بررسی تاثیر عوامل زمین‌شناسی مهندسی در پایداری شیب‌های معدن مس سونگون

رضا بابازاده[1*]، ابراهیم اصغری‌کلجاهی[2] و حمیدرضا صوفی سیاوش[3]

۱- پژوهشگر فرادکتری گروه علوم‌زمین، دانشکده علوم‌طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۲ - دانشیار گروه علوم‌زمین، دانشکده علوم‌طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
۳-کارشناس مهندسی معدن، مدیریت امور معدن، مجتمع مس سونگون ورزقان، ایران

نویسنده مسئول: babazadeh64@gmail.com *

دریافت: ۹۹/۱۲/۲۴ پذیرش: ۱۴۰۰/۳/۱۲ نوع مقاله: کاربردی

چکیده

بررسی‌های میدانی و کنترل نتایج حاصل از رفتارنگاری لغزش‌ها نشان می‌دهند که گسیختگی‌های بزرگ مقیاس در معدن روباز مس سونگون اغلب در امتداد سطوح لغزشی ممتد از قبیل سطوح ناپیوستگی‌ها و نیز مرز واحدهای زمین‌شناسی و یا سطوح دایره‌ای از میان توده سنگ ضعیف مثل سنگ‌های آذرآواری روی می‌دهد. نفوذ آب‌های سطحی به داخل مصالح سست یکی از دلایل اصلی وقوع لغزش‌های دایره‌ای شکل می‌باشد. پس از بارندگی‌های شدید، صعود سطح آب زیرزمینی به بالای زون تماسی، نقش مهمی در ایجاد گسیختگی‌های گوه‌ای دارد. در این مطالعه مهمترین دلایل وقوع ناپایداری‌ها در پله‌های سنگی معدن مس سونگون مورد بررسی قرار گرفته است. برای این منظور نتایج حاصل از کنترل رفتار شیب‌های معدن طی یک بازه زمانی ۵ ساله مورد بررسی قرار گرفته و شرایط حدود ۶۰ لغزش مورد توجه قرار گرفته است. تهیه نقشه پراکندگی لغزش‌های روی داده در معدن نشان‌دهنده توزیع حداکثر لغزش‌ها در بخش‌های جنوبی و جنوب غربی می‌باشند. نتایج حاصل از بررسی ارتباط بین پراکندگی لغزش‌ها در محدوده معدن با پارامترهایی از قبیل گسل‌ها، نوع دگرسانی سنگ‌ها، شرایط زمین‌شناسی و نیز وجود آب‌های سطحی و زیرزمینی نشان می‌دهند که مستعدترین واحدهای زمین‌شناسی به لحاظ ایجاد ناپایداری شیب واحدهای دایکی با دگرسانی فیلیک و واحدهای پیروکلاستیک اشباع از آب می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: معدن مس سونگون، ناپایداری شیب، آلتراسیون، ساختارهای زمین‌شناسی

۱- پیشگفتار

در معادن روباز و به منظور افزایش میزان کارایی عملیات استخراج ماده معدنی، شیب پله‌ها معمولا تا حد ممکن زیاد در نظر گرفته می‌شود که این امر تأثیر مهمی بر کاهش باطله‌برداری و در نتیجه هزینه معدن‌کاری دارد. از طرف دیگر افزایش شیب پله‌ها می‌تواند منجر به ایجاد ناپایداری و گسیختگی‌های غیرقابل کنترل گردد. با پیشرفت عملیات معدن کاری و همچنین افزایش عمق معدن روباز، چنین گسیختگی‌هایی می‌توانند ایمنی و به تبع آن میزان تولید ماده معدنی را تحت تاثیر قرار دهد (آریکان و همکاران، ۲۰۰۷). ناپایداری‌های کنترل نشده شیب‌های معادن روباز می‌توانند منجر به مشکلات متعددی از قبیل موارد زیر گردند (سولیوان، ۲۰۰۶ ؛ بای و همکاران، ۲۰۰۱ ؛ کانمنت، ۱۹۷۷).

الف – فاکتورهای ایمنی (مصدومیت یا فوت کارگران، از دست رفتن درآمد کارگران).

ب- فاکتورهای اقتصادی (اختلال در عملیات معدن‌کاری، از دست رفتن ماده معدنی، وارد شدن صدمات به تجهیزات، افزایش باطله‌برداری و از دست رفتن بازارهای فروش).

ج – فاکتورهای زیست‌محیطی (تاثیرات مخرب زیست محیطی).

بنابراین طراحی محدوده نهایی پیت معدن علاوه بر توزیع عیار کانه و هزینه‌های تولید، متأثر از مقاومت توده سنگ و پایداری پله‌های معدن خواهد بود. بنابراین پتانسیل گسیختگی شیب‌ها بایستی برای هر کدام از طرح‌های معدن‌کاری ارزیابی شده و در طراحی نهایی پیت معدن در نظر گرفته شود. تحلیل پایداری شیب‌ها یکی از بخش‌های مهم و حساس در معدن‌کاری و به ویژه در معادن روباز می‌باشد. در معادن روباز عمیق، شرایط سنگ‌شناسی پیچیده بوده و با وجود ساختارهای زمین‌شناسی (از قبیل گسل‌ها و صفحات لایه‌بندی و ...) تأثیرات قابل توجهی بر پایداری شیب‌ها داشته که می‌تواند فرایند طراحی معدن را

مختل کند. خصوصیات شیب‌ها از قبیل ویژگی‌های هندسی و نیز خصوصیات مختلف توده‌سنگ‌های تشکیل دهنده شیب‌ها پارامترهای کلیدی تأثیرگذار بر پایداری آن‌ها می‌باشند (استید و ولتر، ۲۰۱۵). برای مثال ناپیوستگی‌هایی از قبیل گسل‌ها و خصوصیات آن‌ها نظیر مقاومت برشی، شیب و جهت شیب، تعیین کننده ساز و کار گسیختگی می‌باشند (راگووانشی، ۲۰۱۵). در حالت کلی از معیارهای مؤثر در ناپایداری شیب‌های معادن روباز می‌توان به زمین‌شناسی، زمین‌شناسی ساختاری (شامل جهت‌یافتگی، طول اثر، زبری و نوع مواد پرکننده ناپیوستگی‌ها)، شرایط محیطی (تأثیر فشارآب منفذی و تغییر در شکل شیروانی‌ها)، ارتفاع دیواره، تغییرات در سطح آب زیرزمینی، هوازدگی، لایه‌بندی، چین‌خوردگی، وجود گسل‌ها، وزن توده سنگ و ارتعاشات انفجار اشاره کرد (بدنارژیک، ۲۰۱۷). معدن روباز مس سونگون واقع در شهرستان ورزقان آذربایجان شرقی به عنوان یکی از معادن بزرگ کشور، نیازمند استفاده از روش‌ها و تکنولوژی‌های به روز دنیا جهت تضمین تولید در محیطی امن بوده که از نقطه نظر کاربردی، شامل طراحی پیت با کیفیت بالا، نقشه‌برداری پیوسته شیب‌های رخنمون یافته و نیز استفاده از روش‌های ژئوتکنیکی مناسب جهت مانیتورینگ دائم شیب‌ها می‌باشد. معدن سونگون به روش روباز مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد که در این روش مواد معدنی با استفاده از عملیات پیوسته حفاری - انفجار استخراج می‌شوند (شکل ۱).

هدف اصلی مطالعه حاضر، بررسی شرایط زمین‌شناسی، ساختارهای زمین‌شناسی، و تعیین خصوصیات ژئومکانیکی مصالح مختلف جهت شناسایی مکانیسم و نوع گسیختگی‌های غالب معدن روباز مس سونگون می‌باشد. برای این منظور، مراحل مختلف مطالعه جهت ارزیابی دلایل ناپایداری‌ها و ارائه مکانیسمی برای استفاده در طرح‌های مختلف معدن به شرح ذیل می‌باشد:

۱- بررسی‌های دقیق زمین‌شناسی با استفاده از مطالعات صحرایی مواد رخنمون یافته در ترانشه‌های معدن که شامل شناسایی واحدهای مختلف و نیز تعیین مرز آن‌ها و نیز تعیین دگرسانی‌های غالب موجود در معدن می‌باشد.

