱	۱۳۹/۱	۱۵۷/۷
۱۳۷۹	-۶/۹	۳۸/۶	۱۵/۹	۱۲۶/۹	۱۷۲/۳
۱۳۸۰	-۶	۳۸/۶	۱۶/۴	۹۰/۳	۱۵۷/۰
۱۳۸۱	-۶/۴	۳۹/۴	۱۵/۶	۱۶۲/۷	۱۴۵/۹
۱۳۸۲	-۸/۷	۴۰/۴	۱۵/۵	۱۷۴/۸	۱۶۰/۷
۱۳۸۳	-۸/۵	۳۸/۶	۱۵/۲	۱۸۰/۴	۱۴۵/۴
۱۳۸۴	-۹	۳۹/۶	۱۵/۹	۹۷/۳	۱۴۷/۳
۱۳۸۵	-۸/۸	۴۰/۶	۱۵/۹	۱۶۸	۱۵۳/۱
۱۳۸۶	-۸/۱	۳۸/۲	۱۴/۸	۲۱۶/۱	۱۷۸/۹
۱۳۸۷	-۶/۷	۳۷/۸	۱۶/۳	۱۱۲/۴	۱۷۵/۵
میانگین	-۸/۵	۳۸/۷	۱۴/۸	۱۶۶/۶	۱۵۱/۴

۱-۴-۲-۱- زمین ریخت شناسی منطقه

شهر شاهرود در حاشیه جنوبی ارتفاعات البرز شرقی قرار گرفته است. روند ارتفاعات شمال شرقی-شمال غربی است. حد فاصل کوه و دشت گسل تراستی شاهرود قرار دارد که اختلاف ارتفاع قابل توجهی را در شمال شاهرود ایجاد نموده است. رخنمون‌های آهکی لار و کرتاسه بالایی که سنگ‌های مقاوم در برابر فرسایش هستند، ستیغ و قله‌ها را تشکیل داده‌اند. این بخش‌ها دارای توپوگرافی تند و خشنی می‌باشند. محدوده‌هایی با توپوگرافی ملایم‌تر و کم ارتفاع‌تر مربوط به واحدهای ضعیف‌تر نظیر شیل، مارن و ماسه سنگ (سازند شمشک) و آهک مارنی (سازند دلیچای) می‌باشند. نهشته‌های کواترنری شامل تراس‌های قدیمی، مارن‌های ماسه‌ای و مخروط افکنه‌های آبرفتی (صحرای جلالی) بخش‌های مسطح و پست منطقه را تشکیل داده است که بین کوه‌های تپال و کوه‌های شمال شاهرود واقع شده‌اند (وزیری و همکاران، ۱۳۸۰).

۱-۴-۲-۲- چینه شناسی عمومی منطقه مورد مطالعه

بر اساس نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ شاهرود، واحدهای چینه شناسی در شعاع چند کیلومتری منطقه مورد مطالعه (شکل ۱-۳) در جدول ۱-۲ نشان داده شده است. شکل ۱-۳ نقشه زمین شناسی منطقه در مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ را نشان داده است.



شکل ۱-۳: نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ محدوده چند کیلومتری اطراف منطقه مورد مطالعه
(اقتباس از نقشه زمین شناسی شاهرود - سازمان زمین شناسی کشور)

جدول ۱-۲: واحدهای چینة شناسی در شعاع چند کیلومتری منطقه مورد مطالعه

جنس - سازند		نشانه		
کواترنری		Q^{t2}	تراس‌های جوان و رسوبات آبرفتی	
		Q^{t1}	تراس‌های قدیمی و مارن‌های ماسه‌ای	
		Q^f	بادزن‌های آبرفتی	
ائوسن	M	E_k	سازند کرج	تناوب توف سبز روشن، ماسه‌سنگ توف‌دار، سنگ آهک و شیل توفی
	L	E^v	سازند زیارت	کوارتز میکرودیوریت
		E_z	سازند زیارت	تناوب سنگ آهک‌های نومولیت‌دار متوسط لایه زرد تا خاکستری و سنگ آهک ماسه‌ای نومولیتی
پالئوژن	Pgf_1		سازند فجن	کنگلومرای خاکستری، ماسه سنگ متوسط لایه سبز روشن و مارن ماسه‌ای قرمز
کرتاسه	U	Ku^m	مارن سبز روشن	
		Ku^1	تناوب سنگ آهک خاکستری روشن و مارن سبزرنگ در قاعده و سنگ آهک ضخیم لایه تا صخره‌ای خاکستری رنگ	
		Ku^v	بازالت، گدازه اسپیلیتی و کنگلومرا	
ژوراسیک	U	JL	سازند لار	سنگ آهک توده‌ای ضخیم لایه، خاکستری روشن و سنگ آهک‌های آمونیت‌دار
		Ja	سنگ آهک خاکستری و مارن با مقدار زیادی آمونیت	
	M	Js_3	سازند شمشک	ماسه سنگ نازک لایه تا ضخیم لایه و شیل زغال‌دار

۱-۴-۲-۳- وضعیت ساختاری

همان طور که ذکر شد منطقه مورد مطالعه متعلق به ایالت زمین ساختی البرز شرقی است. البرز شرقی در طی ادوار زمین شناسی متحمل رویدادهای مختلفی از جمله رخدادهای کوهزایی، چین خوردگی و گسلش‌های متعدد بوده است. در ورقه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ شاهرود چین خوردگی‌ها شامل ساختمان‌های تاقدیسی و ناودیسی با روند شمال شرقی - جنوب غربی و یا شرقی - غربی و از انواع متقارن یا نامتقارن می‌باشد. سیستم اصلی گسل‌ها به صورت راندگی‌ها (Trust Fault) و سپس گسل - های امتدادلغز (Strike Slip Fault) است. راندگی‌های موجود دارای امتداد شرقی - غربی بوده و حرکات قابل توجه‌ای را از شمال به جنوب انجام داده‌اند. این راندگی‌ها در جایی که شیب گسل به صفر نزدیک

شده است، سفره‌های رورانده را به وجود آورده‌اند. در محدوده مورد مطالعه نیز واحدهای مختلف چینه-شناسی دارای چین خوردگی‌های واضح و مشهود می‌باشد. گسل اصلی منطقه مورد مطالعه، گسل راندگی شاهرود است. این گسل که از جنوب شهر بسطام و شمال شاهرود عبور کرده با حرکتی از شمال غرب به جنوب شرق در مسیر خود سفره‌های رورانده‌ای را ایجاد کرده است.

۴-۲-۴-۱- لرزه خیزی

زلزله یکی از مهمترین بلایای طبیعی است که در کشور ما نیز هر از چند گاهی باعث خسارات جبران ناپذیری می‌شود. زمین لرزه‌ها به عنوان مهمترین نیروی القایی در طبیعت همواره موجب برهم زدن تعادل دامنه‌ها و ناپایدار سازی مواد خصوصاً در دامنه‌های مرتفع و پر شیب شده و موجب تحریک لغزش‌های قدیمی و بروز انواع زمین لغزش‌ها از جمله سقوط سنگ می‌شوند (شریعت جعفری، ۱۳۸۵). بر اساس آیین نامه ۲۸۰۰ زلزله، شاهرود جزء مناطق با خطر بالای زلزله کشور محسوب می‌شود که شتاب مبنای طرح برای آن برابر با $g/0.35$ در نظر گرفته شده است.

فصل دوم

نایاب‌داری دامنه‌ای،

پهنه بندی خطر

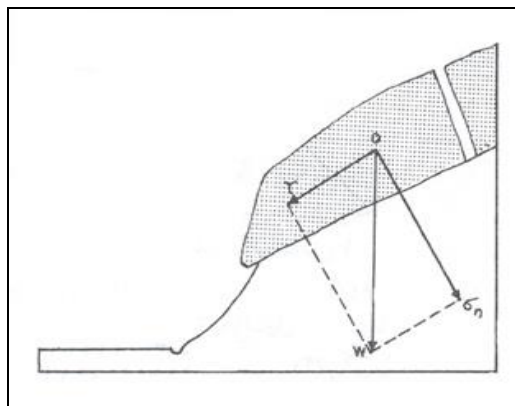
و مدیریت ریزش‌های سنگی

۲-۱- مقدمه

ناپایداری‌های دامنه‌ای یکی از خطرات مهم زمین شناسی هستند که می‌توانند بر زندگی انسان و محیط زندگی او تأثیرات بسیار مخرب و غیر قابل جبرانی داشته باشند. در این فصل به تعاریفی در مورد ناپایداری دامنه‌ای، طبقه بندی لغزش‌ها، ریزش سنگی، تحلیل پایداری دامنه‌ای، مطالعات درزه نگاری، تحلیل استریوگرافیک، مدیریت ریزش‌های سنگی و روش‌های پهنه بندی خطر می‌پردازیم.

۲-۲- ناپایداری دامنه‌ای

ناپایداری یا گسیختگی دامنه‌ای عموماً ناشی از عملکرد گرانج زمین می‌باشد (شکل ۲-۱) (البته سایر نیروهای درونی و بیرونی و عملکرد انسان آن را تشدید می‌کنند). تحت اثر وزن بخشی از سطح زمین ممکن است به آهستگی حرکت کند (حرکت خزشی)، به طور آزاد فرو افتد (ریزش)، در امتداد یک سطح گسیختگی بلغزد (لغزش) یا در روی دامنه جریان پیدا کند. نیروهای گرانج زمین به طور دائم بر توده‌های سنگ و خاک واقع بر دامنه‌ها اثر می‌کند اما زمانی که مقاومت توده سنگ یا خاک کمتر از نیروهای گرانجی باشد، حرکت رخ می‌دهد (معماریان، ۱۳۷۴).



شکل ۲-۱: تجزیه نیروی وزن بر روی دامنه (معماریان، ۱۳۷۴)

۲-۱-۲- عوامل ناپایداری دامنه ای

عوامل مختلف زیادی در ناپایداری شیب ها موثرند که غالباً بر هم تاثیر متقابل دارند و نقش هر یک از آنها در ناپایداری کاملاً پیچیده و ظریف است. روش‌های متعددی جهت طبقه بندی عوامل موثر در ناپایداری‌ها ذکر شده است. در ساده ترین حالت پارامترهای موثر در ناپایداری شیب ها به دو گروه زیر تقسیم می‌شود (وارنز، ۱۹۸۴):

۱- پارامترهای ذاتی و مستعد کننده

۲- پارامترهایی که سبب تغییرات نامطلوب در شیب می گردد.

پارامترهای ذاتی شامل سنگ شناسی، وضعیت ساختاری، شرایط آب و هوایی، پوشش گیاهی، ژئومورفولوژی منطقه می باشد. درجه استعداد داری شیب نسبت به ناپایداری تابعی از شرایط ذاتی آنهاست. در واقع شیب‌ها در هر منطقه با توجه به خصوصیات ذاتی آنها محدوده معینی از درجه ناپایداری را نشان می دهند. پارامترهای ایجادکننده تغییر نامطلوب، به دو گروه پارامترهای تغییر دهنده شرایط تنش و پارامترهای تغییر دهنده مقاومت مواد تقسیم می گردد (جدول ۲-۱).

۲-۲-۲- طبقه بندی ناپایداری‌های دامنه ای

ساده ترین شکل طبقه بندی بر اساس دو پارامتر نوع مصالح و نوع حرکت، توسط وارنز^۱ (۱۹۷۸) ارائه گردید (جدول ۲-۲).

^۱Varnes

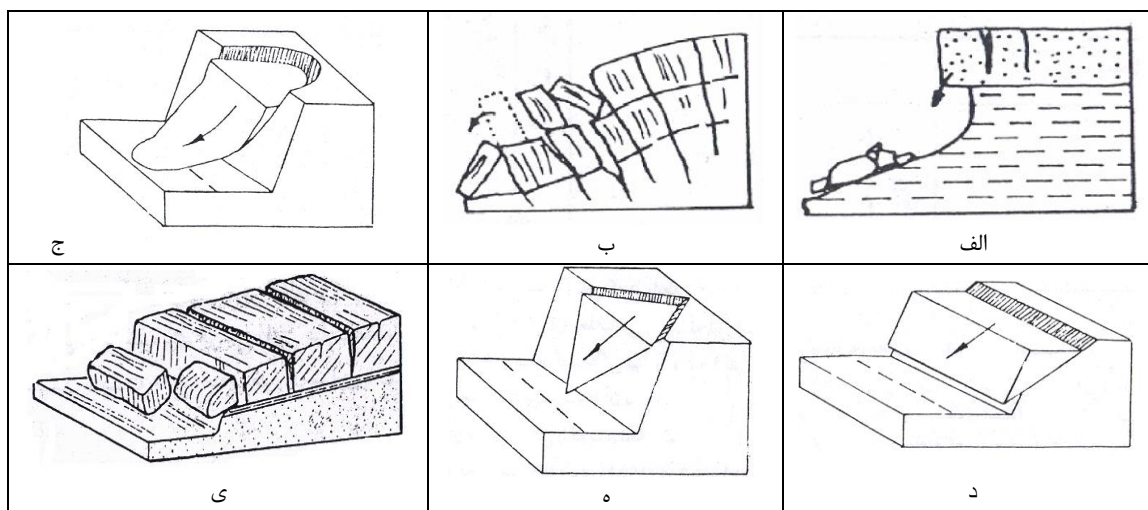
جدول ۲-۱: پارامترهای موثر در ناپایداری شیب‌ها (وارنز، ۱۹۸۴)

شرایط ذاتی	سنگ شناسی، ترکیب، ساخت، بافت	
	وضعیت ساختاری، توالی چینه شناسی، لایه بندی، درزه‌ها، گسل‌ها، چین خوردگی	
	زمین ریخت شناسی، شیب دامنه، ناپایداری	
	شرایط هیدرولوژی و آب و هوایی	
	پوشش گیاهی	
دلایل وقوع ناپایداری	فاکتورهای که تنش را تغییر می‌دهند	تغییرات کند
	فاکتورهای ایجاد کننده تغییرات نامطلوب	تغییرات سریع
	فاکتورهای که مقاومت مصالح را تغییر می‌دهند	هوازدگی، هوازدگی شیمیایی، عمل ریشه درختان، شستشوی سیمان و نمک‌های قابل حل در سنگ‌های کلاسیک
		اثر نرم کنندگی رطوبت در رس‌ها

جدول ۲-۲: تقسیم بندی ناپایداری‌های دامنه‌ای بر مبنای طبقه بندی وارنز (۱۹۷۸)

نوع مصالح			نوع حرکت		
سنگ پستر	خاک های مهندسی				
	عمدتا دانه درشت	عمدتا دانه ریز			
(Rock fall) سقوط سنگ	(Debris fall) سقوط واریزه	(Earth fall) سقوط خاک	(Falls) سقوط		
(Rock topple) واژگونی سنگ	(Debris topple) واژگونی واریزه	(Earth topple) واژگونی خاک	(Topples) واژگونی		
(Rock slump) لغزش دورانی در سنگ	(Debris slump) لغزش دورانی در واریزه	(Earth dump) لغزش دورانی در خاک	تعداد قطعات کبر لغزشات زیاد	دورانی	لغزش ها (Slides)
(Rock block slide) لغزش بلوکی در سنگ	(Debris block slide) لغزش بلوکی در واریزه	(Earth block slide) لغزش بلوکی در خاک		انتقالی	
(Rock slide) لغزش سنگی	(Debris slide) لغزش در واریزه	(Earth slide) لغزش در خاک			
(Rock spread) گسترش سنگی	(Debris spread) گسترش در واریزه	(Earth spread) گسترش در خاک	(Lateral spreads) گسترش های جانبی		
(Rock flow) روانه سنگی	(Debris flow) روانه واریزه	(Earth flow) خاکروانه	(Flows) روانه ها		
(Deep creep) خزش عمیق	(Soil creep) خزش در خاک				
مجموع دو یا چند نوع عمده حرکت			زمینلغزش های پیچیده		

در شکل ۲-۲ و جدول ۲-۳ انواع حالت‌های ناپایداری‌های فوق در دامنه‌های سنگی توضیح داده شده است.



شکل ۲-۲: انواع ناپایداری‌های دامنه‌ای: الف) ریزش، ب) واژگونی، ج) لغزش دورانی، د) لغزش صفحه‌ای، ه) لغزش گوه‌ای و ی) گسترش جانبی (اقتباس از معماریان، ۱۳۷۴)

جدول ۲-۳: تعاریف مختصر در مورد انواع ناپایداری در دامنه‌های سنگی بر اساس طبقه بندی ورنز (۱۹۷۸)

نوع حرکت	توضیحات
سقوط سنگ (Rock fall)	در دامنه‌های پرشیب سنگی، توده‌هایی از سنگ از دامنه جدا شده و به صورت حرکت در هوا، غلتیدن یا جهش بر روی دامنه به سمت پایین دامنه حرکت می‌کند (شکل ۲-۲-الف).
واژگونی سنگ (Rock topple)	قطعات سنگی حول یک نقطه می‌چرخند و واژگون می‌شوند و پس از آن به صورت ریزش یا لغزش بر روی دامنه حرکت می‌کنند. واژگونی می‌تواند در بلوک‌های سنگی درزه‌دار یا در اثر شکستگی‌های کششی حاصل از زیر شویی به وجود آید.
لغزش دورانی در سنگ (Rock slump)	لغزش دورانی در دامنه‌های بسیار درزه‌دار و خرد شده که مانند خاک‌ها رفتار می‌کنند، رخ می‌دهد. حرکت نسبتاً آهسته یک قطعه، یا قطعاتی دارای چسبندگی (خاک، سنگ یا مخلوط خاک و سنگ) در امتداد یک سطح مشخص کمّانی شکل را لغزش دورانی گویند.
لغزش بلوکی در سنگ (Rock block slide) لغزش سنگی (Rock slide)	لغزش انتقالی به دو صورت صفحه‌ای و گوه‌ای است. لغزش گوه‌ای، زمانی رخ می‌دهد که دو دسته درزه همدیگر را قطع کرده و شیب خط تقاطع آنها از شیب دامنه کمتر و از زاویه اصطکاک درزه‌ها بیشتر باشد.
گسترش سنگی (Rock spread)	در این نوع حرکت یک لایه ضعیف در زیر لایه‌های مقاوم سطحی قرار گرفته و با حرکت به سمت بیرون، مواد روی خود را حمل و سبب ایجاد ترک‌های کششی در مواد رویی می‌شود. جهت حرکت غالب در این نوع از حرکات توده‌ای تقریباً افقی می‌باشد (شکل ۲-۲-ی).
روانه سنگی (Rock flow) خزش عمیق	به صورت بهمن واریزه‌ای، یخسار سنگی و جریان خشک است که در دامنه‌های پر شیب و با سرعت زیاد به وقوع می‌پیوندد.

۲-۳- ریزش سنگی

ریزش سنگی یکی از انواع ناپایداری‌های دامنه‌ای و فرآیندی رایج در نواحی کوهستانی و شرایط مختلف آب و هوایی است. خسارت ریزش سنگی به علت حرکت بسیار سریع آن بیشتر از سایر انواع لغزش‌ها می‌باشد و باعث از بین رفتن جان انسان‌ها و صدمه به مناطق مسکونی، مزارع و زمین‌های کشاورزی، مراتع و جنگل‌ها، تخریب خطوط حمل و نقل، خطوط نیرو و مخابرات می‌شود. علی‌رغم گسترش زیاد و خطر بالای ریزش‌های سنگی تلاش‌های اندکی جهت تثبیت یا کاهش خطرات و ریسک همراه با آن در نواحی کوهستانی بزرگ یا در امتداد جاده صورت گرفته است. اکثر کشورهای کوهستانی جهان با مشکل ریزش سنگی مواجه هستند، در این بین کشورهای هم‌چون کانادا، ایتالیا، اسپانیا، هنگ کنگ، چین، ترکیه و ژاپن مطالعات گسترده و فراوانی در زمینه بازسازی صحرایی، مدل سازی و ارائه راهکارهای مناسب انجام داده‌اند (Chau et al., 2004, Marquinez et al., 2003, Ayala-carcedo et al., 2003, Guzzeti et al., 2004, Topal et al., 2007).

در کشورمان ایران نیز در نواحی مختلفی این مشکل مشاهده شده است. به عنوان مثال جاده چالوس که از زیباترین و پرترددترین جاده‌های شمال کشور، به ویژه هنگام تعطیلات است، با قدمتی حدود هفت دهه غالباً شاهد ریزش‌های پی در پی سنگ و بهمن بوده است که موجب بروز مشکلات متعدد، بسته شدن‌های متوالی و ناامنی این محور برای مسافرت شده است (شکل ۲-۳). شدت و گسترش ریزش‌ها در مواقع بارندگی شدید و زمین لرزه‌ها بیشتر است. به عنوان مثال زمین لرزه ۸ خرداد ۱۳۸۳ فیروزآباد کجور با بزرگای ۶/۳ ریشتر، باعث وقوع بیش از ۳۰ مورد زمین لغزش از جمله ریزش‌های سنگی در محدوده سیاه بیشه تا دزدبند و گردنه هزارچم شده است (بلورچی و همکاران، ۱۳۸۵).

جاده هراز نیز در استان مازندران نیز دارای شرایطی مشابه می‌باشد و دارای سابقه ریزش سنگی است که



شکل ۲-۳: ریزش سنگ و مسدود شدن جاده چالوس در تاریخ ۲۴/۰۱/۱۳۸۶

می‌توان به واقعه دلخراش ۲۱ خرداد ۱۳۶۹ اشاره کرد که منجر به کشته و مفقود شدن سه تن و زخمی شدن چند نفر دیگر گردید (رضایی، ۱۳۶۹).

طبق گزارشات سازمان زمین شناسی کشور در سال ۱۳۶۶، جاده ایلام-مهران نیز دائما با سنگ‌های سرگردان و منفصل که از ترانشه جنوب جاده به سمت آن روانه می‌شود، مواجه است (ایرانمنش و شاه بیگ، ۱۳۶۶). در محور کوهستانی سنندج به دهگلان، در گردنه صلوات آباد پس از بارندگی‌های سنگین، ریزش قطعات بزرگ سنگی به جاده و روستاهای پایین دست مشاهده می‌شود.

همان طور که قبلا اشاره شد زمین لرزه‌ها از عوامل مهم تحریک ریزش سنگی هستند. در فاصله زمانی ۱ تا ۷ آذر ۱۳۸۳، ۱۷ زمین لرزه پیاپی با بزرگای بین ۲/۵ تا ۴/۸ در مقیاس محلی (ML) منطقه پلدختر را تکان داد و در محور پلدختر- خرم آباد در سه نقطه تنگ گاوزرده، تنگ فنی و روستای جلگه خلج ریزش- های مختلف رخ داد که بر اثر آن بر اثر ریزش و سقوط سنگ به چند دستگاه وسیله نقلیه خسارت مالی وارد آمد (www. iiees. ac. ir.).

علاوه بر جاده‌ها و محورهای ارتباطی مناطق دیگر نیز همچون مناطق شهری و روستایی در معرض خطر هستند. روستای خسرویه از توابع شهرستان فاروج از روستاهای هدف گردشگری شهرستان است که جاده

دسترسی به آن حداقل سالی یک تا دو بار به علت ریزش سنگ مسدود می‌شود و به علت بزرگی قطعات خسارت به جاده زیاد بوده و بازگشایی آن نیز مشکل می‌باشد. بنا به گزارش‌های سازمان زمین شناسی روستای تنوره واقع در بخش رودبار الموت قزوین و روستای لیوانلو و خانقاه از توابع میانه و روستای وری از توابع بخش ارکواز ملکشاهی استان ایلام نیز با این مشکل مواجه می‌باشند (ارژنگ روش، ۱۳۶۲؛ شاه بیگ و همکاران، ۱۳۶۸؛ شاه بیگ و فروغی، ۱۳۶۸). روستای اسفیدان از توابع شهرستان بجنورد نیز از نقاطی است که با این مساله دست به گریبان است (امانی پور، ۱۳۸۳).

در زمین لرزه ۱۳۶۹ منجیل، موارد متعددی ریزش سنگی در محدوده کانون سطحی زمین لرزه و اطراف گسل زمین لرزه‌ای به وقوع پیوست و غالب جاده‌های کوهستانی مسدود شد (حافظی مقدس، ۱۳۷۲). با توجه به موارد ذکر شده، مطالعه دقیق ریزش‌های سنگی در مناطق مستعد برای جلوگیری از اثرات مخرب آن، از اهمیت بالایی برخوردار است.

۲-۴- مکانیسم ریزش سنگی

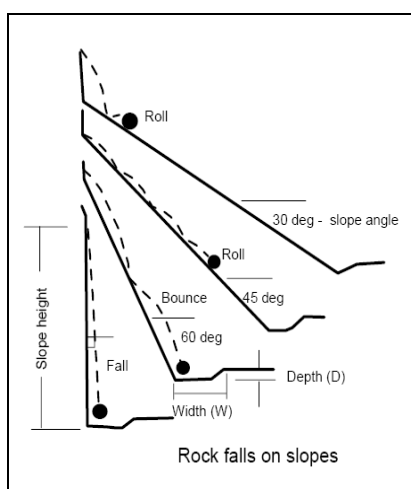
بنا به تعریف وارنز (۱۹۷۸)، ریزش سنگی به جدایش قطعات سنگی بر اثر لغزش، واژگون شدن یا سقوط در امتداد یک صخره عمودی یا تقریباً عمودی و حرکت آن به سمت پایین توسط جهش و پرش در امتداد مسیرهای سهمی شکل و توسط غلتش روی شیب‌های واریزه‌ای یا سنگریزه‌ای، اطلاق می‌شود. اندازه قطعات ریزشی می‌تواند از قطعه‌های کوچک تا تخته سنگ‌های عظیم چند صد متر مکعبی و سرعت حرکت آنها بین چند متر در ثانیه تا دهها متر در ثانیه باشد (Evans and Hunger, 1993). برای انتخاب و طراحی سازه‌های حفاظتی، مشاهده و تحلیل گسیختگی یک قطعه از یک دامنه پر شیب و حرکت آن به پایین دامنه لازم و ضروری است (Giani et al, 2004).

سه طریقه بسیار مهم حرکت قطعات سنگی سقوط آزاد، برخورد با دامنه و جهش و نهایتاً غلتش یا لغزش

می‌باشد (Dorren, 2003).

۱- سقوط آزاد:

مطابق نظر ریچی^۱ (۱۹۶۳)، اگر شیب دامنه از ۷۶ درجه تجاوز کند سقوط آزاد رخ می‌دهد. اما در موقعیت‌های مختلف صحرایی این مقدار متغیر است. شکل ۲-۴ نشان می‌دهد که در شیب حدود ۷۰ درجه، حرکت سنگ‌ها به تدریج از شکل جهشی به سقوط تبدیل می‌شود.



شکل ۲-۴: تاثیر زاویه شیب در نحوه انتقال قطعات ریزشی (Ritchi, 1963)

در سقوط آزاد مسیر حرکت قطعه سنگ در هوا است و انتقال ابتدا از مرکز سنگ صورت می‌گیرد سپس حول مرکز خود می‌چرخد (Azzoni et al, 1995). بوزولو^۲ و پامینی (۱۹۸۶) اظهار داشتند که اصطکاک هوا ناچیز بوده و تاثیر مهمی روی حرکت سنگ نمی‌گذارد.

۲- برخورد و جهش:

پس از سقوط آزاد جایی که شیب دامنه کاهش یابد قطعه سنگ با دامنه برخورد می‌کند و جهش می‌کند. رفتار قطعات هنگام تصادم بسته به خصوصیات مواد، زاویه برخورد، جرم قطعات، شکل و سرعت آنها از کاملاً الاستیک تا کاملاً غیر الاستیک تغییر می‌کند (Azzoni and Freitas, 1995; Chau et al, 1999).

¹Ritchi

²Bozzolo and Pamini

(Chau et al, 2002). به دلیل نیروی گریز از مرکز، قطعات پس از برخورد با سطح دامنه به ندرت متوقف می‌شوند و پس از دوران به صورت سقوط آزاد، غلتش و یا لغزش به حرکت خود ادامه می‌دهند. اگر شیب دامنه تند باشد حرکت به صورت جهش خواهد بود و اگر شیب دامنه کم باشد قطعات به صورت غلتش یا لغزش به حرکت ادامه می‌دهند. مسیر حرکت نیز توسط هندسه دامنه و نیز توسط موانع موجود بر آن ممکن است تغییر کند (Stevens, 1998). موقعیت نسبی قطعه در برخورد با دامنه به شدت روی حرکت تاثیر می‌گذارد. اگر تصادم بین دو سطح صفحه‌ای رخ دهد، باعث متوقف شدن حرکت می‌شود و بالعکس اگر برخورد با دامنه روی لبه‌های قطعه باشد باعث کاهش اتلاف انرژی و ادامه حرکت می‌شود (Giani et al, 2004).

۳- غلتش و یا لغزش:

اگر درجه شیب میانگین دامنه کمتر از حدود ۴۵ درجه باشد، سنگ در حال جهش، به تدریج حرکتش به غلتش تبدیل می‌شود. زیرا ممان چرخشی سنگ بزرگ می‌شود، یک سنگ غلتشی تقریباً به طور ثابتی در تماس با سطح دامنه است (Hunger and Evans, 1998).

بر حسب تغییرات نیمرخ توپوگرافی، دو یا چند شکل ریزش ممکن است مشاهده شود. به علاوه سرعت اولیه، وزن، شکل قطعات و ویژگی‌های مواد تشکیل دهنده دامنه می‌توانند، پدیده ریزش را کنترل کنند (Azzoni et al, 1995, Dorren, 2003). تعیین انتهای مسیر طی شده توسط قطعات امری پیچیده است و به طور کامل قابل تجزیه و تحلیل نیست. با وجود این بدیهی است که تمام نقاط ما بین منشاء و نقاطی که قطعات سنگی متوقف می‌شوند در معرض خطر هستند (Ayala-carcedo et al, 2003). بنابراین برای تعیین محل نصب سازه های دفاعی مناسب، تعریف درست خط سیر یا مسیر ریزش قطعات که به صورت طول مسیر، ارتفاع، سرعت و انرژی قطعات طی ریزش بیان می‌شود؛ ضروری است (Peilla et al, 2007). تعیین انتهای مسیر قطعات پیچیده است و به فاکتورهای زبری، شیب و ارتفاع ریزش، مربوط به دامنه؛ و

سه فاکتور استحکام، شکل و حجم قطعات سنگی بستگی دارد (Ayala-carcedo et al, 2003). تغییرات محلی زبری یا ناهمواری و تموج دامنه قادر به تحمیل تغییرات مهمی در مسیرهای طی شده توسط قطعات با شکل و حجم یکسان که از یک نقطه مشابه رها شده‌اند می‌باشد (Giani et al, 2004). سختی و زبری مواد تشکیل دهنده دامنه به ترتیب تعیین کننده ضرایب ارتجاعی و اصطکاک غلتشی دینامیکی هستند (Guzzeti et al, 2004). ضریب ارتجاعی پارامتری است که توسط اغلب مدل‌های کامپیوتری برای شبیه سازی کاهش انرژی در هر تصادم قطعه با دامنه مورد استفاده قرار می‌گیرد. ضریب ارتجاعی نسبت انرژی جنبشی کل قطعه بعد از برخورد به انرژی جنبشی کل قطعه قبل از برخورد است (رابطه ۱-۲).

$$\varepsilon = \frac{k_1}{k_0} \quad \text{رابطه (۱-۲)}$$

ε = ضریب ارتجاعی، k_1 = انرژی جنبشی کل بعد از برخورد، k_0 = انرژی جنبشی کل قبل از برخورد است (رابطه ۲-۲).

$$k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (\Omega^2 + V_x^2 + V_y^2) \quad \text{رابطه (۲-۲)}$$

I = ممان اینرسی قطعه حول مرکز جرم خودش، Ω = سرعت زاویه‌ای، V_x = مولفه x سرعت انتقالی، V_y = مولفه y سرعت انتقالی، m = جرم قطعه است.

ماکزیمم مقدار برای این ضریب ۱ (بدون اتلاف انرژی) است و مقادیر کاهش متناسب با انتقال انرژی از قطعه به زمین است. مقدار صفر به معنی حالت غیر ارتجاعی است و قطعه نمی‌تواند بجهد و متوقف می‌شود. برای ارزیابی این پارامتر از دو روش استفاده می‌شود: ۱- توسط اندازه گیری مستقیم از طریق تست‌های آزمایشی و ۲- توسط آنالیز برگشتی از هر ریزش طبیعی یا مصنوعی (Azzoni and Freitas, 1995). زاویه شیب روی مقدار ضریب ارتجاعی تاثیر دارد به طوری که با افزایش زاویه شیب، ضریب ارتجاعی نرمال (R_n) افزایش می‌یابد؛ در حالی که ضریب ارتجاعی مماسی (R_t) به زاویه شیب بستگی ندارد.

ضریب ارتجاعی نرمال نسبت به شکل نیز تاثیر پذیر است. در زاویه شیب ۳۵ تا ۵۰ درجه، مقادیر R_n برای قطعات کروی، استوانه‌ای، مکعبی و هگزاگونال مشابه است اما هنگامی که زاویه شیب از ۵۰ به ۷۵ می‌رسد، این مقدار برای منشورهای هگزاگونال، مکعبی، استوانه‌ای و کروی به ترتیب کاهش می‌یابد. همچنین با افزایش شیب، نسبت انرژی جنبشی چرخشی به انتقالی افزایش می‌یابد و در ۴۰ درجه به ماکزیمم مقدار می‌رسد ولی در شیب ۷۵ درجه به مقدار ناچیزی می‌رسد (Chau et al, 1999).

پارامتر دیگری که در کاهش انرژی و متوقف ساختن قطعه در حال غلتش به سمت پایین دامنه موثر می‌باشد، ضریب اصطکاک دینامیک یا غلتشی است که بنابر تعریف استاتهام^۱ (۱۹۷۹) برابر است با تانژانت زاویه‌ای که قطعه می‌تواند در آن حالت با یک سرعت ثابت روی یک شیب حرکت کند. برای محاسبه این ضریب از رابطه ۲-۳ استفاده می‌شود:

$$\tan \varphi_{\mu d} = \tan \varphi_0 + k(d/D) \quad \text{رابطه (۲-۳)}$$

$\varphi_{\mu d}$ زاویه اصطکاک دینامیکی و φ_0 زاویه اصطکاک داخلی دامنه و d و D به ترتیب قطر قطعات موجود در سنگریزه‌های دامنه‌ای و قطر قطعات ریزشی است. زمانی که اندازه قطعات بسیار بزرگتر از قطعات موجود در سنگریزه‌ها باشد، φ_0 برابر با زاویه اصطکاک دینامیک خواهد شد. بوزولو و پامینی (۱۹۸۶) نیز اعتبار ارزیابی‌های استاتهام را تایید کردند.

آزونی و فریتاس^۲ (۱۹۹۵) برای $\tan \varphi_0$ محدوده ۰/۳۷ تا ۰/۶۷، برای k بین ۰/۱۷ تا ۰/۲۶ و برای ضریب اصطکاک دینامیک محدوده ۰/۴ تا ۱/۵ را پیشنهاد دادند. شکل و اندازه قطعات تاثیر بسیار مهمی روی مسیر حرکت دارد (Ayala-carcedo et al, 2003; Giani et al, 2004). در یک مورفولوژی یکسان قطعات سنگی بزرگتر مسیر طولانی‌تری را طی می‌کنند و دارای زوایای دسترسی کوچکتری هستند. قطعاتی که

¹ Statham

² Azzoni and Freitas

بیشتر حالت کوبیک دارند و نیز قطعاتی که بیشتر کروی هستند نسبت به قطعاتی که کمتر کوبیک و کروی هستند مسیر طولانی تری را طی می‌کنند (Ayala-carcedo et al, 2003).

قطعات کروی سریع‌تر از قطعات تخته‌ای یا صفحه‌ای حرکت می‌کنند و سرعت قطعات بزرگتر بیشتر از قطعات کوچکتر است، چون که قطعات بزرگتر و کروی‌تر کمتر تحت تاثیر زبری یا ناهمواری شیب هستند. قطعات با ابعاد بزرگتر، سرعت غلتشی بزرگتری نیز دارند. اما رابطه بین شکل آنها و سرعت غلتشی کمتر است. در مورد شکل قطعات، این رابطه فقط برای قطعات با ابعاد کوچکتر مشاهده می‌شود و تفاوت شکل در قطعات بزرگتر تاثیر چندانی روی سرعت غلتشی نشان نداده‌اند. عدم وجود رابطه واضح بین سرعت غلتشی قطعات بزرگ و شکل آنها ناشی از تعداد محدود مشاهدات و نیز کوتاه بودن مسیر دامنه است. در حقیقت قطعات بزرگتر غیر مشابه به نسبت به قطعات کوچکتر، به یک سرعت ریزشی پایدار نمی‌رسند زیرا با گذشت زمان و رسیدن به انتهای مسیر همچنان شتابشان بیشتر می‌شود. به علاوه مشاهده شده است که هنگامی که سرعت افتادن به اندازه کافی بزرگ باشد، قطعه میل دارد حول کوچکترین محورش بچرخد و این نشان می‌دهد در این شرایط قطعات صفحه‌ای و تخته‌ای به طور اساسی شبیه قطعات کروی رفتار می‌کنند (Azzoni and Freitas, 1995).

پدیده خرد شدگی ناشی از برخورد قطعه با دامنه، خیلی اوقات باعث کاهش شدید انرژی می‌شود که احتمالاً منجر به توقف همه خرده سنگ‌ها می‌شود. با وجود این مواردی که خرده‌های مجزای تولید شده، مسیرهایی را طی می‌کنند که حتی طولانی‌تر از مسیر قطعات سالم است (Giani et al, 2004). پدیده خرد شدن ممکن است در هنگام ریزش رخ دهد به خصوص در سنگ‌های فولیاسیون دار. زاویه برخورد در خرد شدن سنگ‌های فولیاسیون دار نقش کلیدی دارد و اثر انرژی برخوردی در درجه دوم اهمیت قرار می‌گیرد. مطالعات در مورد خرد شدگی هنوز در مراحل اولیه است، که می‌توان دلیل آن را عدم توجه به این پدیده در طراحی سازه‌های دفاعی در برابر ریزش دانست.

حضور ناپیوستگی‌ها در قطعات و نیز سرعت بالای برخورد، خرد شدگی را تسهیل می‌کند. قطعات خرد شده کوچکتر دارای سرعت‌های بیشتر از ماکزیمم سرعت‌های محاسبه شده هستند که می‌تواند ناشی از افزایش نیروی حرکت آنی در اثر خرد شدگی باشد (Giacomini et al, 2009).

مساله دیگر که هنگام طراحی سازه‌های حفاظتی در برابر ریزش باید مورد توجه قرار گیرد، پراکندگی جانبی مسیرهای ریزش است. حتی اگر شرایط راه اندازی قطعات در محل ثابت باشد (موقعیت قطعات، سرعت راه اندازی یا اولیه، شکل و جرم)، موقعیت مسیرهای قطعات روی دامنه با توجه به تغییر شیب زمین به طور قابل توجهی تغییر می‌کند. در دامنه‌های طولانی‌تر، فاصله بین دو کرانه ریزش‌ها بیشتر است، مگر این که دامنه در درون یک دره کم عرض عمیق باشد یا این که توسط چنین دره‌ای قطع شده باشد. اگر D ، فاصله بین دو حد کناری مسیرهای ریزش و L ، طول دامنه باشد؛ در آن صورت صرف نظر از طول دامنه، نسبت $\frac{D}{L}$ به طور معمول بین ۱۰ تا ۲۰ درصد است. دامنه‌های با شیب تندتر، پراکندگی کمتری دارند (Azzoni and Freitas, 1995).

۲-۵- تحلیل پایداری دامنه

روش‌های متعددی برای تحلیل پایداری دامنه‌های سنگی ابداع شده است. گروهی از مولفین، سنگ را یک ماده پیوسته و یکپارچه در نظر گرفته و با استفاده از روش‌هایی مثل فتو الاستیسیته^۱ یا روش اجزاء محدود، پایداری آن را مورد بررسی قرار می‌دهند. این روش‌ها گرچه در زمان بررسی تونل‌ها و دیگر فضاهای زیرزمینی ممکن است جواب‌گوی نیازها باشند، ولی در مورد دامنه‌های سنگی کمتر با واقعیت وفق می‌یابند. بیشتر روش‌هایی که امروزه برای تحلیل پایداری این گونه دامنه‌ها به کار می‌رود، سنگ را ناپیوسته در نظر گرفته و رفتار آن را متأثر از گسستگی‌ها می‌داند. در همین رابطه وقتی که سطوح ضعف

^۱. Photoelasticity

سنگ (مانند لایه بندی، درزه و گسل) به سمت خارج دامنه شیب داشته یا بر اثر حفاری در سطح دامنه ظاهر شوند، ناپایداری مستقیماً توسط این سطوح کنترل می‌شود. در مقابل اگر سطوح ضعف افقی بوده یا به داخل دامنه شیب داشته باشند، باید مشخصات سنگ یکپارچه را نیز در تحلیل پایداری منظور کرد. بنابراین اولین گام برای تحلیل پایداری دامنه، در دست داشتن اطلاعات مربوط به وضعیت درزه‌های موجود در منطقه یا به عبارتی مطالعات درزه نگاری است.

اغلب روش‌های تحلیلی که برای ارزیابی پایداری دامنه‌ها به کار می‌رود بر مبنای تعادل حدی^۱ استوار است. روش تعادل حدی، نیروهای مقاوم را برابر نیروهای محرک قرار می‌دهد. نیروهای محرک، گرانش زمین و فشار آب موجود در منافذ سنگ و خاک است و نیروهای مقاوم، اصطکاک و چسبندگی سطح لغزش است. این نیروها در واقع مقاومت برشی سطح گسیختگی را به وجود می‌آورند.

تمام معادلاتی که پایداری یک قطعه سنگ روی دامنه شیب‌دار را نشان می‌دهد، برای شرایط تعادل حدی ارائه شده است. از این رو به منظور مقایسه میزان پایداری دامنه، در شرایطی غیر از تعادل حدی، از شاخص ضریب اطمینان^۲ (FS) استفاده می‌شود. ضریب اطمینان نسبت نیروهای مقاوم به مجموع نیروهای محرک می‌باشد (معماریان، ۱۳۷۴). در ادامه پس از بحث درزه نگاری، به تحلیل پایداری دامنه به روش استریوگرافیک و تحلیل پایداری قطعات گوه‌ای دامنه‌های سنگی توسط نرم افزار Swedge خواهیم پرداخت.

