

تحلیل سقوط سنگ و ارزیابی خطر آن به روش تکاملی در دامنه‌های سنگی (مطالعه موردی: روستای اسفیدان، جنوب شرقی شهرستان بجنورد، خراسان شمالی)

رسول یازرلو^۱، طاهر زرگر هریجانی^۲، امین جمشیدی^{۳*}، رضا مهدوی ایزدی^۴

دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۵/۲۴ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۱۰/۱۷

چکیده

روستای اسفیدان یکی از مناطق تاریخی و توریستی در ۴۵ کیلومتری جنوب شرقی بجنورد در خراسان شمالی است که در یک ناحیه کوهستانی واقع شده است. افزایش جمعیت و توسعه روستا سبب شده برخی از منازل مسکونی و همچنین جاده ورودی اصلی روستا در محدوده یک دامنه سنگی پرشیب واقع شود. از آنجا که سقوط سنگ در این دامنه می‌تواند منجر به بسته شدن جاده ورودی روستا و همچنین آسیب به بخشی از منازل روستایی گردد، در این مقاله رخداد احتمالی سقوط سنگ مورد تحلیل نرم‌افزاری قرار گرفته و همچنین خطر سقوط سنگ در آن ارزیابی شده است. مطالعات میدانی نشان داد که سقوط سنگ در این ناحیه بیشتر ناشی از تکتونیک واحدهای سنگی، وجود ناپیوستگی، بارش‌های فصلی و یا ترکیبی از این عوامل می‌باشد. مطالعات درزه‌نگاری نشان داد که ناپیوستگی‌های اصلی در این دامنه شامل سه دسته درزه به همراه دو لایه‌بندی عمده می‌باشند. همچنین نمونه‌برداری از لایه‌های سنگی و انجام آزمایش‌های مختلف فیزیکی و مکانیکی نشان داد که لایه‌های سنگی عمدتاً از جنس آهک با مقاومت بالا می‌باشند. تحلیل نرم‌افزاری سقوط سنگ در این دامنه بر روی دو مقطع انتخابی توسط نرم‌افزار Rock fall صورت گرفت که قابلیت انجام تحلیل‌های دو بعدی بر پایه روش جرم توده‌ای را دارد. به این ترتیب ارتفاع جهش قطعات سنگی، فاصله پرتاب، انرژی جنبشی کل و سرعت قطعات سقوط کرده در طول دو مقطع انتخابی توسط این نرم‌افزار محاسبه گردید. در ادامه با تلفیق داده‌های به دست آمده از تحلیل نرم‌افزاری سقوط سنگ و همچنین داده‌های میدانی جمع‌آوری شده از وضعیت فعالیت دامنه، با استفاده از روش تکاملی (ERHA) به ارزیابی پتانسیل سقوط سنگ در دو مقطع انتخابی پرداخته شد. نتایج نشان داد که دامنه مورد مطالعه از نظر خطر سقوط سنگ در رده خطر متوسط تا بالا قرار دارد و نیاز به اجرای روش‌های حفاظتی برای جلوگیری از آسیب به جاده و منازل مسکونی دارد.

کلید واژه‌ها: سقوط سنگ، خصوصیات ژئومکانیکی، ارزیابی خطر

^۱ استادیار گروه مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد گنبد کاوس، گلستان

^۲ کارشناس ارشد مهندسی عمران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نوشهر، مازندران

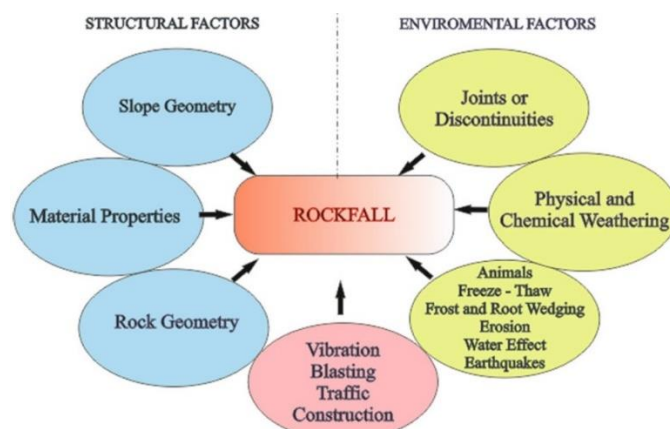
^۳ استادیار گروه زمین‌شناسی، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد jamshidi.am@lu.ac.ir

^۴ کارشناس ارشد مهندسی عمران، موسسه غیر انتفاعی پویندگان دانش چالوس، مازندران

۱. مقدمه

سقوط سنگ نسبت به سایر ناپایداری‌های دامنه، دارای ریسک اقتصادی کمتری می‌باشد. با این حال، حرکت سریع قطعات سنگی در حال سقوط می‌تواند منجر به خسارات مالی بیشتری به سازه‌ها و تاسیسات شهری نسبت به سایر ناپایداری‌های دامنه باشد (Hoek, 2007). عوامل اصلی تاثیر گذار در پدیده سقوط سنگ در شکل ۱ با جزئیات نمایش داده شده است. در این شکل عوامل اصلی مؤثر در پدیده سقوط سنگ در سه گروه اصلی ساختاری، محیطی و عوامل انسان‌زا تقسیم‌بندی شده است. ذکر این نکته ضروری است که در پدیده سقوط سنگ، صرفاً یک عامل مؤثر نبوده و می‌تواند ترکیبی از عوامل موجود در این شکل موجب وقوع آن شود.

یکی از مهم‌ترین مخاطرات زمین‌شناسی که از دیرباز ذهن مهندسان و زمین شناسان را به خود مشغول نموده است، ناپایداری دامنه‌های سنگی می‌باشد. ناپایداری دامنه‌های سنگی انواع مختلفی دارد که یکی از فراوان‌ترین و رایج‌ترین آن‌ها سقوط سنگ می‌باشد که به طور مکرر در مناطق کوهستانی ایجاد حادثه می‌کند. پدیده سقوط سنگ می‌تواند منجر به خسارات جدی برای مناطق شهری، سکونت‌گاه‌های روستایی و همچنین سازه‌های مهندسی شود و علاوه بر این، خسارات جانی قابل توجهی را موجب گردد که در اکثر نقاط جهان گزارش‌های مختلفی از آن شده است (Chau et al., 2003; Ferrari et al., 2017; San et al., 2020)



شکل ۱. عوامل مؤثر در وقوع سقوط سنگ (Geniş et al., 2017)

روش‌های تحلیل دو و سه بعدی اشاره نمود (San et al., 2020). در همین راستا، مطالعات فراوانی توسط محققین در سراسر جهان در زمینه ارزیابی و تحلیل سقوط سنگ انجام شده است (Ritchie, 1963; Raetzo et al., 2002; Corominas et al., 2005; Ulusay et al., 2006; Saroglou et al., 2012; Antoniou, 2013; Geniş et al., 2017; Zhu et al., 2018; Ansari et al., 2018; Zhu et al., 2018; Saroglou, 2019; Sazid, 2019; Liao et al., 2020; San et al., 2020; Liu et al., 2020; Depountis et al., 2020). در کنار این مطالعات، به منظور پیش‌بینی وقوع سقوط سنگ و همچنین ارزیابی خطر سقوط سنگ سیستم‌های مختلفی توسعه یافته‌اند که به طور گسترده در پروژه‌های مختلف به کار می‌روند (Youssef et al.,

در تحلیل کمی سقوط سنگ حرکت هر بلوک سنگی منفرد که از یک سطح شیب‌دار معینی در حال سقوط است بر اساس مؤلفه‌های سرعت قطعه، ارتفاع جهش و فاصله پرتاب تحلیل می‌گردد (Nagendran and Ismail, 2019). به طور کلی پیش‌بینی وقوع سقوط سنگ به دلیل ماهیت نامعین و ناگهانی بودن آن بسیار سخت و پیچیده است (Mineo et al., 2018). از اینرو مناطق دارای استعداد وقوع سقوط سنگ باید با روش‌های مختلف شناسایی ساختگاه، مورد مطالعه دقیق قرار گیرند. در زمینه تحلیل و ارزیابی وقوع سقوط سنگ، روش‌های تحلیل مختلفی طی سال‌های اخیر توسعه یافته است که از بین آن‌ها می‌توان به مطالعات تجربی، مدل‌های عددی، روش‌های GIS و

که احتمال سقوط صخره‌ها و تخته‌سنگ‌های عظیم وجود دارد و هر لحظه منازل و سکنه اسفیدان مورد تهدید ریزش این کوه‌ها هستند. در شکل ۲ نمایی کلی از روستا به همراه راه ورودی اصلی آن نمایش داده شده است. همان‌طور که در این شکل به وضوح دیده می‌شود روستای اسفیدان در یک ناحیه کوهستانی واقع شده که اطراف آن را کوه‌های صخره‌ای مرتفع فرا گرفته که با دامنه‌های پر شیب به سمت روستا قرار دارند. چنین شرایط زمین‌شناسی و ریخت‌شناسی، مستعد وقوع پدیده سقوط سنگ می‌باشد که نمونه‌های متعدد آن طی سالیان اخیر در این روستا مشاهده شده است. برخی از این رخدادهای سقوط سنگ، سبب آسیب به تاسیسات شهری نظیر تیرهای برق شده در حالی که برخی وقایع بزرگ‌تر، خسارات گسترده‌تری به راه دسترسی روستا و برخی منازل مسکونی وارد کرده است. برخی از رخدادهای سقوط سنگ در این ناحیه که در گزارش‌های مختلف ثبت شده است در جدول ۱ به طور خلاصه ارائه گردیده است.



