بررسی مکانیسم سقوط سنگ و تهیهٔ نقشهٔ محدودهٔ خطر و ارائه راه‌کارهای لازم در روستای یدک (شمال استان خراسان رضوی)

صفورا زمانی، *محمد غفوری، غلامرضا لشکری پور،
ناصر حافظی‌مقدس: 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 به‌علت 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 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 هستند. 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 استفاده از نرم افزار GIS تهیه شده است.

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

*نویسنده مسئول ghafoori@um.ac.ir

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

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 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 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 زمین‌لرزه)، 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 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 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] و STONE [٤] 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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

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 [٦]؛ چویی[۳] و همکاران [۷] و تانوسلوگلو[٤] 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 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 [٤]. 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

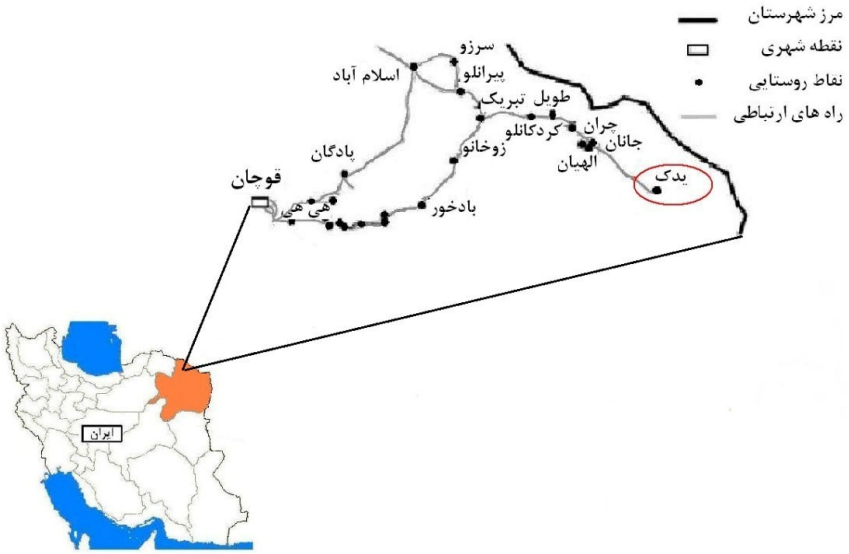
روستای یدک از توابع دهستان شیرین‌دره در بخش مرکزی شهرستان قوچان در استان خراسان رضوی است. این روستا در موقعیت جغرافیایی ۳۷ درجه و ۷ دقیقهٔ عرض شمالی و ۵۷ درجه و ۵۳ دقیقهٔ طول شرقی قرار دارد (شکل ۱).

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 چشم‌گیری 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- جنوب‌شرقی است و ارتفاعات آن را سازند کربناتی مزدوران، شیل و ماسه‌سنگ‌های سازند شوریجه و سازند آهکی تیرگان تشکیل داده‌اند. در حالی که در هستهٔ این ناودیس

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

سازندهای شیلی سنگانه و سرچشمه و تراس‌های آبرفتی قرار گرفته است. محل قرارگیری روستای یدک به‌صورتی است که دامنهٔ شمال‌شرقی 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 می‌دهد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و راه ارتباطی روستای یدک



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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

بررسی شرایط زمین‌شناسی و ساختاری دامنهٔ بررسی شده

دامنهٔ بررسی شده در قسمت شمال‌شرقی روستای یدک با طول حدود ۳۰۰ متر و ارتفاع حدود ۱۰۰ متر است. از نظر هندسهٔ شیب، دامنهٔ مذکور با توجه به وضعیت سنگ‌شناسی به دو بخش تقسیم می‌گردد. بخش فوقانی با شیب 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 شیب 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 دامنهٔ بررسی شده شیل‌ها به قطعاتی به ابعاد سانتی‌متر تبدیل شده‌اند (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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

بیش‌تر 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.