^۱. Limit equilibrium

^۲. Factor of Safety

۲-۵-۱- مطالعات درزه نگاری

توده‌های سنگی به صورت یکپارچه نبوده و دارای درزه و شکستگی‌های متعدد می‌باشد. از طرفی در تنش‌های پایین که در اعماق کم وجود دارد، رفتار توده سنگ توسط شکستگی‌ها کنترل می‌شود؛ لذا شناخت خصوصیات درزه‌ها مشابه با خصوصیات سنگ بکر در ارزیابی پایداری شیب‌های سنگی ضروری می‌باشد. مشخصات سنگ بکر شامل مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیک با انجام آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه دستی یا مغزه‌های حفاری انجام می‌شود.

خصوصیات درزه‌ها شامل شیب و امتداد، فاصله داری، درزه‌داری، پرشدگی، زبری، مقاومت فشاری سطح درزه و ... می‌باشد. مشخصات درزه‌ها بر اساس بررسی رخنمون طبیعی و مصنوعی در صحرا، بررسی دیواره گمانه‌ها و مغزه‌های حفاری و روش‌های فتوگرامتری می‌باشد.

از میان روش‌های بالا روش اول، یعنی بررسی صحرایی توده سنگ، با کمترین وسایل قابل اجرا بوده و لذا بیش از دو روش دیگر به کار گرفته می‌شود. باید توجه داشت که هر چه توصیف صحرایی توده سنگ بهتر و کامل‌تر انجام شود و با زبانی کمی بیان شود، نیاز به آزمون‌های برجا، که معمولاً بسیار پرهزینه هستند، را کاهش خواهد داد. در جدول ۲-۴ اختصاصات مهم درزه‌ها که در صحرا برداشت می‌شود، تشریح شده است.

جدول ۲-۴: اختصاصات مهم درزه‌ها که برای بررسی پایداری دامنه در بازدید صحرایی برداشت شوند.

ردیف	نوع خصوصیات	اهمیت
۱	جهت داری	شیب و امتداد درزه‌ها نقش اساسی در وضعیت ناپایداری دامنه‌ها خواهد داشت.
۲	فاصله داری	فاصله داری درزه تعیین کننده اندازه بلوک‌ها می‌باشد، فاصله داری، فاصله عمودی بین دو سطح درزه می‌باشد و در صورت اندازه‌گیری در جهات دیگر باید ارقام اصلاح شود. با افزایش تعداد قطعات حرکت از ریزش بلوک‌های منفرد به جریانی از واریزه‌ها یا لغزش دورانی تبدیل می‌شود.
۳	بازشدگی	فاصله عمودی بین دو سطح درزه می‌باشد که ممکن است از آب، هوا یا خاک پر شده باشد. هر چه بازشدگی ناپوستگی‌ها بیشتر باشد اثر زبری و موج داری سطح درزه در مقاومت برشی کمتر خواهد شد و خصوصیات ماده پر کننده اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.
۴	پرشدگی	پرشدگی سطح درزه ممکن است از کلسیت، کلریت، رس، لای و ... باشد (شکل ۲-۵).
۵	تعداد دسته درزه‌ها	تعداد دسته درزه‌ها همراه با فاصله داری در ابعاد بلوک‌ها نقش دارد و همچنین نوع گسیختگی صفحه‌ای، بلوکی یا گوه‌ای را کنترل می‌کند.
۶	مقاومت فشاری دسته درزه‌ها	به حداکثر فشاری که سنگ قادر است تحمل کند و در صورت تجاوز از آن، گسیخته خواهد شد؛ مقاومت فشاری سنگ می‌گویند. توضیحات بیشتر در مورد این پارامتر و نحوه محاسبه آن برای درزه‌ها در متن آمده است.
۷	زبری سطح درزه	به ناهمواری و تموج سطح درزه اطلاق می‌شود که نقش مهمی در مقاومت برشی درزه‌ها ایفا می‌کند.



شکل ۲-۵: پرشدگی درزه توسط رس و سیلت قابل مشاهده است.

۲-۵-۱-۱- مقاومت برشی سطح درزه

مقاومت برشی برای نمونه سنگ، سطوح ناپیوستگی و توده سنگی قابل محاسبه است. مقاومت نمونه سنگ و سطوح ناپیوستگی را می‌توان با انجام آزمون برش مستقیم به دست آورد. در این آزمون، نمونه در دستگاه برشی مستقیم که تحت تاثیر یک نیروی قائم ثابت می‌باشد، در اثر اعمال نیروی افقی تدریجی تحت فشار قرار می‌گیرد تا شکسته شود. مقاومتی که در آن سنگ گسیخته می‌گردد، مقاومت برشی اوج می‌گویند (امانی پور، ۱۳۸۳)؛ که معادل با مجموع مقاومت سیمان پیوند دهنده دو دیواره ناپیوستگی (مقاومت چسبندگی یا C) و مقاومت اصطکاکی (ρ) سطح ناپیوستگی می‌باشد. بعد از گسیختگی، همگام با ادامه تغییر مکان، تنش برشی آنقدر کاهش خواهد یافت تا مقاومت برشی ناپیوستگی به مقدار پسماند خود برسد (شکل ۲-۶).

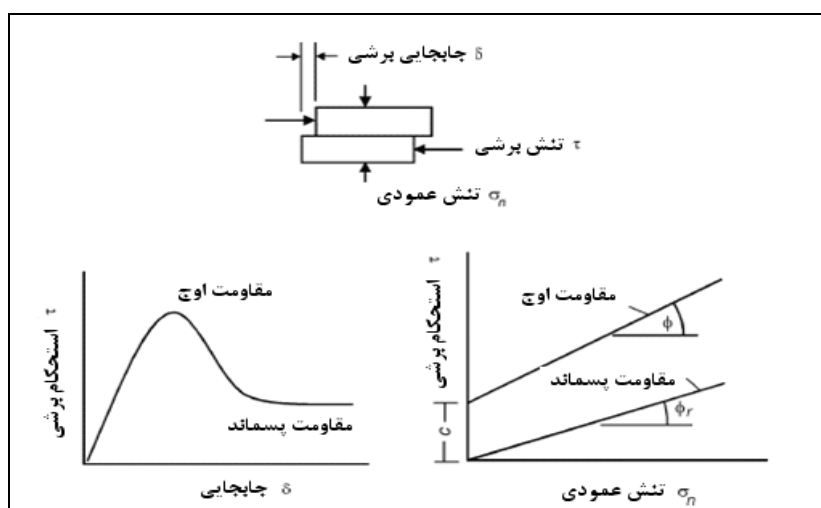
مقاومت برشی سطح درزه توسط آزمایش برشی مستقیم تعیین شده یا به صورت غیر مستقیم از روابط تجربی به دست می‌آید.

پارامترهای مقاومت برشی به صورت پارامترهای اوج (رابطه ۴-۲) و پسماند (رابطه ۵-۲) بیان می‌شود (شکل ۶-۲).

$$\tau_p = c + \delta_n \tan \varphi \quad \text{رابطه (۴-۲)}$$

$$\tau_r = \delta_n \tan \varphi_r \quad \text{رابطه (۵-۲)}$$

زاویه اصطکاک پسماند (φ_r)، به علت صاف و مسطح شدن درزه معمولاً کمتر از زاویه اصطکاک اوج (φ) می‌باشد.



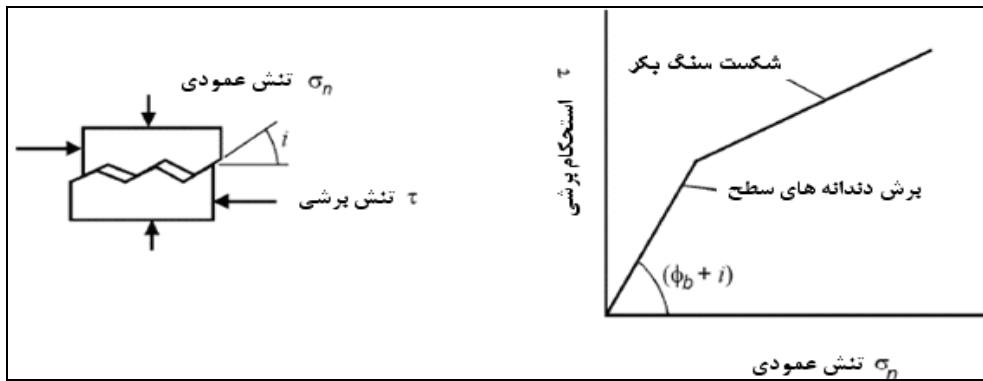
شکل ۶-۲: آزمایش تنش برشی ناپیوستگی‌ها (طاهریان، ۱۳۸۱)

پاتون^۱ (۱۹۶۶) تاثیر زبری را در مقاومت برشی سطح درزه‌ها را به صورت رابطه ۶-۲ بیان نمود (شکل ۲-۲):

$$\tau = \delta_n \tan(\varphi_b + i) \quad \text{رابطه (۶-۲)}$$

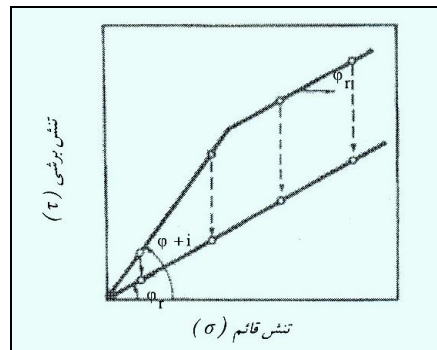
i متوسط شیب دندانها می‌باشد.

^۱ Patton

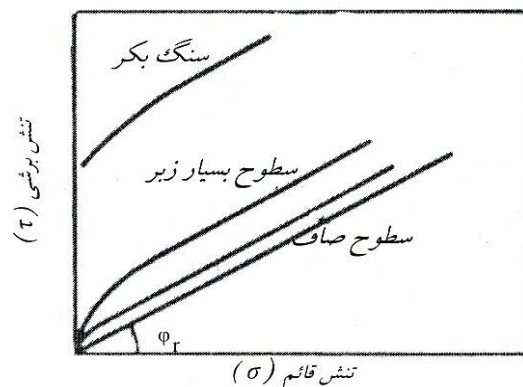


شکل ۲-۷: آزمایش Patton روی استحکام برشی نمونه‌های دندانه دار

در شکل ۲-۸ مقاومت برشی درزه کاملاً صاف و کاملاً زبر و در شکل ۲-۹ مقاومت برشی سطوح صاف، زبر و سنگ بکر با هم مقایسه شده است. ملاحظه می‌گردد که با افزایش زبری سطح درزه مقاومت آن افزایش می‌یابد.



شکل ۲-۸: نمودار مقاومت برشی درزه‌ها برای سطح درز کاملاً صاف یا کاملاً زبر (Patton, 1966)



شکل ۲-۹: مقاومت برشی در حالت‌های مختلف (Patton, 1966)

رابطه ۲-۶ فقط برای تنش‌های عمودی کم معتبر است، از این رو بارتون^۱ (۱۹۷۷) رابطه زیر را ارائه دادند:

$$\tau = \delta_n \tan \left[\varphi_b + JRC \log_{10} \left[\frac{JCS}{\delta_n} \right] \right] \quad \text{رابطه (۷-۲)}$$

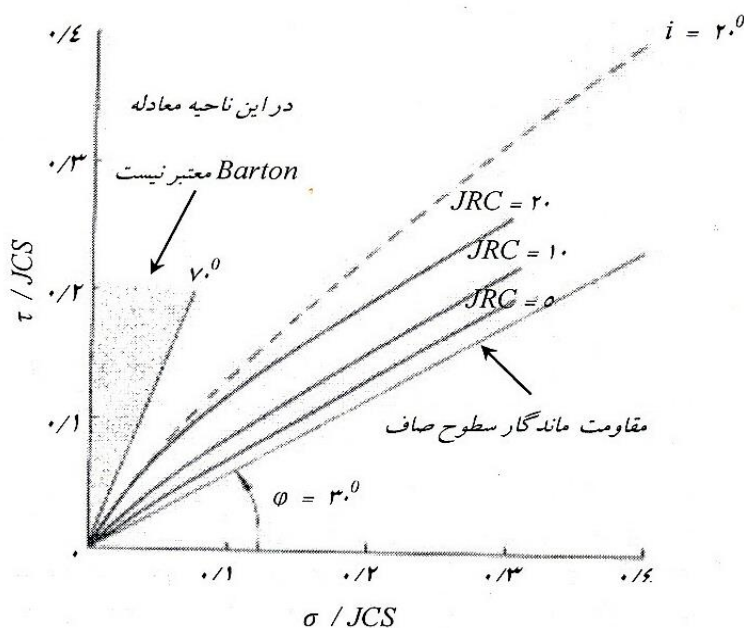
که JRC، ضریب زبری و JCS، مقاومت فشاری دیواره درزه است.

از آنجایی که معادله بارتون در محدوده $0.1 < \frac{\delta_n}{JCS} < 0.3$ بهترین کاربرد را دارد و با توجه به این

مسئله که پایداری شیب‌های سنگی عمدتاً در این محدوده از سطوح تنش عمودی مطرح هستند، این معادله بدون شک بهترین راه برای تحلیل پایداری شیب‌های سنگی می‌باشد. قابل ذکر است که با نزدیک شدن δ_n به صفر معادله به سمت بی‌نهایت میل می‌کند و معادله بی‌اعتبار می‌گردد. بارتون (۱۹۷۳) اعتقاد

دارد که در این معادله حداکثر مقدار $\left[\varphi_b + JRC \log_{10} \left[\frac{JCS}{\delta_n} \right] \right]$ نباید از ۷۰ درجه بیشتر گردد

(شکل ۲-۱۰).



شکل ۲-۱۰: منحنی بارتون برای تعیین مقاومت برشی ناپیوستگی‌های زیر (Hoek and Bray, 1981)

^۱ Barton

۲-۵-۱-۲- زبری سطح درزه

زبری سطح درزه، مهمترین خصوصیات هیدرولیکی و مکانیکی آن همچون زاویه اصطکاک پایه، استحکام پایه، استحکام برشی و بازشدگی (اتساع) را تحت تاثیر قرار می‌دهد. روش‌های مختلفی نظیر ضریب زبری درزه (JRC^1)، مقدار ریشه دوم میانگین حسابی (RMS)، تابع ساختاری (SF) و ... برای تعیین خصوصیات زبری درزه‌های سنگ، مورد استفاده می‌گیرند. اغلب این روش‌ها فقط در مدل‌های ۲ بعدی به کار می‌رود (Boli, and Tanashi, 2006).

به طور کلی هر چه سطح درزه ناهموارتر و زبرتر باشد مقاومت بیشتری در برابر جابجایی از خود نشان خواهد داد و در نتیجه مقاومت توده سنگ بهتر خواهد بود.

پاتون (۱۹۶۶) زبری را به درجه اول (تموج) و درجه دوم (ناصافی) طبقه بندی کرد. وی اظهار داشت که رفتار درزه‌های سنگ به طور اولیه توسط زبری درجه دوم در طول جابجایی‌های کوچک کنترل می‌شود و زبری درجه اول رفتار برشی را برای جابجایی‌های بزرگ تحت کنترل دارد. همچنین بارتون (۱۹۷۳) و هوک^۲ و بری (۱۹۸۱) اظهار داشتند در تنش قائم کم، مقدار زبری نوع دوم (با زاویه بیشتر و طول پایه کم) فرآیند برش را کنترل می‌کند، همانطور که استرس قائم افزایش می‌یابد، زبری درجه دوم برش می‌خورد و زبری نوع اول (با طول اساس یا پایه بلندتر و زاویه کمتر) به فاکتور کنترل کننده تبدیل می‌شود (Yang et al., 2001).

بارتون و چوبی^۳ (۱۹۷۷) مفهوم ضریب زبری (JRC) را برای توصیف مقاومت اوج یک درزه پیشنهاد کردند. مقاومت برشی درزه وابسته به سه مولفه است؛ مولفه زاویه اصطکاک پایه یا پس ماند، مولفه هندسه و مولفه ناهمواری یا زبری که مولفه‌های هندسه و ناهمواری در طی برش درزه در حال تغییر هستند.

¹ Joint roughness coefficient

² Hoek and Bray

³ Barton and Choubey

در مورد مدل درزه بارتون، عقیده بر این است که زمانی که جابجایی‌های محدود است، فقط یک ضریب زبری متحرک (JRC_{mob}) به دست می‌آید. زمانی که جابجایی ۱۰ برابر جابجایی استحکام پیک درزه است مقدار JRC به نصف میزان اوج آن می‌رسد (Cai et al., 2007).

در جایی که دو دیواره در تماس مستقیم با هم هستند، ناهمواری نقش مهمی در مقاومت برشی توده سنگ ایفا می‌کند. با افزایش عرض بازشدگی و ضخامت مواد پر کننده درزه، یا وجود هر نوع جابجایی قبلی، از اهمیت ناهمواری به سرعت کاسته می‌شود (سازمان مدیریت و برنامه ریزی، ۱۳۷۸).

بارتون و چوبی (۱۹۷۷)، گزارش کردند که JRC می‌تواند از طریق تحلیل برگشتی از آزمایش‌های برشی به صورت زیر تخمین زده شود:

$$JRC = \frac{\arctan(\tau/\delta_n) - \varphi_b}{\log_{10}(JCS/\delta_n)} \quad \text{رابطه (۸-۲)}$$

که در آن τ ، استحکام برشی نمونه سنگ، δ_n تنش عمودی، φ_b زاویه اصطکاک پایه، JCS استحکام فشاری دیواره درزه می‌باشد.

آنها همچنین آزمایش کج شدگی را برای تفسیر JRC پیشنهاد نمودند. در این آزمایش دو سطح برش به اندازه‌ای کج می‌شوند تا جابجایی صورت گیرد. در این حالت اگر α_s زاویه کج شدگی باشد که در آن لغزش شروع می‌شود، δ_{n0} استرس قائم موثر بر درزه است که لغزش در آن شروع می‌شود و φ_r زاویه اصطکاک باقیمانده است، مقدار JRC می‌تواند از رابطه زیر تخمین زده شود:

$$JRC = \frac{\alpha_s - \varphi_r}{\log_{10}(JCS/\delta_{n0})} \quad \text{رابطه (۹-۲)}$$

تنش قائم، وزن بلوک بر واحد سطح است که از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\delta_{n0} = \frac{W \cos \beta_s}{A} \quad \text{رابطه (۱۰-۲)}$$

که w وزن بلوک بالایی، A ناحیه تماس، β_s زاویه انحراف یا شیب است. روش‌های دیگر تخمین شامل موارد زیر است.

	$JRC = 0 - 2$
	$JRC = 2 - 4$
	$JRC = 4 - 6$
	$JRC = 6 - 8$
	$JRC = 8 - 10$
	$JRC = 10 - 12$
	$JRC = 12 - 14$
	$JRC = 14 - 16$
	$JRC = 16 - 18$
	$JRC = 18 - 20$

شکل ۲-۱۱: پروفیل‌های زبری و مقادیر JRC هم ارز با آنها (Barton and Choubey, 1977)

همچنین روشی دیگر برای تخمین JRC، استفاده از پارامتر J_r در سیستم طبقه بندی Q، می‌باشد (Wines and Lilly, 2003). آزمایش کشش روشی دیگر برای تعیین ضریب زبری درزه است. نیروی کششی T را نیز می‌توان با استفاده از یک پیچ سنگ تزریقی یا یک جک تخت اعمال کرد. لازم به ذکر است که بلوک مورد آزمایش را با استفاده از حفاری خطی از بلوک‌های اطراف جدا می‌کنند. در این مورد می‌توان مقدار JRC مربوطه را با استفاده از رابطه ۲-۱۱ به دست آورد:

$$JRC = \frac{\arctan\left[\frac{T_1 + T_2}{N}\right]}{JCS \frac{A}{N}} \quad \text{رابطه (۱۱-۲)}$$

که در آن T_1 مولفه مماسی نیروی وزن ناشی از وزن بلوک بالایی و T_2 نیروی کششی اعمال شده است (مزيجانی و کریمی نسب، ۱۳۸۶).

۲-۵-۱-۳- مقاومت فشاری دیواره درزه

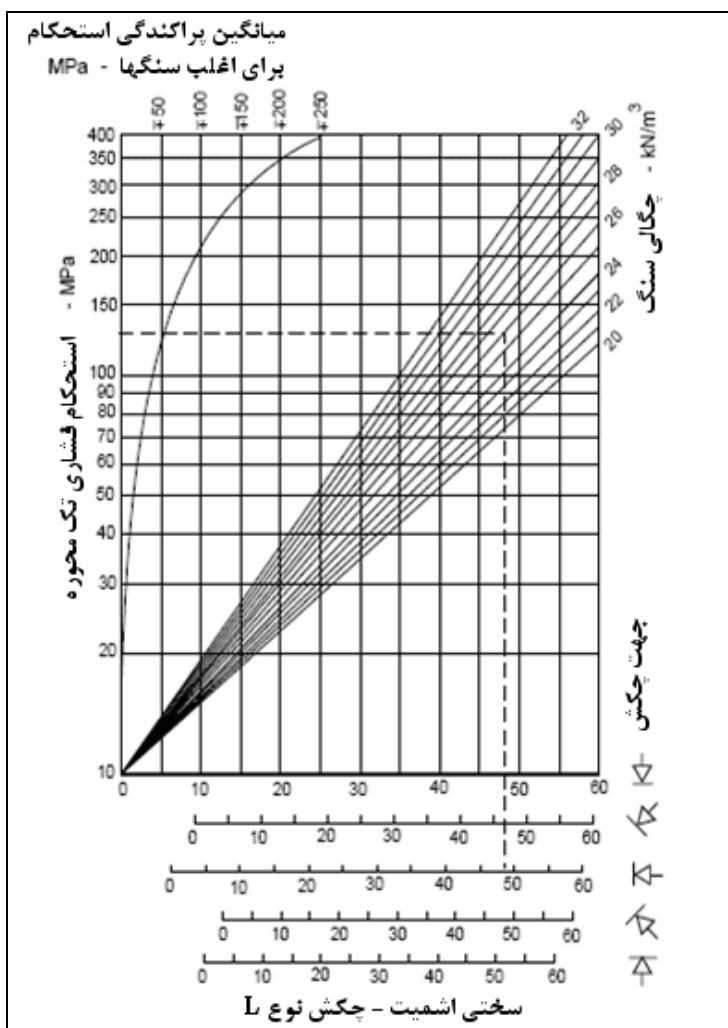
مقاومت فشاری سنگ و دیواره درزه هم به طور آزمایشگاهی (آزمون فشار تک محوری و سه محوری) و هم به طور صحرایی (آزمون‌های سختی چکش اشमित و بارگذاری نقطه‌ای) اندازه گیری می‌شود. بنا به نظر بارتون و همکاران (۱۹۷۷)، مقاومت در طول سطوح ناپیوستگی (JCS) با زبری کنترل می‌شود. بنابراین JCS باید در صحرا و در شرایط طبیعی اندازه‌گیری شود (امانی پور، ۱۳۸۳). برای تخمین مقاومت فشاری درزه، دیر و میلر (۱۹۶۶)^۱ استفاده از چکش اشमित را پیشنهاد کردند.

میانگین مقادیر حاصل از بازتاب چکش اشमित (r) و چگالی سنگ (γ) برای برآورد مقدار مقاومت فشاری دیواره درزه (JCS) با استفاده از شکل ۲-۱۲ مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جایی که وضعیت هوازگی مواد سنگی و دیواره‌های درزه، مشابه است برای تخمین مقاومت فشاری دیواره درزه، نمونه‌های مواد سنگی مورد آزمایش فشار تک محوری قرار می‌گیرند. جایی که دیواره‌های درزه هوازده شده‌اند در یک عمق محدود، روش‌های آزمون بار نقطه‌ای و چکش اشमित مناسب خواهد بود. اگر اندازه‌گیری‌های مستقیم در دسترس نباشد نسبت JCS/δ_c برابر با ۱ به ۴ مورد استفاده قرار می‌گیرد

(Wines and Lilly, 2003).

^۱. Deere and Miller



شکل ۲-۱۲: تخمین استحکام فشاری دیواره درزه از سختی اشویت (Deere and Miller, 1966)

۲-۵-۱-۴- زاویه اصطکاک پایه

زاویه اصطکاک پایه، ϕ_b ، یک کمیت پایه‌ای برای فهم مقاومت برشی سطوح ناپیوستگی است و به طور تقریبی معادل زاویه اصطکاک پسمانده است. می‌توان گفت که تغییر در جنس (نوع) سنگ، باعث تغییر قابل توجهی در مقادیر ϕ_b می‌شود که در نهایت اثر بسیار مهمی بر مقاومت برشی سطح ناپیوستگی سنگ دارد. زاویه اصطکاک پایه می‌تواند از آزمایش برش مستقیم روی سطوح سنگ صاف که با اهر الماسه صاف شده‌اند، بدست آید.

زاویه اصطکاک پایه را برای اغلب سطوح سنگی غیر هوازده صاف بین ۲۵ تا ۳۵ درجه گزارش نموده‌اند (Barton and Choubey, 1977).

استیمپسون^۱ آزمایش کج شدگی روی نمونه‌های مغزه الماسه برای تخمین زاویه اصطکاک پایه را پیشنهاد می‌کند. این آزمایش شامل چسباندن دو نمونه مغزه به یک سطح افقی است، با اطمینان به این که نمونه‌ها در تماس با یکدیگر هستند و برای لغزیدن آزاد نیستند. سپس نمونه مغزه دیگری روی دو قطعه اول قرار داده می‌شود و پایه در حول یک محور افقی چرخانده می‌شود، تا قطعه بالایی در امتداد دو خط تماس با قطعات زیرین شروع به لغزش کند. سپس رابطه زیر می‌تواند برای تخمین زاویه اصطکاک پایه مورد استفاده قرار گیرد.

$$\varphi_A = \tan^{-1}(1.55 \tan \alpha_s) \quad \text{رابطه (۲-۱۲)}$$

که φ_A زاویه اصطکاک پایه برای قطعه بالایی و α_s زاویه‌ای است که لغزش در آن رخ می‌دهد. نتایج بدست آمده حاکی از آن است که در شرایط خشک زاویه اصطکاک پایه برای سنگ آهک بین ۳۱ تا ۳۷ درجه و در شرایط مرطوب بین ۲۷ تا ۳۵ درجه است (Wines and Lilly, 2003).

زاویه اصطکاک پایه برای سنگ آهک در شرایط تنش قائم متفاوت در جدول ۲-۵ آمده است (Yip, 1977)

جدول ۲-۵: مقادیر اصطکاک پایه سنگ آهک در تنش‌های قائم مختلف در دو حالت خشک و اشباع (Yip, 1977)

	$\delta_n (MN/m^2)$	φ_b
dry	۰-۰/۵	۳۳-۳۹
wet	۰-۰/۵	۳۳-۳۶
dry	۰/۱-۷/۱	۳۷-۴۰
wet	۰/۱-۷/۱	۳۵-۳۸
dry	۰/۱-۸/۳	۳۷-۳۹
wet	۰/۱-۸/۳	۳۵

زوایای اصطکاک پایه سنگ‌های کربناته با محتوای ناخالصی کمتر از ۱۰ درصد، با افزایش محتوای کلسیت و اندازه دانه افزایش می‌یابد. کانی‌های رسی زوایای اصطکاک پایه را در سنگ‌های کربناتی با محتوای

^۱ Stimpson

ناخالصی کمتر از ۱۰ درصد، کاهش می‌دهد. زوایای اصطکاک در سطوح صیقلی بین ۷/۵ تا ۷/۹ برای دولومیت و بین ۱۱/۸ تا ۱۳ برای سنگ آهک می‌باشد (Cruden and Hu, 1988).

محمدی راد و یزدان پناه (۱۳۸۰) اظهار داشتند که بر اساس رابطه بارتون و چوبی، چنانچه مقاومت درزه-ها به سمت δ_n میل نماید، زاویه اصطکاک داخلی ناپیوستگی‌ها برابر با اصطکاک اولیه می‌گردد.

برای تعیین زاویه اصطکاک پایه، ϕ_b ، از مغزه‌های سنگی با نسبت طول به قطر برابر با ۲/۵، استفاده می‌شود. در این آزمایش قطعه سنگ توسط پمپ هیدرولیکی کج می‌شود تا وقتی که بخش بالایی شروع به لغزش کند و در این نقطه زاویه کج شدگی توسط انحراف سنج با دقت ۰/۱ درجه ثبت می‌شود. با استفاده از آن زاویه اصطکاک پسماند را می‌توان محاسبه کرد:

$$\phi = (\phi_b - 20) + 20 \frac{r}{R} \quad \text{رابطه (۲-۱۳)}$$

که r مقدار برگشت چکش اشمیت روی سطح درزه هوازده است و R مقدار برگشت روی سطح غیر هوازده است. در مورد درزه‌های غیر هوازده، ϕ_r به طور ایده‌آل مساوی با ϕ_b است (Groneng et al., 2008).

۲-۵-۱-۵- دانسیته

دانسیته یا وزن واحد حجم سنگ، از جمله ویژگی‌های اساسی سنگ‌ها می‌باشد که تعیین آن در بسیاری از کاربردهای مهندسی دارای اهمیت بسزایی است. در بررسی مکانیسم سقوط سنگ، دانسیته یکی از فاکتورهای اساسی جهت محاسبه انرژی ناشی از برخورد سنگ با سطح دامنه می‌باشد.

دانسیته تابعی است از ترکیب کانی شناسی، روزنه داری و بالاخره میزان آب موجود در روزنه‌ها، در واقع حجم کل یک نمونه از سنگ (V_b) مجموعه‌ای است از حجم روزنه‌ها (V_p) و حجم دانه‌های موجود در آن نمونه (V_g) و همچنین جرم کل همان نمونه (m_b) مجموع جرم دانه‌ها (m_g) و جرم آب موجود در روزنه-های آن نمونه (m_w) است. بنابراین:

$$\rho = \frac{m_b}{V_b} = \frac{m_g + m_w}{V_p + V_g} \quad \text{رابطه (۲-۱۴)}$$

اگر سنگ کاملاً خشک باشد، چگالی خشک آن (ρ_d) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\rho_d = \frac{m_g}{V_b} = \frac{m_g}{V_p + V_g} \quad \text{رابطه (۲-۱۵)}$$

چنانچه سنگ اشباع از آب باشد، چگالی اشباع (ρ_s) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\rho_s = \frac{m_g + V_p \rho_w}{V_b} \quad \text{رابطه (۲-۱۶)}$$

معمولاً منظور از چگالی همان چگالی خشک است مگر اینکه خلاف آن قید شده باشد. در یک نمونه مشخص سنگ با افزایش عمق، چگالی افزایش می‌یابد، زیرا که با افزایش عمق، در اثر فشار وارده از سنگ‌های فوقانی، درزه‌ها و شکاف‌ها به تدریج کم و مسدود می‌شود. از طرف دیگر هوازدگی سنگ‌ها در نزدیکی رخنمون‌ها، چگالی را کاهش می‌دهد زیرا اولاً شکستگی‌ها زیاد شده، ثانیاً حجم بعضی از کانی‌ها (مثل مونتموریلونیت و انیدریت) در اثر تماس با آب افزایش می‌یابد (فاروق حسینی، ۱۳۸۴).

در اکثر منابع، چگالی سنگ آهک بین ۲/۶ تا ۲/۸ گرم بر سانتی متر مکعب گزارش شده است. دانسیته نمونه‌های مختلف آهک مارنی با درصدهای متفاوتی از رس و سیلت و ماسه و شن از ۲/۶۸ تا ۲/۸۱ گرم بر سانتی‌متر مکعب تغییر می‌کند (Shaquar et al., 2008).

در جدول ۲-۶ دانسیته سنگ آهک، آهک مارنی، مارن آهکی و آهک متخلخل آمده است (خاکباز، ۱۳۸۰).

جدول ۲-۶: چگالی انواع سنگ آهک در شرایط اشباع و خشک (خاکباز، ۱۳۸۰)

سنگ آهک	آهک مارنی	مارن آهکی	آهک متخلخل
دانسیته طبیعی (تن بر متر مکعب)	۲/۶۳	۲/۴۹	۲/۴۹
دانسیته اشباع (تن بر متر مکعب)	۲/۶۵	۲/۵۴	۲/۵۳
			-

۲-۵-۲- تحلیل استریوگرافیک پایداری دامنه

امروزه به طور وسیعی از روش استریوگرافیک برای تحلیل مقدماتی پایداری دامنه های سنگی استفاده می‌شود. به این منظور ابتدا با بررسی‌های آماری، دسته درزه‌های اصلی و دیگر گسستگی‌های موجود در دامنه تعیین و در استریونت پیاده می‌شود. سپس استریوگرام معرف سطح دامنه، یا شیبی که بر اثر حفاری به وجود خواهد آمد، در استریونت رسم می‌شود. در این مرحله گسستگی‌های مشکل آفرین مورد شناسایی قرار گرفته و بقیه حذف می‌شوند. تحلیل استریوگرافیک زمانی کامل‌تر می‌شود که زاویه اصطکاک (ϕ) سطح گسیختگی نیز در دست باشد. زاویه اصطکاک به صورت دایره‌ای که مرکز آن مرکز استریونت بوده و شعاع آن برابر مقدار (ϕ) است، رسم می‌شود (جدول ۲-۷).

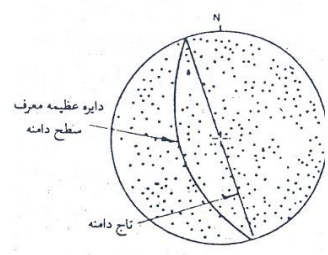
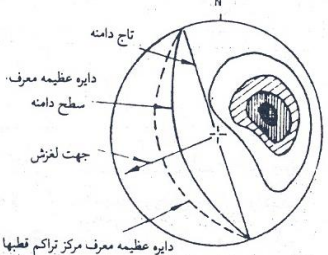
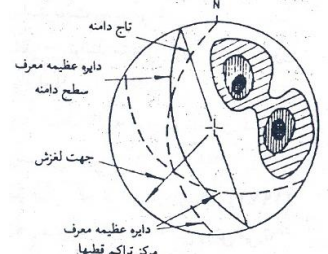
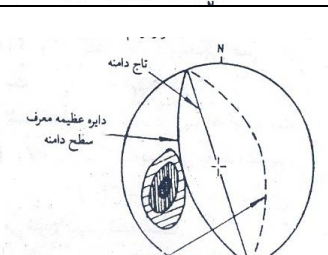
تحلیل استریوگرافیک تنها گسیختگی‌های خطر آفرین داخل دامنه را می‌یابد. لذا دستیابی به یک ضریب اطمینان عددی نیاز به بررسی و تحلیل عمیق‌تر دارد.

۲-۵-۳- تحلیل پایداری با نرم افزار Swedge

جهت ارزیابی ناپایداری بلوک‌های سنگی، نرم افزارهای مختلفی ارائه شده که از جمله آنها نرم افزار Swedge است. این نرم افزار وسیله‌ای تحلیلی، سریع، محاوره‌ای و ساده برای استفاده در ارزیابی پایداری گوه‌های سطحی در شیب‌های سنگی است. گوه‌ها در این نرم افزار از تقاطع دو سری صفحات ناپیوستگی که رویه شیب و سطح بالایی زمین را نیز قطع می‌کنند، تشکیل می‌شوند. یک سری ترک‌های کششی نیز به صورت اختیاری می‌توانند حضور داشته باشند. ارزیابی پایداری گوه‌ها در این نرم افزار به دو صورت قطعی (ضریب اطمینان) و احتمالاتی (احتمال گسیختگی) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این نرم افزار از روش تحلیل جامع هوک^۱ و براون (۱۹۸۱) استفاده شده است. این روش برای واژگونی و لغزش چرخشی

^۱ Hoek and Brown

جدول ۲-۷: تحلیل استریوگرافیک انواع ناپایداری دامنه‌های سنگی (معماریان ۱۳۷۴، با تغییرات)

نوع گسیختگی	تحلیل استریوگرافیک	توضیحات
گسیختگی دایره‌ای		در شرایطی رخ می‌دهد که توده سنگ توسط تعداد زیادی درزه تصادفی قطع شده و به صورت یک توده شبه خاک در آمده باشد
گسیختگی صفحه‌ای		وقتی که ناپیوستگی به موازات دامنه ($\pm 20^\circ$) باشد و شیب آن (θ) به سمت خارج دامنه و بیش از زاویه اصطکاک سطح ناپیوستگی و کمتر از شیب دامنه باشد اتفاق می‌افتد.
گسیختگی گوه‌ای		زمانی که دو ناپیوستگی همدیگر را قطع نموده و شیب دیواره دامنه بزرگتر از شیب خط تقاطع دو صفحه ناپیوستگی باشد و این هر دو بزرگتر از زاویه اصطکاک داخلی دو صفحه ناپیوستگی باشند، لغزش گوه‌ای رخ می‌دهد.
گسیختگی واژگونی		زمانی که ناپیوستگی به موازات دامنه و دارای شیبی تند به سمت داخل دامنه باشد و همچنین شیب دامنه نیز زیاد باشد، گسیختگی از نوع واژگونی رخ خواهد داد.

به کار نمی‌رود. در این روش از پارامترهای استحکام ناپیوستگی‌ها و فشار آب استفاده می‌شود. هیچ محدودیتی در زاویه میل لبه گوه وجود ندارد. در این روش تحلیل می‌توان اثر نیروی خارجی (E) و کابل کششی (T) را در نظر گرفت. علاوه بر این محاسباتی هم به منظور بررسی حداقل ضریب اطمینان در

حالتی که نیروی خارجی (مثلاً شتاب انفجار که در یک جهت مشخص عمل می‌کند) اعمال می‌شود، انجام می‌گیرد. همچنین به حداقل رساندن نیروی کابل مورد نیاز جهت رسیدن به یک ضریب اطمینان معین در این روش در نظر گرفته شده است.

اطلاعات مربوط به مقادیر میانگین فشار آب بر روی سطوح گسیختگی ($u_1 u_2$) و روی ترک کششی (u_5) را می‌توان در روی زمین یا توسط برخی تحلیل‌ها تخمین زد. در صورت عدم وجود اطلاعات دقیق از رفتار آب در شکاف‌ها، نمی‌توان امیدوار بود که پیش بینی دقیق و درست باشد. در این صورت می‌توان فرض کرد که حداکثر شرایط بارندگی سنگین رخ داده است و در نتیجه شکاف‌ها کاملاً از آب پر هستند و فشار آب از صفر در رویه‌های آزاد تا ماکزیمم مقدار در برخی نقاط روی خط تقاطع دو سطح گسیختگی می‌رسد. با این فرض برای دو حالت وجود و عدم وجود ترک کششی، محاسبات انجام می‌گیرد.

داده‌های ورودی نرم افزار شامل مقادیر حداقل، حداکثر، میانگین و انحراف معیار مربوط به شیب و جهت شیب دو دسته درزه اصلی گوه، ترک کششی (در صورت وجود)، رویه شیب (دامنه)، زاویه اصطکاک دسته درزه‌های اصلی و مقدار چسبندگی آنها و همچنین مقادیر مربوط به فشار آب موجود در درزه‌ها، میزان نیروی خارجی (شتاب زلزله یا انفجار) به صورت درصدی از شتاب ثقل زمین و مقدار نیروی میل مهار می‌باشد. ضریب اطمینان برای گوه در حالات مختلف محاسبه می‌شود که در هر کدام از این حالات، محاسبات شامل مراحل مختلفی است. این حالات عبارتند از:

۱- محاسبه ضریب اطمینان وقتی که نیروهای T و E هر دو صفر هستند یا به طور کامل از نظر بزرگی و جهت تعیین شده‌اند.

۲- محاسبه ضریب اطمینان زمانی که نیروی خارجی با بزرگی مشخص در بدترین جهت وارد شود.

۳- در مرحله آخر حداقل نیروی کششی مورد نیاز پیچ سنگ برای رسیدن به ضریب اطمینان مورد نظر، تعیین می‌شود.

در تمامی حالات ذکر شده، ابتدا هندسه گوه مورد بررسی قرار می‌گیرد. اگر داده‌های ورودی طوری باشد که گوه تشکیل نشود، محاسبات ادامه نمی‌یابد و پیغام خطا ظاهر می‌شود. در صورت صحیح بودن هندسه گوه، وزن گوه و مساحت هر یک از وجوه آن محاسبه می‌شود.

در مرحله بعد تنش قائم ناشی از وزن گوه و نیروی ناشی از فشار آب بر روی هر یک از سطوح درزه‌های اصلی و ترک کششی (در صورت وجود) محاسبه می‌شود آن گاه تنش قائم موثر بر این سطوح به دست می‌آید. در صورتی که تنش قائم موثر بر هر کدام از سطوح درزه کمتر از صفر باشد، در آن صورت تماس دو طرف درزه از بین می‌رود. اگر تنش قائم موثر فقط برای یکی از سطوح کمتر از صفر باشد، مقادیر نیروی برشی و مقاومت برشی و نهایتاً ضریب اطمینان برای آن حالت محاسبه می‌شود اما اگر برای هر دو درزه این مقدار از صفر کمتر باشد در آن صورت ضریب اطمینان صفر خواهد بود و محاسبات پایان می‌یابد. در صورتی که ضریب اطمینان بزرگتر از یک باشد در آن صورت گوه پایدار است ولی اگر مقدار آن مساوی یا کمتر از یک باشد گوه گسیخته خواهد شد (Hoek and Bray, 1981).

یکی از مهم‌ترین عواملی که در هنگام تحلیل پایداری دامنه‌ها باید مورد توجه قرار گیرد وجود عدم قطعیت در داده‌های ژئوتکنیکی از قبیل چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و ... می‌باشد (جعفر گندمی، ۱۳۸۰). به منظور کاهش این عدم قطعیت‌ها و همچنین نشان دادن نمایی وسیع‌تر از تاثیر این پارامترها از روش‌های مختلف نمونه برداری آماری استفاده می‌شود.

