بررسی عوامل ناپایداری شیروانی مشرف بر نوار نقاله مجتمع مس سونگون و پایدارسازی آن

حسین سلطانی جیقه*؛ دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، دانشکده فنی
ناصر شیردل؛ مهندسین مشاور زمین ژرفاب، تبریز

تاریخ: دریافت ۹۱/٤/۲۰ **پذیرش** ۹۱/۱۲/۱۹

چکیده

در سال ۱۳۸۵ بخشی از شیروانی مشرف به نوار نقاله و سنگ‌شکن معدن مس سونگون ریزش کرده و ساختمان‌های بالای آن دچار جابه‌جایی و شکست شده است. با توجه به اهمیت کارکرد بی‌عیب نوار نقاله و سنگ‌شکن به‌منظور تداوم در تولید، ویژگی‌های زمین‌شناسی ساختمانی و مهندسی منطقه بررسی شده و وضعیت موجود شیروانی به لحاظ پایداری ارزیابی شد. نتایج ارزیابی‌ها نشان داد که شیروانی اطمینان کافی در مقابل لغزش را ندارد و ناپایداری آن باعث آسیب دیدن یا از بین رفتن نوار نقاله و تونل آن خواهد شد. بنا بر این، با توجه به شرایط فنی و اقتصادی، روش اصلاح هندسه شیروانی، به‌همراه تلفیقی از سایر روش‌ها، به‌عنوان راه‌کار پایدارسازی بخش بالای نوار شیروانی انتخاب می‌شود. هم‌چنین پیشنهاد می‌شود که در بخش زیر نوار نقاله نیز باید از دیگر روش‌های پایدارسازی استفاده گردد.

واژه‌های کلیدی: سونگون، زمین‌لغزش، زمین‌شناسی مهندسی، پایدارسازی شیروانی

* نویسنده مسئول hsoltani@azaruniv.ac.ir

مقدمه

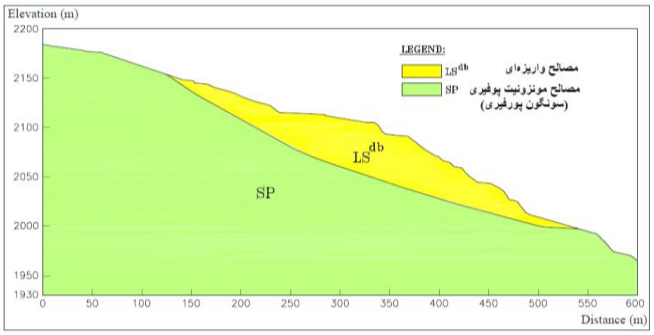
مجتمع معدن مس سونگون در ۳۰ کیلومتری شمال ورزقان از توابع استان آذربایجان‌شرقی از مهم‌ترین ذخایر مس کشور محسوب می‌شود. میزان ذخیره زمین‌شناسی این معدن حدود

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]

۹۹۵ میلیون تن با عیار ۰/٦٦۱ درصد برآورد شده و ۳۸۸ میلیون تن آن با عیار متوسط ۰/٦۲ درصد قابل برداشت است. تولید سالانه کارخانه کانه‌آرایی معدن هفت میلیون تن است که در آینده تا چهارده میلیون تن افزایش خواهد یافت. احداث کارخانه‌های ذوب و پالایش برای تولید مس آند کاتد و اسید سولفوریک از برنامه‌های توسعه این مجتمع است. در فرآیند پرعیارسازی کارخانه کانه‌آرایی، کانسنگ مس بعد از خرد کردن اولیه در سنگ‌شکن، به‌کمک آسیاب خودشکن و گلوله‌ای، تا ابعاد زیر ۱۰۰μm آسیا شده و تصفیه و غنی‌سازی می‌شود. حمل مواد به سنگ‌شکن با سیستم نوار نقاله‌ای صورت می‌گیرد که در دامنهٔ شیروانی مشرف به نوار نقاله و سنگ‌شکن است.

واحدهای سنگی و رسوبی موجود در محدودهٔ بررسی شده عمدتاً شامل سنگ‌های نفوذی، آتشفشانی و سنگ‌های دگرسان شده متأثر از تودهٔ مونزونیتی هستند. بخش بزرگی از محدودهٔ مورد بحث نیز پوشش ضخیمی از نهشته‌های واریزه‌ای حاصل از زمین لغزشی قدیمی است. در شکل ۱ پروفیل شماتیک از زمین‌شناسی محدودهٔ لغزش رسم گردیده است. تودهٔ مونزونیتی که سنگ‌های آهکی کرتاسه فوقانی را در شمال و شمال‌شرقی محدوده معدن قطع کرده است، در اثر فاز دگرسانی گرمایی شدید به‌شدت دگرسان شده و با تغییر کلی بافت اولیهٔ سنگ به‌صورت توده‌ای خردشده سفید، زرد و قهوه‌ای رنگی که دوباره به‌هم پیوسته‌اند، در آمده است. برش‌ها و پیروکلاستیک‌های آندزیتی در مجاورت تودهٔ مونزونیت پورفیری و در محدودهٔ بررسی شده بر روی آن قرار گرفته و عدم تأثیر دگرسانی در این طبقات نشانه ته‌نشست آن‌ها بعد از نفوذ و دگرسانی تودهٔ مزبور است



شکل ۱. پروفیل شماتیک زمین‌شناسی محدودهٔ لغزش

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]

در سال ۸۵ قسمتی از این شیروانی ریزش کرده و به‌تبع آن در ساختمان‌های مهمان‌سرای قدیمی، واقع در بالای شیروانی، ترک‌خوردگی، شکست و جابه‌جایی رخ داده است. با توجه به اهمیت کارکرد صحیح و بی‌عیب مجموعه نوار نقاله و سنگ‌شکن در تداوم تولید، می‌توان گفت بررسی پایداری شیروانی اهمیت ویژه‌ای دارد. در مقاله حاضر، ابتدا تاریخچهٔ زمین‌لغزش و ویژگی‌های زمین‌شناسی منطقه بررسی شده و پایداری شیروانی در شرایط موجود با انجام تحلیل‌های پایداری ارزیابی می‌شود. در نهایت، براساس تحلیل‌های انجام یافته راه‌کارهای لازم برای پایدارسازی شیروانی ارائه می‌گردد.

تاریخچهٔ زمین‌لغزش در محدودهٔ بررسی شده

مطابق شکل ۲ شیروانی در حاشیهٔ شمالی رودخانهٔ سونگون‌چای واقع شده و بر نوار نقاله بین سنگ‌شکن و سایت تغلیظ مشرف است. محدودهٔ لغزش بخشی از یک زمین‌لغزش بزرگ بسیار قدیمی است و می‌توان تودهٔ لغزیده را نهشته‌های (یا خاک‌های برجای) وابسته به سنگ‌های کوهی/توده‌های سنگ‌ریز دانست که در شیب‌های تند در اثر وزن خود به‌سمت پایین حرکت می‌کنند.

بر مبنای قرائت‌های محلی بیشینه جابه‌جایی در محدودهٔ لغزش در حدود ۱۱cm است و کلاس حرکت شیروانی طبق درجه‌بندی کرودن[۱] و وارنس[۲] (۱۹۹۲) به نقل از [۱] در ردهٔ ۳ (نوع آهسته با سرعت حدود ۵×۱۰^{-۶} mm/sec) قرار می‌گیرد. بر اساس تقسیم‌بندی این محققان بر مبنای حرکت سینماتیکی، حرکت شیروانی در شکل لغزش[۳] است که به‌صورت پیش‌رونده از یک گسیختگی موضعی شروع شده و درز و ترک در سطح زمین نمایان می‌شود.