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 به‌وجود آید. شایان ذکر است عمل‌کرد 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 شیب 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 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 به‌علت سقوط بلوک‌های سنگی که نمونهٔ آن‌ها در شکل ۵ مشاهده می‌شود، 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 دامنه ندارد. در مجموع می‌توان گفت پدیدهٔ سقوط سنگ به‌علت وجود سنگ‌های سخت

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

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

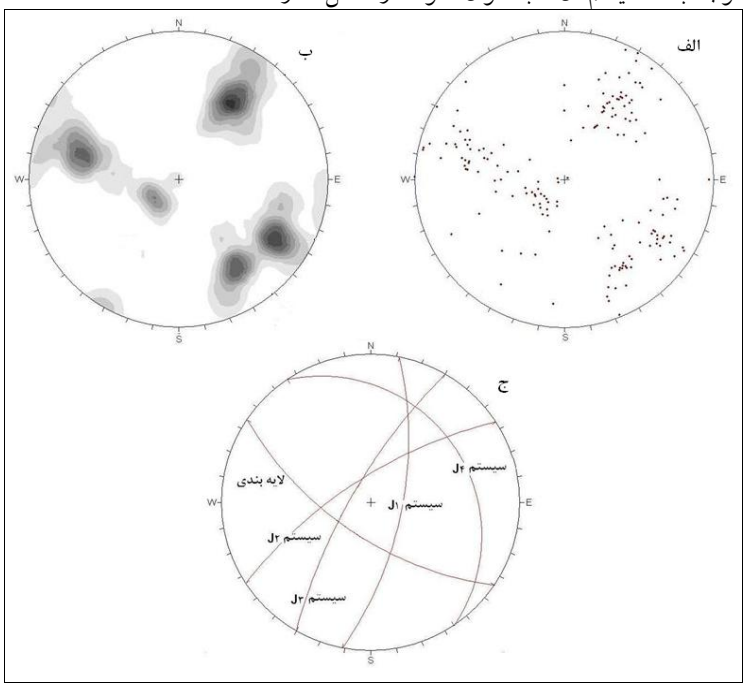
عوامل ساختاری (سطوح لایه‌بندی، ناپیوستگی‌ها و گسل‌ها) شرط اساسی و لازم برای وقوع حرکات دامنه‌ای در شیب‌های سنگی محسوب می‌شوند. با توجه به این نکته، شناسایی و تعیین نوع گسیختگی احتمالی در شیب‌های سنگی به روش درزه‌نگاری و تحلیل‌های استریوگرافی که به‌سادگی امکان‌پذیر است یکی از کارهای اولیه و اساسی محسوب می‌گردد.

به‌دلیل پیچیدگی سیستم تنش فعال در منطقه، سیستم‌های درزه و شکاف بسیار گسترده است. بنا بر این به‌منظور تعیین دقیق وضعیت سیستم‌های درزه و سایر ناپیوستگی‌ها و هم‌چنین 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 ٦ نحوهٔ توزیع نقاط قطبی، خطوط هم‌تراکم قطبی و صفحات اصلی ناپیوستگی‌ها را نشان می‌دهد. نتایج حاصل نشان می‌دهد که در منطقه علاوه بر سیستم لایه‌بندی، چهار سیستم درزه اصلی وجود دارد که تودهٔ

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

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.



شکل٦. توزیع قطبی، خطوط هم تراکم و صفحات اصلی ناپیوستگی در دامنهٔ بررسی شده

با توجه به این که دامنهٔ بررسی شده بخشی از یال شمال‌شرقی ناودیس یدک است، امتداد لایه‌بندی به‌صورت شمال‌غرب–جنوب‌شرق بوده است و دارای شیب متوسط ٦٢ درجه به سمت جنوب‌غرب است.

تجزیه و تحلیل نمودارهای فوق 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 زاویهٔ ٦٠ 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، به‌وجود آمده‌اند.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

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 شمال‌شرقی- 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 می‌شوند.

