

بررسی مکانیسم سقوط سنگ و تهیه نقشه محدوده خطر و ارائه راهکارهای لازم در روستای یدک (شمال استان خراسان رضوی)

صفورا زمانی،^{*} محمد غفوری، غلامرضا لشکری پور،
ناصر حافظی مقدس: دانشگاه فردوسی مشهد، گروه زمین‌شناسی

تاریخ: دریافت ۸۹/۱۲/۷ پذیرش ۹۰/۹/۸

چکیده

اساسی‌ترین روش برای کاربری زمین در مناطق کوهستانی ارزیابی خطر سقوط سنگ است که به علت گسترش ساخت‌وساز در آن مناطق و خطر سقوط سنگ، مسائل جانی و مالی فراوانی ایجاد می‌کند. هدف این مقاله ارزیابی خطر سقوط سنگ در شمال روستای یدک است. روستای یدک از توابع شهرستان قوچان در استان خراسان رضوی در شمال‌شرق ایران قرار دارد. وجود آهک‌های تیرگان با درز و شکاف فراوان در شمال‌شرق این روستا سبب ناپایداری شبی و احتمال سقوط سنگ شده و برای مناطق مسکونی روستایی نزدیک شب خطر آفرین است. نوع سنگ، ژئومورفولوژی، شبکه زهکش و فعالیت‌های لرزه‌ای از عوامل مؤثر در لغزش هستند. برای بررسی سیستم درز و شکاف‌ها در منطقه، ۱۸۰ نایپوستگی برداشت و از نرم‌افزار Dips استفاده شده است. از آنجا که سقوط سنگ از جمله ناپایداری‌های اصلی در شب Rocfall برای تعیین محدوده خطر و بررسی نحوه سقوط سنگ استفاده شده است. سرانجام نقشه پهنه خطر سقوط سنگ در این روستا با استفاده از نرم افزار GIS تهیه شده است.

واژه‌های کلیدی: سقوط سنگ، آهک تیرگان، نایپوستگی، نرم‌افزار Rocfall

ghafoori@um.ac.ir

*نویسنده مسئول

مقدمه

به جدایش مواد از قسمت‌های پرشیب دامنه طبیعی یا مصنوعی و حرکت آن با سرعت زیاد تا بسیار زیاد به‌طرف پایین شیب، سقوط یا ریزش گفته می‌شود. سقوط سنگ فرآیندی ژئومورفولوژیکی است و خطر عمده در مناطق کوهستانی است [۱]. این پدیده در مناطق کوهستانی از عوامل خطر به‌خصوص در جاده‌ها و مناطق شهری و روستایی پای دامنه‌ها است [۲].

عوامل مؤثر در ایجاد پدیده سقوط سنگ شامل عوامل مکانیکی (شیب تند دامنه، وجود درز و شکاف، تنش‌های تکتونیکی، تنش‌های حاصل از انجماد آب‌های نفوذی به درون سیستم‌های ناپیوستگی و ارتعاشات ناشی از زمین‌لرزه)، عوامل هیدرولوژیکی و آب و هوایی (بارندگی‌های سنگین، ذوب سریع برف، تغییرات دما و فرآیند دماشکافنگی)، عوامل زیستی (تنش‌های ناشی از رشد ریشه‌گیاهان در درون درز و شکاف‌ها) و عوامل انسانی است. در شیب‌های سنگی تعیین مکانیسم گسیختگی‌های بالقوه‌ای که شرایط ساختاری کنترل‌کننده آن‌ها است، باید در دستور کار قرار گیرد. در این‌گونه پژوهش‌ها می‌توان شکل گسیختگی اعم از صفحه‌ای، گوهای و واژگونی و یا انواع گسیختگی‌های پیچیده‌ای که شامل تمام موارد است را تعیین کرد.

تا حدود دو الی سه دهه قبل، تحلیل سقوط سنگ تنها براساس کارهای تجربی بوده است که این مسئله باعث محدودیت پژوهش‌ها شده است. در چند دهه اخیر محققان مختلف سعی کرده‌اند تا با طراحی مدل‌های کامپیوتری روشی مناسب برای بررسی این پدیده ارائه دهند. بعضی از این برنامه‌ها دو بعدی و بعضی به صورت سه‌بعدی است. از جمله نرم‌افزارهای دو بعدی و سه‌بعدی می‌توان به ترتیب به برنامه‌های [۳] Rocfall و [۴] STONE اشاره کرد.

Rocfall برنامه‌ای کامپیوتری مفید برای بررسی سقوط سنگ و تعیین مسیر حرکت بلوک‌ها است. علاوه بر این، نرم‌افزار مذکور توانایی محاسبه ارتفاع جهش، انرژی جنبشی، سرعت و نقطه توقف بلوک‌ها در طول مسیر حرکت را نیز دارد. در سال‌های اخیر محققان

بسیاری از این نرمافزار بهمنظور ارزیابی و بررسی دامنه‌های با شیب تند و مستعد سقوط سنگ استفاده کرده‌اند که از آن جمله می‌توان به تحقیقات صورت گرفته توپال^۱ و همکاران [۵]؛ یلماز^۲ و همکاران [۶]؛ چوبی^۳ و همکاران [۷] و تانوسلوگلو^۴ و زورلو^۵ [۸] اشاره کرد.

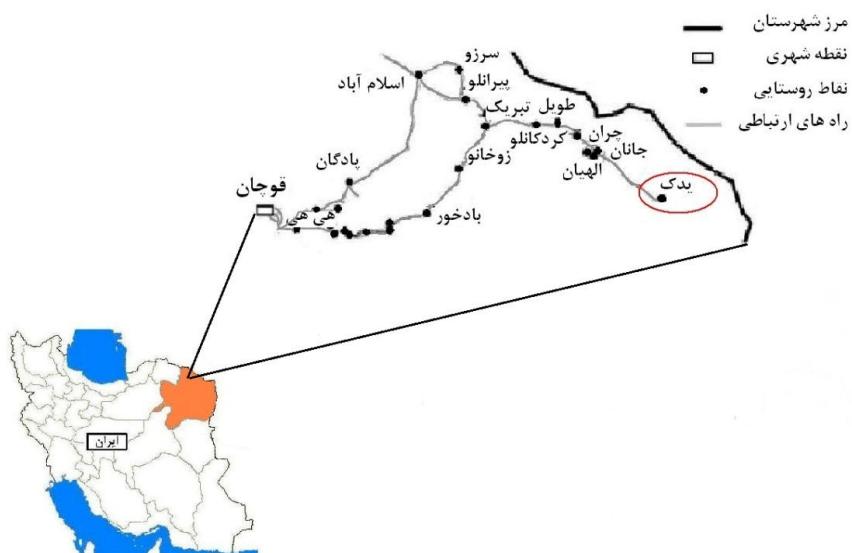
اگر چه در نگاه اول، ارزیابی سقوط سنگ ساده بهنظر می‌رسد، اما در واقع پدیده‌ای بسیار پیچیده است که آنالیز آن به دانستن فاکتورهای مانند نقطه جداش بلوک سنگی، شکل و ژئومتری آن، توپوگرافی شبی، میزان انرژی کاهش یافته در هنگام برخورد و غلطش، خواص مکانیکی بلوک سنگی و دامنه و همچنین سرعت بلوک‌ها در هر نقطه در طول مسیر بستگی دارد. در واقع آنالیز این پدیده حتی در حالت ساده آن و با دانستن شرایط اولیه سقوط و نیروی محرك (مثل نیروی نقل) نیز مشکل است [۴]. با توجه به این که هر ساله در جهان تعداد زیادی از مردم قربانی لغزش‌های سنگی و سنگ افت‌ها می‌گردند، ثبت آن‌ها از اهمیت خاصی برخوردار است. بنا بر این بهمنظور بررسی این پدیده، بازدیدهای صحراوی دقیق و شناخت هرچه بیشتر وضعیت توپوگرافی و زمین‌شناسی دامنه و سیستم‌های ناپیوستگی موجود، ضروری است.

