بررسی مکانیسم سقوط سنگ و تهیهٔ نقشهٔ محدودهٔ خطر و ارائه راه کارهای لازم در روستای یدک (شیمال استان خراسان رضوی)

صفورا زمانی، *محمد غفوری، غلامرضا لشکری پور، ناصر حافظی مقدس: دانشگاه فردوسی مشهد، گروه زمین شناسی تاریخ: دریافت ۸۹/۱۲/۷ پذیرش ۸۹/۹/۸

چکیده

اساسی ترین روش برای کاربری زمین در مناطق کوهستانی ارزیابی خطر سقوط سنگ است که به علت گسترش ساخت و ساز در آن مناطق و خطر سقوط سنگ، مسائل جانی و مالی فراوانی ایجاد می کند. هدف این مقاله ارزیابی خطر سقوط سنگ در شمال روستای یدک است. روستای یدک از توابع شهرستان قوچان در استان خراسان رضوی در شمال شرق ایران قرار دارد. وجود آهکهای تیرگان با درز و شکاف فراوان در شمال شرق این روستا سبب ناپایداری شیب و احتمال سقوط سنگ شده و برای مناطق مسکونی روستایی نزدیک شیب خطر آفرین است. نوع سنگ، ژئومورفولوژی، شبکه زهکش و فعالیتهای لرزهای از عوامل مؤثر در لغزش هستد. برای بررسی سیستم درز و شکافها در منطقه، ۱۸۰ ناپیوستگی برداشت و از نرمافزار Dips استفاده شده است. از آنجا که سقوط سنگ از جمله ناپایداریهای اصلی در شیب قسمت شمالی روستای یدک است، از برنامه Rocfall برای تعیین محدودهٔ خطر و بررسی نحوهٔ سقوط سنگ استفاده شده است. سرانجام نقشه پهنهٔ خطر سقوط سنگ در این روستا با نحوهٔ سقوط سنگ در این روستا با

واژههای کلیدی: سقوط سنگ، آهک تیر گان، ناییوستگی، نرمافزار Rocfall

^{*}نویسنده مسئول ghafoori@um.ac.ir

مقدمه

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

عوامل مؤثر در ایجاد پدیدهٔ 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 زمین لرزه)، عوامل هیدرولوژیکی و آب و هوایی (بارندگیهای سنگین، ذوب سریع برف، تغییرات دما و فرآیند دماشکافتگی)، عوامل زیستی (تنشهای ناشی از رشد ریشهٔ گیاهان در درون درز و شکافها) و عوامل انسانی است. در شیبهای سنگی تعیین مکانیسم گسیختگیهای بالقوهای که شرایط ساختاری کنترلکنندهٔ آنها است، باید در دستور کار قرار گیرد. در این گونه پژوهشها می توان 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 دههٔ اخیر محققان مختلف سعی کردهاند تا با طراحی مدلهای کامپیوتری روشی مناسب برای بررسی این پدیده ارائه دهند. بعضی از این برنامهها دوبعدی و بعضی به صورت سهبعدی است. از جمله نرمافزارهای دوبعدی و سهبعدی میتوان بهترتیب به برنامههای Rocfall [۳] اشاره کرد.

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

بسیاری از این نرم افزار به منظور ارزیابی و بررسی دامنه های با شیب تند و مستعد سقوط سنگ استفاده کرده اند که از آن جمله می توان به تحقیقات صورت گرفته توپال و همکاران [٥]؛ یلماز و همکاران [٦]؛ چویی و همکاران [۷] و تانوسلوگلو و زورلو [۸] اشاره کرد.