شکل ۲. نمای کلی از جاده ورودی اصلی روستا به همراه موقعیت منازل مسکونی

(2003; San et al., 2020). برخی روش‌های کمی در این زمینه شامل سیستم رده‌بندی خطر سقوط سنگ (RHRS) (Pierson and Van Vickle, 1993)، کد سویسی (Lateltin et al., 2005)، سیستم رده‌بندی خطر سقوط سنگ به روش یودات (Pack et al., 2006)، سیستم رده‌بندی خطر سقوط سنگ به روش کلرادو (Russell et al., 2008)، ارزیابی خطر سقوط سنگ به روش تکاملی (ERHA) (Ferrari et al., 2017)، می‌باشد.

مخاطرات طبیعی اصولاً ماهیت پیچیده‌ای دارند و وقوع آن‌ها خارج از کنترل انسان هستند؛ اما میزان آسیب‌پذیری، نتیجه عملکرد عوامل انسانی است. تصاحب بی‌رویه و غیر اصولی عرصه‌های مختلف زمین به علت رشد روز افزون جمعیت، باعث شده تا نرخ وقوع مخاطرات طبیعی و میزان خطرپذیری جوامع روستایی و شهری زیاد شود. رابطه معناداری بین سکونت‌گاه‌ها و تعداد وقایع مخاطرات طبیعی وجود دارد. همخوانی زیادی بین پراکنش ناپایداری دامنه‌های سنگی با مسیر جاده‌های کوهستانی وجود دارد. از ۴۰ مخاطره طبیعی شناخته شده در جهان، بیش از ۳۰ مورد آن در ایران به وقوع پیوسته است. ایران تقریباً یک درصد جمعیت جهان را تشکیل می‌دهد ولی حدود ۶ درصد تلفات مخاطرات جهانی را به خود اختصاص داده است. ایران رتبه چهارم در آسیا و رتبه ششم در جهان را بر اساس وقوع مخاطرات طبیعی دارد (درگاه ملی آمار، ۱۳۹۵).

اسفیدان روستایی گردشگری در استان خراسان شمالی که در ۴۵ کیلومتری جنوب شرقی بجنورد واقع شده است. این روستا از مناطق خوب گردشگری استان خراسان شمالی است که در میان دره‌ای سرسبز قرار گرفته است و پیرامون آن را کوه‌های مرتفعی پوشانده است. روستای اسفیدان از جنوب غربی به کوه آق‌قیه و از شمال غربی به کوه اسب و از جنوب غربی به تنگه دهر مزه منتهی می‌شود. به علت اینکه روستای اسفیدان در دره‌ای عمیق بنا شده و کوه‌های سنگی مرتفعی آن را در بر گرفته‌اند؛ در نگاه اول برای هر بیننده‌ای این تصور پیش می‌آید

جدول ۱. برخی وقایع سقوط سنگ شاخص در روستای اسفیدان (از ۱۳۸۵ تا ۱۳۹۹)

Date	Location	Average size of fallen rock (cm)	Description
1399.12.02	Inside the village	75×80×50	Damage to livestock and gardens
1398.07.30	Entrance road	30×40×45	Road damage
1398.01.02	Inside the village	90×50×50	Damage to homes
1395.07.05	Entrance road	60×60×45	Road closure
1392.07.09	Inside the village	50×60×45	Damage to gardens
1389.11.04	Entrance road	40×40×60	Road closure
1387.08.24	Inside the village	70×75×50	Damage to homes
1385.02.30	Inside the village	60×65×40	Damage to livestock

(۱۳۹۵). محل احداث روستای اسفیدان، دره‌ای گسلی و V شکل با امتداد شمالی-جنوبی است که رودخانه‌ای در وسط آن جریان دارد (شکل ۳). بررسی‌های میدانی نشان داد، دامنه شرقی این دره که روستا درون آن واقع شده است، به علت متفاوت بودن جهت شیب لایه‌ها با جهت شیب دامنه پایدار است و هیچ‌گونه چشمه و گیاهی در این دامنه دیده نمی‌شود. با این حال در دامنه غربی عکس حالت فوق دیده می‌شود؛ یعنی شیب لایه‌ها و شیب دامنه، هم جهت هستند. سنگ‌شناسی این دامنه شامل سنگ آهک و مقداری ماسه سنگ‌های زرد و قرمز رنگ با سیمان ضعیف دارای رپیل مارک و کراس بدینگ، همچنین تناوبی از رسوبات سخت با ترکیبی از مارن و رس، با شیب ۳۰-۴۰ درجه شرقی است. این دامنه، به ارتفاعات متشکل از سنگ‌های آهکی متصل است که این باعث به وجود آمدن چشمه‌های فصلی در سال‌های پر بارش و نتیجتاً رشد گیاهان به‌طور موضعی شده است. منطقه مورد مطالعه از نظر زون‌بندی‌های زمین‌ساختی ایران در مرز دو ایالت ساختاری کپه‌داغ و زون تدریجی بینالود واقع شده است. بررسی دقیق‌تر نشان می‌دهد که محدوده روستای اسفیدان در زون کپه‌داغ واقع شده است ولی به فاصله چند کیلومتر در غرب ناحیه می‌توان زون تدریجی تبدیل واحدهای سنگی کپه‌داغ به زون ساختاری البرز را مشاهده کرد. این منطقه عموماً توسط سنگ‌های دوران مزوزوئیک پوشیده شده است. همچنین سازندهای اصلی منطقه شامل سازندهای آهکی آب دراز، کلات و نیزار (کرتاسه) هستند. سازند اصلی تشکیل دهنده دامنه مورد مطالعه سازند آب دراز با تناوبی از سنگ آهک‌های مارنی چرت‌دار متوسط تا

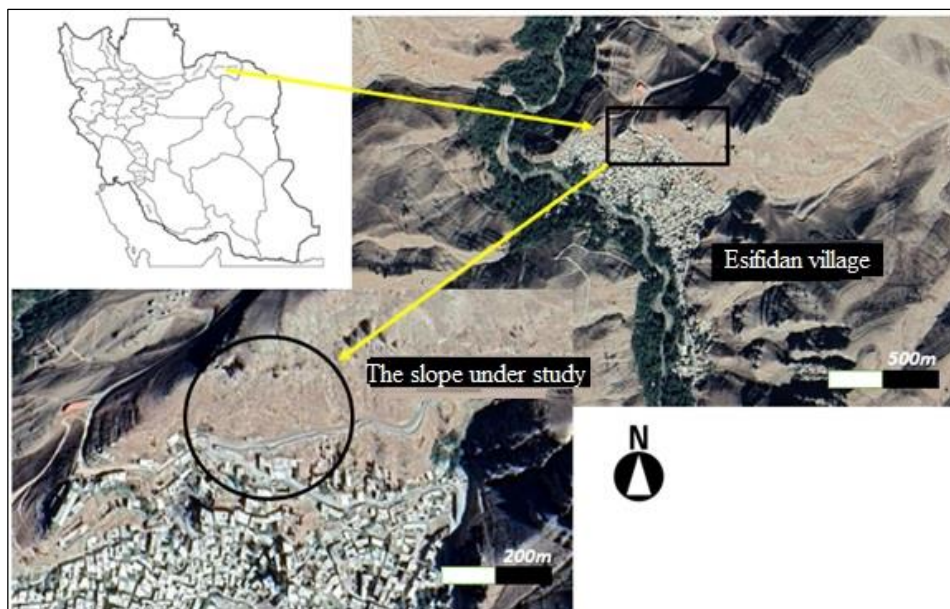
با توجه به مطالب بالا، در این پژوهش قصد بر آن است که پتانسیل سقوط سنگ در دامنه ورودی مشرف به روستا، که هم جاده اصلی ورودی روستا و هم بخشی از منازل مسکونی آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد، مورد مطالعه قرار گیرد. در این راستا، در قدم اول وضعیت زمین‌شناسی و ویژگی‌های محیطی منطقه مورد مطالعه تعیین گردید. سپس با مطالعات میدانی و بازدیدهای محلی، از لایه‌های مختلف سنگی در دامنه مورد مطالعه، نمونه برداری شد و بر روی آن‌ها، مجموعه‌ای از آزمایش‌های مکانیکی و فیزیکی انجام شد. در نهایت پتانسیل سقوط سنگ در دامنه مورد مطالعه با استفاده از تحلیل دو بعدی سقوط سنگ با نرم افزار Rock fall نسخه ۴/۰ (Rocscience, 2012) تعیین و نتایج بدست آمده مورد بحث قرار گرفت. علاوه بر این با استفاده از نتایج به دست آمده، ارزیابی خطر پتانسیل سقوط سنگ با استفاده از روش ارزیابی تکاملی خطر سقوط سنگ (ERHA) انجام شد.