۲- مطالعه ساختارهای زمین‌شناسی از قبیل گسل‌ها و درزه‌ها

۳- مطالعه مغزه‌های حاصل از حفاری‌های اکتشافی

۴- ارزیابی شرایط آب‌های سطحی و زیرزمینی با استفاده از نتایج گمانه‌های حفاری شده و همچنین کنترل آب‌های نشتی در بخش‌های مختلف معدن

۵ - تجزیه و تحلیل نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی جهت تعیین خصوصیات ژئومکانیکی مصالح

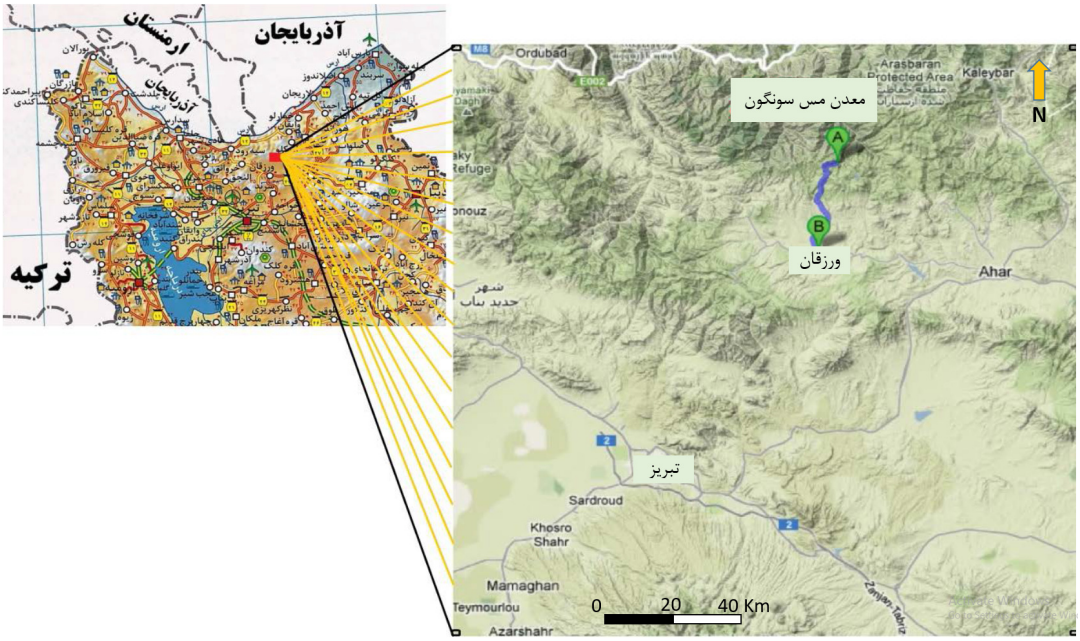
۶- گردآوری اطلاعات مربوط به لغزش‌های روی داده در معدن طی سال‌های گذشته

۷- تجزیه و تحلیل داده‌های مختلف جهت ارزیابی دلایل وقوع ناپایداری شیب‌های معدن

شکل ۱. نمایی کلی از معدن روباز مس سونگون

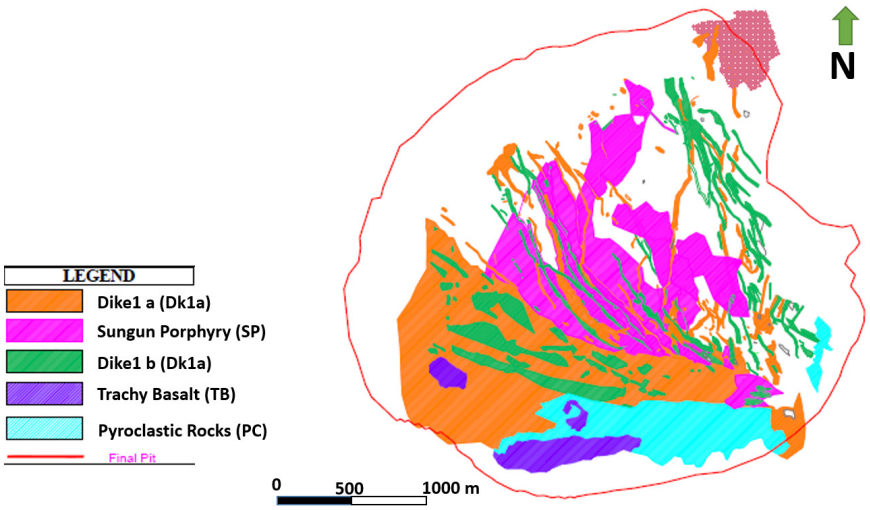
۲- مشخصات کلی و شرایط زمین‌شناسی معدن مس سونگون

معدن مس پورفیری سونگون در ۲۰ کیلومتری شهرستان ورزقان در شمال آذربایجان شرقی واقع شده است. ذخیره قطعی این کانسار در حدود ۸۰۰ میلیون تن کانسنگ با عیار متوسط ۰/۶ درصد وزنی مس، ۰/۰۱ درصد مولیبدن، ۰/۰۱۶ گرم در تن طلا و ۲/۲۱ گرم در تن نقره می‌باشد (محمدیان و همکاران، ۱۳۹۰). راه دسترسی به معدن از طریق جاده تبریز - ورزقان - سونگون میسر است (شکل ۲). شواهد تاریخی نشان می‌دهند انجام فعالیت‌های معدن‌کاری در منطقه مورد مطالعه به دو قرن پیش باز می‌گردد. برای مثال می‌توان به وجود تونل‌های مربوط به استخراج مواد معدنی پرعیار تا اوایل دهه پنجاه شمسی اشاره نمود.



شکل ۲. موقعیت معدن مس سونگون و راه‌های دسترسی (مهندسین مشاور پارس اولنگ، ۱۳۹۲)

به طور کلی محدوده معدن از دیدگاه زمین‌شناسی از سنگ‌های کربناته مربوط به کرتاسه بالایی، توده مونزونیت پورفیری سونگون (SP^5)، دایک‌ها و واحدهای آتشفشانی تشکیل گردیده است. بر این اساس توده مونزونیت پورفیری سونگون مهمترین رخساره سنگی محدوده معدن است که مرز آن با آهک‌های کرتاسه در شمال و شرق ناحیه معدنی سونگون موجب پیدایش زون اسکارن شده و از طرفی در جنوب و جنوب غربی با آتشفشان‌های جوان پالئوکواترنر پوشیده می‌شود. توده اصلی نفوذی سونگون، توسط دو توده تاخیری کوارتزدیوریت- گرانودیوریت و دیوریتی نابارور قطع شده است. دایک‌های مذکور دارای امتداد کلی NW-SE و با شیبی به سمت SW می‌باشند و بر اساس توالی زمانی به چهار نسل تقسیم می‌شوند که نسل اول دارای گسترش زیادی در محدوده معدن بوده و از دو توده تاخیری کوارتزدیوریت تا گرانودیوریت و دیوریتی منشاء گرفته‌اند. این دسته دایک‌ها به زیررده‌های DK1a، DK1b و DK1c قابل تفکیک هستند که با توجه به فراوانی، DK1a و DK1b در محدوده معدن بیشتر مورد ارزیابی قرار گرفته‌اند (مهندسین مشاور پارس‌اولنگ، ۱۳۹۲) (شکل ۳). علاوه بر واحدهای ذکر شده، واحدهای پیروکلاستی (PC) در بخش جنوبی معدن گسترش دارند که در شرایط خشک این مصالح پایداری خوبی داشته و می‌توان پله‌هایی با شیب‌های زیاد در آن‌ها ایجاد نمود. این واحدها عمدتا توده‌ای بوده و در شرایط اشباع به شدت ناپایدار بوده و در طول مدت بهره‌برداری از معدن، موارد متعددی از ناپایداری در آن‌ها ثبت شده است. همان‌طور که در نقشه زمین‌شناسی محدوده پیت نیز نشان داده شده است، واحد تراکی‌بازالت (TB) دارای گسترش محدود و بویژه در جنوب می‌باشد که به علت مقاومت بالا و درجه هوازدگی بسیار کم، مشکلی به لحاظ پایداری ایجاد نکرده است.