موقعیت جغرافیایی و وضعیت زمین‌شناسی منطقه بررسی شده

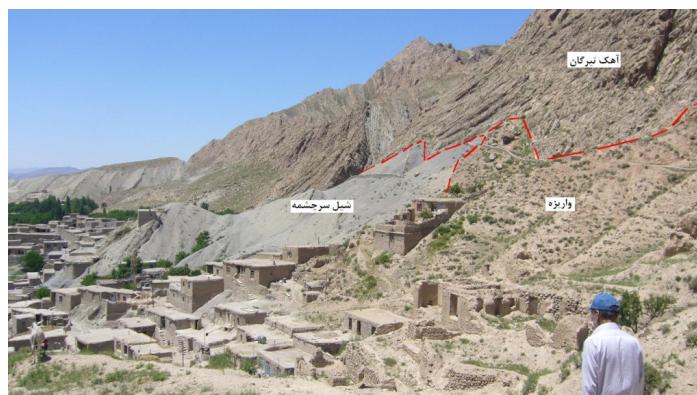
روستای یدک از توابع دهستان شیرین‌دره در بخش مرکزی شهرستان قوچان در استان خراسان رضوی است. این روستا در موقعیت جغرافیایی ۳۷ درجه و ۷ دقیقه عرض شمالی و ۵۷ درجه و ۵۳ دقیقه طول شرقی قرار دارد (شکل ۱).

روستای مذکور بر پایه تقسیمات زمین‌ساختی انجام شده، در زون ساختاری کپه‌داغ واقع گردیده است. زون کپه‌داغ با فعالیت‌های کوه‌زایی اوایل دوران سوم به‌آرامی چین‌خورد و تعداد چشم‌گیری تاقدیس و ناویدیس و گسل و درزه برجای گذاشته است. روستای یدک نیز بر روی محور ناویدیس به‌همین نام قرار گرفته است. محور این ناویدیس دارای روند شمال غربی-جنوب‌شرقی است و ارتفاعات آن را سازند کریاناً مزدوران، شیل و ماسه‌سنگ‌های سازند شوریجه و سازند آهکی تیرگان تشکیل داده‌اند. در حالی که در هسته این ناویدیس

سازندهای شیلی سنگانه و سرچشمہ و تراس‌های آبرفتی قرار گرفته است. محل قرارگیری روستای یدک به صورتی است که دامنه شمال‌شرقی آن مشرف به سنگ‌های سخت و آهکی تیرگان است. قسمت پایین این دیواره نیز با شیل‌های سرچشمہ و واریزه پوشیده شده است. شکل ۲ موقعیت روستا در پای دامنه و سازندهای مشرف به آن را نشان می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه ارتباطی روستای یدک



شکل ۲. نمایی از دامنه بررسی شده و موقعیت روستای یدک در پای دامنه

بررسی شرایط زمین‌شناسی و ساختاری دامنه بررسی شده

دامنه بررسی شده در قسمت شمال‌شرقی روستای یدک با طول حدود ۳۰۰ متر و ارتفاع حدود ۱۰۰ متر است. از نظر هندسه شب، دامنه مذکور با توجه به وضعیت سنگ‌شناسی به دو بخش تقسیم می‌گردد. بخش فوقانی با شب زیاد که از سنگ‌های سخت و آهکی سازند تیرگان تشکیل شده است و بخش تحتانی که از شیل‌های سازند سرچشمه و واریزه پوشیده شده است و دارای شب ملایم‌تری است (شکل ۲). با توجه به چین‌خوردگی منطقه، درز و شکاف‌های فراوانی در سنگ‌های منطقه به‌چشم می‌خورد که در آهک‌های تیرگان به‌طور بارزتری قابل مشاهده است و موجب ناپایداری در این سنگ‌ها گردیده است.

فرآیند هوازدگی غالب در این دامنه با توجه به نوع اقلیم منطقه از نوع فیزیکی است که موجب افزایش بازشدگی ناپیوستگی‌ها در سنگ‌های آهکی و در نتیجه افزایش عمق هوازدگی شده است. هم‌چنین این فرآیند موجب خردشدگی زیاد شیل‌های منطقه گردیده است به‌طوری که در دامنه بررسی شده شیل‌ها به قطعاتی به ابعاد سانتی‌متر تبدیل شده‌اند (شکل ۳).



شکل ۳. خردشدگی شدید شیل‌های دامنه بررسی شده

با توجه به اقلیم منطقه و میزان نزولات جوی، فرآیندهای دماشکافنگی و یخ‌شکافنگی از عوامل مهم بازشدگی درزهای جدایش بلوك‌های سنگی هستند. انقباض و انبساط سنگ‌ها بر اثر نوسانات دما و انجام آب‌های نفوذی درون سیستم ناپیوستگی باعث درهم شکسته شدن توده سنگی و ترک‌خوردن آن‌ها شده است. تکرار این فرآیندها باعث تضعیف توده سنگی شده و با ایجاد قطعات سنگی آزاد، شرایط بالقوه ناپایداری را افزایش می‌دهد. نفوذ آب به درون سیستم ناپیوستگی‌ها علاوه بر افزایش فشار آب، باعث افزایش عمق هوازدگی و تضعیف