۲. موقعیت جغرافیایی و زمین شناسی منطقه مورد مطالعه

روستای اسفیدان با مختصات جغرافیایی ۳۷ درجه و ۱۹ دقیقه شمالی، و ۵۷ درجه و ۳۴ دقیقه شرقی در جنوب شرقی شهرستان بجنورد واقع شده است. از دیدگاه جغرافیایی، منطقه دارای آب و هوای سرد کوهستانی همراه با دره‌های عمیق که اکثراً بر اثر گسل خوردگی ایجاد شده‌اند، می‌باشد. این روستا از لحاظ زمین‌ریخت شناسی دارای ارتفاعی حدود ۱۶۰۰ متر از سطح دریا، و جمعیتی بالغ بر ۶۰۰۰ نفر است (درگاه ملی آمار،

وجود میان لایه‌های زمین‌شناسی سست از جنس رس و مارن در بین لایه‌های ضخیم سنگی (در بررسی‌های محلی پس از لغزش، آثاری به صورت خطوط موازی بر روی رس‌ها باقیمانده است) ۴- آب شستگی در پاشنه شیب توسط جریان رودخانه ۵- ضخامت قابل توجه لایه‌های رسوبات آبرفتی سست و منفصل ۶- لرزه‌خیزی بالای منطقه و وجود گسل‌های فعال ۷- بارندگی زیاد در ماه‌های فروردین و اردیبهشت ۸- رشد ریشه گیاهان و نفوذ به درون سنگ‌ها و لایه‌های زمین‌شناسی ۹- وجود کانی ژپس در محل برخی زمین لغزش‌ها ۱۰- ریخت-شناسی و شیب تند دامنه‌های مشرف به جاده ورودی و بافت روستا.

ضخیم لایه است. مرز بالایی این واحد به صورت ناپیوستگی موازی، سازند کلات جای است (آقنابتی، ۱۳۸۳). در اکثر دامنه‌های مشرف به روستا، اثراتی از زمین لغزش‌های قدیمی به صورت گودافتادگی‌های مقعر شکل، واژگونی، جریان واریزه‌ای و سقوط سنگ دیده می‌شود. پس از مطالعات میدانی و برداشت‌های صحرائی و بررسی تاریخچه زمین‌شناسی، موارد زیر در وقوع انواع زمین لغزش‌های منطقه مورد مطالعه تشخیص داده شدند: ۱- هم جهت بودن شیب لایه‌های زمین‌شناسی (۴۰-۳۰ درجه شمال شرقی و امتداد شمال غربی-جنوب غربی) با شیب رویه تند دامنه دره ۲- هم جهت بودن حرکت آب‌های زیرزمینی با جهت شیب لایه‌های زمین‌شناسی و شیب دامنه ۳-



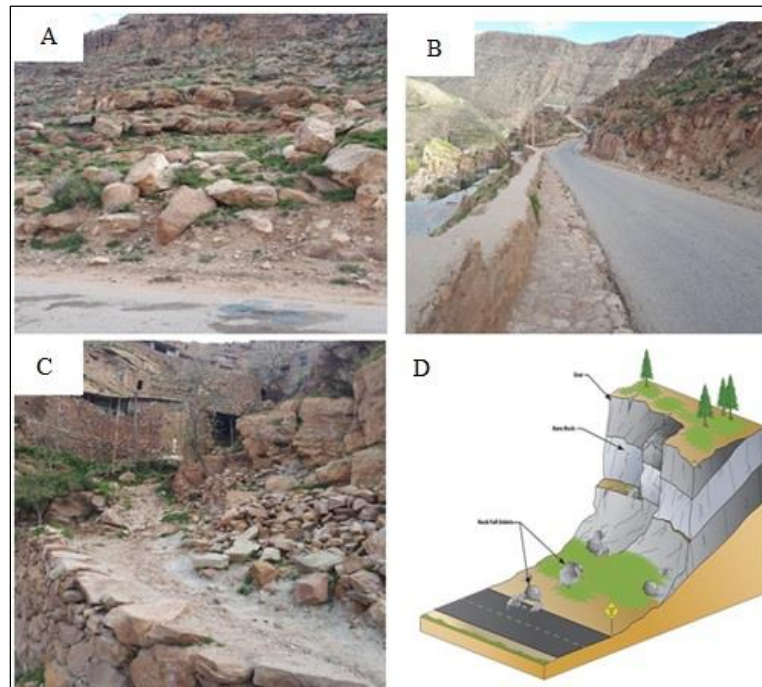
شکل ۳. موقعیت روستای اسفیدان به همراه دامنه مورد مطالعه

۳. مطالعات میدانی و آزمایشگاهی

زمین لغزش به اشکال گوناگون رخ داد. وقوع زمین لغزش‌ها، بیشترین تهدید را برای زمین‌های کشاورزی، راه‌های دسترسی و بافت روستاها داشته است. در روستای اسفیدان، نیز پس از این بارش‌ها ریزش سنگ از دامنه و بهمن‌های سنگی رخ داد، به گونه‌ای که قطعات بزرگ سنگ و تخته سنگ‌ها به پایین دست دامنه هدایت شدند (شکل ۴-A و ۴-D). همچنین ریزش سنگ از دامنه، چندین بار سبب بسته شدن جاده ورودی روستا و راه‌های داخل روستا شد (شکل ۴-B). علاوه بر این،

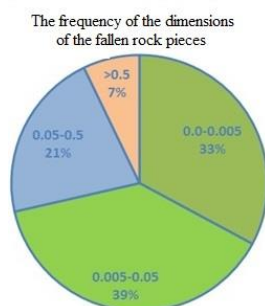
در راستای مطالعات میدانی، بازدیدهایی از محل دامنه مورد مطالعه انجام شد و به جمع‌آوری تجارب سکنه از حوادث قبلی اقدام گردید. بر اساس بازدیدهای میدانی مشخص شد در روزهای پایانی سال ۹۷ و هفته‌های اول سال ۹۸ بارش گسترده در سطح استان خراسان شمالی باعث جاری شدن روان‌آب و پس از آن آب گرفتگی قسمتی‌های وسیعی از استان و ایجاد سیل شد. در این برهه زمانی، در مناطق کوهستانی و کوهپایه‌ای،

ریزش سنگ باعث ورود حجم زیادی واریزه به بافت روستا و راه‌های ارتباطی درون آن گردید (شکل ۴-۴).



شکل ۴. (A) قطعات سنگی سقوط کرده در دامنه مورد مطالعه (B) نمایی از دامنه به همراه جاده ورودی روستا و حفاظ نیم متری راه (C) تجمع قطعات سقوط کرده که سبب مسدود شدن راه‌های درون روستا و حیاط منازل شده (D) تصویر شماتیک از مکانیسم سقوط سنگ

مشاهدات میدانی نشان داد که تعداد زیادی از قطعات سنگی در دامنه‌های مشرف به روستا دیده می‌شود که بر اثر رخدادهای متعدد سقوط سنگ در آن نقاط تجمع یافتند. در دامنه مورد مطالعه حدود هفتاد بلوک سنگی مشاهده شد که در حوادث سقوط برخی از آن‌ها، جاده دسترسی به روستا بسته شده و همچنین خساراتی به منازل مسکونی پایین دست آن وارد شده است. ابعاد قطعات سنگی سقوط کرده متفاوت می‌باشد به گونه‌ای که ابعاد بزرگ‌ترین بلوک سنگی مشاهده شده (۵۰×۸۰×۱۲۰) سانتی‌متر بوده که وزنی تقریباً معادل با ۱/۲ تن خواهد داشت. در راستای بررسی آماری قطعات سنگی سقوط



