

پهنه‌بندی خطر ریزش سنگی در ارتفاعات شمال شهر شاهرود

رمضان رضانی اومالی^{۱*}، ناصر حافظی مقدس^۲ و کزال حیدری^۳

^۱ استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

^۳ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۱/۲۷ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۸/۲۰

چکیده

ریزش سنگی یکی از انواع متداول ناپایداری‌های دامنه‌ای در نواحی کوهستانی است و وجه تمایز آن با دیگر ناپایداری‌ها سرعت بالا و رخداد ناگهانی آنهاست. به همین دلایل ریزش سنگی از جمله ویرانگرترین حرکت‌های توده‌ای به شمار می‌رود و سبب از بین رفتن جان انسان‌ها و ایجاد خسارات سنگین می‌شود. در این پژوهش پایداری دامنه‌های سنگی ارتفاعات تپال در شمال باختری شهر شاهرود مورد تحلیل قرار گرفته است. برای این منظور نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰ منطقه تهیه و مطالعات درزه نگاری در ۱۲ مقطع انجام شد و با استفاده از این داده‌ها ناپایداری دامنه‌ای به دو روش استریوگرافیک توسط نرم افزار Dips 5.103 و شبیه‌سازی تعادل حدی توسط نرم افزار Swedge 4.078 مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان از پایداری دامنه‌ها در شرایط استاتیک و ناپایداری آنها در شرایط دینامیک دارد. در صورت رخداد شرایط بحرانی (بارش‌های شدید و متوالی و رخداد زمین‌لرزه‌های شدید) قطعات سنگی به شدت ناپایدار خواهند بود و خطری جدی برای پایین دست ایجاد خواهند کرد. همچنین سازوکار ریزش سنگی با استفاده از نرم‌افزار Rocfall 4.039 شبیه‌سازی، سپس نتایج آن وارد نرم‌افزار Arc GIS 9.3 و به صورت پهنه‌های با درجات مختلف خطر نشان داده شد. پس از روی هم‌اندازی نقشه کاربری اراضی منطقه و نقشه پهنه‌بندی خطر، مشخص شد که جاده سلامتی، جاده کاج و حواشی آن، مزار شهدای گمنام، هتل جهانگردی و بخش‌هایی از پارک آزادی، مناطق مسکونی پایین دست جاده سلامتی و مجتمع تفریحی آبشار در محدوده خطر قرار گرفته‌اند.

کلیدواژه‌ها: ریزش سنگی، شاهرود، پیمایش درزه، ناپایداری دامنه‌ای، پهنه‌بندی.

***نویسنده مسؤل:** رمضان رضانی اومالی

Email: ramazani43@shahroodut.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

ریزش سنگی نوع رایجی از زمین‌لغزش‌هاست که سرعت بسیار بالایی دارد. به همین دلیل ویرانگرترین حرکت‌های توده‌ای به شمار می‌آیند و سبب از بین رفتن جان انسان‌ها و آسیب به تأسیسات می‌شود؛ با وجود این تلاش‌های کمی برای تثبیت یا کاهش خطرات و ریسک همراه با آن صورت می‌پذیرد (Guzzetti et al., 2004). عوامل مستعد کننده متعددی در رخداد ریزش سنگی نقش دارند که از جمله آنها می‌توان به افزایش فشار آب حفره‌ای در توده سنگ، فرسایش مصالح در برگیرنده در زمان رخداد توفان‌های باران‌زای شدید، فرایندهای یخ‌زدن-آب شدن در اقلیم سرد، تجزیه شیمیایی و هوازدگی سنگ، زمین‌لرزه و اثر گوه‌ای ریشه درختان اشاره کرد (Varnes, 1978). توپوگرافی دامنه، سرعت اولیه، وزن و شکل قطعات و ویژگی‌های مواد سازنده شیب، چگونگی حرکت قطعات را پس از سقوط از نقطه منشأ ریزش، کنترل می‌کنند. ریزش سنگی ممکن است به صورت سقوط آزاد، جهش یا غلظش باشد که بر حسب تغییرات نیم‌رخ توپوگرافی، دو یا چند شکل ریزش سنگی ممکن است دیده شود (Topal et al., 2007). تعریف درست مسیر ریزش قطعات که به صورت طول مسیر، ارتفاع، سرعت و انرژی قطعات طی ریزش بیان می‌شود برای تعیین محل نصب سازه‌های حفاظتی مناسب ضروری است (Peilla et al., 2007). انتهای مسیر قطعات به عامل‌های زبری، شیب و ارتفاع ریزش مربوط به دامنه و سه فاکتور استحکام، شکل و حجم قطعات سنگی بستگی دارد (Ayala-carcedo et al., 2003). سختی و زبری مواد سازنده دامنه به ترتیب تعیین کننده ضرایب ارتجاعی و اصطکاک غلظشی دینامیکی هستند (Guzzetti et al., 2004).

۲- مدیریت و پهنه‌بندی خطر ریزش سنگی

اقتصادی‌ترین و سریع‌ترین روش ارزیابی وضعیت پایداری شیب‌ها و راهکارهای مناسب برای آنها، پهنه‌بندی درجه ناپایداری نسبی مناطق با استفاده از سامانه‌های مناسب ارزیابی خطر و ریسک ناپایداری است. برای این منظور از روش‌های کیفی

$$\varphi_p = JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{\delta_n} \right) + \varphi \quad \text{رابطه (۱)}$$

φ_p در دسته‌درزه‌های مختلف و در مقاطع مختلف، متفاوت بوده و میان ۴۱ تا ۵۶/۷ درجه است. به منظور برآورد حجم قطعات سنگی، مقدار تنش عمودی وارد بر سطوح درزه‌ها و در نهایت تحلیل پایداری قطعات سنگی، میزان فاصله‌داری درزه‌ها اندازه‌گیری شده است. فاصله‌داری در واحد لار که بخش بالایی ارتفاعات محل و منشأ اصلی ریزش‌ها را تشکیل می‌دهد، بیشتر بوده است و بلوک‌های بزرگ‌تری را به وجود می‌آورد بر پایه مطالعات استریوگرافی بیشترین حجم بلوک‌ها ۸۲ متر مکعب و وزن آن ۲۱۳ تن محاسبه شده است. مقاومت فشاری سطح درزه‌ها با استفاده از چکش اشمت اندازه‌گیری شده و بر پایه زاویه آزمایش و نیز چگالی مصالح، مقاومت فشاری تک‌محوری سطح درزه‌ها با استفاده از نمودار (Deere & Miller (1966) برآورد شده است.

در بیشتر موارد درزه‌ها کیپ هستند، اما بازشدگی‌های موجود، بین ۰/۵ تا ۲۰ سانتی‌متر عرض دارند و در حاشیه گسل‌ها به ۱ متر هم می‌رسد و مقدار آن در دسته‌درزه‌های کشتی بیشتر از دیگر دسته‌درزه‌هاست. در بیشتر موارد این بازشدگی‌ها دارای پرکننده رس و تا حدی املاح آهکی هستند که نشان‌دهنده استعداد بالای ریزشی قطعات است (شکل ۶؛ حیدری و همکاران، ۱۳۸۷).