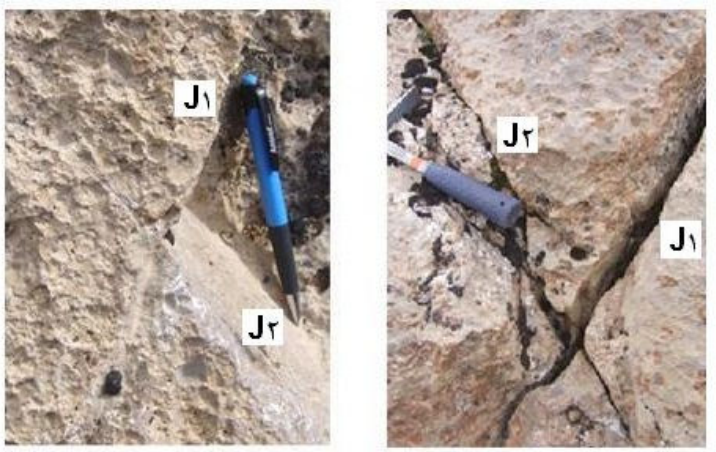
سیستم درزه J4 را می‌توان به‌عنوان درزه‌های رهایی در نظر گرفت که به موازات سطح محوری چین به‌وجود آمده است. این دسته درزه دارای روندی تقریباً موازی با روند لایه‌بندی است و دارای شیب کم (۲۳ درجه) به سمت شمال‌شرق است.

عاملی که در تعیین ابعاد قطعات سنگی تأثیر دارد، فاصله‌داری سطوح ناپیوستگی است. برداشت فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها در دامنه روستای یدک نشان داد که فاصلهٔ بین سطوح لایه‌بندی به‌طور متوسط ۷۰ سانتی‌متر، فاصلهٔ دستهٔ درزه‌های برشی J1 و J2 از ۱۵ سانتی‌متر تا ۱/۵ متر متغیر است و فاصلهٔ بین سطوح سیستم درزه J4 از ۵۰ سانتی‌متر تا ۱ متر متغیر است. تمرکز سیستم درزه J3 بیش‌تر در فاصلهٔ چند متری از گسل موجود روی دامنه و با روند موازی با آن است، به‌طوری که در اطراف گسل فاصلهٔ 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.

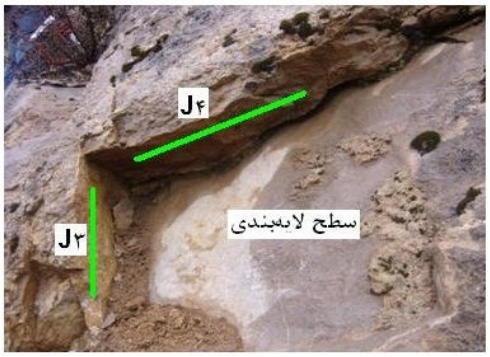
مجموعه عوامل فوق باعث شده است تا اندازهٔ قطعات سنگی سقوط‌کرده از دیواره متغیر باشد. بررسی‌های انجام‌شده در روستا نشان داد قطعات سنگی با اندازهٔ بزرگ‌تر و در نتیجه جرم بیش‌تر در نزدیکی پای دامنه متوقف شده‌اند و قطعات کوچک‌تر مسیر طولانی‌تری را طی نموده‌اند. شایان ذکر است که بسیاری از این قطعات کوچک‌تر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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]



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



شکل ۸. سیستم درزه‌های J_3، J_4 و لایه‌بندی

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

	نوع ناپیوستگی	شیب	جهت شیب	فاصله‌داری	
				حداقل (cm)	حداکثر (cm)
J1	درزهٔ برشی	۷۰	۱۰۱	۱۵	۱۵۰
J2	درزهٔ برشی	۷٤	۳۲۸	۱۵	۱۵۰
J3	درزهٔ کششی	۷٦	۳۰۱	٤۰	۳۰۰
J4	درزهٔ رهایی	۲۳	۵۸	۵۰	۱۰۰
لایه‌بندی	لایه‌بندی	٦۲	۲۱۷	۵۰	۱۰۰

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

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 ادامهٔ مسیر را به‌صورت جهش، سقوط آزاد در طول یک مسیر منحنی یا غلطش و لغزش به‌طرف پایین شیب طی کنند [۹].

در پژوهش‌های مربوط به پدیدهٔ سقوط سنگ، هندسهٔ شیب و جنس مواد تشکیل‌دهندهٔ دامنه مهم‌ترین عوامل تعیین‌کنندهٔ 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[۱] و ضریب اصطکاک برای نشان دادن خواص مکانیکی مواد سازندهٔ دامنه استفاده می‌شود.