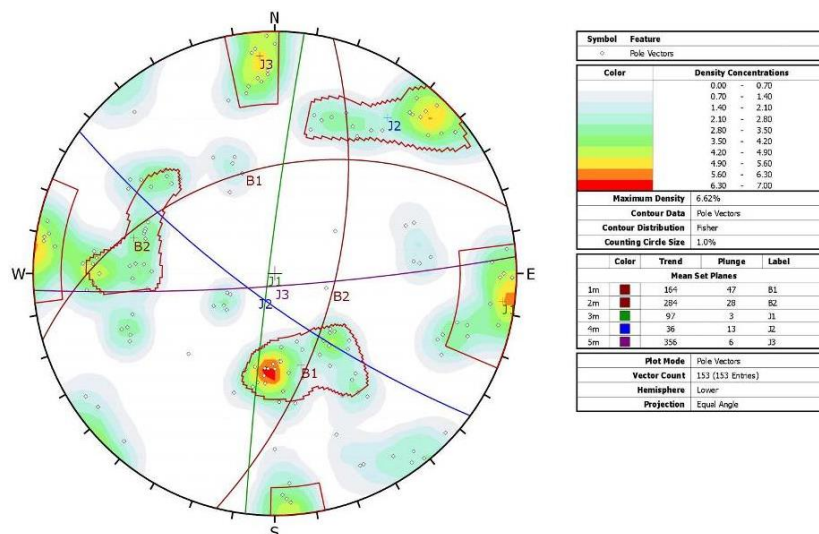
شکل ۵. فراوانی ابعاد (بر حسب متر مکعب) مختلف بلوک‌های سنگی در دامنه مورد مطالعه

همان‌طور که در شکل ۵ نیز دیده می‌شود بیشترین فراوانی سنگ‌های سقوط کرده مربوط به قطعات سنگ با ابعاد ۰/۰۵ تا ۰/۰۵ متر مکعب می‌باشد که طبیعتاً خسارات کمتری می‌تواند ایجاد کنند. شایان ذکر است حدود ۷ درصد قطعات سقوط کرده، دارای اندازه بیش از نیم متر مکعب هستند که با توجه به وزن آن‌ها می‌تواند خسارات قابل توجه‌ای در پی داشته باشند.

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، رویه دامنه دارای شیب بالایی بوده از این رو بیشتر قطعات سنگی سقوط کرده به حاشیه جاده و حتی خود مسیر جاده می‌رسند. به منظور تکمیل داده‌های میدانی، اطلاعات ناپیوستگی‌های موجود در لایه‌های آهکی سازنده دامنه، اندازه‌گیری شد که شامل جهت‌گیری

همان‌طور که در شکل ۵ نیز دیده می‌شود بیشترین فراوانی سنگ‌های سقوط کرده مربوط به قطعات سنگ با ابعاد ۰/۰۵ تا ۰/۰۵ متر مکعب می‌باشد که طبیعتاً خسارات کمتری می‌تواند ایجاد کنند. شایان ذکر است حدود ۷ درصد قطعات سقوط کرده، دارای اندازه بیش از نیم متر مکعب هستند که با توجه به وزن آن‌ها می‌تواند خسارات قابل توجه‌ای در پی داشته باشند.

همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود، رویه دامنه دارای شیب بالایی بوده از این رو بیشتر قطعات سنگی سقوط کرده به حاشیه جاده و حتی خود مسیر جاده می‌رسند. به منظور تکمیل داده‌های میدانی، اطلاعات ناپیوستگی‌های موجود در لایه‌های آهکی سازنده دامنه، اندازه‌گیری شد که شامل جهت‌گیری



شکل ۶. منحنی کنتور مربوط به ناپیوستگی‌های دامنه مورد مطالعه

بررسی نتایج درزه‌نگاری نشان می‌دهد که جز لایه‌بندی که به صورت متوالی تغییر می‌کند، می‌توان سه دسته ناپیوستگی غالب (درزه) را در دامنه مورد مطالعه شناسایی کرد. مشخصات این ناپیوستگی‌ها در استریوگرام شکل (۶) نمایش داده شده است. مطابق این شکل، با توجه به وجود لایه‌های مختلف، دو لایه-بندی به صورت B1 و B2 معرفی شده است. با توجه به موقعیت دامنه، جهت شیب لایه‌بندی‌ها به سمت جاده بوده و در شرایط مساعدی برای لغزش می‌باشد. در میان درزه‌ها، دسته درزه J2 با موقعیت فضایی ۳۰۵/۷۷ و دسته درزه J3 با موقعیت

فضایی ۲۶۵/۸۵ امکان جدایش قطعات سنگی را مهیا می‌کنند. در این بین، دسته درزه J2 به دلیل باز شدگی بیشتر شرایط مساعدی از نظر نفوذ آب زیرزمینی دارد. از آنجایی که عمده بلوک‌های سنگی سقوط کرده از لایه‌های آهکی می‌باشند، بر روی نمونه‌های جمع‌آوری شده از این لایه‌ها آزمایش‌های ژئومکانیکی بر اساس استاندارد انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM, 2007) انجام شد. به این منظور، مغزه‌های سنگی با قطر استاندارد NX از نمونه‌های جمع‌آوری شده تهیه و ابعاد مغزه‌ها بر اساس استاندارد مورد استفاده، آماده گردید. در ادامه

برای تعیین ویژگی‌های مقاومتی نمونه‌ها، آزمایش‌های مقاومت تراکمی تک محوری و برش مستقیم انجام شد. علاوه بر این، ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌ها شامل چگالی، جذب آب و تخلخل

نیز تعیین شدند. نتایج آزمایش‌های ژئومکانیکی در جدول ۲ ارائه شده‌اند.

جدول ۲. ویژگی‌های ژئومکانیکی سنگ آهک موجود در دامنه مورد مطالعه

	Cohesion (MPa)	Internal friction angle (°)	Uniaxial compressive strength (MPa)	Porosity (%)	Water absorption (%)	Saturation density (g/cm ³)	Dry density (g/cm ³)
Average	5.1	46.5	95.4	5.6	2.2	2.55	2.50
Standard deviation	-	-	32.1	3.1	1.6	0.076	0.107

از روی یک سطح شیب‌دار به اشکال مختلفی مانند سقوط آزاد، جهش، غلتش یا لغزش رخ می‌دهد. با این حال در طبیعت، بسیاری از رخداد‌های سقوط سنگ می‌تواند ترکیبی از انواع اشکال ذکر شده باشد.

در این پژوهش از نرم‌افزار Rock fall (Rocscience, 2012) رای ارزیابی پتانسیل سقوط سنگ و تحلیل سقوط سنگ به صورت دو بعدی مورد استفاده شده است. این نرم‌افزار یکی از کارآمدترین نرم‌افزارهای موجود در تحلیل آماری پدیده سقوط سنگ است که به دلیل آسان بودن استفاده از آن توسط کاربر، در پروژه‌های مهندسی و تحقیقات علمی (Ansari et al., 2018; Nagendran and Ismail, 2019; Sazid, 2019; San et al., 2020) بسیار رایج است. نرم‌افزار Rock fall از روش جرم توده‌ای به منظور شبیه‌سازی حرکت قطعات سنگی استفاده می‌کند. بنابراین می‌تواند ارتفاع جهش، انرژی جنبشی و میزان فاصله پرتاب قطعات سنگی بر روی سطح شیب‌دار را به آسانی محاسبه نمایند (San et al., 2020). در این روش، نرم‌افزار قطعه سنگی را به عنوان یک جرم توده‌ای در نظر گرفته و از جنبه‌های سه بعدی قطعه سنگی، مانند شکل و ابعاد آن چشم پوشی می‌کند (Rocscience, 2012; Ku, 2013; Taga and Zorlu, 2017). لازم به ذکر است در نسخه‌های به روز شده (v.8.0) Rock fall، این نرم‌افزار دارای گزینه مکانیک جسم صلب شده است که در این حالت اجازه تعیین شکل بلوک سنگی (کره‌ای، مکعبی یا بلوکی) را می‌دهد. به هر حال، چنانچه شکل قطعات سنگی به صورت کره‌های کوچک در نظر گرفته شوند، نتیجه

بر اساس بررسی‌های انجام گرفته روی نتایج ۱۶ نمونه سنگ آهک، میانگین چگالی در حالت خشک و اشباع به ترتیب برابر با ۲/۵۰ و ۲/۵۵ گرم بر سانتی متر مکعب است. نزدیک بودن این اعداد، به سبب کم بودن میزان تخلخل نمونه، نشانگر این است که حضور آب تأثیر زیادی روی چگالی ندارد. لازم به ذکر است به طور کلی هر چه تخلخل افزایش یابد، مقدار جذب آب بیشتر و مقاومت کاهش می‌یابد. میانگین جذب آب در این نمونه ۲/۲ درصد و دامنه تغییرات آن قابل توجه است. میانگین مقاومت تراکمی تک محوری ۹۵/۴ مگاپاسکال است و دامنه تغییرات آن نیز قابل توجه می‌باشد که علت آن را می‌توان وجود ناخالصی‌های رسی و تخلخل موجود در این آهک دانست. بر پایه نتایج به دست آمده از آزمایش برش مستقیم انجام شده روی نمونه‌ها، میانگین زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی به ترتیب برابر با ۴۶/۵ درجه و ۵/۱ مگاپاسکال است. خاطر نشان می‌شود که میزان همگنی سنگ، وجود ناخالصی رسی، حضور ریزترک‌ها، شدت هوازدگی، ابعاد بلورها و شرایط انجام آزمایش از جمله عوامل مؤثر بر ویژگی‌های مقاومتی سنگ است.