در مطالعات آماری، واضح است که تا حد امکان، هر چه تعداد نمونه‌ها در یک مجموعه بیشتر باشد به جواب دقیق‌تری خواهیم رسید، اما در مهندسی ژئوتکنیک، ازدیاد داده‌ها از محدودیت مالی و عملی برخوردار می‌باشد. به همین دلیل باید توزیع آماری هر یک از پارامترهای تحلیل پایداری دامنه را تعیین کرد، سپس داده‌های زیادی را از توزیع تعریف شده با تکنیک‌های مختلف نمونه برداری هم‌چون مونت کارلو و لاتین هیپرکیوب استخراج نمود (طاهریان، ۱۳۸۱).

مدل مونت کارلو، برای نمونه برداری از توزیع‌های احتمال، از اعداد تصادفی یا شبه تصادفی استفاده می‌نماید. در این حالت اگر تعداد بسیار زیادی از داده‌ها شکل گرفته و از همین داده‌ها نیز مثلاً برای محاسبه ضریب ایمنی استفاده شود، محصول نهایی از توزیع معین و مشخصی برخوردار خواهد بود.

تکنیک نمونه برداری لاتین هیپرکیوب^۱، روشی است که می‌توان نتایج حاصل از آن را با تکنیک مونت کارلو (اما با نمونه‌های کمتر)، مقایسه نمود. روش مزبور بر اساس نمونه برداری لایه بندی شده^۲ است که در آن، نمونه‌ها از هر لایه به طور تصادفی انتخاب می‌گردند. در حالت ایده‌آل، چنان چه تحلیل‌های خود را با ۱۰۰۰ نمونه حاصل از روش لاتین هیپرکیوب انجام دهیم، نتایج به دست آمده را می‌توان با ۵۰۰۰ نمونه حاصل از روش مونت کارلو، به خوبی مقایسه نمود (طاهریان، ۱۳۸۱).

نمونه برداری برای هر کدام از ورودی‌های نرم‌افزار بر اساس تولید اعداد تصادفی توسط تحلیل مونت کارلو و یا لاتین هیپرکیوب است. بنابراین احتمال گسیختگی لزوماً در هر زمان و محاسبه با همان داده‌ها یکی نخواهد بود. ضریب ایمنی میانگین، لزوماً ضریب ایمنی مربوط به گوه میانگین نیست. در کل احتمال گسیختگی در هر زمان که نرم افزار اجرا می‌شود، تاحدی متفاوت خواهد بود. همچنین می‌توان نمودارهای توزیع فاکتورهای مختلف از جمله ضریب اطمینان، وزن گوه، زاویه میل و روند خط تقاطع گوه و ... را رسم کرد. میانگین، انحراف معیار و ماکزیمم در پایین نمودار توزیع نمایش داده می‌شود. همچنین با استفاده از اسکاترپلات‌های مختلف موجود در نرم افزار می‌توان همبستگی بین فاکتورها و متغیرهای ورودی مختلف را تعیین کرد. ضریب همبستگی می‌تواند بین ۱- و ۱ متغیر باشد که مقادیر نزدیک به صفر نشان دهنده یک همبستگی ضعیف است و مقادیر نزدیک به ۱ و ۱- نشان دهنده همبستگی خوب است. بنابراین می‌توان عاملی را که در کاهش ضریب اطمینان و در نتیجه ناپایداری قطعات موثرتر است، تشخیص داد.

^۱.Latin Hypercube

^۲.Stratified sampling

زمانی که برای بررسی وضعیت پایداری از روش تحلیل احتمالاتی استفاده می‌کنیم، نرم افزار به جای ضریب اطمینان، احتمال وقوع گسیختگی را ارائه می‌دهد که برابر با درصد تعداد گوه‌های گسیخته (با ضریب اطمینان کمتر از یک) به تعداد کل گوه‌ها می‌باشد. پس از تعیین احتمال گسیختگی در منطقه مورد نظر اگر این احتمال بیش از آستانه پیش بینی شده باشد، آن گاه بررسی و شبیه سازی نحوه ریزش در محل به منظور تعیین مناطق در معرض خطر (پهنه بندی خطر) و ایجاد سازه های حفاظتی مناسب، لازم می‌باشد. لازم به ذکر است که آستانه احتمال بسته به اهمیت سازه‌های در معرض خطر، توسط کاربر تعریف می‌شود.

۲-۶- معرفی نرم‌افزار Rocfall

به طور کلی، مدل‌های شبیه سازی سقوط سنگ را می‌توان به روش‌های عددی و تحلیلی تقسیم بندی نمود. شبیه سازی روش‌های تحلیلی اکثراً بر مبنای روش توده‌ای- کلوخه‌ای و یا روش جسم صلب پایه ریزی شده‌اند. در مدل‌های توده‌ای- کلوخه‌ای، توده سنگی به صورت متمرکز در مرکز ثقل آن در نظر گرفته می‌شود و شکل یا حجم سنگ مورد توجه قرار نمی‌گیرد؛ بنابراین در این مدل‌ها غلتش شبیه سازی نمی‌شود. مدل‌های صلب، مدل‌هایی هستند که به شکل و حجم سنگ توجه می‌کنند. با وجود این، از آن جایی که تعیین داده‌های ورودی واقعی برای همه این پارامترها بسیار مشکل است، این روش‌ها در عمل زیاد به کار نمی‌روند (Alejano et al, 2007).

تاگلیاوینی و همکاران^۱ (۲۰۰۷) در مقایسه‌ای بین برنامه دو بعدی Rocfall و برنامه سه بعدی STONE به این نتیجه رسیدند که نتایج برنامه Rocfall در مورد انرژی، سرعت، ارتفاع پرش و ... به طور منصفانه‌ای با نتایج برنامه STONE قابل مقایسه است. اما در کل STONE مسیره‌های طولانی‌تر و بلندتری برای سنگ‌های ریزشی تولید می‌کند. در اکثر موارد از Rocfall که یک نرم افزار تحلیلی کمی است در کنار

^۱ Tagliavini et al.

نرم‌افزارها یا روش‌های تحلیلی کیفی دیگر، به منظور کامل‌تر شدن اطلاعات در مورد پدیده ریزش استفاده می‌کنند (Marussich et al., 2008, Yilmaz, 2008).

نرم افزار Rocfall یک برنامه تحلیلی- آماری دو بعدی است که توسط استیونز^۱ برای شبیه سازی سقوط سنگ ایجاد شده است. این برنامه جزء مدل‌های توده‌ای- کلوخه‌ای 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 شبیه سازی این برنامه نتایج آماری مفیدی در اختیار قرار می‌دهد و مشکلات مرتبط با عدم قطعیت این داده‌های ورودی را کاهش می‌دهد. خروجی‌های این برنامه به صورت منحنی‌ها و نمودارهای توزیع ماکزیمم سرعت، انرژی جنبشی، ارتفاع پرش و مکان توقف سنگ در سرتاسر طول شیب می‌باشد (Stevens, 1998).

تحلیل احتمالاتی این نرم افزار بر اساس روش مونت کارلو است. از نتایج این نرم افزار برای طراحی دیوارهای حائل مناسب استفاده می‌شود که بر اساس آن می‌توان محل، اندازه و استحکام مورد نیاز دیوار حائل را تخمین زد.

برای در نظر گرفتن خواص مواد تشکیل دهنده دامنه در تعیین چگونگی برخورد سنگ به سطح دامنه و خصوصیات مسیر طی شده توسط قطعات سنگی از اصطلاحی به نام ضریب ارتجاعی نرمال و مماسی و ضریب اصطکاک در شبیه سازی سقوط سنگ استفاده می‌شود (Chau et al., 2002).

تغییرات جزئی در مقدار ضریب ارتجاعی تاثیرات کاملاً واضحی در مقدار پارامترهای خروجی این برنامه از جمله ارتفاع پرش سنگ‌ها و مسافت طی شده دارد و محاسبه مقدار دقیق آن نتایج شبیه سازی را صحیح‌تر می‌کند (Stevens, 1998).

^۱.Stevens

با استفاده از یکی از گزینه‌های نرم افزار^۱، ضریب ارتجاعی بر اساس جرم یا سرعت قطعه سنگ تعدیل شود؛ به این ترتیب که با افزایش سرعت برخورد قطعه سنگ، ضریب ارتجاعی کاهش می‌یابد. به طوری که شرایط از کاملاً الاستیک در سرعت‌های پایین برخورد تا کاملاً غیر الاستیک برای زمانی که خردشدگی قطعه سنگ و فرورفتگی دامنه افزایش می‌یابد، تغییر می‌کند.

در این برنامه (کلاً در مدل‌های توده‌ای- کلوخه‌ای) هر قطعه سنگ به عنوان یک ذره مدل می‌شود و فرض می‌شود این ذره یک دایره خیلی کوچک است. از آن جایی که ذرات بی نهایت کوچک فرض می‌شود بنابراین هیچ برخوردی بین آنها وجود ندارد و فقط با دامنه و موانع موجود بر روی آن برخورد می‌کنند. جرم سنگ در معادلات محاسبه حرکت سنگ‌ها استفاده نمی‌شود ولی در معادلات محاسبه انرژی جنبشی سنگ مورد توجه قرار می‌گیرد. این جرم در شروع شبیه سازی با یک مقدار معین یا توزیع تصادفی نمونه-های دارای پتانسیل ریزشی مشخص می‌شود و در طول شبیه سازی ثابت می‌ماند. سنگ‌ها در طول شبیه سازی شکسته یا به قسمت‌های مختلفی تقسیم نمی‌شوند. از مقاومت هوا در محاسبه معادله حرکت صرف نظر می‌شود زیرا در نظر گرفتن آن معادلات را خیلی پیچیده می‌کند و تاثیر چندانی در نتیجه ندارد. 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 لغزش. الگوریتم ذره همه پارامترهای شبیه سازی را دریافت می‌کند و صحت و اعتبار پارامترها را بررسی می‌کند و شرایط اولیه را برای الگوریتم جهش و الگوریتم لغزش فراهم می‌کند و سپس الگوریتم جهش آغاز می‌شود. الگوریتم جهش برای محاسبه حرکت سنگ در حالت جهش و الگوریتم لغزش برای محاسبه حرکت در زمانی که سنگ با سطح شیب‌دار برخورد می‌کند و به سمت پایین حرکت می‌کند، استفاده می‌شود. از تلاقی مسیر سهمی شکل توده سنگ با دامنه در لحظه برخورد

^۱. Coefficient of normal restitution scaling

و حل معادله درجه دوم می‌توان سرعت، انرژی و ارتفاع پرش را در هر نقطه تعیین کرد. برای مقابله با قطعه سنگ‌هایی که به انتهای مسیر می‌رسند با استفاده از این پارامترها می‌توان تمهیدات لازم را انجام داد (Stevens, 1998).

مکانیسم حرکت قطعه سنگ بعد از جدایش از قوانین فیزیکی پیروی می‌کند. شبیه سازی چنین رفتار حرکتی، نیاز به استفاده از معادلات سرعت و انرژی برای قطعه سنگ دارد. با توجه به سرعت اولیه قطعه سنگ و برخورد آن با سطح دامنه، مسیر سهمی شکل ایجاد می‌شود که در نهایت پس از چندین برخورد و میرا شدن انرژی در نقطه‌ای در پایین شیب متوقف می‌شود. نقطه و زمان برخورد قطعه سنگ از تلاقی این سهمی با دامنه از رابطه ۲-۱۷ محاسبه می‌شود (Stevens, 1998).

معادله پارامتری خط شیب را می‌توان به صورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} x - X_1 &= u(X_2 - X_1) \\ y - Y_1 &= u(Y_2 - Y_1) \end{aligned} \quad U \in [0,1] \quad \text{رابطه (۲-۱۷)}$$

که در آن X_1 و Y_1 مختصات اولین نقطه از خط و X_2 و Y_2 مختصات دومین نقطه از خط می‌باشد. معادله پارامتری مسیر سهمی شکل قطعه سنگ نیز به صورت رابطه (۲-۱۸) است:

$$\begin{aligned} x &= V_{x_0} t + X_0 \\ y &= -\frac{1}{2} g t^2 + V_{y_0} t + Y_0 \end{aligned} \quad t \in [0, \infty] \quad \text{رابطه (۲-۱۸)}$$

که در آن g شتاب نیروی ثقل معادل 9.81 m/s^2 ، X_0 و Y_0 موقعیت اولیه قطعه سنگ، V_{x_0} و V_{y_0} سرعت اولیه قطعه سنگ است.

معادله پارامتری سرعت قطعه در هر نقطه به صورت رابطه زیر است:

$$\begin{aligned} V_{x_B} &= V_{x_0} \\ V_{y_B} &= V_{y_0} + g t \end{aligned} \quad \text{رابطه (۲-۱۹)}$$

که V_{Y_B} و V_{X_B} سرعت سنگ در هر نقطه در مسیر سهمی شکل قبل از برخورد می‌باشد. از تلاقی خط شیب و مسیر سهمی شکل قطعه سنگ در لحظه برخورد و حل معادله درجه دوم می‌توان سرعت، انرژی و ارتفاع پرش را در هر نقطه تعیین کرد.

این سیکل محاسباتی تا زمانی که قطعه سنگ متوقف نشود تکرار می‌شود.

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

$$q = \frac{(Y_2 - Y_1)}{(X_2 - X_1)} \quad \text{رابطه (۲۰-۲)}$$

که در آن q خط شیب می‌باشد.

از حل معادله درجه دوم فوق زمان برخورد قطعه سنگ به شیب به صورت رابطه ۴-۵ به دست می‌آید:

$$t = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} \quad \text{رابطه (۲۱-۲)}$$

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

$$b = V_{Y_0} - qV_{X_0}$$

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

مولفه‌های سرعت در راستای عمود و مماس بر شیب قبل از ضربه به صورت زیر محاسبه می‌شود:

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

$$V_{TB} = V_{YB} \cdot (\sin \theta) + V_{XB} \cdot (\cos \theta) \quad \text{رابطه (۲۲-۲)}$$

V_{NB} و V_{TB} به ترتیب سرعت عمودی و سرعت مماس بر شیب می‌باشند. سرعت سنگ بعد از ضربه نیز با

دخالته ضرایب ارتجاعی به صورت رابطه (۲۳-۲) محاسبه می‌شود:

$$V_{NA} = R_N \cdot V_{NB}$$

$$V_{TA} = R_T \cdot V_{TB} \quad \text{رابطه (۲۳-۲)}$$

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

عمودی و مماسی قطعه سنگ بعد از برخورد می‌باشد.

$$\begin{aligned} V_{XA} &= V_{NA} \cdot (\sin \theta) + V_{TA} \cdot (\cos \theta) \\ V_{YA} &= V_{TA} \cdot (\sin \theta) - V_{NA} \cdot (\cos \theta) \end{aligned} \quad \text{رابطه (۲۴-۲)}$$

که V_{XA} و V_{YA} سرعت سنگ در مسیر سهمی شکل بعد از برخورد می‌باشد. انرژی سنگ هم متناسب با سرعت قبل و بعد از ضربه از رابطه (۲۵-۲) به دست می‌آید.

$$\begin{aligned} E_B &= \frac{1}{2} m V_B^2 \\ E_A &= \frac{1}{2} m V_A^2 \end{aligned} \quad \text{رابطه (۲۵-۲)}$$

E_A و E_B ، انرژی قطعه سنگ قبل و بعد از برخورد به سطح شیب‌دار است.

سیکل محاسبات در الگوریتم جهش تا زمانی که شرایط برای جهش قطعه سنگ امکان پذیر باشد تکرار می‌شود. زمانی که قطعه سنگ در روی شیب حرکت می‌کند در حالت لغزش قرار می‌گیرد که رفتار این پدیده نیز با توجه به زاویه شیب و زاویه اصطکاک و با قوانین حرکت بیان می‌شود (Stevens, 1998). در حالتی که زاویه شیب بزرگتر از زاویه اصطکاک باشد ($\theta > \varphi$) نیروی محرک بیشتر از نیروی پایداری می‌شود و قطعه سنگ با افزایش سرعت به سمت پایین حرکت می‌کند. در این حالت با توجه به رابطه (۲۶-۲) داریم:

$$V_{EXIT} = \sqrt{V_0^2 - 2sgk} \quad k = \pm \sin \theta \cdot \tan \varphi \quad \text{رابطه (۲۶-۲)}$$

V_{EXIT} سرعت سنگ در هر نقطه در طول شیب، V_0 سرعت اولیه قطعه سنگ به صورت مماس بر سطح شیب‌دار و s فاصله موقعیت اولیه تا نقطه مورد نظر در شیب است.

در حالتی که زاویه شیب برابر زاویه اصطکاک باشد ($\theta = \varphi$)، قطعه سنگ با سرعت یکنواخت بر روی سطح شیب‌دار حرکت می‌کند.

$$V_{EXIT} = V_0 \quad \text{رابطه (۲۷-۲)}$$

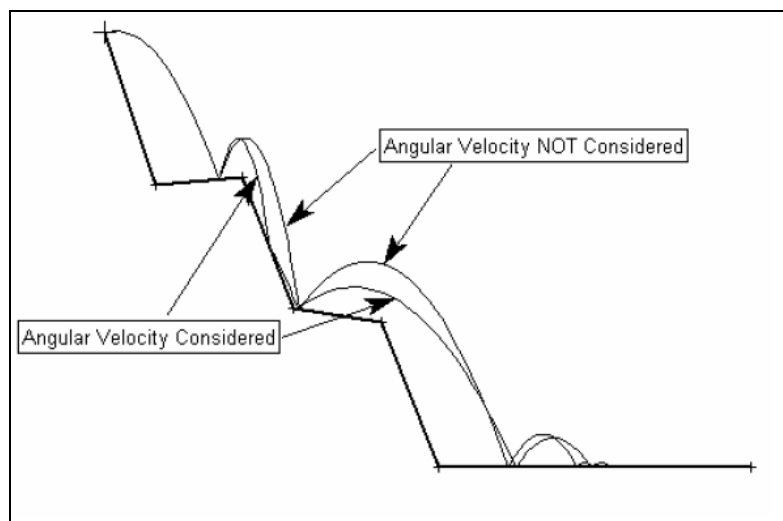
در حالتی که زاویه شیب کوچکتر از زاویه اصطکاک باشد ($\theta < \phi$)، سرعت قطعه سنگ کاهش می‌یابد و در جایی متوقف می‌شود. فاصله موقعیت اولیه قطعه سنگ تا نقطه توقف آن با قرار دادن $V_{EXIT} = 0$ در رابطه (۲-۲۸) به دست می‌آید:

$$S = \frac{V_0^2}{2gk} \quad \text{رابطه (۲-۲۹)}$$

که در آن S ، فاصله موقعیت اولیه قطعه سنگ تا نقطه توقف می‌باشد (Stevens, 1998).

۲-۶-۱- تاثیر سرعت زاویه‌ای بر مسیر ریزش

اگر در هنگام اجرای این برنامه گزینه سرعت زاویه‌ای را انتخاب کنیم، در معادلات حرکت علاوه بر سرعت انتقالی، سرعت زاویه‌ای نیز در نظر گرفته می‌شود که در این حالت چرخش سنگ نیز شبیه سازی می‌شود. چرخش سنگ در هوا سبب می‌شود که مسیر آن در چندین مرحله برخورد با سطح دامنه یا موانع موجود بر آن تغییر نماید. سرعت زاویه‌ای اولیه در شروع حرکت سنگ صفر قرار داده می‌شود و در طول حرکت به صورت متغیر تصادفی و توزیع نرمال تعریف می‌گردد. شکل ۲-۱۳ تاثیر سرعت زاویه‌ای در مسیر حرکت سنگ را به خوبی نشان می‌دهد (Stevens, 2003).



شکل ۲-۱۳: تاثیر سرعت زاویه‌ای بر مسیر ریزش (Stevens, 2003)

۲-۶-۲- محدودیت شبیه سازی در Rocfall

هر چند نتایج شبیه سازی رفتار قطعه سنگ در نرم افزار 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 قطعه سنگ به رفتار واقعی باید آن‌ها را مد نظر قرار داد. عدم توجه به تاثیر شکل و نحوه خردایش قطعه سنگ بر اثر برخورد و ضربه با سطوح دامنه در طول مسیر، عدم انتخاب صحیح و دقیق مقادیر ضرایب ارتجاعی در طول مسیر و عدم شبیه سازی سه بعدی رفتار قطعه سنگ و در نتیجه عدم توجه به پراکنش جانبی مسیرهای ریزش از محدودیت‌های این نرم افزار است.

۲-۷- مدیریت و پهنه بندی خطر ریزش سنگی

مدیریت ناپایداری دامنه‌ها شامل ارزیابی ابعاد و اختصاصات ناپایداری، اثرات اقتصادی و اجتماعی آنها و نیز راهکارهای مناسب جهت کاهش خطر و ریسک ناپایداری می‌باشد.

ارزیابی وضعیت پایداری شیب‌ها در طول یک پروژه خطی چند کیلومتری یا محدوده وسیع چند صد هکتاری نیاز به صرف هزینه و زمان زیاد دارد و عملاً امکان پذیر نیست. با توجه به محدودیت بودجه و زمان در مطالعات اولیه و مکان یابی پروژه، لازم است شیب‌های با پتانسیل ریزش با روشی سریع و اقتصادی شناسایی شوند و راهکار مناسب مواجهه با آنها شامل پرهیز از محدوده‌های خطر یا اصلاح شیب انتخاب گردد. اقتصادی‌ترین و سریع‌ترین روش دستیابی به این پیش بینی در مقیاس گسترده و وسیع، پهنه بندی درجه ناپایداری نسبی مناطق با استفاده از روش مناسب و تعیین مناطق بالقوه است. لازمه این امر استفاده از سیستم‌های مناسب ارزیابی خطر و ریسک ناپایداری است. مدیریت ناپایداری بر اساس سیستم‌های بررسی ریسک و خطر، یکی از مؤثرترین راه‌های تشخیص اثرات ناپایداری شیب‌ها می‌باشد (تاروردیان، ۱۳۸۶). با استفاده از این سیستم‌ها می‌توان شیب‌ها را بر اساس خطر و ریسک رتبه بندی

نموده و بر اساس سطح بدست آمده به تصمیم‌گیری در زمینه اصلاح و کاهش ریسک در مقاطع مورد نظر پرداخت (امانی پور، ۱۳۸۳).

برای این منظور از روش‌های کیفی شامل سیستم‌های طبقه بندی توده سنگ و سیستم‌های ارزیابی تجربی و روش‌های کمی شامل مطالعات آزمایشی^۱ و مدل سازی ریزش سنگی استفاده می‌شود. مدل سازی ریزش سنگی خود می‌تواند دارای انواع مختلف باشد.

۲-۷-۱- روش‌های کیفی

روش‌های کیفی شامل سیستم‌های طبقه بندی توده سنگ و سیستم‌های ارزیابی تجربی می‌باشند. اگر هیچ ابزار تحلیلی برای مطالعات دقیق‌تر در دسترس نباشد، می‌توان از سیستم‌های کیفی طبقه بندی و روش‌های طراحی تجربی استفاده کرد. طراحی تجربی، از روش‌های مرسوم طراحی، محاسبات و معادلات تحلیلی یا مدل سازی یا از این قبیل موارد استفاده نمی‌کند. بلکه عمدتاً بر اساس تجربه و قضاوت مهندسی می‌باشد. سیستم‌های کیفی متنوعی برای ارزیابی سطح ریسک و خطر به منظور مدیریت ناپایداری شیب‌های سنگی حاشیه جاده‌ها ارائه و استفاده شده‌اند که تعدادی از آنها در جدول ۲-۸ ارائه شده است (تاروردیان، ۱۳۸۶).

تاروردیان (۱۳۸۶) در قالب تحقیق پایان نامه ارشد، جاده اورامانات بین پاه و مریوان (واقع در استانهای کرمانشاه و کردستان) را در محدوده دری بر- هجیج تحت مطالعه و بررسی قرار داد. در این تحقیق، مکانیسم ناپایداری و وسایل اصلاح ممکن با تشخیص پرخطرترین بخش‌های جاده مورد بررسی قرار گرفت. در راستای این هدف وی خطر و ریسک ریزش سنگی را توسط سیستم RHRS^۲ تخمین زد. بر اساس آن مسیر جاده را به ۸ بخش تقسیم کرد. مطالعات نامبرده نشان داد که ۲۰۰ متر انتهایی مسیر خطرناک‌ترین پهنه است و ریسک بالاتری دارد و نیاز فوری به اقدامات پیشگیرانه دارد. با توجه به شرایط

^۱ Experimental Methods

^۲ Rockfall Hazard Rating System

پیچیده رویه شیب، در پهنه فوق نتیجه گرفت کارهای اصلاحی مرسوم برای امن شدن این محل و حل مشکل کافی نیست و پیشنهاد نمود که کارهای اصلاحی باید با کمترین تداخل با شرایط موجود شیب انجام شود.

جدول ۲-۸: تعدادی از سیستم‌های کیفی ارزیابی ریزش‌های سنگی (تاروردیان، ۱۳۸۶)

سیستم ارزیابی	محل ارائه	مرجع	سیستم ارزیابی	محل ارائه	مرجع
NHI ¹	آرگون ^۲ ، آمریکا	(Pierson et al, 1990) (National Highway	RHI ³	چین	(Zang et al, 2004)
FRHI ⁴	آمریکا	(Fellow, 2004)	MNHI ⁵ , Wyllie	نیویورک، آمریکا	(Hidajin, 2002)
Brawner&Wyllie (CPR)	کانادا	(Brawner, 2004)	MNHI , ontario	میسوری ^۶ ، آمریکا	(Maerz, 2005)
NPCS ⁷	هنگ کنگ	(Chau et al, 2003)	MNHI	تنز ^۸ ، آمریکا، ایتالیا	(Vandewater, 2002) (Budetta, 2004)
RSHIS ⁹	اسکاتلند	(McMillan and Matheson, 1998)	(Japan Road Association, 1998)	ژاپن	موسسه راه ژاپن ^{۱۰}
USMS ¹¹	واشنگتن، آمریکا	(Ho and Norton, 1991)	DRD ¹²	چین	(Yang et al, 2006)
RHRON ¹³	کانادا	(Franklin and Senior, 1987)			

¹ . National Highway Institute

3.Rock Hazard Index

5.Modified NHI

7. .New Priority Classification System

9. .Rock Slope Hazard Index System

11. .Unstable Slope Management System

13. Ontario Rockfall Hazard Rating System

2.Oregon

4. Falling Rock Hazard Index

6. Missouri

8. Tennessee

10. Japan Road Association

12. Degree of Reinforcement Demand

۲-۷-۲- روش‌های کمی

روش‌های کمی شامل مطالعات آزمایشی و مدل سازی ریزش سنگی می‌باشند. مطالعات آزمایشی شامل بازسازی فرآیند ریزش به طور مصنوعی با پرتاب قطعات با ابعاد و خصوصیات متفاوت بر روی دامنه‌های مختلف در صحرا است. با انجام آزمایشات فوق می‌توان به روابط بین پارامترهای مؤثر بر فرآیند ریزش (در محل‌های مختلف) پی برد و معادلات ریاضی مربوط به آن‌ها را به دست آورد و برای نقاط مشابه تعمیم داد و یا مدل‌های کامپیوتری را بر اساس این پارامترها تولید کرد. از این روش‌ها با توجه به این که محاسبات با کامپیوتر انجام می‌شود، به عنوان روش‌های کامپیوتری نیز نام برده می‌شود.

آزونی و فریتاس (۱۹۹۵) با استفاده از آزمایش‌های درجا، با پرتاب قطعات سنگی و فیلم برداری از تمام مراحل حرکت آنها، پارامترهای مناسب برای تحلیل‌های ریزش سنگی کامپیوتری را ارزیابی کردند. این پارامترها شامل ضریب ارتجاعی، ضریب اصطکاک غلتشی، سرعت‌های انتقالی و غلتشی و ارتفاع جهش می‌باشد. آن‌ها همچنین تاثیر شکل و ابعاد بلوک‌ها را روی سرعت غلتشی بررسی کردند. همچنین پراکندگی جانبی مسیرهای ریزش بر روی شیب‌های مختلف و اثر وجود گودال بر روی مسیرهای ریزش را نیز مورد مطالعه قرار دادند.

دورن^۱ (۲۰۰۳) مدل‌های کمی یا کامپیوتری را به طور کلی در سه گروه طبقه بندی کرد:

۱. مدل‌های تجربی^۲
۲. مدل‌های متکی بر فرآیند^۳
۳. مدل‌های متکی بر GIS^۴

۲-۷-۲-۱- مدل‌های تجربی

مدل‌های تجربی رابطه بین مشخصات شیب نظیر توپوگرافی و درزه‌داری را با ابعاد و حجم ریزش و مسافت طی شده از پای شیب بیان می‌کنند. برای این منظور از قوانین مختلفی نظیر قانون

^۱ . Dorren

^۲ . Empirical Models

^۳ . Process-based Models

^۴ . GIS-based Models

Fahrböschung (معادل زاویه دسترسی^۱ است) (Heim, 1932; Evans and Hungr, 1993) و قانون حداقل زاویه سایه^۲ (Rapp, 1960; Evans and Hungr, 1993) استفاده می‌شود.

چائو و همکاران^۳ (۲۰۰۳) داده‌های بیش از ۴۰۰ ریزش سنگی را در هنگ کنگ از سال ۱۹۴۹ تا ۱۹۹۶ گردآوری و تحلیل کردند. نامبردگان اظهار داشتند که رابطه بزرگی- فراوانی ریزش مشابه با رابطه گوتنبرگ ریشتر برای زلزله‌ها است. در این مطالعه تعداد ریزش‌های سنگی روزانه در مقابل داده‌های بارندگی ۱، ۲ و ۳ روزه از سال ۱۹۸۹ تا ۱۹۹۶ رسم شدند و نتیجه گرفته شد که حد آستانه بارندگی روزانه در حدود ۱۵۰-۲۰۰ میلی متر برای تحریک ریزش سنگی در هنگ کنگ مورد انتظار است و بارندگی تجمعی ۲ روزه بیشترین شاخص قابل اعتماد است. نقشه پهنه بندی خطر به صورت نقشه‌های کنتوری ریزش سنگی با مقیاس ۱/۱۰۰۰۰۰ برای جزیره Kowloon تهیه شد. برای این کار ابتدا نقشه منطقه به شبکه‌های چهار گوش با مساحت ۰/۲۵ کیلومتر مربع تقسیم بندی شد و تعداد تجمعی ریزش‌ها در هر واحد برای دوره ۱۳ ساله محاسبه شد سپس خط کنتوری بر اساس تعداد تجمعی ریزش‌ها در هر کدام از واحدها رسم شدند. مسئله اصلی در تحلیل داده‌های ریزش سنگی، ناکامل بودن مجموعه داده‌ها به علت عدم گزارش برخی وقایع است. روش تحلیل داده‌ها در این مقاله برای هنگ کنگ برای جاهای دیگر نیز بدون نیاز به اصلاح زیاد قابل استفاده است. یکی از روش‌های متداول برای ارزیابی نحوه ریزش- های سنگی استفاده از نظریه حرکت مخروطی واریزه‌ها در طول دامنه است. این نظریه توسط ایوانز و هانگر (۱۹۹۳)^۴ پیشنهاد شده و بر پایه این نظریه، حرکت بلوک سنگ از محل جدایش در طول دامنه به سمت افق پایین‌تر در فضای یک مخروط صورت می‌گیرد. قاضی پور و همکاران (۱۳۸۶)، از این روش برای تهیه نقشه پهنه بندی خطر ریزش سنگی در مسیر جاده چالوس حد فاصل پل زنگوله تا مرزن آباد

^۱ Reach angle

^۲ Minimum Shadow angle

^۳ Chau et al.

^۴ Evans and Hungr

استفاده کردند. آنها ابتدا موقعیت ریزش سنگی را توسط مشاهدات صحرایی در ۴۷ ایستگاه برداشت کردند و نقشه رقومی شیب را با استفاده از نرم افزار Arc-GIS تهیه نمودند. سپس برای تهیه نقشه‌های پهنه بندی خطر ریزش سنگی، مناطق با شیب ۴۰ یا ۴۵ درجه و بیشتر به عنوان نقاط منشاء ریزش در نظر گرفتند. بر این مبنا محاسبه مخروط افت برای دو زاویه ۴۰ و ۴۵ درجه به وسیله نرم افزار CONEFALL و به کمک نرم افزار Arc-GIS صورت گرفت و نقشه پهنه بندی خطر ریزش سنگی تهیه شد. نامبردگان بیان داشتند که نتایج به دست آمده از نقشه پهنه بندی با شواهد و واقعیت‌های روی زمین تطابق نزدیک و خوبی داشته و این امر صحت به کارگیری روش مخروط افت را برای منطقه نشان می‌دهد.

۲-۷-۲-۲-مدل‌های متکی بر فرآیند

مدل‌های متکی بر فرایند، روش‌های حرکت سنگ‌های در حال سقوط بر روی سطوح دامنه‌ای را توصیف و شبیه سازی می‌کنند. این مدل‌ها می‌توانند دو بعدی و یا سه بعدی باشند. مدل‌های دو بعدی همه دارای سه مشخصه مشابه هستند. اول اینکه مدل‌هایی در مقیاس دامنه‌ای^۱ هستند و قطعات ریزشی را محدود به حرکت در یک صفحه عمودی می‌کند. در نتیجه حرکت‌های جانبی شبیه سازی نمی‌شود. دوم اینکه مسیر ریزش سنگی به صورت ترکیبی از خط‌های مستقیم به هم وصل شده است و زاویه شیب، برابر شیب میانگین مسیر ریزش سنگی است. سوم اینکه، حرکت‌ها به صورت فازهای پرشی^۲ و تماسی شبیه سازی می‌شوند. فاز پرشی با یک معادله سهمی شکل بر اساس سرعت اولیه در مسیرهای x و y و شتاب ناشی از ثقل شبیه سازی می‌شود. نقطه تصادم سنگ روی سطح دامنه از نقطه تلاقی تابع سهمی شکل پرش و بخش‌های مستقیم دامنه محاسبه می‌شود (Dorren, 2003).

تفاوت بین مدل‌های دو بعدی در این است که برخی از این مدل‌ها قطعه ریزشی را به صورت جرم متمرکز در نظر می‌گیرند (Pfeiffer and Bowen, 1989; Kobayashi et al., 1990; Evans and Hungr, 1993).

^۱ . Slope-scale

^۲ . Flying Phase

در حالی که دیگر مدل‌های دو بعدی، قطعات سنگ ریزشی را به صورت یک جسم بیضوی در نظر می‌گیرند (Bozzolo et al., 1988; Azzoni et al., 1995). همچنین برخی مدل‌ها حرکت را در طی یک ریزش سنگی با خصوصیات مفصل و جزئی برای جهش، لغزش و غلتش، نزدیک یا روی سطح دامنه شبیه سازی می‌کند (Kobayashi et al., 1990; Evans and Hungr, 1993; Azzoni et al., 1995). اما دیگر مدل‌ها جهش، غلتش و لغزش را به عنوان حرکت‌های مشابه که می‌توان به صورت برخوردها و جهش‌های متوالی توصیف کرد، در نظر می‌گیرند (Bozzolo et al., 1988; Pfeiffer and Bowen, 1989).

در همه مدل‌ها از الگوریتم‌ها یا محاسبات عددی خاصی برای محاسبه سرعت‌های غلتشی و لغزشی استفاده می‌کنند. برای محاسبه سرعت قبل و بعد از جهش از ضریب ارتجاعی که بر اساس محاسبه اتلاف انرژی (نسبت انرژی کل سنگ قبل و بعد از برخورد) است استفاده می‌شود است. این ضریب به صورت یک ضریب ارتجاعی مماسی که در مسیر موازی با سطح دامنه عمل می‌کند و یک ضریب ارتجاعی نرمال که عمود بر سطح دامنه عمل می‌کند، اتلاف انرژی را محاسبه می‌نماید. ضریب ارتجاعی مماسی توسط پوشش گیاهی و زبری سطح تعیین می‌شود و ضریب ارتجاعی نرمال توسط الاستیسیته مواد سطحی تعیین می‌شود.

توپال و همکاران^۱ (۲۰۰۷) خطر ریزش سنگی را در اطراف یک قلعه باستانی در شهر آفیون ترکیه، که یک مکان توریستی و تاریخی است، مورد بررسی قرار دادند. خصوصیات درز و شکاف‌ها، میانگین فاصله داری درزه‌های سرد شدگی و لایه بندی، بازشدگی، پرشدگی، درجه زبری ناپیوستگی‌ها در صحرا برداشت شدند. تجزیه و تحلیل‌های ریزش سنگی به صورت دو بعدی در امتداد ۹ پروفیل انجام گرفت. ریزش در هر پروفیل به وسیله نرم افزار Rocfall 4.0 شبیه سازی شد. برای به دست آوردن ضریب ارتجاعی، در یک تپه مشابه در نزدیکی شهر تعدادی قطعات سنگی پرتاب و با تجزیه و تحلیل این ریزش‌ها ضریب ارتجاعی محاسبه گردید. با استفاده از نتایج نرم افزار نقشه توزیع پارامترهایی همچون مسافت ریزش، ارتفاع جهش،

^۱ Topal et al.

انرژی جنبشی و سرعت تهیه شدند. و نهایتاً نقشه پهنه بندی خطر در حضور و عدم حضور سازه‌های دفاعی تهیه شد و پیشنهاداتی برای جلوگیری و مقابله با ریزش ارائه دادند (Topal et al, 2007).

امانی پور (۱۳۸۳) در تحقیق پایان نامه کارشناسی ارشد خود مکانیسم ریزش سنگی و عوامل موثر و زمینه ساز وقوع آن را برای دامنه‌های سنگی منطقه اسفیدان از توابع شهرستان بجنورد واقع در استان خراسان شمالی که در معرض تخریب بر اثر پدیده ریزش سنگ می‌باشد، مورد مطالعه و بررسی قرار داد. مکانیسم سقوط و پارامترهای مرتبط با آن از جمله سرعت، انرژی، ارتفاع جهش و . . . توسط مدل کامپیوتری ROCFALL بررسی گردید. جهت شناسایی نوع گسیختگی، عامل جدایش قطعات و تعیین ضریب اطمینان قطعات سنگی در حالت‌های مختلف، پایداری شیب‌های گسترده طرح به روش‌های استریوگرافیکی و ریاضی و با استفاده از برنامه‌های Rockware و SASW ارزیابی گردید. علاوه بر این، به منظور دستیابی به برخی از فاکتورهای مورد نیاز در تحلیل پایداری، تشخیص نوع حرکت ایجاد شده و ابعاد آن، میزان فعالیت دامنه و تخریب شیب‌ها و همچنین ریسک گسیختگی، توده‌های سنگی تشکیل دهنده شیب‌ها از لحاظ خصوصیات ژئوتکنیکی و ژئومکانیکی مورد بررسی قرار گرفتند. درصد احتمال گسیختگی نیز با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی تعیین گردید. پس از انجام بررسی‌ها و مطالعات لازم، پهنه بندی خطر ناشی از سقوط سنگ‌ها در شیب‌های منطقه انجام گرفت. نتایج حاصل از مطالعات انجام گرفته نشان داد که شیب‌های منطقه دارای استعداد بالایی برای حرکت‌های توده‌ای از نوع سقوط می‌باشند و به دلیل گستردگی عوامل موثر و همچنین تغییرات بسیار وسیع این عوامل در قسمت‌های مختلف، سقوط سنگ‌ها دارای مکانیسم نسبتاً پیچیده‌ای است و همراه با خطرات اقتصادی و جانی فراوانی برای ساکنین منطقه می‌باشد (امانی پور، ۱۳۸۳).

در دهه گذشته در تکامل و توسعه مدل‌های متکی بر فرآیند پیشرفت زیادی حاصل شده است و برخی از این مدل‌ها قادر به تشخیص مختصات، سرعت و سرعت زاویه‌ای برای قطعات چندگانه در فضای سه بعدی

می‌باشند (Descouder and Zimmermann, 1987; Gascuel et al., 1998). این مدل‌ها از دست دادن و به دست آوردن انرژی جنبشی از قطعات در نتیجه تصادم‌های غیر ارتجاعی و اصطکاکی با یکدیگر و با سطح دامنه را شبیه سازی می‌کنند. این نوع مدل‌ها بر اساس روش‌های المان مجزا یا بر اساس تحلیل تغییر شکل می‌باشند (Dorren, 2003).

احمدی (۱۳۸۶) به منظور تحلیل پایداری دیواره پر شیب مشرف به شمال سد و نیروگاه آبی گتوند علیا در شهرستان شوشتر، رفتار مکانیکی توده‌های سنگی را پس از جدایش و حین سقوط در ۴ مقطع که بلوک‌های سنگی در آنها پتانسیل ریزشی بیشتری داشتند، با استفاده از روش‌های تحلیلی (نرم افزار Rocfall) و روش عددی المان مجزا (نرم افزار PFC) مطالعه نمود. در روش عددی المان مجزا، بلوک‌های سنگی منفصل به وسیله مجموعه‌ای از عناصر کروی و هم شکل و مجزا برای حرکت روی دیواره در نظر گرفته می‌شود. رفتار مکانیکی توده سنگ در این مدل از طریق حرکت هر ذره و اندرکنش در نقاط تماس آنها با استفاده از معادلات حرکت توصیف می‌شود. نتایج حاصل از این مدل لزوم برنامه ریزی برای کاهش خسارات ناشی از سقوط سنگ در این محدوده و یا جلوگیری از سقوط سنگ به وسیله تثبیت و تحکیم توده سنگ‌ها را مورد تاکید قرار داد. نتایج هر دو روش شبیه سازی برای بلوک‌های بحرانی در مقطع ۴، ۶، ۷ و ۹ مؤید این مطلب است که بلوک پس از برخورد‌های متوالی در طی مسیر خود به سمت تاسیسات نیروگاه حرکت کرده و خساراتی به آن وارد می‌کند. رفتار واقعی بلوک در حین سقوط و خردایش آن بر اثر برخورد به سطح شیب دار در شبیه سازی عددی PFC، نتایج به دست آمده از روش تحلیلی را تأیید کرده است.