ضریب ارتجاعی نشان‌دهندهٔ 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 به‌کار برده 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 ارتجاعی بستگی دارد [۱۲]. سطوح پوشیده از سنگ‌ریزه و خرده‌سنگ‌ها 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 به‌طور ریاضی به‌وسیلهٔ ضریب ارتجاعی بیان می‌شود [۱۳]. در بیش‌تر مطالعات سقوط سنگ، از این ضریب به صورت دو مؤلفه مماسی (R_t) و نرمال (R_n) استفاده می‌گردد[۱٤].

$$R_n = \frac{V_{rn}}{V_{in}} \quad (۱)$$

$$R_t = \frac{V_{rt}}{V_{it}} \quad (۲)$$

V_{rn} , V_{in} : مؤلفه‌های نرمال سرعت به‌ترتیب قبل و بعد از برخورد

V_{rt} , V_{it} : مؤلفه‌های مماسی سرعت به‌ترتیب قبل و بعد از برخورد

۱. Coefficient of restitution

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

بررسی‌های انجام‌شده توسط محققان مختلف نشان می‌دهد که دامنهٔ تغیرات ضریب ارتجاعی نرمال (R_n)، برای بیش‌تر سنگ‌ها معمولاً بین ۰/۳ تا ۰/۵ و برای ضریب ارتجاعی مماسی (R_t)، بین ۰/۸ تا ۰/۹۵ 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، 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 [۱۵].

ضریب زاویه به شکل قطعهٔ سقوط‌کرده و نوع حرکت بستگی دارد. لغزش و غلطش قطعه سنگی به‌طور 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 ارتجاعی مماسی به‌دست آورد (رابطهٔ ۳).

$$\text{Friction angle} = \frac{(1 - R_t)}{R_t} \qquad (۳)$$

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 [۱۶].

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

خصوصیات بلوک سقوط‌کرده شامل شرایط ابتدایی آن (نقطهٔ جدایش، تعداد و جرم قطعات و سرعت ابتدایی) است. بیش‌تر شیب‌هایی که خطر ریزش را نشان می‌دهند شیبی تند و تعداد زیادی قطعات ناپایدار در طول شیب دارند. این امر باعث می‌شود که قطعات از هر جایی در امتداد شیب حرکت کنند. البته در مقایسه با هندسهٔ شیب و خصوصیات مواد تشکیل‌دهندهٔ 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 به‌طور ناگهانی افزایش چشم‌گیری می‌یابد. قطعاتی که بر اثر زمین‌لرزه حرکت می‌کنند سرعت اولیهٔ بیش‌تری دارند. در مدل‌های کامپیوتری سرعت اولیه یا ابتدایی بین ۰/۵ تا ۳ متر بر ثانیه است[۱۰].

بحث

در این تحقیق به‌منظور 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 دوبعدی است که به تغییرات توپوگرافی و جنس مصالح تشکیل‌دهندهٔ 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 به‌صورت گراف‌هایی ارائه می‌شود.

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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

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 به‌نسبت 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، به‌وسیلهٔ شیل و یا واریزه پوشیده شده است که دارای ضریب ارتجاعی کم‌تری 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 B به‌خصوص در اثر تحریکات ناشی از زمین‌لرزه می‌توانند به‌صورت 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 می‌دهند. در شکل ۹ برخی بلوک‌های سقوط‌کرده نیز نشان داده شده است. چنان‌که مشاهده می‌شود تجمع بیش‌تر 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[۱] در ایتالیا که چیسی[۲] و همکاران [۱۷] ارائه کرده‌اند، به‌دست آمد. ضرایب مربوط به خاک با استفاده از نتایج تحقیقات صورت گرفته توسط پفیفر[۳] و برون[٤] [۱۸] به‌دست آمد. ضرایب مربوط به شیل نیز با مقایسهٔ این ضرایب در تحقیق‌های مختلف و به‌نوعی استفاده از آنالیز برگشتی در مقطع ۲ به‌دست آمد. جدول ۲ مقادیر ضرایب ارتجاعی نرمال و مماسی استفاده شده برای واحدهای مختلف موجود در دامنهٔ روستای یدک را نشان می‌دهد.