پژوهش‌های زمین‌شناسی ساختمانی

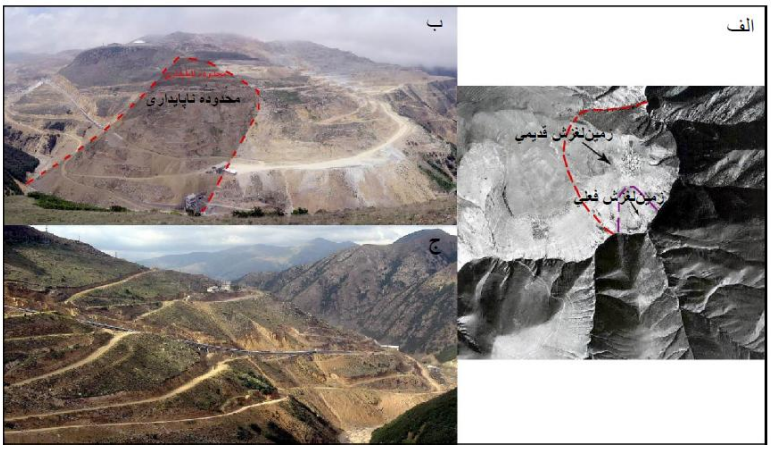
۱. گسل‌ها

گسل‌های متعدد و فراوانی در چهارگوش منطقه ورزقان وجود دارد که اغلب آن‌ها به سبب عمل‌کردشان از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. این گسل‌ها را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم کرد

۱. Cruden ۲. Varnes ۳. Sliding

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]



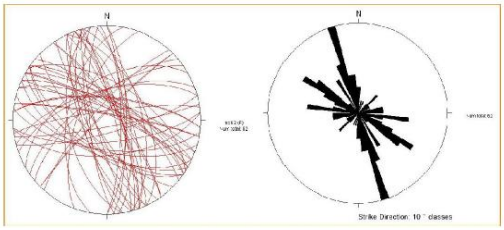
شکل ۲. الف) عکس هوایی ۱:۲۰۰۰۰ منطقه (خطوط قرمز، زمین لغزش قدیمی و خطوط بنفش، زمین لغزش فعلی)، ب) محدوده کلی ناپایداری دیواره مشرف به نوار نقاله (دید به سمت شمال)، ج) نمایی دیگر از محدوده ناپایداری (دید به سمت شمال شرق)

گسل‌های اولیه که روندی عمدتاً شرقی- غربی دارند و نمونهٔ مشخص این دسته از گسل‌ها، گسل ونستان- سونگون است. استمرار حرکات زمین‌ساختی در زمان‌های بعد از ائوسن سبب انقطاع و جابه‌جایی گسل‌های قدیمی‌تر شده است. این گروه از گسل‌ها، که گسل‌های ثانویه هستند، دارای روند اصلی غالباً شمالی- جنوبی هستند. گسله شمال‌غربی- جنوب شرقی مزرعه جزو این دسته طبقه‌بندی می‌شود [۲]. محدودهٔ بررسی شده به‌دلیل جای‌گزینی تودهٔ کوارتز مونزونیت پورفیری و عمل‌کرد گسله‌های عمده نزدیک به گستره مزبور، دارای شکستگی‌ها و خردشدگی‌های متعدد است که به‌دلیل پوشش گیاهی متمرکز و هم‌چنین پوشش خاک سطحی در بیشتر قسمت‌ها قابل شناسایی نیستند.

گسل‌های قابل اندازه‌گیری در ترانشه‌های محدودهٔ پژوهش دارای روند کلی شمال‌غرب- جنوب‌شرق هستند که این روند مشابه با روند گسل‌های ناحیه‌ای است. درصد فراوانی گسل‌ها با توجه به نمودار گل سرخی در فاصلهٔ آزیموتی ۳۴۰ تا ۳۵۰ درجه بیش‌تر از همه است و فاصلهٔ آزیموتی ۳۰۰ تا ۳۱۰ درجه در اولویت بعدی هستند (شکل ۳). گسل‌های اندازه‌گیری شده بیش‌تر از نوع گسل‌های معکوس هستند که با عمل‌کرد خود سبب به‌هم‌ریختگی درزه‌ها، جابه‌جایی لایه‌ها و شکستگی‌هایی در آن‌ها شده‌اند.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

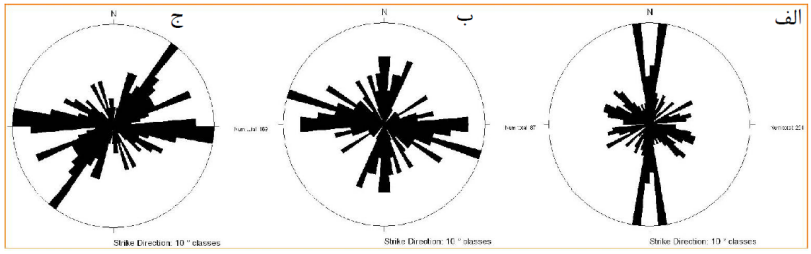
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]



شکل ۳. نمودار گل‌سرخی امتداد و شبکه هم‌مساحت گسل‌ها در محدوده ترانشه‌ها

۲. درزه‌ها

دسته‌بندی درزه‌های محدودهٔ پژوهش در سه بخش زیر نوار نقاله، مجاور نقاله و بالای نوار نقاله با در نظر گرفتن ترانشه‌های موجود انجام شده و بررسی ویژگی‌های آن‌ها جداگانه بررسی شده است. تعداد درزه‌های برداشت شده در سه بخش ذکر شده به‌ترتیب ۲۲٤، ۸۷ و ۱٦۹ درزه است (شکل ٤ الف، ب و ج). فاصلهٔ درزه‌ها در امتداد خط‌های برداشت بررسی شده از ۵ سانتی‌متر تا ۱۱۰ سانتی‌متر متغیر است و در بخش‌های با فواصل کم، خردشدگی سنگ‌ها و آسیب‌پذیری آن‌ها در برابر هوازدگی بیش‌تر می‌شود. بازشدگی درزه‌های اندازه‌گیری شده بین ۵ تا ۲۵ میلی‌متر متغیر است و هوازدگی نسبتاً قابل‌توجه سنگ‌ها موجب گردیده که درزه‌های باز حاصل از این فرآیند، با مواد رسی همراه با لکه‌داری[1] اکسیدآهن پرشدگی داشته باشند. تقریباً تمامی درزه‌های اصلی مسطح و زبر هستند. بقیه درزه‌ها نیز که عمدتاً غیرسیستماتیک و یا با طول کم‌تر از یک متر هستند، موجی و زبر هستند.



شکل ٤. نمودار گل‌سرخی امتداد مجموع درزه‌های: الف) زیر نوار نقاله، ب) مجاور نوار نقاله، و ج) بالای نوار نقاله

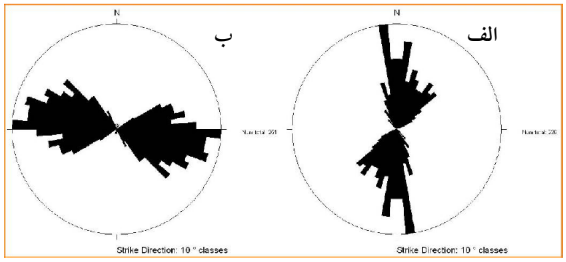
برای جمع‌بندی وضعیت هندسی و فضایی درزه‌ها، کل درزه‌های برداشت شده از تمامی خط‌های برداشت بررسی شده و نهایتاً بـه دو مجموعه تقسیم گردیدند. این مجموعه‌ها هر یک

۱ . Staining

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]

شامل چند دسته درزه‌اند، ولی ویژگی متمایزکننده این دو مجموعه نزدیکی سوی امتداد درزه‌ها در هر مجموعه به دو روند کلی است. به این ترتیب که در مجموعه ۱ سوی امتداد درزه‌ها عمدتاً شمالی و جنوبی است، در حالی‌که در مجموعه ۲ سوی امتداد درزه‌ها عموماً شرقی و غربی است (شکل ۵). نتیجه حاصل با مباحث مطرح شده در بخش زمین‌شناسی ساختمانی ناحیه‌ای و طبقه‌بندی گسل‌های ناحیه به دو دسته اولیه و ثانویه بر مبنای روند آن‌ها، کاملاً منطبق است که تودهٔ کوارتز مونزونیت پورفیری پس از جای‌گیری، تحت تأثیر هر دو تنش اصلی قرار گرفته و باعث درزخوردگی تودهٔ مزبور در دو امتداد عمود برهم گردیده است.