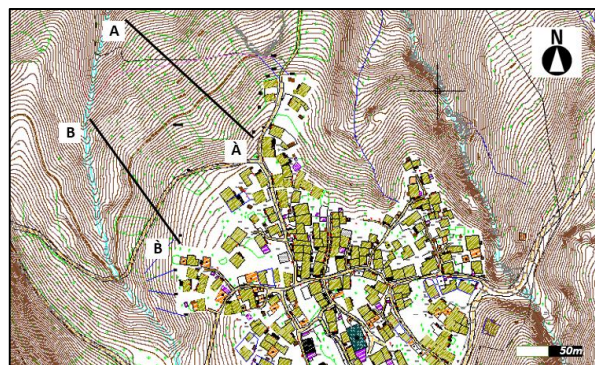
۴. تحلیل سقوط سنگ

وقوع سقوط سنگ بسته به ویژگی‌های هندسی و مکانیکی دامنه، و قطعات سنگی (میزان اصطکاک، زبری سطح، مقاومت غلطشی، ضریب ارتجاعی و غیره) بسیار متفاوت است (Ritchie, 1963; Ansari et al., 2014). سقوط قطعات سنگی

ضرایب ارتجاعی مماسی و نرمال بر اساس پژوهش‌های گذشته در سنگ‌های آهکی (Geniş et al., 2017; Keskin et al., 2020) و همچنین توصیه راهنمای نرم افزار (Rocscience, 2012) انتخاب شده است. همچنین مقدار زبری سطح دامنه بر اساس راهنمای انجمن بین المللی مکانیک سنگ (ISRM, 2007) برای مطالعات درزه‌نگاری، مقدار متوسط ۳ در نظر گرفته شد. در نهایت در تحلیل‌های سقوط سنگ، وزن قطعات سنگی برابر با ۱۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم انتخاب شدند تا در برگزیده اکثر قطعات سقوطی گزارش شده در منطقه مورد مطالعه باشد.

تحلیل هر دو روش جرم توده‌ای و مکانیک جسم صلب مشابه خواهد بود (Rocscience, 2021).

تحلیل سقوط سنگ توسط نرم‌افزار Rock fall بر روی دو مقطع بحرانی در دامنه مورد مطالعه انجام شد (شکل ۷). پارامترهای ورودی مورد استفاده در نرم افزار در جدول ۳ ارائه شده‌اند. در تحلیل‌های انجام شده بر اساس پژوهش‌های گذشته، تعداد قطعات سنگ سقوطی ۱۰۰۰ عدد در نظر گرفته شد (Ansari et al., 2018; San et al., 2020). همچنین سرعت اولیه قطعات سنگی بر اساس موقعیت هر قطعه‌ای سنگی و ویژگی‌های دامنه مورد مطالعه مانند تعداد ناپیوستگی و هندسه شیب، معادل با صفر متر بر ثانیه تعیین شد. مقادیر



شکل ۷. محل دو مقطع مورد استفاده در نرم افزار Rock fall به منظور تحلیل سقوط سنگ

جدول ۳. پارامترهای ورودی مورد استفاده در نرم افزار Rock fall

Parameter	Value
Number of falling rock pieces	1000
Initial velocity (m/s)	0
Type of fall	Random
Internal friction angle (Degree)	40-52 (Average 46)
Roughness of the slope surface	2-4 (Average 3) (ISRM, 2007)
Tangential elastic coefficient (Rt)	0.45±0.3
Normal elastic coefficient (Rn)	0.10±0.6

پارامترهای مهم در وقوع سقوط سنگ شامل ارتفاع جهش قطعات سنگی، انرژی جنبشی آن‌ها و فاصله پرتابی هر یک از قطعات محاسبه گردید که در شکل ۹ برای هر یک از مقاطع نمایش داده شده است. به منظور ساده‌سازی مقایسه نتایج به دست آمده برای هر یک از تحلیل‌ها، خلاصه‌ای از خروجی نرم افزار در جدول ۴ ارائه شده است.

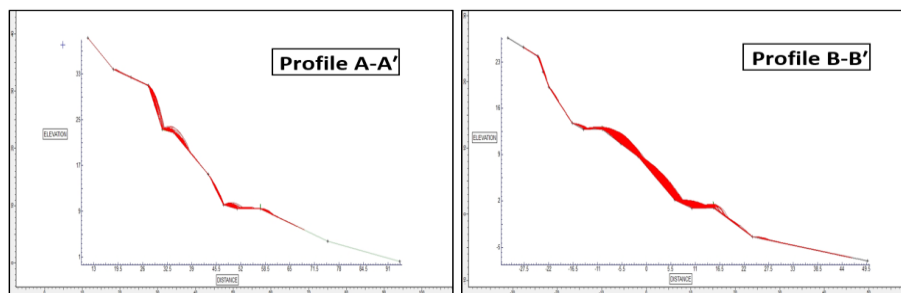
همان‌طور که در بخش‌های قبل بیان شد، تحلیل سقوط سنگ بر روی دو مقطع انتخابی در دامنه مورد مطالعه توسط نرم‌افزار Rock fall انجام شد که نتایج خروجی یکی از تحلیل‌ها به عنوان نمونه در شکل ۸ نمایش داده شده است. همچنین بر اساس تحلیل دو بعدی سقوط سنگ توسط این نرم‌افزار، دیگر

از آنجایی که مقطع B-B' از دو دیوار حائل مربوط به دو جاده بالادست و پایین دست عبور می‌کند، میزان ارتفاع جهش حداکثر قطعات به طور متوسط کم‌تر از مقطع A-A' می‌باشد. با این حال به علت این‌که دارای شیب توپوگرافی تندتری است، انرژی جنبشی قطعات سقوط کرده بیشتر بوده، از همین رو تعداد قطعات رسیده به جاده بالادست و جاده پایین دست، بیشتر از مقطع A-A' می‌باشد. به بیان دقیق‌تر از هر ۱۰۰۰ قطعه سنگ که در نرم افزار Rock fall سقوط آن‌ها شبیه سازی شده است، در این مقطع ۳۲۱ عدد از آن‌ها به جاده بالادست، ۱۴۲ عدد آن به جاده پایین دست و ۵ عدد آن‌ها به بافت روستا رسیده است. در اینجا نیز باید خاطر نشان شد که صرفاً قطعات مربوط به سنگ‌های با وزن ۵۰۰ کیلوگرم، که دارای انرژی جنبشی بالایی بودند توانستند به بافت روستا برسند و قطعات سنگی کوچک‌تر توسط دیوارهای حائل در دو مقطع جاده مهار شده‌اند.