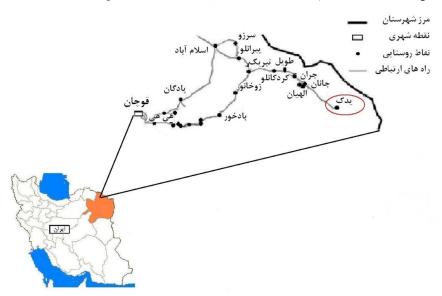
اگر چه در نگاه اول، ارزیابی سقوط سنگ ساده بهنظر میرسد، اما در واقع پدیدهای بسیار پیچیده است که آنالیز آن به دانستن فاکتورهایی مانند نقطهٔ جدایش بلوک سنگی، شکل و ژئومتری آن، توپوگرافی شیب، میزان انرژی کاهش یافته در هنگام برخورد و غلطش، خواص مکانیکی بلوک سنگی و دامنه و همچنین سرعت بلوکها در هر نقطه در طول مسیر بستگی دارد. در واقع آنالیز این پدیده حتی در حالت ساده آن و با دانستن شرایط اولیهٔ سقوط و نیروی محرک (مثل نیروی ثقل) نیز مشکل است [3]. با توجه به این که هر ساله در جهان تعداد زیادی از مردم قربانی لغزشهای سنگی و سنگ افتها میگردند، تثبیت آنها از اهمیت خاصی برخوردار است. بنا بر این بهمنظور بررسی این پدیده، بازدیدهای صحرایی دقیق و شناخت هرچه بیشتر وضعیت توپوگرافی و زمینشناسی دامنه و سیستمهای ناپیوستگی موجود، ضروری است.

موقعیت جغرافیایی و وضعیت زمینشناسی منطقهٔ 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 دقیقهٔ عرض شمالی و ۷۵ درجه و ۵۳ دقیقهٔ 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 چینخورده و تعداد چشم گیری تاقدیس و ناودیس و گسل و درزه برجای گذاشته است. روستای یدک نیز بر روی محور ناودیسی بههمین نام قرار گرفته است. محور این ناودیس دارای روند شمال غربی - جنوب شرقی است و ارتفاعات آن را سازند کربناتی مزدوران، شیل و ماسه سنگهای سازند شوریجه و سازند آهکی تیرگان تشکیل داده اند. در حالی که در هستهٔ این ناودیس

سازندهای شیلی سنگانه و سرچشمه و تراسهای آبرفتی قرار گرفته است. محل قرارگیری روستای یدک بهصورتی است که دامنهٔ شمال شرقی آن مشرف به سنگهای سخت و آهکی تیرگان است. قسمت پایین این دیواره نیز با شیلهای سرچشمه و واریزه پوشیده شده است. شکل ۲ موقعیت روستا در پای دامنه و سازندهای مشرف به آن را نشان می دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه ارتباطی روستای یدک



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

بررسی شرایط زمین شناسی و ساختاری دامنهٔ بررسی شده

دامنهٔ بررسی شده در قسمت شمال شرقی روستای یدک با طول حدود ۳۰۰ متر و ارتفاع حدود ۱۰۰ متر است. از نظر هندسهٔ شیب، دامنهٔ مذکور با توجه به وضعیت سنگ شناسی به دو بخش تقسیم می گردد. بخش فوقانی با شیب زیاد که از سنگ های سخت و آهکی سازند تیرگان تشکیل شده است و بخش تحتانی که از شیل های سازند سرچشمه و واریزه پوشیده شده است و دارای شیب ملایم تری است (شکل ۲). با توجه به چین خوردگی منطقه، درز و شکاف های فراوانی در سنگ های منطقه به چشم می خورد که در آهک های تیرگان به طور بارزتری قابل مشاهده است و موجب ناپایداری در این سنگ ها 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 به طوری که در دامنهٔ بررسی شده شیلها به قطعاتی به ابعاد سانتی متر تبدیل شده اند (شکل ۳).



شکل ۳. خردشدگی شدید شیلهای دامنهٔ بررسی شده

با توجه به اقلیم منطقه و میزان نزولات جوی، فرآیندهای دماشکافتگی و یخشکافتگی از عوامل مهم بازشدگی درزهها و جدایش بلوکهای سنگی هستند. انقباض و انبساط سنگها بر اثر نوسانات دما و انجماد آبهای نفوذی درون سیستم ناپیوستگی باعث درهم شکسته شدن تودهٔ سنگی و ترکخوردن آنها شده است. تکرار این فرآیندها باعث تضعیف تودهٔ 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 سیستم ناپیوستگیها علاوه بر افزایش فشار آب، باعث افزایش عمق هوازدگی و تضعیف

بیش تر تودهٔ سنگ نیز شده است. مجموعهٔ این فرآیندها باعث شده که بلوکها از تودهٔ سنگی جدا شده که آثار آن بهصورت بلوکهایی با ابعاد چندین مترمکعب بر روی سطح دامنه است. زمین لرزه 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 زمین لرزه ممکن است به وجود آید. شایان ذکر است عمل کرد زمین لرزه علاوه بر این که موجب ناپایداری بلوکهای مستعد می گردد، زمینه را برای سقوط ثانویه بلوکهایی که بر روی سطح دامنه سقوط کرده اند نیز فراهم می سازد.