مقاطع ٦ تا ۱۰ به‌دلیل ساخت منازل مسکونی بدون توجه به‌مسئلهٔ ریزش سنگ بر روی دامنه

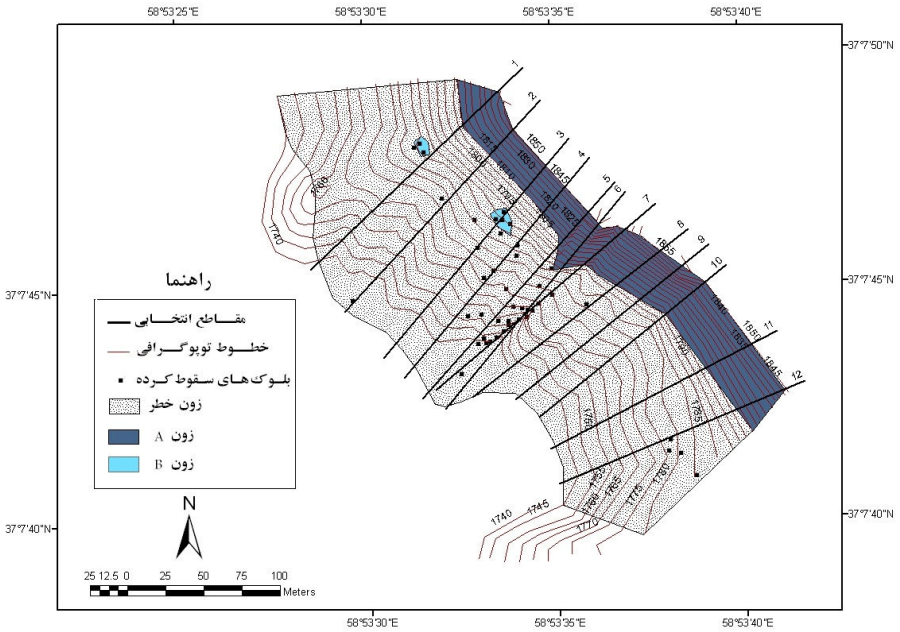
۱. San Quirico ۲. Chiessi ۳. Pfeiffer ٤. Browen

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

بیش‌ترین خطر را برای اهالی این روستا ایجاد کرده است. به‌خصوص مقاطع ٦ و ٧ که به‌علت مجاورت با گسل تودهٔ سنگی خردشدگی بیش‌تری داشته و چنان‌که در شکل ۹ نیز مشاهده می‌شود تعداد بلوک‌های سقوط کرده بیش‌تر است.

در نهایت با توجه به‌بررسی‌های صورت گرفته در منطقه که به تفضیل بیان گردید و با استفاده از برنامه Rocfall فاصلهٔ نهایی بلوک‌های سقوط کرده از پای دامنه برای مقاطع مختلف به‌دست 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

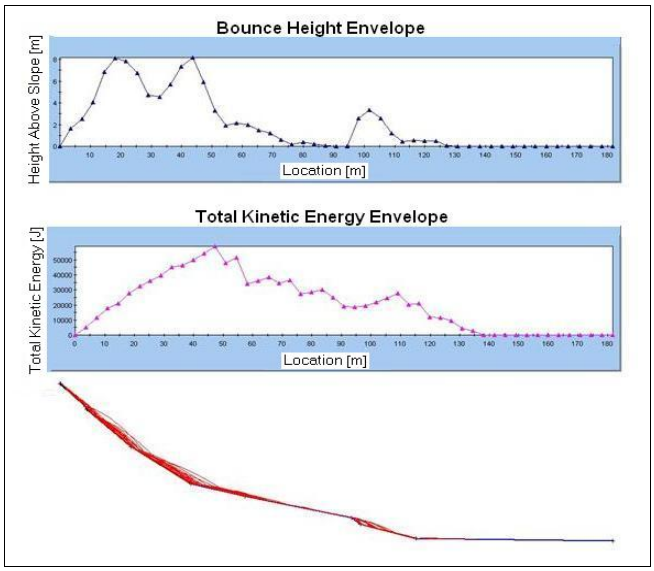
ردیف	واحد	ضریب ارتجاعی نرمال	ضریب ارتجاعی مماسی
۱	آهک	۰/٦	۰/۸۵
۲	شیل	۰/۳۸	۰/۸
۳	خاک	۰/۳	۰/۸

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

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.