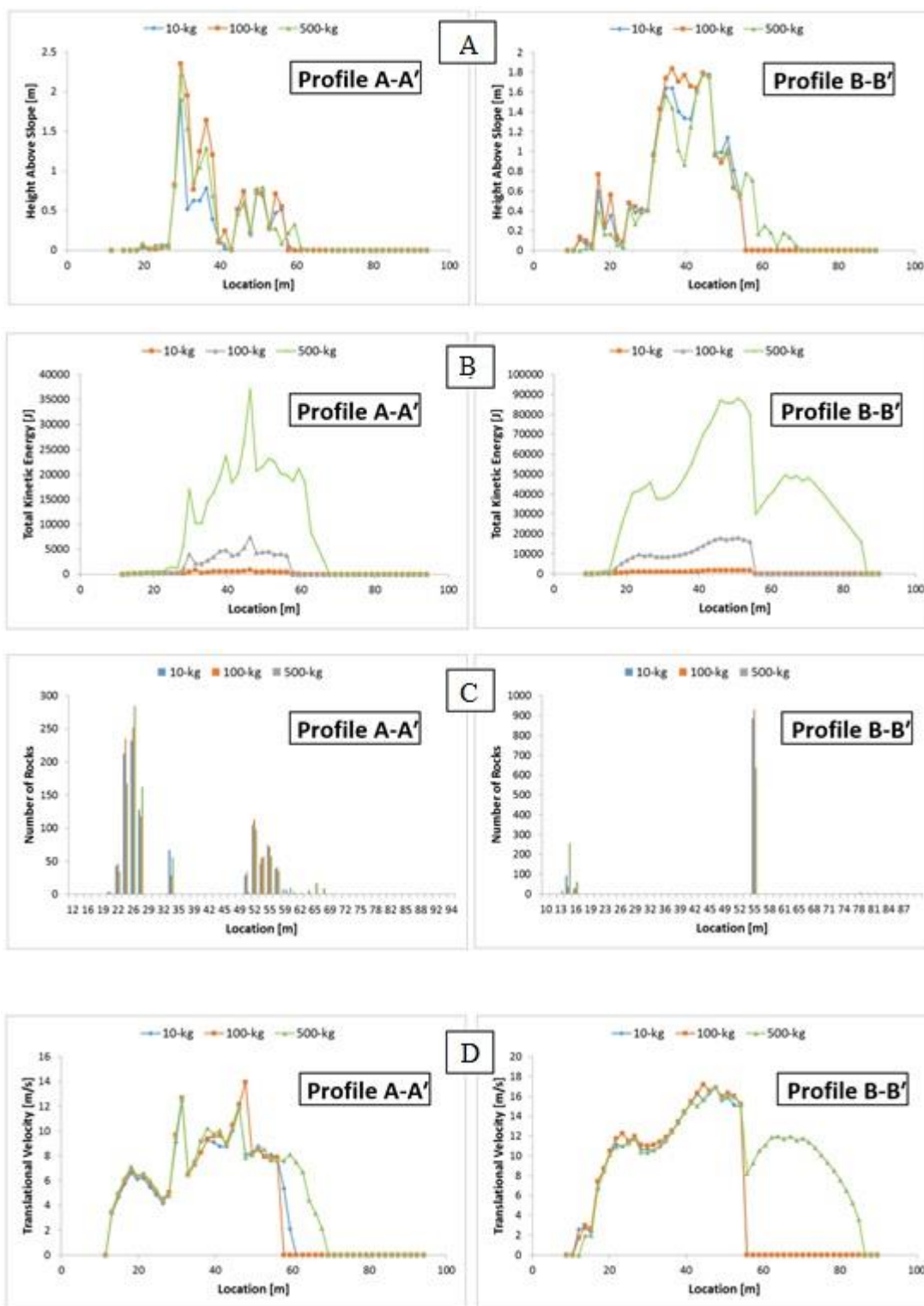
بررسی نتایج جدول ۴ نشان می‌دهد که برای هر دو مقطع مورد مطالعه، قطعات سنگی با وزن ۱۰۰ کیلوگرم هم بیش‌ترین ارتفاع جهش و هم بیش‌ترین سرعت را در بین قطعات سنگی داشته‌اند. ذکر این نکته ضروری است که هر چه وزن قطعات سنگی افزایش یابد، انرژی جنبشی آن‌ها نیز افزایش یافته و متعاقباً ارتفاع جهش آن‌ها کاهش خواهد یافت. در پایان این بخش باید خاطر نشان کرد که نتایج تحلیل دو بعدی سقوط سنگ توسط نرم افزار Rock fall نشان داد که دامنه مورد مطالعه به شدت مستعد وقوع سقوط سنگ بوده که حوادث متعدد واقعی سقوط سنگ مؤید نتایج تحلیل‌های نرم‌افزاری می‌باشد.

همانطور که در جدول ۴ مشاهده می‌شود، برای مقطع A-A' حداکثر انرژی جنبشی برای قطعات با وزن ۱۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم به ترتیب برابر با ۰/۸۴، ۷/۴ و ۳۷ کیلوژول بدست آمده، در حالی که برای مقطع B-B' مقدار انرژی جنبشی برای همین اوزان بترتیب معادل ۱/۷، ۱۷/۹ و ۸۸ کیلوژول محاسبه شده است. به دلیل توپوگرافی تندتر و شیب بیشتر دامنه در مقطع B-B'، سرعت قطعات پرتابی افزایش یافته و در نتیجه میزان انرژی جنبشی آن‌ها بیشتر از مقطع A-A' است. لازم به توضیح است، در کناره جاده ورودی به روستا و در طرف دور از دامنه آن، دیوار حائل کوتاهی به ارتفاع تقریبی یک متر و ضخامت ۰/۵ متر برای جلوگیری از عبور سنگ‌ها از فراز جاده و رسیدن آن‌ها به بافت روستا احداث شده است، که این مانع در نرم افزار Rock fall مدل‌سازی شده است.

نتایج محاسبات نشان می‌دهد برای مقطع A-A' حداکثر ارتفاع جهش قطعات سنگی برای هر سه وزن ۱۰، ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم بیش از یک متر می‌باشد که به این معناست که امکان عبور آن‌ها از فراز دیوار حائل وجود دارد. اما بررسی دقیق‌تر نتایج مربوط به این مقطع نشان می‌دهد که در ناحیه‌ی اتصال دامنه به جاده، ارتفاع جهش قطعات حداکثر ۰/۹ متر است که دیوار احداث شده می‌تواند به طور مؤثری جلوی عبور برخی از قطعات سقوطی را بگیرد. اما از آنجایی که دیوار حائل در پایین دست جاده احداث شده است، نتایج تحلیل‌ها نشان داد که از هزار قطعه سنگ سقوط کرده، بیش از ۲۹۳ عدد از آن‌ها به جاده رسیده و همچنین ۱۲ عدد از قطعات با وزن ۵۰۰ کیلوگرم می‌توانند از دیوار حائل این مقطع عبور کرده و به بافت روستا برسند.



شکل ۸ نمونه‌ای از خروجی تحلیل سقوط سنگ برای مقاطع انتخابی و وزن قطعه ۵۰۰ کیلوگرمی



شکل ۹. (A) نتایج تحلیل مقدار جهش قطعات سنگی برحسب متر (B) انرژی جنبشی قطعات سنگی برحسب ژول (C) تعداد

قطعات سنگی (D) سرعت انتقالی قطعات سنگی برحسب متر بر ثانیه

جدول ۴. نتایج بدست آمده از تحلیل دو بعدی سقوط سنگ توسط نرم افزار Rock fall

Maximum velocity (m/s)	Maximum kinetic energy (J)	Maximum height of the jump (m)	Weight of rock pieces (kg)	Cross section name
12.4	840	1.53	10	A-A'
13.9	7467	2.34	100	
12.7	37051	2.21	500	
16.8	1723	1.64	10	B-B'
17.1	17964	1.83	100	
16.9	88006	1.78	500	

۵. ارزیابی پتانسیل سقوط سنگ

یکی از مهم ترین مسائل مرتبط با پدیده سقوط سنگ، بررسی ارزیابی پتانسیل وقوع آن در جاده ها و مناطق مسکونی می باشد (Budetta, 2004). از آنجایی که در منطقه مورد مطالعه هم جاده اصلی ورودی روستا و هم برخی از ساختمان های روستا در محدوده خطر قرار دارند، ارزیابی پتانسیل وقوع سقوط سنگ در آینده بسیار حیاتی می باشد. به منظور ارزیابی پتانسیل سقوط سنگ در سال های اخیر چندین روش و آیین نامه توسعه یافته است (Pierson and Van Vicklr, 1993; Lateltin et al., 2005; Pack et al. 2006; Russell et al., 2008; Saroglou et al., 2012; Ferrari et al., 2017). در این پژوهش به منظور ارزیابی پتانسیل خطر سقوط سنگ از روش ارزیابی تکاملی (Evolving Rock fall Hazard Assessment, ERHA) که توسط فراری و همکاران (Ferrari et al., 2017) توسعه یافته، استفاده شده است. این روش یکی از جدیدترین و پرکاربردترین روش های ارزیابی خطر سقوط سنگ بوده که در حقیقت اصلاح شده روش آیین نامه سوئدی است. روش ارزیابی تکاملی ابتدا برای ارزیابی سقوط سنگ در معادن روباز زغال سنگ توسعه یافت که با استفاده از آن مناطق پرخطر دامنه شناسایی و

طبقه بندی می شوند. در این روش، شدت سقوط سنگ که بر حسب انرژی جنبشی آن تعیین می شود و همچنین وضعیت فعالیت دامنه، دو پارامتر اصلی برای ارزیابی خطر سقوط سنگ می باشند. وضعیت فعالیت دامنه بر اساس یک سیستم امتیازدهی تعیین می شود که در آن ویژگی های مختلفی از دامنه، مانند ساختارهای زمین شناسی، مکانیسم محتمل ناپایداری و شرایط دامنه بررسی می شود. ویژگی های مذکور به راحتی و با بازدید میدانی از دامنه مورد مطالعه و استفاده از راهنمایی که در جدول ۵ ارائه شده است، قابل تعیین و امتیازدهی می باشند. در این روش ارزیابی، امتیازدهی به وضعیت فعالیت دامنه به صورت مرحله ای انجام می شود. به این معنی که ابتدا با مشاهده وضعیت دامنه و استفاده از داده های جدول ۵ وضعیت فعالیت اولیه دامنه تعیین شده و سپس این عدد با قرار گرفتن در جدول ۶ به صورت وضعیت فعالیت نهایی دامنه در می آید. در جدول ۶ نشانه های ناپایداری دامنه معیار اصلی است به طوری که اگر در دامنه مورد مطالعه نشانه های ناپایداری دیده شود، کلاس وضعیت فعالیت دامنه را یک درجه افزایش می دهد (Ferrari et al., 2017).

