



ارزیابی و پهنه‌بندی خطر ناپایداری شیروانی‌های سنگی در گردنه صلوات‌آباد، خاور سنندج

مرتضی یوسفی (نویسنده مسئول)^۱ و مرجان عامل^۲

^۱ اداره کل زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی منطقه کردستان، سنندج Yousefi_iran@yahoo.com

^۲ دانش‌آموخته کارشناسی ارشد زمین‌شناسی دانشگاه آزاد تهران شمال

چکیده

گردنه صلوات‌آباد با طول تقریبی ۲۳ کیلومتر، بین طول‌های جغرافیایی ۴۷ ۰۷ ۰۰ تا ۴۷ ۰۸ ۳۰ خاوری و عرض‌های جغرافیایی ۱۵ ۰۰ تا ۳۵ ۲۰ ۰۰ شمالی در پهنه سنندج- سیرجان شمالی، زیرپهنه با دگرپهنه‌های پیچیده و کمربند آتشفشانی کرتاسه سنندج قرار دارد. از نظر سنگ‌شناسی، سنگ‌های دگرگونی (کالک‌شیبست و متاسنداستون)، سنگ‌های آتشفشانی (گدازه‌های حدواسط تا بازیک) و رسوبی (شیل و سنگ‌آهک) در محدوده سنی تریاس تا کرتاسه پسین در این منطقه رخنمون دارند. برای پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش، بر اساس تغییرات سنگ‌شناسی، منطقه مورد مطالعه به ۶ پهنه تقسیم شد. زمین‌لغزش‌های به وقوع پیوسته بیشتر از نوع گوه‌ای (پهنه‌های ۲، ۳ و ۴)، صفحه‌ای (پهنه ۵) و سنگ‌افت (تمام پهنه‌ها به جز پهنه ۶) هستند. مطالعه درزه‌نگاری به منظور بررسی وضعیت دسته درزه-ها و میزان پایداری توده‌های سنگی در طول مسیر انجام شد. پارامترهای موثر بر لغزش به تفکیک هر پهنه برداشت و محاسبه شد. بر اساس مطالعه ویژگی‌های مهندسی سنگ‌ها مشخص شد که توده‌های سنگی مقاومت پایین تا خوب دارند. با استفاده از روش‌های طبقه‌بندی مهندسی سنگ‌ها (شامل رده‌بندی RQD، RMR و RMi)، ارزیابی پایداری شیروانی‌های سنگی به روش RHRS و ترسیم نقشه پهنه‌بندی زمین‌لغزش مشخص شد که پهنه‌های جاده‌ای ۱ و ۶ (بخش‌های ابتدایی و انتهایی جاده مورد مطالعه) در محدوده با خطر پایین (C)، پهنه‌های جاده‌ای ۲ و ۵ در محدوده با خطر متوسط (B) و پهنه‌های جاده‌ای ۳ و ۴ در محدوده با خطر بالا (A) قرار دارند. روش‌های پایداری‌سازی مناسب در دامنه‌های طبیعی، لقی‌گیری و در دامنه‌های بریده شده با ترانشه، شامل لقی‌گیری و بتن‌پاشی می‌شود. استفاده از توری سیمی و پلکانی کردن دامنه‌ها نیز می‌تواند در پایداری‌سازی دامنه‌ها موثر واقع شود. برای پایدار نمودن دامنه‌ها در میان مدت و بلندمدت می‌توان از زهکش سطحی به روش ثقلی افقی استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی

شیروانی سنگی، محور سنندج- همدان، گسل صلوات‌آباد، زمین‌لغزش، پهنه‌بندی



۱. مقدمه

گردنه صلوات‌آباد در خاور سندج، بخشی از مهم‌ترین راه ارتباطی کردستان با سایر نواحی کشور است که در کیلومتر ۱۴ محور سندج-همدان دارد. با توجه به وجود شواهد فراوان ناپایداری در دامنه‌های سنگی پرشیب این منطقه، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و ارزیابی مقدماتی ناپایداری شیروانی‌های سنگی این محور در دستور کار قرار گرفت. نوشتار پیش‌رو شامل بررسی‌های زمین‌شناسی، ارزیابی ناپایداری شیروانی‌های سنگی، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش و راهکارهای پایدارسازی دامنه‌های این منطقه است.

۲. جغرافیای منطقه مورد مطالعه

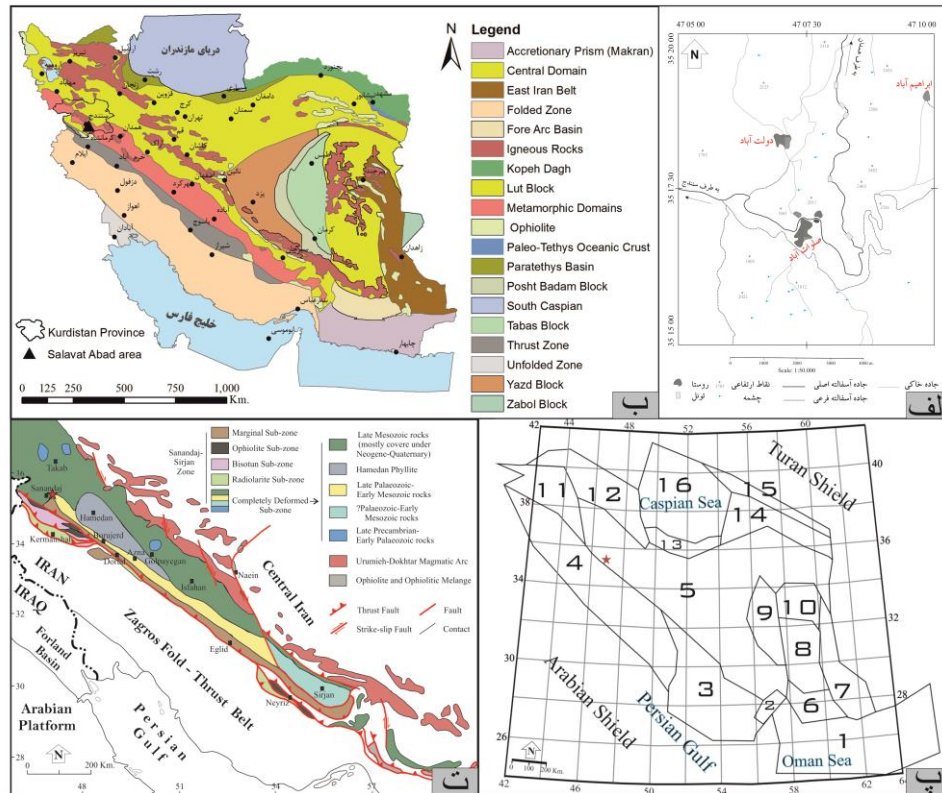
منطقه موردنظر با طول تقریبی ۲۳ کیلومتر در مسیر جاده سندج-همدان و ارتفاع متوسط ۲۲۰۰ متر، بین طول‌های جغرافیایی ۰۷۰۰ تا ۴۷۰۸۳۰ و عرض‌های جغرافیایی ۰۰ ۱۵ ۳۵ تا ۰۰ ۲۰ ۳۵ شمالی قرار دارد (شکل ۱). مهم‌ترین مرکز جمعیتی، روستای تاریخی صلوات‌آباد (از توابع بخش مرکزی شهرستان سندج) است که ۳۵۰۰ نفر جمعیت دارد. بلندترین نقطه محدوده مورد مطالعه با بلندای ۲۵۱۷ متر از سطح دریاهای آزاد در جنوب خاوری تونل شماره ۳ گردنه صلوات‌آباد واقع شده است. کمینه بلندای منطقه ۱۷۰۰ متر است. آب‌وهوای منطقه سرد و نیمه خشک است. بیشتر بارش‌ها به صورت برف و به مقدار کمتر باران است. رژیم بارندگی، مدیترانه‌ای است و بادهای مرطوب باختری، عامل اصلی بارش‌هاست. بین سال‌های ۱۴۰۰-۱۳۵۴، میانگین کمینه و بیشینه دمای هوا در منطقه صلوات‌آباد به ترتیب ۵/۲ و ۲۱/۷ درجه سانتی‌گراد، میانگین بارش سالیانه ۴۷۴/۵ میلی‌متر و متوسط روزهای برفی و بارانی ۳۵ روز گزارش شده است [3]. مهم‌ترین رود منطقه، رودخانه فصلی دولت‌آباد با راستای شمال خاور- جنوب باختر است که به رودخانه صلوات‌آباد می‌پیوندد.