۲-۷-۲-۳- مدل‌های متکی بر GIS

مدل‌هایی هستند که در یک محیط GIS، اجرا می‌شوند یا مدل‌های رستری هستند که داده‌های ورودی آنها توسط تحلیل GIS تهیه یا آماده می‌شوند. این مدل‌ها در مقیاس دامنه‌ای یا ناحیه‌ای به طور وسیعی

برای پیش بینی ریسک ناشی از ریزش سنگی مورد استفاده قرار می‌گیرد. مدل‌های متکی بر GIS شامل سه فرآیند تشخیص نواحی منشاء ریزش سنگی در ناحیه، تعیین مسیر ریزش و ارزیابی فاصله نهایی از پای شیب می‌باشد.

یک مدل ساده برای تشخیص نواحی منشاء ریزش سنگی تعریف حدود آستانه برای شیب میانگین دامنه است (Toppe, 1987; Van Dijke and Van Westen, 1990). روش دیگر تعیین نواحی منشاء ریزش سنگی، تشخیص نواحی پرشیب و پرتگاهی موجود در نقشه‌های توپوگرافی یا استفاده از نواحی تعریف شده به عنوان شیب‌های ریزش سنگی فعال موجود در نقشه‌های زمین شناسی و ژئومورفولوژیکی است (Van Dijke and Van Westen, 1990). روش خودکار و بسیار واقع بینانه تر، تشخیص نواحی منشاء ریزش سنگی بر اساس مجموعه داده‌های ترکیب شده در GIS است. این مجموعه داده می‌تواند شامل نوع سنگ، رخنمون، انحنای دامنه، شیب دامنه و پوشش زمین باشد.

اگر به جای استفاده از مقدار شیب میانگین دامنه، نواحی ریزش سنگی همچون رویه‌های پرتگاهی کوچک را به جزئیات بتوان تشخیص داد، به طور قابل توجهی در تعیین نواحی منشاء بهبود حاصل می‌شود (Dorren and Seijmonbrrgen, 2003).

رایج ترین روش مورد استفاده برای تعیین مسیر ریزش در مدل‌های ریزش سنگی متکی بر GIS، روش D-8 یا روش D-16 می‌باشد. هر کدام از این روش‌ها دارای مزایا و معایب مربوط به خود می‌باشند. برای محاسبه زون مسافت طی شده از پای دامنه می‌توان از مدل‌های تجربی و متکی بر فرآیند در محیط GIS استفاده کرد. با استفاده از یک مدل تجربی در محیط GIS، می‌توان یک تقریب اولیه از مسافت طی شده از پای دامنه به دست آورد.

آیالا- کارسیدو و همکاران^۱ (۲۰۰۳)، چهار نوع نقشه استعداد داری ریزش سنگی در مقیاس ۱/۵۰۰۰ برای منطقه Lacabrera sierra در مادرید ایتالیا تهیه کردند. این نقشه‌ها عبارتند از: (۱) نقشه حداکثر مسافت طی شده^۲: که برای این منظور قطعات سنگی با بیشترین فاصله از منشأ در محل مورد نظر را نقشه برداری نمودند و خط پوشش آنها با درونیابی رسم شد و خط حداکثر مسافت طی شده از پای دامنه تعیین گردید. سپس پهنه‌های با درجات مختلف خطر تعریف شدند. (۲) نقشه حداکثر مسافت طی شده مطلق^۳: حداکثر مسافت طی شده توسط بزرگترین قطعات در صحرا در کل منطقه می‌باشد. این روش منطبق بر فلسفه طراحی بیشترین خطر است. در این حالت نیز منطقه خطر پهنه بندی شد. (۳) نقشه حداقل زاویه دسترسی^۴: زاویه بین خط منبع ریزش تا محل توقف دورترین قطعات ریزشی و افق می‌باشد. (۴) نقشه ژئوتکنیکی از تحلیل دینامیک^۵: با یک روش قطعی (Deterministic) و با انجام تحلیل برگشتی برای بیشترین خطر (Hazard) مشاهده شده (بلوک ۸/۵ متر مکعبی و ۲۰/۴ تنی)، ضرایب ارتجاعی نرمال (R_n) و مماسی (R_t) و ضریب اصطکاکی ترکیبی معادل برای غلتش لغزشی تعیین شده است. نقشه خطر حاصل از تحلیل دینامیک نیز بر اساس انرژی قطعات در طول مسیر طبقه بندی شد. مقایسه بین نقشه‌ها نشان می‌دهد که نقشه‌های حداکثر مسافت طی شده مطلق و کمترین زاویه دسترسی بسیار محافظه کارانه تر از نقشه حداکثر مسافت طی شده و نقشه ژئوتکنیکی است. از نقطه نظر کارهای GIS، استفاده از نقشه‌های حداکثر مسافت طی شده و حداکثر مسافت طی شده مطلق نسبت به نقشه حداقل زاویه دسترسی زمان کمتری برای تحلیل نیاز دارد و مناسب‌تر هستند.

منندز دوآرت و مارکوینز^۶ (۲۰۰۲)، برای ارزیابی ریزش سنگی در رشته کوه‌های Cantabrian در شمال اسپانیا از مدل مسیر جریان سیال که بر اساس پر شیب ترین مسیر جریان از پیکسل مرکزی است،

1 Ayala-Carcedo et al

2 . Maximum Run-out map

3 . Maximum Absolute Run-out map

4 . Minimum Reach Angle

5 . Geotechnical Map From Dynamic

6 Menendez Duarte and Marquinez

استفاده کردند. ماتریکس حاصل در ترکیب با نقشه سنگریزه‌ها یک سری از سلول‌ها را در شبکه به عنوان حوضه توپوگرافی سنگریزه تعیین می‌کند. از ترکیب نقشه حوضه توپوگرافیکی سنگریزه با نقشه شیب‌های سنگی، نقشه حوضه‌های ریزش سنگی به دست می‌آید. با تعیین جنس واریزه‌های سنگی، نقشه‌ای به دست می‌آید که شیب‌های سنگی را به دو دسته فعال و غیر فعال تقسیم می‌کند. برای تعیین درجه اعتبار این روش، این کار را به صورت دستی نیز انجام دادند و نتایج، درجه هم‌خوانی بیش از ۷۵ درصد برای دامنه‌های آهکی و ۶۰ درصد برای شیب‌های سیلیسی نشان می‌دهد. نتایج نشان داد که در دامنه‌های سیلیسی ۴۱ درصد و در دامنه‌های آهکی ۲۹-۲۲ درصد از سنگریزه‌ها بدون پوشش گیاهی بودند که نشان دهنده فعالیت بالای دامنه‌های سیلیسی است که این به علت وضعیت ناپیوستگی‌های متراکم و پیشرفته و مسطح و بدون سیمان شدگی آن است. اما در شیب‌های آهکی، ناپیوستگی‌ها با سیمان کربناتی چسبانده شده که به شدت، اثر آنها را به عنوان ناپیوستگی و یا خط درز محدود می‌کند.

مارکوینز^۱ و همکاران (۲۰۰۳)، با استفاده از تعدادی متغیرهای زمین شناسی و محیطی توانستند یک مدل پیشگویانه در محیط GIS برای فعالیت ریزش سنگی برای رشته کوه‌های Cantabrian در شمال اسپانیا ارائه دهند. متغیرهای زمین شناسی شامل سنگ شناسی و موقعیت نسبی ناپیوستگی‌های اصلی نسبت به سطح توپوگرافی و دو پارامتر ریخت شناسی: زبری و درجه شیب می‌باشد. متغیرهای محیطی نیز شامل ارتفاع و تابش خورشید بودند. برای تعیین حوضه‌های ریزش سنگی، از ترکیب نقشه سنگریزه‌های جدید و نقشه حوضه‌های مسیر سیالات برای تشخیص حوضه توپوگرافیکی سنگریزه استفاده شد و با روی هم قرار دادن این نقشه و نقشه شیب‌های سنگی، حوضه ریزش سنگی به دست آمد. این روش با روش دستی تعیین حوضه‌های ریزش سنگی نتایج بسیار مشابهی نشان داد. تحلیل برگشتی برای ۴۴۲ صخره سنگی آهکی و کوارتزی به کار رفته و همبستگی متقابل بین این فاکتورها و فعالیت ریزش سنگی برای ساخت مدل مورد استفاده قرار گرفت. طبق نتایج این مطالعه، رخنمون‌های مختلف، رفتارهای متفاوت

^۱ Marquinez et al

قابل توجهی نسبت به درجه شیب نشان می‌دهند. در صخره‌های سیلیسی، فعالیت ریزش شدیدتر است و به طور قابل ملاحظه‌ای با افزایش درجه شیب افزایش می‌یابد، در حالی که شیب‌های آهکی فعالیت کمتری نشان می‌دهند که با درجه شیب بین ۵۰ تا ۶۰ درجه رشد می‌کند و به آرامی با افزایش درجه شیب کاهش می‌یابد.

چائو^۱ و همکاران (۲۰۰۴)، تطابق وقوع ریزش را با فاکتورهای مختلف با استفاده از برگشت منطقی از طریق نرم‌افزار SPSS برای ۳۷۴ مورد ریزش از سال ۱۹۸۴ تا ۱۹۹۸ در هنگ کنگ بررسی کردند. این فاکتورها شامل زمین شناسی و جهت شیب، زاویه شیب و ارتفاع است که با استفاده از GIS توسط مدل ارتفاعی دیجیتالی (DEM) تولید شدند. برای تولید آنها از نقشه کنتری دیجیتالی ۱/۵۰۰۰ هنگ کنگ برای تولید TIN و DEM استفاده شد. فاصله کنترها ۱۰ متر بوده و قدرت تفکیک DEM، ۳۰ متر در ۳۰ متر است. بر اساس فایل TIN، فایل‌های رستری ارتفاعی، جهت شیب و زاویه شیب برای همه محل‌ها در هنگ کنگ تولید شد. تحلیل برگشتی منطقی وسیله آماری مفیدی برای پیش بینی ریزش و لغزش می‌باشد. مدل برگشتی منطقی مناسب می‌تواند برای محاسبه احتمال وقوع ریزش سنگی هم در نقاط ریزشی و هم در نقاط غیر ریزشی مورد استفاده قرار بگیرد.

جوزتی و همکاران^۲ (۲۰۰۴) روشی برای تعیین خطر ریزش سنگی و تعیین ریسک ناشی از آن در امتداد شبکه حمل و نقل در Nera Vally واقع در ایتالیای مرکزی ارائه دادند. این روش برای تشخیص مقاطعی از جاده که دارای بیشترین خطر ریزش سنگی هستند پیشنهاد شده و بر اساس یک تحلیل ترکیبی از باز رخداد وقایع تاریخی، حجم و فراوانی ریزش‌های جدید و نتایج حاصل از یک مدل شبیه سازی ریزش سنگی توزیع شده از لحاظ فضایی است. خطر ریزش سنگی با استفاده از سه نقشه رستری تولید شده توسط برنامه STONE تعیین شد، این سه نقشه شامل نقشه تعداد کل مسیرهای ریزش سنگی، نقشه

¹ Chau et al

² Guzzetti et al

بیشترین ارتفاع از سطح زمین و بیشترین سرعت محاسبه شده می‌باشد. این نقشه‌ها با روش‌های مختلف ترکیب شدند و نتایج حاصل از آن به صورت نقشه پهنه بندی خطر، بر حسب پارامترهای سه نقشه ورودی، به سطوح مختلف خطر طبقه بندی شدند. برای تشخیص بخش‌هایی از جاده که پتانسیل خطر ریزش را دارند، نقشه خطر با نقشه شبکه حمل و نقل در GIS ترکیب شدند. همچنین نوع روش‌های حفاظتی در برابر ریزش سنگی شامل روکش‌های توری، توری‌های ارتجاعی، دیوارهای بتونی و تونل‌های مصنوعی، برای تخمین درجه تاثیر ساختارهای حفاظتی و تعیین سطح ریسک باقیمانده در امتداد جاده مورد استفاده قرار گرفت. تحلیل نشان می‌دهد که تاثیر ترکیبی از همه ساختارهای حفاظتی موجود در حدود ۱۰/۴ درصد وسعت ناحیه در معرض ریزش سنگی و حدود ۶۷/۷ درصد از طول کل جاده‌های در معرض خطر ریزش را کاهش می‌دهد. از سیستم RHRS برای تعیین ریسک وسایل نقلیه در سه حالت استفاده شد. اول با عدم توجه به حضور ساختارهای حفاظتی موجود، دوم با در نظر گرفتن همه وسایل حفاظتی بدون توجه به درجه تاثیر آنها در کاهش خطرات ریزش سنگی و سوم فقط در حضور ساختارهای باز دارنده مؤثر از این سیستم استفاده شد. نتایج تحلیل آنها نشان داد که وسایل حفاظتی تا حد زیادی میانگین ریسک وسایل نقلیه را کاهش می‌دهد. ولی وجود حداقل سطح خطر ریزش در امتداد جاده‌ها را تأیید می‌کند.

به نظر می‌رسد مدل‌های متکی بر فرآیند، پیش بینی‌های بسیار دقیق‌تری از مسافت طی شده از پای دامنه را ارائه می‌دهند. علاوه بر این، مزیت دیگر مدل‌های متکی بر فرآیند این است که برخورد سنگ‌های ریزشی با تنه درختان یا دیگر موانع را می‌تواند شبیه سازی کند. مشکل یا مساله اصلی مدل سازی ریزش سنگی محاسبه سرعت‌های غلتشی و جهشی است. بسته به درجه کامل بودن یا جزئیات داده‌های ورودی، الگوریتم‌های مختلفی از لحاظ پیچیدگی از کم تا زیاد می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد.

دورن و سیج مون برگن (۲۰۰۳)^۱ برای ارزیابی ریزش سنگی در مقیاس ناحیه‌ای در ناحیه جنگلی از پارامترهای ثابت ساده همچون تعداد درختان در هکتار و قطر تنه در ارتفاع متوسط استفاده نمودند و دو مدل ریزش سنگی Rocky1 و Rocky2 را با یک مدل جدید متکی بر GIS، Rocky3، مورد مقایسه قرار دادند. Rocky1 بر اساس الگوریتم‌های توصیف شده توسط Van Dijke and Van Westen (1990) می‌باشد و فقط حرکت لغزش را شبیه سازی می‌کند. Rocky2 نوع پیشرفته تر Rocky1 است. این مدل برای سنگ ریزشی ابتدا سقوط و سپس لغزش را شبیه سازی می‌کند. مدل Rocky3 بر اساس الگوریتم‌های اصلاح شده (Pfeiffer and Bowen 1989) می‌باشد و برای قطعه سنگ ریزشی جهش‌های متوالی و حرکت در هوا را شبیه سازی می‌کند. دو مدل اولیه کاهش انرژی را در فاصله دو مرکز سلول محاسبه می‌کنند، در حالیکه مدل سوم (Rocky3) قادر به محاسبه چندین جهش در یک پیکسل است و سرعت ریزش سنگی را بر اساس کاهش انرژی ناشی از برخورد با درختان و سطح زمین محاسبه می‌کند. از بین آنها Rocky3 که حرکت سقوط را با جزئیات بیشتر شبیه سازی می‌کند و پارامترهای یک جنگل ساده را در آن دخالت می‌دهد بیشترین دقت را در پیش بینی مسافت طی شده از پای دامنه در مقیاس ناحیه‌ای دارد.

لان و همکاران^۲ (۲۰۰۷) برای تسهیل ارزیابی خطرات ریزش سنگی در محیط GIS، زیر برنامه‌ای را تحت عنوان Rockfall Analyst (RA) تولید نمودند که ترکیبی از یک مدل سازی سه بعدی (3D) فرآیند ریزش سنگی با مدل سازی GIS است و قادر به انتقال مقادیر زیادی از اطلاعات زمین مکانی مرتبط با رفتارهای ریزش سنگی می‌باشد.

^۱ Dorren and Seijmonbrgen

^۲ Lan et al

کوپون^۱ و ویلاپلانا (۲۰۰۸)، نقشه‌های استعداد داری ریزش سنگی را بر اساس لیست وقایع گذشته تهیه کردند. آنها چهار سطح استعداد داری وقوع ریزش را براساس ویژگی‌های توده‌های سنگی (استحکام، هوازدگی و خصوصیات ناپیوستگی‌ها) و چگالی نشانگرهای ریزش در دامنه‌های سنگی تعیین کردند؛ سپس بر اساس تحلیل آماری ریزش‌های جدید، زوایای دسترسی و سایه را برای احتمال دسترسی ۰/۲۵ به دست آوردند. مقایسه نقشه‌های حد دسترسی بر اساس زوایه دسترسی و زوایه سایه با نقشه ژئومورفولوژیکی مربوط به موقعیت دورترین قطعات و دامنه سنگریزه‌ای، نشان داد که نقشه‌ای که بر اساس رابطه تجربی زوایه سایه است مطابقت بیشتری با نقشه ژئومورفولوژیکی دارد و مدل زوایه دسترسی، مسیر بسیار طولانی‌تری را برای ریزش نشان می‌دهد که مطابق با میانه دشت سیلابی است که هیچ قطعه ریزشی وجود ندارد در حالی که مدل زوایه سایه، در مقیاس بزرگ، از اعتبار مناسبی برخوردار است. بنابراین خطر ریزش سنگی با استفاده از نقشه استعداد داری نواحی در معرض برخورد با استفاده از چند محدوده برای زوایه سایه، پهنه بندی شد.

۲-۷-۳- روش‌های کاهش خطر

پس از تعیین احتمال گسیختگی و پهنه بندی خطر ریزش سنگی با مشخص شدن سازه‌ها و افرادی که در پهنه‌های خطر قرار می‌گیرند باید اقدامات لازم جهت جلوگیری از پیامدهای ناخوشایند ناشی از وقوع حوادث ریزش سنگی صورت گیرد. طبق نظر معماریان (۱۳۷۴) برای مواجهه با مشکل ناپایداری دامنه سه راه وجود دارد که عبارتند از:

۱- اجتناب از خطر گسیختگی دارای ریسک زیاد: جایی که جلوگیری از ایجاد گسیختگی ممکن نباشد و ریسک گسیختگی بالا باشد بهتر است احداث سازه‌ها به جایی دیگر با خطر کمتر منتقل شود و

¹ Copons and Vilaplana

مناطق مسکونی یا سازه‌های دیگر تخلیه شوند و مورد استفاده قرار نگیرند.

۲- قبول خطر گسیختگی: زمانی که خطر گسیختگی کم یا متوسط است می‌توان آن را پذیرفت. در این صورت اجازه می‌دهیم تا گسیختگی صورت گیرد سپس واریزه‌های حاصله را از محل دور می‌کنیم.

۳- کاهش خطر توسط تثبیت دامنه: در مواقعی که اجتناب از خطر امکان پذیر نیست همچنین قبول ریسک وقوع گسیختگی نیز ممکن نباشد و یا راه حلی برای مرتفع کردن خطر گسیختگی وجود دارد، می‌توان با استفاده از روش‌های گوناگون تثبیت دامنه میزان خطر را کاهش داد. اگر ریسک گسیختگی پایین یا متوسط باشد، اقتصادی بودن روش‌های ترمیمی و اصلاح دامنه باید مد نظر قرار بگیرد اما اگر ریسک خیلی بالا باشد مخارج اصلاح دامنه را هر میزان که باشد باید پذیرفت.

۲-۷-۳-۱- روش‌های اصلاح و تثبیت دامنه

روش‌های اصلاح و تثبیت دامنه بسیار متنوعند و به طرق مختلفی می‌توان آنها را طبقه بندی نمود. به عنوان مثال معماریان (۱۳۷۴) آنها را به سه گروه تقسیم کرد که عبارتند از:

۱- تغییر در شکل دامنه توسط تغییر در ارتفاع و شیب آن

۲- بهبود وضعیت زهکشی سطحی یا داخلی برای کنترل نیروی مخرب آن

۳- استفاده از تمهیدات یا سازه‌های مهندسی برای افزایش نیروهای مقاوم در برابر گسیختگی.

در جدول ۲-۹ خلاصه‌ای از روش‌های مهم پایدارسازی دامنه آمده است. بسته به این که این روش‌ها قبل یا بعد از گسیختگی دامنه به کار روند، به نام روش‌های پیش گیرنده یا ترمیمی شناخته می‌شوند.

جدول ۲-۹: خلاصه روش‌های پایدارسازی دامنه‌ها (معماریان، ۱۳۷۴)

روش	شرایط	هدف از کاربرد (پیشگیری با ترمیم)
تغییر شکل دامنه	کاهش ارتفاع کاهش شیب افزودن به وزن پاشنه	پیشگیری، ترمیم در مراحل اولیه پیشگیری، ترمیم در مراحل اولیه ترمیم در مراحل اولیه
کنترل آب سطحی	گیاهان بستن ترک‌ها سیستم زهکشی	پیشگیری پیشگیری، ترمیم در مراحل اولیه پیشگیری، ترمیم در مراحل اولیه
کنترل زهکشی داخلی	چاه‌های عمیق زهکش‌های ثقلی قائم زهکش‌های افقی گالری‌های زهکشی چاه، چاهک و خندق در پاشنه دامنه خندق‌های بالای خاکریز زهکشی ورقه‌ای الکترواسمز مواد شیمیایی	ترمیم موقتی پیشگیری، ترمیم در مراحل اولیه پیشگیری، ترمیم در مراحل اولیه تا حد واسط پیشگیری، ترمیم در مراحل اولیه ترمیم در مراحل اولیه پیشگیری، ترمیم در مراحل اولیه پیشگیری پیشگیری، ترمیم در مراحل اولیه (موقتی) پیشگیری، ترمیم در مراحل اولیه
	پا سنگ بتنی میل مهار سنگ قطعات بتنی و میل مهار	پیشگیری پیشگیری، ترمیم قطعات لغزنده پیشگیری
	مهار کابلی توری سیمی دیوار ضربه‌گیر بتنی بتن پاشی پایه سنگریز دیوار سبدي دیوار صندوقی دیوار خاک مسطح دیوارهای بتنی ثقلی	پیشگیری، ترمیم در مراحل اولیه نگهداری قطعات ریزشی نگهداری قطعات لغزنده یا غلطنده پیشگیری پیشگیری، ترمیم در مراحل اولیه پیشگیری، ترمیم در مراحل اولیه پیشگیری پیشگیری پیشگیری
	دیوارهای بتنی مهار شده شمع‌ها ...	پیشگیری، ترمیم در مراحل اولیه تا حدواسط پیشگیری، ترمیم در مراحل اولیه

تاروردیان (۱۳۸۶) اقداماتی را که به منظور اصلاح دامنه‌های سنگی انجام می‌گیرد به دو دسته شامل پایدار سازی و کاهش ریسک گسیختگی تقسیم کرد. وی به کار بردن مواد و وسایلی چون مهار کردن سنگ توسط پیچ سنگ‌ها، داول‌ها و میل مهار، بتن دندانه‌ای، باترس، شاتکریت، تزریق، زهکشی آب‌های سطحی و زیر زمینی، تغییر هندسه شیب و احداث انواع دیوارهای حائل را جزء دسته اقدامات پایدار سازی دامنه می‌داند که هدف آنها تشخیص و جلوگیری از حرکت بلوک‌های سنگی مستعد گسیختگی است. از آن جایی که امکان تشخیص و جلوگیری از حرکت تمامی بلوک‌های سنگی وجود ندارد لذا اقداماتی که برای به حداقل رساندن ریسک خسارت‌های جانی و مالی ناشی از حرکت بلوک‌های سست صورت می‌گیرند جزء اقدامات کاهش ریسک و خطر می‌داند. گروه اخیر شامل اقدامات لق گیری و آتشباری، احداث برم‌ها، جوی و تله در پای شیب، دیوار ضربه گیر و سد کننده (تقلیل دهنده انرژی، فنس، زمین‌های مستحکم شده مکانیکی، دیوارهای ضربه گیر)، مش‌ها (توری، مش‌های فلزی)، انبارک سنگ گیر یا سقف‌های بهمن گیر، نیم تونل و سیستم‌های اعلان خطر می‌باشد.

۲-۷-۳-۲- انتخاب روش اصلاح دامنه

انتخاب روش مناسب برای اصلاح و پایدار سازی دامنه باید اقتصادی و ایمن باشد و با کلیه محدودیت‌های موجود در محل سازگار باشد. با توجه به تنوع در نوع گسیختگی‌های شیبی و تنوع شرایط محیطی، انتخاب یک روش مناسب جهت تثبیت و کنترل شیب‌های در حال گسیختگی به عوامل متعددی بستگی دارد. تصمیم گیری در مورد روش مناسب مقابله با خطر گسیختگی مستلزم شناسایی دقیق عوامل زیر است:

رابطه بین شرایط زمین شناسی و شکل بالقوه گسیختگی

اهمیت فعالیت دامنه یا مقدار و سرعت حرکت آن

عناصر پایداری دامنه (عوامل موثر در ناپایداری)

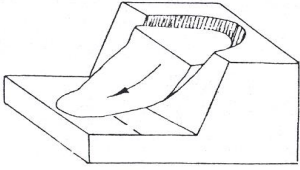
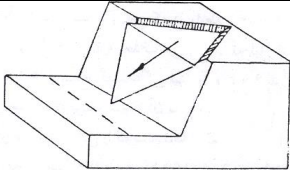
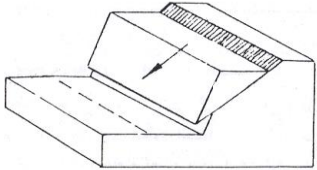
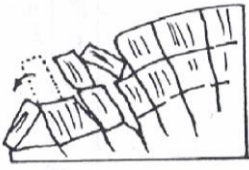
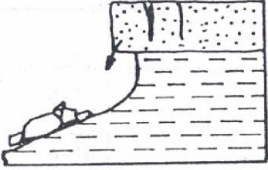
شکل و ویژگی‌های دامنه گسیخته شده

امکان استفاده از تحلیل‌های ریاضی

نوع و شکل گسیختگی (طبقه بندی)

عوامل موثر بر انتخاب روش اصلاح دامنه عبارتند از: مکانیسم و گستردگی ناپایداری، مشخصات هندسی دامنه، شرایط زمین شناسی (مثل درجه هوازگی سنگ، شرایط پی بلوک سنگی و هیدرولوژی آب‌های سطحی و زیر زمینی)، مشخصات ریسک و خطر ناپایداری و اقتصاد طرح، دانش فنی موجود، زمان در دسترس، اهداف پایدار سازی از لحاظ موقتی یا دائمی بودن، توسعه آینده (چند مرحله‌ای بودن). در جدول ۲-۱۰ خلاصه‌ای از چند روش اصلاح و پایدار سازی که قابلیت اجرا را فقط بر اساس شکل گسیختگی دامنه دارند، آمده است. گاهی ممکن است برای کنترل و پایدار سازی یک دامنه از چندین روش همراه با هم استفاده شود. برای انتخاب روش پایدار سازی و اصلاح دامنه‌ها دو عامل زمان و میزان پول کلیدی هستند.

جدول ۲-۱۰: خلاصه‌ای از روش‌های اصلاح و پایدارسازی (Ortigao and Sayao, 2004)

مصلح	نوع گسیختگی	نوع گسیختگی	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
سنگ به شدت درزه دار	دایره‌ای		*	*	*	-	-	-	-	-	-	-
سنگ	گوه‌ای		*	*	-	*	*	*	*	-	-	-
	صفحه‌ای		*	*	-	*	*	*	*	-	-	-
	واژگونی		*	*	-	*	*	*	*	-	-	-
سنگ افت			-	-	-	-	*	*	*	*	*	*

در این جدول علائم - : این روش کاربردی ندارد.

*: این روش کاربرد دارد.

و اعداد نشان دهنده انواع روش‌ها اصلاح و پایدارسازی شیب‌ها است که مطابق جدول زیر است:

زهکشی	کاهش شیب دامنه	دیواره-های حائل	شبکه بتنی مهار شده ^۱	باترس یا پایه مهار شده ^۲	پیچ سنگ	شاتکریت	مش فولادی	برداشتن بلوک‌های سست (لق گیری)	سد کننده‌ها
۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰

^۱ Anchored concrete grid

^۲ Anchored buttresses or pillar

فصل سوم
مطالعات زمین شناسی و
درزه نگاری

۳-۱- مقدمه

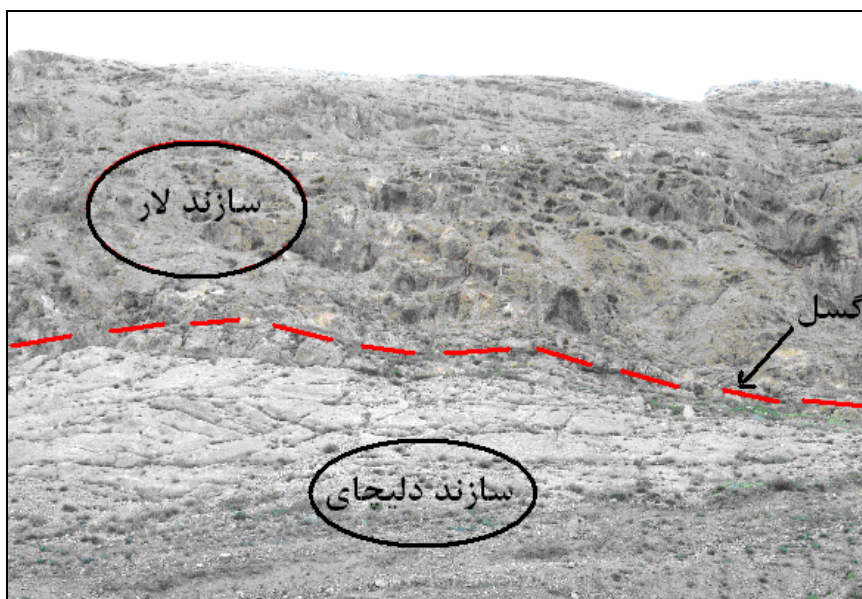
جهت ارزیابی پایداری دامنه‌های مورد مطالعه، اطلاعات سنگ شناسی، درزه نگاری و تعیین خصوصیات سطح درزه و توده سنگ ضروری می‌باشد. برای این منظور نقشه زمین شناسی بزرگ مقیاس منطقه (۱/۱۰۰۰۰) با استفاده از عکس‌های هوایی تهیه شده است. همچنین مقاومت توده سنگ و مشخصات درزه‌ها در ۱۲ مقطع مورد مطالعه قرار گرفته است.

۳-۲- زمین شناسی محدوده مطالعاتی

قلل و بخش مرتفع ارتفاعات منطقه مطالعاتی، متعلق به سازند آهکی لار است. آهک لار از نوع آهک-های توده‌ای و حاوی نودول‌های چرت است. به علاوه این آهک‌ها در مقابل فرسایش مقاوم اند و به همین دلیل صخره ساز بوده و توپوگرافی تند و ظاهر خشنی ایجاد نموده اند. در زیر آهک لار، تناوب آهک مارنی و مارن وجود دارد که متعلق به سازند آهکی دلیچای می‌باشد. وجود تناوب‌های مارنی در سازند دلیچای سبب شده که این آهک‌ها نسبت به فرسایش مقاومت کمتری داشته باشند و توپوگرافی ملایم‌تری نسبت به بخش‌های بالاتر خود داشته باشند. نکته جدیدی که در نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰ دیده می‌شود حضور واحدی است که متشکل از شیل زغال دار و ماسه سنگی سبز رنگ در زیر سازند لار است. چنین خصوصیتی مطابق با واحد JS₂ متعلق به سازند شمشک می‌باشد. این سنگ‌ها نیز نسبت به فرسایش مقاومت کمی دارند و به صورت فرسایش یافته در زیر آهک‌های لار دیده می‌شوند به طوری که در محل کنتاکت، اختلاف فرسایش باعث شده که آهک‌های لار به صورت معلق در آیند. علاوه بر عامل فرسایش، حضور دو گسل موازی با روند ارتفاعات، یکی در مرز سازند لار با دلیچای و شمشک و یکی داخل سازند لار باعث به وجود آمدن پرتگاه‌هایی به ارتفاع ۳ تا ۴ متر شده است. در شکل ۳-۱ و ۳-۲ نمایی از دیواره‌های پر شیب و پرتگاه‌ها در محدوده مطالعاتی دیده می‌شود.

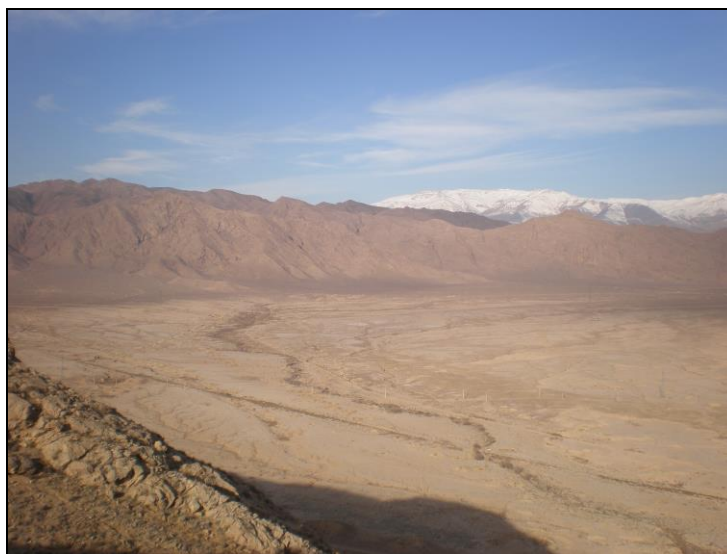


شکل ۳-۱: نمایی از پرتگاهی که در اثر عملکرد گسلی که موازی با روند ارتفاعات از داخل سازند لار عبور نموده، به وجود آمده است.



شکل ۳-۲: دیواره‌های پر شیب سازند لار

در شمال منطقه مورد مطالعه دشت مسطح و پستی قرار دارد که متشکل از نهشته‌های کواترنری شامل تراس‌های قدیمی، مارن‌های ماسه‌ای و مخروط افکنه‌های آبرفتی است که به صحرای جلالی موسوم می‌باشد. شکل ۳-۳ دشت جلالی را که در شمال ارتفاعات شمال شهر شاهرود واقع شده است را نشان می‌دهد.



شکل ۳-۳: نمایی از دشت جلالی در شمال ارتفاعات مورد مطالعه

در دامنه جنوبی ارتفاعات منطقه، شهر شاهرود بر روی نهشته‌ها کواترنری بنا شده است (شکل ۴-۳).



شکل ۴-۳: شهر شاهرود در دامنه جنوبی ارتفاعات مورد مطالعه

سازند لار و دلیچای در محل به شدت تکتونیزه شده و دارای درز و شکاف‌های فراوانی هستند. هوازدگی ناشی از اختلاف دمای شبانه روزی و وجود تعداد زیاد روزهای یخبندان در طول سال و فرآیند ذوب و انجماد آب در درز و شکاف‌ها منجر به عمیق‌تر شدن و گسترش سیستم درزه‌ها شده است. عوامل ذکر شده باعث شده تا پرتگاه‌های موجود استعداد بالایی برای ریزش قطعات سنگی داشته باشند. به علاوه عامل تفاوت فرسایش در واحدهای مختلف سنگی نیز موجب ناپایداری قطعات سنگی شده است. در حال حاضر دامنه‌ها (به خصوص در بخش‌های پایین‌تر پوشیده از قطعات سنگی در ابعاد بسیار متنوع از چند سانتی متر مکعب تا چند متر مکعب است. شکل ۳-۵ نمایی از واریزها را

در محل نشان می‌دهد. در برخی نقاط نیز قطعاتی بسیار بزرگ به ابعاد چند ده متر مکعب دیده می‌شود.



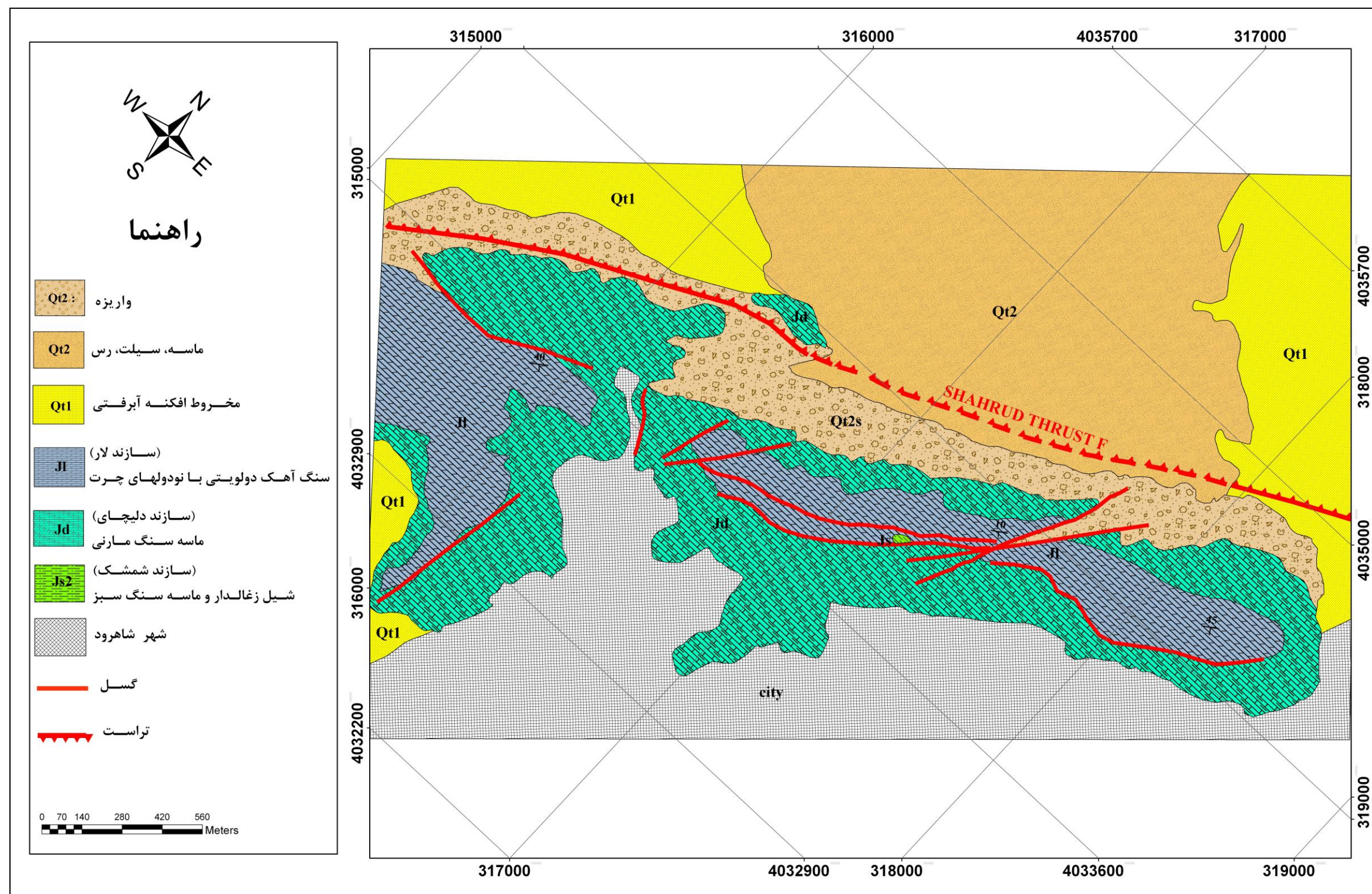
شکل ۳-۵: واریزهای موجود بر روی دامنه مشرف بر مناطق مسکونی

۳-۲-۱- چینه شناسی منطقه مطالعاتی

واحدهای موجود در منطقه شامل سازندهای زیر است.

الف) سازند شمشک

توالی‌های این سازند در ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ شاهرود بر اساس تنوع رخساره‌ای به چهار واحد تقسیم شده که شامل واحد Jm، واحد Js1، واحد Js2 و واحد Js3 و دارای ضخامت تقریبی ۱۱۰۰ متر هستند به علاوه چین خوردگی‌های متعددی را نیز متحمل شده‌اند. این تناوب که اساساً از ماسه سنگ‌های ارغوانی تیره و شیل‌های سبز، ارغوانی زغال دار تشکیل شده به علت داشتن لایه‌های شیلی، به صورت نواحی کم ارتفاع و پست در منطقه نمایان است. شروع سازند شمشک را بر اساس فسیل‌های گیاهی مطالعه شده در آن به زمان تریاس بالایی (نورین-ریتین) نسبت داده‌اند که در برخی نقاط سن این سازند تا ژوراسیک میانی (باژوسین) گزارش شده است (وزیری و همکاران، ۱۳۸۰). در محدوده منطقه مورد مطالعه در مقیاس ۱/۱۰۰۰۰ این سازند از نوع واحد Js2 می‌باشد.



شکل ۳-۶: نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰ منطقه مورد مطالعه

– واحد Js2

واحد فوق دارای تن سیاه رنگ در بین توالی‌های سازند شمشک است و از تناوب شیل زغال‌دار سیاه نازک لایه و ماسه سنگ‌های سبز نازک تا متوسط لایه تشکیل شده است. در شکل ۳-۷ تصویری از رخنمون سازند شمشک در منطقه مورد مطالعه نشان داده شده است.



شکل ۳-۷: رخنمون سازند شمشک در منطقه مورد مطالعه که متعلق به واحد Js2 است.

ب) سازند دلیچای

نام این سازند از رودخانه دلیچای گرفته شده است. ضخامت آن در مقطع تیپ ۱۰۷ متر است و شامل آهک مارنی تا ماسه‌ای نازک لایه به رنگ سبز خاکستری است که در آن گاهی شیل مارنی به صورت بین لایه‌ای دیده می‌شود. در بخش قاعده‌ای آن الیت‌های آهکی با قلوه‌های لیمونیتی و گاهی ترک‌های گلی را می‌توان ملاحظه کرد (درویش زاده، ۱۳۷۰).

توالی‌های سازند دلیچای در ناحیه مورد مطالعه از ویژگی‌های خاصی برخوردار است و از آنجا که اساساً از تناوب‌های مارنی تشکیل شده است دارای رخنمون‌های کم ارتفاع، پست و فرسایش پذیر می‌باشد. مطالعات محیط رسوبی نشان می‌دهد که سازند دلیچای با یک رخساره ساحلی شروع شده و عمدتاً

رخساره‌های آن مربوط به ناحیه نیمه عمیق دریا (Continental slope) است. گیاهی یزدی (۱۳۷۸) معتقد است که رخساره‌های سازند دلیچای عمدتاً مربوط به بخش‌های عمیق دریایی (Openmarine facies) می‌باشد. سن این سازند بر اساس آمونیت‌های مطالعه شده از آن ژوراسیک میانی (باژوسین بالایی - کالوین) تعیین گردیده است (Seyed Emami and Alavi Naini, 1990).