شکل ۵. نمودار گل‌سرخی امتداد مجموع درزه‌های الف) ۱، ب) ۲

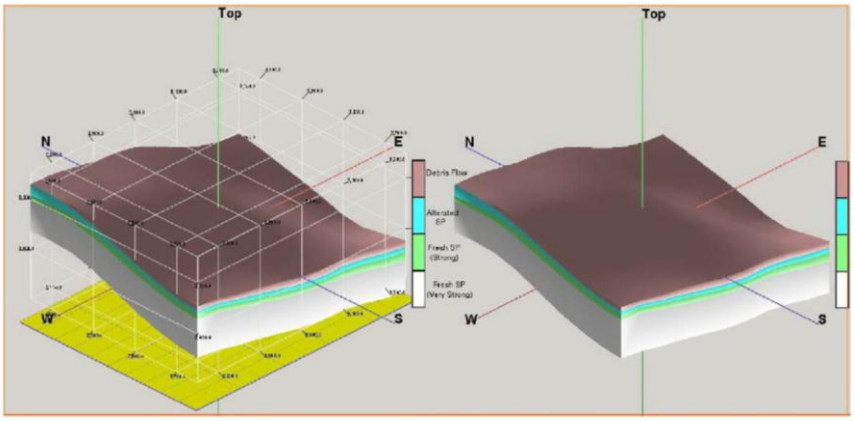
ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک

برای شناسایی لایه‌های زیرسطحی، حفاری‌های گمانه‌ای گسترده‌ای انجام گردیده و آزمایش‌های نفوذ استاندارد (SPT) و نفوذپذیری لوفران در محل گمانه‌ها انجام و سطح آب زیرزمینی اندازه‌گیری شد. از این گمانه‌ها نمونه‌های دست‌نخورده اخذ گردیده و بر روی آن‌ها آزمایش‌های آزمایشگاهی مختلف نیز انجام شد [۳]. با توجه به اطلاعات حاصل از گمانه‌ها، مصالح تشکیل‌دهنده منطقه به ٤ لایه تقسیم‌بندی می‌شود (شکل ٦):

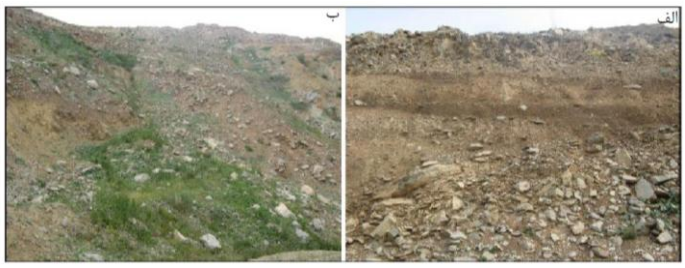
لایهٔ اول مصالح واریزه‌ای، با ضخامت حدود ٦ تا ۲۷ متر، شامل رس، سیلت، ماسه و قطعاتی از آندزیت بازالت است (شکل ۷). قطعات سنگی آندزیت بازالت در اثر ریزش و لغزش به پایین رانده شده و سطح تازه تا نسبتاً هوازده دارند که در حضور آب و سایر عوامل مستعد ریزش هستند. آزمایش‌های صحرایی نشان می‌دهند که به‌طور کلی تا اعماق ۸–۷ متر مصالح درشت‌دانه با تراکم متوسط و ریزدانه سفت تا خیلی سفت وجود دارند. در اعماق پایین، اعداد نفوذ استاندارد به بیش از ۵۰ ضربه می‌رسد.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]



شکل ٦. تصویر شماتیک از وضعیت لایه‌بندی مصالح تشکیل‌دهنده



شکل ۷. تصویر قرارگیری قطعات آندزیت بازالت به‌طور ناهمگن در مجاورت مصالح ماسه، سیلت و رس

لایهٔ دوم مصالح سونگون پورفیری (SP) هوازده به ضخامت ۵ تا ٢٤ متر هستند که در حدفاصل دو لایه واریزه‌ای و SP سالم قرار گرفته و جنس آن‌ها کوارتزمونزونیت هوازده است. این مصالح در اثر تماس با آب به راحتی متلاشی شده و به‌دلیل از بین رفتن تراکم و پیوستگی اجزای سازنده آن به خاک رسی ضعیف تبدیل می‌شوند و نفوذ آب‌های سطحی و زیرزمینی می‌تواند منجر به ناپایداری آن‌ها شود. این مصالح با نام سنگ SP توصیف می‌شوند و به‌دلیل کم بودن مقاومت حاصل از آزمایش‌های تک‌محوری (کم‌تر از MPa ۱/۰)، طبق رده‌بندی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ، در ردهٔ خاک با مقاومت خیلی کم قرار می‌گیرد [٤]. با توجه به آزمون‌های آزمایشگاهی جنس مصالح اغلب از نوع ماسه رس‌دار و ندرتاً لای‌دار

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]

است و در مواردی رس با خمیری پایین نیز مشاهده می‌شود. شاخص کیفی سنگ (RQD) این مصالح ٤۰-۳۰ درصد است که نشان‌گر کیفیت ضعیف آن‌ها است.

لایهٔ سوم مصالح سونگون پورفیری (SP) سالم و هوانزده مقاوم است که اکثر این مصالح از نظر لیتولوژی کوارتزمونزونیت پورفیری با بافت گرانولار و ساخت متراکم با متوسط شاخص کیفی حدود ۷۰-۵۰ درصد هستند که نشان از کیفیت متوسط تا خوب آن‌ها دارد. متوسط مقاومت فشاری تک‌محوری آن‌ها حدود ٤۰MPa و در ردهٔ مقاومت نسبتاً کم قرار می‌گیرند. لایهٔ چهارم مصالح SP سالم و هوانزده خیلی مقاوم است که از لحاظ جنس با لایهٔ قبلی مشابه است و از نظر مصالح کوارتزمونزونیت تا کوارتزمونزودیوریت تخمین زده می‌شود. ولی کیفیت مصالح به‌دلیل عدم وجود آب یا جریان کم آب زیرزمینی و بهبود وضعیت ناپیوستگی‌ها و ...، نسبت به لایهٔ قبلی بهتر است. متوسط مقاومت فشاری تک‌محوری این مصالح ۵۰MPa-۳۰ است و در ردهٔ مصالح با مقاومت نسبتاً کم قرار می‌گیرد. در خارج از محدوده ریزش ضخامتی حدود ۲-۱ متر، مصالح روباره است و زیر آن‌ها کوارتزمونزونیت و کوارتزمونزودیوریت به‌عمق ٦-٤ متر به‌صورت هوازده و سپس وضعیت تقریباً بدون هوازدگی با استحکام قابل قبول قرار دارند.