بیشتر توءه سنگ نیز شده است. مجموعه این فرآیندها باعث شده که بلوک‌ها از توءه سنگی جدا شده که آثار آن به صورت بلوک‌هایی با ابعاد چندین متر مکعب بر روی سطح دامنه است. زمین‌لرزه نیز ممکن است باعث افزایش ناپایداری بلوک‌های سنگی در منطقه شود. حرکت بلوک‌هایی با حجم و جرم زیاد در پای دامنه نیاز به نیروی بسیار زیادی دارد که این نیروها تنها بر اثر تنش دینامیکی ناشی از عامل زمین‌لرزه ممکن است به وجود آید. شایان ذکر است عمل کرد زمین‌لرزه علاوه بر این که موجب ناپایداری بلوک‌های مستعد می‌گردد، زمینه را برای سقوط ثانویه بلوک‌هایی که بر روی سطح دامنه سقوط کرده‌اند نیز فراهم می‌سازد. بسیاری از قطعات سنگی سقوط کرده از بخش آهکی دامنه، در هنگام برخورد با شیل‌های خردشده و یا قسمت‌های پوشیده شده توسط واریزه، بهدلیل کاهش شبی و کاهش انرژی از حرکت باز می‌ایستند. وجود تعداد زیادی از این بلوک‌ها بر روی این واریزه‌ها و شیل‌ها گواه بر این امر است (شکل ۴). گسترش ساخت و ساز منازل مسکونی بر روی این دامنه، بدون توجه به خطر سقوط بلوک‌های سنگی، سبب بروز مشکلاتی برای ساکنین این روستا شده است، به طوری که برخی از ساکنین به علت سقوط بلوک‌های سنگی که نمونه‌آن‌ها در شکل ۵ مشاهده می‌شود، مجبور به تخلیه منازل خود شده‌اند.



شکل ۴. توقف تعدادی از بلوک‌های سقوط کرده بر روی شیل (الف) و واریزه (ب)

لازم به ذکر است که دامنه بررسی شده چه در قسمت آهکی و چه در قسمت شیلی فاقد پوشش گیاهی است. بنا بر این ریشه گیاهان تأثیری در ایجاد و گسترش سیستم‌های درزه در این دامنه ندارد. در مجموع می‌توان گفت پدیده سقوط سنگ به علت وجود سنگ‌های سخت

بر روی سنگ‌های نرم در این دامنه در شرایط طبیعی صورت گرفته و فعالیت‌های بشری در دامنه باعث افزایش خطر گردیده است.

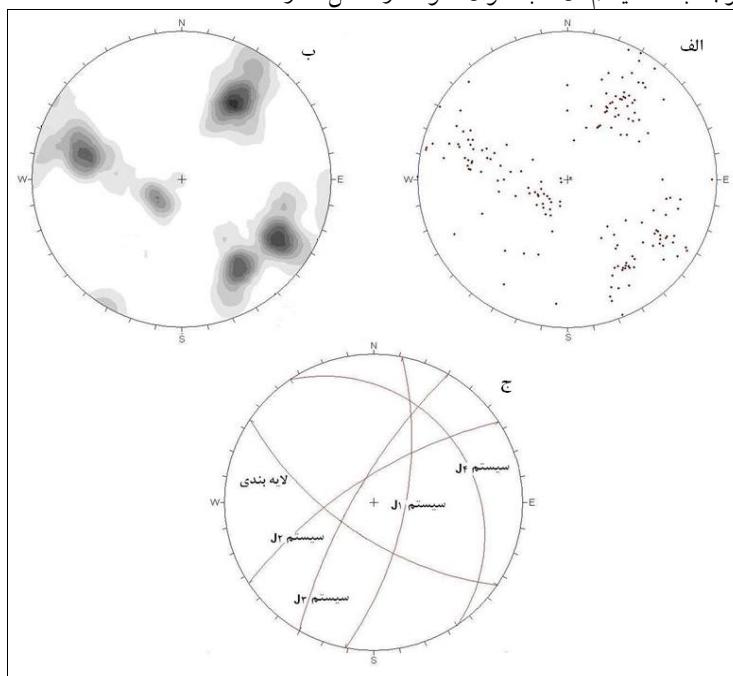


شکل ۵. تعدادی از بلوک‌های سقوط کرده در محدوده روستا

تأثیر عوامل ساختاری در پدیده سقوط سنگ

عوامل ساختاری (سطوح لايه‌بندي، ناپيوستگي‌ها و گسل‌ها) شرط اساسی و لازم برای وقوع حرکات دامنه‌اي در شيب‌های سنگي محسوب می‌شوند. با توجه به اين نكته، شناساني و تعين نوع گسيختگي احتمالي در شيب‌های سنگي به روش درزنگاري و تحليل‌های استريوگرافی که بسادگي امكان‌پذير است يكى از کارهای اوليه و اساسی محسوب می‌گردد. به دليل پيچيدگي سيسitem تنش فعال در منطقه، سيسitem‌های درزه و شکاف بسیار گستره است. بنا بر این بهمنظور تعين دقیق وضعیت سيسitem‌های درزه و سایر ناپيوستگي‌ها و هم‌چنین بررسی چگونگي تغییر روند آن‌ها، حدود ۱۸۰ ناپيوستگي (درزه و لايه‌بندي) در دامنه مشرف به روستا برداشت گردید. سپس برای تعين سيسitem‌های ناپيوستگي غالب در منطقه و تحليل استريوگرافيك توده سنگ از برنامه Dips استفاده گردید. شکل ۶ نحوه توزيع نقاط قطبی، خطوط هم‌تراکم قطبی و صفحات اصلی ناپيوستگي‌ها را نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در منطقه علاوه بر سيسitem لايه‌بندي، چهار سيسitem درزه اصلی وجود دارد که توده

سنگی را به بلوک‌هایی با ابعاد و اشکال متفاوت تبدیل کرده‌اند. لایه‌بندی و چهار سیستم درزه اصلی با توجه به مکانیسم آن‌ها به عنوان نمونه در شکل ۷ ارائه شده است.



شکل ۶. توزیع قطبی، خطوط هم تراکم و صفحات اصلی ناپیوستگی در دامنه بررسی شده

با توجه به این که دامنه بررسی شده بخشی از یال شمال‌شرقی ناویدیس یدک است، امتداد لایه‌بندی به صورت شمال‌غرب–جنوب‌شرق بوده است و دارای شیب متوسط ۶۲ درجه به سمت جنوب‌غرب است.