با استفاده از اطلاعات درزه‌نگاری، پایداری دامنه‌ها مورد تحلیل قرار گرفت. بیشتر روش‌های تحلیلی که برای ارزیابی پایداری دامنه‌ها به کار می‌رود بر پایه تعادل حدی استوار است. از این رو به منظور مقایسه میزان پایداری دامنه، در شرایط غیر از تعادل حدی، از شاخص ضریب اطمینان (FS) و احتمال گسیختگی استفاده می‌شود. تحلیل پایداری دامنه‌های منطقه مورد مطالعه به روش استریوگرافیک در نرم‌افزار Dips 5.103 و تحلیل پایداری قطعات گوه‌ای دامنه‌ها توسط نرم‌افزار Swedge صورت گرفته است.

۴-۲. تحلیل استریوگرافیک پایداری دامنه

از روش استریوگرافیک برای تحلیل مقدماتی پایداری دامنه‌های سنگی استفاده می‌شود. به این منظور دسته‌درزه‌های اصلی، سطح دامنه و دایره زاویه اصطکاک مربوط به دسته درزه با زاویه اصطکاک کمتر با شعاع φ در نرم‌افزار Dips 5.103 رسم و نوع گسیختگی مشخص شد. در جدول ۱ وضعیت انواع ناپایداری گوه‌ای و واژگونی در مقاطع آورده شده است. وضعیت ناپایداری در تمام مقاطع مورد بررسی در شکل ۷ نشان داده شده است. برای ارزیابی حجم قطعات، سطح مقطع و ارتفاع بلوک‌ها تعیین و حجم و وزن آنها برآورد شده است.

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

۴-۳. تحلیل پایداری گوه‌ای با استفاده از نرم‌افزار Swedge 4.078

نرم‌افزار Swedge وسیله‌ای تحلیلی، سریع، محاوره‌ای و ساده برای استفاده در ارزیابی پایداری گوه‌های سطحی در شیب‌های سنگی است که به دو صورت قطعی (ضریب اطمینان) و احتمالاتی (احتمال گسیختگی) مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این نرم‌افزار از روش تحلیل جامع (Hoek & Brown (1981) و متغیرهای استحکام ناپیوستگی‌ها و فشار آب استفاده شده است. همچنین اثر نیروهای خارجی (مثلاً شتاب انفجار یا وسایل مهار کننده گوه مانند میل مهار یا پیچ سنگ) را می‌توان روی پایداری در نظر گرفت.

اطلاعات مربوط به مقادیر میانگین فشار آب روی سطوح گسیختگی را می‌توان در صحرا یا توسط برخی تحلیل‌ها برآورد کرد. در صورت نبود اطلاعات دقیق از رفتار آب در شکاف‌ها، می‌توان فرض کرد که بیشینه شرایط بارندگی سنگین رخ داده است و شکاف‌ها کاملاً از آب پر هستند. نمونه‌برداری برای هر کدام از ورودی‌های نرم‌افزار بر پایه تولید اعداد تصادفی توسط تحلیل مونت‌کارلو و یا لاتین هیپرکیوب است. می‌توان نمودارهای توزیع عامل‌های مختلف از جمله ضریب

تشخیص نواحی منشأ ریزش سنگی در ناحیه، تعیین مسیر ریزش و ارزیابی فاصله نهایی از پای شیب است. برای محاسبه پهنه مسافت طی شده از پای دامنه می‌توان از مدل‌های تجربی و متکی بر فرایند در محیط GIS استفاده کرد. به نظر می‌رسد مدل‌های متکی بر فرایند در محیط GIS، پیش‌بینی‌های بسیار دقیق‌تری از مسافت طی شده از پای دامنه ارائه می‌دهند. در مطالعه حاضر از روش متکی بر فرایند توسط نرم‌افزار Rocfall 4.039 برای شبیه‌سازی پدیده ریزش سنگی در ارتفاعات شمال شهر شاهرود استفاده، نتایج آن در محیط GIS وارد و نقشه پهنه‌بندی خطر ریزش تهیه شده است.

۳- زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی

منطقه مورد مطالعه ارتفاعات شمال باختر شهر شاهرود است. برای مطالعه دقیق‌تر نقشه زمین‌شناسی بزرگ مقیاس منطقه (۱/۱۰۰۰۰) با استفاده از عکس‌های هوایی تهیه شده است (شکل ۱). قلل و بخش مرتفع ارتفاعات، متعلق به سازند آهکی صخره‌ساز لار است. در زیر آهک لار، سازند دلیچای (تناوب آهک مارنی و مارن) قرار دارد که نسبت به فرسایش مقاومت کمتری دارد (شکل ۲). رخنمون کوچکی از شیل زغال‌دار شمشک نیز در زیر سازند لار به صورت فرسایش یافته دیده می‌شود (شکل ۳). در محل همبری سازندها اختلاف فرسایش سبب شده است که آهک‌های لار به صورت معلق در آیند. افزون بر عامل فرسایش، حضور دو گسل موازی با روند ارتفاعات، یکی در مرز سازند لار با دلیچای و شمشک و یکی درون سازند لار سبب به وجود آمدن پرتگاه‌هایی به ارتفاع ۳ تا ۴ متر شده است. تکنونیزه بودن سازندها، هوازدگی ناشی از اختلاف دمای شبانه‌روزی و وجود شمار زیاد روزهای یخبندان در طول سال و فرایند ذوب و انجماد آب در درز و شکاف‌ها سبب شده است تا پرتگاه‌های موجود استعداد بالایی برای ریزش قطعات سنگی داشته باشند. شکل ۴ نمایی از واریزه‌ها را در محل نشان می‌دهد. در برخی نقاط نیز قطعاتی بسیار بزرگ به ابعاد چند ده متر مکعب دیده می‌شود.

۴-۴. تحلیل پایداری دامنه

بیشتر روش‌هایی که امروزه برای تحلیل پایداری دامنه‌های سنگی به کار می‌رود، سنگ را ناپیوسته در نظر گرفته و رفتار آن را متأثر از گسستگی‌ها می‌دانند؛ زیرا در تنش‌های پایین که در اعماق کم وجود دارد، رفتار توده سنگ توسط شکستگی‌ها کنترل می‌شود، بنابراین مطالعات درزه آماری در منطقه صورت گرفت.

۴-۱. مطالعات درزه‌نگاری

با توجه به نقشه توپوگرافی و بازدیدهای صحرايي، ۱۲ مقطع بحرانی شناسایی شدند (شکل ۵). وجود نقاط منشأ ریزش سنگی، اصلی‌ترین معیار برای بحرانی بودن شرایط در نظر گرفته شد. از ویژگی‌های چنین مناطقی، وجود آثار گسیختگی یا کنده‌شدگی‌های پیشین، شیب تند و گاهی معلق یا شیب منفی، حضور قطعات ریزشی بسیار بزرگ در پای دامنه یا روی دامنه، وجود مناطق مسکونی در فاصله نزدیک از دامنه و ... است. ویژگی‌های درزه‌ها شامل شیب و امتداد، فاصله‌داری، درزه‌داری، پرشدگی، زبری، مقاومت فشاری سطح درزه و ... برای ۵۰ درزه در هر مقطع برداشت شد.