طبقه‌بندی توده‌های سنگی منطقه

روش‌های متعددی برای رده‌بندی توده‌های سنگی ارائه گردیده است که برای منطقهٔ بررسی شده از ۳ روش بنیاوسکی (۱۹۸۹) [۵] و اصلاح شده آن را رومانا [٦]، بارتون و همکاران (۱۹۷٦) [۷] و هوک و براون (۱۹۹۷) [۸] استفاده کرده‌اند. با توجه به مشاهدات و برداشت‌های صحرایی، پژوهش‌های ژئوتکنیکی و آزمون‌های آزمایشگاهی امتیازات مربوط به روش بنیاوسکی اصلاح شده در جدول ۱ خلاصه شده است.

در سیستم طبقه‌بندی Q که بارتون و همکاران (۱۹۷٦) ارائه کردند [۷] تودهٔسنگ‌ها دارای عددی هستند که از ۱۰۰۰ تا ۰/۰۰۱ متغیر است و معرف مشخصات توده‌های سنگی است و هر چه این مقدار بزرگ‌تر باشد، توده‌های سنگی از شریط بهتری برخوردار هستند. در جدول ۲ ارزیابی ناپیوستگی‌های توده‌های سنگی منطقه و امتیازات مربوطه آورده شده است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]

جدول ۱. طبقه‌بندی RMR (۱۹۸۹) و SMR توده‌های سنگی منطقه

بخش‌های ناپایدار بررسی شده		بخش ۱	بخش ۲
امتیازات عوامل مؤثر بر توده‌های سنگی	مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)	۲	۱۵۰
	ضریب کیفیت سنگ (RQD)	۳۰	۸۰
	فاصله‌بندی درزه‌ها (mm)	۳۰–۱۰	۵۰۰
	شرایط درزه‌ها	سطوح آیینه‌ای با ضخامت کم‌تر از ۵ mm مواد پرکننده، mm ۵–۱ بازشدگی، درزه‌های ممتد	سطوح کمی زبر، mm ۱> جدایی، دیواره درزها سخت
	وضعیت آب زیرزمینی	آب فراوان	کاملاً خشک
امتیازات عوامل مؤثر بر توده‌های سنگی	مقاومت فشاری تک‌محوری (MPa)	۰	۱۲
	ضریب کیفیت سنگ (RQD)	۸	۱۷
	فاصله‌بندی درزه‌ها (mm)	۵	۲۰
	شرایط درزه‌ها	٦	۲۰
	وضعیت آب زیرزمینی	۰	۱۰
امتیاز نهایی (BRMR)		۱۹	۷۹
کلاس توده‌های سنگی در طبقه‌بندی RMR		V	II
توضیحات		خیلی ضعیف	خوب
امتیاز پارامترهای SMR	F_1	۰/۸۵	۰/۷۰
	F_2	۱	۱
	F_3	–۲۵	–٦
	F_4	۱۵	۱۵
امتیاز نهایی (SMR)		۱۲/۷۵	۸۹/۸
کلاس توده‌های سنگی در طبقه‌بندی SMR		V	I
توضیحات		خیلی ضعیف	خیلی خوب
میزان پایداری		ناپایدار	پایدار
گسیختگی‌های احتمالی در دامنه		گسیختگی صفحه‌ای بزرگ	---
نوع پایدارسازی پیشنهاد شده		باربرداری و خاک‌برداری، ایجاد زه‌کش‌های سطحی و عمقی	---

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]

جدول ۲. طبقه‌بندی توده‌های سنگی منطقه به روش Q

چگونگی پارامترهای طبقه‌بندی Q		بخش ۱	بخش ۲
ضریب کیفیت سنگ (RQD)		۳۰	۸۰
عدد مجموعه درز	تعداد	دو مجموعه درز و نامنظم	دو مجموعه درز
	مقدار (J_n)	٦	٤
زبری سطوح درزه‌ها	چگونگی	زبر و نامنظم- مسطح	زبر و نامنظم- متموج
	مقدار (J_r)	۱/۵	۳
هوازدگی و پرشدگی درزه‌ها	چگونگی	شدیداً هوازده	هوازدگی متوسط
	مقدار (J_a)	٦	٤
آبداری درزه‌ها	چگونگی	جریان آب زیاد	خشک
	مقدار (J_w)	۰/۳۳	۱
ضریب کاهش تنش	چگونگی	سنگ تجزیه شده	سنگ سالم
	مقدار (SRF)	۵	۲/۵
مقدار شاخص Q		۰/۰۸	٦
مقدار شاخص RMR (9lnQ+44)		۲۱/۳	٦۰
توضیحات		ضعیف	مناسب

شاخص GSI بر ارزیابی سنگ‌شناسی، ساختار و شرایط سطوح ناپیوستگی در توده‌های سنگی استوار است که با توجه به پژوهش‌ها و برداشت‌های صحرایی تخمین زده می‌شود. شاخص مقاومت زمین‌شناسی با دو پارامتر مهم بلوکی شدن تودهٔ سنگی و شرایط ناپیوستگی‌ها تعیین می‌گردد. با توجه به وضعیت سطوح درزه‌ها از قبیل بازشدگی، پرشدگی و هوازدگی آن‌ها و نیز خردشدگی توده‌های سنگی در منطقه بررسی شده، مقادیر شاخص GSI با استناد به شکل ۸ که هوک و براون (۱۹۹۷) [۸] ارائه کرده‌اند، در ناحیهٔ ۱ برابر ۱۸ نمره و در ناحیهٔ ۲ برابر ۵۵-٦۰ نمره است.

براساس نتایج فوق و پژوهش‌های صحرایی و آزمون‌های آزمایشگاهی، منطقه بررسی شده از نظر ژئومکانیکی به ۲ ناحیهٔ قابل تفکیک است. بخشی که در زیر مصالح واریزه‌ای و ریزشی

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]

مدفون شده (بخش ۱) و بخش دیگر (۲) که در خارج از این محدوده و در قسمت غربی آن واقع شده است. در شکل ۹، پهنه‌بندی ژئومکانیکی منطقه به‌صورت ساده ترسیم شده است.

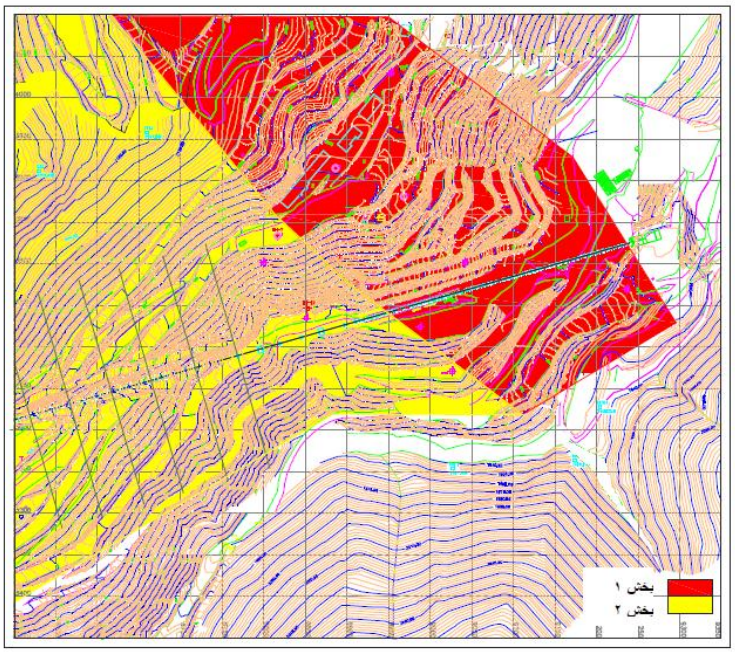
شکل ۸. طبقه‌بندی GSI توده‌های سنگی منطقه

تحلیل پایداری شیروانی

برای تعیین وضعیت پایداری شیروانی و ارائهٔ طرح ایمن و اقتصادی برای پایدارسازی آن، پایداری مقاطع مختلف شیروانی در وضعیت موجود و پس از ارائه طرح پایدارسازی به‌روش تعادل حدی با نرم‌افزار Geo-Slope ارزیابی شد. پارامترهای مکانیکی استفاده شده برای