شکل ۳. نقشه زمین‌شناسی ساده شده محدوده معدن مس سونگون

۳- روش تحقیق

قبل از انجام عملیات طراحی پله‌های معادن روباز، کسب داده‌هایی از پارامترهای مختلف لازم و ضروری می‌باشد که پارامترهای مذکور مطابق ذیل می‌باشند:

۱- شرایط زمین‌شناسی محلی، وجود گسل‌ها و همچنین موقعیت ماده معدنی که تعیین کننده محدوده‌های لیتولوژیکی و ساختاری متفاوت درون پیت می‌باشند.

۲- هیدروژئولوژی و کسب اطلاعاتی از سیستم جریان آب زیرزمینی که کل پایداری پیت را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

۳- تعیین زون‌های دگرسان شده در محدوده معدن. از آنجایی که دگرسانی می‌تواند مقاومت سنگ را تحت تاثیر قرار دهد، بنابراین بایستی به صورت مشخصی تعیین گردند.

۴- آزمایش‌های آزمایشگاهی جهت تعیین خصوصیات ژئومکانیکی مصالح مختلف تشکیل‌دهنده پله‌های استخراجی معدن.

به منظور سهولت در انجام مطالعات مختلف، محدوده معدن به ۶ بلوک تقسیم شده که در شکل ۴ موقعیت این بلوک‌ها و مقاطع در نظر گرفته شده نمایش داده شده است. جهت تعیین خصوصیات ژئوتکنیکی مصالح مختلف، برنامه حفاری ژئوتکنیکی جامعی در نظر گرفته شده و تعداد ۱۵ گمانه به شماره‌های GT-1 تا GT-15 با عمق‌های مختلف (۱۵۰ متر تا ۶۰۰ متر) حفاری شد. در طی حفاری موقعیت گمانه‌ها طوری انتخاب شدند که در امتداد ۶ مقطع شعاعی (مشخص شده با RS در نقشه) شیب‌های اصلی پیت را قطع کنند (شکل ۴).

۳-۱- تهیه نقشه لغزش‌های معدن مس سونگون

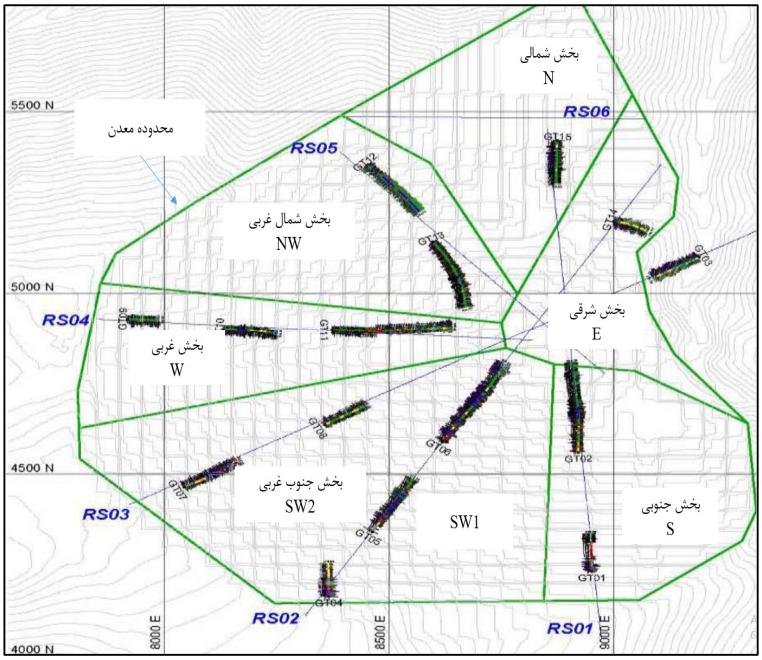
با استفاده از گردآوری داده‌های مربوط به ناپایداری شیب (۶۰ مورد لغزش ثبت شده) در بخش‌های مختلف معدن مس سونگون در بازه زمانی ۵ ساله (۱۳۹۴ تا ۱۳۹۹)، نقشه پراکنش لغزش‌ها تهیه شده است (مهندسین مشاور پارس اولنگ، ۱۳۹۹). بر این اساس مشخص شد که وقوع لغزش‌ها در بخش‌های خاصی از معدن گزارش شده است. بخش‌های جنوبی و جنوب‌غربی معدن دارای بیشترین تعداد لغزش‌های کوچک مقیاس و بزرگ مقیاس ثبت شده می‌باشند، در حالی که در بخش‌های شمالی، شمال غربی، شرقی هیچ لغزش قابل‌توجهی ثبت نشده است. همچنین لازم به ذکر است که در محدوده غربی معدن و حدواسط این بخش با بخش جنوب‌غربی نیز تعدادی لغزش ثبت شده است (شکل ۵).

۳-۲- شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی

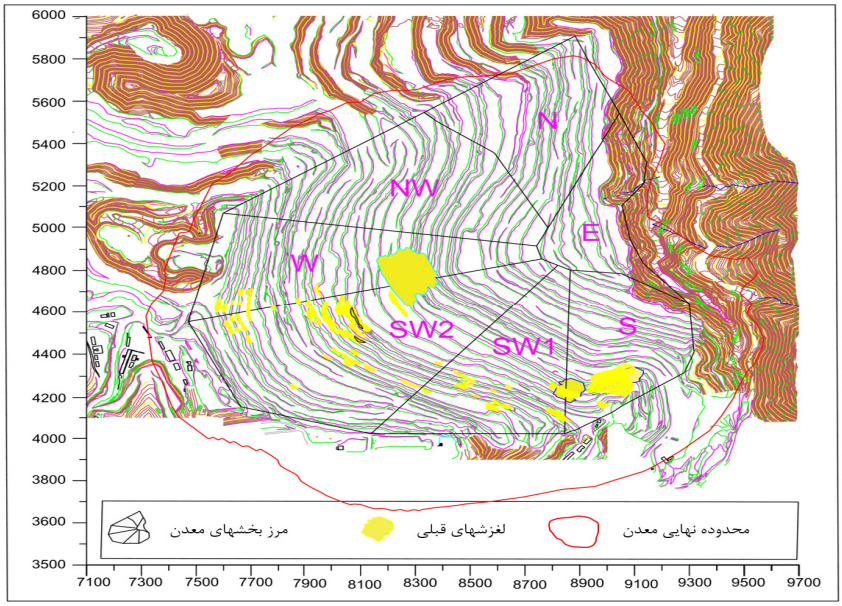
نقشه زمین‌شناسی ساده شده محدوده معدن مس سونگون نشان می‌دهد که واحدهای متعددی در آن رخنمون داشته و بنابراین رفتار ژئوتکنیکی متفاوتی خواهند داشت. واحدهای سونگون پورفیری (SP)، دایک‌ها، واحدهای پیروکلاستیک و تراکی‌آندزیت به ترتیب دارای بیشترین گسترش در محدوده معدن می‌باشد. نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های اخذ شده از مصالح سونگون پورفیری و دایک‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است. از آنجایی که مصالح تراکی‌بازالت به لحاظ مقاومت بسیار بالایی که دارند نقشی در وقوع ناپایداری شیب‌ها ندارند و

بنابراین از نمونه‌برداری و انجام آزمایش بر روی آن‌ها صرفنظر شد. بر اساس نتایج به دست آمده از آزمایش‌های آزمایشگاهی مشخص می‌شود که پارامترهای مقاومت برشی و نیز مقاومت تک‌محوری مصالح دارای تغییرات گسترده‌ای می‌باشد. همچنین نسبت پارامتر R نیز که مطابق رابطه ۱ و به صورت نسبت مقاومت فشاری تک محوری بر مقاومت فشاری در حالت طبیعی تعریف می‌شود. برای واحدهای مختلف سنگ‌شناسی مطابق جدول ۲ می‌باشد. این پارامتر در حقیقت نشان‌دهنده تاثیر وجود آب بر کاهش میزان مقاومت و در نتیجه ناپایداری‌های ناشی از آن می‌باشد.