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 شیب و کاهش انرژی از حرکت باز می ایستند. وجود تعداد زیادی از این بلوکها بر روی این واریزهها و شیلها گواه بر این امر است (شکل ٤). 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، بهطوری که برخی از ساکنین به علت سقوط بلوکهای سنگی که نمونهٔ آنها در شکل همشاهده می شود، مجبور به تخلیه منازل خود شدهاند.





شکل ٤. توقف تعدادی از بلوکهای سقوط کرده بر روی شیل (الف) و واریزه (ب)

لازم به ذکر است که دامنهٔ بررسی شده چه در قسمت آهکی و چه در قسمت شیلی فاقد پوشش گیاهی است. بنا بر این ریشهٔ گیاهان تأثیری در ایجاد و گسترش سیستمهای درزه در این دارد. در مجموع می توان گفت پدیدهٔ 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.

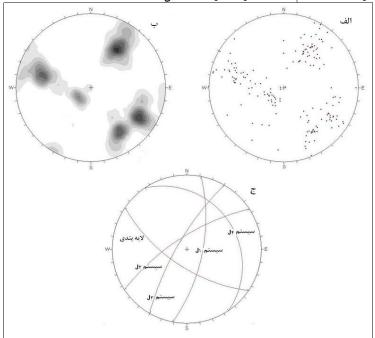


شکل ۵. تعدادی از بلوکهای سقوط کرده در محدودهٔ روستا

تأثیر عوامل ساختاری در پدیدهٔ سقوط سنگ

عوامل ساختاری (سطوح لایهبندی، ناپیوستگیها و گسلها) شرط اساسی و لازم برای وقوع حرکات دامنهای در شیبهای سنگی محسوب می شوند. با توجه به این نکته، شناسایی و تعیین نوع گسیختگی احتمالی در شیبهای سنگی به روش درزه نگاری و تحلیلهای استریوگرافی که به سادگی امکان پذیر است یکی از کارهای اولیه و اساسی محسوب می گردد. بهدلیل پیچیدگی سیستم تنش فعال در منطقه، سیستمهای درزه و شکاف بسیار گسترده است. بنا بر این به منظور تعیین دقیق وضعیت سیستمهای درزه و سایر ناپیوستگیها و هم چنین بررسی چگونگی تغییر روند آنها، حدود ۱۸۰ ناپیوستگی (درزه و لایهبندی) در دامنهٔ مشرف به روستا برداشت گردید. سپس برای تعیین سیستمهای ناپیوستگی غالب در منطقه و تحلیل استریوگرافیک تودهٔ سنگ از برنامهٔ Dips استفاده گردید. شکل 7 نحوهٔ توزیع نقاط قطبی، خطوط هم تراکم قطبی و صفحات اصلی ناپیوستگیها را نشان می دهد. نتایج حاصل نشان خطوط هم تراکم قطبی و صفحات اصلی ناپیوستگیها را نشان می دهد. نتایج حاصل نشان می دهد که در منطقه علاوه بر سیستم لایهبندی، چهار سیستم درزه اصلی وجود دارد که تودهٔ

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



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

با توجه به این که دامنهٔ بررسی شده بخشی از یال شمال شرقی ناودیس یدک است، امتداد لایه بندی به صورت شمال غرب - جنوب شرق بوده است و دارای شیب متوسط ۲۲ درجه به سمت جنوب غرب است.

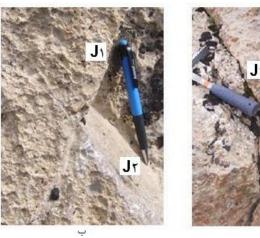
تجزیه و تحلیل نمودارهای فوق نشان می دهد که درزههای موجود بر اثر نیروهایی به وجود آمدهاند که باعث ایجاد چین خوردگی در منطقه شدهاند. به طوری که در هنگام چین خوردگی معمولاً دو سیستم درزه که با هم زاویهٔ $\rm 7$ درجه تشکیل داده است، ایجاد می شوند و درزههای برشی نامیده می شوند. سیستم درزههای $\rm J1$ و $\rm J2$ از این نوع هستند. این درزهها در زمان چین خوردگی، هنگامی که لایهها در امتداد عمود بر محور چین تحت فشارش واقع شده، به وجود آمده اند.