۳. روش انجام کار

به تقریب تمام طول گردنه از شیب‌های سنگی تشکیل شده است و شیب‌های خاکی وجود ندارد. بر همین مبنا، وضعیت ناپایداری شیروانی‌های سنگی مورد توجه قرار گرفت و به بحث لغزش‌های انتقالی، چرخشی و روانه‌ها اشاره‌ای نشده است. در این پژوهش مراحل زیر در دستور کار قرار گرفت: ۱- گردآوری و بررسی منابع اطلاعاتی موجود، شامل نقشه‌های زمین‌شناسی، توپوگرافی، هم‌بارش، عکس‌های هوایی و تصاویر ماهواره‌ای، آمارها، گزارش‌ها، پایان‌نامه‌ها و مقاله‌های معتبر علمی، ۲- شناسایی واحدهای سنگی، تهیه نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه و شناسایی زمین‌لغزش‌های قدیمی در طول مسیر، ۳- طبقه‌بندی مسیر مورد مطالعه به پهنه‌های مجزا با توجه به سنگ‌شناسی رخنمون‌ها و وضعیت ناپایداری دامنه‌ها و برداشت ناپیوستگی‌ها (گسل‌ها، درزه‌ها و لایه‌بندی)، ۴- بررسی ناپایداری شیروانی‌های سنگی در طول مسیر، ۵- پهنه‌بندی مسیر با استفاده پارامترهای زمین‌شناسی و روش پیشنهادی پیرسون (RHRS)، ۶- تحلیل اطلاعات به دست آمده از بازدیدهای میدانی در محیط نرم‌افزارهای google earth, Microsoft excel, Stereonet, Dips, Arc GIS و ... ۷- نگارش متن، معرفی نقاط پرخطر و ارائه پیشنهادات به منظور پیشگیری و پایدارسازی دامنه‌های سنگی

۴. زمین‌شناسی منطقه صلوات‌آباد

بر اساس پهنه‌بندی رسوبی- ساختمانی ایران، منطقه‌ی مورد مطالعه در پهنه سندج- سیرجان قرار دارد [1,16]. در پهنه‌بندی [14] در پهنه سندج- سیرجان، منطقه مطالعاتی در زیرپهنه با دگرریختی‌های پیچیده واقع شده است. [11]، سه کمر بند آتشفشانی در شمال باختر ایران با روند شمال باختر- جنوب خاور حدفاصل راندگی اصلی زاگرس در جنوب باختر و گسل تبریز در شمال خاور معرفی کردند. منطقه مورد مطالعه در کمر بند آتشفشانی کرتاسه سندج واقع شده است. همچنین از نظر لرزه‌خیزی، منطقه صلوات‌آباد در پهنه‌بندی لرزه‌زمین‌ساختی کشور که از سوی [9] منتشر شده، در بخش‌های شمال باختری استان لرزه‌زمین‌ساختی ایران مرکزی و در نزدیکی مرز با استان لرزه‌زمین‌ساختی شمال باختر زاگرس قرار دارد.



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناختی منطقه صلوات آباد در باختر فلات ایران، الف: موقعیت جغرافیایی، ب و ت: به ترتیب موقعیت قرارگیری در پهنه سنندج - سیرجان و زیرپهنه با دگرریختی‌های پیچیده، پ: موقعیت منطقه در ایالت‌های لرزه‌زمین‌ساختی

۵. پهنه‌بندی گردنه صلوات آباد

اساس پهنه‌بندی منطقه مورد مطالعه بر اساس تغییرات سنگ‌شناسی استوار بوده است. بر این مبنا، منطقه به ۶ پهنه (محدوده) طبقه‌بندی شد (شکل ۱۴-۲). برداشت‌های صحرایی و تجزیه و تحلیل داده‌ها به تفکیک پهنه‌های شش‌گانه انجام شد (جدول ۱-۲).

جدول ۱. مختصات جغرافیایی و طول پهنه‌های معرفی شده در گردنه صلوات آباد

شماره پهنه	طول جغرافیایی	عرض جغرافیایی	طول پهنه (Km.)
پهنه ۱ = ۳/۶	۴۷ ۰۳ ۲۰/۱	۳۵ ۱۸ ۲۹/۱	شروع ۱
پهنه ۲ = ۲/۰	۴۷ ۰۵ ۱۱	۳۵ ۱۷ ۲۶/۵	پایان ۱ و شروع ۲
پهنه ۳ = ۶/۴۶	۴۷ ۰۶ ۲۳/۵	۳۵ ۱۷ ۲۱/۸	پایان ۲ و شروع ۳
پهنه ۴ = ۳/۲۲	۴۷ ۰۸ ۳۲/۷	۳۵ ۱۶ ۱۶/۵	پایان ۳ و شروع ۴
پهنه ۵ = ۵/۸۵	۴۷ ۰۷ ۵۷	۳۵ ۱۷ ۴۰/۳۵	پایان ۴ و شروع ۵
پهنه ۶ = ۱/۹۵	۴۷ ۰۸ ۳۸/۳۶	۳۵ ۲۰ ۱۱/۴۶	پایان ۵ و شروع ۶



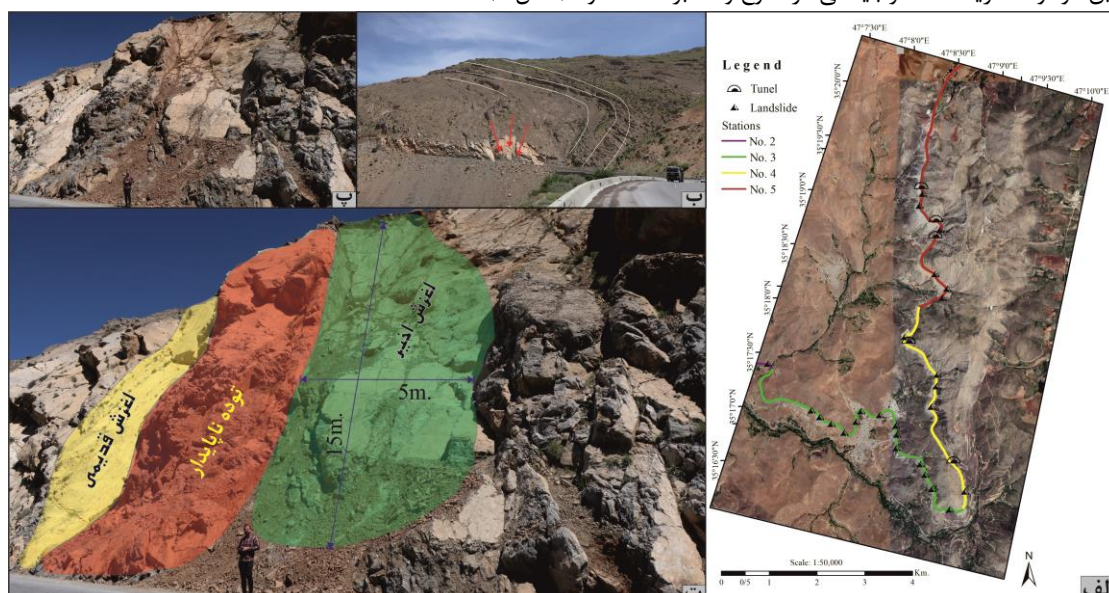
پایان پهنه ۶	۴۷۰۹۵۲/۲	۳۵۲۰۱۶/۷	۲۳~مجموع
--------------	----------	----------	----------

از نگاه ترکیب لیتولوژی، ایستگاه شماره یک از گدازه‌های پورفیری تا مگاپورفیری سبز رنگ، ایستگاه شماره دو از گدازه‌های بالشی پیلولاوا با ترکیب آندزیت تا بازالتیک آندزیت، ایستگاه شماره سه از گدازه‌های با ترکیب آندزیت پورفیری تا بازالتیک آندزیت و بازالت‌های سبز تا ارغوانی تیره همراه با قطعات نابرجا از سنگ‌آهک‌های اربیتولین‌دار، پهنه شماره چهار از سنگ‌آهک‌های خاکستری روشن متوسط لایه و به شدت تکتونیزه، پهنه شماره پنج از تناوب سنگ‌آهک متوسط تا ضخیم لایه و توده‌ای با میان لایه‌هایی از سنگ‌های آتشفشانی سبز رنگ با بافت پورفیری با ترکیب حدواسط در حد آندزیت و ایستگاه شماره شش بیشتر از ماسه‌سنگ‌های نازک تا متوسط لایه، سفید، کرم، قهوه‌ای و ارغوانی با میان لایه‌هایی از شیل‌های خاکستری تیره و کالک شیست تشکیل شده است.