$$R= \sigma_{c\ (sat)} / \sigma_{c\ (dry)} \qquad (1)$$



شکل ۴. تفکیک محدوده معدن مس سونگون به قطعات مختلف بر اساس موقعیت جغرافیایی



شکل ۵ . نقشه پراکندگی لغزش‌های روی داده در معدن مس سونگون در بازه زمانی ۵ ساله (۱۳۹۴ تا ۱۳۹۹)

جدول ۱. نتایج آزمایش‌های آزمایشگاهی بر روی سنگ‌های اصلی معدن مس سونگون (شرکت پارس‌اولنگ، ۱۳۹۲)

لیتولوژی			مقاومت فشاری تک محوری σ_c (MPa)		پارامترهای مقاومت برشی			
					چسبندگی (MPa)		زاویه اصطکاک (degree)	
نوع	دگرسانی	شرایط آزمایش	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر	حداقل	حداکثر
SP	فیلیک	طبیعی	14	75	0	0.79	23	35
		اشباع	10	73	0.02	0.08	20	32
	پتاسیک	طبیعی	13	87	0.01	0.067	21	34
		اشباع	10	76	0.02	0.053	22	30
DK1a	فیلیک	طبیعی	20	147	0	0.76	25	33
		اشباع	16	136	0.04	0.36	14	25
DK1b	فیلیک	طبیعی	72	147	0	0.36	25	36
		اشباع	65	107	0.01	0.15	21	33

جدول۲. تعیین مقادیر پارامتر R برای واحدهای مختلف سنگ‌شناسی

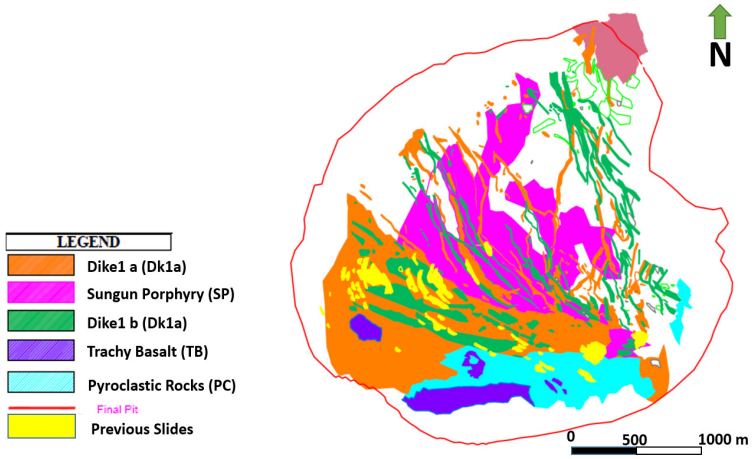
نوع	دگرسانی	مقادیر R	
		حداقل	حداکثر
SP	فیلیک	0.7	0.97
	پتاسیک	0.76	0.87
DK1a	فیلیک	0.8	0.92
DK1b	فیلیک	0.72	0.9

نتایج ارائه شده جدول ۲ نشان می‌دهد که واحدهای سنگ‌شناسی مورد مطالعه، در اثر اشباع شدن از آب بخشی از مقاومت خود را از دست می‌دهند که می‌تواند از نقطه نظر ناپایداری شیب حائز اهمیت باشد. هر چند بر اساس این پارامتر نمی‌توان اختلاف معناداری بین واحدهای مختلف پیدا کرد و مقادیر حداقل به دست آمده برای مصالح مورد آزمایش نشان‌دهنده تاثیرپذیری کم و بیش مشابه آن‌ها از وجود آب می‌باشد.

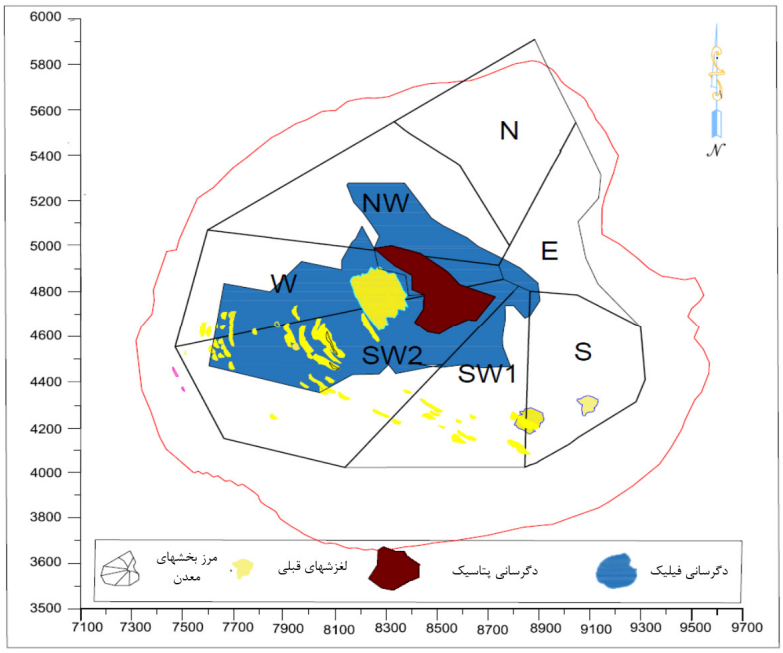
در شکل ۶ موقعیت لغزش‌های روی داده بر روی نقشه زمین‌شناسی نشان داده شده است. همان‌طوری که در این شکل مشاهده می‌شود عمده لغزش‌ها به ترتیب در واحدهای دایک (DK1a و DK1b)، پیروکلاست (PC) و سونگون پورفیری (SP) روی داده است. همچنین هیچ لغزشی در واحدهای تراکیتی (TB) گزارش نشده است.

۳-۳- دگرسانی (آلتراسیون)

یکی از فرایندهای تاثیرگذار بر مقاومت توده‌سنگ‌ها و نیز میزان پایداری شیب‌های معدن مس سونگون، دگرسانی توده‌سنگ‌ها می‌باشد. مطالعات انجام شده نشان دادند که دگرسانی‌های پتاسیک (فلدسپار پتاسیم، کوارتز و بیوتیت ثانویه) و فیلیک (کوارتز، سریسیت، کائولینیت، پیریت) دارای گسترش زیادی می‌باشند که به طور قابل‌ملاحظه‌ای می‌توانند مقاومت توده‌سنگ را تحت تاثیر قرار دهند. بررسی‌های انجام شده نشان دادند که دگرسانی فیلیک نقش موثرتری در کاهش مقاومت سنگ بکر با تبدیل فلدسپارها به سریسیت و رس‌ها دارند. همچنین دگرسانی پتاسیک باعث افزایش مقاومت سنگ بکر می‌گردد که دلیل آن را می‌توان به تبدیل فلدسپارهای اولیه به فلدسپارهای غنی از پتاسیم و نیز افزوده شدن سیلیس به صورت کوارتز ارتباط داد. بر اساس مشاهدات نیز می‌توان گفت که پله‌های ایجاد شده با زاویه شیب زیاد در بخش‌هایی از معدن با دگرسانی از نوع پتاسیک پایداری خود را حفظ کرده‌اند. هر چند که وجود درزه‌ها و گسل‌های متعدد باعث خردشدگی شدید در مصالح سنگی با دگرسانی پتاسیک شده است که باعث افزایش تغییرشکل‌پذیری توده سنگ می‌گردد. به منظور بررسی این پارامتر، نقشه دگرسانی محدوده معدن تهیه شد و سپس پراکندگی لغزش‌های روی داده در محدوده معدن در ارتباط با انواع مختلف دگرسانی مورد ارزیابی قرار گرفته است (شکل ۷). بر این اساس مشاهده می‌گردد که اکثریت گسیختگی‌های مهم در مصالحی با دگرسانی فیلیک روی داده‌اند که تایید کننده مطالب ذکر شده در بالا می‌باشند.