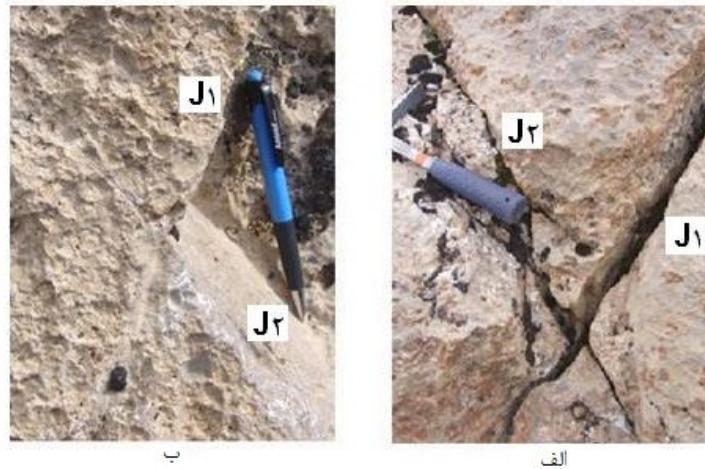
تجزیه و تحلیل نمودارهای فرق نشان می‌دهد که درزه‌های موجود بر اثر نیروهایی به وجود آمده‌اند که باعث ایجاد چین‌خوردگی در منطقه شده‌اند. به‌طوری که در هنگام چین‌خوردگی معمولاً دو سیستم درزه که با هم زاویه ۶۰ درجه تشکیل داده است، ایجاد می‌شوند و درزه‌های برشی نامیده می‌شوند. سیستم درزه‌های J1 و J2 از این نوع هستند. این درزه‌ها در زمان چین‌خوردگی، هنگامی که لایه‌ها در امتداد عمود بر محور چین تحت فشارش واقع شده، به وجود آمده‌اند.

دسته درزه J3 در اطراف گسل موجود در دامنه و تحت تأثیر آن و نیروهای کششی ناشی از چین خوردگی لایه‌ها به وجود آمده است. این دسته درزه مذکور از نوع درزه‌های کششی است، زیرا جنوب غربی و با شیب ۷۵ درجه است. دسته درزه مذکور از طبقات درزه‌های کششی است، زیرا هنگامی که طبقات در امتداد عمود بر محور چین تحت فشارش قرار گرفته و چین‌ها تشکیل شده‌اند، در امتداد محور چین تحت کشش واقع می‌شوند.

سیستم درزه J4 را می‌توان به عنوان درزه‌های رهایی در نظر گرفت که به موازات سطح محوری چین به وجود آمده است. این دسته درزه دارای روندی تقریباً موازی با روند لایه‌بندی است و دارای شیب کم (۲۳ درجه) به سمت شمال شرق است.

عاملی که در تعیین ابعاد قطعات سنگی تأثیر دارد، فاصله‌داری سطوح ناپیوستگی است. برداشت فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها در دامنه روستای یدک نشان داد که فاصله بین سطوح لایه‌بندی به طور متوسط ۷۰ سانتی‌متر، فاصله دسته درزه‌های برشی J1 و J2 از ۱۵ سانتی‌متر تا ۱/۵ متر متغیر است و فاصله بین سطوح سیستم درزه J4 از ۵۰ سانتی‌متر تا ۱ متر متغیر است. تمرکز سیستم درزه J3 بیشتر در فاصله چند متری از گسل موجود روی دامنه و با روند موازی با آن است، به طوری که در اطراف گسل فاصله بین سطوح این سیستم درزه کم و حدود ۵۰ سانتی‌متر است و با دور شدن از گسل، فاصله‌داری سطوح این نوع درزه افزایش می‌یابد. مشخصات سیستم غالب درز و شکاف‌ها در منطقه در جدول ۱ ارائه شده است.

مجموعه عوامل فوق باعث شده است تا اندازه قطعات سنگی سقوط‌کرده از دیواره متغیر باشد. بررسی‌های انجام شده در روستا نشان داد قطعات سنگی با اندازه بزرگ‌تر و در نتیجه جرم بیشتر در نزدیکی پای دامنه متوقف شده‌اند و قطعات کوچک‌تر مسیر طولانی‌تری را طی نموده‌اند. شایان ذکر است که بسیاری از این قطعات کوچک‌تر نتیجه متلاشی شدن قطعات بزرگ‌تر در طول مسیر حرکت بوده‌اند و به همین دلیل فاصله‌ی بیشتری نسبت به قطعات بزرگ‌تر طی کردند.



شکل ۷. سیستم درزهای J_1 و J_2 با بازشدگی زیاد (الف) و فاقد بازشدگی (ب)



شکل ۸ سیستم درزهای J_3 و J_4 و لایه‌بندی

جدول ۱. شیب و برای شیب ناپیوستگی‌های موجود در دامنه روستای یدک

فاصله داری (cm)	حداکثر (cm)	حداقل (cm)	جهت شبیب	شبیب	نوع نایپوسنگی	
۱۵۰	۱۵	۱۰۱	۷۰	درزه برشی	J1	
۱۵۰	۱۵	۳۲۸	۷۴	درزه برشی	J2	
۳۰۰	۴۰	۳۰۱	۷۶	درزه کششی	J3	
۱۰۰	۵۰	۵۸	۲۳	درزه رهایی	J4	
۱۰۰	۵۰	۲۱۷	۶۲	لایه بندی	لایه بندی	

مکانیسم سقوط سنگ

قطعاتی از سنگ (بلوک سنگی) که توسط فرآیند لغزش یا واژگونی از یک شیب قائم یا نزدیک قائم جدا می‌شوند، ممکن است ادامه مسیر را به صورت جهش، سقوط آزاد در طول یک مسیر منحنی یا غلطش و لغزش به طرف پایین شیب طی کنند [۹].

در پژوهش‌های مربوط به پدیده سقوط سنگ، هندسه شیب و جنس مواد تشکیل دهنده دامنه مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده مسیر و نوع حرکت بلوک‌ها و فاصله نهایی آن‌ها از پای دامنه است. در پژوهش‌های مربوط به پدیده سقوط سنگ، از دو پارامتر ضریب ارجاعی^۱ و ضریب اصطکاک برای نشان دادن خواص مکانیکی مواد سازنده دامنه استفاده می‌شود.

ضریب ارجاعی نشان‌دهنده کاهش انرژی قطعات در هنگام برخورد با سطح شیب است و رفتار قطعه سقوط کرده را پس از برخورد با شیب نشان می‌دهد [۲]. ضریب اصطکاک برای نشان دادن کاهش انرژی در هنگام غلطش یا لغزش به کار برد می‌شود. کاهش انرژی قطعات بر اثر تصادم یا غلطش تابعی از هندسه و خصوصیات ژئوتکنیکی شیب، ویژگی‌های مکانیکی، ژئومتری و دینامیک قطعات (سرعت انتقال، دوران و زاویه تصادم) و پوشش گیاهی است [۱۰، ۱۱].