۶. زمین‌لغزش‌های گردنه صلوات‌آباد

به منظور تحلیل ناپایداری شیروانی‌های سنگی لازم است موقعیت زمین‌لغزش‌های حال حاضر و لغزش‌های کهن مشخص شود. شناسایی زمین‌لغزش‌ها از طریق بررسی عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای و استفاده از فنون سنجش از دور امکان‌پذیر است. بررسی تصاویر ماهواره‌ای و بازدیدهای صحرایی منطقه نشان داد که مجموعه متنوعی از لغزش‌ها شامل سنگ‌افت، واژگونی، انواع جریان و لغزش انتقالی در مسیر جاده و نواحی اطراف به وقوع پیوسته است. در شکل (۲ الف)، موقعیت لغزش‌های اصلی بر روی تصویر ماهواره‌ای مشخص شده است.

جدیدترین زمین‌لغزش در گردنه صلوات‌آباد در شامگاه جمعه، یکم اردیبهشت ماه ۱۴۰۲ پس از چند روز بارش متداوم باران در منطقه به وقوع پیوست. لغزش توده‌های سنگی حدفاصل تونل‌های شماره ۲ و ۳، منجر به مسدود شدن کامل مسیر رفت سنندج-همدان شد. با تلاش سازمان راه‌داری و همکاری پلیس راهنمایی و رانندگی، این مسیر تا سحرگاه روز بعد بازگشایی شد. زمین‌لغزش در طول جغرافیایی ۴۷۰۸۲۰/۶ خاوری و عرض جغرافیایی ۳۵۱۸۶/۸ شمالی رخ داد. این بخش از سنگ‌آهک‌های نازک تا ضخیم لایه خاکستری تیره تا سیاه رنگ کرتاسه پیشین (آهک اربیتولین‌دار) تشکیل شده است. این واحد در بسیاری از نقاط گردنه بر روی سنگ‌های آتشفشانی حدواسط تا بازیک کرتاسه پسین (آندزیت تا آندزیت بازالت) رانده شده است. لغزش از نوع صفحه‌ای تا گوه‌ای و در اثر ناپایداری حاصل از یک گسل اصلی و درزه‌های مرتبط با آن با شیب و جهت شیب ۱۹۰/۸۸ درجه به وقوع پیوسته است (شکل ۲). جهت شیب لایه‌بندی هم جهت شیب توپوگرافی (شیب دامنه) است. گسل‌های این منطقه از نوع معکوس و راستای شمالی-جنوبی دارند. ارتفاع دامنه لغزیده در حدود ۲۵ متر و ابعاد توده لغزیده ۱×۱۵×۵ متر (۷۵ مترمکعب) برآورد گردید. در کنار این توده لغزیده یک توده کاملاً ناپایدار قرار دارد که بین دو توده لغزیده است و بایستی در اسرع وقت برداشت شود (شکل ۲)





شکل ۲. زمین لغزش‌های گردنه صلوات‌آباد، الف: موقعیت زمین لغزش‌های کهن و عهدحضر، ب: موقعیت بخش لغزیده در هسته تاقدیس پلانچ‌دار با یال برگشته، دید به سوی شمال-شمال باختر، پ و ت: موقعیت و ابعاد توده لغزیده در سمت راست، توده ناپایدار با خطر لغزش بالا در بخش وسط و لغزش قدیمی در سمت چپ

۷. نقش عامل انسانی در ناپایداری دامنه‌های گردنه صلوات‌آباد

علاوه بر عوامل طبیعی، فعالیت‌های انسانی، خطر زمین لغزش در گردنه صلوات‌آباد را به شدت افزایش داده است. حفر ترانشه‌های یک و دو طرفه برای احداث و تعریض محور سنندج-همدان و ریختن مواد باطله در دامنه‌های پایین دست، مسدود نمودن زهکش‌های طبیعی و افزایش فشار آب منفذی در اثر فعالیت‌های عمرانی و کشاورزی، برهم زدن شیب طبیعی دامنه‌ها و تسطیح اراضی برای احداث ویلا مسکونی و باغداری، تنها گوشه‌ای از نقش مخرب عامل انسانی در ناپایداری دامنه‌های گردنه صلوات‌آباد است. با توجه به بالا بودن خطر زمین لغزش در بسیاری از نقاط، اداره راهداری و حمل و نقل جاده‌ای علاوه بر نصب تابلوهای هشداردهنده در مورد خطر ریزش کوه در سرتاسر مسیر، اقدام به پلکانی کردن برخی دامنه‌های مرتفع مشرف به جاده و حفر ترانشه در دو سوی جاده نموده است. همچنین در روزهای پایانی برداشت‌های میدانی، عملیات احداث رمپ‌های خروج اضطراری و ساخت دیوار حایل در محور مورد مطالعه آغاز شد. با آنکه انجام این دست اقدامات لازم و مفید است ولی به هیچ‌وجه کافی نیست.

۸. ارزیابی ناپایداری شیروانی‌های سنگی

به منظور ارزیابی ناپایداری شیروانی‌های سنگی از پارامترهای مختلفی استفاده می‌شود که در ادامه توضیح داده خواهد شد.

۸.۱ شاخص کیفی توده سنگ (RQD)

هر چه میزان RQD بیشتر باشد، کیفیت توده سنگ بهتر است [5]. در جدول ۲ مقادیر RQD حاصل از مغزه‌گیری در محل تونل‌های پنج‌گانه (دریافتی از اداره کل راه و شهرسازی سنندج) آمده است.

۸.۲ رده‌بندی RMR

در رده‌بندی بنیواسکی (۱۹۷۶ و ۱۹۸۹)، شش فاکتور موثر در رده‌بندی معرفی شده است که پنج پارامتر مقاومت فشاری تک محوری، شاخص کیفیت توده سنگ، وضعیت ناپیوستگی‌ها، فاصله‌داری و وضعیت آب زیرزمینی به صورت کمی و پارامتر جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌ها به صورت کیفی بررسی می‌شود. بر اساس عدد به دست آمده، سنگ‌ها در رده‌های پنج‌گانه از خیلی خوب تا بسیار ضعیف قرار می‌گیرند [10]. در جدول ۲، نتایج آزمایش تراکم تک محوری آمده است.

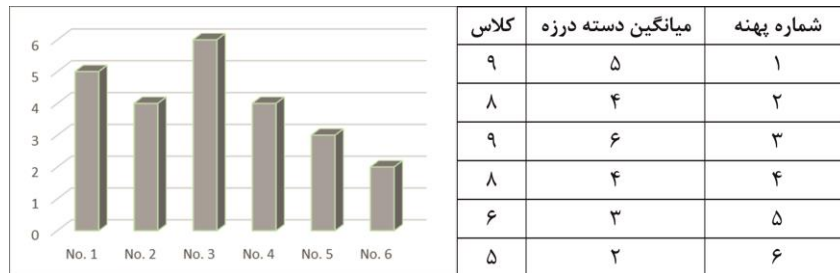
جدول ۲. مقادیر RQD، آزمایش مقاومت فشاری تک محوره و ابعاد متوسط بلوک‌ها در هر لغزش

شماره پهنه‌ها	۱	۲	۳	۴	۵	۶
RQD (%)	۴۵	۴۴	۲۹	۲۸	۴۱	۳۶
مقاومت تک محوری	۲۰/۶۸	۴۸/۱۱	۴۷/۵۲	۲۰/۵۸	۲۰/۵۸	۴۸/۱۱
اندازه بلوک‌ها m ³	۰/۸۵	۰/۴۱	۰/۶۴	۲/۰۲	۱/۰۷	۰/۱۶

۹. ارتباط درزه‌ها با میزان ناپایداری شیروانی‌ها در گردنه صلوات‌آباد

۹.۱ تعداد دسته درزه‌ها

تعداد دسته درزه‌ها یکی از مهم‌ترین فاکتورهای موثر در میزان پایداری توده‌های سنگی در بریدگی حاشیه جاده‌ها و تونل‌ها به حساب می‌آید. هر چه تعداد دسته درزه‌ها بیشتر باشد، کیفیت توده سنگ هم پایین می‌آید [6]. بر همین اساس لازم است در حین عملیات صحرایی، درزه‌ها از سایر ناپیوستگی‌ها و درزه‌های سیستماتیک از غیرسیستماتیک تفکیک گردد [13]. میانگین تعداد دسته درزه‌های برداشت‌شده و نمودار فراوانی آن‌ها به تفکیک هر پهنه ترسیم شد. بر این اساس، سنگ‌های پهنه شماره ۶ در نزدیکی ایستگاه ایست و بازرسی دهگلان، کمترین و سنگ‌های پهنه شماره ۳ در حوالی روستای صلوات‌آباد، بیشترین میانگین دسته درزه را دارند.