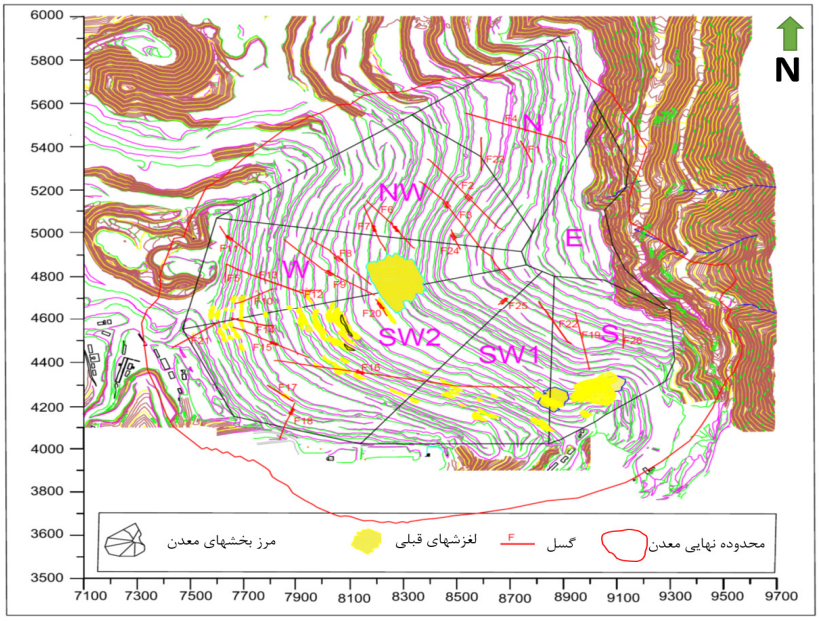
شکل ۶. موقعیت لغزش‌های روی داده در معدن در ارتباط با واحدهای مختلف زمین‌شناسی



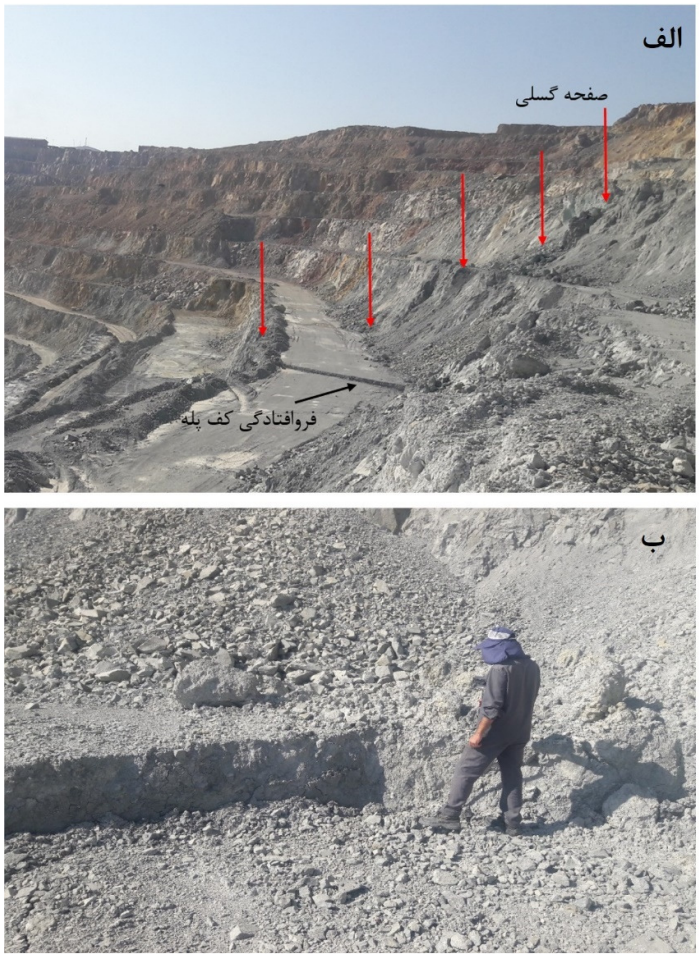
شکل ۷. موقعیت لغزش‌های روی داده در معدن در ارتباط با زون‌های دگرسان شده اصلی

۳-۴- ساختارهای زمین‌شناسی

بررسی ساختارهای مختلف زمین‌شناسی از قبیل گسل‌ها، درزه‌ها و مرز واحدهای مختلف زمین‌شناسی نشان دادند که گسل‌ها مهمترین نوع این عوارض می‌باشند که تاثیر به سزایی بر پایداری شیب‌های معدن مس سونگون دارند. بنابراین جهت تعیین ارتباط بین گسل‌ها و پراکندگی لغزش‌ها در محدوده معدن مس سونگون، نقشه گسل‌های معدن تهیه شده و ارتباط آن‌ها با لغزش‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. اندازه‌گیری خصوصیات مختلف گسل‌های معدن نشان دادند که روند کلی آن‌ها شمال‌غرب - جنوب شرق بوده و مکانیسم غالب آن‌ها شیب‌لغز نرمال می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۸ نشان داده شده است، تعدادی از لغزش‌های روی داده قبلی در معدن مس سونگون در مجاورت خطوط گسلی اصلی می‌باشند. در شکل ۹ تصاویری از وقوع گسیختگی بزرگ مقیاس در پله‌های واقع در ترازهای ۲۲۳۵ تا ۲۱۶۲/۵ متر نشان داده شده است. همان‌طور که در این تصاویر دیده می‌شود، ناپایداری شیب در ارتباط مستقیم با گسل بزرگ (در نقشه گسل‌ها با F14 مشخص شده است) ایجاد شده که سبب تشکیل فروافتادگی در کف پله در حدود ۱ متر گردیده است.



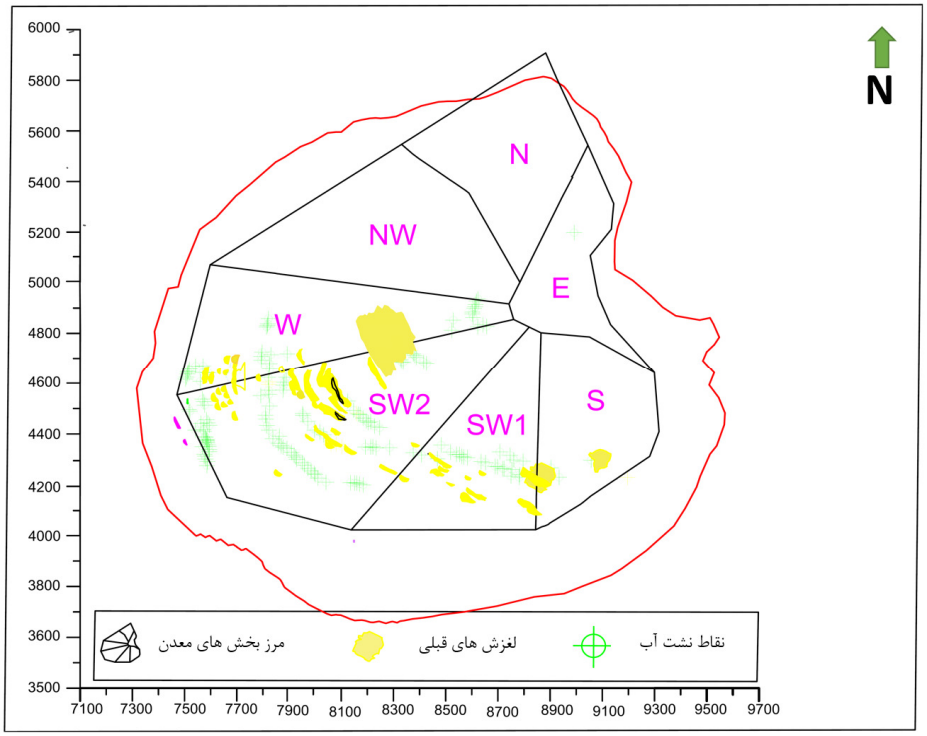
شکل ۸. پراکندگی لغزش‌های روی داده در محدوده معدن در ارتباط با گسل‌های اصلی معدن