مقدار انرژی که در زمان برخورد قطعه به سطح شیب کاهش می‌یابد به ضریب ارجاعی بستگی دارد [۱۲]. سطوح پوشیده از سنگریزه و خردسنج‌ها مقدار چشم‌گیری از انرژی قطعه سنگ سقوط‌کرده را جذب می‌کنند و در بسیاری از موارد باعث متوقف شدن آن می‌شوند؛ در حالی که سطوح تمیز سنگ‌های غیرهوازده مقدار کم‌تری از انرژی قطعه را جذب می‌کنند. قابلیت جذب انرژی قطعه سنگ توسط مواد سطح شیب به طور ریاضی به وسیله ضریب ارجاعی بیان می‌شود [۱۳]. در بیش‌تر مطالعات سقوط سنگ، از این ضریب به صورت دو مؤلفه مماسی (R_t) و نرمال (R_n) استفاده می‌گردد [۱۴].

$$R_n = \frac{V_{rn}}{V_{in}} \quad (1)$$

$$R_t = \frac{V_{rt}}{V_{it}} \quad (2)$$

V_{rn} ، V_{in} : مؤلفه‌های نرمال سرعت به ترتیب قبل و بعد از برخورد

V_{rt} ، V_{it} : مؤلفه‌های مماسی سرعت به ترتیب قبل و بعد از برخورد

^۱. Coefficient of restitution

بررسی‌های انجام‌شده توسط محققان مختلف نشان می‌دهد که دامنه تغیرات ضریب ارجاعی نرمال (R_n)، برای بیشتر سنگ‌ها معمولاً بین $0/3$ تا $0/5$ و برای ضریب ارجاعی مماسی (R_t ، بین $0/8$ تا $0/95$ است. زمین‌های پوشیده از گیاه و خاک نرم دارای مقادیر کم‌تر و سنگ بستر غیرهوازده و آسفالت دارای مقادیر بیشتری هستند [۳].

استفاده از آنالیز برگشتی، روشنی تجربی برای تعیین ضریب ارجاعی است. در این صورت باید مسیر سقوط بلوك سنگی، محل توقف آن، نقطه جداش (ممکن است هوازدگی کم‌تر را نشان دهد) و نقاط برخورد بلوك سنگی به سطح شیب (اثر ضربه)، مشخص باشد. سپس با مدل‌سازی نیم‌رخ مسیر سقوط و با دانستن پارامترهای فوق، مقدار ضریب ارجاعی را تغییر داد تا مقدار مورد نظر که با نقاط برخورد بلوك با سطح شیب و فاصله نهایی آن از پای دامنه هم‌خوانی دارد، را به دست آوریم [۱۵].

ضریب زاویه به شکل قطعه سقوط‌کرده و نوع حرکت بستگی دارد. لغزش و غلطش قطعه سنگی به طور عمده با این ضریب کنترل می‌شود [۲]. مقداری که برای این ضریب انتخاب می‌گردد به گونه‌ای است که اگر مقدار شیب دامنه از این مقدار کم‌تر باشد، حرکت قطعه سنگ متوقف می‌شود و در شیب‌های بیشتر به حرکت خود ادامه می‌دهد. این ضریب را می‌توان از ضریب ارجاعی مماسی به دست آورد (رابطه ۳).

$$\text{Friction angle} = \frac{1 - R_t}{R_n} \quad (3)$$

زاویه حاصل از رابطه فوق به صورت رادیان است که باید به درجه تبدیل گردد [۱۵]. ناهمواری سطح شیب از عوامل کنترل‌کننده فاصله نهایی قطعات از پای دامنه است. دامنه‌های دارای سطح صاف مانند صفحات رهایی در توده‌های گرانیتی، مثل پیست اسکی عمل می‌کنند و قطعات هنگام غلطش روی آن‌ها، انرژی کم‌تری را از دست می‌دهند؛ در نتیجه با فاصله دورتری نسبت به شیب متوقف خواهند شد. در حالی که شیب‌های ناهموار به دلیل اصطکاک زیاد، باعث کاهش شدید انرژی قطعات شده و در نهایت فاصله نیز کم می‌شود. در این نوع شیب‌ها قطعه ممکن است روی سطح دامنه نیز توقف کند و تا انتهای شیب حرکت نکند [۱۶].

خصوصیات بلوک سقوطکرده شامل شرایط ابتدایی آن (نقطه جدایش، تعداد و جرم قطعات و سرعت ابتدایی) است. بیشتر شبیهایی که خطر ریزش را نشان می‌دهند شبیه تندر و تعداد زیادی قطعات ناپایدار در طول شبی دارند. این امر باعث می‌شود که قطعات از هر جایی در امتداد شبی حرکت کنند. البته در مقایسه با هندسه شبی و خصوصیات مواد تشکیل‌دهنده آن، نقطه جدایش تأثیر چندانی در تعیین مسیر سقوط ندارد. اصولاً محل‌هایی نزدیک به قله دارای بیشترین انرژی پتانسیل هستند بنا بر این بهتر است محل ابتدایی و نقطه شروع سقوط را از این محل‌ها انتخاب کنیم.

قطعات سنگی در هنگام جدایش از توده اصلی دارای سرعت کمی هستند. پس از جدایش سرعت حرکت این قطعات به طور ناگهانی افزایش چشم‌گیری می‌یابد. قطعاتی که بر اثر زمین‌لرزه حرکت می‌کنند سرعت اولیه بیشتری دارند. در مدل‌های کامپیوتری سرعت اولیه یا ابتدایی بین $۰/۵$ تا ۳ متر بر ثانیه است [۱۰].

بحث

در این تحقیق به منظور بررسی مکانیسم سقوط سنگ و دست‌یابی به اطلاعات مورد نیاز برای طراحی راهکارهای مناسب برای کنترل خطر، از مدل کامپیوتری Rocfall استفاده شد. این برنامه مدلی دو بعدی است که به تغییرات توپوگرافی و جنس مصالح تشکیل‌دهنده دامنه بسیار حساس است. نتایج حاصل از این برنامه، شامل مسیر سقوط بلوک، ارتفاع جهش، فاصله نهایی آن از پای دامنه و انرژی جنبشی و ارتفاع جهش است که به صورت گراف‌هایی ارائه می‌شود.

با توجه به شرایط دامنه (تغییرات شبی و توسعه خانه‌های روستایی)، مقاطعی به عنوان نمونه انتخاب و تحلیل‌های لازم در این مقاطع انجام گرفت. در کل تعداد ۱۲ مقطع در دامنه این روستا انتخاب گردید. چنان‌که ذکر شد، دامنه بررسی شده از آهک، شیل و مواد واریزهای که به خاک تبدیل شده است، تشکیل گردیده است. هم‌چنین به دلیل تأثیر عوامل تکتونیکی سیستم درزه و شکاف دارای امتداد و شبی متفاوت است. بنا بر این قطعات سنگی جدا شده از

قسمت آهکی، تغییرات وسیعی را در نقطه جدایش، حجم مواد ریزشی، سرعت، ارتفاع جهش، انرژی و فاصله نهایی از پای شیب نشان خواهند داد.

گسیختگی، نخستین فاز حرکتی در مراحل سقوط قطعه سنگی است که به صورت واژگونی و یا لغزش رخ می‌دهد. حرکت ابتدایی در این دامنه اغلب به صورت لغزش است و واژگونی به نسبت بسیار کمی رخ می‌دهد. واژگونی حرکتی است که در قسمت‌های با شیب زیاد و عمدتاً در ستیغ دامنه‌ها مشاهده می‌شود.