رخنمون‌های سنگی مورد بررسی در مقاطع مختلف دارای ۴ یا بیش از ۴ دسته درزه هستند. از نیم‌رخ‌های Barton & Choubey (1977) برای برآورد شاخص JRC سطح درزه‌ها استفاده شده است. بیشتر درزه‌ها سطحی زیر با مقادیر JRC میان ۸ تا ۱۴ دارند، اما در موارد بحرانی این مقدار به ۶ هم می‌رسد.

مقدار φ_p برای سنگ‌های منطقه بر پایه نظر (Wines & Lilly (2003) ۳۱ درجه در نظر گرفته شد. مقدار φ_p سطح درزه‌ها با توجه به مقدار φ_p و JRC، از رابطه زیر برای همه دسته‌درزه‌ها در هر مقطع برآورد شده است:

Stevens (1998) برای شبیه‌سازی سقوط سنگ ایجاد شده است. استفاده از روش تحلیل احتمالی و متغیرهای تصادفی در متغیرهای جرم، شرایط اولیه و سرعت سنگ و همچنین در متغیرهای ضرایب ارتجاعی، زاویه اصطکاک و موقعیت رتوس شیب‌ها، در شبیه‌سازی 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 بیشینه سرعت، انرژی جنبشی، ارتفاع پرش و مکان توقف سنگ در سرتاسر طول شیب است (Stevens, 1998). تحلیل احتمالاتی آن بر پایه روش مونت کارلو است. از نتایج این نرم‌افزار می‌توان برای طراحی دیوارهای حایل استفاده کرد. تغییرات جزئی در مقدار ضریب ارتجاعی تأثیرات کاملاً آشکاری در مقدار متغیرهای خروجی این برنامه از جمله ارتفاع پرش سنگ‌ها و مسافت طی شده دارد و محاسبه مقدار دقیق آن نتایج شبیه‌سازی را صحیح‌تر می‌کند (Stevens, 1998). عدم توجه به تأثیر شکل و عدم شبیه‌سازی برخورد و چگونگی 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 شبیه‌سازی سه‌بعدی رفتار قطعه سنگ و در نتیجه عدم توجه به پراکنش جانبی مسیرهای ریزش از محدودیت‌های این نرم‌افزار است.

با توجه به نتایج نرم‌افزار Swedge 4.078 پر واضح است که در شرایط استاتیک و بدون عوامل کاهنده پایداری (وجود فشار آب در درزه‌ها و نیروی شتاب زمین لرزه) احتمال وقوع گسیختگی زیاد بالا نیست اما در شرایط بحرانی همچون بارش‌های سنگین و زمین‌لرزه‌های بزرگ مقیاس (شرایط دینامیک)، خطر ریزش در همه مقاطع بسیار بالاست. بنابراین شناخت سازوکار ریزش و تغییرات متغیرهای اصلی در مسیر ریزش شامل بیشترین مسافت طی شده توسط قطعات، بیشترین انرژی جنبشی، بیشترین سرعت و بیشترین ارتفاع پرش آنها ضروری است. به این منظور از نرم‌افزار Rocfall 4.078 برای شبیه‌سازی پدیده ریزش سنگی برای همه ۱۲ مقطع استفاده شد. نقاط منشأ ریزش تعیین شدند و برای بخش‌های مختلف دامنه مطابق جدول ۵، ضرایب ارتجاعی، ضریب اصطکاک و زبری متناسب با ویژگی‌های آنها تعیین و وزن بزرگ‌ترین قطعات در هر مقطع با استفاده از برداشت‌های صحرایی بر پایه فاصله‌داری درزه‌ها مشخص شد. جدول تنظیمات نرم‌افزار برای شبیه‌سازی ۱۰۰۰ ریزش در هر بار اجرای برنامه تنظیم شد.

شبیه‌سازی 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 زمین‌لرزه، هزار بار شبیه‌سازی شد. در مرحله دوم هزار بار ریزش قطعات با همان ابعاد، در شرایطی که سرعت قطعات بر اثر بزرگ‌ترین زمین‌لرزه‌ی ممکن (با دوره بازگشت ۴۷۵ ساله و شتاب $g = 0.35$) به $1/21$ متر در ثانیه رسیده است، شبیه‌سازی شد. نتایج این دو روش در جدول ۶ آمده است.

مقایسه دو روش نشان می‌دهد که با تغییر سرعت اولیه هیچ تغییر خاصی در هیچ کدام از متغیرها صورت نگرفته است. در مرحله سوم هزار بار ریزش قطعاتی با وزنی مساوی با بزرگ‌ترین قطعه در کل مقاطع (۲۱۳ تن) با سرعت اولیه $1/21$ متر در ثانیه برای کلیه مقاطع شبیه‌سازی شد. نتایج این مرحله در جدول ۷ آمده است. در واقع در اینجا بدترین شرایط در نظر گرفته شده است که با توجه به آن محافظه‌کارانه‌ترین تصمیم‌گیری صورت گیرد.

از مقایسه سه جدول اخیر نکات ذیر 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 کنترل‌کننده ارتفاع جهش قطعات، عامل توپوگرافی است که با مقایسه مقادیر ارتفاع جهش در مقاطع مختلف، تفاوت به خوبی قابل مشاهده است.

اطمینان، وزن گوه، زاویه میل و روند خط تقاطع گوه و ... را رسم کرد. همچنین با استفاده از اسکاتریلات‌های مختلف موجود در نرم‌افزار می‌توان همبستگی میان فاکتورها و متغیرهای ورودی مختلف را تعیین کرد. بنابراین می‌توان عاملی را که در کاهش ضریب اطمینان و در نتیجه ناپایداری قطعات مؤثرتر است تشخیص داد. روش تحلیل احتمالاتی، احتمال رخداد گسیختگی را ارائه می‌دهد که برابر با درصد تعداد گوه‌های گسیخته (با ضریب اطمینان کمتر از یک) به تعداد کل گوه‌هاست.

بنابر نتایج تحلیل استریوگرافیک، مقاطع ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶، ۸، ۱۰ و ۱۱ استعداد ناپایداری گوه‌ای دارند. به منظور تحلیل پایداری قطعات گوه‌ای دامنه‌ها، اطلاعات مربوط به شیب و سوی شیب، زاویه اصطکاک دسته‌درزه‌های مقاطع سازنده گوه و اطلاعات مربوط به هندسه دامنه برای شبیه‌سازی پایداری گوه‌ها در مقاطع مختلف، وارد نرم‌افزار Swedge 4.078 شد.