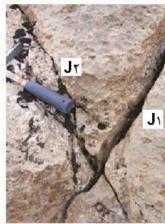
دسته درزه J3 در اطراف گسل موجود در دامنه و تحت تأثیر آن و نیروهای کششی ناشی از چینخوردگی لایهها به وجود آمده است. این دسته درزه دارای روند تقریباً شمال شرقی - جنوب غربی و با شیب ۷۵ درجه است. دسته درزهٔ مذکور از نوع درزههای کششی است، زیرا هنگامی که طبقات در امتداد عمود بر محور چین تحت فشارش قرار گرفته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

سیستم درزه J4 را می توان به عنوان درزه های رهایی در نظر گرفت که به موازات سطح محوری چین به وجود آمده است. این دسته درزه دارای روندی تقریباً موازی با روند لایه بندی است و دارای شیب کم (T درجه) به سمت شمال شرق است.

عاملی که در تعیین ابعاد قطعات سنگی تأثیر دارد، فاصله داری سطوح ناپیوستگی است. برداشت فاصله داری ناپیوستگی ها در دامنه روستای یدک نشان داد که فاصلهٔ بین سطوح لایه ببندی به طور متوسط ۷۰ سانتی متر، فاصلهٔ دستهٔ درزه های برشی J1 و J2 از ۱۰ سانتی متر تا ۱۰ متر متغیر است و فاصلهٔ بین سطوح سیستم درزه J4 از ۰۰ سانتی متر تا ۱ متر متغیر است. تمرکز سیستم درزه J3 بیش تر در فاصلهٔ چند متری از گسل موجود روی دامنه و با روند موازی با آن است، به طوری که در اطراف گسل فاصلهٔ بین سطوح این سیستم درزه کم و حدود ۵۰ سانتی متر است و با دور شدن از گسل، فاصله داری سطوح این نوع درزه افزایش می یابد. مشخصات سیستم غالب درز و شکاف ها در منطقه در جدول ۱ ارائه شده است.

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





شکل ۷. سیستم درزههای ${f J}_1$ و ${f J}_2$ با بازشدگی زیاد (الف) و فاقد بازشدگی $(f \psi)$



شکل ۸ سیستم درزههای J_4 ، J_3 و لایهبندی جدول ۱. شیب و برای شیب ناپیوستگیهای موجود در دامنهٔ روستای یدک

<u> فاص</u>لەدارى نوع ناپيوستگي حداكثر (cm) حداقل (cm) ١٥ 10. 1.1 ٧. درزهٔ برشی J1 10. ١٥ ٣٢٨ ٧٤ درزهٔ برشی J2 درزهٔ کششی ۳., ٤٠ ٣.١ ٧٦ J3 ١.. ٥٠ ۲۳ J4 ٥٨ درزهٔ رهایی ١.. ٦٢ لايەبندى لايەبندى

مكانيسم سقوط سنگ

قطعاتی از سنگ (بلوک سنگی) که توسط فرآیند لغزش یا واژگونی از یک شیب قائم یا نزدیک قائم جدا می شوند، ممکن است ادامهٔ 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 پدیدهٔ سقوط سنگ، هندسهٔ شیب و جنس مواد تشکیلدهندهٔ دامنه مهم ترین عوامل تعیین کنندهٔ مسیر و نوع حرکت بلوکها و فاصلهٔ نهایی آنها از پای دامنه است. در پژوهشهای مربوط به پدیدهٔ سقوط سنگ، از دو پارامتر ضریب ارتجاعی و ضریب اصطکاک برای نشان دادن خواص مکانیکی مواد سازندهٔ دامنه استفاده می شود.

ضریب ارتجاعی نشان دهندهٔ کاهش انرژی قطعات در هنگام برخورد با سطح شیب است و رفتار قطعه سقوط کرده را پس از برخورد با شیب نشان می دهد [۲. ضریب اصطکاک برای نشان دادن کاهش انرژی در هنگام غلطش یا لغزش به کار برده می شود. کاهش انرژی قطعات بر اثر تصادم یا غلطش تابعی از هندسه و خصوصیات ژئوتکنیکی شیب، ویژگی های مکانیکی، ژئومتری و دینامیک قطعات (سرعت انتقال، دوران و زاویه تصادم) و پوشش گیاهی است [۱۰].