نتایج حاصل از بررسی‌های صورت گرفته و مقاطع انتخابی در این دامنه در شکل ۹ نشان داده شده است. چنان‌که در این شکل مشاهده می‌شود، در واحد A جدایش و سقوط قطعات به شکل اولیه رخ می‌دهد. واحد B علاوه بر این که دارای شیب کمی است، به وسیله شیل و یا واریزه پوشیده شده است که دارای ضریب ارتقایی کمتری نسبت به دیواره آهکی است. این دو عامل سبب توقف این بلوك‌های سنگی که اغلب دارای ابعاد بزرگی هستند، در این واحد شده است. بلوك‌های موجود در واحد B به خصوص در اثر تحریکات ناشی از زمین‌لرزه می‌توانند به صورت ثانویه سقوط کنند.

شکل و ابعاد بلوك‌های سقوط‌کرده در پای دامنه نیز اهمیت خاصی در شناخت مکانیسم سقوط دارند و اطلاعات مهمی را در مورد مسیر سقوط قطعات در آینده به دست می‌دهند. در شکل ۹ برخی بلوك‌های سقوط‌کرده نیز نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود تجمع بیش‌تر بلوك‌های سقوط‌کرده در محل فعالیت گسل و بخش خردشده توده سنگ آهک است. ضرایب ارتقایی نرمال و مماسی مربوط به سنگ آهک از تحقیق صورت گرفته در روستای سن کوریکو^۱ در ایتالیا که چیسی^۲ و همکاران [۱۷] ارائه کرده‌اند، به دست آمد. ضرایب مربوط به خاک با استفاده از نتایج تحقیقات صورت گرفته توسط پفیر^۳ و برون^۴ [۱۸] به دست آمد. ضرایب مربوط به شیل نیز با مقایسه این ضرایب در تحقیقات مختلف و به نوعی استفاده از آنالیز برگشتی در مقطع ۲ به دست آمد. جدول ۲ مقادیر ضرایب ارتقایی نرمال و مماسی استفاده شده برای واحدهای مختلف موجود در دامنه روستای یدک را نشان می‌دهد.

مقاطع ۶ تا ۱۰ به دلیل ساخت منازل مسکونی بدون توجه به مسئله ریزش سنگ بر روی دامنه

۱. San Quirico

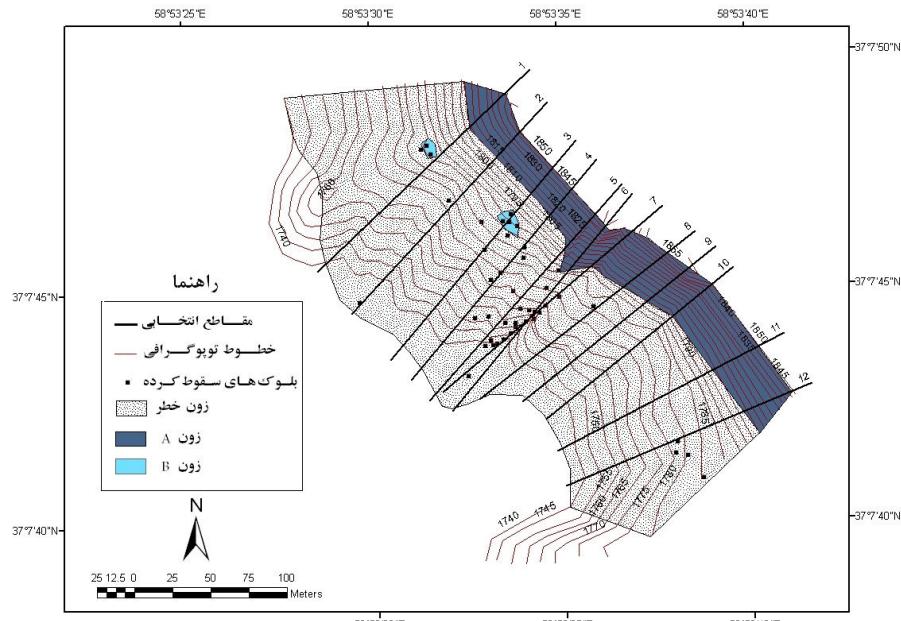
۲. Chiessi

۳. Pfeiffer

۴. Brown

بیشترین خطر را برای اهالی این روستا ایجاد کرده است. بهخصوص مقاطع ۶ و ۷ که به علت مجاورت با گسل توده سنگی خردشده بیشتری داشته و چنان‌که در شکل ۹ نیز مشاهده می‌شود تعداد بلوک‌های سقوط کرده بیشتر است.

در نهایت با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در منطقه که به تفضیل بیان گردید و با استفاده از برنامه Rocfall فاصله نهایی بلوک‌های سقوط کرده از پای دامنه برای مقاطع مختلف به دست آمد، با در نظر گرفتن این فاصله‌های نقشه محدوده خطر در روستای یدک با استفاده از نرم‌افزار ArcGIS تعیین و ترسیم گردید (شکل ۹).



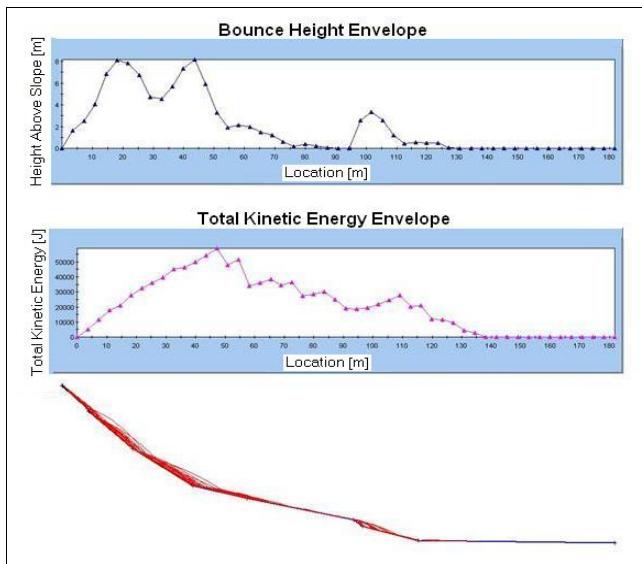
شکل ۹. نقشه توپوگرافی دامنه به همراه مقاطع انتخابی و زون خطر

جدول ۲. ضرایب ارجاعی نرمال و مماسی آهک، شیل و خاک

ردیف	واحد	ضریب ارجاعی نرمال	ضریب ارجاعی مماسی
۱	آهک	۰/۶	۰/۸۵
۲	شیل	۰/۳۸	۰/۸
۳	خاک	۰/۳	۰/۸

در شکل ۱۰ مسیر حرکت بلوک سنگی مربوط به مقطع شماره ۸ بهمراه تغییرات انرژی جنبشی و ارتفاع جهش بلوک‌ها در طول مسیر نشان داده شده است.