جدول ۵. پارامترها، امتیاز و وزن های مربوط به تعیین وضعیت فعالیت دامنه (Ferrari et al., 2017) به همراه امتیاز مقاطع مورد مطالعه

Parameter	Description	Rating	Weight	Score	
				A-A'	B-B'
Fracturing degree	Massive rock mass structure	0	3	3	3
	Blocky or very blocky structure	1			
Undercutting	Homogenous weathering	0	2	2	2
	Differential weathering	1			
Block sliding	Block sliding is unlikely	0	2	0	0
	Block sliding is likely	1			
Block toppling	Block toppling is unlikely	0	1	1	1
	Block toppling is likely	1			
Slope performance	Good (close to slope design)	0	3	3	0
	Bad (deviation from slope design)	1			
			Sum	9	6

جدول ۶. تعیین وضعیت فعالیت نهایی دامنه (Ferrari et al., 2017)

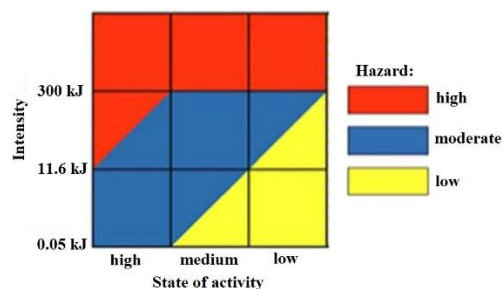
Preliminary score	Preliminary class	Without signs of activity	With signs of activity
0-3	Low	Low	Medium
4-7	Medium	Medium	High
8-11	High	High	High

موضوع با توجه به نشانه‌های صحرائی و تاریخچه سقوط سنگ در دامنه مورد مطالعه تأیید می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، روش ارزیابی تکاملی شامل یک ماتریس بوده که از دو پارامتر وضعیت فعالیت و شدت سقوط برای ارزیابی خطر سقوط سنگ بهره می‌برد. شدت سقوط سنگ پارامتری است که به وزن قطعه سنگ ناپایدار، وضعیت اولیه آن و توزیع انرژی در طول مسیر پرتاب بستگی دارد. شدت سقوط با استفاده از انرژی جنبشی قطعات سنگ سقوط کرده تعیین می‌شود. بر اساس شکل ۱۰، سه رده خطر مختلف وجود دارد که درجه خطر احتمال سقوط سنگ با افزایش پارامتر شدت سقوط، بیشتر می‌شود. در این رده‌بندی نواحی قرمز نشان دهنده خطر سقوط بالای سنگ بوده که در آن شدت سقوط بالا/متوسط و وضعیت فعالیت دامنه زیاد/متوسط/کم می‌باشد. نواحی آبی نشان دهنده درجه خطر متوسط سقوط سنگ است که در آن شدت سقوط متوسط/پایین و وضعیت فعالیت دامنه زیاد/متوسط/کم می‌باشد. در نهایت نواحی زرد نشان دهنده خطر سقوط پایین بوده که می‌توان در این نواحی شدت سقوط متوسط/پایین و همچنین فعالیت دامنه متوسط/کم دامنه را انتظار داشت. لازم به ذکر است در نواحی زرد این شکل احتمال وقوع سقوط سنگ قابل ملاحظه، پایین می‌باشد.

با استفاده از اطلاعات جدول‌های ۵ و ۶ وضعیت فعالیت مقاطع در دامنه مورد مطالعه، تعیین و محاسبه شد. از آنجایی که در دامنه مورد مطالعه سه دسته درزه منظم در مطالعات درزه‌نگاری شناسایی شد، می‌توان امتیاز کامل میزان شکستگی (ساختار سنگ بلوکی) را برای هر دو مقطع در نظر گرفت. در مورد بررسی وضعیت هوازدهی در دامنه مورد مطالعه، همان‌طور که در بخش زمین‌شناسی به آن اشاره شد، وجود میان لایه‌های مارنی و رسی در بین لایه‌های آهک و ماسه‌سنگ باعث ایجاد هوازدهی تفریقی شود که این ویژگی سبب شده که زیر قطعات سنگی به تدریج بر اثر هوازدهی خالی شده و شرایط مساعد سقوط سنگ ایجاد شود. از این‌رو امتیاز کامل این پارامتر برای هر دو مقطع در نظر گرفته شد. علاوه بر این‌ها، در هر دو مقطع به دلیل وضعیت ریخت‌شناسی و پوشش گیاهی، امکان لغزش قطعات سنگی ناچیز است، در حالی که احتمال واژگونی برخی از قطعات وجود دارد. در نهایت وضعیت عملکرد کلی دامنه و هماهنگی آن با طراحی مورد نظر، امتیازدهی شد.

در قدم بعد و با جمع بستن امتیازها بدست آمده از جدول ۵، این امتیازها در جدول ۶ قرار داده شدند و بر اساس وجود نشانه‌های ناپایداری در مقاطع مورد مطالعه، وضعیت فعالیت نهایی هر دو مقطع تعیین گردید. بر اساس جدول ۶ وضعیت فعالیت هر دو مقطع در رده فعالیت زیاد قرار گرفته است که این



شکل ۱۰. رده‌بندی خطر سقوط سنگ بر اساس روش ارزیابی تکاملی (Ferrari et al., 2017)

توانسته درصد بالایی از سنگ‌های سقوط کرده را مهار کند. با توجه به نتایج حاصل از تحلیل نرم‌افزاری و تعیین دقیق مسیر قطعات پرتابی و انرژی جنبشی آن‌ها و همچنین در نظر گرفتن وضعیت ریخت‌شناسی دامنه مورد مطالعه، می‌توان توصیه کرد که برای کاهش خطر سقوط سنگ در این منطقه، از دیوار حائل با ارتفاعی بیش از دو متر در بالادست جاده و در حد فاصل شیب و جسم جاده استفاده شود. بر اساس مسیر پرتاب قطعات سنگ، چنانچه حد فاصل بین جسم جاده و پای دامنه، سنگ-برداری شود به طوری که فضایی با عرض ۴ متر با وضعیت افقی پشت دیوار حائل ایجاد شود، انرژی اغلب قطعات سقوط کرده را مستهلک خواهد نمود.

به منظور ارزیابی خطر سقوط سنگ، از نتایج شدت سقوط توسط نرم افزار Rock fall و وضعیت فعالیت بدست آمده از جداول‌های ۵ و ۶ استفاده شده است. از آنجایی که وزن قطعات سقوط کرده تأثیر مستقیمی بر روی شدت سقوط آن‌ها دارد، ارزیابی خطر سقوط سنگ برای هر مقطع و برای قطعات سنگ با اوزان مختلف محاسبه شد، که نتایج آن در جدول ۷ ارائه شده است. همانطور که از این جدول مشاهده می‌شود، بر اساس ارزیابی خطر به روش تکاملی، خطر سقوط سنگ در مقاطع دامنه مورد مطالعه متوسط تا بالا است. این تحلیل‌ها نشان می‌دهد خطرات قابل توجهی متوجه عابرین پیاده و وسایل نقلیه عبوری از این منطقه و جاده عبوری از آن، خواهد بود. علاوه بر این، نتایج تحلیل نرم‌افزاری نشان می‌دهد که دیوار حائل،

جدول ۷. خلاصه نتایج ارزیابی خطر برای دامنه مورد مطالعه بر اساس روش ارزیابی تکاملی

Hazard level	State of activity class	Weight of rock pieces (kg)	Cross section name
Moderate	High	10	A-A'
Moderate	High	100	
High	High	500	
Moderate	High	10	B-B'
High	High	100	
High	High	500	

سنگ آهک تشکیل دهنده دامنه دارای مقاومت بسیار بالایی می‌باشد.