در قسمت‌های بالایی ندول‌های چرت به طور پراکنده و اندک دیده می‌شود. توالی‌های سازند دلیچای در منطقه مورد مطالعه به واسطه یک ناپیوستگی فرسایشی موازی (Disconformity) بر روی تناوب‌های سازند شمشک قرار داشته و در مرز بالایی خود به طور هم شیب و تدریجی توسط سنگ آهک‌های ضخیم لایه سازند لار پوشیده می‌شود. ایجاد ناپیوستگی فوق ناشی از عملکرد رویداد کوهزایی سیمین میانی (Seyed Emami and Alavi Naini, 1990) است که منجر به ایستایی رسوبی و دوره فرسایشی روشنی در زمان ژوراسیک میانی (باژوسین میانی) شده است (وزیری و همکاران، ۱۳۸۰).

ج) سازند لار

وجه تسمیه آهک لار از دره لار در البرز مرکزی (در دامنه شمالی کوه کلوم بستک) گرفته شده است. از لحاظ لیتولوژی، شامل آهک‌های نازک لایه میکریتی تا توده‌ای، ولی متراکم با رنگ خاکستری روشن است و حاوی قلوها (نودول) و یا لایه‌های چرتی به رنگ سفید تا بنفش کم رنگ است. ضخامت آن در مقطع تیپ بین ۲۵۰ تا ۳۵۰ متر گزارش شده است. این سازند به صورت هم شیب و تدریجی بر روی سازند دلیچای قرار گرفته است. حد بالای آن با یک دگرشیبی زاویه‌دار و سطح فرسایش قابل توجه، زیر آهک‌های اربتولین‌دار سازند تیزکوه یا آهک‌های کرتاسه فوقانی و حتی ترسیر قرار می‌گیرد (درویش زاده، ۱۳۷۰).

توالی‌های سازند لار در ناحیه مورد مطالعه از سنگ آهک‌های خاکستری روشن حاوی تعداد کمی آمونیت تشکیل شده است. این سنگ آهک‌ها ابتدا ضخیم لایه بوده که تدریجاً به سنگ آهک‌های توده‌ای و دیواره

ساز تبدیل می‌شوند. این سنگ‌ها در قسمت‌های فوقانی خود دارای ندول‌های چرت فراوان هستند. البته تاکنون از این چرت‌ها به عنوان یکی از اختصاصات بارز لار یاد شده است و شروع تناوب‌های این سازند را با ظهور یک افق چرتی معرفی کرده‌اند. اما مطالعات جدید شروع سازند لار را با شروع سنگ آهک‌های ضخیم لایه‌ای می‌دانند که فاقد تناوب‌های مارنی در لا به لای خود هستند (وزیری و همکاران، ۱۳۸۰). مطالعه محیط رسوبی سازند لار نشان می‌دهد که سازند لار در محیط سدی، لاگونی و پهنه جزر و مدی تشکیل شده و یک رخساره کم عمق دریا است. با بررسی تغییرات عمودی رخساره‌های کم عمق سازند دلیچای و لار می‌توان نتیجه گرفت که از زمان ژوراسیک بالایی پسروی دریا موجب شده تا رخساره‌های کم عمق سازند لار بر روی رخساره‌های عمیق سازند دلیچای راسب شوند (گیاهی یزدی، ۱۳۷۸). در آهک لار، فسیل‌های زیادی یافت می‌شود از جمله آنها آمونیت‌های ایدوسراس، آتاکسیوسراس، و انواع مختلف جنس پریسفنکس است که در مجموع سن قسمتی از آهک‌های لار را به اکسفوردین-کیمریجین (ژوراسیک فوقانی) تعیین می‌کند، ولی در مورد حد زیرین و فوقانی آن مسائل حل نشده‌ای وجود دارد. آهک لار با بخش بالایی سازند سورمه در زاگرس هم ارز است (درویش زاده، ۱۳۷۰). اما محققین دیگری معتقد است که سن سازند لار بر اساس آمونیت‌های مطالعه شده از آن ژوراسیک میانی (کالوین بالایی)-ژوراسیک بالایی می‌باشد (Seyed Emami and Alavi Naini, 1990).

د) رسوبات کواترنری

- واحد Qt₁:

این واحد شامل پادگان‌های آبرفتی قدیمی و مارن‌های ماسه‌ای است که در قسمت بالا دست رودخانه‌ها و یا در کنار دره‌ها تشکیل شده‌اند. بخش قابل توجه از نیمه جنوبی منطقه مورد مطالعه را این نوع رسوبات در بر گرفته است.

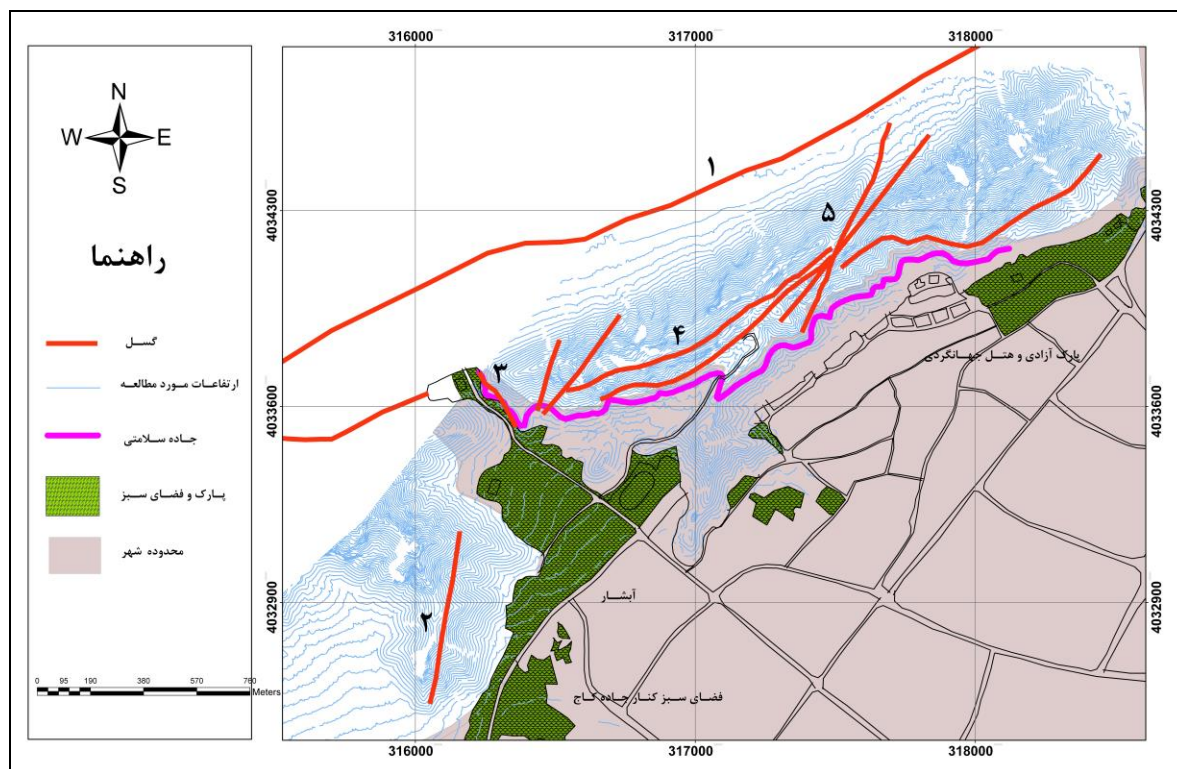
- واحد Qt2

این واحد شامل پادگانه‌های آبرفتی جوان و رسوبات آبرفتی است.

۳-۲-۲- وضعیت ساختاری

منطقه مورد مطالعه متعلق به ایالت زمین ساختی البرز شرقی است که در طی ادوار زمین شناسی متحمل کوهزایی، چین خوردگی و گسلش‌های فراوان بوده است. لذا منطقه مورد مطالعه به شدت تکتونیزه و دارای گسل‌های زیادی است. در شکل ۳-۸ مهمترین گسل‌های منطقه شماره گذاری شده است که در زیر به طور مختصر به خصوصیات آنها اشاره می‌شود.

تراست شاهرود که در شکل ۳-۸ با شماره ۱ نشان داده شده گسل بسیار مهم منطقه است و دارای امتداد شمال شرقی- جنوب غربی است. جهت شیب آن به سمت شمال می‌باشد و جهت حرکت آن از شمال به جنوب بوده است. این گسل در شمال ارتفاعات مورد مطالعه در حد فاصل سازند دلیچای و نهشته‌های کواترنری قرار دارد. گسل شماره ۲ یک گسل عادی است و شیب آن ۵۰ درجه به سمت غرب (جهت شیب ۲۷۰ درجه) است. گسل شماره ۳ با امتدادی معادل ۳۰۰ درجه دارای شیبی کاملاً عمودی است که دقیقاً در حاشیه جاده سلامتی واقع شده است. گسل شماره ۴ که از داخل سازند لار عبور می‌کند با امتداد ۲۳۰ درجه، شیبی تقریباً عمودی دارد و باعث ایجاد پرتگاه‌هایی شده که مستعد ریزش سنگی است. گسل شماره ۵ در مرز سازند لار و دلیچای واقع شده است. این گسل دارای امتدادی موازی با گسل شماره ۴ می‌باشد و شیبی معادل ۴۵ درجه دارد. جهت شیب این گسل ۳۴۰ درجه است. گسل شماره ۵، گسلی امتداد لغز و راست بر است که با امتدادی در حدود ۲۰ درجه (تقریباً شمالی- جنوبی)، گسل ۴ را قطع کرده و شیبی کاملاً عمودی دارد. در محل تقاطع آن با گسل شماره ۴ دیواره‌های کاملاً عمودی ایجاد شده و سازند شمشک نیز در همین محل رخنمون پیدا کرده است.



شکل ۳-۸: گسل‌های مهم منطقه

۳-۲-۳- لرزه خیزی

برای پیش بینی خطر وقوع گسیختگی و چگونگی فرآیند ریزش سنگی در بحرانی‌ترین شرایط باید اثر نیروی ناشی از زلزله را در نظر گرفت. جهت بررسی و تحلیل پایداری دامنه‌ها و همچنین شبیه سازی مکانیسم ریزش سنگی در حالت دینامیک، شدت بزرگترین زلزله منطقه محتمل در منطقه محاسبه شده است. شدت زلزله با طول گسل‌ها رابطه مستقیم دارد لذا طول بزرگترین گسل منطقه از نقشه‌های ۱/۱۰۰۰۰۰ شاهرود، بسطام و خوش ییلاق معادل ۶۰ کیلومتر تعیین شد. با استفاده از رابطه آمبرسیز و ملویل (۱۹۸۲)، بزرگترین زلزله محتمل در منطقه معادل ۶/۷ ریشتر برآورد گردید.

$$M_s = 4.629 + 1.429 \log L$$

رابطه (۳-۱) آمبرسیز و ملویل (۱۹۸۲)

که L برابر با نصف طول گسل بر حسب کیلومتر است.

برای تحلیل پایداری دامنه‌ها در حالت دینامیک به شتاب افقی زلزله نیاز است. در انجام این تحلیل با استفاده از نرم افزار Swedge شتاب افقی زلزله طبق آیین نامه زلزله ۲۸۰۰، معادل $g/0.35$ در نظر گرفته شد. برای شبیه سازی مکانیسم ریزش در نرم افزار Rocfall نیز لازم است سرعت اولیه ریزش قطعات در نظر گرفته شود، لذا با استفاده از رابطه ۳-۴ (جوینر و بور^۱، ۱۹۸۸) مولفه افقی سرعت زلزله (PHV) برای زلزله‌ای به بزرگی $6/7$ ریشتر، $1/21$ متر در ثانیه تعیین شد.

$$\log PHV(cm/sec) = 2.17 + 0.49(M - 6)^2 - \log R - 0.0026 + 0.17 \quad \text{رابطه (۳-۴)}$$

۳-۳- مطالعات درزه نگاری

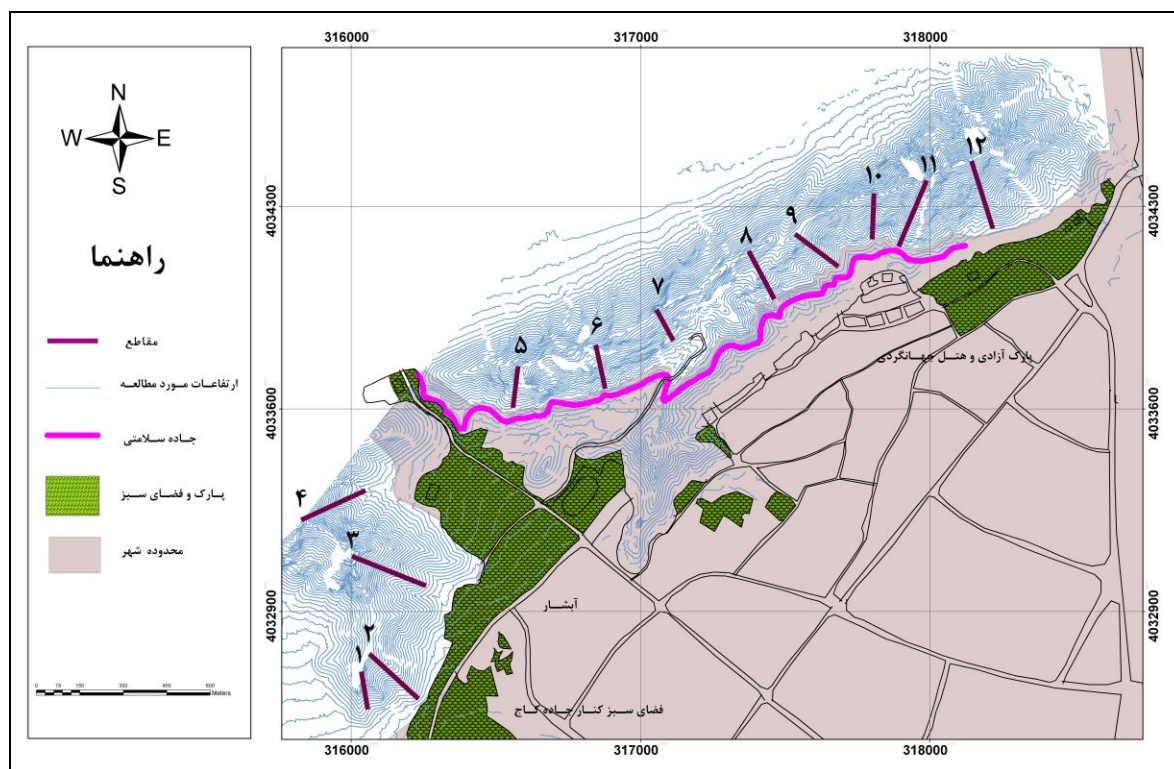
۳-۳-۱- مقدمه

جهت بررسی وضعیت پایداری دامنه در منطقه مورد مطالعه با توجه به نقشه توپوگرافی و بازدیدهای صحرایی، مناطق بحرانی شناسایی شدند. وجود نقاط منشاء ریزش سنگی، اصلی‌ترین معیار برای بحرانی بودن شرایط در نظر گرفته شد. از ویژگی‌های چنین مناطقی، شیب تند و گاهی معلق یا شیب منفی، حضور قطعات ریزشی بسیار بزرگ در پای دامنه یا بر روی دامنه، وجود مناطق مسکونی در فاصله نزدیک از دامنه و ... می‌باشد. با این اوصاف تعداد ۱۲ مقطع برای انجام مطالعات صحرایی و درزه نگاری در نظر گرفته شد. در شکل ۳-۹ موقعیت مقاطع انتخابی در کوه‌های منطقه و نسبت به شهر شاهرود نشان داده شده است.

¹ Goyner and Boore

۳-۲- اختصاصات درزه‌ها

در هر مقطع خصوصیات ناپیوستگی‌ها شامل تعداد، شیب، امتداد، فاصله داری، بازشدگی، پرشدگی، زبری و مقاومت سطح درزه در بازدیدهای مکرر صحرایی برداشت شد. این خصوصیات حداقل برای ۵۰ درزه برداشت شده و با استفاده از نرم افزار Dips دسته درزه‌های اصلی مشخص گردیده است. به منظور تخمین



شکل ۳-۹: موقعیت مقاطع برداشت درزه نگاری در ارتفاعات منطقه مورد مطالعه

حجم قطعات سنگی، مقدار تنش عمودی وارد بر سطوح درزه‌ها و نهایتاً تحلیل پایداری قطعات سنگی، میزان فاصله داری درزه‌ها اندازه گیری شده است. در شرایطی که جهت خط برداشت عمود بر سطح و امتداد درزه‌ها نبوده تصحیحات لازم صورت پذیرفته است. در جایی که درزه‌ها دارای بازشدگی بودند نوع مواد پرکننده نیز ثبت شدند. مقاومت فشاری سطح درزه‌ها با استفاده از چکش اشمیت اندازه‌گیری شده و بر اساس زاویه آزمایش و نیز دانسیته مصالح، مقاومت فشاری تک محوری سطح درزه‌ها با استفاده از نمودار دیر و میلر (۱۹۶۶) برآورد شده است.

از پروفیل‌های چوبی و بارتون (۱۹۷۷) برای برآورد شاخص JRC سطح درزه‌ها استفاده شده و مقادیر حداقل و حداکثر و میانگین JRC هر دسته تعیین شده است. در جداول ۱-۳ تا ۱۲-۳ خصوصیات مقاومتی دسته درزه‌های اصلی، تمام مقاطع آمده است. مقدار ϕ_b برای سنگ‌های منطقه بر اساس نظر وینز و لیلی (۲۰۰۳)، ۳۱ درجه در نظر گرفته شد. مقدار ϕ_p سطح درزه‌ها با توجه به مقدار ϕ_b و JRC از رابطه زیر برای تمامی دسته درزه‌ها در هر مقطع برآورد شده است:

$$\phi_p = JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\delta_n} \right) + \phi_r \quad \text{رابطه (۳-۵)}$$

جدول ۱-۳-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۱

دسته درزه	میانگین شیب	جهت شیب	فاصله داری به سانتی متر			پرش‌دگی	حداکثر بازشدگی به سانتی متر
			ماکزیمم	میانگین	مینیمم		
۱	۷۶	۲۶۶	۱۳۸	۲۶	۲٫۸	کلسیت، سیلت	۱۰۰
۲	۶۲	۳۴۴	۳۱۸	۴۳	۴/۲	ندارد	ندارد
۳	۷۷	۴۱	۱۹۰	۶۶/۷	۱۰	سیلت	۰/۳
۴	۶۳	۱۲۳	۲۱۶	۴۲	۳/۴	سیلت	۱۰
۵	۸۳	۲۰۸	۱۹۰	۶۶/۷	۱۰	سیلت	۱

جدول ۱-۳-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۱

دسته درزه	ϕ_b	ضریب زبری (JRC)			مقاومت فشاری دیواره درزه (JCS)			ϕ_p (میانگین)
		ماکزیمم	میانگین	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	مینیمم	
۱	۳۱	۱۱	۸/۳	۶	۵۹۰	۴۸۱	۳۳۵	۵۱/۶
۲	۳۱	۱۰	۷/۱۶	۴	۵۹۵	۴۱۳/۷۵	۲۰۵	۵۳/۳۵
۳	۳۱	۹	۷	۵	۵۹۰	۴۸۱	۳۳۵	۵۵/۲۹
۴	۳۱	۹	۷/۴	۵	۶۰۰	۵۴۹	۴۷۵	۵۶/۳
۵	۳۱	۹	۵/۸	۴	۶۰۰	۵۷۲/۵	۵۱۵	۴۷/۲۵

جدول ۳-۲-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۲

حداکثر بازشدگی به سانتی متر	پرشدگی	فاصله داری به سانتی متر			جهت شیب	میانگین شیب	دسته درزه
		مینیمم	میانگین	ماکزیمم			
۶	کلسیت	۴,۸	۳۸/۵	۲۰۸	۱۳۴	۶۹	۱
۰/۵	ندارد	۲,۳	۲۳/۵	۲۴۹	۱۹۶	۷۹	۲
۲	کلسیت	۲۰	۱۱۲	۳۱۰	۳۸	۷۵	۳
۳	ندارد	۴/۵	۴۸/۲	۳۶۰	۳۰۶	۶۶	۴

جدول ۳-۲-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۲

ϕ_p (میانگین)	مقاومت فشاری دیواره درزه (JCS)			ضریب زبری (JRC)			ϕ_b	دسته درزه
	مینیمم	میانگین	ماکزیمم	مینیمم	میانگین	ماکزیمم		
۵۶/۵	۳۵۰	۵۱۰/۷	۶۰۰	۷	۷/۵	۹	۳۱	۱
۵۱/۶۷	۴۵۰	۴۸۳/۳۳	۵۴۰	۵	۵/۸	۹	۳۱	۲
۵۶/۶۴	۲۶۰	۳۹۳	۵۱۰	۶	۷/۷	۹	۳۱	۳
۵۵/۵	۲۴۰	۳۹۶	۵۲۰	۶	۷	۸	۳۱	۴

جدول ۳-۳-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۳

حداکثر بازشدگی به سانتی متر	پرشدگی	فاصله داری به سانتی متر			جهت شیب	میانگین شیب	دسته درزه
		مینیمم	میانگین	ماکزیمم			
ندارد	ندارد	۳,۶	۱۲/۸	۱۱۵	۳۴۱	۷۷	۱
۱۰	سیلت	۱,۳	۱۷	۸۷	۲۳۴	۶۰	۲
۱۵	سیلت	۱/۹	۱۱/۸	۴۷	۱۴۰	۵۶	۳
ندارد	ندارد	۱۰	۴۴/۳	۱۴۰	۴۰	۷۷	۴

جدول ۳-۳-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۳

ϕ_p (میانگین)	مقاومت فشاری دیواره درزه (JCS)			ضریب زبری (JRC)			ϕ_b	دسته درزه
	مینیمم	میانگین	ماکزیمم	مینیمم	میانگین	ماکزیمم		
۵۴/۴	۴۱۵	۴۸۳/۳	۵۴۰	۴	۶/۵۳	۹	۳۱	۱
۴۸/۶	۱۷۵	۴۰۳/۳۳	۵۹۰	۳	۵/۳۵	۸	۳۱	۲
۴۹	۲۸۰	۴۳۷/۲۵	۵۹۵	۳	۶	۸	۳۱	۳
۵۱/۳۸	۲۶۰	۳۹۳	۵۱۰	۳	۵/۸	۸	۳۱	۴

جدول ۳-۴-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۴

حداکثر بازشدگی به سانتی متر	پرشدگی	فاصله داری به سانتی متر			جهت شیب	میانگین شیب	دسته درزه
		مینیمم	میانگین	ماکزیمم			
۵	سیلت	۵/۳	۴۴	۳۶۰	۵۹	۷۷	۱
۱	ندارد	۷/۵	۶۱	۵۰۳	۲۵۶	۷۴/۵	۲
۶	ندارد	۱۰	۹۲	۶۷۳	۲۱۹	۴۴	۳
ندارد	ندارد	۴	۷۴	۳۵۵	۱۹۷	۷۳	۴
ندارد	ندارد	۲/۵	۴۶	۲۲۵	۷	۸۰	۵
۵	ندارد	۴۰	۱۱۴	۲۸۰	۱۴۱	۶۳	۶
۲	سیلت	۴۰	۱۱۴	۲۸۰	۳۱۲/۵	۶۷	۷

جدول ۳-۴-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۴

ϕ_p (میانگین)	مقاومت فشاری دیواره درزه (JCS)			ضریب زبری (JRC)			ϕ_b	دسته درزه
	مینیمم	میانگین	ماکزیمم	مینیمم	میانگین	ماکزیمم		
۵۰/۵۹	۱۳۰	۴۵۲/۸۵	۶۰۰	۳	۵/۴۵	۷	۳۱	۱
۴۹/۹۸	۲۰۰	۴۶۸/۶۳	۶۰۰	۳	۵/۷۵	۹	۳۱	۲
۴۵/۹۱	۳۲۰	۴۸۱	۶۰۰	۲	۵/۱۶	۸	۳۱	۳
۴۸/۱۲	۳۲۰	۴۸۱	۶۰۰	۴	۵	۸	۳۱	۴
۵۲/۹۲	۲۰۵	۴۱۳/۷۵	۵۹۵	۳	۵/۶۲	۹	۳۱	۵
۴۶/۴۲	۲۰۰	۴۷۳/۶۳	۶۰۰	۳	۴/۶	۷	۳۱	۶
۴۶/۶۸	۲۱۰	۴۷۰	۵۹۰	۳	۴/۳	۹	۳۱	۷

جدول ۳-۵-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۵

حداکثر بازشدگی به سانتی متر	پرشدگی	فاصله داری به سانتی متر			جهت شیب	میانگین شیب	دسته درزه
		مینیمم	میانگین	ماکزیمم			
۱۰	سیلت	۰/۸	۳/۳	۱۸/۴	۲۵۵	۶۵	۱
۲۰	سیلت	۹	۴۰	۷۷	۱۸۴	۷۶	۲
۲۰	سیلت	۱۵	۴۹	۱۴۰	۱۰۵	۶۵/۵	۳
۰/۳	کلسیت	۳/۵	۱۴	۷۸	۶۵	۳۵/۵	۴
۵	سیلت	۱/۵	۱۱	۷۰	۳۲۷	۶۹/۵	۵

جدول ۳-۵-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۵

ϕ_p (میانگین)	مقاومت فشاری دیواره درزه (JCS)			ضریب زبری (JRC)			ϕ_b	دسته درزه
	مینیمم	میانگین	ماکزیمم	مینیمم	میانگین	ماکزیمم		
۴۷/۸	۳۳۵	۴۸۱	۵۹۰	۴	۵	۸	۳۱	۱
۵۴/۸	۵۱۵	۵۷۲/۵	۶۰۰	۴	۷	۸	۳۱	۲
۵۱/۲	۴۷۵	۵۳۶/۲۵	۶۰۰	۲	۴/۹	۸	۳۱	۳
۴۳/۱۱	۲۹۵	۴۲۶	۵۷۵	۴	۴/۳	۶	۳۱	۴
۵۳/۳۷	۲۰۵	۴۱۳/۷۵	۵۹۵	۳	۶/۸۷	۱۰	۳۱	۵

جدول ۳-۶-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۶

حداکثر بازشدگی به سانتی متر	پرشدگی	فاصله داری به سانتی متر			جهت شیب	میانگین شیب	دسته درزه
		مینیمم	میانگین	ماکزیمم			
۱۰	سیلت	۳/۷	۳۲	۱۸۰	۱۹۵	۷۷	۱
ندارد	ندارد	۳/۵	۵/۲۳	۱۲۴	۲۷۸	۶۶	۲
۱	سیلت	۱۱/۵	۸۳	۵۲۹	۳۴۱	۷۸	۳
۲۰	سیلت	۲۰	۱۳۲	۲۸۰	۹۸	۷۷/۵	۴
۱۰	کلسیت	۵/۵	۴۷	۲۶۵	۷۰/۵	۷۱/۵	۵

جدول ۳-۶-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۶

ϕ_p (میانگین)	مقاومت فشاری دیواره درزه (JCS)			ضریب زبری (JRC)			ϕ_b	دسته درزه
	مینیمم	میانگین	ماکزیمم	مینیمم	میانگین	ماکزیمم		
۵۵	۳۲۰	۴۸۱	۶۰۰	۵	۷	۹	۳۱	۱
۵۳/۴	۲۰۰	۴۷۴	۶۰۰	۴	۶/۴۷	۹	۳۱	۲
۵۴/۸	۲۱۰	۴۶۰	۶۰۰	۵	۷	۹	۳۱	۳
۵۴/۳	۱۳۰	۴۵۲	۶۰۰	۳	۶/۹	۱۰	۳۱	۴
۵۲	۴۴۵	۵۱۸	۶۰۰	۳	۶/۲	۸	۳۱	۵

جدول ۳-۷-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۷

حداکثر بازشدگی به سانتی متر	پرشدگی	فاصله داری به سانتی متر			جهت شیب	میانگین شیب	دسته درزه
		مینیمم	میانگین	ماکزیمم			
ندارد	ندارد	۲۷	۱۱۸	۳۵۵	۳۲۹	۷	۱
۲	سیلت	۲۰	۶۴	۱۹۰	۳۳۶	۷۹/۵	۲
ندارد	ندارد	۲	۶/۲	۴۰/۷	۱۰۹	۷۷	۳
۰/۵	سیلت	۰/۸	۴	۱۵	۴۶	۸۰	۴
۲	سیلت	۶/۸	۳۱	۱۰۲	۳۳۸	۷۳	۵

جدول ۳-۷-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۷

ϕ_p (میانگین)	مقاومت فشاری دیواره درزه (JCS)			ضریب زبری (JRC)			ϕ_b	دسته درزه
	مینیمم	میانگین	ماکزیمم	مینیمم	میانگین	ماکزیمم		
۴۸/۹	۱۳۰	۳۳۰	۴۲۵	۶	۶/۸	۸	۳۱	۱
۵۶	۱۲۰	۲۵۹/۵	۳۸۰	۴	۶/۳	۸	۳۱	۲
۴۶	۱۲۰	۲۶۰	۳۸۵	۴	۶/۴	۸	۳۱	۳
۵۸	۱۴۰	۳۰۷	۵۵۰	۵	۸/۲	۱۰	۳۱	۴
۵۳	۱۴۰	۲۵۸	۵۱۵	۴	۶/۹	۸	۳۱	۵

جدول ۳-۸-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۸

دسته درزه	میانگین شیب	جهت شیب	فاصله داری به سانتی متر			پرشدگی	حداکثر بازشدگی به سانتی متر
			ماکزیمم	میانگین	مینیمم		
۱	۷۷	۵۶	۳۸۰	۱۴۵	۲۰	سیلت	۱۰
۲	۲۵	۳۲۳	۱۵۰	۱۰۵	۴۷	سیلت	۵
۳	۶۹	۲۰۲	۱۷/۶	۳۵	۳/۲۵	سیلت	۱۵
۴	۷۲	۱۴۹	۵۱	۳۱	۱۲/۷	سیلت	۲۰
۵	۶۹	۱۰۹	۵۴	۱۵/۳	۱/۶	سیلت	۱
۶	۷۶	۳۳۲	۱۳۲	۸۱	۳۳	کلسیت	۱۰

جدول ۳-۸-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۸

دسته درزه	ϕ_b	ضریب زبری (JRC)			مقاومت فشاری دیواره درزه (JCS)			ϕ_p (میانگین)
		ماکزیمم	میانگین	مینیمم	ماکزیمم	میانگین	مینیمم	
۱	۳۱	۱۲	۷	۳	۵۸۰	۴۴۳/۷۵	۳۰۰	۴۳/۶
۲	۳۱	۱۱	۷/۴	۵	۳۵۰	۳۳۷	۳۲۰	۴۴/۱
۳	۳۱	۹	۶/۳	۳	۵۷۰	۴۶۷	۳۸۵	۴۵/۳
۴	۳۱	۱۰	۵/۷	۲	۵۸۰	۳۹۱/۲۵	۲۵۰	۴۲/۶
۵	۳۱	۱۰	۵/۴۲	۴	۵۶۵	۳۹۶	۳۰۰	۴۱
۶	۳۱	۱۰	۵/۶	۲	۵۵۰	۴۳۴/۲	۱۸۰	۴۱

جدول ۳-۹-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۹

دسته درزه	میانگین شیب	جهت شیب	فاصله داری به سانتی متر			پرشدگی	حداکثر بازشدگی به سانتی متر
			ماکزیمم	میانگین	مینیمم		
۱	۵۷	۱۵۳	۱۴۸	۳۰	۴/۲	سیلت	۵
۲	۷۵	۵	۴۸۵	۶۶/۵	۱۲/۳	سیلت	۴
۳	۷۳	۱۱۳	۲۰۴	۲۹	۰/۷۴	سیلت	۵
۴	۷۳	۵۹	۱۷۰	۸۲	۲۰	سیلت	ندارد
۵	۶۶	۳۲۵	۴۸۱	۱۰۰	۱۳	سیلت	۵
۶	۷۳	۲۳۳	۱۷۰	۸۲	۲۰	ندارد	ندارد

جدول ۳-۹-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۹

ϕ_p (میانگین)	مقاومت فشاری دیواره درزه (JCS)			ضریب زبری (JRC)			ϕ_b	دسته درزه
	مینیمم	میانگین	ماکزیمم	مینیمم	میانگین	ماکزیمم		
۴۸/۵	۲۸۰	۴۳۷/۲۵	۵۹۵	۳	۵/۵	۸	۳۱	۱
۴۷/۸	۴۱۵	۴۸۳	۵۴۰	۳	۵	۸	۳۱	۲
۵۰/۴	۳۵۰	۴۹۶	۵۵۰	۴	۵/۵۷	۹	۳۱	۳
۴۹/۷	۲۶۰	۳۹۳	۵۱۰	۴	۵/۸	۹	۳۱	۴
۵۰/۹	۲۴۰	۳۹۶	۵۲۰	۵	۶/۴	۸	۳۱	۵
۵۱/۱۲	۱۷۵	۴۰۳	۵۹۰	۴	۶/۷	۹	۳۱	۶

جدول ۳-۱۰-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۱۰

حداکثر بازشدگی به سانتی متر	پرشدگی	فاصله داری به سانتی متر			جهت شیب	میانگین شیب	دسته درزه
		مینیمم	میانگین	ماکزیمم			
۰/۵	سیلت	۴	۲۱	۱۶۹	۴۲	۷۶	۱
۳	سیلت	۱	۸/۳	۴۱	۱۳۲	۵۶	۲
۷	سیلت	۲۰	۹۰	۲۵۰	۲۶۰	۷۸	۳
۳	ندارد	۴	۲۳	۱۸۸	۲۰۸	۸۷	۴
۵	رس	۹	۷۵	۴۰۰	۲۳۹	۶۰	۵

جدول ۳-۱۰-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۱۰

ϕ_p (میانگین)	مقاومت فشاری دیواره درزه (JCS)			ضریب زبری (JRC)			ϕ_b	دسته درزه
	مینیمم	میانگین	ماکزیمم	مینیمم	میانگین	ماکزیمم		
۵۰/۶	۲۹۵	۴۲۶	۵۷۵	۴	۵/۸۳	۸	۳۱	۱
۵۳/۸	۴۷۵	۵۳۶	۶۰۰	۵	۷/۲	۹	۳۱	۲
۵۷/۷	۳۳۵	۴۸۱	۵۹۰	۴	۶/۷۳	۸	۳۱	۳
۵۴/۹	۵۱۵	۵۴۵	۵۷۵	۴	۵/۷۵	۸	۳۱	۴
۵۳/۱	۲۰۵	۴۱۴	۵۹۵	۴	۶/۷۵	۹	۳۱	۵

جدول ۱۱-۳-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۱۱

حداکثر بازشدگی به سانتی متر	پرشدگی	فاصله داری به سانتی متر			جهت شیب	میانگین شیب	دسته درزه
		مینیمم	میانگین	ماکزیمم			
۲	رس	۳۰	۹۴	۱۸۰	۱۳۷	۴۴	۱
۱	رس	۱۶	۷۸	۴۰۶	۳۵۰	۶۶	۲
۱۰	رس	۱۶	۵۴۶	۱۲۷	۳۱	۸۱	۳
۲	رس	۷/۳	۴۷	۱۸۳	۲۴۲	۷۴	۴
۳	رس	۳۰	۹۴	۱۸۰	۳۰۲	۴۸	۵

جدول ۱۱-۳-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۱۱

ϕ_p (میانگین)	مقاومت فشاری دیواره درزه (JCS)			ضریب زبری (JRC)			ϕ_b	دسته درزه
	مینیمم	میانگین	ماکزیمم	مینیمم	میانگین	ماکزیمم		
۴۹/۹	۳۶۰	۵۳۴	۵۹۵	۴	۶/۳۳	۸	۳۱	۱
۵۲/۸	۳۹۵	۴۶۷	۵۶۰	۵	۷	۹	۳۱	۲
۵۶/۹	۵۴۰	۵۵۲	۵۶۵	۵	۷	۸	۳۱	۳
۵۴/۸	۱۸۰	۴۴۶	۵۹۰	۴	۶/۴۶	۸	۳۱	۴
۵۱/۷	۳۴۰	۴۷۰	۵۸۵	۶	۷/۲	۸	۳۱	۵

جدول ۱۲-۳-الف: خصوصیات درزه‌های اصلی مقطع شماره ۱۱

حداکثر بازشدگی به سانتی متر	پرشدگی	فاصله داری به سانتی متر			جهت شیب	میانگین شیب	دسته درزه
		مینیمم	میانگین	ماکزیمم			
ندارد	ندارد	۲,۸	۲۴	۱۰۵	۵۴	۱۳	۱
۴	سیلت	۹	۸۱	۳۳۶	۱۷۶	۸۲	۲
۱	سیلت	۲۰	۱۱۰	۳۲۰	۲۲۳	۶۵	۳
۱	سیلت	۱۵	۷۰	۴۲۲	۳۱۴	۷۶	۴
۱/۵	سیلت	۱۳	۶۳	۲۳۰	۱۵	۸۱	۵
۳	سیلت	۷	۳۱	۱۸۵	۱۰۶	۸۰	۶

جدول ۳-۱۲-ب: خصوصیات مقاومت برشی درزه‌های اصلی مقطع شماره ۱۲

φ_p (میانگین)	مقاومت فشاری دیواره درزه (JCS)			ضریب زبری (JRC)			φ_b	دسته درزه
	مینیمم	میانگین	ماکزیمم	مینیمم	میانگین	ماکزیمم		
۴۵/۵	۴۲۰	۵۱۰	۶۰۰	۵	۶/۸	۹	۳۱	۱
۴۳/۲	۳۲۰	۴۴۴	۵۴۰	۵	۵/۹	۹	۳۱	۲
۵۳/۲	۳۵۰	۴۵۷	۵۸۰	۴	۷	۸	۳۱	۳
۵۶/۸	۲۰۰	۴۷۳	۶۰۰	۴	۶/۷۲	۹	۳۱	۴
۵۴	۴۴۵	۵۰۲	۵۷۰	۴	۵/۵۸	۸	۳۱	۵
۵۸	۱۳۰	۴۲۸	۵۶۵	۴	۷/۲۸	۱۰	۳۱	۶

همان طور که مشاهده می‌کنید میزان شیب و ضریب زبری سطح درزه بر میزان زاویه اصطکاک محاسبه شده تاثیر بسیار زیادی می‌گذارد به طوری که با افزایش شیب درزه به علت کاهش در میزان تنش قائم ناشی از وزن قطعات، مقدار زاویه اصطکاک افزایش می‌یابد. با افزایش درجه زبری نیز زاویه اصطکاک به شدت افزایش می‌یابد.

فصل چهارم
تحلیل پایداری و
مکانیسم ریزش سنگی در
منطقه مورد مطالعه

۴-۱- مقدمه

با توجه به مطالعات درزه آماری که در فصل قبل مورد بررسی قرار گرفت، دسته درزه‌های متعدد در جهات مختلف توده سنگی را قطع نموده و قطعات سنگی با اشکال و ابعاد متفاوت را تشکیل داده‌اند. با توجه به بازدیدهای صحرایی در بعضی نقاط این قطعات بسیار ناپایدار به نظر می‌رسند و قطعاتی نیز در پای دامنه مشاهده شده است. از آنجایی که دامنه‌های سنگی منطقه مشرف بر مناطق تفریحی و مسکونی می‌باشند، تحلیل پایداری دامنه‌ها بسیار ضروری است. در این فصل ابتدا با استفاده از داده‌های به دست آمده از مطالعات درزه آماری، پایداری دامنه‌های سنگی به روش استریوگرافیک مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته و نوع ناپایداری‌های موجود نیز تعیین شده است. سپس در مقاطعی که ناپایداری از نوع گوه‌ای تشخیص داده شده، با استفاده از نرم افزار Swedge 4078 احتمال گسیختگی در شرایط استاتیک و دینامیک مورد بررسی قرار گرفته است. در بخش آخر پدیده ریزش سنگی در مقاطع مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار Rocfall 4.078 شبیه سازی شده است.

۴-۲- ارزیابی ناپایداری دامنه‌ای به روش استریوگرافیک

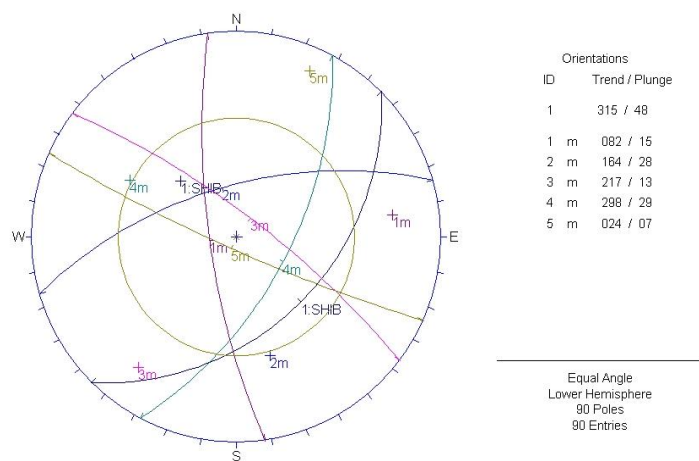
به منظور ارزیابی مقدماتی ناپایداری دامنه‌ای، از روش استریوگرافیک استفاده شده است. ابتدا شیب و امتداد دسته درزه‌های اصلی وارد نرم افزار Dips 5.103 شده و بر اساس آن دسته درزه‌ها تفکیک شده‌اند. سپس دایره اصطکاک مربوط به دسته درزه با زاویه اصطکاک کمتر، رسم گردیده است. در مواردی که شیب خط تقاطع دو دسته درزه بیش از زاویه اصطکاک باشد، استعداد وقوع ناپایداری گوه‌ای وجود دارد. وضعیت ناپایداری در مقاطع مورد بررسی در اشکال ۴-۱ تا ۴-۱۲ وجود دارد. جهت ارزیابی حجم قطعات، سطح مقطع و ارتفاع بلوک‌ها تعیین شده و حجم و وزن آنها برآورد شده است. در جدول ۴-۱ وضعیت انواع ناپایداری گوه‌ای و واژگونی در مقاطع آورده شده است.