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]

مصالح در تحلیل‌ها در جدول ۳ ارائه می‌شوند که بر پایه نتایج آزمون‌های صحرایی و آزمایشگاهی انتخاب شده‌اند. با توجه به اهمیت لغزش‌های محتمل به‌لحاظ میزان خطرساز بودن آن‌ها، تحلیل‌های پایداری در تمامی مقاطع به‌طور جداگانه بر روی سه محدوده زیر انجام شد:



شکل ۹. پهنه‌بندی ژئومکانیکی توده‌های سنگی منطقهٔ بررسی شده

- محدودهٔ الف) این محدوده شامل خود نوار نقاله و شیروانی پایین‌دست آن است و منجر به ناپایداری ناشی از جابه‌جایی و نشست پایه‌های نوار نقاله و یا کالورت بتنی نوار نقاله می‌گردد.
- محدودهٔ ب) محدودهٔ شیروانی نزدیک و مشرف به نوار نقاله است که ناپایداری آن به‌طور مستقیم باعث ریزش مصالح بر روی نوار نقاله و یا کالورت بتنی می‌گردد.
- محدودهٔ پ) محدودهٔ شیروانی‌های بالادست نوارنقاله که در فاصله دور (بیش از ۱۰۰ متری) نوار نقاله واقع شده و خطرآفرینی آن با غلتیدن مصالح و قطعات سنگی از آن فاصله بر روی نوار نقاله است.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]

شکل ۱۰ محدودهٔ شیروانی مشرف به نوار نقاله، موقعیت نوار و نیز محل مقاطع فرضی که تحلیل پایداری آن‌ها انجام شده بر روی مسیر نوار نقاله را نشان می‌دهد. شکل ۱۱ مقطع عرضی F-F شیروانی را به‌همراه محدوده‌های مذکور نشان می‌دهد.

جدول ۳. پارامترهای فیزیکی و مکانیکی در نظر گرفته شده برای شرایط تحلیل استاتیکی و دینامیکی

مشخصات لایه‌ها	لایهٔ اول			لایهٔ دوم			لایهٔ سوم			لایهٔ چهارم		
	ϕ	C	γ	ϕ	C	γ	ϕ	C	γ_w	ϕ	C	γ
	درجه	$\frac{kN}{m^2}$	$\frac{kN}{m^3}$	درجه	$\frac{kN}{m^2}$	$\frac{kN}{m^3}$	درجه	$\frac{kN}{m^2}$	$\frac{kN}{m^3}$	درجه	$\frac{kN}{m^2}$	$\frac{kN}{m^3}$
مقدار پارامتر	۳٤	٥	۲۲	۲٦	۳۰	۲۲	۳۸	٥۳	۲٦	۳۸	۱۰۰۰	۲٦

شکل ۱۰. نمای شمال شرق محدودهٔ شیروانی مشرف به نوار نقاله و مقاطع فرضی برای انجام تحلیل‌های پایداری

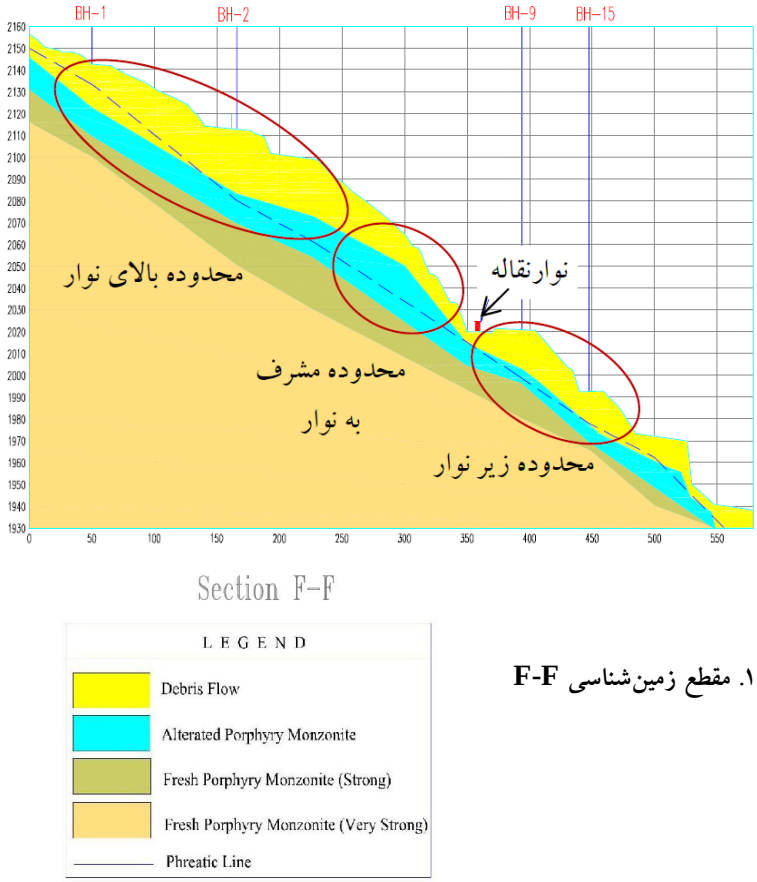
۱. تحلیل وضعیت موجود شیروانی

در این بخش پایداری شیروانی در وضعیت موجود در شرایط بارگذاری استاتیکی بررسی شد. نمونه‌ای از نتایج تحلیل‌های پایداری برای مقطع F-F در شکل ۱۲ و ضرایب اطمینان پایداری برای تمامی مقاطع در جدول ٤ ارائه شده است. مطابق جدول ٤، در وضعیت موجود، تقریباً در تمامی سطوح لغزش مقادیر ضرایب اطمینان کم‌تر از حداقل قابل قبول است. در این حالت حداقل ضریب اطمینان مطابق توصیه‌های استاندارد گروه مهندسان ارتش امریکا برای دوایر لغزش عمیق برابر ۱/۵ در نظر گرفته شده است [۹].

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]

شواهد محلی از قبیل ترک‌های ایجاد شده در محل ساختمان‌های مهمان‌سرا، ترک‌های زیر دکل فشار قوی بالای مهمان‌سرا و ریزش قاشقی شکل در شیروانی و وقوع جابه‌جایی‌ها در بدنه کالورت بتنی نوار نقاله، حاکی از شرایط ناپایدار منطقه و وجود خطرات بالقوه به لحاظ خسارت‌های ناشی از این عدم پایداری است.