شکل ۹. تصاویری از وقوع ناپایداری شیب در ترازهای ۲۲۳۵ تا ۲۱۶۲/۵ متر معدن مس سونگون، الف) صفحه گسلی مسبب لغزش و فروافتادگی در کف پله و ب)نمایی نزدیک از فروافتادگی مذکور

۳-۵- شرایط آب‌های سطحی و زیرزمینی

وجود آب همواره می‌تواند باعث کاهش کارایی شیب‌های معدن شود. فشار آب عمل کننده در هر کدام از ناپیوستگی‌ها و یا فضای خالی حفرات توده‌های سنگی منجر به کاهش تنش موثر شده و در نهایت مقاومت برشی توده سنگ را کاهش می‌دهد. همچنین در مواردی که فشارهای آب حفره ای اضافی در زیر کف معدن ایجاد می‌شود، احتمال وقوع بالازدگی وجود دارد (رید و بیل، ۲۰۱۳). بر اساس بررسی موارد متعدد، وجود آب‌های سطحی و زیرزمینی تاثیر به سزایی بر ناپایداری شیب‌های معدن مس سونگون نیز دارد که لازم است به منظور زهکشی و کاستن از فشار حفره‌ای آب‌های زیرزمینی جهت طراحی شیب‌های پایدار و نیز مساعد کردن شرایط جهت انجام عملیات انفجار، تدابیر ویژه‌ای اندیشیده شود. جهت مطالعه شرایط آب‌های زیرزمینی، از نتایج پیزومترهای نصب شده در تعدادی از گمانه‌های ژئوتکنیکی استفاده شده است. هر چند که به علت انجام عملیات انفجار و برداشت مصالح از پله‌های معدن، امکان حفظ پیزومترها به مدت طولانی میسر نبود. جدول ۳ نشان‌دهنده نتایج کنترل سطح آب زیرزمینی در گمانه‌های مذکور می‌باشد. بر اساس نتایج به دست آمده از کنترل تراز آب زیرزمینی با استفاده از گمانه‌ها مشخص شد که سطح آب زیرزمینی در محدوده‌های جنوبی و جنوب‌غربی معدن بالاتر است، هر چند که جهت اظهار نظر دقیق در این مورد لازم است مطالعات هیدروژئولوژیکی دقیقی با استفاده از تعداد زیادی پیزومتر انجام گیرد. علاوه بر شرایط آب‌های زیرزمینی، جریان آب‌های سطحی نیز می‌توانند منجر به ایجاد ناپایداری‌هایی در شیب‌های معدن گردند. مطالعات نشان دادند که در محدوده معدن عمده ناپایداری شیب‌ها از اوخر فروردین ماه شروع می‌گردد که یکی از دلایل آن افزایش آب‌های سطحی می‌باشد. در شکل ۱۰ نقشه مناطق نشت آب (چشمه‌ها) برای اردیبهشت ماه ۱۴۰۰ ترسیم شده است. همان طور که نشان داده شده است، عمده چشمه‌های مشاهده شده با دبی کمتر از ۰/۵ لیتر بر ثانیه و بیشتر از آن در محدوده جنوب و جنوب‌غربی معدن گسترش دارند. بر این اساس مشاهده می‌شود که در مجاورت تعدادی از لغزش‌ها نقاط نشت ثبت شده است که نشان‌دهنده ارتباط مستقیم بین جریان آب‌های زیرزمینی و وقوع ناپایداری شیب‌ها می‌باشد.



شکل ۱۰. نقشه مناطق نشت آب (چشمه‌های فصلی) بر اساس برداشت‌های اردیبهشت۱۴۰۰ و ارتباط با لغزش‌های محدوده معدن

۳-۶- خصوصیات ژئومکانیکی توده‌سنگ‌های بخش جنوبی و جنوب غربی

از نقطه نظر ناپایداری شیب‌های معدن، خصوصیات ژئومکانیکی توده سنگ دارای اهمیت فوق‌العاده‌ای می‌باشد. در مطالعه حاضر نیز با توجه به شرایط زمین‌شناسی، توزیع لغزش‌ها و سایر شرایط دیگر که بخش جنوبی و جنوب غربی معدن را به لحاظ وقوع ناپایداری مستعد می‌سازد، پارامترهای RMR و GSI برای این بخش‌ها تعیین شده است (جدول‌های ۴ و ۵). بر این اساس مشخص شد که واحدهای دایک DK1a و DK1b در رده ضعیف تا متوسط، سونگون پورفیری (SP) در رده ضعیف و تراکیت (TB) نیز در رده خوب قرار می‌گیرد.

جدول ۳. تراز آب زیرزمینی در تعدادی از گمانه‌های ژئوتکنیکی

گمانه	عمق آب زیرزمینی (متر)
GT01	12
GT04	15
GT14	10
GT15	11

جدول ۴. طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ لیتولوژی‌های اصلی بخش جنوبی معدن

لیتولوژی	RMR	GSI	توصیف توده سنگ
	میانگین	میانگین	
DK1a (1)	39	34	ضعیف
DK1a (2)	61	56	متوسط
DK1b (1)	33	28	ضعیف
DK1b (2)	42	37	متوسط
SP	39	34	ضعیف

جدول ۵. طبقه‌بندی توده‌سنگ انجام شده بر روی لیتولوژی‌های اصلی در بخش جنوب غربی

لیتولوژی	RMR	GSI	توصیف توده سنگ
	میانگین	میانگین	
TB	63	58	خوب
DK1a (1)	40.5	35.5	متوسط
DK1a (2)	41	36	متوسط
DK1b (1)	31	26	ضعیف
DK1b (2)	42	37	متوسط
SP	37	32	ضعیف

۴- بحث

به منظور ارزیابی دلایل ناپایداری شیب‌های معدن روباز مس سونگون، پارامترهای مختلفی از قبیل فراوانی لغزش‌های روی داده قبلی، شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، شرایط ساختاری، دگرسانی، هیدرولوژی و هیدروژئولوژی مورد بررسی قرار گرفته است. به عبارتی با استفاده از توزیع لغزش‌های قبلی و ارتباط آن‌ها با پارامترهای مذکور تلاش شده است مهمترین دلایل ناپایداری شیب‌های معدن مس سونگون شناسایی شده و به عنوان راهکاری عملی در طراحی معدن و عملیات اجرایی مدنظر قرار گیرد. پس از تهیه نقشه‌های مربوطه سعی شد ارتباطی منطقی بین درصد وقوع لغزش‌ها در محدوده معدن مس سونگون و فاکتورهای مختلف برقرار شود. در شکل‌های ۱۱ روابط هر کدام به صورت نمودارهایی نشان داده شده است. بر این اساس می‌توان نتایج زیر را اخذ کرد:

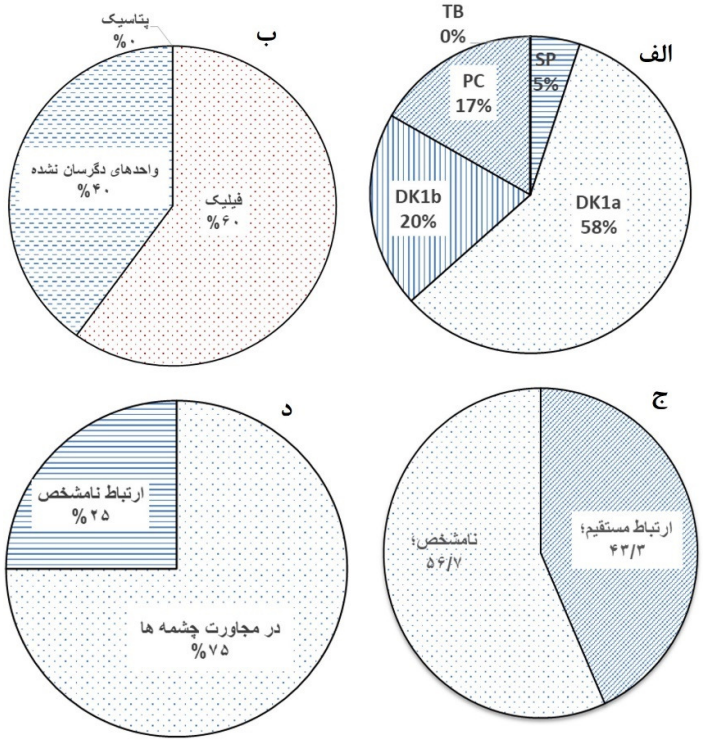
الف- تمامی ۶۰ مورد لغزش روی داده در محدوده معدن مس سونگون در چهار نوع لیتولوژی غالب سونگون پورفیری، دو نوع دایک و پیروکلاست ثبت شده‌اند که درصد وقوع در هر کدام از آن‌ها متفاوت می‌باشد (شکل

۱۱ الف). بیشترین درصد ناپایداری شیب (حدود ۶۰ ٪ موارد مشاهده شده) در دایک Dk1a گزارش شده است، در حالی که این مقدار در تراکیت‌ها به صفر می‌رسد.

