مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
تابستان ۱۳۹۷، جلد یازدهم، شماره ۲، صفحه ۹۹ تا ۱۱۳

پهنه‌بندی پتانسیل گسیختگی شیب‌های سنگی معدن مس سونگون بر اساس امتیاز توده‌ی شیب (SMR) و تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

موسی فتحی[۱]، قدرت برزگری*[۲]

دریافت مقاله: ۹۷/۱۰/۰۵ پذیرش مقاله: ۹۷/۱۲/۲۳

چکیده

پهنه‌بندی مخاطرات زمین‌شناسی در معادن روباز این امکان را فراهم می‌کند تا قبل از وقوع حادثه، نسبت به پیش‌بینی و اجرای تمهیدات لازم برای پایدارسازی مناطق با پتانسیل گسیختگی و مخاطره‌آمیز اقدام گردد. معدن مس سونگون در استان آذربایجان شرقی در ٤٥ کیلومتری شمال شهرستان ورزقان قرار دارد. در این تحقیق برای پهنه‌بندی مناطق با پتانسیل ناپایداری از روشهای امتیاز توده‌ی شیب (Slope Mass Rating)، تحلیل سینماتیکی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (Analytic Hierarchy Process) و با استفاده از نرم‌افزارهای Dips 6.0، Expert Choice و ArcGIS استفاده شده است. برای بررسی به روش تحلیل سلسله مراتبی، معیارهای اصلی دخیل در گسیختگی شیب‌های سنگی و پله‌های استخراج شامل *زمین‌شناسی ساختاری*، ژئومکانیکی، *وضعیت آب زیرزمینی درزه‌ها*، مورفولوژی و درجه دگرسانی انتخاب و با تشکیل ماتریس مقایسه زوجی امتیازدهی شدند و زیرمعیارها و گزینه‌های تعیین شده برای هرکدام از معیارهای اصلی بر پایه میزان اهمیت آنها و به روش مجموع سطری وزن‌دهی شدند. سپس با تلفیق لایه‌های اطلاعاتی مختلف در محیط ArcGIS، محدوده‌ی معدن از لحاظ خطر ناپایداری شیب‌های سنگی در سه دسته کم، متوسط و زیاد پهنه‌بندی گردید. با توجه به نتایج بدست آمده، *مناطق غربی، جنوبی، جنوب‌شرقی و بصورت پراکنده قسمتی از شمال* محدوده‌ی معدن بویژه در پله‌های استخراج، پتانسیل وقوع گسیختگی بیشتر است که با شواهد میدانی مطابقت نسبی خوبی دارد. نتایج بدست آمده نشان داد که همخوانی نسبتاً خوبی بین نتایج روشهای مورد استفاده در این تحقیق وجود دارد. ولی بدلیل اینکه در روش تحلیل سلسله مراتبی سایر معیارهای دخیل در گسیختگی در نظر گرفته می‌شود نتایج قابل اعتمادتری بدست می‌آید.

کلید واژه‌ها: *گسیختگی شیب‌های سنگی، امتیاز توده‌ی شیب (SMR)، ArcGIS، تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، معدن مس سونگون*

۱. دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی مهندسی، دانشگاه تبریز، تبریز
۲. عضو هیأت علمی گروه علوم زمین، دانشگاه تبریز، تبریز gbarzegari@tabrizu.ac.ir
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

اهمیت پایداری شیب‌های سنگی و پله‌های استخراج به دلیل تأثیر آن در اقتصاد معدن، همواره یکی از مسایل اصلی معادن روباز سطحی به شمار می‌رود. لذا طراحی و پیاده‌سازی آن با در نظر گرفتن مسائل فنی، اقتصادی، زیست محیطی و ایمنی انجام می‌گیرد (Qi et al., 2017). وقوع گسیختگی به هر علتی می‌تواند باعث بروز خسارت شود. بارگذاری، مقاومت فشاری تک محوری سنگ، زمین‌شناسی، فشار آب‌منفذی و سایر عوامل باعث ایجاد گسیختگی در شیب‌ها می‌شوند. با توجه به وسعت زیاد معادن روباز، امکان وقوع گسیختگی‌های متعدد و مختلف با بزرگی‌های متفاوت وجود دارد (شرکت مهندسین مشاور ژرفاب، ۱۳۸۸).

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) روش توسعه یافته‌ای است که توسط ساعتی(Saaty, 1980) برای تصمیم‌گیری چند منظوره ابداع شده است. از این روش در فرآیند تصمیم‌گیری برای اولویت‌بندی در میان گزینه‌های مختلف با در نظر گرفتن اهمیت و میزان تأثیر و جنبه‌های کیفی و کمی آنها استفاده می‌شود.

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی برای تجزیه و تحلیل ساختار و تعیین وزن معیارهای دخیل در هر پدیده‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرد و از نرم‌افزار ArcGIS برای تهیه نقشه‌ی پهنه‌بندی براساس معیارهای مختلف بدست آمده از تحلیل سلسله مراتبی، استفاده می‌شود (دهبان و همکاران، ۱۳۹۳؛ رحیمی شهید و رحیمی، ۱۳۹۶).