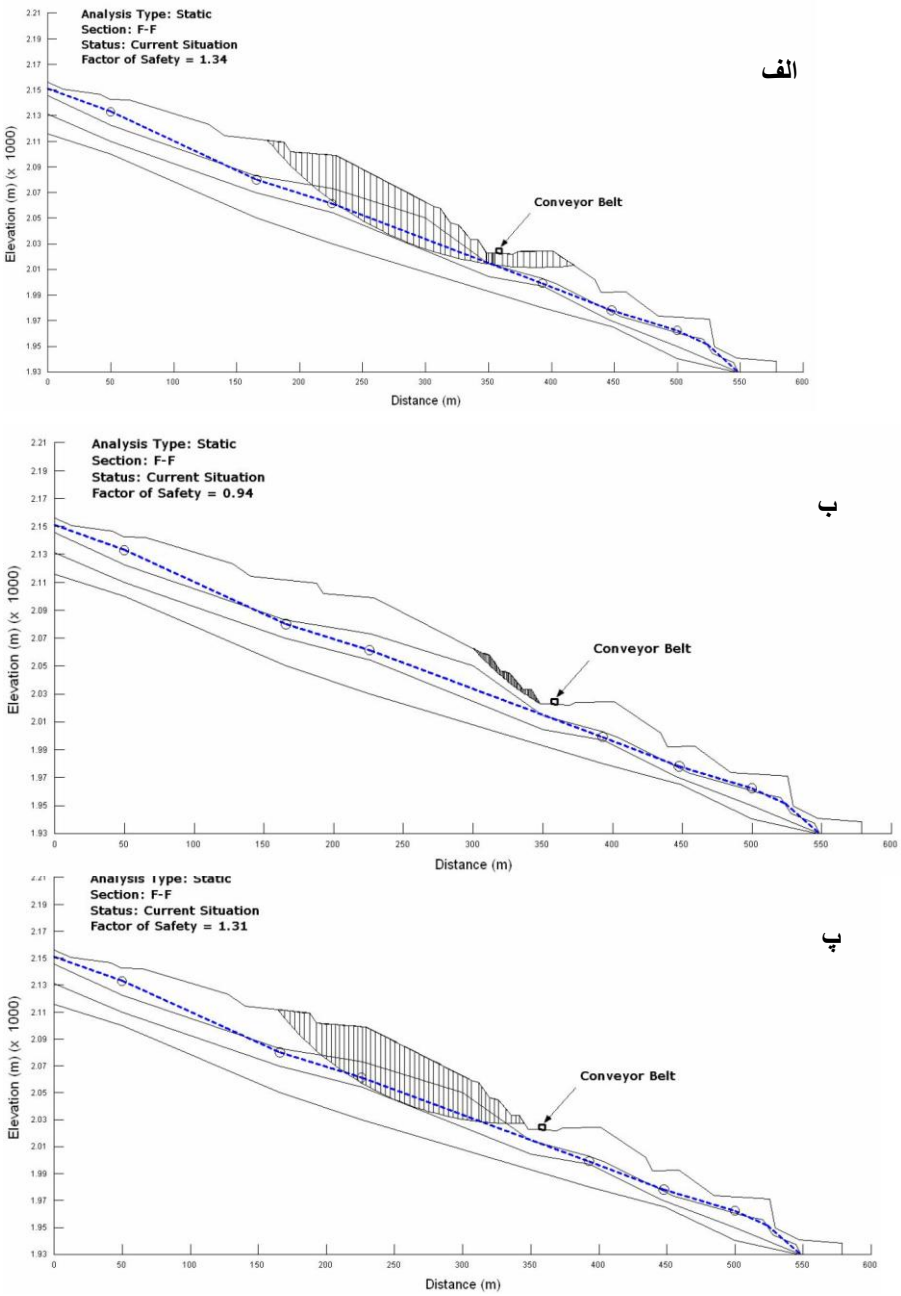
شکل ۱۱. مقطع زمین‌شناسی F-F

۲- پایدارسازی شیروانی با اصلاح هندسه آن

با توجه به این‌که شیروانی در وضعیت موجود به‌لحاظ پایداری دارای ریسک است، برای حفاظت سازه‌های واقع در زیر شیروانی و کاهش خطرات محتمل باید پایدار شود. به‌دلایل اقتصادی، ارائه طرح پایدارسازی در این پروژه در مواردی صورت گرفته که ریزش، شکست

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]



شکل ۱۲. نتایج تحلیل‌های پایداری در محدوده‌های الف، ب و پ برای مقاطع F-F

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]

جدول (٤): مقادیر ضریب اطمینان در شرایط بارگذاری استاتیکی برای مقاطع مختلف در وضعیت موجود

محدوده / مقطع	پایین نوار	مشرف به نوار	بالای نوار
C – C	۱/۳۲	۱/۱۵	۱/۳۳
D – D	۰/۹۹	۰/۹٦	۱/۳٤
E – E	۱/۳۵	۱/۱٤	۱/۳۹
F – F	۱/۳٤	۰/۹٤	۱/۳۱
H – H	۱/۱۱	۰/۹۸	۱/۲۱
I – I	۱/۰۱	۱/۰۹	۱/۱٦
J – J	۱/۱٦	۱/۲٤	۱/۲٤

یا تغییرشکل، مشکلاتی برای سازه‌های پایین شیروانی به‌وجود آورد؛ یعنی ممکن است در برخی مقاطع ضریب اطمینان در مقابل لغزش کافی نباشد، ولی با توجه به تهدید نشدن سازه‌های پایین یا وقوع لغزش‌های موضعی از پایدارسازی آن‌ها صرف‌نظر شده است. بر اساس مقایسه‌های فنی و اقتصادی و با توجه به این‌که به‌غیر از ساختمان‌های مخروبه و متروکه مهمان‌سرای قدیمی و دکل‌های برق فشارقوی، تأسیسات خاصی بر روی شیروانی وجود ندارد و نیازی به تملک اراضی روی این شیروانی نیز نیست، برای پایدارسازی قسمت بالای شیروانی، روش اصلاح هندسه شیروانی همراه با تلفیقی از دیگر روش‌ها به‌عنوان طرح مناسب پیشنهاد می‌شود. به‌طوری که با تغییر هندسه شیروانی سعی شده است که پایداری شیروانی با در نظر گرفتن وضعیت مصالح تحت‌الارضی و توپوگرافی محل تأمین گردد.

مقاطع اصلاح شده در محدودهٔ شیروانی مشرف به نوار نقاله و سنگ‌شکن با نرم‌افزار Geo-Slope در شرایط بارگذاری عادی و شبه استاتیکی ارزیابی و پایداری آن‌ها کنترل شد. بارگذاری شبه استاتیکی در دو سطح طراحی DBE و MCE بررسی گردید. با توجه به توصیهٔ استانداردهای معتبر و متداول [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳] در حالت بارگذاری فوق‌العاده (لرزه‌ای) حداقل ضریب اطمینان لغزش قابل‌قبول برای سطح طراحی MCE، معادل ۱/۱۵ و برای سطح طراحی DBE، معادل ۱/۰۰ پذیرفته شده است. در سطح طراحی MCE با توجه به این‌که تعریف این سطح طراحی با معیار سید (Seed) هم‌خوانی دارد ضریب زلزله موردنظر

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]

با توجه به این معیار انتخاب شده است. بر اساس این معیار مقدار پارامتر a_h، برای زمین‌لرزه‌های با M =۶/۵ معادل ۰/۱g و برای زمین‌لرزه‌های با M =۸/۲۵ معادل ۰/۱۵g پیشنهاد شده است. به‌طوری‌که میزان ضریب اطمینان از ۱/۱۵ کم‌تر نباشد. به همین سبب، با توجه به مقدار بیشینهٔ بزرگی زلزله M =۷/۶ و درون‌یابی خطی مابین مقادیر ارائه شده در معیار Seed، ضریب زلزله معادل ۰/۱۳۱ شتاب ثقل در سطح طراحی MCE به‌دست آمده است. در سطح طراحی DBE نیز مطابق توصیهٔ ارائه شدهٔ گروه مهندسان ارتش آمریکا مقدار ضریب اطمینان مورد قبول ۱/۰۰ فرض شده است. طبق نتایج پژوهش‌های لرزه‌خیزی مقدار ضریب زلزله در این سطح طراحی برابر با نصف شتاب بیشینه سنگ بستر و معادل ۰/۱۹۰ شتاب ثقل فرض شده است [۱۰]، [۱۱]، [۱۲]، [۱۳]. وضعیت آب با معرفی خط آزاد آب بر اساس اندازه‌گیری‌های محلی مشخص گردید. با توجه به‌توان لرزه‌زایی نسبتاً زیاد محدوده با احتمال وقوع زمین‌لرزه‌هایی با بزرگی حدود ۷ ریشتر، در نظر گرفتن اثرات زمین‌لرزه در طرح، اثرات ناشی از انفجار را نیز پوشش می‌دهد و نیازی به در نظر گرفتن اثر انفجار نیست.