ب – بررسی نقشه‌های تهیه شده و همچنین نمودار آماری تهیه شده مطابق شکل ۱۱ ب نشان می‌دهند که حدود ۶۰ درصد ناپایداری شیب‌های معدن مس سونگون در واحدهایی با دگرسانی از نوع فیلیک روی داده است، در حالی که ۴۰ درصد بقیه لغزش‌ها در واحدهای دگرسان نشده از قبیل مصالح پیروکلاستی ثبت شده است. همچنین هیچ نوع لغزش قابل‌توجهی در مصالحی با دگرسانی از نوع پتاسیک گزارش نشده است.

ج – لغزش‌های دارای ارتباط مستقیم با گسل‌های اصلی معدن بخش قابل‌توجهی از ناپایداری‌ها را تشکیل می‌دهند. بر اساس نمودار نشان داده شده در شکل ۱۱ ج، حدود ۴۳ درصد از ناپایداری شیب‌های معدن مس سونگون در طی بازه زمانی در نظر گرفته شده، در مجاورت این نوع از ساختارهای زمین‌شناسی شکل گرفته‌اند.

د- شناسایی دقیق محل‌های نشت آب یکی از پارامترهای مهم در تعیین محل وقوع لغزش می‌باشد. بررسی‌های صحرایی نشان داده است که بخش عمده‌ای از محل‌های نشت آب در پله‌های کاری معدن مس سونگون در ارتباط مستقیم با گسل‌ها می‌باشد. تجزیه و تحلیل محل‌های وقوع ناپایداری شیب‌ها و ارتباط آن با محل‌های نشت آب (چشمه‌ها) نشان می‌دهند که ۷۵ درصد از لغزش‌های گزارش شده دارای ارتباط مستقیمی با چشمه‌ها می‌باشند. هر چند که تعیین ارتباط بین شرایط آب زیرزمینی و شدت وقوع ناپایداری‌ها نیازمند بکارگیری داده‌های پیزومتری در معدن می‌باشد (شکل ۱۱د).



شکل ۱۱. الف) ارتباط بین فراوانی وقوع لغزش‌ها در معدن مس سونگون با نوع واحدهای لیتولوژیکی، ب) ارتباط بین فراوانی وقوع لغزش‌ها در معدن مس سونگون با نوع دگرسانی سنگ‌ها، ج) ارتباط بین فراوانی وقوع لغزش‌ها در معدن مس سونگون با تاثیر گسل‌ها و د) ارتباط بین فراوانی وقوع لغزش‌ها در معدن مس سونگون با تاثیر آب‌های سطحی.

۴-۱- بررسی شرایط وقوع بزرگ‌ترین لغزش در معدن مس سونگون

یکی از بزرگ‌ترین ریزش‌های روی داده در قسمت جنوبی معدن (مشخص شده در شکل ۸ در مرز سکتور جنوب و جنوب غربی SW1) در شهریور ماه سال ۱۳۹۵ گزارش شده است. این ریـزش ۵ پله از جنوب مـعدن را شامل می‌شود که در شکل ۱۲ کاملا مشهود است. لغزش مذکور در واحد پیروکلاست اتفاق افتاده که نسبت به

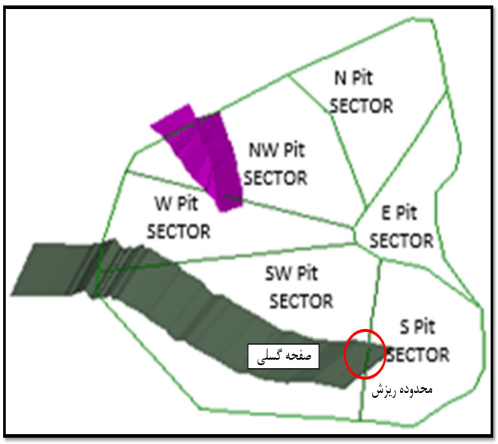
لیتولوژی‌های دیگر از مقاومت کمتری برخوردار است. یکی دیگر از عوامل موثر در ریزش‌های اتفاق افتاده، شیب پله‌ها است. بر اساس مقطع عرضی برای ریزش مذکور مشخص شده که شیب کلی معدن در محدوده مورد بررسی در حدود ۳۵ درجه بوده که با مقادیر استاندارد پیشنهادی توسط مشاور طرح مطابق جدول ۶ (بین ۳۰ تا ۳۳) متفاوت می‌باشند و این عامل نیز تا حدودی می‌تواند در فرایند ناپایداری شیب‌ها تاثیر گذار باشد (اس آر ک، ۲۰۰۸). همچنین بر اساس مقادیر ارائه شده در جدول ۶ مشاهده می‌شود که برای بخش‌های شمال، شمال‌غرب و غرب معدن مقادیر زاویه شیب بیشتر با ضریب اطمینان بالاتری نسبت به سایر قسمت‌ها در نظرگرفته شده است.

شکل ۱۲. ریزش روی داده در شهریور ماه ۱۳۹۵ در مصالح پیروکلاستی

جدول ۶. زوایای شیب کلی پیش بینی شده برای بخش‌های مختلف معدن (اس آر ک، ۲۰۰۸)

محدوده	زاویه شیب پیشنهادی	ضریب اطمینان	
		زهکشی نشده	زهکشی شده
جنوب	30	1.23	1.44
	32	1.18	1.39
	33	1.18	1.38
جنوب غربی	30	1.17	1.31
	34	0.99	1.14
	30	1	1.3
	33	0.92	1.1
غرب	30	1.28	1.61
	33	1.19	1.46
شمال غرب	30	1.57	1.77
	36	1.33	1.48
شمال	35	1.54	1.64
	37	1.47	1.6

علاوه بر زاویه شیب و عدم رعایت آن به هنگام اجرای طرح، همان‌طور که در شکل ۱۳ نیز نشان داده شده است، گسل اصلی معدن (گسل F16) محدوده ریزش را قطع می‌کند که نمایانگر تاثیر آن بر ناپایداری می‌باشد. گسل F16 که گسل اصلی معدن شناخته می‌شود، دارای امتداد شمال غرب - جنوب شرق بوده و با مکانیسم از نوع شیب‌لغز نرمال عامل اصلی ناپایداری‌های گزارش شده شناخته شده است. از بین پارامترهای اصلی تاثیرگذار بر ناپایداری شیب‌های معدن مس سونگون، مسئله وجود آب‌های سطحی و زیرزمینی در رابطه با ریزش مورد مطالعه بررسی شد. بر اساس نتایج آزمایش لوژان نفوذپذیری واحدهای لغزش یافته (بر اساس انجام آزمایش لوژان در واحدهای پیروکلاستی مجاور توده لغزش یافته) بالا بوده که موید پتانسیل بسیار زیاد آن در انتقال آب‌های سطحی و در نتیجه افزایش وزن توده می‌باشد. همچنین بر اساس نتایج پیزومتر نصب شده در نزدیکی محل وقوع لغزش (تراز ۲۱۱۲/۵ متر)، تراز آب نزدیکی سطح زمین می‌باشد که باعث ایجاد حالت اشباع و افزایش فشار منفذی آب در این ناحیه شده و عامل ایجاد ناپایداری این ناحیه به حساب می‌آید.