تحلیل سقوط سنگ بر روی دو مقطع انتخابی از دامنه، توسط نرم‌افزار Rock fall صورت گرفت که توانایی تحلیل آماری دو بعدی سقوط سنگ را دارد. نتایج تحلیل نرم‌افزاری نشان داد که در مقطع 'B-B'، پارامترهای اصلی مربوط به سقوط سنگ نظیر ارتفاع جهش قطعات سنگ، انرژی و سرعت آن‌ها بیشتر از مقطع 'A-A' می‌باشد. همچنین نتایج این بخش نشان داد که وجود دیوار حائل در پایین دست جاده توانسته به طور موثری از ورود قطعات سقوط کرده به درون بافت روستا جلوگیری نماید. با استفاده از داده‌های به دست آمده از نرم‌افزار Rock fall خطر سقوط سنگ در دامنه مورد مطالعه ارزیابی گردید. نتایج این بخش نشان داد که خطر سقوط سنگ در مقطع 'A-A' برای قطعات سنگی با وزن کمتر از ۱۰۰ کیلوگرم در حد متوسط

۶. نتیجه‌گیری

روستای اسفیدان در یک منطقه کوهستانی در محلی است که مشرف به پرتگاه‌های سنگی عمدتاً از نوع آهکی با شیب تند می‌باشد. از این‌رو در طول سالیان گذشته شاهد رخداد‌های فراوان سقوط سنگ بوده است. در این پژوهش، پتانسیل رخداد سقوط سنگ در یکی از دامنه‌های روستا که مشرف به جاده ورودی و بخشی از بافت مسکونی آن است، مورد مطالعه و تحلیل قرار گرفت. به این منظور، طی بازدیدهای میدانی اقدام به بررسی‌های زمین‌شناسی و درزه‌نگاری شد، که نتایج نشان داد، دامنه دارای سه دسته درزه عمده و دو لایه‌بندی اصلی است. همچنین در طی بازدیدهای میدانی، نمونه‌های متعددی از لایه‌های سنگ آهکی دامنه، تهیه و بر روی آن‌ها آزمایش‌های مختلف فیزیکی و مکانیکی انجام شد که نتایج آن نشان داد

ممکن است این قطعات از دیوار حائل جاده عبور کرده و به بافت مسکونی روستا رسیده و منجر به خسارات مالی و جانی شود. یکی از دلایل اصلی سقوط سنگ در دامنه مورد مطالعه، نزولات جوی بوده است. برای مثال پس از بارش‌های شدید در اوایل سال ۱۳۹۸، رخداد‌های متعدد سقوط سنگ که منجر به بسته شدن جاده و آسیب به برخی منازل مسکونی روستا شد، مؤید این موضوع است. در پایان به منظور کاهش خطر سقوط سنگ، توصیه می‌شود دیوار حائل فعلی مرتفع‌تر شده و همچنین با سنگ‌برداری، فضای خالی بین دامنه و جاده ایجاد شود.

بوده در حالی که در همین مقطع برای سنگ‌های با وزن ۵۰۰ کیلوگرم مقدار خطر بالا تخمین زده شده است. از طرف دیگر، نتایج تحلیل خطر برای مقطع 'B-B' نشان داد که در این مقطع، خطر سقوط سنگ برای قطعات با وزن ۱۰ کیلوگرم در حد متوسط اما برای قطعات با وزن ۱۰۰ و ۵۰۰ کیلوگرم در حد بالا می‌باشد.

نتایج نشان داد که به طور کلی عبور ترافیک، چه عابرین پیاده و چه ماشین‌آلات، در دامنه مورد نظر می‌تواند همراه با خطر باشد. همچنین نتایج تحلیل‌های نرم‌افزاری نشان داد که در صورت سقوط قطعات سنگی با وزن بیش از ۵۰۰ کیلوگرم،

منابع

آقائباتی، ع (۱۳۸۳) زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

درگاه ملی آمار (۱۳۹۵). www.amar.org.ir

- Ansari MK, Ahmad M, Singh R, Singh TN (2014) Rockfall hazard assessment at Ajanta Cave, Aurangabad, Maharashtra, India Arab J Geosci 7:1773–1780.
- Ansari MK, Ahmad M, Singh R, Singh TN (2018) 2D and 3D rockfall hazard analysis and protection measures for Saptashrungi Gad Temple, Vani, Nashik, Maharashtra – a case study. J Geol Soc India 91:47–56.
- Antoniou AA (2013) GIS-based evaluation of rockfall risk along routes in Greece. Environ Earth Sci 70:2305–2318.
- Budetta P (2004) Assessment of rockfall risk along roads. Nat Hazards Earth Syst Sci 4:71–81.
- Chau KT, Wong RHC, Liu J, Lee CF (2003) Rockfall hazard analysis for Hong Kong based on rockfall inventory. Rock Mech Rock Eng 36:383–408.
- Corominas J, Copons R, Moya J, Vilaplana JM, Altimir J, Amigó J (2005) Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area. Landslides 2:343–357.
- Depountis N, Nikolakopoulos K, Kavoura K, Sabatakakis N (2020) Description of a GIS-based rockfall hazard assessment methodology and its application in mountainous sites. Bull Eng Geol Environ 79:645–658.
- Ferrari F, Giacomini A, Thoeni K, Lambert C (2017) Qualitative evolving rockfall hazard assessment for highwalls. Int J Rock Mech Min Sci 98:88–101.
- Geniş M, Sakız U, Aydın BC (2017) A stability assessment of the rockfall problem around the Gökgöl Tunnel (Zonguldak, Turkey). Bull Eng Geol Environ 76:1237–1248.
- Hoek E (2007) Practical rock engineering. RocScience, <https://www.rocscience.com/assets/resources/learning/hoek/PracticalRockEngineering-Full-Text.pdf>.
- ISRM (2007) The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 1974–2006.
- Keskin B, Bacak G, Bilir ME, Geniş M (2020) Investigation of rockfall potential of Zonguldak-Kilimli roadway (Turkey). Arab J Geosci 13: 805–820.
- Ku C-Y (2013) Modeling of rockfalls using the lumped mass method and DDA. Proc. 3rd ISRM SINOROCK Symposium-Rock Characterization. In: Feng et al (eds) Modeling and Engineering Design Methods. CRC Press.
- Lateltin O, Haemmig C, Raetzo H, Bonnard C (2005) Landslide risk management in Switzerland. Landslides 2:313–320.

- Liao X, Wang X, Li L, Liu H, Yang Z, Chen Z (2020) Engineering application and prediction of the influence area of the rockfall hazards. *Math Probl Eng* 2020:1–14.
- Liu H, Wang X, Liao X, Sun J, Zhang S (2020) Rockfall investigation and hazard assessment from Nang County to Jiacha County in Tibet. *Appl Sci* 10:1–13.
- Mineo S, Pappalardo G, Mangiameli M, Campolo S, Mussumeci G (2018) Rockfall analysis for preliminary hazard assessment of the cliff of taormina Saracen Castle (Sicily). *Sustain* 10:1–18.
- Nagendran SK, Ismail MAM (2019) Analysis of rockfall hazards based on the effect of rock size and shape. *Int J Civ Eng* 17:1919–1929.
- Pack RT, Boie K, Mather S, Farrell J (2006) UDOT rockfall hazard rating system: final report and user's manual Utah Department of Transportation Research and Development Division. Rep. No. UT-06.07, 81.
- Pierson LA, Van Vickle R (1993) Rockfall Hazard Rating System participant's manual. FHWA Sa-93-057 1, 102.
- Raetzo H, Lateltin O, Bollinger D, Tripet JP (2002) Hazard assessment in Switzerland - codes of practice for mass movements. *Bull Eng Geol Environ* 61:263–268.
- Ritchie AM (1963) Evaluation of rockfall and its control. *Highw. Res. Rec. 17, Stab. Rock Slopes, Highw. Res. Board, Natl. Res. Council. Washington, D.C.* 13–28.
- Rocscience (2012) Rocfall-computer program for risk analysis of falling rocks on steep slopes. Version 4.0, Toronto, Canada, <https://www.rocscience.com>.
- Rocscience (2021) Rocfall (v.8.0) <https://www.rocscience.com/software/rocfall>.
- Russell CP, Santi P, Higgins JD (2008) Rockfall Hazard Rating System, Report No: CDOT-2008-7.
- San NE, Topal T, Akin MK (2020) Rockfall hazard assessment around Ankara Citadel (Turkey) using rockfall analyses and hazard rating system. *Geotech Geol Eng* 38:3831–3851.
- Saroglou C (2019) GIS-based rockfall susceptibility zoning in Greece. *Geosci.* 9:163–176
- Saroglou H, Marinos V, Marinos P, Tsiambaos G (2012) Rockfall hazard and risk assessment: an example from a high promontory at the historical site of Monemvasia, Greece. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 12:1823–1836.
- Sazid M (2019) Analysis of rockfall hazards along NH-15: a case study of Al-Hada road. *Int J Geo-Engineering* 10:1–13.
- Taga H, Zorlu K (2017) Assessment of rockfall hazard on steep slopes: Ermenek (Karaman, Turkey). *Yerbilimleri, Bulletin of the Earth Sciences Application and Research Centre of Hacettepe University* 38(2):161–178.
- Ulusay R, Gokceoglu C, Topal T, Sonmez H, Tuncay E, Erguler ZA, Kasmer O (2006) Assessment of environmental and engineering geological problems for the possible re-use of an abandoned rockhewn settlement in Urgüp (Cappadocia), Turkey. *Environ Geol* 50:473–494.
- Youssef A, Maerz NH, Fritz MA, Boulevard M, City J (2003) A risk consequence hazard rating system for Missouri Highway rock cuts. 54th Highw. *Geol Symp*: 175–195.
- Zhu C, Wang D, Xia X, Tao Z, He M, Cao C (2018) The effects of gravel cushion particle size and thickness on the coefficient of restitution in rockfall impacts. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 18:1811–1823.