با توجه به‌میزان خطرساز بودن عوامل ناپایدارساز در هر محدوده و با در نظر گرفتن موقعیت و شرایط نوار نقاله به‌لحاظ میزان آسیب‌پذیری آن از بابت عریان بودن خود نوار و پایه‌های آن، عبور نوار از داخل کالورت بتنی (تونل)، مدفون بودن کالورت بتنی در زیر مصالح واریزه و نهایتاً فاصله آن از محدودهٔ لغزش در طرح پیشنهادی لحاظ شده و اصلاح هندسه شیروانی مطابق با آن و با هدف حصول یک معماری قابل اجرا صورت گرفته است.

برای رسیدن به مقاطع اصلاح شده نیاز به انجام عملیات خاک‌برداری و سنگ‌برداری به‌میزان حدود یک میلیون مترمکعب است. در شکل ۱۳ نمونه‌ای از نتایج تحلیل‌های پایداری برای مقطع اصلاح شده F-F ارائه می‌شود. هم‌چنین مقادیر ضرایب اطمینان به‌دست آمده از تحلیل‌های پایداری برای مقاطع مختلف اصلاح شده در جدول ۵ نشان داده می‌شود. نتایج نشان می‌دهند که علیرغم افزایش ضرایب اطمینان پایداری در اکثر مقاطع، در برخی از آن‌ها احتمال ریزش و لغزش به‌ویژه در حالت بارگذاری شبه‌استاتیکی وجود دارد. احتمال ناپایداری در مناطق با فاصلهٔ تقریبی ۱۰۰ متر از مسیر نوار نقاله اتفاق می‌افتد که علت اصلی آن ضخامت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]

قابل توجه لایهٔ روباره و مصالح سست موجود است. با توجه به حجم انبوه مصالح روباره در ناحیهٔ مذکور، عملاً خاک‌برداری آن ممکن است توجیه اقتصادی نداشته باشد. به همین سبب، با درنظر گرفتن فاصله مذکور توصیه می‌گردد که لغزش مذکور پذیرفته گردد. نتایج داده‌های به‌دست آمده از رفتارنگاری در حین و بعد از اصلاح هندشه شیروانی نیز می‌تواند اطلاعات ارزشمندی را در خصوص برآورد دقیق میزان خطر لغزش به ما بدهد. به‌طوری‌که با قبول ریسک در این مرحله برای رعایت جنبه اقتصادی از انجام خاک‌برداری صرف‌نظر شده و با تکیه به داده‌های حاصل از رفتارنگاری در صورت بروز تغیر شکل‌های فزاینده اقدام به برداشت مصالح گردد.

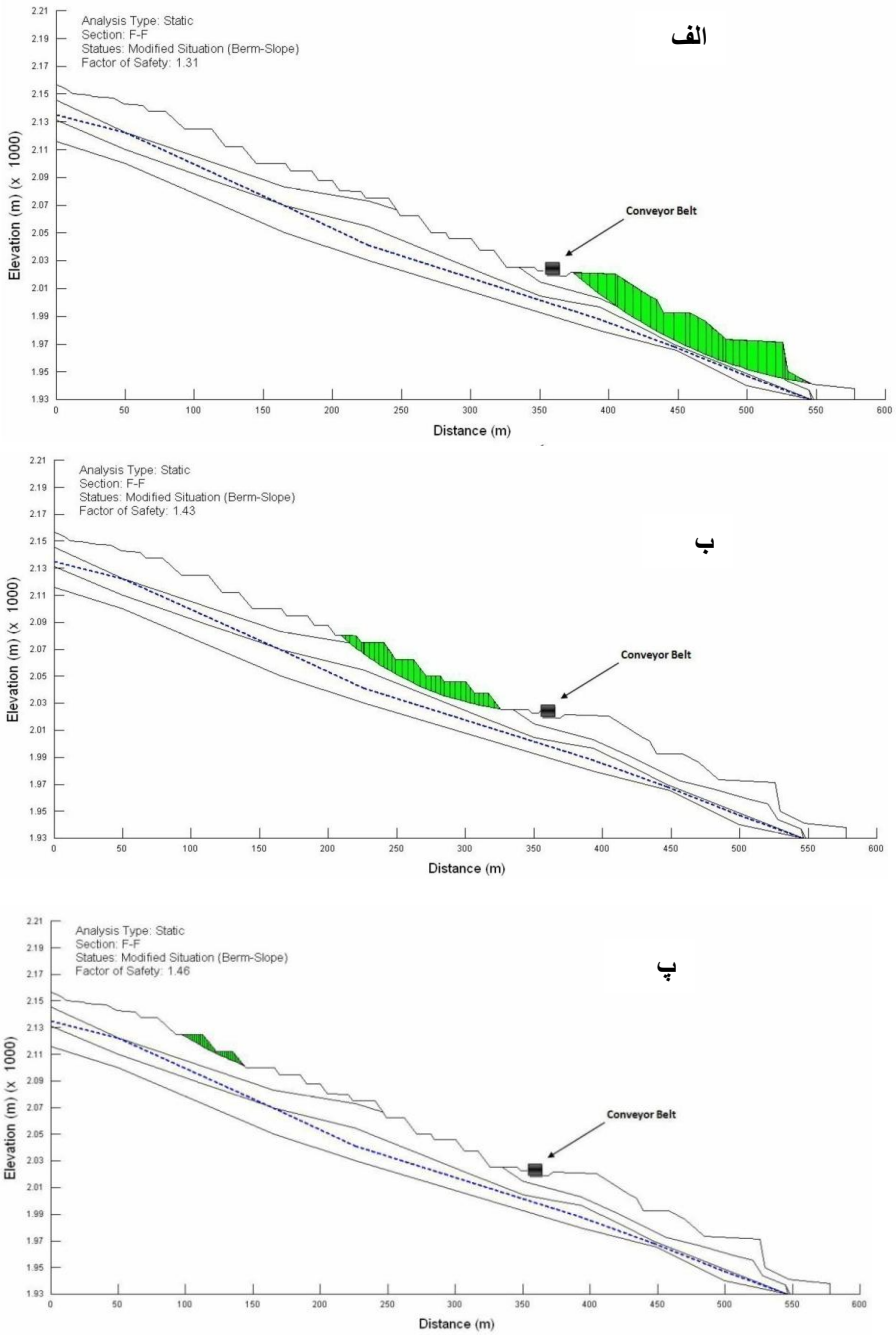
علاوه بر اصلاح هندسه شیروانی، با توجه به بالا بودن سطح آب زیرزمینی و وقوع بارش‌های سیل‌آسا در منطقه، لازم است زه‌کشی و هدایت آب‌های سطحی و زیرزمینی باید به صورت تلفیقی با روش فوق اجرا گردد [۱۳]. همچنین برای حفاظت از رویه شیروانی در برابر هوازدگی، فرسایش و نفوذ آب‌های سطحی، پس از انجام خاکبرداری‌ها لازم است لایه شاتکریت به ضخامت ۱۰ cm بر روی شیب اجرا شود. اجرای این لایه در مواردی که نوار نقاله خارج از کالورت قرار می‌گیرد به‌سبب حفاظت از رویه شیب از وقوع ریزش‌های سطحی اهمیت بیش‌تری دارد. این لایه در مواردی اجرا می‌شود که سطح زیرین قوام مناسب را داشته باشد تا به مرور زمان جدایی بین سطح شیب و شاتکریت رخ ندهد.