برای بررسی و مقایسه اثر متغیرهای مختلف بر پایداری گوه‌ها، ۴ حالت (۱) عدم اعمال نیروی خارجی؛ (۲) اعمال فشار آب اشباع؛ (۳) اعمال نیروی زمین‌لرزه با شتاب $g = 0.35$ و (۴) اعمال شتاب زمین‌لرزه و فشار آب با هم در نظر گرفته شده است. همچنین برای همه این حالات، وضعیت پایداری گوه‌ها در صورت وجود ترک‌های کششی و نبود آنها شبیه‌سازی شده است. احتمال گسیختگی در همه موارد یادشده با ۱۰۰۰ بار نمونه‌برداری از داده‌های ورودی به روش مونت کارلو، شبیه‌سازی و محاسبه شده است. در جدول ۲-الف ویژگی‌های هندسی مربوط به گوه‌های مقطع ۸ که به عنوان ورودی نرم‌افزار Swedge هستند، نشان داده شده است. احتمال گسیختگی گوه‌های این مقطع در حالت مختلف در جدول ۲-ب آمده است.

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

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

۵- شبیه‌سازی سازوکار ریزش سنگی با استفاده از نرم‌افزار Rocfall4.078

به‌طور کلی، مدل‌های شبیه‌سازی سقوط سنگ را می‌توان به روش‌های عددی و تحلیلی تقسیم‌بندی کرد. شبیه‌سازی روش‌های تحلیلی بیشتر بر پایه روش توده‌ای - کلوخه‌ای و یا روش جسم صلب پایه‌ریزی شده‌اند. برنامه Rocfall جزو مدل‌های توده‌ای - کلوخه‌ای است که توده سنگی را به‌صورت متمرکز در مرکز گرانی آن در نظر گرفته و شکل یا حجم سنگ را مورد توجه قرار نمی‌دهند و غلتش شبیه‌سازی نمی‌شود. جرم سنگ در معادلات محاسبه حرکت سنگ‌ها استفاده نمی‌شود ولی در محاسبه انرژی جنبشی سنگ مورد توجه قرار می‌گیرد. سنگ‌ها در طول شبیه‌سازی شکسته یا به بخش‌های مختلفی تقسیم نمی‌شوند (Alejano et al., 2007). Tagliavini et al. (2007) به این نتیجه رسیدند که نتایج برنامه Rocfall در مورد انرژی، سرعت، ارتفاع پرش و ... با نتایج برنامه STONE قابل مقایسه است اما در کل STONE مسیرهای طولانی‌تری برای سنگ‌های ریزشی تولید می‌کند. به عبارت دیگر نتایج Rocfall محافظه‌کارانه‌تر است. در بیشتر موارد از Rocfall که یک نرم‌افزار تحلیلی کمی است در کنار نرم‌افزارها یا روش‌های تحلیلی کیفی دیگر، به منظور کامل‌تر شدن اطلاعات ریزش سنگی استفاده می‌شود (Marussich et al., 2008; Yilmaz et al., 2008).

نرم‌افزار Rocfall یک برنامه تحلیلی - آماری دوبعدی است که توسط

برخورد قطعات در پهنه‌های بالاتر بیشتر است (Ayala-carcedo et al., 2003). بنابراین تعیین محل توقف قطعات ریزشی به منظور تعیین پهنه در معرض خطر ضروری است. 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. در مطالعه حاضر از مدل‌سازی سینماتیک ریزش سنگی (Stevens, 1998)، نرم‌افزار Rocfall استفاده شده است.

بنابراین به منظور پهنه‌بندی خطر ریزش سنگی در منطقه مورد مطالعه پس از تشخیص نقاط منشأ یا محل رخداد ریزش سنگی، برای بررسی احتمال دسترسی قطعات ریزشی و شدت ریزش در هر نقطه، دینامیک ریزش در ۱۲ مقطع عرضی توسط نرم‌افزار Rocfall 4.039 شبیه‌سازی شد. هر چند آن طور که گفته شد، بیشترین مسافت طی شده توسط قطعات رابطه خاصی با وزن و اندازه آنها ندارد؛ اما برای یکسان‌سازی شرایط شبیه‌سازی ریزش سنگی در همه مقاطع، وزن قطعات معادل بزرگ‌ترین قطعه‌ای که بر پایه داده‌های صحرایی به دست آمده است (۲۱۳ تن) فرض شد. در این پژوهش پهنه‌بندی منطقه مورد مطالعه بر پایه بیشترین مسافت طی شده توسط قطعات، در هر مقطع است (شکل ۹). برای ارزیابی بهتر نتایج نقشه پهنه‌بندی خطر با نقشه کاربری اراضی منطقه ترکیب شده است و محل‌هایی که در پهنه‌های تعیین شده واقع شده‌اند، قابل مشاهده است. پهنه‌های خطر تفکیک شده عبارتند از:

۱- منطقه با استعدادداری خطر بالا: منطقه میان نقاط منشأ ریزش سنگی و خط توقف قطعات سنگی (حاصل از اتصال نقاط توقف قطعات سنگی در هر مقطع). این محدوده در معرض برخورد قطعات سنگی است. نقاط مرتفع‌تر، بیشتر در معرض خطر هستند. تا حد امکان باید از استفاده از این زون پرهیز کرد. در مواردی که پرهیز امکان‌پذیر نیست، باید اقدامات لازم برای کاهش خطر و ریسک ناشی از ریزش صورت گیرد. جاده سلامتی، مزار شهدای گمنام (که در حال گسترش و تکمیل است) و همچنین جاده دسترسی به آن در این پهنه واقع شده است. همچنین فضای سبز واقع در شمال هتل جهانگردی، شماری از منازل مسکونی پایین دست جاده سلامتی (در مقاطع ۸، ۹، ۱۰ و ۱۱)، بخشی از فضای سبز حاشیه جنوبی محل تفریحی آبشار و حاشیه باختری جاده کاج نیز در این محدوده قرار می‌گیرد. در مقطع شماره ۷ که مزار شهدای گمنام را در بر می‌گیرد، در صورت رخداد ریزش، چند متر پیش 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.

۲- منطقه با استعدادداری خطر کم: این محدوده با عرض ۱۰۰ متر از مرز منطقه با استعدادداری خطر بالا قرار دارد. انتخاب فاصله ۱۰۰ متر بر پایه شواهد صحرایی و شیب دامنه می‌باشد. در این پهنه انتظار رخداد شمار کمی ریزش وجود دارد. 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 باختری جاده کاج در این پهنه قرار می‌گیرد.

۳- منطقه بدون خطر: مناطقی که پایین‌تر از منطقه با استعدادداری خطر کم قرار گرفته‌اند جزو این پهنه به شمار می‌روند. در این پهنه در مواقع رخداد ریزش نیز هیچ خطری وجود ندارد.

۷- روش‌های پیشنهادی اصلاح دامنه در منطقه مطالعاتی

برای مدیریت خطر ریزش سنگی در منطقه مورد مطالعه انجام موارد زیر پیشنهاد می‌شود:

- پرهیز از ساخت‌وساز جدید در پهنه‌های خطر به‌ویژه پهنه با استعدادداری خطر بالا.