مقدار انرژی که در زمان برخورد قطعه به سطح شیب کاهش می یابد به ضریب ارتجاعی بستگی دارد [۱۲]. سطوح پوشیده از سنگریزه و خرده سنگها مقدار چشم گیری از انرژی قطعه سنگ سقوط کرده را جذب می کنند و در بسیاری از موارد باعث متوقف شدن آن می شوند؛ در حالی که سطوح تمیز سنگهای غیرهوازده مقدار کم تری از انرژی قطعه را جذب می کنند. قابلیت جذب انرژی قطعه سنگ توسط مواد سطح شیب به طور ریاضی به وسیلهٔ ضریب ارتجاعی بیان می شود [۱۳]. در بیش تر مطالعات سقوط سنگ، از این ضریب به صورت دو مؤلفه مماسی (R_1) و نرمال (R_n) استفاده می گردد [۱۲].

$$R_n = \frac{V_{rn}}{V_{in}} \tag{1}$$

$$R_t = \frac{V_{rt}}{V_{it}} \tag{2}$$

برخورد و بعد از برخورد : V_{rn} , V_{in} و بعد از برخورد : V_{rr} , V_{in} و بعد از برخورد : V_{rt} , V_{it}

^{\.} Coefficient of restitution

بررسی های انجام شده توسط محققان مختلف نشان می دهد که دامنهٔ تغیرات ضریب ارتجاعی نرمال (R_n)، برای بیش تر سنگ ها معمولاً بین 7/0 تا 0/0 و برای ضریب ارتجاعی مماسی (R_t)، بین 0/0 است. زمین های پوشیده از گیاه و خاک نرم دارای مقادیر کم تر و سنگ بستر غیرهوازده و آسفالت دارای مقادیر بیش تری هستند [T].

استفاده از آنالیز برگشتی، روشی تجربی برای تعیین ضریب ارتجاعی است. در این صورت باید مسیر سقوط بلوک سنگی، محل توقف آن، نقطهٔ جدایش (ممکن است هوازدگی کمتری را نشان دهد) و نقاط برخورد بلوک سنگی به سطح شیب (اثر ضربه)، مشخص باشد. سپس با مدلسازی نیمرخ مسیر سقوط و با دانستن پارامترهای فوق، مقدار ضریب ارتجاعی را تغییر داد تا مقدار مورد نظر که با نقاط برخورد بلوک با سطح شیب و فاصله نهایی آن از پای دامنه همخوانی دارد، را به دست آوریم [10].

ضریب زاویه به شکل قطعهٔ سقوطکرده و نوع حرکت بستگی دارد. لغزش و غلطش قطعه سنگی به طور عمده با این ضریب کنترل می شود [۲]. مقداری که برای این ضریب انتخاب می گردد به گونهای است که اگر مقدار شیب دامنه از این مقدار کم تر باشد، حرکت قطعه سنگ متوقف می شود و در شیبهای بیش تر به حرکت خود ادامه می دهد. این ضریب را می توان از ضریب ارتجاعی مماسی به دست آورد (رابطهٔ ۳).

Friction angle =
$$\frac{(1-R_{c})}{R_{c}}$$
 (7)

زاویهٔ حاصل از رابطهٔ فوق بهصورت رادیان است که باید به درجه تبدیل گردد [۱۵].

ناهمواری سطح شیب از عوامل کنترلکنندهٔ 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 بهدلیل 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 [17].

خصوصیات بلوک سقوطکرده شامل شرایط ابتدایی آن (نقطهٔ جدایش، تعداد و جرم قطعات و سرعت ابتدایی) است. بیشتر شیبهایی که خطر ریزش را نشان می دهند شیبی تند و تعداد زیادی قطعات ناپایدار در طول شیب دارند. این امر باعث می شود که قطعات از هر جایی در امتداد شیب حرکت کنند. البته در مقایسه با هندسهٔ شیب و خصوصیات مواد تشکیل دهندهٔ آن، نقطهٔ 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 نقطهٔ شروع سقوط را از این محلها انتخاب کنیم.