شکل ۳. میانگین دسته درزه‌های اندازه‌گیری شده و نمودار فراوانی دسته درزه‌ها به تفکیک هر پهنه

۹.۲ شیب و امتداد درزه‌ها

چنانچه شیب لایه‌ها و درزه‌ها به طرف جاده باشد، احتمال لغزش و سقوط توده‌های سنگی به سوی جاده و مخاطرات حاصل از آن افزایش چشمگیری می‌یابد [4,8]. در حالتی که رویه شیروانی دارای شیب قابل ملاحظه‌ای باشد و زاویه شیب ناپیوستگی (درزه) با سطح افق نزدیک به قائم و جهت شیب ناپیوستگی در خلاف جهت رویه شیروانی باشد، خطر سنگ واژگونی وجود دارد. چنانچه دو دسته درزه متقاطع در توده سنگ وجود داشته باشد و زاویه دو صفحه ناپیوستگی نسبت به افق از زاویه اصطکاک داخلی سنگ بزرگتر باشد، امکان لغزش گوه‌ای وجود دارد [5]. مقادیر شیب و جهت شیب درزه‌های هر پهنه در چندین ایستگاه اندازه‌گیری شد. تصاویر استریوگرافی و نمودارهای گل‌سرخ درزه‌های برداشت شده به تفکیک هر پهنه ترسیم و مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.

۹.۳ فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها

فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها دست‌کم از دو جهت با اهمیت است: ۱- میزان فاصله، تاثیر زیادی بر مقدار نفوذپذیری توده سنگ دارد. ۲- فاصله‌داری به همراه جهت‌یابی و فراوانی دسته درزه‌ها، شکل و ابعاد قطعات حاصل از توده سنگ را کنترل می‌کند که نقش مهم در پایداری کلی توده سنگ ایفا می‌کند [2]. در ارزیابی اولیه و به منظور شناخت کیفیت توده‌های سنگی، می‌توان بر مبنای فاصله ناپیوستگی‌ها، توده سنگ را رده‌بندی نمود [12]. بر اساس گسترش سیستم ناپیوستگی‌ها در گردنه صلوات‌آباد، مقدار کمینه، بیشینه و میانگین فاصله‌داری اندازه‌گیری شد. در این پژوهش از میانگین کمینه مقدار فاصله‌داری در هر پهنه به عنوان عدد فاصله‌داری ناپیوستگی‌ها در روابط ریاضی استفاده شد.

۹.۴ تداوم یا پیوستگی درزه‌ها

هر قدر تداوم درزه‌ها کمتر باشد، کیفیت توده سنگ بهتر خواهد بود [12]. بر اساس نوع تداوم، ناپیوستگی‌ها به انواع منظم، نیمه‌منظم و نامنظم طبقه‌بندی می‌شوند. برای اندازه‌گیری میزان تداوم ناپیوستگی‌ها در گردنه صلوات‌آباد، طول خط اثر ناپیوستگی‌ها در سطح رخنمون اندازه‌گیری شد. این روش اندازه‌گیری، تخمینی اولیه از گسترش ناپیوستگی‌ها در کل توده سنگ در اختیار پژوهشگر قرار می‌دهد.

۹.۵ بازشدگی دهانه درزه‌ها

بازشدگی‌ها به دلیل نقشی که در مقاومت برشی، قابلیت هدایت توده‌ی سنگ و فشار آب موجود در آن‌ها، اهمیت فراوانی دارند. بررسی‌های آماری در سنگ‌های رخنمون‌یافته در گردنه‌ی صلوات‌آباد نشان داد که بخش قابل توجهی از ناپیوستگی‌های برداشت شده در ایستگاه‌ها از نوع باز هستند. به منظور استفاده از فاکتور بازشدگی در رده‌بندی RMR، میانگین بازشدگی ناپیوستگی‌های هر دسته درزه



به حساب آمد. پیمایش‌های صحرایی نگارنده نشان داد که مهم‌ترین عامل بازشدگی درزه‌ها در سنگ‌های کربناته، فرآیند انحلال و کارستی‌شدن و در سنگ‌های آتشفشانی، فرآیند هوازدگی فیزیکی و شیمیایی است.

۹.۶ ناهمواری سطح درزه

هدف از مطالعه ناهمواری‌های سطح درزه، برآورد مقاومت برشی گسستگی‌ها و انبساط ناشی از جابجایی است. با افزایش عرض بازشدگی و ضخامت مواد پرکننده درزه و ایجاد جابجایی در سطح درزه، از نقش ناهمواری در مقاومت برشی کاسته می‌شود. [2]. بررسی کیفی سطح ناپیوستگی‌ها در گردنه صلوات‌آباد نشان داد که ناپیوستگی‌ها در سنگ‌آهک‌های اوربیتولین‌دار کرتاسه پیشین از نوع مسطح و زبر، موج و نرم و موج و زبر است. سطوح درزه در واحدهای آتشفشانی نیز بیشتر از نوع نرم و مسطح هستند.

۹.۷ مواد پرکننده

مواد پرکننده درزه‌ها بر حسب ترکیب، در برابر مقاومت برشی، تغییرشکل پذیری و نفوذپذیری رفتارهای گوناگونی از خود نشان می‌دهند. پرشدگی در ناپیوستگی‌ها به دو صورت برجا (تحت تاثیر فرآیند هوازدگی) و نابرجا (رسوب‌گذاری از محلول‌های گرمایی و آب‌های زیرزمینی) مشاهده می‌شوند [2]. مواد پرکننده درزه‌ها در سنگ‌های کربناته صلوات‌آباد، در درزه‌های با بازشدگی کمتر از ۵ میلی‌متر از جنس کلسیت و در درزه‌های با بازشدگی بیش از ۵ میلی‌متر از کلسیت و ذرات آواری با ابعاد در حد ماسه تا گل است. در واحدهای آتشفشانی به دلیل عملکرد محلول‌های گرمایی و تاثیر به نسبت بیشتر هوازدگی شیمیایی، مواد پرکننده درزه‌ها بیشتر از جنس کانی‌های رسی، کلریت و ذرات تخریبی در حد سیلت و رس است.



شکل ۴. ویژگی سطح درزه، الف: درزه فاقد پرشدگی، ب: درزه پرشده با مواد آواری، پ: دگرسانی سطح درزه (کلریتی شدن) و ت: پرشدگی سطح درزه با کلسیت ثانویه

۹.۸ مقاومت دیواره درزه

مقاومت برشی سطح ناپیوستگی یکی از مهم‌ترین فاکتورهای مکانیکی توده‌های سنگی به حساب می‌آید که تحت تاثیر هوازدگی قرار دارد. مقاومت تراکمی سطح درزه، تحت تاثیر مواد پرکننده قرار دارد و با استفاده از چکش اشمیت اندازه‌گیری می‌شود.

۹.۹ تراوش



فشار آب به ویژه در زمانی که مواد پرکننده درزه‌ها ریزدانه و از جنس رس باشند، نقش منفی در پایداری توده‌های سنگی ایفا می‌کند [2]. وضعیت آب زیرزمینی بر رفتار مهندسی توده‌های سنگی به شکل‌های مختلف بررسی می‌شود. میزان جریان آب در فصول سرد و گرم سال متفاوت است و بهتر است اندازه‌گیری در زمان‌های مختلف انجام شود. اندازه‌گیری میزان آب در تونل‌های پنج‌گانه گردنه صلوات‌آباد انجام شد. بر اساس این اندازه‌گیری، میزان آب وارد شده به ۱۰ متر از طول تونل در اردیبهشت ماه در حدود ۵-۶ لیتر در دقیقه تخمین زده شد.

۹.۱۰ جهت‌یابی ناپیوستگی‌ها

در ایستگاه‌های مختلف، مقدار شیب و جهت شیب طبقات و درزه‌ها اندازه‌گیری شد. این پارامتر در هنگام محاسبه RMR یک پارامتر کیفی است و برای بیان آن از مفاهیمی مانند شرایط مناسب یا شرایط نامناسب استفاده می‌شود. نمودار گل‌سرخ منطقه نشان داد که ناپیوستگی‌های با روند تقریبی شمالی - جنوبی و شمال باختر - جنوب خاور بیشترین فراوانی را دارند.