۲) با افزایش وزن قطعه سنگ، تغییر خاصی در میزان بیشترین مسافت طی شده، ارتفاع جهش و سرعت حاصل نشده است. تنها عاملی که دستخوش تغییر شده، انرژی جنبشی کل قطعه است که به‌طور آشکاری افزایش یافته است زیرا در الگوریتم محاسبات نرم‌افزار Rocfall، از سه متغیر یادشده تنها انرژی بیشترین رابطه را با وزن دارد. نکته بسیار جالب‌تر این است که با افزایش سرعت اولیه قطعه سنگ از صفر به ۱/۲۱ متر در ثانیه ناشی از بزرگ‌ترین زمین‌لرزه ممکن، هیچ تغییر خاصی در هیچ کدام از متغیرها ایجاد نشده است. یعنی با وجود اینکه نیروی ناشی از شتاب زمین‌لرزه سبب افزایش چشمگیری در احتمال گسیختگی می‌شود؛ اما اینجا در سازوکار ریزش و حرکت سنگ از نقطه منشأ تا هنگام توقف تأثیر چندانی ندارد. بنابراین عواملی که تعیین‌کننده نوع حرکت و میزان متغیرهای مختلف حرکت هستند عبارتند از ویژگی‌های توپوگرافی دامنه و وزن بلوک. البته شکل و هندسه آنها در این مطالعه مورد توجه قرار نگرفته است.

مقایسه نمودارهای مربوط به متغیرهای مختلف ریزش سنگی در مقطع ۱۱ در دو حالت حضور و عدم حضور جاده سلامتی (شکل ۸) نشان می‌دهد که اگر جاده سلامتی وجود نداشت بیشترین مسافت طی شده از ۳۳۳ متر به ۲۹۷ متر؛ ارتفاع جهش از ۹/۲ به ۱/۱ متر؛ انرژی جنبشی از ۲/۹۵ به ۲/۳۵ مگاژول و سرعت انتقالی از ۲۱ به ۱۷/۵ متر در ثانیه کاهش می‌یافت. بنابراین تأثیر جاده سلامتی در افزایش خطر ریزش سنگی در منطقه مورد مطالعه، به نوعی نشان‌دهنده نقش فعالیت‌های انسان بر محیط اطراف و ایجاد آشفتگی‌های زیست محیطی است.

۶- پهنه‌بندی خطر ریزش سنگی

نقشه‌های پهنه‌بندی استعدادداری ریزش سنگی در مقیاس (۱/۵۰۰۰-۱/۲۵۰۰۰) می‌تواند ابزاری مناسب و از دید اقتصادی به صرفه برای طراحی کاربری اراضی به منظور مدیریت ریسک ریزش سنگی و هدایت رشد شهر و تصمیم‌گیری در مورد برنامه‌های کاری بر پایه تحلیل ریسک و خطر باشد تا زمین‌ها و افرادی را که در معرض خطر هستند شناسایی و سطوح مختلفی از خطر را برای ناحیه در معرض خطر تعریف کرد (Copons & Vilaplana, 2008). برای پیش‌بینی رخداد فضایی پدیده‌هایی همچون ریزش سنگی، دو محل باید تشخیص داده شوند: جایی که رخداد روی می‌دهد و جایی که مواد ریزشی متوقف می‌شوند. افزون بر این شدت ریزش سنگی به‌طور معناداری در امتداد مسیر حرکت، یا خط سیر منحنی آن تغییر می‌کند، همچنین از یک مسیر به مسیر دیگر نیز بسیار متفاوت است.

۶-۱- تعیین منشأ ریزش سنگی

برای تشخیص نواحی منشأ ریزش سنگی روش‌های مختلفی از جمله بازدیدهای صحرایی، استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی و زمین‌ریخت‌شناسی (نواحی با عنوان شیب‌های ریزش سنگی فعال)، تعریف حد آستانه برای شیب میانگین دامنه و تشخیص نواحی منشأ ریزش بر پایه عامل‌های کنترل‌کننده ریزش (نوع سنگ، رخنمون، انحنای دامنه، شیب دامنه و پوشش زمین) استفاده می‌شود. روش‌های قطعی ارزیابی استعدادداری رخداد ریزش سنگی، بر پایه محاسبه ضریب اطمینان با روش‌های تعادل حدی ساده است (Hoek & Bray, 1981). تعیین استعدادداری رخداد ریزش در مقیاس منطقه‌ای بر پایه مدل‌سازی آماری عامل‌های کنترل‌کننده بسیار کم به کار رفته است (Marquinez et al., 2003; Chau et al., 2004). در این پژوهش به منظور تشخیص نقاط منشأ ریزش سنگی از روش حد آستانه برای شیب میانگین دامنه استفاده و با توجه به بازدیدهای صحرایی دامنه‌های سنگی با شیب بیش از ۴۰ درجه بعنوان نقاط منشأ در نظر گرفته شد.

۶-۲- تعیین محل توقف قطعات ریزشی

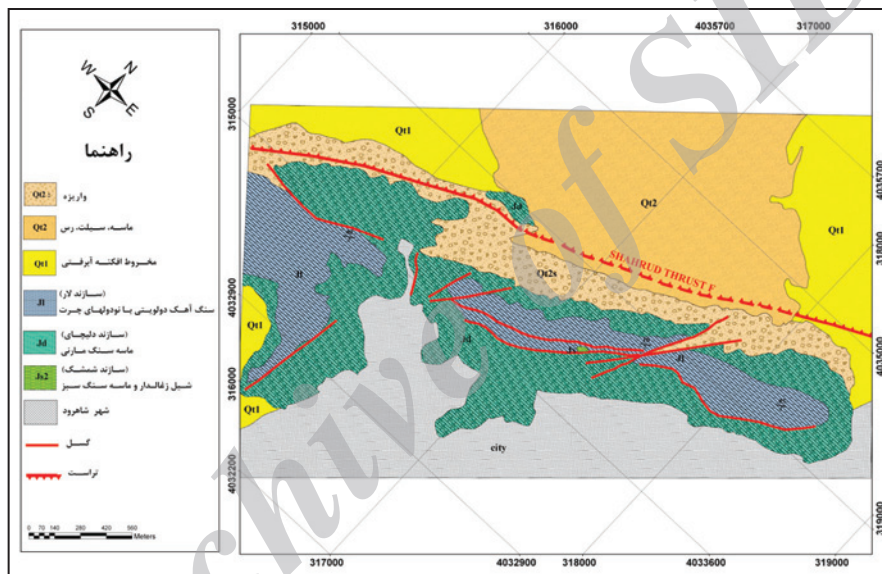
همه نقاط میان پرتگاه یا منشأ ریزش و محل توقف قطعات ریزشی، مستعد برخورد قطعات سنگی است و این می‌تواند سبب ایجاد خسارت شود. بدیهی است که احتمال

ارتفاعات شمال شاهرود به ویژه در شرایط رخداد زمین لرزه و بارندگی به نسبت شدید است. بر پایه نقشه پهنه‌بندی پیشنهادی جاده سلامتی، مزار شهدای گمنام، بخشی از محدوده‌های مسکونی پایین دست جاده سلامتی، بخشی از فضای سبز حاشیه جنوبی پارک آبشار و حاشیه باختری جاده کاج در معرض خطر قرار دارند. آثار ریزش‌های قدیمی در حال حاضر نیز در این مناطق دیده می‌شود که تأییدی بر درستی مطالعات حاضر است. بخشی از پهنه در معرض خطر در گذشته به فضای سبز اختصاص داده شده است، ولی در سال‌های اخیر این مهم نادیده گرفته شده و در آنها ساخت‌وساز صورت گرفته است که لازم است در کاربری این زمین‌ها تجدید نظر صورت گیرد. همچنین توصیه می‌شود اقدامات پیشگیرانه همچون لق‌گیری، ساخت دیوار حایل در مناطقی مانند مزار شهدای گمنام و در محدوده مقاطع ۷ و ۱۱ که مشرف بر مناطق مسکونی است صورت پذیرد.