قطعات سنگی در هنگام جدایش از تودهٔ اصلی دارای سرعت کمی هستند. پس از جدایش سرعت حرکت این قطعات به طور ناگهانی افزایش چشم گیری می یابد. قطعاتی که بر اثر زمین لرزه حرکت می کنند سرعت اولیهٔ بیش تری دارند. در مدل های کامپیو تری 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 راه کارهای مناسب برای کنترل خطر، از مدل کامپیوتری Rocfall استفاده شد. این برنامه مدلی دوبعدی است که به تغییرات توپوگرافی و جنس مصالح تشکیل دهندهٔ دامنه بسیار حساس است. نتایج حاصل از این برنامه، شامل مسیر سقوط بلوک، ارتفاع جهش، فاصلهٔ نهایی آن از پای دامنه و انرژی جنبشی و ارتفاع جهش است که به صورت گرافهایی ارائه می شود.

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

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

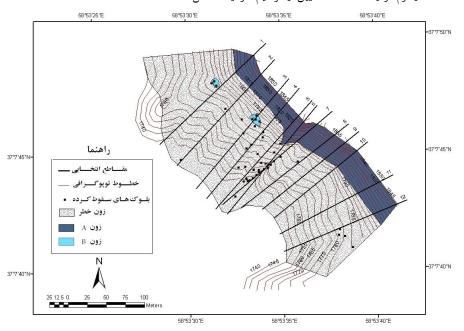
گسیختگی، نخستین فاز حرکتی در مراحل سقوط قطعهٔ سنگی است که بهصورت واژگونی و یا لغزش رخ میدهد. حرکت ابتدایی در این دامنه اغلب بهصورت لغزش است و واژگونی به نسبت بسیار کمی رخ میدهد. واژگونی حرکتی است که در قسمتهای با شیب زیاد و عمدتاً در ستیغ دامنهها مشاهده میشود.

نتایج حاصل از بررسی های صورت گرفته و مقاطع انتخابی در این دامنه در شکل P نشان داده شده است. چنان که در این شکل مشاهده می شود، در واحد P جدایش و سقوط قطعات به شکل اولیه رخ می دهد. واحد P علاوه بر این که دارای شیب کمی است، به وسیلهٔ شیل و یا واریزه پوشیده شده است که دارای ضریب ارتجاعی کم تری نسبت به دیوارهٔ آهکی است. این دو عامل سبب توقف این بلوکهای سنگی که اغلب دارای ابعاد بزرگی هستند، در این واحد شده است. بلوکهای موجود در واحد P به خصوص در اثر تحریکات ناشی از زمین لرزه می توانند به صورت ثانویه سقوط کنند.

شکل و ابعاد بلوکهای سقوطکرده در پای دامنه نیز اهمیت خاصی در شناخت مکانیسم سقوط دارند و اطلاعات مهمی را در مورد مسیر سقوط قطعات در آینده بهدست می دهند. در شکل ۹ برخی بلوکهای سقوطکرده نیز نشان داده شده است. چنان که مشاهده می شود تجمع بیش تر بلوکهای سقوطکرده در محل فعالیت گسل و بخش خردشده تودهٔ سنگ آهک است. ضرایب ارتجاعی نرمال و مماسی مربوط به سنگ آهک از تحقیق صورت گرفته در روستای سن کوریکو در ایتالیا که چیسی و همکاران [۱۷] ارائه کردهاند، بهدست آمد. ضرایب مربوط به خاک با استفاده از نتایج تحقیقات صورت گرفته توسط پفیفر و برون و ایدوعی استفاده از ضرایب مربوط به شیل نیز با مقایسهٔ این ضرایب در تحقیقهای مختلف و به نوعی استفاده از آلیز بـرگشتی در مقطع ۲ بـه دست آمد. جدول ۲ مقادیر ضرایب ارتجاعی نرمال و مماسی استفاده شده برای واحدهای مختلف موجود در دامنهٔ روستای یدک را نشان می دهد.

مقاطع 7 تا ۱۰ بهدلیل ساخت منازل مسکونی بدون توجه بهمسئلهٔ ریزش سنگ بر روی دامنه ۱. San Quirico ۲. Chiessi ۳. Pfeiffer ٤. Browen بیش ترین خطر را برای اهالی این روستا ایجاد کرده است. به خصوص مقاطع \mathbf{r} و \mathbf{v} که به علت مجاورت با گسل تودهٔ سنگی خردشدگی بیش تری داشته و چنان که در شکل \mathbf{v} نیز مشاهده می شود تعداد بلوک های سقوط کرده بیش تر است.