جدول ۴-۱: ارزیابی وضعیت انواع ناپایداری‌های موجود در مقاطع به روش استریوگرافیک

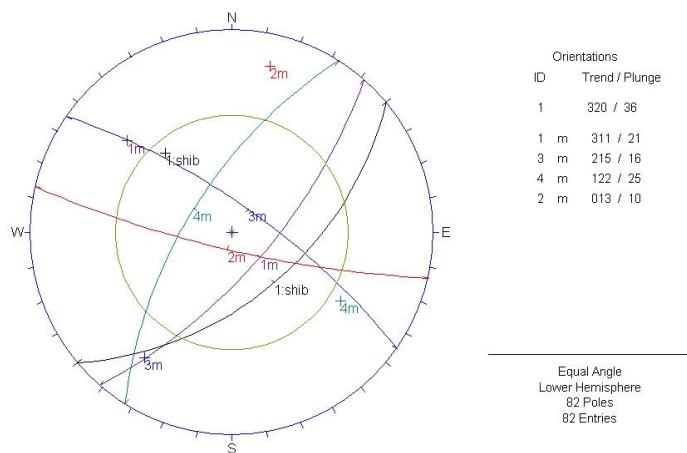
شماره مقطع	لغزش گوه‌ای	واژگونی
۱	۳ و ۵	-
۲	۲ و ۳	۴
۳	۳ و ۴	-
۴	-	۳
۵	۳ و ۴	-
۶	۱ و ۵	-
۷	-	-
۸	۱ و ۳	۱ و ۳
۹	-	-
۱۰	۱ و ۳	۵
۱۱	۱ و ۴	-
۱۲	-	۴ و ۵

اگر جهت شیب این دسته درزه با جهت شیب دامنه همسو باشد و میزان آن کمتر از زاویه شیب دامنه و بیش از زاویه اصطکاک سطح درزه باشد، استعداد ناپایداری از نوع لغزش صفحه‌ای وجود دارد. اما اگر جهت شیب این دسته درزه مخالف جهت شیب دامنه و میزان آن بیش از زاویه شیب دامنه باشد، استعداد ناپایداری از نوع واژگونی وجود خواهد داشت.

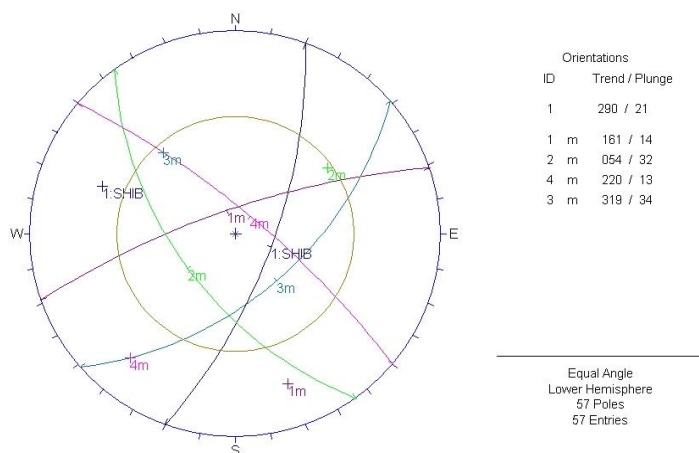
در مقاطع مورد بررسی با توجه به این که شیب لایه بندی بیشتر از شیب دامنه می‌باشد در حال حاضر پتانسیل لغزش صفحه‌ای وجود ندارد اما در صورت حفر ترانشه مصنوعی با شیب بیشتر از شیب درزه‌ها خطر لغزش صفحه‌ای نیز وجود نخواهد داشت.



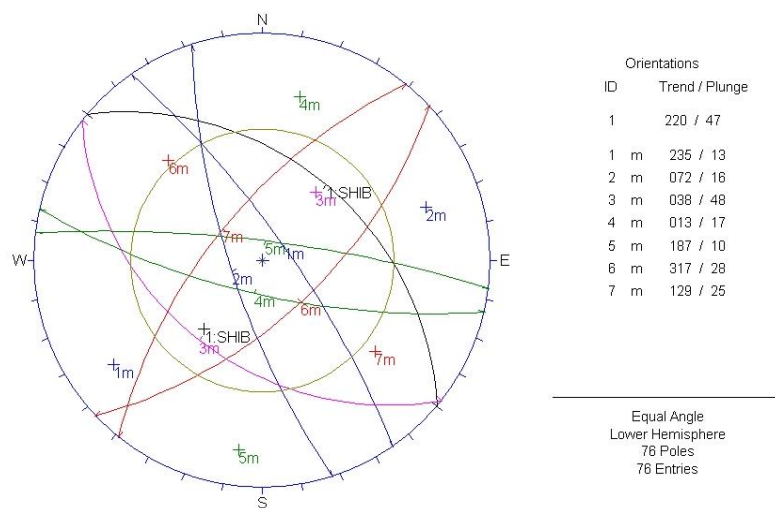
شکل ۴-۱: موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۱



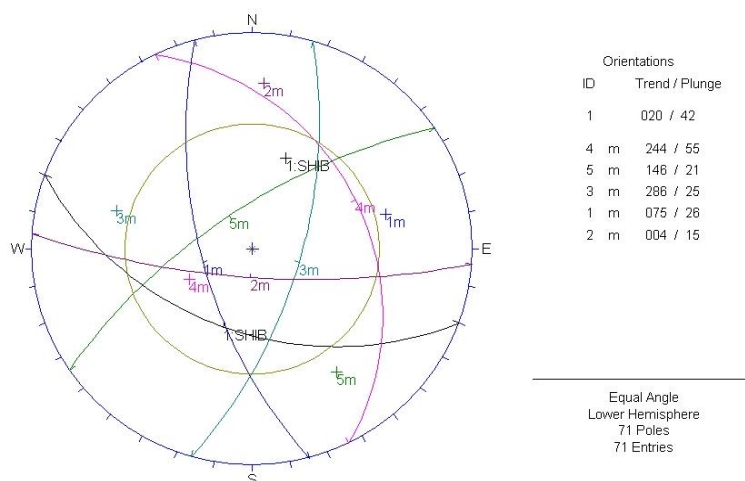
شکل ۴-۲: موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۲



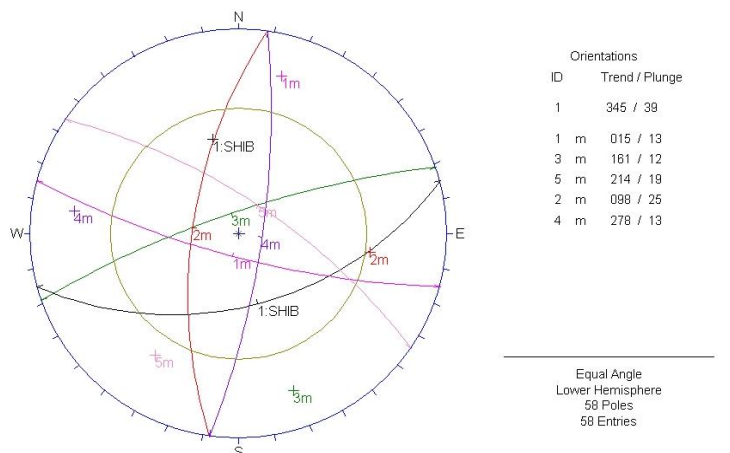
شکل ۴-۳: موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۳



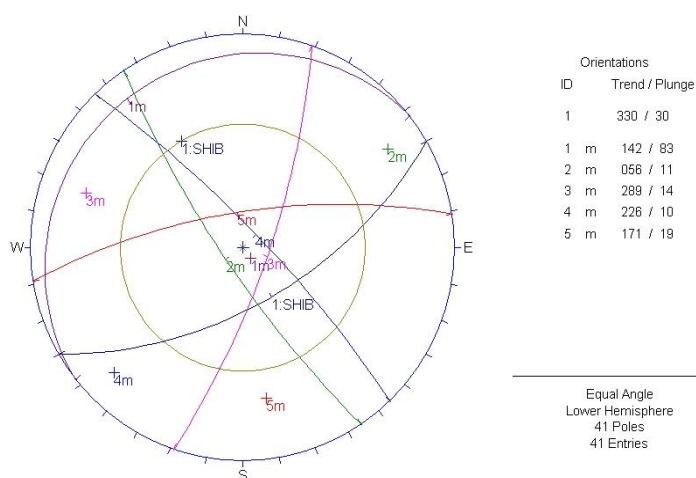
شکل ۴-۴: موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۴



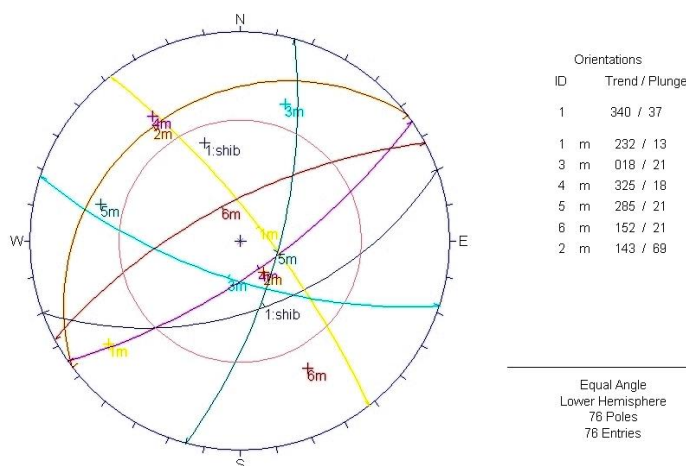
شکل ۴-۵: موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۵



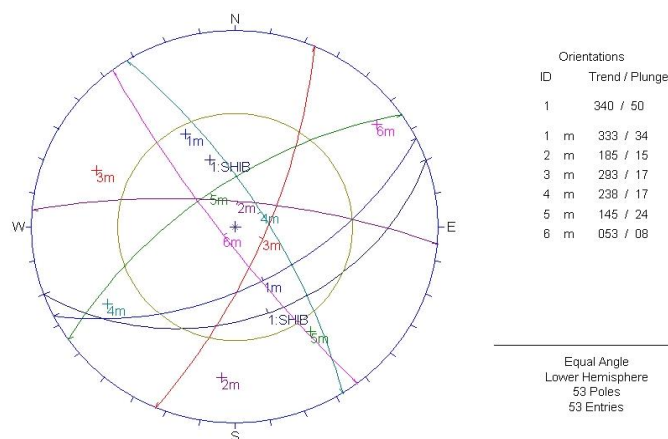
شکل ۴-۶: موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۶



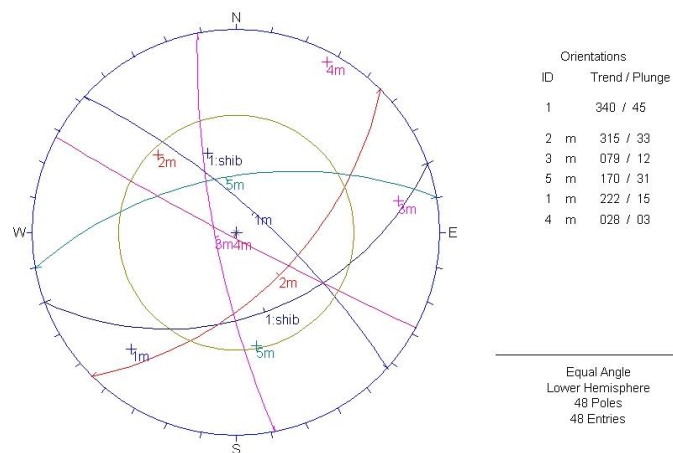
شکل ۴-۷: موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۷



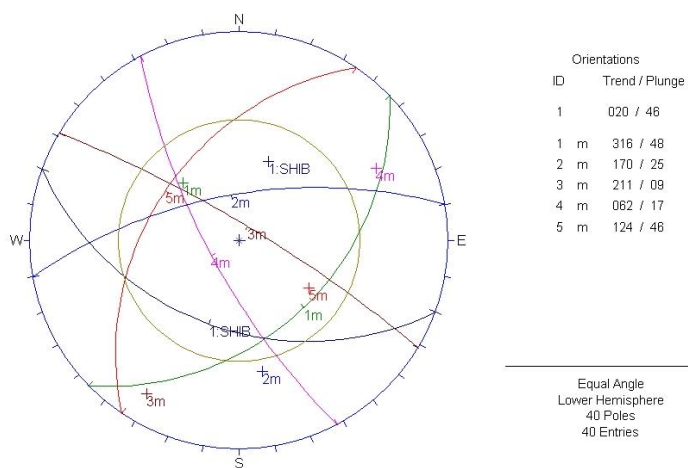
شکل ۴-۸: موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۸



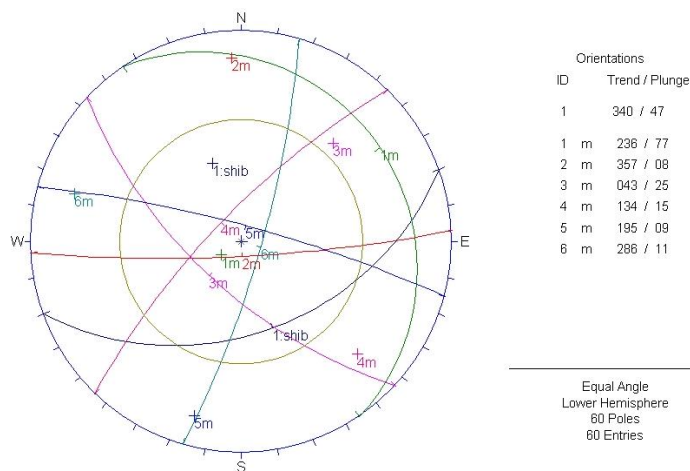
شکل ۴-۹: موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۹



شکل ۴-۱۰: موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۱۰



شکل ۴-۱۱: موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۱۱



شکل ۴-۱۲: موقعیت دسته درزه‌های مقطع شماره ۱۲

۴-۳- تحلیل ناپایداری گوه‌ای با استفاده از نرم افزار Swedge 4.078

بنابر نتایج تحلیل استریوگرافیگ، مقاطع ۱، ۲، ۳، ۵، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۱ استعداد ناپایداری گوه‌ای را دارا می‌باشند. برای بررسی دقیق‌تر ناپایداری گوه‌ای لازم است که اطلاعات مربوط به شیب و جهت شیب، زاویه اصطکاک دسته درزه‌های متقاطع تشکیل دهنده گوه و اطلاعات مربوط به هندسه دامنه مقطع مورد نظر مورد توجه قرار گیرد. در این بخش به منظور تحلیل پایداری قطعات گوه‌ای دامنه‌ها، اطلاعات ذکر شده برای شبیه سازی پایداری گوه‌ها در مقاطع مختلف، وارد نرم افزار Swedge 4.078 گردید.

برای بررسی و مقایسه اثر پارامترهای مختلف بر پایداری گوه‌ها، چهار حالت: ۱- عدم اعمال نیروی خارجی، ۲- اعمال فشار آب اشباع، ۳- اعمال نیروی زلزله با شتاب $g/35$ ، ۴- اعمال شتاب زلزله و فشار آب با هم در نظر گرفته شده است. همچنین برای تمامی این حالات، وضعیت پایداری گوه‌ها در صورت وجود ترک‌های کششی و عدم وجود آنها شبیه سازی شده است. احتمال گسیختگی در تمام موارد ذکر شده با ۱۰۰۰ بار نمونه برداری از داده‌های ورودی به روش مونت کارلو، شبیه سازی و محاسبه شده است. در جدول ۴-۲-الف خصوصیات هندسی مربوط به گوه‌های مقطع ۸ که به عنوان ورودی نرم افزار Swedge هستند، نشان داده شده است. احتمال گسیختگی گوه‌های این مقطع در حالت مختلف در جدول ۴-۲-ب آمده است.

جدول ۴-۲-الف: خصوصیات هندسی گوه‌های مقطع شماره ۸

خصوصیات هندسی گوه				
ارتفاع دامنه	زاویه اصطکاک	جهت شیب	شیب	
-	۴۰/۳	۵۵/۹	۷۷/۵	دسته درزه ۱
-	۳۹/۳	۲۰۲/۵	۶۹	دسته درزه ۲
-	-	۱۴۹	۷۲	ترک کششی شماره ۴
-	-	۱۰۹/۳	۶۸/۸	ترک کششی شماره ۵
-	-	۳۴۰	۷۰/۶	ترک کششی شماره ۶
۵	-	۱۵۰	۵۳	دامنه
-	-	۱۵۰	۲۲	وجه بالایی گوه

جدول ۴-۲: احتمال گسیختگی گوه‌های مقطع شماره ۸ در شرایط مختلف

بدون اعمال نیرو	فشار آب (اشباع)	شتاب زلزله ($0.35g$)	فشار آب و زلزله
بدون ترک کششی	۰/۰۰۱۴	۰/۲۸	۱
ترک کششی شماره ۴	۰	۰/۲۱	۰/۹۸
ترک کششی شماره ۵	۰	۰/۲۱	۰/۹۹
ترک کششی شماره ۶	۰	۰/۲۱	۰/۸۴

نتایج احتمال گسیختگی در شرایط مختلف اعمال نیروهای خارجی در عدم حضور ترک‌های کششی در جدول ۴-۳ و در حضور ترک‌های کششی در جدول ۴-۴ آورده شده است.

جدول ۴-۳: احتمال گسیختگی گوه بر اثر اعمال نیروهای خارجی و عدم اعمال آنها در حالتی که ترک کششی در نظر گرفته نشده است.

احتمال وقوع گسیختگی در حالات مختلف				شماره مقطع
بدون اعمال نیرو	فشار آب (اشباع)	شتاب زلزله ($0.35g$)	فشار آب و زلزله	
۰	۰/۸۷	۰/۰۰۳۵	۱	۱
۰	۱	۰/۰۰۷	۱	۲
۰/۰۸	۱	۰/۶۴	۱	۳
۰/۰۱۹	۰/۹۶	۰/۲۶	۱	۵
۰	۰/۴۷	۰/۰۱	۰/۷۴	۶
۰/۰۰۷	۱	۰/۳۱	۱	۸
۰	۰/۹۶	۰	۱	۱۰
۰/۰۱۸	۱	۰/۶	۱	۱۱

نتایج این جداول بیانگر این مطلب است که اعمال نیروهای خارجی یعنی فشار آب و شتاب ناشی از زلزله تاثیر شگرفی بر احتمال گسیختگی دارند. در ادامه تاثیر عامل فشار آب و شتاب زلزله بر احتمال گسیختگی بررسی می‌شود. به این منظور برای مقاطع مختلف، احتمال گسیختگی در درجات مختلف شتاب زلزله و فشار آب شبیه سازی شد.

جدول ۴-۴: احتمال وقوع گسیختگی در حالات مختلف اعمال نیروهای خارجی و عدم اعمال آنها در حالتی که ترک‌های کششی مختلف در نظر گرفته شده است

خصوصیات ترک کششی						احتمال گسیختگی در صورت حضور نیروهای مختلف وارده بر دامنه و عدم حضور آنها	
شماره مقطع	شماره ترک کششی	جهت شیب نسبت به دامنه	فاصله داری (سانتیمتر)	بدون اعمال نیرو	فشار آب (اشباع)	شتاب زلزله (g/۳۵)	فشار آب و زلزله
۱	۱	مخالف	۱۳۸	.	.	.	.
	۲	مخالف	۳۱۸	.	.	.	.
	۴	موافق	۲۱۵	.	۰/۰۰۵	.	۰/۰۳
۲	۱	موافق	۲۰۰	.	۰/۰۷	.	۰/۳
	۴	مخالف	۳۵۹	.	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۴۱
۳	۱	مخالف	۱۱۵	۰/۰۳	۰/۰۹۹	۰/۵۳	۰/۹
	۲	موافق	۸۷	۰/۰۵۶	۰/۶	۰/۶۴	۱
۵	۴	مخالف	۱۴۰	.	.	۰/۰۴۷	۰/۱۳
	۳	موافق	۵۶۳	.	.	.	.
	۴	موافق	۲۸۰	.	۰/۰۱۳	.	۰/۲
۸	۴	موافق	۵۰	۰/۰۰۳	۰/۷	۰/۲۴	۰/۹۹
	۵	موافق	۵۰	۰/۰۰۱۷	۰/۵۸	۰/۲۲	۰/۹۸
	۶	مخالف	۱۳۱	.	۰/۰۰۸۱	۰/۱۱	۰/۶۲
۱۰	۲	موافق	۴۳	.	۰/۷	.	۰/۹۵
	۳	مخالف	۲۵۰	.	.	.	.
	۵	مخالف	۳۰۰	.	.	.	.
۱۱	۲	مخالف	۵۰	۰/۰۰۹۵	۰/۰۹۱	۰/۵۶	۰/۹۲
	۳	مخالف	۱۵۰	.	۰/۵	۰/۴۷	۰/۹۹۸

۴-۳-۱- اثر فشار آب بر احتمال گسیختگی

از آن جایی که سنگ‌های منطقه مورد مطالعه به شدت تکتونیزه و پر درزه هستند و با توجه به ویژگی‌های اقلیمی محل، هوازدگی عامل مهمی در توسعه و گسترش درز و شکاف سنگ‌ها می‌باشد. از این میان نقش آب موجود در درزه‌ها قابل توجه است به ویژه در فصول سرد سال، چرخه ذوب و انجماد آب باعث باز شدن بیشتر درزه‌ها می‌شود. هر چند در منطقه مورد مطالعه در سی سال گذشته بیشترین میزان میانگین

بارندگی سالانه ۲۸۵ میلیمتر بوده است، اما در صورت وقوع بارش‌های متوالی میزان فشار آب در درزه‌ها می‌تواند به حالت اشباع برسد. بنابراین در این مواقع پیش بینی احتمال وقوع گسیختگی ضروری خواهد بود.

هنگامی که فشار آب بر روی سطوح گوه وارد می‌شود به دو طریق پایداری قطعه سنگی را کاهش می‌دهد. اول این که فشار آب موجود در درزه‌های اصلی با ایجاد نیرویی عمودی معادل u به سمت بالا، باعث کاهش تنش عمودی ناشی از وزن قطعه (نیروی مقاوم) می‌شود. دوم این که به علت فشار آب موجود در ترک کششی نیرویی معادل v ، موازی با سطح لغزش و به سمت پایین دامنه عمل خواهد کرد و باعث افزایش نیروهای محرک لغزش می‌شود. بنابراین ضریب اطمینان در حالتی که علاوه بر وزن قطعه نیروهای ناشی از فشار آب نیز دخیل باشد، به صورت زیر است.

$$FS = \frac{CA + (W \cos i - U) \tan \phi}{W \sin i + V} \quad \text{رابطه (۱-۴)}$$

وقتی که دامنه در مرز گسیختگی است، شرایط تعادل حدی برقرار بوده و نیروهای مقاوم در برابر گسیختگی و نیروهای برهم زننده پایداری با هم برابرند. در چنین شرایطی ضریب اطمینان برابر ۱ است. هرچه ضریب اطمینان از ۱ بیشتر شود، بر پایداری دامنه افزوده خواهد شد (معماریان، ۱۳۷۴).

فشار آب در حالتی که ترک‌های کششی وجود ندارند از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$u_1 = u_2 = \gamma_w \times \frac{H_w}{3} \quad \text{رابطه (۲-۴)}$$

که u_1 و u_2 ، مقدار فشار آب بر روی درزه‌های شماره ۱ و شماره ۲، γ_w چگالی آب و H_w ، ارتفاع گوه است.

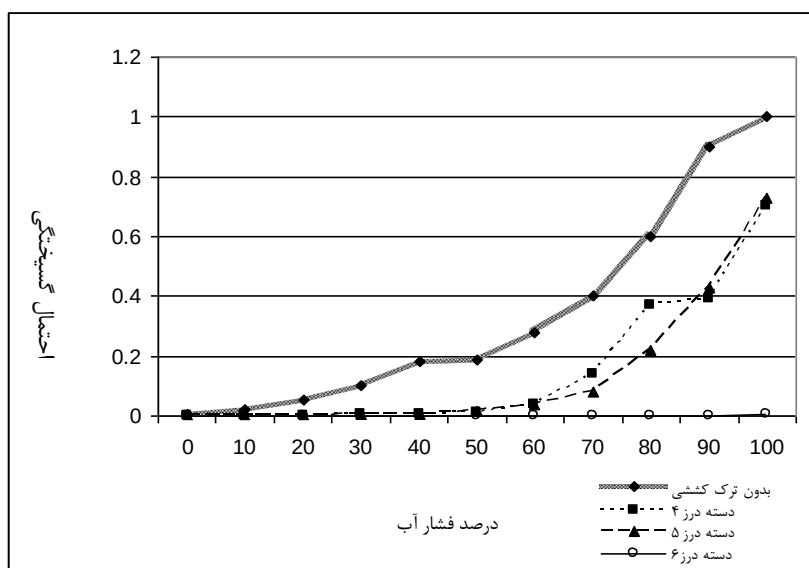
با در نظر گرفتن ترک‌های کششی، فشار آب موجود بر سطوح درزه‌ها از رابطه (۳-۴) محاسبه می‌شود:

$$u_1 = u_2 = u_5 = \gamma_w \times \frac{H_{5w}}{3} \quad \text{رابطه (۳-۴)}$$

که در آن u_5 ، مقدار فشار آب در ترک کششی و H_{5w} ارتفاع سطح ترک کششی است.

فشار آب حاصل از رابطه (۳-۴) کمتر از رابطه (۲-۴) است، بنابراین در حضور ترک‌های کششی احتمال گسیختگی کاهش می‌یابد (ضریب اطمینان بالا می‌رود).

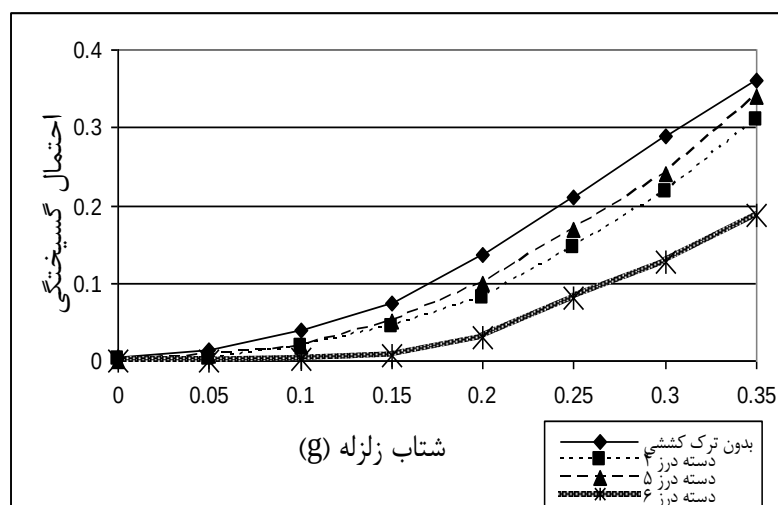
برای بررسی عامل فشار آب بر روی پایداری گوه‌ها در مقاطع مورد نظر، احتمال گسیختگی برای درصدهای متفاوتی از فشار آب در حضور ترک‌های کششی و عدم حضور آنها محاسبه شد که به عنوان نمونه نتایج آن در مقطع شماره ۸ به صورت نمودار تغییرات احتمال گسیختگی در مقابل تغییر درصد فشار آب (شکل ۴-۱۳) به نمایش درآمده است. همان گونه که مشاهده می‌شود با افزایش فشار آب بر روی درزه‌ها، احتمال گسیختگی به سرعت افزایش می‌یابد. نکته مهم و قابل توجه در این نمودار این است که در شرایط مشابه فشار آب، در حضور ترک‌های کششی، احتمال گسیختگی کاهش می‌یابد یا به عبارتی حضور ترک کششی باعث افزایش وزن توده و بالا رفتن ضریب اطمینان گوه‌ها می‌شود. به خصوص در حضور ترک‌های کششی با جهت شیب مخالف دامنه (در این جا دسته درزه ۶)، کاهش در احتمال گسیختگی بسیار چشمگیر است.



شکل ۴-۱۳: تاثیر فشار آب بر احتمال گسیختگی در شرایط مختلف

۴-۳-۲- اثر زلزله بر احتمال گسیختگی

برای بررسی اثر نیروی زلزله بر احتمال وقوع گسیختگی و نقش ترک کششی بر آن نیز در شتاب‌های متفاوت زلزله، احتمال وقوع گسیختگی در مقاطع مختلف شبیه سازی شد که به عنوان مثال نتایج آن به صورت نمودار تغییرات احتمال گسیختگی در برابر درصد‌های مختلف شتاب زلزله برای مقطع ۸، در شکل ۴-۱۴ قابل مشاهده است.



شکل ۴-۱۴: اثر شتاب زلزله بر احتمال وقوع گسیختگی

با توجه به نمودار فوق می‌توان دریافت که با افزایش شتاب زلزله در هر دو حالت وجود و عدم وجود ترک-های کششی، احتمال وقوع گسیختگی به سرعت افزایش می‌یابد اما به طور کلی در شرایط مشابه شتاب زلزله، در حضور ترک‌های کششی احتمال گسیختگی کمتر است.

۴-۴- شبیه سازی مکانیسم ریزش سنگی با استفاده از نرم افزار Rocfall 4.078

با توجه به نتایجی که در بخش قبل در تحلیل احتمال گسیختگی قطعات به دست آمد پر واضح است که اگر چه در شرایط معمولی و بدون عوامل کاهنده پایداری (وجود فشار آب در باز شدگی درزه‌ها و نیروهای

خارجی مثل شتاب زلزله) احتمال وقوع گسیختگی زیاد بالا نیست اما در شرایط بحرانی همچون بارش- های سنگین و زلزله‌های با مقیاس بزرگ، خطر ریزش قطعات سنگی در تمامی مقاطع در منطقه مورد مطالعه بسیار بالاست. بنابراین برای مدیریت خطر و پیشگیری از بروز آسیب‌های جدی به افراد و سازه‌ها، شناخت چگونگی مکانیسم ریزش و تغییرات پارامترهای اصلی پدیده ریزش در طی حرکت به پایین دامنه لازم و ضروری می‌باشد. این پارامترها شامل حداکثر مسافت طی شده توسط قطعات، حداکثر انرژی جنبشی، حداکثر سرعت و حداکثر ارتفاع پرش آنها می‌باشد. به این منظور از روش‌های مختلفی جهت شبیه سازی پدیده ریزش سنگی استفاده می‌شود. همان طور که قبلاً اشاره شد نرم افزارهای دو بعدی و سه بعدی فراوانی برای این امر وجود دارد که هر کدام مزایا و معایب مربوط به خود را دارند. در این تحقیق از نرم افزار Rocfall 4.078 جهت شبیه سازی پدیده ریزش سنگی استفاده شد.

برای این منظور ابتدا مقاطع عرضی توپوگرافی برای تمام ۱۲ مقطع تهیه شد. برای قسمت‌های مختلف دامنه، مطابق جدول ۴-۵، ضرایب ارتجاعی (با استفاده از جدول ضرایب ارتجاعی نرم افزار)، ضریب اصطکاک و زبری متناسب با ویژگی‌های آنها تعیین شد. در قدم بعدی نقاط منشاء ریزش تعیین شدند و وزن بزرگترین قطعات در هر مقطع با استفاده از برداشت‌های صحرایی مشخص شد. جدول تنظیمات نرم افزار برای شبیه سازی ۱۰۰۰ ریزش در هر بار اجرای برنامه تنظیم شد.

جدول ۴-۵: خصوصیات مواد تشکیل دهنده دامنه که به صورت ورودی نرم افزار هستند

بخش بالایی دامنه	بخش بالایی دامنه	
سنگ آهک مارنی پوشیده با مقدار زیادی سنگریزه و اندکی پوشش گیاهی	سنگ آهک‌های توده‌ای و مقاوم لار	نوع سنگ‌های دامنه
۲	۲	زبری دامنه (انحراف معیار از شیب میانگین)
۳۰	۳۰	زاویه اصطکاک دامنه
۰/۳۳	۰/۵	ضریب ارتجاعی نرمال
۰/۸۷	۰/۹۵	ضریب ارتجاعی مماسی
Pfeiffer and Bowen (1989)	Giani, (1992)	مرجع (برای ضرایب ارتجاعی)

شبیه سازی ریزش به سه صورت انجام شد. اول ریزش بزرگترین قطعات در هر مقطع (با ابعاد به دست آمده از برداشت‌های صحرایی) بدون سرعت اولیه ناشی از شتاب زلزله، هزار بار شبیه سازی شد. نتایج به دست آمده از این شبیه سازی برای پارامترهای بیشترین مسافت طی شده، بیشترین ارتفاع جهش، بیشترین انرژی جنبشی و بیشترین سرعت انتقالی در جدول ۴-۶ آمده است. در مرحله دوم هزار بار، ریزش قطعات با همان ابعاد، در شرایطی که سرعت قطعات بر اثر بزرگترین زلزله ممکنه به ۱/۲۱ متر در ثانیه رسیده است، شبیه سازی شد. نتایج این مرحله در جدول ۴-۷ نشان داده شده است.

جدول ۴-۶: خصوصیات ریزش سنگی در مقاطع مختلف، در شرایطی که ریزش سنگین‌ترین قطعه سنگ در هر مقطع بدون سرعت اولیه، ۱۰۰۰ بار شبیه سازی شده است.

شماره مقطع	طول مسافت طی شده (متر)	ارتفاع پرش قطعات (متر)	حداکثر انرژی کل (مگا ژول)	حداکثر سرعت انتقالی (متر بر ثانیه)
۱	۱۷۲	۱/۵	۶	۲۲
۲	۱۸۸/۸	۰/۰۴	۲/۶	۸/۲
۳	۳۳۰	۱۳/۲	۱۳/۵	۳۷
۴	۲۳۱	۲/۶	۱۲/۸	۲۹/۱
۵	۱۹۲	۵/۹	۹	۲۶/۵
۶	۲۶۹	۹/۳	۲۵	۳۴
۷	۳۰۷/۱	۴/۵	۲۰	۲۹/۵
۸	۲۱۹	۶/۱	۴/۴	۱۵/۱
۹	۱۸۵/۴	۱/۳	۷۱	۲۲/۲
۱۰	۱۸۰	۱/۷	۱۲/۱	۲۳/۵
۱۱	۳۲۸	۷/۲	۲/۶	۱۹/۸
۱۲	۲۲۲	۰/۸	۱۸/۵	۱۸/۷

با توجه به نتایج این دو جدول ملاحظه می‌شود که تغییر خاصی در میزان بیشترین مسافت طی شده، ارتفاع جهش، انرژی جنبشی و سرعت انتقالی صورت نگرفته است و مقادیر تفاوت اندکی که مشاهده می

جدول ۴-۷: خصوصیات ریزش سنگی در مقاطع مختلف در شرایطی که ریزش سنگین‌ترین قطعه سنگ در هر مقطع با سرعت ۱/۲۱ متر در ثانیه، ۱۰۰۰ بار شبیه سازی شده است.

شماره مقطع	طول مسافت طی شده (متر)	ارتفاع پرش قطعات (متر)	حداکثر انرژی کل (مگا ژول)	حداکثر سرعت انتقالی (متر بر ثانیه)
۱	۱۷۳	۱/۴۵	۷/۷	۲۳
۲	۱۸۸/۴	۰/۰۶۵	۲/۶۶	۸/۵
۳	۳۲۸	۱۳/۳	۱۴/۵	۳۵
۴	۲۴۲	۲/۸	۱۱/۷	۲۸/۲
۵	۱۹۹	۵/۶	۸/۷	۲۶/۵
۶	۲۶۶	۷/۸	۲۲	۳۲
۷	۳۱۱	۵/۴	۲۱/۱	۲۹/۲
۸	۲۲۱	۶/۲	۴/۴	۱۸/۱
۹	۲۱۳	۱/۲	۷۲	۲۲/۲
۱۰	۲۰۰	۳/۵	۱۳/۱	۲۳/۵
۱۱	۳۲۸	۹/۲	۲/۶	۲۰
۱۲	۲۲۵/۳	۰/۹	۱۶/۱	۱۸/۲

شود به نظر می‌رسد به علت این باشد که در هر بار اجرا شدن برنامه به طریق احتمالاتی، مقداری که نرم افزار برای پارامترهای ورودی در نظر می‌گیرد متفاوت با دفعات دیگر است در نتیجه، مقادیر پارامترهای خروجی نیز تا حدی متغیر خواهد بود. پس مقایسه نشان می‌دهد تغییر سرعت اولیه تاثیری در میزان پارامترهای خروجی ذکر شده ندارد.

در مرحله سوم هزار بار ریزش قطعاتی با وزنی مساوی با بزرگترین قطعه در کل مقاطع (۲۱۳ تن) با سرعت اولیه ۱/۲۱ متر در ثانیه برای کلیه مقاطع شبیه سازی شد. نتایج این مرحله در جدول ۴-۸ آمده است. در واقع در این جا بدترین شرایط در نظر گرفته شده است که با توجه به آن محافظه کارانه‌ترین تصمیم‌گیری صورت گیرد.

جدول ۴-۸: خصوصیات ریزش سنگی در مقاطع مختلف، در شرایطی که ریزش سنگین‌ترین قطعه سنگ (در کل منطقه مورد مطالعه معادل ۲۱۳ تن) با سرعت اولیه معادل ۱/۲۱ متر در ثانیه، ۱۰۰۰ بار شبیه سازی شده است.

شماره مقطع	طول مسافت طی شده (متر)	ارتفاع پرش قطعات (متر)	حداکثر انرژی کل (مگا ژول)	حداکثر سرعت انتقالی (متر بر ثانیه)
۱	۱۷۴	۱/۴۵	۸۲	۲۴
۲	۱۸۹	۰/۰۶۵	۱۰/۵	۸/۵
۳	۳۳۴	۱۲/۹	۱۵۲	۳۳
۴	۲۳۹	۲/۶	۱۱۰	۲۸/۱
۵	۱۹۱/۶	۵/۹	۹۴۰	۲۶/۶
۶	۲۷۹	۷/۷	۱۴۹	۳۳
۷	۳۰۸	۵/۶	۱۱۶	۲۹/۲
۸	۲۲۲	۷/۱	۴۲	۱۸/۸
۹	۲۱۳	۱/۲	۷۲	۲۲/۲
۱۰	۲۰۰	۳/۵	۱۳/۱	۲۳/۵
۱۱	۳۲۸	۹/۲	۲/۶	۲۰
۱۲	۲۲۳	۰/۱۵	۵۰/۵	۱۸/۵

از مقایسه سه جدول اخیر نکات زیر برداشت می‌شود:

۱- با افزایش سرعت اولیه قطعه سنگ و نیز افزایش وزن آن در یک توپوگرافی معین (یک مقطع

خاص) تغییر خاصی در ارتفاع جهش قطعات دیده نمی‌شود. بنابراین می‌توان گفت اصلی‌ترین

عامل کنترل کننده ارتفاع جهش قطعات، عامل توپوگرافی است که با مقایسه مقادیر ارتفاع جهش

در مقاطع مختلف، تفاوت به خوبی قابل مشاهده است

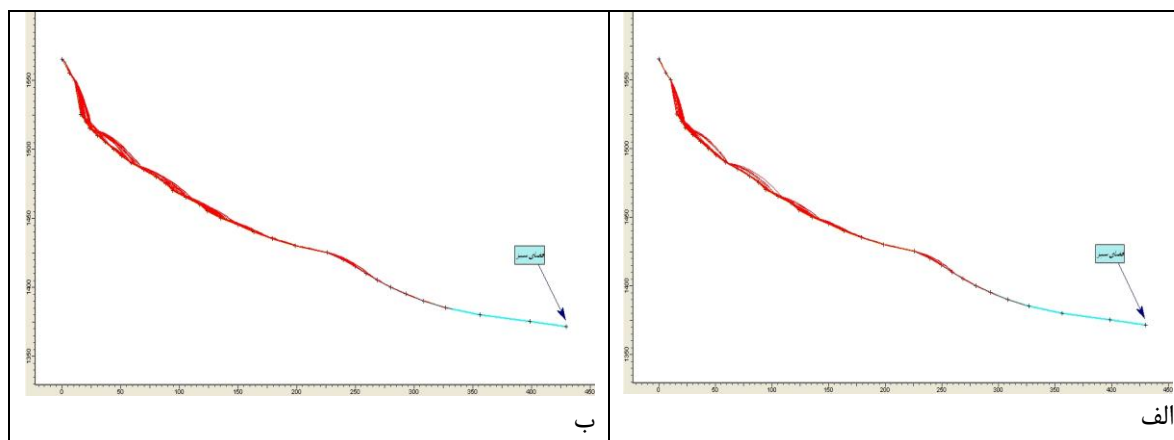
۲- با افزایش وزن قطعه سنگ، تغییر خاصی در میزان بیشترین مسافت طی شده، ارتفاع جهش و

سرعت حاصل نشده است. تنها عاملی که با افزایش وزن قطعه دستخوش تغییر شده، انرژی

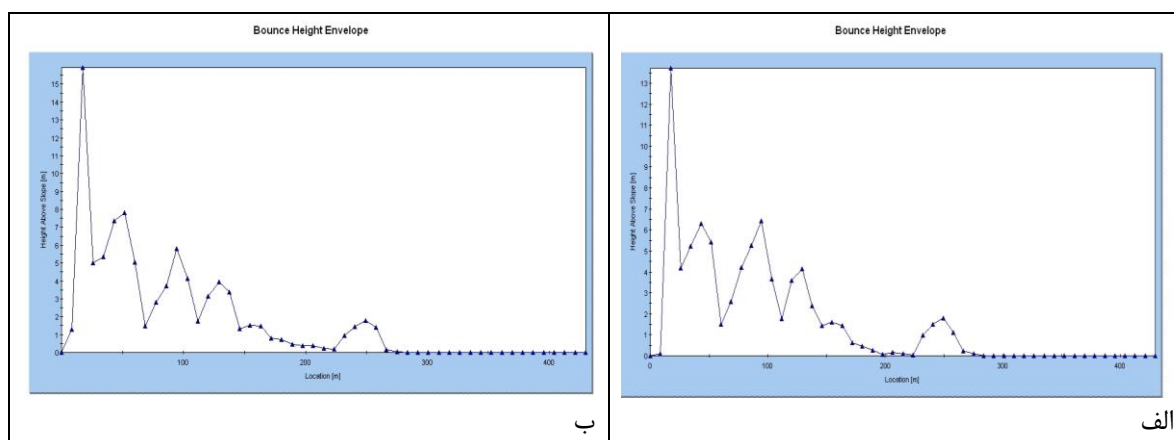
جنبشی کل قطعه است که به طور فاحشی افزایش یافته است زیرا در الگوریتم محاسبات نرم

افزار Rocfall، از میان سه پارامتر مورد نظر فقط انرژی بیشترین رابطه را با وزن دارد.