- استفاده از روش‌های مناسب برای تثبیت دامنه به منظور جلوگیری از گسیختگی قطعات سنگی و کاهش خطر برای سازه‌های واقع در پهنه‌های خطر با روش‌هایی همچون لق‌گیری، شاتکریت، توری سیمی و مهار کابلی.
 - به کارگیری سازه‌های حفاظتی همچون دیوارهای حایل، فنس‌های ارتجاعی و غیر ارتجاعی، خاکریز و کانال ضربه گیر برای جلوگیری از ادامه حرکت قطعات فرو ریخته و در حال حرکت در پهنه‌های خطر به منظور کاهش ریسک ریزش سنگی در مقاطع ۷ و ۱۱ که مزار شهدای گمنام و منازل مسکونی موجود در معرض خطر هستند.
 - تغییر کاربری اراضی و همچنین ایجاد فضای سبز در پهنه با استعدادداری خطر کم به منظور متوقف کردن قطعات ریزشی و کاهش ریسک ناشی از خطر ریزش.

۸- نتیجه گیری

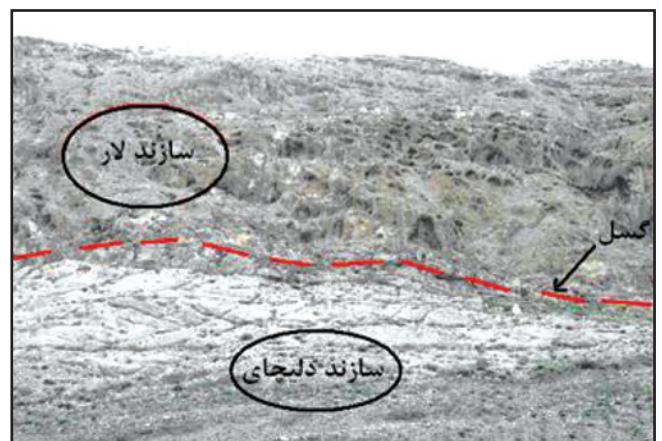
بررسی حاضر و شواهد صحرائی نشان از پتانسیل بالای رخداد ریزش در



شکل ۱- نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰ منطقه مورد مطالعه.



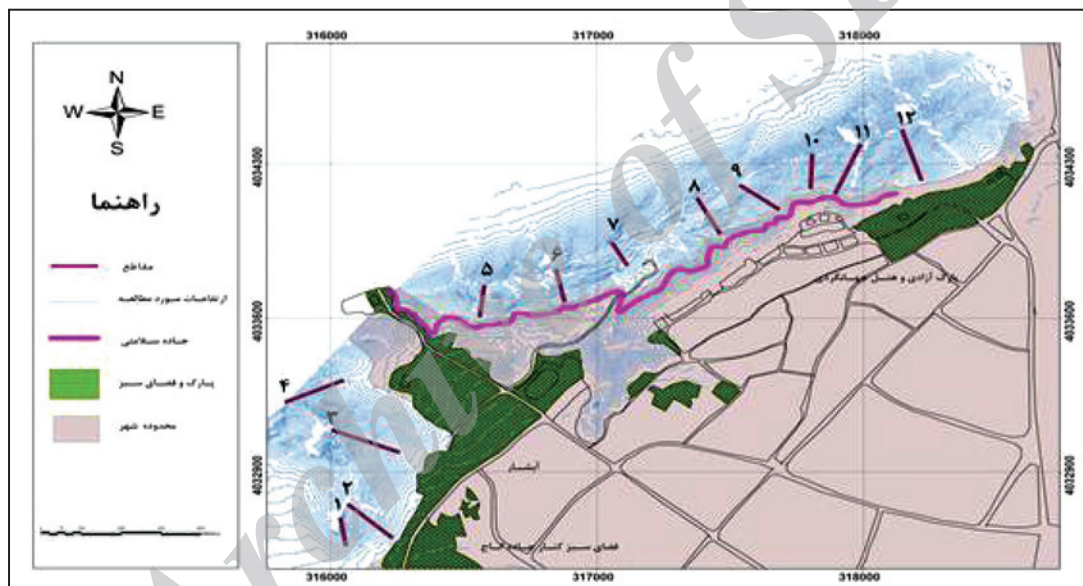
شکل ۳- رخنمون سازند شمشک در منطقه مورد مطالعه متعلق به واحد JS₂ است که در زیر سازند لار قرار گرفته است.



شکل ۲- دیواره‌های پرشیب سازند لار.