به طور کلی در تمامی مقاطع در ابتدای مسیر حرکت بلوک‌ها، تغییرات انرژی جنبشی روند افزایشی داشته است. شبیز زیاد این بخش از دامنه و ضریب ارجاعی نرمال و مماسی نسبتاً زیاد مربوط به سنگ‌های آهکی تشکیل‌دهنده این بخش از دامنه، دلیل این افزایش انرژی است. در صورتی که بلوک‌ها پس از برخورد با بخش شیلی یا واریزهای با شبیز ملایم‌تر و ضریب ارجاعی کم‌تر، به تدریج انرژی خود را از دست می‌دهند تا این‌که در محل توقف، انرژی جنبشی بلوک به صفر می‌رسد. از آنجا که نرمافزار استفاده شده برای بررسی مکانیسم سقوط، نسبت به تغییرات جزئی هندسه شبیز نیز حساس است، تغییراتی که در مقدار انرژی جنبشی در طول مسیر حرکت بلوک بر روی بخش واریزهای دامنه دیده می‌شود به دلیل تغییرات موجود در شبیز دامنه است.



شکل ۱۰. مسیر حرکت بلوک‌های سنگی و گراف مربوط به تغییرات ارتفاع جهش و انرژی جنبشی بلوک‌ها در طول مسیر مربوط به مقطع شماره ۸

در تمامی مقاطع بیشترین ارتفاع جهش مربوط به بخش آهکی دامنه است، در صورتی که حرکت بلوک بر روی بخش شیلی و واریزهای به صورت غلطش و یا جهش با ارتفاع کم است و تنها در نقاطی که شیب دامنه افزایش یافته است ارتفاع جهش نیز بیشتر شده است.

بنا بر این با توجه به تجزیه و تحلیل صورت گرفته و تهیه نقشه خطر برای دامنه مشرف به روستا مشخص گردید که روستا در معرض خطر سقوط سنگ است. یکی از کارهای اساسی برای جلوگیری از خطرات جانی و مالی برای اهالی روستا ارائه راهکارهای مناسب برای جلوگیری از خطر است. بدین منظور برای جلوگیری از خطر این راهکارها ارائه می‌گردد:

- پایدار کردن وضعیت رئومکانیکی توده سنگی با استفاده از میل مهارها، بولت و مهارهای کابلی در مناطقی که دارای پتانسیل خطر سقوط هستند.

- استفاده از شاتکریت یا بتنپاشی برای جلوگیری از نفوذ آب‌های سطحی، کاهش سرعت فرسایش و هم‌چنین استحکام نسبی بخشیدن به توده سنگی.

- استفاده از تورسیمی راه حل مناسب دیگری برای کنترل خطر در این دامنه است. پیچ کردن تور به دیواره سنگی می‌تواند از جدا شدن سنگ‌ها جلوگیری کرده و پایداری بیشتری برای دامنه یا دیواره سنگی فراهم کند.

- روش دیگری که در سال‌های اخیر برای مدیریت خطر در شیب‌های مستعد ریزش معمول شده است، استفاده از شبکه رینگی است. این شبکه‌ها در دو نوع ارتقای و غیرارتقای ساخته می‌شوند. در شبکه‌ای که فقط قسمت خاصی در معرض خطر است و همچنین در جاهایی که وسعت منطقه دارای پتانسیل ریزش زیاد باشد، شبکه‌های رینگی را می‌توان مانند دیگر موانع فیزیکی استفاده کرد. تکیه‌گاه این شبکه‌ها میله‌های فولادی ارتقای یا غیرارتقای است که به صورت قائم و یا با زاویه خاصی نسبت به سطح شبکه کار گذاشته می‌شوند.

- کاشت درختان تنومند در پای شبکه، یکی از روش‌های مناسب برای جلوگیری از ورود قطعات سنگی به مناطق مسکونی روستا است. البته درخت کاری بر روی قسمتی از

دامنه که از شیل سرچشمه تشکیل شده است امکان‌پذیر نیست، اما در بخش خاکی می‌تواند به عنوان راهکاری مناسب معرفی گردد.

- روش دیگر هرس کردن دیواره آهکی است، هرس کردن عبارت است از برداشتن بلوک‌های سست و مستعد ریزش، که این کار را می‌توان با انفجارهای کوچک و کنترل شده انجام داد. در قسمت‌هایی از دامنه که عمل کرد گسل باعث خردشیدگی زیاد توده سنگی شده است، این روش مناسب است. همچنین روی دامنه بلوک‌های سنگی بزرگی دیده می‌شود که احتمال حرکت ثانویه آن وجود دارد، خردکردن و برداشتن این بلوک‌ها نیز امری الزامی است. از آنجایی که عمل هرس کردن برای ساکنین بخش‌های پایین دامنه خطرناک است، باید با دقت زیادی انجام گیرد.

- ارتفاع جهش قطعات پس از برخورد با سطح زمین رابطه تنگاتنگی با ارتفاع نقطه جدایش دارد، بنا بر این پلکانی کردن شیب‌ها یک روش کاهش فاصله بین نقطه جدایش و نقطه برخورد (ارتفاع) و در نتیجه کاهش خطر ریزش‌های سنگی است. اجرای این روش در روستای یدک به دلیل فاصله کم بین سازه‌ها و دامنه و همچنین هزینه زیاد امکان‌پذیر نیست.

- احداث دیوار ضربه‌گیر با ارتفاع مناسب نیز روش دیگری برای جلوگیری از ورود قطعات سنگی به محدوده روستا است.

- تخلیه منازل مسکونی در محدوده خطر به خصوص منازلی که بر روی دامنه احداث شده‌اند. لازم به ذکر است نتایج حاصل از بررسی‌های صحرایی نشان داد که تخلیه و برداشتن سقف منازلی که در قسمت‌های بالایی دامنه و نزدیک به دیواره آهکی قرار دارند، سبب می‌شود بلوک‌های سقوط‌کرده به تله افتاده و از حرکت آن‌ها به‌سمت قسمت‌های پایین دامنه جلوگیری شود.

- زون‌بندی روستا به مناطق پر خطر، متوسط و کم خطر. تخلیه مناطق پر خطر، اسکان خانه‌های روستایی و محل نگهداری دام به مناطق با خطر متوسط و جلوگیری از

احداث ساختمان‌های عمومی نظیر مدرسه، درمانگاه و دفتر مخابراتی و ... در محدوده کم خطر.

نتیجه‌گیری

روستای یدک از توابع شهرستان قوچان در استان خراسان رضوی است. دامنه مشرف به این روستا بهدلیل وجود آهک‌های سازند تیرگان با درز و شکاف فراوان مستعد ریزش یا سقوط سنگ است. علاوه بر سیستم ناپیوستگی، اقلیم منطقه با نزوالت جوی فراوان و نفوذ آب به درون سیستم ناپیوستگی‌ها و همچنین فرآیندهای بخشکافیگی و دماشکافیگی از مهم‌ترین عوامل در جدایش بلوک‌های سنگی و ناپایداری آن‌ها است.