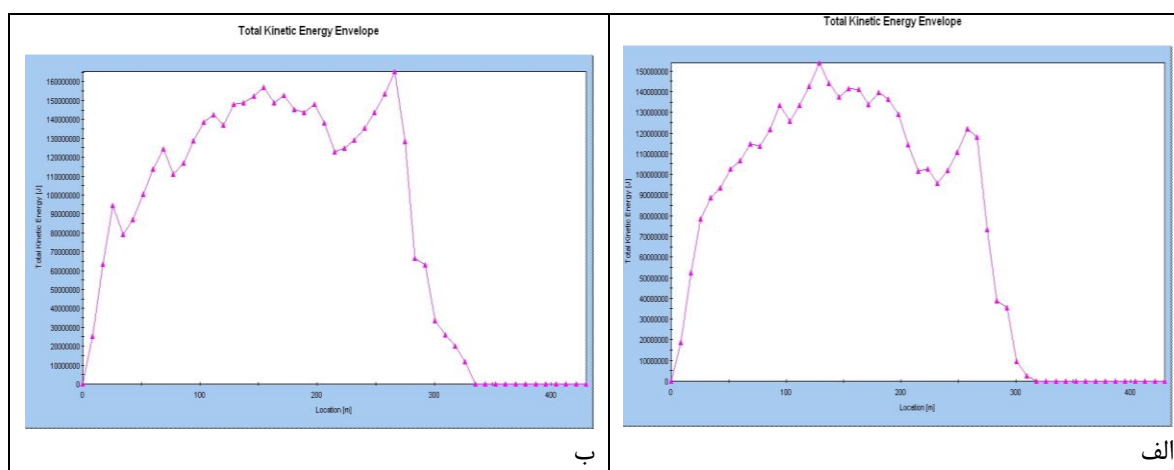
۳- نکته بسیار جالب‌تر این است که با مقایسه جداول مشاهده می‌کنیم که با افزایش سرعت اولیه قطعه سنگ از صفر به ۱/۲۱ متر در ثانیه، هیچ تغییر خاصی در مقدار بیشترین مسافت طی شده، بیشترین ارتفاع پرش، بیشترین انرژی جنبشی و حتی بیشترین سرعت انتقالی ایجاد نشده است یا اینکه بسیار ناچیز و قابل اغماض می‌باشد. یعنی علی‌رغم این که در بحث احتمال گسیختگی ملاحظه شد که نیروی ناشی از شتاب زلزله باعث افزایش چشمگیری در احتمال گسیختگی می‌شد؛ اما در این جا مشاهده می‌شود که در مکانیسم ریزش و حرکت سنگ از نقطه منشاء تا هنگام توقف تاثیر چندانی ندارد. بنابراین عواملی که تعیین کننده نوع حرکت و میزان پارامترهای مختلف حرکت هستند عبارتند از ویژگی‌های توپوگرافی دامنه و خصوصیات قطعات (که البته در این جا با استفاده از نرم افزار Rocfall، تنها ویژگی قطعات، وزن آنها است و شکل و هندسه آنها مورد توجه قرار نگرفته است). البته اشاره به این نکته لازم است که با افزایش سرعت اولیه به مقدار زیاد (به عنوان مثال سرعت زیاد ناشی از پرتاب مصنوعی قطعات به منظور آزمایشات صحرایی) قطعاً تغییراتی در میزان پارامترهای ذکر شده ایجاد خواهد شد. اما به طور طبیعی در محل مورد مطالعه حتی میزان سرعت ناشی از بزرگترین زلزله ممکنه (با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله) نیز قادر به ایجاد تغییرات قابل ذکری نبوده است. برای درک بیشتر مطلب نمودارهای مربوط به پارامترهای ذکر شده در مقطع شماره ۳ (در شرایطی که ریزش سنگین‌ترین قطعه سنگ در کل مقاطع به وزن ۲۱۳ تن، ۱۰۰۰ بار شبیه سازی شده است)، در دو حالت با سرعت ۱/۲۱ متر در ثانیه و با سرعت ۴ متر در ثانیه با هم مقایسه شده‌اند (اشکال ۴-۱۵ تا ۴-۱۸).



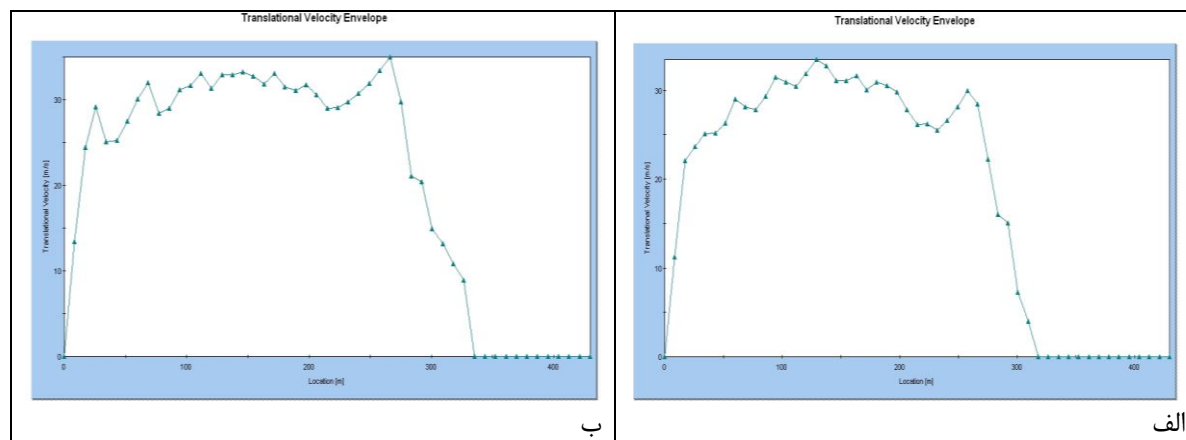
شکل ۴-۱۵: مسیرهای طی شده در مقطع ۳. با سرعت ۱/۲۱ متر در ثانیه (الف) و با سرعت ۴ متر در ثانیه (ب).



شکل ۴-۱۶: بیشترین ارتفاع جهش در مقطع ۳. با سرعت ۱/۲۱ متر در ثانیه (الف) و با سرعت ۴ متر در ثانیه (ب).

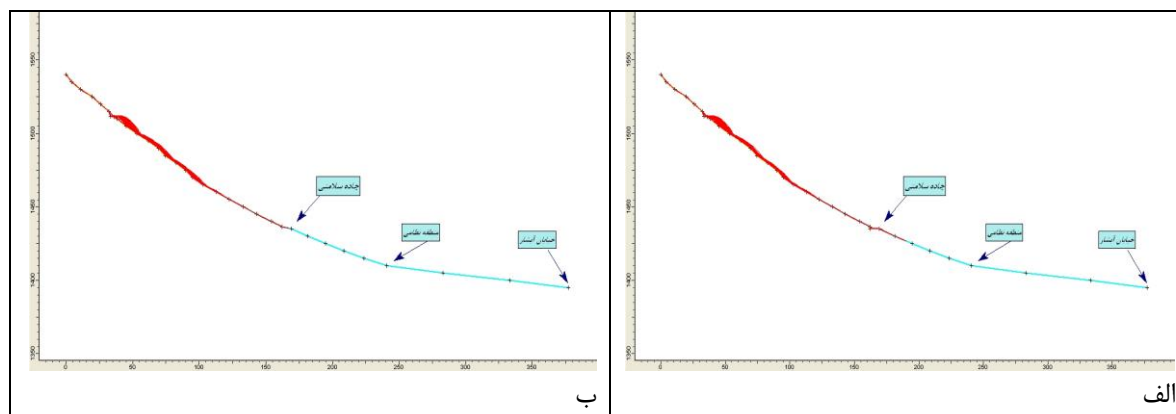


شکل ۴-۱۷: بیشترین انرژی جنبشی در مقطع ۳. با سرعت ۱/۲۱ متر در ثانیه (الف) و با سرعت ۴ متر در ثانیه (ب).

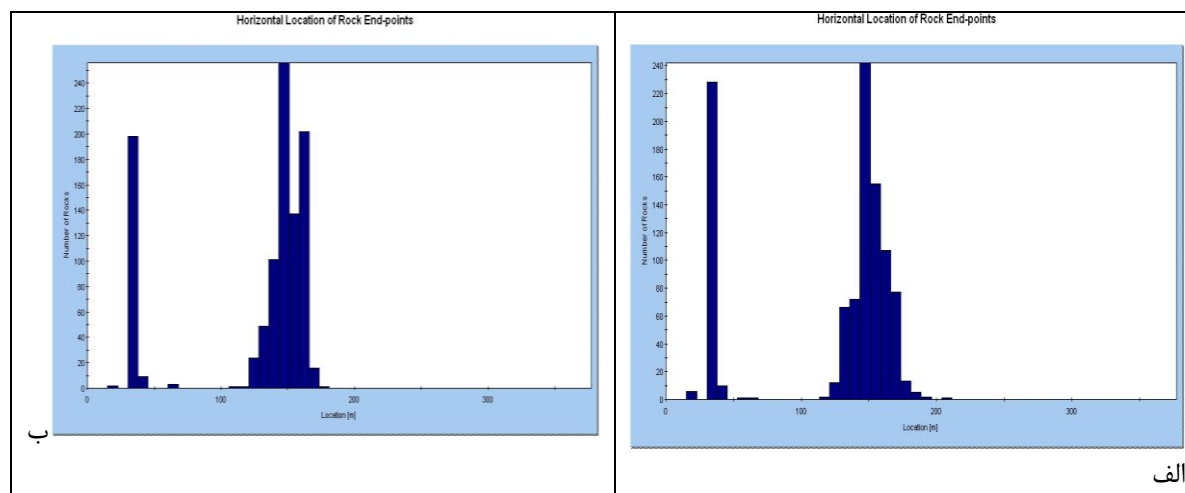


شکل ۴-۱۸: بیشترین سرعت انتقالی در مقطع ۳ با سرعت ۱/۲۱ متر در ثانیه (الف) و با سرعت ۴ متر در ثانیه (ب).

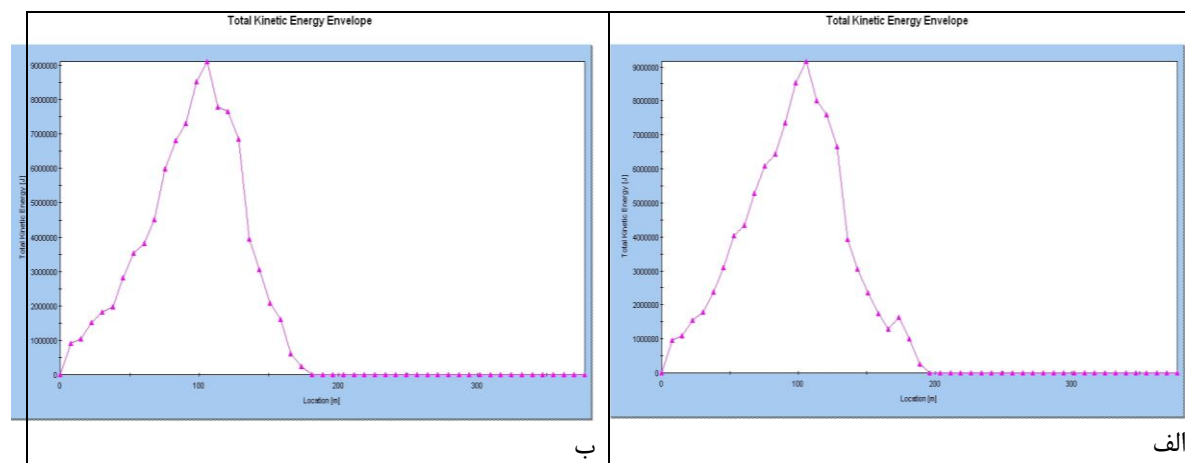
همان طور که مشاهده می شود با افزایش سرعت اولیه به ۴ متر بر ثانیه، محل توقف قطعات از ۳۲۴ متری از نقطه منشاء به ۳۳۳ متری، ارتفاع جهش از ۱۳/۷ متر به ۱۵/۹ متر، انرژی جنبشی از ۱۴۶ مگاژول به ۱۶۵ مگاژول و سرعت انتقالی از ۳۲ متر در ثانیه به ۳۵ متر در ثانیه افزایش یافته است و تغییر در پارامترها را می توان تشخیص داد اما هنگامی که سرعت اولیه در حد ۱/۲۱ متر بر ثانیه افزایش می یابد تغییر در پارامترهای ذکر شده محسوس نیست. لذا نقش زلزله را در مکانیسم ریزش ضعیف عنوان نمودیم. در هنگام شبیه سازی ریزش سنگی در مقطعی که مشرف بر جاده سلامتی بودند، نکته ای که مشاهده می شد افزایش ارتفاع جهش بود. برای بررسی بیشتر به مقایسه ریزش سنگی در حالتی که جاده سلامتی وجود ندارد با وضع موجود در دو مقطع ۵ و ۱۱ می پردازیم. در این جا ریزش سنگین ترین قطعه در مقاطع نامبرده شبیه سازی شده است. نمودار پارامترهای حرکت قطعات ریزشی در این مقاطع در اشکال ۴-۱۹ تا ۴-۲۷ قابل مشاهده است.



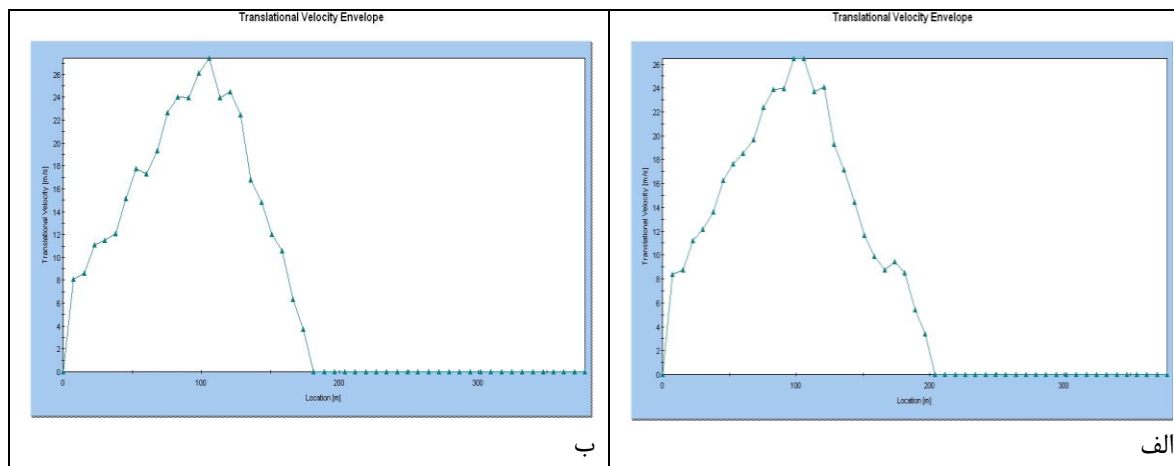
شکل ۴-۱۹: مسیرهای طی شده در مقطع ۵ در حالتی که جاده سالمی وجود دارد (الف) و حالتی که وجود ندارد (ب).



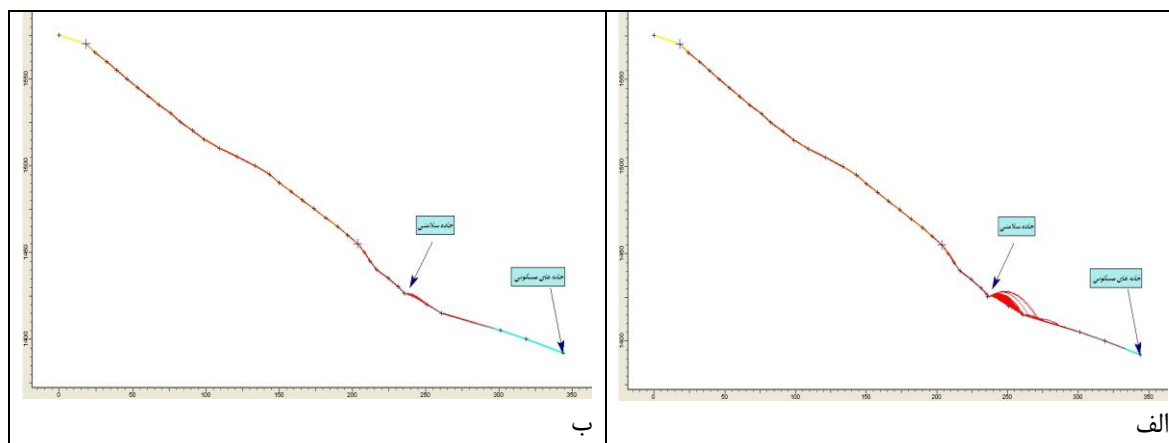
شکل ۴-۲۰: مقایسه نقاط توقف قطعات سنگی در مقطع ۵ در حالتی که جاده سالمی وجود دارد (الف) و حالتی که وجود ندارد (ب).



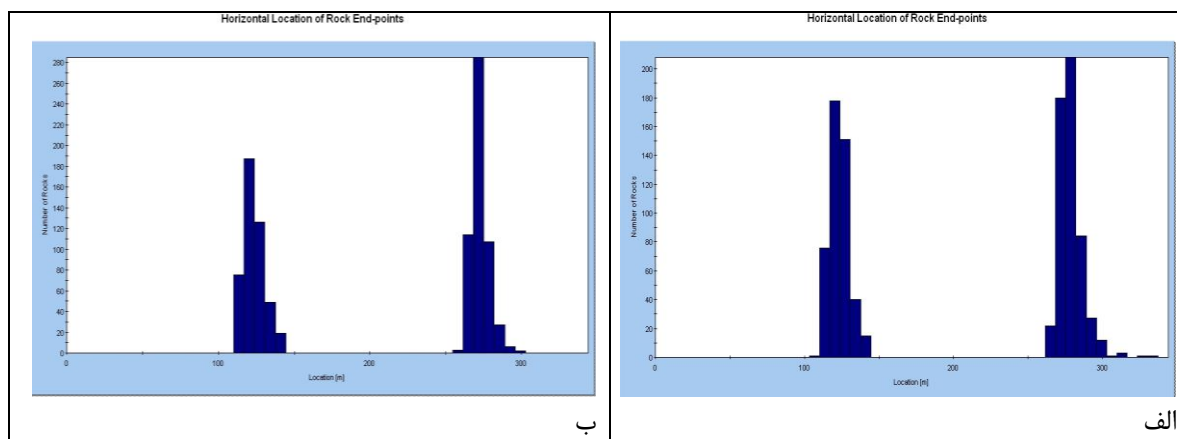
شکل ۴-۲۱: مقایسه انرژی جنبشی کل در مقطع ۵ در حالتی که جاده سالمی وجود دارد (الف) و حالتی که وجود ندارد (ب).



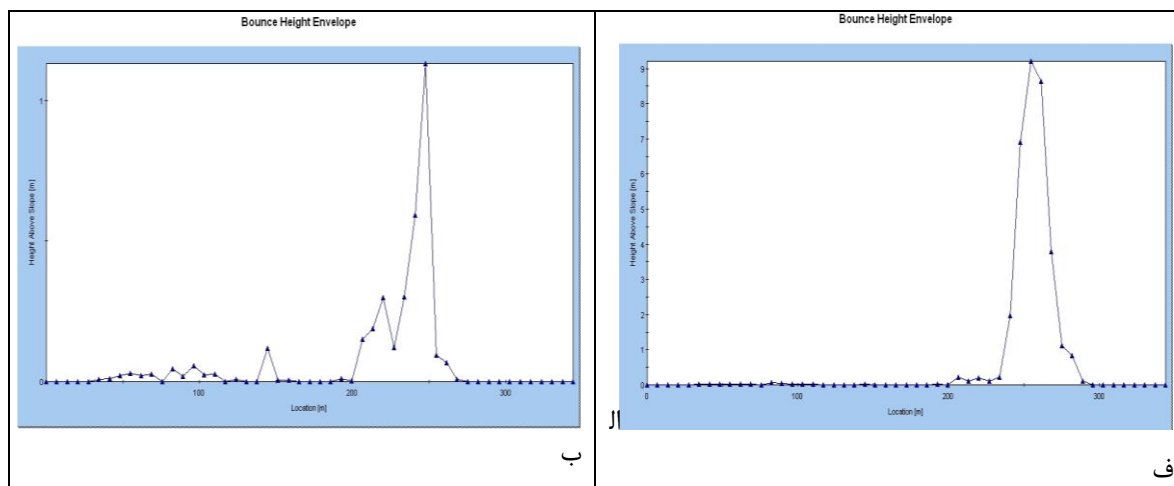
شکل ۴-۲۲: مقایسه انرژی جنبشی انتقالی در مقطع ۵ در حالتی که جاده سلامتی وجود دارد (الف) و حالتی که وجود ندارد (ب).



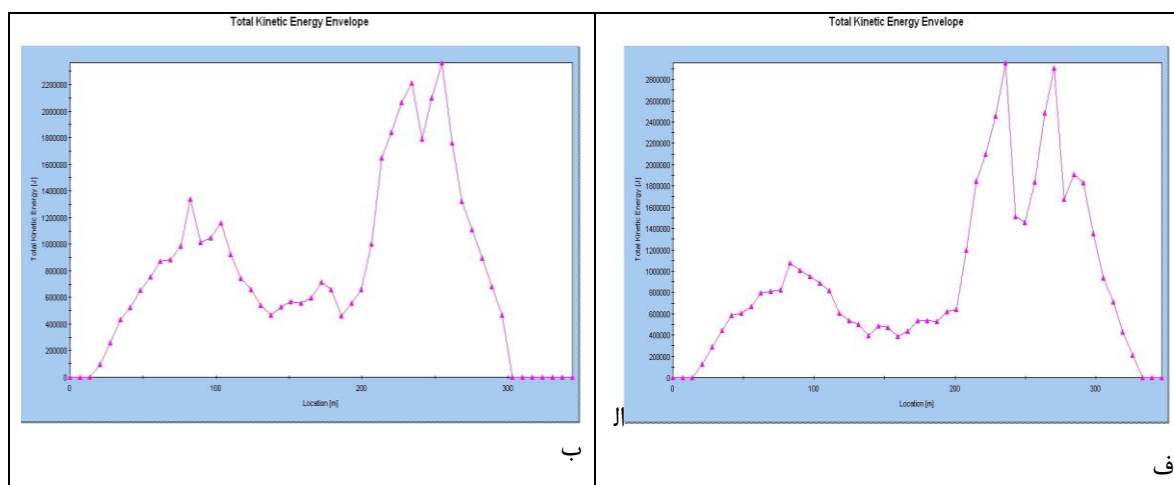
شکل ۴-۲۳: مسیرهای طی شده در مقطع ۱۱ در حالتی که جاده سلامتی وجود دارد (الف) و حالتی که وجود ندارد (ب).



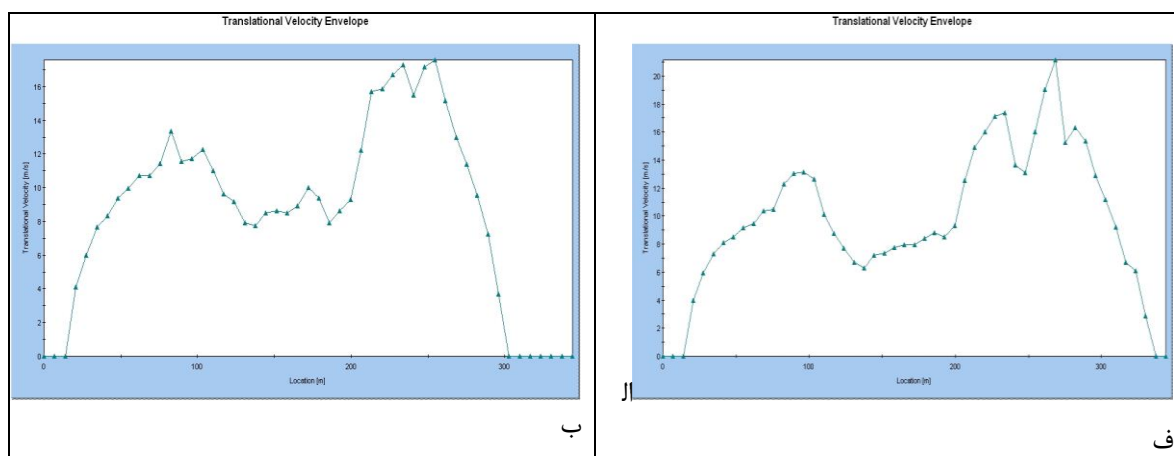
شکل ۴-۲۴: مقایسه نقاط توقف قطعات سنگی در مقطع ۱۱ در حالتی که جاده سلامتی وجود دارد (الف) و حالتی که وجود ندارد (ب).



شکل ۴-۲۵: مقایسه ارتفاع پرش در مقطع ۱۱ در حالتی که جاده سلامتی وجود دارد (الف) و حالتی که وجود ندارد (ب).

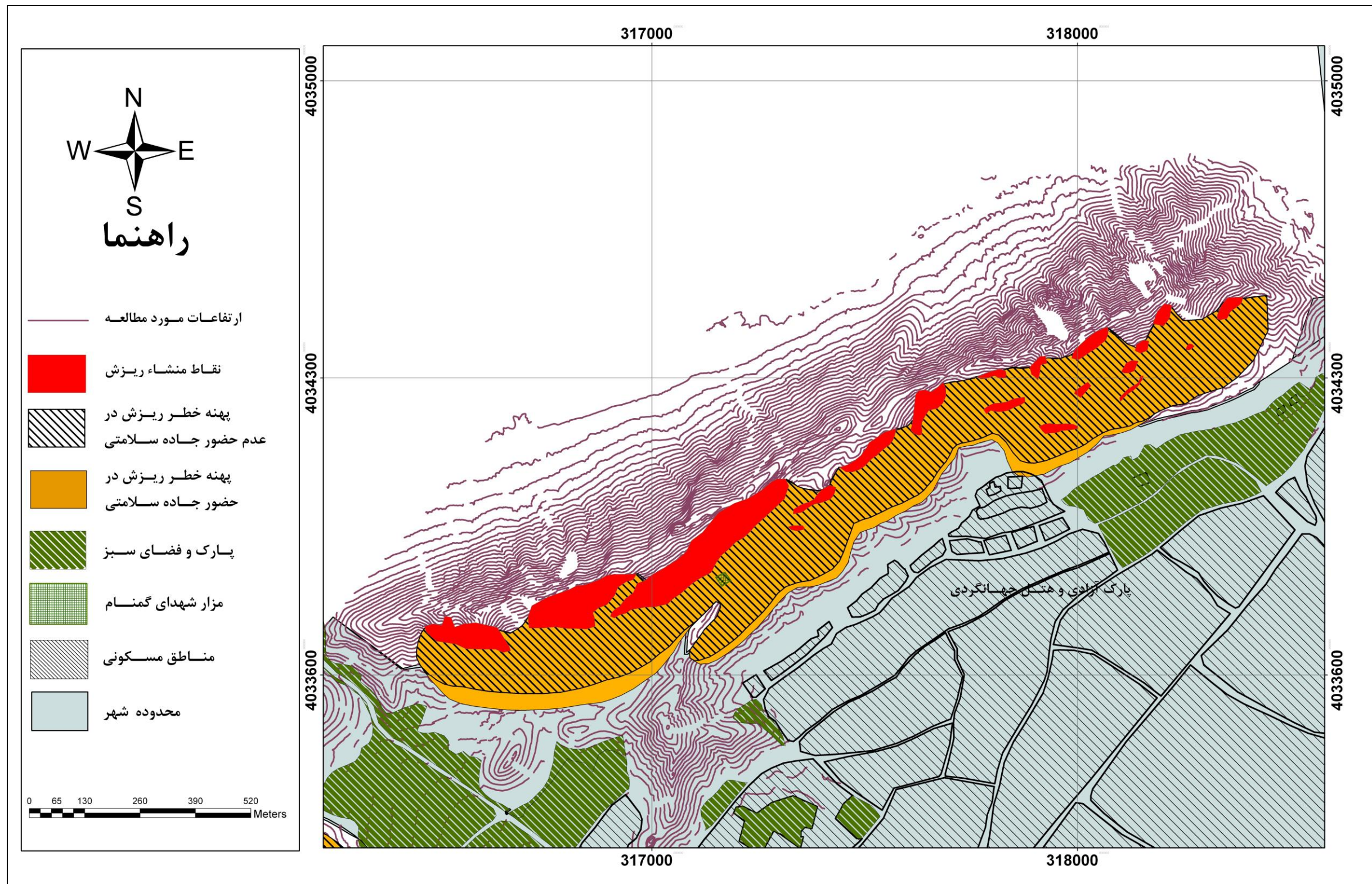


شکل ۴-۲۶: مقایسه انرژی کل در مقطع ۱۱ در حالتی که جاده سلامتی وجود دارد (الف) و حالتی که وجود ندارد (ب).



شکل ۴-۲۷: مقایسه سرعت انتقالی در مقطع ۱۱ در حالتی که جاده سلامتی وجود دارد (الف) و حالتی که وجود ندارد (ب).

با مقایسه نمودارها مشاهده می‌شود که اگر جاده سلامتی وجود نداشت در مقطع ۵ بیشترین مسافت طی شده از ۱۹۰ متر به ۱۶۷ متر و در مقطع ۱۱ از ۳۳۳ متر به ۲۹۷ متر کاهش می‌یافت. در مقطع ۵ در صورت حضور جاده سلامتی ملاحظه می‌شود که قبل از جاده سلامتی ارتفاع جهش، انرژی جنبشی و سرعت انتقالی در حالی که بسیار کاهش یافته است در محل برخورد با جاده به طور ناگهانی افزایش قابل توجهی یافته و به شکل یک پیک کوچک دیده می‌شود به همین دلیل نیز طول مسافت طی شده افزایش یافته است. در مقطع ۱۱ در حالی که جاده وجود دارد ارتفاع جهش به شدت افزایش یافته و نسبت به حالتی که جاده وجود ندارد از ۱/۱ به ۹/۲ متر رسیده است. همچنین انرژی جنبشی از ۲/۳۵ به ۲/۹۵ مگا ژول و سرعت انتقالی از ۱۷/۵ به ۲۱ متر در ثانیه رسیده است. بنابراین تاثیر جاده سلامتی در افزایش خطر ریزش سنگی در منطقه مورد مطالعه، به نوعی نشان دهنده نقش فعالیت‌های انسان را بر محیط اطراف و ایجاد آشفته‌گی‌های زیست محیطی است. در شکل ۴-۲۸ پهنه بیشترین مسافت طی شده در دو حالت حضور و عدم حضور جاده سلامتی مقایسه شده است.



شکل ۴-۲۸: مقایسه پهنه بیشترین مسافت در حضور جاده سلامتی

فصل پنجم

پهنه‌بندی خطر ریزش سنگی
و ارائه راهکارهای کاهش خطر
در منطقه مطالعاتی

۵-۱- مقدمه

با توجه به اهمیت ریسک ریزش سنگی در مدیریت زیست محیطی، به روش‌ها و تکنیک‌هایی نیاز است که قادر باشد خطر ریزش سنگی را به طور واقع بینانه ارزیابی کند (Frattini et al., 2008). نقشه‌های پهنه‌بندی استعداد داری ریزش سنگی در مقیاس (۱/۲۵۰۰۰-۱/۵۰۰۰) می‌تواند ابزار مناسبی برای طراحی کاربری اراضی به منظور مدیریت ریسک ریزش سنگی باشد. چنین نقشه‌ای برای مسئولان اجرایی وسیله‌ای مفید و از لحاظ اقتصادی به صرفه برای مدیریت ریسک طبیعی به منظور هدایت رشد شهر و تصمیم‌گیری در مورد برنامه‌های کاری بر اساس تحلیل ریسک و خطر می‌باشد. با استفاده از نقشه پهنه‌بندی استعداد داری ریزش سنگی می‌توان زمین‌ها و افرادی را که در معرض خطر هستند شناسایی نمود و سطوح مختلفی از خطر را برای ناحیه در معرض خطر تعریف کرد (Copons and Vilaplana, 2008).

۵-۲- پهنه بندی خطر ریزش سنگی

برای پیش بینی وقوع فضایی پدیده‌هایی همچون ریزش سنگی، جریان واریزه‌ای و بهمن سنگی، دو محل باید تشخیص داده شوند: جایی که واقعه رخ می‌دهد و جایی که مواد ریزشی متوقف می‌شوند. علاوه بر این شدت ریزش سنگی به طور معناداری در امتداد مسیر حرکت، یا خط سیر منحنی آن تغییر می‌کند، همچنین از یک مسیر به مسیر دیگر نیز بسیار متفاوت است. در نتیجه به منظور پهنه بندی خطر ریزش سنگی، می‌توان شدت و احتمال ریزش سنگی را در هر محل در امتداد کل مسیر تعریف کرد.

۵-۲-۱- تعیین منشاء ریزش سنگی

همان گونه که در فصل ۲ عنوان شد برای تشخیص نواحی منشاء ریزش سنگی روش‌های مختلفی از جمله استفاده از نقشه‌های زمین شناسی و ژئومورفولوژی (نواحی با عنوان شیب‌های ریزش سنگی

فعال)، تعریف حد آستانه برای شیب میانگین دامنه و تشخیص نواحی منشاء ریزش بر اساس فاکتورهای کنترل کننده ریزش (نوع سنگ، رخنمون، انحناى دامنه، شیب دامنه و پوشش زمین) استفاده می‌شود

در این تحقیق به منظور تشخیص نقاط منشاء ریزش سنگی از روش حد آستانه برای شیب میانگین دامنه استفاده شد. در تعیین محل منشاء ریزش به این روش، زوایای مختلفی را می‌توان در نظر گرفت؛ به عنوان مثال قاضی پور و همکاران (۱۳۸۶) مقادیر ۴۰ و ۴۵ درجه، آیالا- کارسیدو و همکاران (۲۰۰۳) مقدار ۴۵ درجه و فراتینی و همکاران (۲۰۰۸) مقدار ۳۷ درجه را منظور نموده‌اند. ناحیه منشاء در این تحقیق به صورت دامنه‌های سنگی با شیب بیش از ۴۰ درجه در نظر گرفته شد. در شکل ۵-۱ موقعیت مناطق منشاء ریزش بر اساس دامنه‌های با شیب بیش از ۴۰ درجه قابل مشاهده است.

در برخی مطالعات به منظور ارزیابی و تفکیک دقیق‌تر مناطق منشاء ریزش سنگی از شیوه‌های متنوعی استفاده می‌شود. این شیوه‌ها بر اساس روش‌های قطعی، احتمالاتی و آماری با درجات متفاوت از لحاظ پیچیدگی هستند (Frattini et al, 2008).

اگر فرض شود شرایط کنترل کننده گسیختگی توده‌های سنگی (همچون زمین شناسی ساختاری و توپوگرافی) و شرایط کنترل کننده مسافت طی شده توسط قطعات سنگی (همچون مورفولوژی دامنه یا پوشش گیاهی) در گذر زمان ثابت است، لیست وقایع ریزش سنگی، اطلاعات خوب و غیر قابل صرف‌نظری را برای تحلیل استعداد داری وقوع ریزش فراهم می‌کند. شیوه‌هایی که بر اساس لیست وقایع ریزش سنگی تاریخی هستند، اجازه تعریف توزیع فراوانی توده‌های ناپایدار و احتمال وقوع ریزش آنها بر حسب دوره بازگشت را می‌دهد (Chau et al 2003; Copons and Vilaplana, 2008). از آن جایی که در منطقه مطالعاتی، هیچ اطلاعاتی در مورد تاریخچه ریزش سنگی وجود ندارد، لذا استفاده از چنین روشی برای پهنه بندی استعداد داری وقوع ریزش سنگی در این محل مقدور نمی‌باشد.

روش‌های قطعی ارزیابی استعداد داری وقوع ریزش سنگی، بر اساس محاسبه ضریب اطمینان با روش‌های تعادل حدی ساده می‌باشد (Hoek and Bray, 1981). تعیین استعداد داری وقوع ریزش در مقیاس منطقه‌ای بر اساس مدل سازی آماری فاکتورهای کنترل کننده بسیار به ندرت به کار رفته است (Marquinez et al, 2003; Chau et al, 2004).

۵-۲-۲- تعیین محل توقف قطعات ریزشی

همه نقاط بین پرتگاه یا منشاء ریزش و محل توقف قطعات ریزشی، مستعد اصابت قطعات سنگی است و این می‌تواند باعث ایجاد خسارت شود. بدیهی است که احتمال برخورد قطعات در زون‌های بالاتر بیشتر است (Ayala-carcedo, et al, 2003). بنابراین تعیین محل توقف قطعات ریزشی به منظور تعیین پهنه در معرض خطر ضروری است.

طبق تعریف رویلر و همکاران (۱۹۹۸)، احتمال دسترسی قطعات به یک نقطه عبارت است از فراوانی (بر حسب درصد یا احتمال) قطعات ریزشی‌ای که به آن نقطه می‌رسند یا از آن عبور می‌کنند. خط حد دسترسی، خطی است که از به هم پیوستن نقاط دارای احتمال دسترسی یکسان به وجود آمده است.

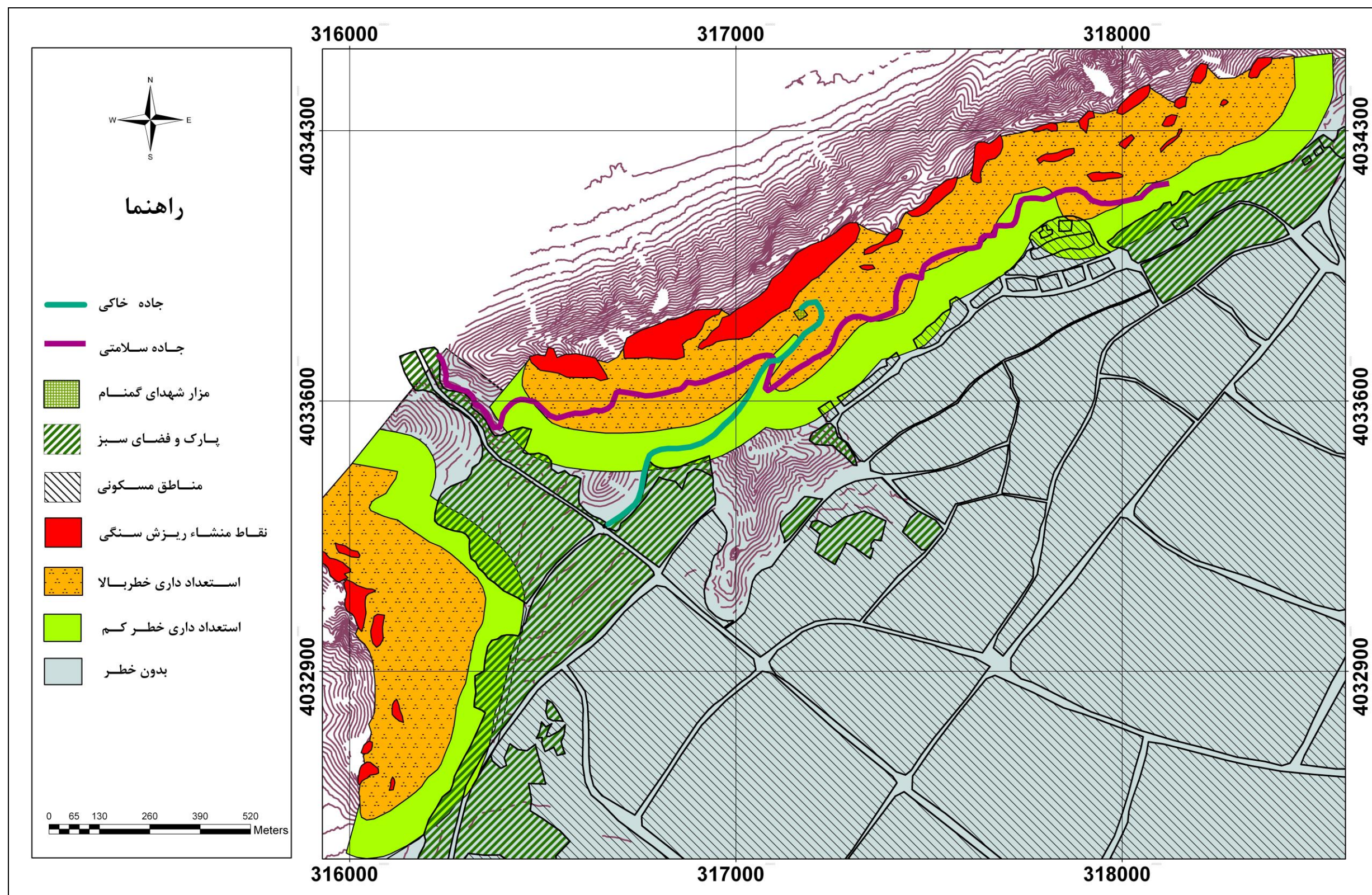
خطر ناشی از انتشار ریزش سنگی شامل احتمال دسترسی قطعات ریزشی به هر نقطه و شدت ریزش در هر نقطه است. این خطر توسط مدل سازی رفتار دینامیکی ریزش‌های سنگی (با درجات مختلف پیچیدگی) مورد بررسی قرار می‌گیرد. دینامیک ریزش سنگی با استفاده از روش‌های تجربی مانند روش مخروط سایه، (Evans and Hungr, 1993) و شبیه سازی سقوط آزاد، برخورد، جهش و حرکات غلتشی با استفاده از مدل سازی‌های سینماتیک (Stevens, 1998)، هیبرید (Pfeiffer and Bowen, 1989) و مدل‌های ریاضی دینامیک (Descouedres and Zimmermann, 1987; Bozzolo et al, 1995; Azzoni et al, 1988) در محیط‌های دو و سه بعدی، توصیف شده‌اند. کارهای اندکی در زمینه محاسبه احتمال وقوع و شدت ریزش سنگی به روش توزیع مکانی به منظور ارزیابی و پهنه بندی

ریزش سنگی انجام شده است (Dorren and Siejmonsbergen, 2003; Guzzeti et al, 2004). در مطالعه حاضر از مدل سازی سینماتیک ریزش سنگی (Stevens, 1998)، نرم افزار Rocfall، استفاده شده است.