۱۰. شاخص کیفیت سنگ

در این پژوهش از روش برآورد مستقیم مقدار RQD و روش پالمسترم (بر پایه استفاده از تعداد دسته درزه‌ها و فاصله‌داری آن‌ها)، استفاده گردید. لازم به یادآوری است که هیچ فاکتوری به تنهایی قادر به توصیف ویژگی‌های کلی توده‌های سنگی درزه‌دار نیست و تنها استفاده همزمان از پارامترهای مختلف می‌تواند به توصیف جامع منجر شود [4,8]. رابطه پالمسترم به قرار زیر است:

$$RMi = q_c \times J_p \quad \text{رابطه (۱)}$$

q_c = مقاومت تراکمی تک محوری بر حسب مگاپاسگال، J_p = فاکتور درزه که از صفر (برای سنگ‌های به طور کامل تخریب شده) تا یک (برای سنگ بکر) متغیر است. پارامترهای موثر در فاکتور درزه شامل چهار ویژگی زیر، دگرسانی، ابعاد درزه و تراکم درزه‌ها می‌شود. فاکتورهای ورودی جهت ارزیابی RMi شامل موارد زیر است:

۱۰.۱ مقاومت ماده سنگ

مقاومت سنگ به وسیله مقاومت فشاری تک محوری اندازه‌گیری می‌شود [4]. در این پژوهش، اعداد مقاومت تراکمی تک محوری از اداره کل راه و شهرسازی شهرستان سنندج دریافت شد. این آزمایش در شرایط اشباع و در زمان احداث تونل‌های پنج‌گانه گردنه صلوات‌آباد و تعریض جاده در سال‌های اخیر انجام شده است.

۱۰.۲ اندازه بلوک‌ها

عوامل کنترل‌کننده ابعاد بلوک‌ها شامل تعداد دسته درزه‌ها، جهت‌یافتگی فضایی درزه‌ها، فاصله و تداوم درزه‌ها می‌شود. با استفاده از اندازه بلوک‌ها می‌توان مقاومت و مدول تغییرشکل‌پذیری توده سنگ را به دست آورد [15]. برای اندازه‌گیری ابعاد بلوک‌ها، روش‌های مختلفی شامل استفاده از نسبت RQD/J_n ، استفاده از شاخص اندازه قطعات و استفاده از پارامتر فاصله‌داری وجود دارد (جدول‌های ۳ و ۴).

جدول ۳. نتایج حجم بلوک‌ها بر اساس نسبت شاخص کیفی سنگ بر تعداد دسته درزه‌ها

شماره پهنه	RQD	J_n	RQD/J_n
۱	۳۷	۱۵	۲/۴۶
۲	۳۵	۱۵	۲/۳۴
۳	۲۲	۱۵	۱/۴۷
۴	۳۲	۱۵	۲/۱۳



۵	۳۶	۱۵	۲/۴۰
۶	۳۸	۱۲	۳/۱۷

جدول ۴. میانگین ابعاد بلوک‌ها با استفاده از پارامتر فاصله‌داری، بلوک‌های آزاد و ارتفاع دامنه در پهنه‌های مختلف

شماره پهنه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
اندازه بلوک‌ها (مترمکعب) بر حسب فاصله‌داری	۰/۴	۰/۴۹	۱/۳۳	۲/۵۷	۱/۸۳	۰/۱۸
اندازه بلوک‌ها (مترمکعب) بر حسب بلوک‌های آزاد	۰/۸۵	۰/۴۱	۰/۶۴	۲/۰۲	۱/۰۷	۰/۱۶
ارتفاع دامنه (متر)	۲۰	۵۵	۶۴	۴۸	۳۰	۲۵

۱۲ تحلیل خطر سنگ افت

به منظور تحلیل خطر سنگ افت در گردنه صلوات‌آباد از روش پیرسون بهره گرفته شد. این روش بر پایه یک سیستم امتیازدهی به توان ۳ استوار است. و شیروانی‌های سنگی را در چهار گروه با امتیازهای ۳، ۹، ۲۷ و ۸۱ رتبه‌بندی می‌کند. فاکتورهای استفاده شده در روش پیرسون به قرار زیر است.

۱۲.۱ ارتفاع دامنه

در اینجا منظور از ارتفاع، فاصله قائم مرتفع‌ترین نقطه از دامنه است که احتمال سقوط سنگ از آن وجود دارد (شکل ۵). در صورتی که در پای دامنه ترانشه‌ای حفر شده باشد، عمق ترانشه به ارتفاع دامنه افزوده می‌شود. این پارامتر در گردنه صلوات‌آباد با استفاده از دستگاه GPS اندازه‌گیری شد. برای افزایش دقت، اعداد قرانت شده با داده‌های ماهواره‌ای گوگل‌ارث و داده‌های GPS تلفن همراه چک گردید.



شکل ۵. نحوه اندازه‌گیری پارامترهای ارتفاع دامنه و عرض جاده

۱۲.۲ فاکتور ترانشه کنار جاده

این فاکتور معرف توانایی ترانشه حفرشده در حاشیه جاده در برابر ورود بلوک‌های سقوط کرده از دامنه است. عوامل موثر در اندازه‌گیری این پارامتر شامل شیب و ارتفاع دامنه، شکل، عمق و عرض ترانشه، ابعاد بلوک‌های سنگی و حجم ریزش و تاثیر ناهمواری‌های سطح دامنه در حین سقوط می‌شود. برای ارزیابی این پارامتر، مقدار امتیاز در چهار رده (۳، ۹، ۲۷ و ۸۱) رتبه‌بندی می‌شود. با افزایش مقدار عددی، توانایی ترانشه در رفع خطر سنگ‌های سقوط کرده کمتر می‌شود [2,12]. با آنکه در بیشتر نقاط، ترانشه‌ها و جوی‌های کم‌ژرفایی حفر شده است، ولی در بسیاری از این ترانشه‌ها کارایی چندانی ندارند و با استانداردهای تعریف شده مطابق نیستند. این ترانشه‌ها در غالب



موارد پر شده است. ارتفاع دامنه و شیب توپوگرافی و طبقات به گونه‌ای است که در صورت وقوع سنگ افست، بسیاری از آن‌ها به جاده خواهند رسید. بر همین اساس، این پارامتر در پهنه‌های ۱ و ۶، امتیاز ۳، برای پهنه ۲، امتیاز ۹، برای پهنه ۵، امتیاز ۲۷ و برای پهنه‌های ۳ و ۴، امتیاز ۸۱ در نظر گرفته شد.

۱۲.۳ متوسط خطر وسیله نقلیه

این فاکتور معرف درصد زمانی است که یک وسیله نقلیه در معرض خطر ریزش قرار می‌گیرد و با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$AVR = \frac{\text{طول دامنه} * \text{تعداد وسایل نقلیه عبوری در طول شبانه‌روز}}{\text{سرعت متوسط وسایل نقلیه} * 24 \text{ ساعت}} \quad \text{رابطه (۲)}$$

مقدار $AVR=100$ ، بدین معنی است که در تمام زمان‌ها به طور متوسط یک خودرو در محدوده پرخطر قرار دارد. خودروهای عبوری از گردنه صلوات‌آباد، در هشت مرحله از شبانه‌روز (ساعت‌های ۱، ۴، ۷، ۱۰، ۱۳، ۱۶، ۱۹ و ۲۲) و در هر نوبت به مدت ۱۰ دقیقه شمارش و میانگین آن محاسبه شد. فاکتور موثر دیگر در این رابطه، سرعت وسایل نقلیه است. سرعت متوسط وسایل نقلیه با توجه به پیچ‌وخم‌های فراوان و عرض کم جاده، چندان بالا نیست. در حال حاضر با توجه به اجرای عملیات تعریض جاده، عرض بخش رفت و برگشت جاده با هم برابر نیست و در نتیجه امکان سبقت گرفتن مجاز فراهم نیست. بر همین اساس، سرعت خودروها در مسیر رفت و برگشت برابر نیست و سرعت متوسط خودروها در هر دو مسیر رفت و برگشت لحاظ شده است.