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

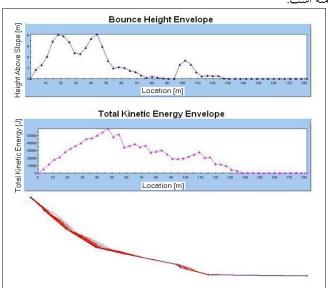


شکل ۹. نقشهٔ توپوگرافی دامنه بههمراه مقاطع انتخابی و زون خطر جدول ۲. ضرایب ارتجاعی نرمال و مماسی آهک، شیل و خاک

ضريب ارتجاعي مماسي	ضريب ارتجاعي نرمال	واحد	ردیف
•/٨٥	•/٦	آهک	١
•/٨	•/٣٨	شيل	۲
•/A	٠/٣	خاک	٣

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

به طور کلی در تمامی مقاطع در ابتدای مسیر حرکت بلوک ها، تغییرات انرژی جنبشی روند افزایشی داشته است. شیب زیاد این بخش از دامنه و ضریب ارتجاعی نرمال و مماسی نسبتاً زیاد مربوط به سنگهای آهکی تشکیل دهندهٔ این بخش از دامنه، دلیل این افزایش انرژی است. در صورتی که بلوکها پس از برخورد با بخش شیلی یا واریزهای با شیب ملایم تر و ضریب ارتجاعی کم تر، به تدریج انرژی خود را از دست می دهند تا این که در محل توقف، انرژی جنبشی بلوک به صفر می رسد. از آن جا که نرم افزار استفاده شده برای بررسی مکانیسم سقوط، نسبت به تغییرات جزئی هندسهٔ شیب نیز حساس است، تغییراتی که در مقدار انرژی جنبشی در طول مسیر حرکت بلوک بر روی بخش واریزهای دامنه دیده می شود به دلیل تغییرات موجود در شیب 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 شمارهٔ ۸

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

بنا بر این با توجه به تجزیه و تحلیل صورتگرفته و تهیهٔ نقشهٔ خطر برای دامنهٔ 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 ارائهٔ راهکارهای مناسب برای جلوگیری از خطر است. بدین منظور برای جلوگیری از خطر این راهکارها ارائه می گردد:

- پایدار کردن وضعیت ژئومکانیکی تودهٔ سنگی با استفاده از میل مهارها، بولت و مهارهای کابلی در مناطقی که دارای پتانسیل خطر سقوط هستند.
- استفاده از شاتکریت یا بتن پاشی 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 می تواند از جدا شدن سنگها جلوگیری کرده و پایداری بیش تری 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 ارتجاعی و غیرارتجاعی ساخته میشوند. در شیبهایی 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 ارتجاعی یا غیرارتجاعی است که بهصورت قائم و یا با زاویهٔ خاصی نسبت به سطح شیب کار گذاشته میشوند.
- کاشت درختان تنومند در پای شیب، یکی از روشهای مناسب برای جلوگیری از ورود قطعات سنگی به مناطق مسکونی روستا است. البته درختکاری بر روی قسمتی از

- دامنه که از شیل سرچشمه تشکیل شده است امکانپذیر نیست، اما در بخش خاکی می تواند به عنوان راه کاری 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 می توان با انفجارهای کوچک و کنترلشده انجام داد. در قسمتهایی از دامنه که عمل کرد گسل باعث خردشدگی زیاد تودهٔ سنگی شده است، این روش مناسب است. همچنین روی دامنهٔ بلوکهای سنگی بزرگی دیده می شود که احتمال حرکت ثانویهٔ 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 رابطهٔ تنگاتنگی با ارتفاع نقطهٔ جدایش دارد، بنا بر این پلکانی کردن شیبها یک روش کاهش فاصله بین نقطهٔ جدایش و نقطهٔ برخورد (ارتفاع) و در نتیجه کاهش خطر ریزشهای سنگی است. اجرای این روش در روستای یدک بهدلیل فاصلهٔ کم بین سازهها و دامنه و همچنین هزینهٔ زیاد امکانیذیر نیست.
- احداث دیوار ضربه گیر با ارتفاع مناسب نیز روش دیگری برای جلوگیری از ورود قطعات سنگی به محدودهٔ روستا است.
- تخلیهٔ منازل مسکونی در محدودهٔ خطر بهخصوص منازلی که برروی 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 دیوارهٔ آهکی قرار دارند، سبب می شود بلوکهای سقوط کرده به تله افتاده و از حرکت آنها به سمت قسمتهای پایین دامنه جلوگیری شود.
- زون بندی روستا به مناطق پرخطر، متوسط و کمخطر. تخلیه مناطق پرخطر، اسکان خانه های روستایی و محل نگه داری دام به مناطق با خطر متوسط و جلوگیری از

احداث ساختمانهای عمومی نظیر مدرسه، درمانگاه و دفتر مخابراتی و ... در محدودهٔ کمخطر.