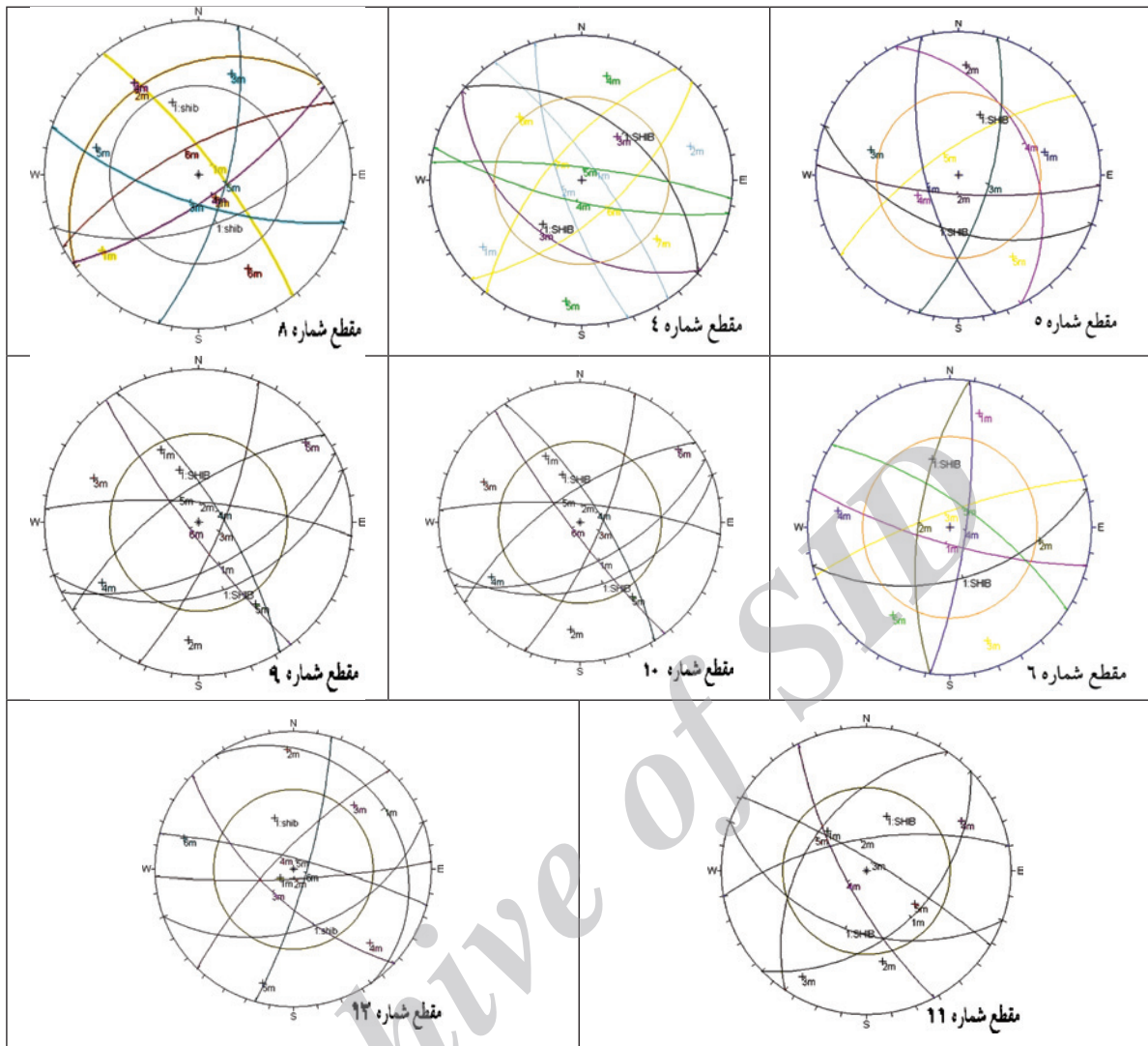
شکل ۴- واریزهای موجود روی دامنه مشرف بر مناطق مسکونی.



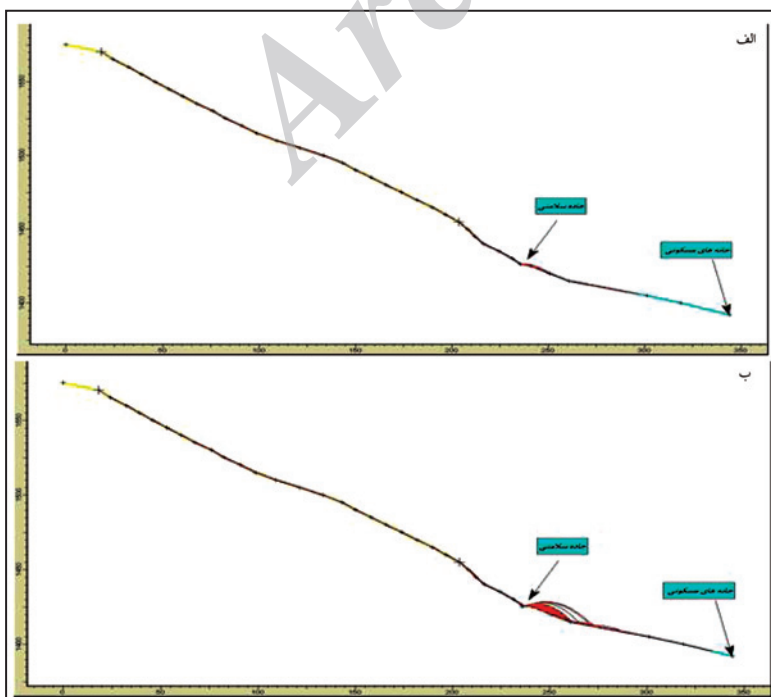
شکل ۵- موقعیت مقاطع برداشت درزه‌نگاری در ارتفاعات مشرف بر شمال شهر شاهرود.



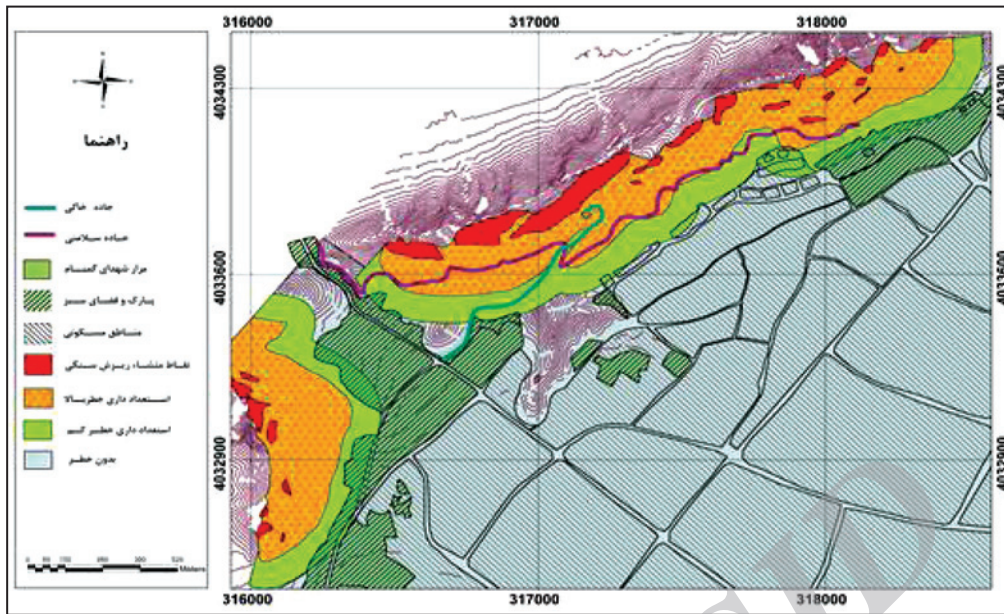
شکل ۶- پرشدگی درزه توسط رس و سیلت.



شکل ۷- تحلیل پایداری دامنه‌ها به روش استریوگرافیک در برخی مقاطع.



شکل ۸- مسیرهای طی شده در مقطع ۱۱ در حالی که: الف) جاده سلامتی وجود دارد؛ ب) جاده سلامتی وجود ندارد.



شکل ۹- پهنه‌بندی خطر ریزش سنگی بر پایه بیشترین مسافت طی شده در هر مقطع توسط قطعات.

جدول ۲- الف) ویژگی‌های هندسی گوه‌های مقطع شماره ۸؛ ب) احتمال گسیختگی گوه‌های مقطع شماره ۸ در شرایط مختلف.

ارتفاع دامنه	زاویه اصطکاک	سوی شیب	شیب	
-	۴۰/۳	۵۵/۹	۷۷/۵	دسته‌دوزه ۱
-	۳۹/۳	۲۰۲/۵	۶۹	دسته‌دوزه 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 ۱- ارزیابی وضعیت انواع ناپایداری‌های موجود در مقاطع به روش استریوگرافیک.