طبق بررسی‌های صحراوی صورت گرفته و با استفاده از نرم‌افزار Dips علاوه بر لایه‌بندی، چهار سیستم درزه اصلی (J_1 ، J_2 ، J_3 و J_4) در منطقه شناسایی شد. با توجه به این که دامنه بررسی شده بخشی از یال شمال‌شرقی ناویدیس یدک است، امتداد لایه‌بندی به صورت NW-SE است و دارای شبیه متوسط ۶۲ درجه به سمت جنوب‌غرب است. سیستم‌های درزه نیز تحت تأثیر نیروهای فعال در منطقه که موجب ایجاد تاقدیس و ناویدیس در منطقه شده‌اند، به وجود آمده‌اند. این درزه‌ها شامل دو سیستم درزه برشی (J_1 و J_2) بوده که با زاویه حدود ۶۰ درجه نسبت به یکدیگر فرار گرفته‌اند و در اثر نیروهای فشارشی وارد در زمان چین‌خوردگی ایجاد شده‌اند. دسته درزه J_3 از نوع درزه‌های کششی بوده و عمود بر محور ناویدیس ایجاد شده است. سیستم درزه J_4 از نوع درزه‌های رهایی است و به موازات سطح محوری چین به وجود آمده و دارای شبیه کم به سمت شمال‌شرق است. وجود این دسته درزه‌ها به همراه دسته درزه‌های تصادفی باعث گردیده است تا بلوک‌های ایجاد شده دارای اشکال و ابعاد متغیری باشند.

به‌منظور بررسی مکانیسم سقوط سنگ در دامنه بررسی شده با نرم‌افزار Rocfall تعداد ۱۲ مقطع با توجه به شرایط دامنه (شبیه دامنه، توسعه منازل مسکونی و محل گسل‌خوردگی) برای تهیه نیم‌رخ توپوگرافی دامنه انتخاب گردید. ضریب ارجاعی و ضریب اصطکاک مهم‌ترین

خصوصیات مکانیکی مربوط به مواد تشکیل دهنده دامنه است که در بررسی‌های مرتبط با پدیده سقوط سنگ استفاده شده است.

تحلیل‌های صورت گرفته نشان داد که تغییرات شیب دامنه و ضریب ارجاعی مواد سازنده آن بیشترین نقش را در تعیین مسیر حرکت بلوک‌ها، ارتفاع جهش و میزان انرژی جنبشی آن‌ها در طول مسیر حرکت بلوک‌های سقوط کرده دارند. بهطوری که در نقاط با شیب زیاد یا بخش‌هایی از دامنه که از آهک با ضریب ارجاعی زیاد تشکیل شده است، انرژی جنبشی بلوک‌ها و ارتفاع جهش آن‌ها بیشتر از نقاطی است که از شیل یا واریزه با ضریب ارجاعی کم‌تر و شیب ملایم‌تر تشکیل یافته است. با توجه به بررسی‌های صحراوی صورت گرفته و تجزیه و تحلیل‌های انجام‌شده با نرم‌افزار Rocfall، نقشه زون خطر سقوط سنگ در روستای یدک مشخص گردید تا در آینده از توسعه روستا در مناطق پرخطر جلوگیری به عمل آید.

منابع

1. Walley, W. B., "Rockfalls in slope instability", D. Brumsdem and D.B. Prior (eds), Wiley and Scienc Ltd. Ch.chester (1984) 217-256.
2. Alejano, L.R., Pons, B., Bastante, F. G., Alonso, E., Stockhausen, H. W., "Slope geometry design as a means for controlling rockfalls in quarries", Int. J. Rock Mech. & Min. Sciences, 44 (2007) 903-921.
3. Stevens, W. D., "ROCFALL: a tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls, M.A.Sc. thesis", Department of civil engineering, University of Toronto. Ontario, Canada, (1998) 105.
4. Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., Agliardi, F., "STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls", Computers & Geosciences, 28 (2002) 1079-1093.

5. Topal, T., Akin, M., Ozden, U. A. , "Assessment of rockfall hazard around Afyon Castle", Turkey, Environ Geol, 53 (2007) 191-200.
6. Yilmaz, I., Yildirim, M., Keskin, I., "A method for mapping the spatial distribution of rockfall computer program analyses results using ArcGIS software", Bull Eng Geol Environ, 67 (2008) 547-554.
7. Choi, Y., Lee, J. Y., Lee, J., Park, H. D., "Engineering geological investigation into rockfall problem: A case study of the Seated Seokgayeorae image carved on a rock face at the UNESCO world heritage site in Korea", Geosciences Journal, 13 (2009) 69-78.
8. Tunusluoglu, M. C., Zorlu, K., "Rockfall hazard assessment in a cultural and natural heritage (Ortahisar Castle, Cappadocia, Turkey)", Environ Geol, 56 (2009) 963-972.
9. Varnes, D. J., "Slope movements: type and processes, in: landslide analysis and control, R. L. Schuster, R. J. Krizek (eds)", Transportation research board. Special report 176, Washington, DC (1978) 11-35.
10. Crosta, G. B., Agliardi, F.A., "Methodology for physically based rock fall hazard assessment", J. Natural Hazard and Earth System Sciences, 3 (2003) 407-422.
11. Agliardi, F., Crosta, G. B, "High resolution three-dimensional numerical modeling of rock falls", Int. J. Rock Mech. & Min. Sciences, 40 (2003) 455-471.
12. Imre, B., Räbsamen, S., Springman, S. M., "A coefficient of restitution of rock materials", Comp. Geosci, 34 (2008) 339-350.

13. Hoek, E., "Practical rock engineering" (2007), Available on the Rocscience website www.rocsicence.com
14. Antoniou, A. A., Lekkas, E., "Rockfall susceptibility map for Athinios port, Santorini Island, Greece, Geomorphology" (2010) 15.
15. ROCSIENCE, "Rocfall user manual. Statistical analysis of rockfalls, (2002) Available on the Rocscience website", www.rocsicence.com/roc/software/Rocfall.htmS.
16. Hoek, E., "Rock fall-a program in BASIC for the analysis of rock falls from slopes", Golder associates, University of Toronto, Unpublished notes (1990).
17. Chiessi, V., D'Orefice, M., Mugnozza, G. S., Vitale, V., Cannese, C., "Geological, geomechanical and geostatistical assessment of rockfall hazard in San Quirico village (Abruzzo, Italy)", Geomorphology (2010) 15.
18. Pfeiffer, T. J., Bowen, T. D., "Computer simulation of rockfalls", Bulletin of Association of Engineering Geologists, 26 (1989) 135-146.