۱۲.۴ فاصله تصمیم‌گیری راننده

طبق تعریف، فاصله تصمیم‌گیری راننده طولی از جاده را در بر می‌گیرد که راننده قادر است بلوک‌های سنگی حاصل از ریزش را مشاهده و تصمیم مناسب را اتخاذ نماید. این پارامتر تحت تاثیر عوامل مختلفی مانند پیچ و خم جاده و پوشش گیاهی منطقه قرار دارد. در صورتی که امکان دید موانع جاده به خوبی مهیا نباشد و به علت حوادث گوناگون در طول مسیر، راننده مجبور به تغییر مسیر ناگهانی شود، مقدار DSD به حد بحرانی خود نزدیک می‌شود [7]. به کوتاه‌ترین مسیر در امتداد جاده که راننده بتواند یک جسم با ارتفاع مشخص را به طور پیوسته مشاهده نماید، فاصله دید گفته می‌شود. برای مشخص نمودن فاصله دید کمینه، بایستی نسبت به مقطع دارای خطر سنگ افست از هر دو جهت رانندگی نمود. در اینجا هر دو فاصله عمودی و افقی مدنظر است. با توجه به اینکه تغییرات ارتفاعی در گردنه صلوات‌آباد تدریجی است، در اینجا از آن صرف‌نظر می‌شود. در مقابل به دلیل وجود پیچ و خم‌های فراوان در طول مسیر، تغییرات افقی اهمیت دو چندان پیدا می‌کند. با استفاده از رابطه ۳، می‌توان فاصله دید را برحسب درصد به دست آورد.

$$DSD (\%) = \frac{\text{فاصله واقعی محل}}{\text{فاصله تصمیم‌گیری راننده}} * 100 \quad \text{رابطه (۳)}$$

فاصله واقعی محل، حداکثر فاصله‌ای است که راننده خودرو قادر است یک شئی با ارتفاع معین را به طور پیوسته مشاهده کند. پس از محاسبه این پارامتر و با استفاده از رابطه بالا، درصد فاصله تصمیم‌گیری برای پهنه‌ها محاسبه شد.

جدول ۵. متوسط خطر وسیله نقلیه، درصد فاصله تصمیم‌گیری راننده با استفاده از فاکتورهای موثر و عرض جاده به تفکیک پهنه‌های شش گانه

شماره پهنه	۱	۲	۳	۴	۵	۶
مجموع کل خودروهای عبوری	۱۷۴۷۲	۱۷۴۷۲	۱۷۴۷۲	۱۷۴۷۲	۱۷۴۷۲	۱۷۴۷۲
طول دامنه	۳/۴۸	۲/۱	۶/۲	۳/۷۳	۵/۸۴	۱/۷۴
سرعت متوسط خودروها	۱۰۰	۸۵	۹۰	۶۰	۶۰	۹۰
AVR (%)	۲۵/۳۳	۱۷/۹۸	۵۰/۱۵	۴۵/۲۵	۷۰/۸۵	۱۴/۰۷
تعداد خودروهای موجود در یک زمان معین	۲۵	۱۷	۵۰	۴۵	۷۰	۱۴
فاصله واقعی محل (متر)	۲۸۰	۲۶۰	۱۶۰	۱۵۰	۱۷۰	۲۷۰
سرعت مجاز	۷۰	۷۰	۶۰	۴۰	۴۰	۷۰
فاصله تصمیم‌گیری راننده	۳۳۰	۳۳۰	۳۰۰	۱۸۰	۱۸۰	۳۳۰



۸۱	۹۴	۸۳	۵۳	۷۸	۸۴	درصد فاصله تصمیم‌گیری راننده
۹/۵	۹	۸	۱۱/۵	۱۱/۵	۱۰	میانگین عرض جاده در مسیر رفت
۹/۵	۷/۵	۶	۹/۵	۱۱/۵	۱۰	میانگین عرض جاده در مسیر برگشت
۹/۵	۸/۲۵	۷	۱۰/۵	۱۱/۵	۱۰	میانگین عرض جاده

۱۲.۵ عرض جاده

در اینجا منظور از عرض جاده نشان‌دهنده محدوده‌ای است که بایستی از آن در برابر خطر لغزش محافظت کرد. برای به دست آوردن این پارامتر، محاسبات برای مسیر رفت و برگشت به صورت مجزا انجام می‌شود [2,7]. در مواردی که عرض جاده در بخش‌های مختلف مسیر، متغیر باشد، باریک‌ترین بخش جاده ملاک عمل قرار می‌گیرد. برای هر دو مسیر رفت و برگشت، فاصله مرکز جاده تا حاشیه شانه خاکی اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۵). با آنکه در سال‌های اخیر بسیاری از بخش‌های مسیر رفت (سنندج- همدان) دو بانده شده است، ولی بسیاری از بخش‌های مسیر برگشت (همدان- سنندج) و بخش‌هایی از مسیر رفت همچنان یک بانده است. بر همین اساس، در تمام بخش‌های پهنه‌های مختلف که مطالعات درزه‌نگاری در آن انجام شد، عرض جاده نیز محاسبه شد و در نهایت میانگین کل به دست آمد (جدول ۲۶-۳). عرض جاده در باریک‌ترین بخش آن ۳/۷ و در پهن‌ترین بخش، بیش از ۲۰ متر است. متوسط عرض جاده در کل مسیر ۹/۵ است که در پارامتر عرض جاده در گردنه صلوات‌آباد ملاک عمل قرار گرفت (جدول ۵).

۱۲.۶ ویژگی‌های زمین‌شناسی

ویژگی‌های زمین‌شناسی در قالب دو فاکتور در تحلیل خطر سنگ‌افت بررسی می‌شوند. فاکتور ۱: مواردی همچون زاویه اصطکاک داخلی (بیانگر پتانسیل حرکت یک توده نسبت به بلوک دیگر)، مواد پرکننده درزه، پیوستگی درزه‌ها و بار هیدروستاتیک (در صورت وجود آب) را شامل می‌شود. بر همین اساس، پارامتر درزه‌های مخالف (درزه‌های مسبب گسیختگی گوه‌ای، بلوکی و واژگونی) اهمیت می‌یابد. فاکتور ۲: مواردی همچون وجود تناوب در سنگ‌شناسی و قرارگیری واحدهای سنگی نامقاوم در زیر واحدهای مقاوم است. در این صورت، واحدهای با پتانسیل بالای هوازدگی در اثر پدیده زیرشویی، عقب‌نشینی می‌کنند و لایه‌های با مقاوم‌تر در بالا ناپایدار می‌شوند (جدول ۶) جدول ۶: نقش ویژگی‌های زمین‌شناسی در ناپایداری شیروانی‌های سنگی گردنه صلوات‌آباد

شماره پهنه		۱	۲	۳	۴	۵	۶
ویژگی‌های زمین‌شناسی	فاکتور ۱	درزه‌ها پیوسته، جهت یابی معکوس	درزه‌ها پیوسته، جهت یابی معکوس	درزه‌ها پیوسته، جهت یابی معکوس	درزه‌ها پیوسته، جهت یابی معکوس	درزه‌ها پیوسته، جهت یابی معکوس	درزه‌ها پیوسته، جهت یابی معکوس
	اصطکاک سنگ	ناهموار بدون درهم قفل‌شدگی	صفحه‌ای	صفحه‌ای	صفحه‌ای	صفحه‌ای	ناهموار بدون درهم قفل‌شدگی
فاکتور ۲	شرایط ساختاری	مشخصات فرسایش فرعی است	مشخصات فرسایش فرعی است	مشخصات فرسایش کمی با هم اختلاف دارند	فرسایش زیاد	فرسایش زیاد	مشخصات فرسایش کمی با هم اختلاف دارند
	اختلاف در نرخ فرسایش	کم	متوسط	زیاد	زیاد	متوسط	کم

۱۲.۷ اندازه بلوک‌ها و حجم ریزش در هر حادثه

هنگام برآورد خطر سقوط سنگ، بایستی اندازه بلوک‌ها مدنظر قرار گیرد. به منظور تخمین حجم بزرگ‌ترین بلوک ناپایدار در هر پهنه، ابعاد بزرگ‌ترین بلوک سنگی موجود در پای دامنه که احتمال سقوط آن وجود دارد، اندازه‌گیری می‌شود [2]. نوع لیتولوژی تأثیری مستقیمی بر نحوه شکل‌گیری سیستم درزه‌ها و ابعاد بلوک‌ها دارد. در گردنه صلوات‌آباد، ابعاد بلوک‌های حاصل از واحدهای کربناته به



مراتب بزرگ‌تر از واحدهای آتشفشانی است. متاسفانه با همه تلاش‌های انجام شده از سوی سازمان‌های مرتبط، بانک اطلاعاتی دقیقی و کاملی، از لغزش‌های کشور تهیه نشده است. در مورد گردنه صلوات‌آباد برای پارامتر حجم ریزش، تنها به گزارش شاهدان محلی، مطالعات دورسنجی و شناسایی زمین‌لغزش‌های کهن اکتفا شده است. با توجه به این اطلاعات، حجم ریزش در تمامی پهنه‌ها معادل ۳ مترمکعب در هر لغزش در نظر گرفته شد.