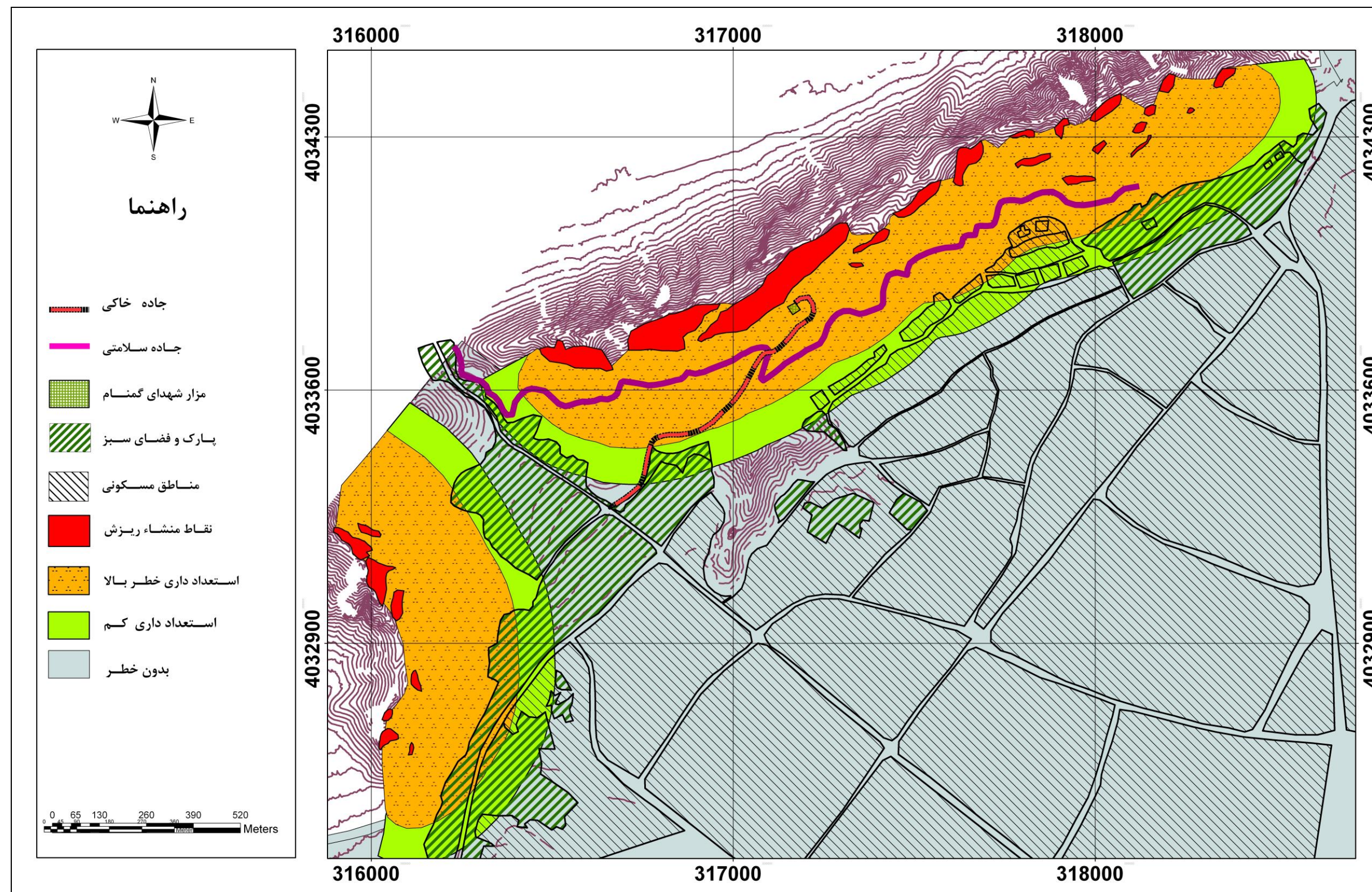
۵-۲-۳- پهنه بندی خطر ریزش سنگی

به منظور پهنه بندی خطر ریزش سنگی در منطقه مورد مطالعه پس از تشخیص نقاط منشاء یا محل وقوع ریزش سنگی، برای بررسی احتمال دسترسی قطعات ریزشی و شدت ریزش در هر نقطه، دینامیک ریزش در ۱۲ مقطع عرضی توسط نرم افزار Rocfall 4.039 شبیه سازی شد. هر چند آن طور که در فصل پیش گفته شد، بیشترین مسافت طی شده توسط قطعات رابطه خاصی با وزن و اندازه قطعات ندارد؛ اما برای یکسان سازی شرایط شبیه سازی ریزش سنگی در تمام مقاطع، وزن قطعات معادل بزرگترین قطعه‌ای که بر اساس داده‌های صحرایی به دست آمده است (۲۱۳ تن) فرض شد.

در این تحقیق پهنه بندی منطقه مورد مطالعه مشابه آیالا- کارسیدو (۲۰۰۳) به دو روش انجام شد. هر دو روش، بر اساس مسافت طی شده توسط قطعات ریزشی می‌باشد با این تفاوت که آیالا- کارسیدو این مسافت‌ها را از بازدیدهای صحرایی گردآوری نموده است، اما در مطالعه حاضر این مسافت‌ها توسط شبیه سازی پدیده ریزش به دست آمده است. روش اول بر اساس بیشترین مسافت طی شده توسط قطعات در هر مقطع می‌باشد. روش دوم بر اساس بیشترین مسافت طی شده توسط قطعات در کل منطقه مورد مطالعه (تمام مقاطع) است. برای هر دو روش مناطق مختلفی از خطر تعریف شد. شکل ۵-۱ پهنه بندی منطقه مورد مطالعه بر اساس روش اول و شکل ۵-۲ پهنه بندی بر اساس روش دوم می‌باشد. در هر دو شکل نقشه پهنه بندی خطر با نقشه کاربری اراضی منطقه ترکیب شده است و محل‌هایی که در پهنه‌های تعیین شده واقع شده‌اند، قابل مشاهده است. مناطق پهنه بندی شده در هر دو روش عبارتند از:



شکل ۵-۱: پهنه بندی خطر ریزش سنگی به روش اول (بر اساس بیشترین مسافت طی شده در هر مقطع توسط قطعات)



شکل ۵-۲: پهنه بندی خطر ریزش سنگی در منطقه مورد مطالعه به روش دوم اساس بیشترین مسافت طی شده در کل منطقه (بر اساس نتایج شبیه سازی).

۱- منطقه با استعداد داری خطر بالا: منطقه ما بین نقاط منشاء ریزش سنگی و خط توقف قطعات سنگی (حاصل از اتصال نقاط توقف قطعات سنگی در هر مقطع). این محدوده در معرض اصابت قطعات سنگی است. نقاط مرتفع تر، بیشتر در معرض خطر هستند. تا حد امکان باید از استفاده از این زون اجتناب نمود. در مواردی که اجتناب امکان پذیر نیست، باید اقدامات لازم جهت کاهش خطر و ریسک ناشی از ریزش صورت گیرد. در نقشه پهنه بندی به روش اول (شکل ۵-۱) مشاهده می شود که در این پهنه جاده سلامتی، مزار شهدای گمنام (که در حال گسترش و تکمیل است) و همچنین جاده دسترسی به آن در این پهنه واقع شده است. اما در نقشه پهنه بندی به روش دوم (شکل ۵-۲)، علاوه بر موارد ذکر شده فضای سبز واقع در شمال هتل جهانگردی، تعدادی منازل مسکونی پایین دست جاده سلامتی (در مقاطع ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱)، بخشی از فضای سبز حاشیه جنوبی محل تفریحی آبشار و حاشیه غربی جاده کاج نیز در این محدوده قرار می گیرد.

۲- منطقه با استعداد داری خطر کم: این محدوده با عرض ۱۰۰ متر از مرز منطقه با استعداد داری خطر بالا قرار دارد. این پهنه در روش اول پهنه بندی (شکل ۵-۱) فضای سبز واقع در شمال هتل جهانگردی، مناطق مسکونی در پایین دست جاده سلامتی (در مقاطع ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱)، بخشی از فضای سبز حاشیه جنوبی محل تفریحی آبشار و حاشیه غربی جاده کاج را در بر می گیرد در حالی که در روش دوم پهنه بندی (شکل ۵-۲) علاوه بر موارد ذکر شده هتل جهانگردی و پارک آزادی، حاشیه شمالی مجتمع آبشار، جاده کاج و حاشیه شرقی آن به همراه بخش هایی از مجتمع ورزشی استخر فجر در همین پهنه قرار دارند.

۳- منطقه بدون خطر: نقاطی که پایین تر از منطقه با استعداد داری خطر کم قرار گرفته اند جزء این پهنه محسوب می شود. در این پهنه در مواقع وقوع ریزش نیز هیچ خطری وجود ندارد.

با توجه به نقشه‌های پهنه بندی به هر دو روش می‌توان دریافت که روش دوم روشی محافظه کارانه‌تر است به طوریکه مناطقی که در نقشه تهیه شده به روش اول در هر پهنه‌ای قرار گرفته باشند در نقشه تهیه شده به روش دوم در پهنه‌ای با یک درجه خطر بالاتر قرار دارد. لذا به نظر می‌رسد برای مدیریت خطر ریزش سنگی در مناطق شهری با توجه رویکرد محافظه کارانه مدیران شهری نقشه پهنه بندی خطر که با روش دوم تهیه شده مناسب‌تر است.

۵-۳- روش‌های پیشنهادی اصلاح دامنه در منطقه مطالعاتی

برای مدیریت خطر ریزش سنگی در منطقه مورد مطالعه عمل به موارد زیر پیشنهاد می‌گردد:

- ۱- اجتناب از ساخت و ساز جدید در پهنه‌های خطر به خصوص پهنه با استعداد داری خطر بالا.
- ۲- انجام روش‌های مناسب جهت تثبیت دامنه به منظور جلوگیری از گسیختگی قطعات سنگی و کاهش خطر موجود برای سازه‌های واقع در پهنه‌های خطر با روش‌هایی همچون لقی گیری و شاتکریت و استفاده از وسایلی مانند توری سیمی، و مهار کابلی.
- ۳- به کار گیری وسایل حفاظتی همچون دیوارهای حائل، فنس‌های ارتجاعی و غیر ارتجاعی، خاکریز و کانال ضربه گیر جهت جلوگیری از ادامه حرکت قطعات فرو ریخته و در حال حرکت در پهنه‌های خطر به منظور کاهش ریسک ریزش سنگی. در نزدیکی مقطع شماره ۷ که مزار شهدای گمنام به طور جدی در معرض خطر قرار دارد و در پهنه با خطر بالا واقع شده است به طوری که در صورت وقوع ریزش، چند متر قبل از مزار شهدا به علت ارتفاع و شیب زیاد دامنه، ارتفاع جهش بیش از ۵ متر خواهد بود. در صورت ریزش قطعاتی با وزن معادل بزرگترین قطعه در این مقطع (۳۹ تن)، انرژی جنبشی در محل برخورد با مزار شهدا برابر با ۲۰ مگاژول خواهد بود اما اگر ابعاد قطعات ریزشی معادل بزرگترین قطعه در کل منطقه (۲۱۳ تن) باشد انرژی جنبشی به ۱۱۰ مگاژول خواهد رسید. بنابر این در صورت احداث خاکریز در ۵ متر قبل مزار شهدا ارتفاع آن باید حداقل ۵/۵ متر باشد و ظرفیتی

معادل حداقل ۱۲۰ مگاژول باشد. در این مورد دیوار حائل بسیار ناکارآمد است زیرا به علت بالا بودن ضریب ارتجاعی آن، ارتفاع جهش قطعات افزایش می‌یابد. البته در مورد خاکریز نیز به علت بالا بودن هزینه‌های ساخت و نگهداری و همچنین در مواردی عبور قطعات سنگی از فراز آن، استفاده از شاتکریت و بتن پاشی و توری سیمی و میل مهار نیز بسیار مهم و کارآمد خواهد بود.

در مقطع شماره ۱۱ که منازل مسکونی دقیقاً در محل توقف سنگ‌ها (با شبیه سازی ریزش توسط نرم افزار Rocfall) بنا شده‌اند نیز باید دیوار حائل (از جنس مواد با ضریب ارتجاعی بالا همچون بتون) یا خاکریز (مواد با ضریب ارتجاعی پایین) قبل از رسیدن قطعات به منازل احداث شود. در صورت ریزش قطعات با ابعاد معادل بزرگترین قطعه در منطقه (۲۱۳ تن)، ارتفاع جهش قطعات صفر است اما انرژی جنبشی در این نقطه حدوداً ۱۲ مگا ژول خواهد بود و شبیه سازی احداث دیوار و خاکریز در نرم افزار Rocfall نشان می‌دهد که برای متوقف کردن قطعات سنگی، این سازه‌های حفاظتی باید در فاصله ۱۰ متری قبل از برخورد قطعات با منازل احداث شوند و حداقل دارای ظرفیتی معادل ۱۷ مگاژول باشند، حداقل ارتفاع آنها باید ۲ متر در نظر گرفته شود.

۴- تغییر کاربری اراضی و همچنین ایجاد فضای سبز در پهنه با استعداد داری خطر کم به منظور متوقف کردن قطعات ریزشی و کاهش ریسک ناشی از خطر ریزش.

فصل ششم
نتیجه گیری و
پیشنهاده‌ها

۶-۱- مقدمه

در تحقیق حاضر ناپایداری دامنه‌های سنگی ارتفاعات شمال غربی شهر شاهرود مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت.

برای انجام این تحقیق نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰ منطقه تهیه شد و مطالعات درزه نگاری در ۱۲ مقطع انجام گرفت. با استفاده از این داده‌ها ناپایداری دامنه‌ای توسط نرم افزار Dips 5.103 به روش استریوگرافیک و نرم افزار Swedge 4.078 به روش تعادل حدی مورد ارزیابی قرار گرفت. در مرحله بعد مکانیسم پدیده ریزش سنگی در تمامی مقاطع مورد مطالعه، توسط نرم افزار Rocfall 4.039 شبیه سازی شد سپس با استفاده از نتایج این شبیه سازی، خطر ریزش سنگی در منطقه مورد مطالعه پهنه بندی شد.

۶-۲- زمین شناسی و مطالعات درزه نگاری

جهت بررسی دقیق منطقه، نقشه زمین شناسی در مقیاس ۱/۱۰۰۰۰ تهیه شد. در این نقشه (نسبت به نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ شاهرود) علاوه بر دقیق تر شدن محل کنتاکت سازندها، سنگ آهک‌های محل نیز به صورت دو سازند آهکی لار و دلیچای تشخیص داده شده است، به طوری که بخش‌های صخره‌ای و دیواره‌ها (به طور کلی ستیغ‌ها) متعلق به سازند لار و بخش‌های کم شیب‌تر و کم ارتفاع‌تر در منطقه متعلق به سازند دلیچای است. به علاوه رخنمون سازند شمشک نیز در این نقشه مشاهده می‌شود. گسل‌های مهم منطقه شماره گذاری شده و خصوصیات آنها ذکر شده است. بزرگترین زلزله ممکن در منطقه بر اساس طول بزرگترین گسل موجود (تراست شاهرود) معادل ۶/۲ ریشتر است. تحلیل خطر زلزله به طور تعیینی برای چنین زلزله‌ای انجام شد و شتاب افقی ناشی از آن $0.35g$ برآورد شد و برای بررسی و تحلیل ناپایداری و شبیه سازی ریزش سنگی در شرایط دینامیک مورد استفاده قرار گرفت.

خصوصیات دسته درزه‌ها شامل شیب و جهت شیب، فاصله داری، میزان باز شدگی، نوع پر شدگی، زبری سطح درزه و استحکام فشاری آنها طی بازدیدهای مکرر صحرایی در ۱۲ مقطع برداشت گردید.

۶-۳- تحلیل پایداری دامنه

در مرحله ارزیابی مقدماتی تحلیل ناپایداری، از روش استریوگرافیک استفاده شد. در این مرحله پس از وارد نمودن درزه‌ها به نرم افزار Dips 5.103، با توجه به موقعیت آنها نسبت به یکدیگر و نسبت به دامنه، نوع ناپایداری محتمل تشخیص داده شد. در مقاطع ۱، ۲، ۳، ۵، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۱ احتمال لغزش گوه‌ای، و در مقاطع ۲، ۴، ۸، ۱۰ و ۱۲ احتمال واژگونی وجود دارد.

در مرحله بعد احتمال گسیختگی گوه‌ای در مقاطع ۱، ۲، ۳، ۵، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۱ توسط نرم افزار Swedge 4.078 مورد تحلیل قرار گرفت. به این منظور احتمال گسیختگی در دو حالت حضور ترک کششی و عدم حضور آن شبیه سازی شد و در هر کدام از این حالات احتمال گسیختگی به چهار صورت محاسبه شد که عبارتند از: ۱- عدم احتمال نیروی خارجی، ۲- اعمال فشار آب اشباع، ۳- اعمال شتاب زلزله ($0.35g$) و ۴- اعمال شتاب زلزله ($0.35g$) و فشار آب اشباع با هم. بیشترین میزان احتمال گسیختگی در حالت ۴ مشاهده شد به طوری که در این حالت در صورت عدم حضور ترک کششی، در اکثر مقاطع احتمال گسیختگی به ۱ می‌رسد یعنی ضریب اطمینان تمام قطعات کمتر از ۱ است. در عدم حضور ترک کششی نیز در حالت ۴ باز هم بیشترین احتمال گسیختگی را ایجاد می‌کند. در این وضعیت بیشترین احتمال گسیختگی مربوط به مقطع ۸ است یعنی این مقطع پر خطرترین مقطع در منطقه است که با توجه به بازدیدهای صحرایی که حاکی از وجود دیواره‌های پر شیب و حتی عمودی است، چنین نتیجه‌ای قابل انتظار است. مزار شهدای گمنام و جاده سلامتی در پای این مقطع قرار دارد.

۶-۴- شبیه سازی مکانیسم ریزش سنگی

مکانیسم ریزش سنگی در مقاطع مختلف به ۳ روش توسط نرم افزار Rocfall 4.039 شبیه سازی شد. در روش اول شبیه سازی ریزش قطعات بدون سرعت اولیه انجام شد. در روش دوم و سوم سرعت اولیه قطعات ریزشی با فرض وقوع بزرگترین زلزله ممکن در منطقه $1/21$ متر در ثانیه در نظر گرفته شد.

در روش دوم وزن قطعات معادل وزن‌های محاسبه شده برای هر مقطع است اما در روش سوم وزن قطعات سنگی در همه مقاطع معادل بزرگترین قطعه در تمام منطقه در نظر گرفته شد.

نتایج روش اول حاکی از این است که بیشترین مسافت طی شده مربوط به مقطع ۳ و ۱۱ و معادل ۳۲۸ متر است و بیشترین ارتفاع پرش در مقطع ۳ مشاهده شده که معادل ۱۳/۳ متر می‌باشد. همچنین بیشترین انرژی جنبشی و سرعت انتقالی متعلق به مقطع ۷ است که به ترتیب برابر با ۲۱/۱ مگا ژول و ۲۹/۲ متر در ثانیه است. در روش دوم بیشترین مسافت طی شده مربوط به مقطع ۳ و معادل ۳۳۴ متر است. بیشترین ارتفاع پرش برابر با ۱۲/۹ متر و بیشترین سرعت انتقالی معادل ۳۳ متر بر ثانیه نیز مربوط به همین مقطع می‌باشد. بیشترین انرژی جنبشی قطعات مربوط به مقطع ۵ و معادل ۹۴۰ مگا ژول است. مقایسه این دو روش نشان می‌دهد که در شبیه سازی ریزش سنگی توسط نرم افزار Rocfall 4.039 با افزایش وزن قطعه تغییر محسوسی در میزان مسافت طی شده، ارتفاع جهش و سرعت انتقالی ایجاد نمی‌شود و تنها روی میزان انرژی جنبشی اثر می‌گذارد و به شدت افزایش می‌یابد.

۵-۶- پهنه‌بندی خطر ریزش سنگی

با استفاده از نتایج شبیه سازی ریزش سنگی منطقه به دو روش پهنه بندی شد. در هر دو روش منطقه به چهار پهنه تقسیم شد که عبارتند از: ۱- پهنه با استعداد داری خطر بالا (نقاط منشاء ریزش سنگی هستند)، ۲- پهنه با استعداد داری خطر متوسط (محدوده ما بین نقاط منشاء ریزش سنگی و محل توقف قطعات سنگی است)، ۳- پهنه با استعداد داری خطر کم (پهنه با عرض ۱۰۰ متر در پایین پهنه با استعداد داری خطر متوسط) و ۴- پهنه بدون خطر.

پهنه بندی به روش اول بر مبنای بیشترین مسافت طی شده در هر مقطع است که توسط شبیه سازی ریزش به دست آمده است (شکل ۵-۱). روش دوم پهنه بندی بر اساس بیشترین مسافت طی شده در کل منطقه می‌باشد که توسط شبیه سازی ریزش به دست آمده است.

از آن جایی که مدیران شهری جهت مدیریت خطر علاقمند هستند از روش‌های محافظه کارانه استفاده کنند لذا استفاده از نقشه پهنه بندی به روش دوم که روشی محافظه کارانه‌تر است، مناسب‌تر خواهد بود.

۶-۶- پیشنهادها

در راستای تکمیل مطالعات انجام شده و ارائه راهکارهای مناسب برای مدیریت خطر ریزش سنگی و کاهش پیامدهای ناشی از این پدیده در پهنه‌های مختلف، موارد زیر پیشنهاد می‌شود.

۱- در محدوده‌های خطر از هر گونه ساخت و ساز پرهیز شود و این محدوده به فضای سبز اختصاص داده شود.

۲- به منظور جلوگیری از جدایش قطعات سنگی و تثبیت صخره، از توری سیمی و شاتکریت می‌توان استفاده نمود. به عنوان مثال در نزدیکی مقطع هفت که مزار شهدا قرار دارد این امر بسیار لازم و ضروری است.

۳- جهت حفاظت از مناطق مسکونی تحت خطر می‌توان از دیوار سنگی و خاکریز استفاده نمود. احداث خاکریز با ارتفاع ۵/۵ متر و ظرفیت ۱۲۰ مگاژول در نزدیکی مقطع ۷ و در ۵ متر قبل از مزار شهدا و همچنین احداث خاکریز یا دیوار حائل با ارتفاع ۲ متر و ظرفیت ۱۷ مگاژول در مقطع ۱۱ پیشنهاد می‌شود.

۴- جهت حفاظت و حفظ ایمنی جاده سلامتی توصیه می‌گردد که مناطق بحرانی لق گیری شده و یا با احداث دیوار کوتاه حفاظت گردد.

منابع

منابع فارسی

آیین نامه طرح ساختمانها در برابر زلزله، استاندارد ۲۸۰۰، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران، چاپ چهارم.

احمدی ج، (۱۳۸۶)، پایان نامه ارشد، "تحلیل پایداری شیروانی مشرف به نیروگاه گتوند علیا از دیدگاه پدیده سقوط بلوکهای سنگی" دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود.

ارژنگ روش ب، (۱۳۶۲) "بررسی و مطالعه سنگ ریزشها و زمین لغزش روستای تنوره واقع در بخش رودبار الموت قزوین" گزارش سازمان زمین شناسی کشور.

امانی پور ح، (۱۳۸۳)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "بررسی مکانیسم سقوط سنگ و پهنه بندی خطر در روستای اسفیدان"، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد.

ایرانمنش م. ح، شاه بیگ ا، (۱۳۶۶) "مطالعه لغزش و ریزش در جاده ایلام- مهران" گزارش سازمان زمین شناسی کشور.

بلورچی م. ج، محمودپور م، کریم نژاد س، شمشکی ا، (۱۳۸۵) "گزارش بررسی خطر سنگ ریزش در جاده چالوس" سازمان زمین شناسی کشور، گزارش شماره: ۸۵-۱-۱. En Geol

تاروردیان م، (۱۳۸۶)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "بررسی ناپایداری شیبهای سنگی و کارهای اصلاحی روی جاده اورامانات"، دانشکده مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

تاروردیان م، (۱۳۸۶)، سمینار کارشناسی ارشد، "اصلاح و پایداری شیبها"، دانشکده مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران.

جعفر گندمی آ، (۱۳۸۰)، "تحلیل پایداری شیبها با استفاده از مجموعههای فازی" مجموعه مقالات اولین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، چاپس اول، مجدی ع و قزوینیان ع، انجمن مکانیک سنگ ایران، تهران، ص ۲۰۹-۲۱۴.

خاکباز م، (۱۳۸۰)، بررسی های ژئومکانیکی توده سد کارون ۴، ص ۳-۱۳، "مجموعه مقالات اولین کنفرانس مکانیک سنگ ایران"، چاپ اول، مجدی ع و قزوینیان ع، انجمن مکانیک سنگ ایران، تهران.

حافظی مقدس ن، (۱۳۷۲)، پایان نامه کارشناسی ارشد، "پهنه بندی خطر لغزش در مناطق زلزله خیز مطالعه موردی زمین لغزه های تحریک شده در زلزله خرداد ۱۳۶۹ منجیل"، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس.

درویش زاده ع، (۱۳۷۰) "زمین شناسی ایران" انتشارات نشر روز دانشگاه.

رضایی ح، (۱۳۶۹) "ریزش در نزدیکی دهانه جنوبی تونل شماره ۹ جاده هراز" گزارش سازمان زمین شناسی کشور.

سازمان برنامه و بودجه، (۱۳۷۸)، "دستورالعمل برداشت صحرایی گسستگی های سنگ در کارهای مهندسی و سد سازی"، نشریه ۱۸۹، وزارت نیرو.

شاه بیگ ا، نمازی فرد ح، اسکویی ا، (۱۳۶۸) "مطالعه زمین لغزش در روستاهای لیوانلو و خانقاه از توابع میانه و علت تخریب منازل مسکونی" گزارش سازمان زمین شناسی کشور.

شاه بیگ ا، فروغی ه، (۱۳۶۸) "مطالعه زمین لغزش، سنگ ریزش و علت تخریب منازل مسکونی در روستاهای کلک نقی، سیاب و رویش، وری و گرآن خوشادول از توابع بخش اركواز ملكشاهی استان ایلام" گزارش سازمان زمین شناسی کشور.

شریعت جعفری، م، ۱۳۷۵، "زمین لغزش (مبانی و اصول پایداری شیب های طبیعی)" چاپ اول.

طاهریان، ع، ۱۳۸۱، "مهندسی سنگ کاربردی" انتشارات امیرکبیر.

گیاهی یزدی. ح، ۱۳۷۸، مطالعه سنگ شناسی و محیط رسوبی سازندهای دلیچای و لار در ناحیه البرز شرقی (غرب شاهرود)، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران شمال.

فاروق حسینی م، (۱۳۸۴) "درآمدی بر مکانیک سنگ" چاپ سوم، نشر کتاب دانشگاهی، تهران.

قاضی پور ن، ارومیه‌ای، ع، انتظام ا، انصاری ف، پیروز م، (۱۳۸۶) "استفاده از نظریه مخروط افت در ارزیابی خطر سنگ ریزش در مسیر جاده چالوس (پل زنگوله- مرزن آباد)" مجله علوم زمین، ۶۶، ۱۶۹-۱۶۰.

قزوینیان ع، (۱۳۸۲) "تعادل حدی روش مناسب جهت تحلیل پایداری سطوح شیبدار" دوره آموزشی تحلیل و پایدار سازی شیب‌ها،

مساواتی ا، (۱۳۷۰)، "مطالعات اجمالی خاکشناسی و طبقه بندی اراضی منطقه شاهرود"، موسسه تحقیقات خاک و آب.

محمدی راد م و یزدان پناه ش، (۱۳۸۰) "تخمین معیار شکست خش لغزه‌های گسل سنگی بر اساس رطوبت و زبری"، ص ۴۱-۵۰، مجموعه مقالات اولین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، چاپ اول، مجدی ع و قزوینیان ع، انجمن مکانیک سنگ ایران، تهران.

مزيجانی ح، کریمی نسب س، (۱۳۸۶) "برآورد مقاومت برشی درزه‌ها با استفاده از روش تجربی و نتایج آزمایشگاهی در معدن گل گهر سیرجان" سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران.

معماریان ح، (۱۳۷۴) "زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک" انتشارات دانشگاه تهران، چاپ چهارم.

وزیری. ح، مجیدی فرد. م، سعیدی. ع، ۱۳۸۰، نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ شاهرود، انتشارات سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

منابع لاتین

Alejano L. R., Pons B., Bastante F.G., Alonso E., Stockhausen H.W., (2007) "Slope geometry design as means for controlling rockfalls in quarries" International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 44, 903-921.

Amberseys, N.N., Melville, C.P., (1982) "A history of Persian Earthquakes" Cambridge Earth Science series.

Ayala-carcedo, F., Cubillo-nielsen, S., Alvarez, A., Dominguez, M., Lain, L., Lain, R., Ortiz, G., (2003) "Large scale rockfall reach susceptibility maps in La Cabrera sierra (Madrid) performed with GIS and dynamic analysis at 1/5000" Natural Hazard, 30, 325-340.

- Azzoni A., Barbera G.L., Zaninetti A., (1995) "Analysis and prediction of rockfall using a mathematical model" *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science* 32, 709-24.
- Azzoni A., Freitas M. H., (1995) "Experimentally gained parameters", *Disive for rockfall analysis* *Rockmechanics and Rock Engineering*, 28(2), pp 111-124.
- Barton, N., Choubey, V., (1977) "The shear strength of rock joints in theory and practice", *Rock Mech*, 10, 1-54.
- Barton. N., (1973) "Review of a new shear strength criterion for rock joints", *Eng Geol*, 7, 278-332.
- Boli, Y.J., Tanashi, Y., (2006) "Estimation the relation between surface roughness and mechanical properties of rock joints" *International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences*, 43, 837-846.
- Bozzolo D., Pamini R., (1986) "simulation of rockfalls down a valley side". *Acta Mechanica* 63, 113-30.
- Bozzolo D., Pamini R., Hutter K., (1988) "Rockfall analysis –a mathematical model and its test with field data" *Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides in Lausanne*. Rotterdam: Balkema, 555-60.
- Cai, M., Kaiser, P. K., Taska, Y., Minima, M., (2007) "Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system" *International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences*, 44, 247-265.
- Chau K.T., Wong R.H.C., Liu J., Lee C.F., (1999) "Shape effects on the coefficient of restitution during rockfall impacts" *Ninth International Congress on Rock Mechanics*, ISRM Congress, Paris, p.541-44.
- Chau, K. T., Tang, Y.F., Wong, R. H. C., (2004) "GIS based rockfall hazard for Hong kong" *International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences*, 41, 745-752.
- Chau, K. T., Wong, R. H. C., Liu, J., Lee, C. F., (2003) "Rockfall hazard analysis for Hong Kong based on rockfall inventory" *International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences*, 36(5), 383-408.
- Chaua, K. T., Wonga, R. H. C., Wub, J. J., (2002) *Coefficient of restitution and rotational motions of rockfall impact*.
- Copons, R., Vilaplana, J.M., (2008) "Rockfall susceptibility zoning at a larger scale: from geomorphological inventory to preliminary land use planning" *Engineering geology*, 102, 142-151.
- Cruden, D. M., Hu, X. Q., (1988) "Basic friction angle of carbonate rocks from Kananaskis county, Canada" *Dulletin of Engineering geology and the Environment*, 55-59

- Deere, D.U., Miller, R. P., (1966) "Engineering classification and index properties for intact rock. Technical report No. AFNL-TR-65-116. Air force weapons laboratory, New Mexico.
- Descoeudres F., Zimmermann T., (1987) "Three-dimensional dynamic calculation of rockfalls", in Herget G. Vongpasial S, editors, Proceedings of the Sixth International Congress on Rock Mechanics. Montreal.
- Dorren, L. K. A., (2003) "A review of rockfall mechanics and modelling approaches" Progress in Physical Geography, 27(1), 69-87.
- Dorren, L. K. A., Seijmonsbergen, A. C., (2003) "Comparison of three GIS-based models for predicting rockfall runout zones at a regional scale" Geomorphology, 56, 49-64.
- Evans S.G., Hungr O., (1993) "The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes" Canadian Geotechnical Journal 30, 620-636.
- Frattoni, P., Crosta, G., Carrara, A., Agliardi, F., (2008) "Assessment of rockfall susceptibility by integrating statistical and physically-based approaches" Geomorphology, 94, 419-437.
- Gascuel J.D., Cani- Gascuel M.P., Desbrun M., Leroi E., Mirgon C., (1998) "Simulating landslides for natural disaster prevention" In Arnaldi B. Hergon G. editors, computer animation and simulation 98. Proceedings of the Eurographics Workshop, Lisbon, 31 August- 1 September 1998. Springer VERLAG, 1- 12.
- Giacomini A., Buzzi O., Renard B., Giani G.P., (2009) "Experimental studies on fragmentation of rock falls on impact with rock surfaces" International Journal of Rock Mechanics and Mining Science 46, 708-715.
- Giani G.P., Giacomini A., Miglizza M., Segalini A., (2004) "Experimental and Theoretical Studies to Improve Rock Fall Analysis and Protection Work Design" Rock Mechanics and Rock Engineering, 37, 369-389.
- Giani, G.P., (1992) "Rock Slope Stability Analysis" Rotterdam, Balkema.
- Groneng, G., Nilsen, B., Sandven, R., (2008) "Shear strength estimation for Aknes sliding area in western Norway" International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences, 45, 1-10.
- Guzzetti, F., Reichenbach, P., Ghigi, S., (2004) "Rockfall hazard assessment along a transportation corridor in the Nera valley, central Italy" Environmental Management, 34(2), 191-208.
- Heim A., (1932) "Bergsturz und Menschenleben" Beiblatt zur Vierteljahrsschrift der Naturforschenden Gesellschaft in Zurich 77, pp 218

- Hoek E., Bray J.W., (1981) "Rock Slope Engineering" ,Revised 3rd edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp 341-351.
- Hoek E., Brown E.T., (1981) "Rock Slope Engineering" Institution of Mining and Metallurgy, London.
- <http://www.Rocscience.com/support/pdf/RF-FAQ3.pdf>.
- Hunger O., Evans S.G., (1998) "Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards" Proceedings of the 5th International Symposium on Landslides in Lausanne. Rotterdam: Balkema, 685-90.
- Joyner, W.B., Boore, D.M., (1988) "Measurement, characterization, and predication of strong ground motion" in Earthquake Engineering and soil Dynamics II- Recent Advances in Ground-motion Evaluation, Geotechnical Special Publication 20, ASCE, New York, 43-102.
- Kobayashi Y., Harp E.L., Kagawa T. (1990) "simulation of rockfalls triggered by earth-quakes" Rock mechanics and Rock Engineering 23,1-20.
- Lan, H., Martin, C. D., Lim, C. H., (2007) "RockFall analyst: A GIS extension for three-dimensional and spatially distributed rockfall hazard modeling" Computers & Geosciences, 33, 262-279.
- Marquinez, J., Menendez Duarte, R., Faias, P., Jemenez Sanchez, M., (2003) "Predictive GIS- based model of rockfall activity in mountain cliffs" Natural Hazards, 30, 341-360.
- Marussich D., Zini L. Devoto S., (2008) "Rockfall hazard evaluation and Risk management: an example of a comprehensive approach in northern Italy" Geophysical Research Abstracts 10, EGU 2008-A-01881,2008.
- Menendez Duarte, R., Marquinez, J., (2002) "The influence of environmental and litologic factors on rockfall at a regional scale: an evaluation using GIS" Geomorphology, 43, 117-136.
- Ortigao, J., Sayao, A., (2004) "Handbook of slope stabilsation" Springer, 487 P.
- Patton, F.D., (1966) "Multiple of shear failure in rock, proc".1st international congress of rock mechaniscs Lisbon, vol 1, 509-513.
- Peilla D., Oggeri C., Castiglia, C., (2007) "Ground reinforced embankment for rockfall protection: designe and evaluation of full scale test" Landslides 4, 255-265.
- Pfeiffer T.J., Bowen T.D., (1989) "Computer simulation of rockfalls" Bulletin of the Association of Engineering Geologists XXVI(1), 135-46.
- Rapp A., (1960) "recent development of mountain slopes in Karkevagge and surroundings, northern Scandinavia" Geografiska Annaler 42, 65-200.

- Ritchie A.M., (1963) "Evaluation of rock fall and its control" Highway Res. Rec. 17, HRB, National Research Council, Washington, D.C., 13-28.
- Rouiller J.D., Jaboyedoff M., Marro Ch. Philippossian F., Mamin M., (1998) "Pentes instables dans le Pennique valaisan. Rapport final du Programme National de Recherche PNR" 31/CREALP, 98. vdf Hochschulverlag AG and ETH, Zurich.239pp.
- Seyed –Emami. K., Alavi-Naini. M., (1990), "Bajocian stage in Iran-Mem". Descr.certa Geol. Dltalla, 40:215-221, 3 flgs, 2tab.
- Shaqur, F.M., Jarar, G., Hencher, S., Kuisi, M., 2008, "Geotechnical and mineralogical characteristics of marl deposits in Jordan"., Environ Geol, 55, 1777-1783.
- Statham I., (1979) "A simple dynamic model of rockfall: some theoretica principles and field experiments" Int. Colloguium on Physical and Geomechanical Models, ISMES Bergamo, 237-258.
- Stevens, D., (1998) "Rocfall: A tool for Probabilistic Analysis, Design of Remedial Measures And Prediction of Rockfalls", A thesis submitted in conformity with the requirements for degree of Master of Applied Science Graduate Department of civil Engineering University of Toronto.
- Stevens, D., (2003) "Determining Input Parameters for a Rocfall Analysis".
- Stimpson, B., (1981) "A suggested technique for determining the basic friction angle of rock surfaces using core" Int J Rock Mech Min Sci Geomesh Abstr, 18:63-5.
- Tagliavini F., Richenbach P., Maragna D., Guzzetti F., Pasuto A., (2007) "A comparison of 2-D and 3-D models for the M.Salta rockfall, Vajont valley, northern Italy" Geophysical Research Abstracts 9, 02787.
- Topal, T., Akin, M., Ahmet Ozden, U., (2007) "Assessment of rockfall hazard around Afyon Castle, Turkey" Environ Geol, 53, 191- 200.
- Toppe R., (1987) "Terraian models- a tool for natural hazard mapping" In Salm B. Gubler H. editors Avalanche formation, movement and effects. IAHS Publication no. 162, 629-38.
- van Dijke J.J., van Westen C.J., (1990) "Rockfall hazard, a geomorphological application of neighbourhood analysis with ILWIS" ITC Journal 1, 40-44.
- Varnes D.J., (1978) "Slope Movements: Types and Processess" in: Landslide Analysis and Control, Edited by: Schuster R.L. Krizek R.J., Transportation Reserch Board, Special Report 176, Washington, DC, pp. 11-33.
- Wines, D.R., Lilly, P.A., (2003) "Estimates of rock joint shear strength in part of the Fimiston open pit operation in western Australia" International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences, 40, 929-937.

www. IIEES. ac. ir.

www.Rocscience.com

Yang, Z. Y., Di, C. C., Yen, K. C., (2001) “The effect of asperity order on the roughness of rockjoint” International Journal of Rock Mechanics and Mining sciences, 38, 745-752.

Yilmaz I., Yildirim M., Keskin I., (2008) “A mthod for mapping te spatial distribution of rockfall computer program analyses results using ArcGIS software” Bull Eng Geol Environ, 7, 547-554.

Yip, CH., (1977) “Shear strength and deformability of rock joint” MITLibraries document servies.

Abstract

Rock falls are the usual forms of slope instability in hill slopes. The high velocity and suddenly occurrence are the main difference of rock fall and other instability. Therefore the rock falls are among the most destructive mass movements and results to high lost of lives and heavy damage to the structures, roads, residential area, farms.... Because of the vast distributions and the high hazard level of rock fall, in recent decades, different studies and researches are performed on this phenomenon. The study of rock fall in Iran is in the beginning state but have an increasing trend. By consideration of massive mountain area and high destructive history of rock fall in Iran, the more study is necessary.

In this research, rock fall in rocky slopes of Tepal mountain in northwest of Shahrood city are investigated. The occurrence of rock fall and also the forms of block are controlled by different parameters of local climate, lithology, structures (includes of faults, main joints) and etc. In this study, for the precise geology study of area, the large scale geological map of 1:10000 is produced and joint study in 12 sections are performed. Then, the slope instability is analyzed by two methods of stereographic (using Dips 5.103 software) and numerical method (by Swedge 4.078 and rock fall 4.039 software's). The results of these methods that the all of slopes are stable in static conditions and became instable in dynamic state. In critical states of huge raining and earthquake intense instability will be occurred and the big problems could be creating for the down area of slopes. Based on the results of numerical analysis and using the Arc GIS 9.3 rock fall hazard zonation map of are produced. Also by overlaying of landslide hazard map and land use map the area affected by rock falls are distinguished. The results of this study show that Salamaty road, Mazar Shohaday Gomnam and its access road, some part of Azadi Park, Tourism hotel, some of the residential area down of the Salamaty road and some parts of Abshar Park, are located in the hazard zones. In the last section of this study, for decreasing of hazard and risk of rock fall some methods are proposed.

Key word: Rockfall, Shahrood, joint study, zonation.



Shahrood University of Technology
Faculty of Earth sciences.
M.Sc Thesis

Rockfall Hazard Zonation in Shahrood City

Kajal Heydari

Supervisor:

Dr. N. Hafezi Moghaddas

Advisor:

Dr. R. Ramezani Omali

Summer 2009