جدول ۵. مقادیر ضریب اطمینان در مقاطع اصلاح شده در محدوده‌های مختلف

شماره مقطع	محدودهٔ پایین نوار		محدودهٔ مشرف به نوار		محدودهٔ بالای نوار	
	استاتیکی	شبه‌استاتیکی	استاتیکی	شبه‌استاتیکی	استاتیکی	شبه‌استاتیکی
C – C	۱/۳۵	۰/۹۱	–	–	۱/۵۲	۱/۰۰۵
D – D	۱/۲۱	۰/۸۹	–	–	۱/٤۷	۱/۰۰
E – E	۱/۳٦	۰/۹٦	–	–	۱/٤۵	۰/۹۷
F – F	۱/۳۱	۰/۸٦	۱/٤۳	۰/۹٤	۱/٤٦	۰/۹۷
H – H	۱/۱٤	۰/۷۷	۱/۵۹	۰/۹۹	۱/٤٦	۰/۹۳
I – I	۱/۱۲	۰/۸٦	۱/۵۰	۱/۰۰	۱/۵۱	۰/۹۸
J – J	۱/۲۱	۰/۸۲	-	-	۱/٤۳	۰/۹۳

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]



شکل (۱۳): نتایج تحلیل‌های پایداری در محدوده‌های الف، ب و پ برای مقاطع اصلاح شده F-F

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]

نتیجه‌گیری

منطقه بررسی شده در حاشیهٔ شمالی رودخانه سونگون‌چای واقع شده و بر نوار نقاله بین سنگ‌شکن و سایت تغلیظ مشرف است. این محدوده بخشی از یک زمین‌لغزش بزرگ بسیار قدیمی است و می‌توان تودهٔ لغزیده را نهشته‌های (یا خاک‌های برجای) وابسته به سنگ‌های کوهی/توده‌های سنگریز دانست که در شیب‌های تند در اثر وزن خود به‌سمت پایین حرکت می‌کنند. بر مبنای قرائت‌های محلی بیشینه جابه‌جایی در محدودهٔ لغزش در حدود ۱۱cm است و کلاس حرکت شیروانی در ردهٔ ۳ (نوع آهسته با سرعت حدود ۵×۱۰^{-٦} mm/sec) قرار می‌گیرد. خلاصه نتایج پژوهش‌های انجام شده را می‌توان بدین شرح عنوان کرد:

- برداشت‌های صحرایی و بررسی درزه‌ها و شکاف‌های موجود در محدودهٔ بررسی شده نشان می‌دهد که سوی شیب درزه‌ها از دو روند کلی شرقی- غربی و شمالی- جنوبی پیروی کرده و مطابقت خوبی با جهت وارد آمدن تنش‌های تکتونیکی منطقه‌ای از خود نشان می‌دهند.
- با توجه به پژوهش‌*های* ژئوتکنیکی صورت گرفته، مصالح منطقه را می‌توان به ٤ لایه تقسیم‌بندی کرد: لایهٔ اول مصالح واریزه‌ای، با ضخامت حدود ٦ تا ۲۷ متر، شامل رس، سیلت، ماسه و قطعاتی از آندزیت بازالت است. لایهٔ دوم مصالح سونگون پورفیری (SP) هوازده به ضخامت ۵ تا ۲٤ متر است که در حد فاصل دو لایه واریزه‌ای و SP سالم قرار گرفته و جنس آن‌ها کوارتزمونزونیت هوازده است. لایهٔ سوم مصالح سونگون پورفیری (SP) سالم و هوانزده مقاوم است که اکثر این مصالح از نظر لیتولوژی کوارتزمونزونیت پورفیری با بافت گرانولار و ساخت متراکم با متوسط شاخص کیفی حدود ۷۰-۵۰ درصد هستند که نشان از کیفیت متوسط تا خوب آن‌ها دارد. لایهٔ چهارم مصالح SP سالم و هوانزده خیلی مقاوم است که از لحاظ جنس با لایهٔ قبلی مشابه است و از نظر مصالح کوارتزمونزونیت تا کوارتزمونزودیوریت تخمین زده می‌شود.
- منطقه پژوهش از نظر ژئومکانیکی به ۲ ناحیهٔ قابل تفکیک است. بخشی که در زیر مصالح واریزه‌ای و ریزشی مدفون شده و بخش دیگر که در خارج از این محدوده و در قسمت

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]

غربی آن واقع شده است. که ناحیهٔ ۱ بر اساس رده‌بندی RMR و Q به‌ترتیب در وضعیت خیلی ضعیف تا ضعیف و ناحیه ۲ در وضعیت خوب تا مناسب قرار دارند.

- با توجه به ناپایداری شیروانی مشرف به نوار نقاله و سنگ‌شکن در معدن مس سونگون، در موارد داشتن توجیه اقتصادی روش خاک‌برداری برای اصلاح هندسه شیروانی برای پایدارسازی پیشنهاد شده و پایداری هندسه اصلاح شده به‌روش تعادل حدی در شرایط بارگذاری استاتیکی و شبه‌استاتیکی ارزیابی گردید. نتایج نشان داد که اصلاح هندسه شیروانی به‌همراه ایجاد زهکش‌ها می‌تواند اطمینان در برابر ریزش و لغزش را به‌نحو چشم‌گیر افزایش داده و خطرات آسیب‌دیدگی سازه‌های پایین‌دست را افزایش دهد. هم‌چنین برای ارزیابی رفتار شیروانی در حین و پس از پایدارسازی لازم است رفتارنگاری نیز صورت گیرد.

تقدیر و تشکر

نویسندگان مقاله از شرکت مهندسان مشاور زمین‌ژرفاب برای در اختیار گذاشتن اطلاعات پروژه تشکر و قدردانی می‌کنند.

منابع

1. Turner A. K., Jayaprakash G. P., "Landslides: Investigation and Mitigation, Special Report 247", National Research Council (U.S.), Transportation Research Board, Editors: Turner, A. K. and Schuster, Robert L. (1996) 49-52.

۲ . مهرپرتو م؛ امینی فضل آ؛ *نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ ورزقان، سازمان زمین‌شناسی کشور* (۱۳۷۱).

۳ . *گزارش مطالعات ژئوتکنیک شیروانی مشرف بر نوار نقاله مجتمع مس سونگون*، شرکت مهندسین مشاور زمین‌ژرفاب (۱۳۸۹).

4. ISRM, "Basic Geotechnical Description of Rock Masses", International Journal of Rock Masses and Mining, Sciences and Geomech., Pergamon

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]

Press Ltd, Vol. 18 (1979) 85-110.

5. Bieniawski z. t., "Engineering Rock Mass Classifications", Wiley, New York (1989).

6. Romana M., "SMR Geomechanics Classification: Application, Experience and Validation", ISRM, Technology Roadmap for Rock Mechanics, South Africa Institute of Mining and Metallurgy (2003).

7. Barton N., Lien R., Lunde J., "Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support", Rock Mech., Vol. 69 (1976) 218-236.

8. Hoek E., Brown E. T., "Underground Excavations in Rock", the Institution of Mining and Metallurgy, Chapman & Hall, London (1997) 527.

9. "Slope Stability: Engineering and Design Us Army Corps of Engineers", Engineer Manual (2003).

۱۰. *گزارش مطالعات لرزه‌خیزی مجتمع مس سونگون*، شرکت مهندسین مشاور بندآب.

11. Seed H. B, "Considerations in the Earthquake-Resistant Design of Earth and Rockfill Dams", 19th Rankine Lecture of the British Geotechnical Society, Geotechnique, Vol. XXIX, No. 3 (Sept. 1979) 215-263.

12. Rampello S., Silvestri F., *"Force-Based Pseudo-static Methods versus Displacement-Based Methods for Slope Stability Analysis*", edited by Cosenza, Eurocode 8 Perspectives from the Italian Standpoint Workshop, Doppiavoce, Napoli, Italy (2009) 249-262.

13. Lee A., et. al., "Slope Stability and Stabilization Methods", A. Wiley., Interscience Publication (2001) 712.

[Downloaded from isharat.khu.ac.ir on 2026-10-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1392.7.2.6.7]