۱۲.۸ شرایط آب و هوایی و وضعیت آب بر روی دامنه‌ها

حضور آب، یخ‌زدگی و ذوب مجدد یخ، باعث هوازگی و ناپایداری توده سنگ در دامنه‌ها می‌شود. فشار آب منفذی باعث کاهش تنش عمودی موثر بر سطح گسیختگی و کاهش مقاومت برشی مواد دامنه می‌گردد [5]. بر اساس آمارهای بلندمدت دریافتی از هواشناسی کردستان، منطقه در محدوده نواحی کم باران با دوره‌های یخ‌زدگی طولانی قرار دارد. بر پایه همین آمارها، حضور آب در شیب دامنه‌ها در حالت متوسط در نظر گرفته شد.

۱۲.۹ تاریخچه ریزش‌های سنگی

اطلاعات این بخش از طریق کسب اطلاع از افراد محلی، رانندگانی که هر روزه از این مسیر تردد دارند و مکان‌یابی زمین‌لغزش‌های قدیمی حاصل گردید (شکل ۲ الف). برای این پارامتر، چهار طبقه لحاظ شده است. امتیاز ۳ به ریزش‌های کم، ۹ برای ریزش‌های تصادفی، ۲۷ برای ریزش‌های زیاد و ۸۱ برای ریزش‌های ثابت و دائمی اختصاص داده شده است. با توجه به آمارهای دریافتی، درجه امتیاز ۹ (ریزش-های تصادفی) برای همه پهنه‌ها لحاظ گردید.

۱۳ امتیازدهی به روش RHRS و تهیه نقشه ریسک منطقه

این روش به صورت یک روش نیمه کمی، اهمیت خطرات ناشی از ریزش‌های سنگ در مسیر بزرگراه‌ها، خطوط راه‌آهن و سایر محورهای مواصلاتی را به خوبی نشان می‌دهد [13]. بر اساس امتیازهای کسب شده در هر پهنه، محدوده گردنه صلوات‌آباد رده‌بندی گردید. از آنجایی که بر اساس آیین‌نامه ۲۵۰۰ وزارت راه و شهرسازی، این منطقه در محدوده با ریسک کم ($\alpha = 0.24 < 0.25$) واقع شده است، از نیروی ناشی از زمین‌لرزه در این رده‌بندی صرف‌نظر شد. در روش پیشنهادی پیرسون برای طبقه‌بندی خطر ریزش‌های سنگی، مناطق با مجموع امتیازات بیش از ۴۰۰ در کلاس A (پرخطر)، نواحی با امتیاز ۴۰۰-۲۰۰ در کلاس B (با ریسک متوسط) و بخش‌های با امتیاز کمتر از ۲۰۰ در کلاس C (کم خطر) قرار می‌گیرند. بر این اساس، ریسک ناشی از ریزش‌های سنگی در پهنه‌های مختلف گردنه صلوات-آباد در جدول ۸ آورده شده است.

جدول ۷: امتیازدهی به روش RHRS و رده‌بندی بخش‌های پهنه‌های مختلف از لحاظ خطر ریزش‌های سنگی

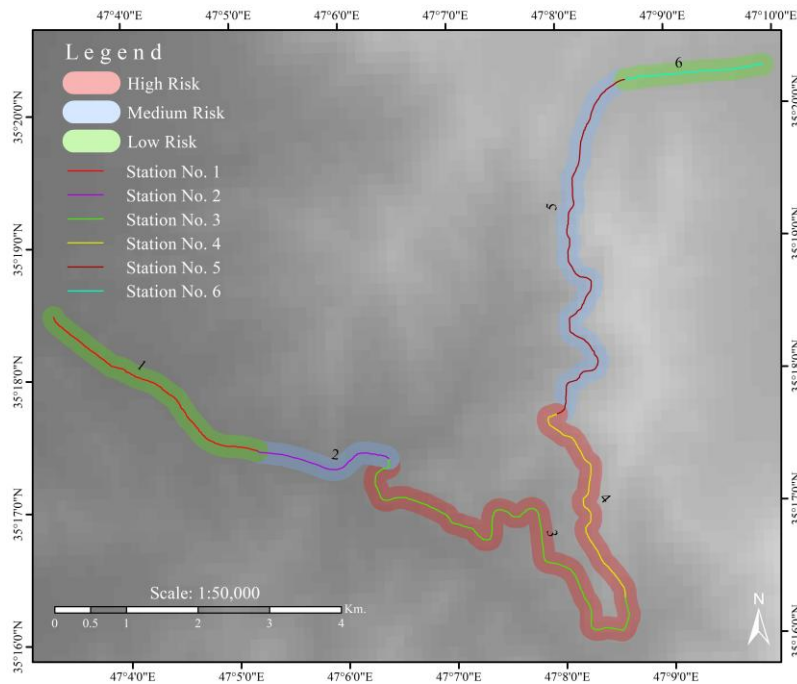
فاکتورها	شماره پهنه					
	۱	۲	۳	۴	۵	۶
امتیازها						
ارتفاع (متر)	۹	۸۱	۸۱	۸۱	۲۷	۲۷
تأثیر ترانشه	۳	۹	۸۱	۸۱	۲۷	۳
AVR	۲۷	۸۱	۸۱	۸۱	۸۱	۲۷
DSD	۹	۳	۳	۳	۳	۹
عرض جاده	۲۷	۹	۲۷	۸۱	۸۱	۲۷
ویژگی زمین‌شناسی	۲۴	۳۰	۴۰	۳۶	۳۶	۳۰
ابعاد بلوک‌ها	۲۷	۹	۹	۸۱	۲۷	۳
شرایط آب و هوا	۹	۹	۹	۹	۹	۹
تاریخچه ریزش	۳	۹	۸۱	۲۷	۲۷	۳



۱۳۸	۳۱۸	۴۸۰	۴۱۲	۲۴۰	۱۳۸	مجموع امتیازات
C	B	A	A	B	C	کلاس خطر

همان‌طور که در جدول ۸ و شکل ۶ مشاهده می‌شود، ارزیابی خطر زمین‌لغزش بر اساس رده‌بندی پیرسون در پهنه‌های جاده‌ای ۱ و ۶ با مساحتی در حدود ۲۴ درصد در محدوده کم خطر (کلاس C)، پهنه‌های جاده‌ای ۲ و ۵ با مساحتی در حدود ۳۴ درصد در محدوده با خطر متوسط (کلاس B) و در پهنه‌های جاده‌ای ۳ و ۴ با مساحتی در حدود ۴۲ درصد از کل مسیر در محدوده با خطر بالا (کلاس A) قرار می‌گیرند.

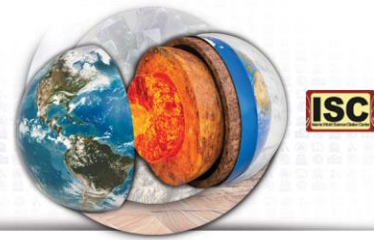
با توجه به مطالب ذکر شده در بالا می‌توان نتیجه گرفت که سامانه امتیازدهی به سنگ افت و ارزیابی خطر سقوط سنگ، یک روش نیمه کمی است و به عنوان یک ابزار مقدماتی، پژوهشگر را تا حدودی به اهمیت خطرات نسبی ناشی از وقوع سنگ‌افت در مسیر راه‌ها مطلع می‌کند.



شکل ۶. پهنه‌بندی خطر وقوع زمین‌لغزش در گردنه صلوات‌آباد بر اساس روش پیرسون

۱۴. روش‌های پیشگیری و پایدارسازی

روش‌های پایدارسازی در دامنه‌هایی که ترانشه‌های یک طرفه و دو طرفه برای احداث و تعریض جاده حفر شده است با دامنه‌هایی طبیعی که تغییری در وضعیت شیب آن‌ها ایجاد نشده است، متفاوت خواهد بود. در دامنه‌های طبیعی، استفاده از روش لقی‌گیری و در دامنه‌هایی که با ترانشه بریده شده‌اند، بعد از لقی‌گیری بلوک‌های سنگی ناپایدار، بتن‌پاشی پیشنهاد می‌شود. لقی‌گیری یکی از ساده‌ترین، کم هزینه‌ترین و کاربردی‌ترین روش‌های پایدارسازی دامنه‌های طبیعی و حفاری شده است. در این روش، قطعات سنگی ناپایدار از شیب دامنه برداشته می‌شود. از آنجایی که قطعات ناپایدار در بسیاری از بخش‌های مسیر ابعاد آنچنان بزرگی ندارند، اجرای این روش به نسبت آسان و موجه است. با این همه در ابتدای پهنه شماره ۵ و در نزدیکی مرز آن با پهنه ۴، ابعاد قطعات ناپایدار بسیار بزرگ است که در شیب تندی قرار گرفته‌اند و نیازمند لقی‌گیری فوری است (شکل ۷).