شماره مقطع	شماره دسته‌دوزه‌های مستعد لغزش گوه‌ای	شماره دسته‌دوزه‌های مستعد 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

فشار آب و زمین‌لرزه	شتاب زمین‌لرزه (g/۳۵)	فشار آب (اشباع)	بدون اعمال نیرو	
۱	۰/۲۸	۱	۰/۰۰۱۴	بدون ترک کششی
۰/۹۸	۰/۲۱	۰/۷	۰	ترک کششی شماره ۴
۰/۹۹	۰/۲۱	۰/۷	۰	ترک کششی شماره ۵
۰/۸۴	۰/۲۱	۰/۱۷	۰	ترک کششی شماره ۶

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

شماره مقطع	احتمال رخداد گسیختگی در حالات مختلف			
	بدون اعمال نیرو	فشار آب (اشباع)	شتاب زمین‌لرزه (g/۳۵)	فشار آب و زمین‌لرزه
۱	۰	۰/۸۷	۰/۰۰۳۵	۱
۲	۰	۱	۰/۰۰۷	۱
۳	۰/۰۸	۱	۰/۶۴	۱
۵	۰/۰۱۹	۰/۹۶	۰/۲۶	۱
۶	۰	۰/۴۷	۰/۰۱	۰/۷۴
۸	۰/۰۰۷	۱	۰/۳۱	۱
۱۰	۰	۰/۹۶	۰	۱
۱۱	۰/۰۱۸	۱	۰/۶	۱

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

احتمال گسیختگی در صورت حضور نیروهای مختلف وارد بر دامنه و عدم حضور آنها				ویژگی‌های ترک کششی			
شماره مقطع	شماره ترک کششی	سوی شیب نسبت به دامنه	فاصله‌داری (سانتی‌تر)	بدون اعمال نیرو	فشار آب (اشباع)	شتاب زمین‌لرزه (۰/۳۵ g)	فشار آب و زمین‌لرزه
۱	۱	مخالف	۱۳۸	۰	۰	۰	۰
	۲	مخالف	۳۱۸	۰	۰	۰	۰
	۴	موافق	۲۱۵	۰	۰/۰۰۵	۰	۰/۰۳
۲	۱	موافق	۲۰۰	۰	۰/۰۷	۰	۰/۳
	۴	مخالف	۳۵۹	۰	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	۰	۰/۰۴۷	۰/۱۳
۶	۳	موافق	۵۶۳	۰	۰	۰	۰
	۴	موافق	۲۸۰	۰	۰/۰۱۳	۰	۰/۲
۸	۴	موافق	۵۰	۰/۰۰۳	۰/۷	۰/۲۴	۰/۹۹
	۵	موافق	۵۰	۰/۰۱۷	۰/۵۸	۰/۲۲	۰/۹۸
	۶	مخالف	۱۳۱	۰	۰/۰۰۸۱	۰/۱۱	۰/۶۲
۱۰	۲	موافق	۴۳	۰	۰/۷	۰	۰/۹۵
	۳	مخالف	۲۵۰	۰	۰	۰	۰
	۵	مخالف	۳۰۰	۰	۰	۰	۰
۱۱	۲	مخالف	۵۰	۰/۰۰۹۵	۰/۰۹۱	۰/۵۶	۰/۹۲
	۳	مخالف	۱۵۰	۰	۰/۵	۰/۴۷	۰/۹۹۸

جدول ۵- ویژگی‌های مواد سازنده دامنه که به‌صورت ورودی نرم‌افزار هستند.

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

جدول ۷- ویژگی‌های 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 شبیه‌سازی شده است.

شماره مقطع	طول مسافت طی شده (متر)	ارتفاع پرتاب (متر)	بیشینه انرژی کل (مگاژول)	بیشینه 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

جدول ۶- ویژگی‌های ریزش سنگی در مقاطع مختلف، در شرایطی که ریزش سنگین‌ترین قطعه سنگ در هر مقطع بدون سرعت اولیه (ستون‌های سفید) و با سرعت اولیه ۱/۲۱ متر در ثانیه (ستون‌های خاکستری)، ۱۰۰۰ بار شبیه‌سازی شده است.

شماره مقطع	طول مسافت طی شده (متر)	ارتفاع پرتاب (متر)	بیشینه انرژی کل (مگاژول)	بیشینه سرعت انتقالی (متر بر ثانیه)
۱	۱۷۲	۱/۵	۷/۷	۲۲
۲	۱۸۸/۸	۰/۰۴	۲/۶۶	۸/۲
۳	۳۳۰	۱۳/۲	۱۴/۵	۳۷
۴	۲۳۱	۲/۶	۱۱/۷	۲۹/۱
۵	۱۹۲	۵/۹	۸/۷	۲۶/۵
۶	۲۶۹	۹/۳	۲۲	۳۴
۷	۳۰۷/۱	۴/۵	۲۱/۱	۲۹/۵
۸	۲۱۹	۶/۱	۴/۴	۱۵/۱
۹	۱۸۵/۴	۲/۳	۷۲	۲۲/۲
۱۰	۱۸۰	۱/۷	۱۳/۱	۲۳/۵
۱۱	۳۲۸	۷/۲	۲/۶	۱۹/۸
۱۲	۲۲۲	۰/۸	۱۶/۱	۱۸/۷

حیدری، ک.، حافظی مقدس، ن. و رمضانی اومالی، ر.، ۱۳۸۷- ارزیابی پتانسیل ریزش سنگی در شمال شهر شاهرود. دوازدهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران، اهواز.

References

- 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.
- 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.
- Barton, N. & Choubey, V., 1977- The shear strength of rock joints in theory and practice”, *Rock Mech*, 10, 1-54.
- 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.
- 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.
- 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.
- Descoedres, 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 Geogaphy*, 271, 69-87.
- Evans, S. G. & Hungr O., 1993- The assessment of rockfall hazard at the base of talus slopes, *Canadian Geotechnical Journal* 30, 620-36.
- 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 Workkshop*, Lisbon, 31 Agust- 1 Septembr 1998. Springer VERLAG, 1- 12.
- Giani, G. P., 1992- *Rock Slope Stability Analysis*, Rotterdam, Balkema.
- Guzzeti, F., Reichenbach, P., Ghigi, S., 2004- Rockfall hazard assessment along a transportation corridor in the Nera vally, central Italy, *Environmental Management*, 342, 191-208.
- 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.
- 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
- 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* XXVII, 135-46.
- Rapp, A., 1960- Rrecent development of mountain slopes in Karkevagge and surroundings, northern Scandinavia, *Geografiska Annaler* 42, 65-200.
- 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.
- 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.
- Varnes, D. J., 1978- Slope Movements: Types and Processess, in: *Landslide Analysis an 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 & Mining Sciences* 40, 929-937
- Yilmaz, I., Yildirim, M. & Keskin, I., 2008- A mthod for mapping the spatial distribution of rockfall computer program analyses results using ArcGIS software, *Bull Eng Geol Environ*, 7, 547-554.