به‌طور 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 تشکیل‌دهندهٔ این بخش از دامنه، دلیل این افزایش انرژی است. در صورتی که بلوک‌ها پس از برخورد با بخش شیلی یا واریزه‌ای با شیب ملایم‌تر و ضریب ارتجاعی کم‌تر، به‌تدریج 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 هندسهٔ شیب نیز حساس است، تغییراتی که در مقدار انرژی جنبشی در طول مسیر حرکت بلوک بر روی بخش واریزه‌ای دامنه دیده می‌شود به‌دلیل 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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

در تمامی مقاطع بیش‌ترین 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 بیش‌تر 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 می‌گردد:

- پایدار کردن وضعیت ژئومکانیکی تودهٔ سنگی با استفاده از میل‌مهارها، 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 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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

دامنه که از شیل سرچشمه تشکیل شده است امکان‌پذیر نیست، اما در بخش خاکی می‌تواند به‌عنوان 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 کنترل‌شده انجام داد. در قسمت‌هایی از دامنه که عمل‌کرد گسل باعث خردشدگی زیاد تودهٔ سنگی شده است، این روش مناسب است. هم‌چنین روی دامنهٔ بلوک‌های سنگی بزرگی دیده می‌شود 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 امکان‌پذیر نیست.
- احداث دیوار ضربه‌گیر 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 می‌شود بلوک‌های سقوط‌کرده به تله افتاده و از حرکت آن‌ها به‌سمت قسمت‌های پایین دامنه جلوگیری شود.
- زون‌بندی روستا به مناطق پرخطر، متوسط و کم‌خطر. تخلیه مناطق پرخطر، اسکان خانه‌های روستایی و محل نگه‌داری دام به مناطق با خطر متوسط و جلوگیری از

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

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

نتیجه‌گیری

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 مهم‌ترین عوامل در جدایش بلوک‌های سنگی و ناپایداری آن‌ها است.

طبق بررسی‌های صحرایی صورت‌گرفته و با استفاده از نرم‌افزار Dips علاوه بر لایه‌بندی، چهار سیستم درزهٔ اصلی (J_1، J_2، J_3 و J_4) در منطقه شناسایی شد. با توجه به این‌که دامنهٔ بررسی شده بخشی از یال شمال‌شرقی ناودیس یدک است، امتداد لایه‌بندی به‌صورت NW-SE است و دارای شیب متوسط ٦٢ درجه به سمت جنوب‌غرب است. سیستم‌های درزه نیز تحت تأثیر نیروهای فعال در منطقه که موجب ایجاد تاقدیس و ناودیس در منطقه شده‌اند، به وجود آمده‌اند. این درزه‌ها شامل دو سیستم درزه برشی (J_1 و J_2) بوده که با زاویهٔ حدود ٦٠ درجه نسبت به یک‌دیگر قرار گرفته‌اند و در اثر نیروهای فشارشی وارده در زمان چین‌خوردگی ایجاد شده‌اند. دسته درزهٔ J_3 از نوع درزه‌های کششی بوده و عمود بر محور ناودیس ایجاد شده است. سیستم درزه J4 از نوع درزه‌های رهایی است و به موازات سطح محوری چین به‌وجود آمده و دارای شیب کم به‌سمت شمال‌شرق است. وجود این دسته درزه‌ها به‌همراه دستهٔ درزه‌های تصادفی باعث گردیده است تا بلوک‌های ایجاد شده دارای اشکال و ابعاد متغییری باشند.

به‌منظور 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

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

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

تحلیل‌های صورت‌گرفته نشان داد که تغییرات شیب دامنه و ضریب ارتجاعی مواد سازندهٔ 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 ارتجاعی زیاد تشکیل شده است، انرژی جنبشی بلوک‌ها و ارتفاع جهش آن‌ها بیش‌تر از نقاطی است که از شیل یا واریزه با ضریب ارتجاعی کم‌تر و شیب ملایم‌تر تشکیل یافته است. با توجه به بررسی‌های صحرایی صورت‌گرفته و تجزیه و تحلیل‌های انجام‌شده با نرم‌افزار Rocfall، نقشهٔ زون خطر سقوط سنگ در روستای یدک مشخص گردید تا در آینده از توسعهٔ روستا در مناطق پرخطر جلوگیری به‌عمل 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.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

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.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]

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.

15. ROCSCIENCE, "Rocfall user manual. Statistical analysis of rockfalls, (2002) Available on the Rocscience website",
www.rocscience.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.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-11-03]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1390.5.1.2.7]