پاشیدن بتن بر روی سطح دامنه‌های دارای سنگ‌های سست و فرسایش یافته و توده‌های سنگی دارای دسته درزه‌های فراوان، ضمن حفظ پایداری دامنه، از هوازگی فیزیکی و شیمیایی بیشتر آب‌های سطحی جلوگیری خواهد کرد [5]. در مناطقی که توالی سنگی از تناوب طبقات سخت و سست تشکیل شده است، عملیات بتن‌پاشی با پوشاندن سطح طبقات ضعیف از تخریب آن‌ها و خالی شدن زیر طبقات مقاوم و واژگونی آن‌ها جلوگیری به عمل می‌آورد. روش دیگر پایدارسازی قابل استفاده در منطقه مورد مطالعه، استفاده از توری سیمی است. این روش به نسبت ارزان است و با توجه به ابعاد کوچک واریزه‌ها، کاربرد زیادی در پایداری دامنه‌ها خواهد داشت. در بسیاری از دامنه‌های سنگی صلوات‌آباد، استفاده از روش‌های کاهش شیب و ارتفاع و پلکانی کردن شیب دامنه‌ها کاربرد کمتری دارد، در مقابل روش زهکشی، به ویژه در شرایطی که عمق نفوذ آب در درون درزه اندک باشد، روشی بسیار کاربردی در پایدارسازی دامنه‌های سنگی در میان مدت و دراز مدت خواهد بود. مراحل اجرای روش‌های زهکشی سطحی قابل استفاده در این منطقه می‌تواند شامل بستن شکاف‌ها، ایجاد شبکه زهکشی سطحی و مالچ پاشی شود. در گام بعد بایستی آب موجود در دامنه زهکشی شود. بهترین روش، زهکشی ثقیلی افقی است. اجرای همزمان مجموعه روش‌های ذکر شده در بالا می‌تواند ناپایداری دامنه‌ای در منطقه را به حداقل ممکن برساند.



شکل ۷. پایدارسازی دامنه‌ها، الف: پلکانی کردن شیب و ب: بخش‌هایی که نیازمند لقی گیری فوری است.

۱۵ نتیجه‌گیری

۱- بر اساس مجموع شواهد می‌توان گفت که گردنه صلوات‌آباد، از منظر ناپایداری شیروانی‌های سنگی دارای پتانسیل است. نتایج حاصل از رده‌بندی RMR در گردنه صلوات‌آباد نشان داد که کلاس توده سنگ در پهنه‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در رده خوب تا کلاس خیلی ضعیف در پهنه ۴ متغیر است. نتایج حاصل از رده‌بندی شیروانی‌های سنگی نشان داد که در پهنه‌های ۱، ۲ و ۳ در رده نرمال و پهنه‌های ۳ و ۴ در کلاس بد قرار دارند. بر پایه طبقه‌بندی RMS در تمام پهنه‌ها، مقاومت توده سنگ در رده متوسط قرار می‌گیرد.

۲- در پهنه شماره ۵، پتانسیل گسیختگی بیشتر از نوع صفحه‌ای است. پهنه‌های ۳، ۴ و ۵ دارای پتانسیل گسیختگی گوه‌ای است که هر ساله در طول مسیر به وقوع می‌پیوندد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در فصول پربارش که ناپیوستگی‌ها مملو از آب می‌شوند، از مقدار ضریب اطمینان به شدت کاسته می‌شود. در فصول خشک که درزه‌ها و شکستگی‌ها فاقد رطوبت هستند، ضریب اطمینان در حد مطلوب قرار دارد.

۳- جز پهنه شماره ۶ و بخش‌هایی از پهنه ۱، سایر مناطق مورد مطالعه دارای پتانسیل سنگ افت هستند. به منظور ارزیابی خطر سقوط سنگ از سیستم امتیازدهی RHRS استفاده شد. بر اساس این روش، پهنه‌های ۱ و ۲ در محدوده کم خطر (کلاس C)، پهنه‌های ۳ و ۴ در محدوده با خطر متوسط (کلاس B) و پهنه‌های ۳ و ۴ در محدوده با خطر بالا (کلاس A) قرار می‌گیرند.



۴- روش‌های پایدارسازی مناسب در دامنه‌های طبیعی ناحیه، لق‌گیری و در دامنه‌های بریده شده با ترانشه، شامل لق‌گیری و بتن‌پاشی می‌شود. یکی از ارزان‌ترین روش‌ها استفاده از توری سیمی است که با توجه به ابعاد به نسبت کوچک واریزه‌ها، در پایدارسازی دامنه‌ها می‌تواند موثر واقع شود. در میان مدت و بلند مدت برای پایدار نمودن دامنه‌ها می‌توان از زهکش سطحی به روش ثقلی افقی استفاده نمود. مراحل مختلف طراحی زهکش سطحی شامل بستن شکاف‌ها، ایجاد شبکه زهکشی و مالچ‌پاشی می‌شود. روش‌های با کارایی کمتر شامل پلکانی کردن شیب دامنه‌ها و حفر ترانشه در پای دامنه‌ها می‌شود که در حال حاضر در صلوات‌آباد توسعه یافته است.

منابع

- [1] سید علی آقانباتی، ۱۳۸۳. زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۶۰۶ صفحه.
- [2] انتظاری و پورخسروانی، ۱۳۹۸. مخاطرات دامنه‌ای با تاکید بر زمین لغزش، انتشارات دانشگاه اصفهان، ۱۴۱ صفحه.
- [3] پایگاه اینترنتی اداره کل هواشناسی استان کردستان، ۱۴۰۰. نشانی اینترنتی: <http://www.kurdistanmet.ir>
- [4] غلامرضا خانلری، ۱۳۹۴. اصول مکانیک سنگ، چاپ دوم، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا همدان، شماره ۲۰۲، ۴۵۴ صفحه.
- [5] غلامرضا خانلری، علی اکبر مومنی و یاسین عبدی لر، ۱۳۹۷. زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک، چاپ سوم، با ویرایش و تجدید نظر کلی، انتشارات دانشگاه بوعلی سینا همدان، شماره ۱۴۶، ۴۵۶ صفحه.
- [6] راهن. پ. ه، ۱۳۷۹. زمین‌شناسی مهندسی، ترجمه سید محمود فاطمی عقدا، رضایی و نوری زاده، دانشگاه هرمزگان، ۳۴۳ صفحه.
- [7] ذبیح‌الله روحانی، ۱۳۸۷. بررسی ناپایداری شیروانی‌های سنگی مسیر جاده همدان- سنندج، پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه بوعلی سینا همدان، ۱۶۹ صفحه.
- [8] حسین صادقی، ۱۳۸۸. زمین‌شناسی مهندسی (ویژه دانشجویان عمران)، چاپ سوم، انتشارات دانشگاه امام حسین، ۵۳۳ صفحه.
- [9] کمیته ملی سدهای بزرگ ایران، ۱۳۷۵. استان‌های لرزه زمین‌ساخت ایران، کمیته فنی لرزه‌خیزی و مهندسی زمین‌لرزه‌ها در طراحی سدها، نشریه شماره ۱۲، انتشارات وزارت نیرو، ۵۵ صفحه.
- [10] والتهم، ا. ک، ۱۳۸۹. مبانی زمین‌شناسی مهندسی، ترجمه: قاضی‌فرد، امامی، چاپ چهارم، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد اصفهان، ۳۵۲ صفحه.
- [11] Azizi, H., Moinevaziri, H. 2009, Petrology of cretaceous volcanic rock in northern Sanandaj, Iran. Journal of Geodynamics 47, 167-179.
- [12] Hyndman, D. 2011, Natural Hazards and Disasters, Third Edition, 223 p.
- [13] ISRM, 1981, Basic geotechnical description of rock masses, International Society of Rock Mechanics Commission on the Classification of rock and rock masses, International Journal of Rock Mech Min Sci Geomech, V. 18, 85-110 pp.
- [14] Mohajjel, M., Frgusson, C. L. and Sahandi, M. R 2003, Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj- Sirjan Zone, western Iran. Journal of Asian Earth Sciences., Vol. 21, pp. 397-412.
- [15] Palmstorm, A 2005, Measurements and correlations between block size and rock quality designation (RQD), Tunneling and Underground Space Technology, V. 20, 262-373 p.
- [16] Stöcklin, J 1968, Structural history and tectonics of Iran: a review. AAPG bulletin, 52(7), 1229-1258.