شکل ۱۳. موقعیت لغزش مورد بررسی در ارتباط با صفحه گسلی اصلی (گسل F16 مشخص شده در شکل ۸)

نتیجه‌گیری

در این مقاله پایداری شیب‌های معدن روباز مس سونگون واقع شده در شهرستان ورزقان آذربایجان شرقی مورد بررسی قرار گرفته است. با توجه به گسترش معدن و نیاز به استخراج ماده معدنی از اعماق بیشتر، انجام مطالعات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی مهندسی برای پایداری شیب‌های معدن از اهمیت خاصی برخوردار است. برای این منظور مطالعات جامعی در یک بازه زمانی ۵ ساله (۱۳۹۴ تا ۱۳۹۹) انجام شده و نتایج حاصله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. پارامترهای مختلفی از قبیل پراکندگی لغزش‌های اصلی روی داده، شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی، شرایط آب‌های سطحی و زیرسطحی، دگرسانی و ساختارهای زمین‌شناسی ارزیابی شده و نقشه هر کدام از آن‌ها تهیه شد. سپس سعی گردید ارتباط منطقی بین شدت وقوع لغزش‌ها و پارامترهای دخیل در آن برقرار گردد. نتایج حاصل از مطالعه حاضر به شرح زیر می‌باشد:

۱- در بازه زمانی مذکور، تنها در بخش‌های جنوبی و جنوب غربی معدن لغزش‌های قابل‌توجهی روی داده است. به عبارت دیگر تمامی ۶۰ مورد لغزش ثبت شده فقط در این قسمت‌ها گزارش شده‌اند.

۲- از نقطه نظر زمین‌شناسی، لغزش‌ها در مصالح خاصی روی داده‌اند به طوری که حدود ۶۰ درصد در واحدهای DK1a، ۲۰ درصد در DK1b، حدود ۱۶٪ در نهشته پیروکلاست (PC) و ۵٪ در واحدهای سونگون پورفیری (SP) گزارش شده است. در حالی که در مصالح تراکیتی که بخش عمده‌ای از رخنمون‌های جنوب معدن را تشکیل می‌دهد ناپایداری شیب مشاهده نشده است.

۳- بررسی ارتباط بین نوع دگرسانی موجود در معدن پورفیری مس سونگون با توزیع لغزش‌ها نشان داد که دگرسانی فیلیک از نقطه نظر ناپایداری شیب دارای اهمیت بیشتری نسبت به دگرسانی پتاسیک می‌باشد، به طوری که حدود ۶۰ درصد ناپایداری شیب گزارش شده در مصالحی با این نوع دگرسانی می‌باشد. همچنین لغزش قابل توجهی در مصالح با دگرسانی پتاسیک ثبت نشده است.

۴- تهیه نقشه پراکندگی محل‌های نشت آب (چشمه‌ها) نشان دادند که بخش قابل‌توجهی از لغزش‌های برداشت شده در معدن (۷۵ درصد) در مجاورت چشمه‌های داخل پله می‌باشند.

۵- یکی دیگر از مهمترین پارامترهای تاثیرگذار بر وقوع ناپایداری شیب‌های معدن مس سونگون، وجود گسل‌های اصلی می‌باشد. برقراری ارتباط بین نقشه گسل‌های معدن و پراکندگی لغزش‌ها نشان داد که در حدود ۴۳ درصد از لغزش‌ها، گسل‌ها به عنوان ساختار اصلی زمین‌شناسی و به عنوان دلیل مهم وقوع ناپایداری شناخته می‌شوند.

۶- از نقطه نظر اجرایی و طراحی معدن و همچنین برنامه‌ریزی برای کنترل رفتار شیب‌های معدن، می‌توان گفت که واحدهای دایکی با دگرسانی از نوع فیلیک و واحد پیروکلاستی رخنمون یافته در بخش‌های جنوبی و جنوب غربی معدن مستعدترین واحدها برای ایجاد ناپایداری شیب می‌باشند. بنابراین ارائه طرح در واحدهای مذکور بایستی با در نظر گرفتن وجود گسل‌های اصلی، شرایط آب‌های سطحی و زیرزمینی همراه باشد.

تشکر و قدردانی

از داوران محترم این نشریه که در جهت ارتقای کیفیت این مقاله، پیشنهادات ارزنده‌ای ارائه نمودند، تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

مهندسین مشاور پارس‌اولـنگ (۱۳۹۲) گزارش مـطالعات زمین‌شناسی معدن مس سونگون. جلد ۱، ص ۱ تا ۲۴۰.

مهندسین مشاور پارس‌اولنگ (۱۳۹۹) گزارش مطالعات هیدرولوژی معدن مس سونگون. ص ۱ تا ۱۲۰.

Arıkan, F., Ulusay, R., Aydın, N (2007) Characterization of weathered acidic volcanic rocks and a weathering classification based on a rating system. Bull Eng Geo Environ, 66(44): 415–430.

Bednarczyk, Z (2017) Slope Stability Analysis for the Design of a New Lignite Open-Pit Mine. Procedia engineering, 191: 51-58.

Bye, A. R., Bell, F. G (2001) Stability assessment and slope design at Sandsloot open pit, South Africa. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 38: 449–466.

Canment (1977) Pit Slope Manual, Ch. 5, Design. Canment report 77-5. Energy, Mines & Resources, Canada, Ottawa.

Raghuvanshi, T. K (2019) Plane failure in rock slopes—a review on stability analysis techniques. J King Saud Univ Sci, 31: 101–109. https ://doi.org/10.1016/j.jksus .2017.06.004.

Read, J., Beale, G (2013) Guidelines for evaluating water in pit slope stability. CSIRO publishing.

SRK Consulting Engineers (2008) Sungun Copper Project Mining Geotechnics and Slope Design Studies, pages 1 to 110.

Stead, D., Wolter, A (2015) A critical review of rock slope failure mechanisms: the importance of structural geology. J Struct Geol, 74: 1– 23. https ://doi.org/10.1016/j.jsg.2015.02.002

Steffen, O. K. H., Contreras, L. F., Terbrugge, P. J., Venter, J (2008) A risk evaluation approach for pit slope design" ARMA 08-231, American Rock Mechanics Association.

Sullivan, T. D (2006) Pit slope design and risk – a view of the current state of the art. In Proceedings of International Symposium on Stability of Rock Slopes in Open Pit Mining and Civil Engineering, Cape Town. South African Institute of Mining and Metallurgy, Johannesburg.

Terbrugge, P. J., Wesseloo, J., Venter, J. & Steffen, O. K. H (2006) "A risk consequence approach to open pit slope design" The South African Institute of Mining and Metallurgy, SA ISSN 0038-223X.

An investigation on the effect of engineering geological factors on stability of slopes at the Sungun Copper mine

R. Babazadeh[1*], E. Asghari-Kaljahi[2] and H. R. Soofi[3]

1- Dept., of Earth Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran
2- Assoc. Prof., Dept., of Earth Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran
3- M. Sc., of Mining Engineering, Sungun Copper Complex, Varzeghan, Iran

*** babazadeh64@gmail.com**

Recieved: 2021/3/14 Accepted: 2021/6/1

Abstract

The on-site observations and monitoring data showed that large-scale failures occurred mainly along both the interconnected sliding surfaces, consisting of discontinuities, contact zone, and the circular surfaces through the weathered soil-like pyroclasts at the sungun copper mine. Surface water infiltration through the unconsolidated materials contributed to the circular-shaped failures. After a heavy rainy period, an increase in the groundwater table above the contact zone played a major role in the initiation of bi-planar wedge failures. In this study, the main reasons causing instabilities in benches of sungun copper mine have been investigated. For this purpose, the results obtained using monitoring program during a time of 5 years were evaluated and totally 60 slides were identified and investigated. Slide map of pit showed that the instability of slopes has been recorded in south and south west sector of pit. The correlation between slide distribution throughout the pit and parameters such as faults, alteration, geology, hydrology and hydrogeology showed that the most susceptible geology units to instability identified as dikes with phylic type alteration, and water saturated pyroclasts.

Keywords: Sungun copper mine, Instability of slopes, Alteration, Geological structures