نتیجه گیری

روستای یدک از توابع شهرستان قوچان در استان خراسان رضوی است. دامنهٔ 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 نزولات جوی فراوان و نفوذ آب به درون سیستم ناپیوستگیها و همچنین فرآیندهای یخشکافتگی و دماشکافتگی از مهم ترین عوامل در جدایش بلوکهای سنگی و ناپایداری آنها است.

طبق بررسی های صحرایی صورتگرفته و با استفاده از نرمافزار Dips علاوه بر لایهبندی، چهار سیستم درزهٔ اصلی J_2 J_3 J_4 J_2 J_5 J_6 J_6 J_7 J_8 J_8 J_8 J_9 J_9

به منظور بررسی مکانیسم سقوط سنگ در دامنهٔ بررسی شده با نرمافزار Rocfall تعداد ۱۲ مقطع با توجه به شرایط دامنه (شیب دامنه، توسعه منازل مسکونی و محل گسلخوردگی) برای تهیهٔ نیمرخ توپوگرافی دامنه انتخاب گردید. ضریب ارتجاعی و ضریب اصطکاک مهمترین

خصوصیات مکانیکی مربوط به مواد تشکیل دهندهٔ دامنه است که در بررسی های مرتبط با یدیده سقوط سنگ استفاده شده است

تحلیلهای صورت گرفته نشان داد که تغییرات شیب دامنه و ضریب ارتجاعی مواد سازندهٔ آن بیش ترین نقش را در تعیین مسیر حرکت بلوکها، ارتفاع جهش و میزان انرژی جنبشی آنها در طول مسیر حرکت بلوکهای سقوط کرده دارند. به طوری که در نقاط با شیب زیاد یا بخشهایی از دامنه که از آهک با ضریب ارتجاعی زیاد تشکیل شده است، انرژی جنبشی بلوکها و ارتفاع جهش آنها بیش تر از نقاطی است که از شیل یا واریزه با ضریب ارتجاعی کم تر و شیب ملایم تر تشکیل یافته است. با توجه به بررسیهای صحرایی صورت گرفته و تحلیلهای انجام شده با نرم افزار Rocfall، نقشهٔ زون خطر سقوط سنگ در روستای یدک مشخص گردید تا در آینده از توسعهٔ روستا در مناطق پرخطر جلوگیری به عمل آید.

منابع

- Walley, W. B., "Rockfalls in slope instability", D. Brumsdem and D.B. Prior (eds), Wiley and Scienc Ltd. Ch.chester (1984) 217-256.
- 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.
- 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.
- 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.

- Topal, T., Akin, M., Ozden, U. A., "Assessment of rockfall hazard around Afyon Castle", Turkey, Environ Geol, 53 (2007) 191-200.
- 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.
- 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.
- Tunusluoglu, M. C., Zorlu, K., "Rockfall hazard assessment in a cultural and natural heritage (Ortahisar Castle, Cappadocia, Turkey)", Environ Geol, 56 (2009) 963-972.
- 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.
- 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.
- 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.rocsicience.com
- 14. Antoniou, A. A., Lekkas, E., "Rockfall susceptibility map for Athinios port, Santorini Island, Greece, Geomorphology" (2010) 15.
- ROCSCIENCE, "Rocfall user manual. Statistical analysis of rockfalls, (2002) Available on the Rocscience website",

www.rocscience.com/roc/software/Rocfall.htmS.

- Hoek, E., "Rock fall-a program in BASIC for the analysis of rock falls from slopes", Golder associates, University of Toronto, Unpublished notes (1990).
- 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.
- Pfeiffer, T. J., Bowen, T. D., "Computer simulation of rockfalls",
 Bulletin of Association of Engineering Geologists, 26 (1989) 135-146.