از معیارهای مؤثر در ناپایداری معادن می‌توان به زمین‌شناسی، زمین‌شناسی ساختاری (شامل جهت یافتگی، طول اثر، زبری و نوع پرکننده)، شرایط محیطی (تأثیر فشارآب منفذی و تغییر در شکل شیروانی‌ها)، ارتفاع دیواره، تغییرات در سطح آب‌زیرزمینی، سیستم درزه‌ها، هوازدگی، لایه‌بندی، چین‌خوردگی، گسل‌ها، وزن توده‌ی‌سنگ و ارتعاشات انفجاری اشاره کرد(Bednarczyk, 2017).

مراحل تهیه نقشه‌های پهنه‌بندی پتانسیل گسیختگی بر اساس نظر نورالهی و همکاران (Noorollahi et al., 2018) عبارتند از:

الف) جمع‌آوری اطلاعات و نقشه‌های عوامل موثر

ب) استفاده از روشAHP برای برآورد وزن هر یک از عوامل

ج) رقومی سازی و استفاده از وزن برای هر لایه با استفاده از GIS

د) هم‌پوشانی لایه‌های اطلاعاتی و تهیه نقشه نهایی

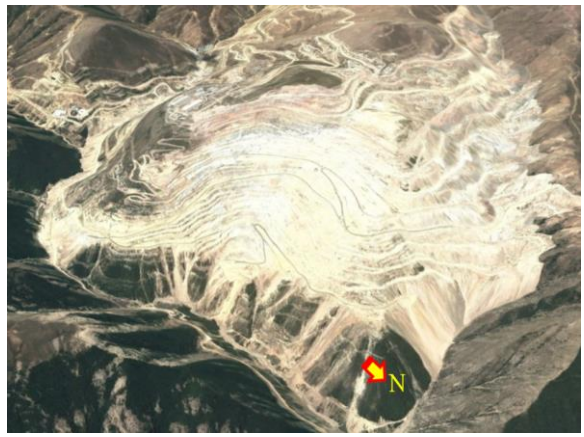
با استفاده از مدل تحلیل سلسله مراتبی، امکان تهیه نقشه‌ی پهنه‌بندی ناپایداری با درنظر گرفتن تأثیر عوامل مختلف وجود دارد. محققان مختلفی از روش تحلیل سلسله مراتبی و نرم‌افزار ArcGIS ، برای مطالعات مسائل مختلف زمین‌شناسی-مهندسی و زیست‌محیطی چند پارامتری که نیاز به تصمیم‌گیری چندمتغیره است استفاده کرده‌اند.

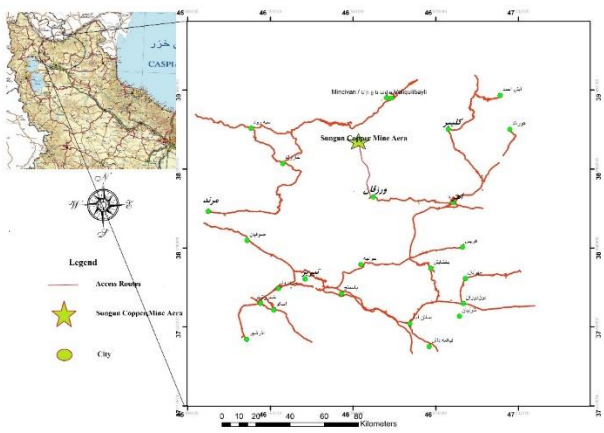
هیرناوان (Hirnawan, 2010)، برای شناسایی مناطق ناپایدار، به بررسی عوامل مؤثر بر گسیختگی شیب‌های سنگی، بلوک‌بندی محدوده‌ی معدن و اجرای رویکرد یکپارچه با استفاده از نرم‌افزارExpert Choice وArcGIS پرداخته‌اند. ستایشی‌راد و همکاران (۱۳۸۹)، خطر زمین‌لغزش در ساحل دریای خزری در محدوده‌ی نوشهر تا رامسر را به روش AHP بررسی کردند. دهیان ایوان استخری و همکاران (۱۳۹۳) به ارزیابی پتانسیل زمین‌لغزش در مخزن سد خاکی پلرود با رویکرد چند معیاره فازی پرداخته‌اند.

کاساپ و سوباسی (Kasap and Subasi, 2017)، ریسک تیم‌های کاری معادن روباز را با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی را مورد ارزیابی قرار دادند. لئو و همکاران (Luo et al., 2016)، تحلیل پایداری شیب‌ها در معادن روباز را با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و روش وزنی انتروپی انجام دادند. نورالهی و همکاران (Noorollahi et al., 2018)، مدل زمین‌لغزش و نقشه حساسیت آن را برای مخزن سد طالقان با استفاده از روابط فازی و فرآیند تحلیل سلسله مراتبی انجام دادند. یزدادی و قنواتی (Yazdadi and Ghanavati, 2017)، پهنه‌بندی خطر زمین‌لغزش حوزه آبریز کردان را با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و GIS مطالعه کردند.

معدن مس سونگون در ۱۲۵ کیلومتری شمال شرق تبریز و ٤٥ کیلومتری شمال شهرستان ورزقان و در موقعیت جغرافیایی ٤٦ درجه و ٤٣ دقیقه طولی و ٣٨ درجه و ٤٣ دقیقه عرضی واقع شده است. گستره‌ی معدن قسمتی از رشته کوه‌های قره‌داغ قرار دارد که از توپوگرافی خشن و کوهستانی برخوردار است. ارتفاع متوسط منطقه از سطح دریا در حدود ۱۹۰۰ تا ۲۳۰۰ متر است. شکل (۱) تصویر ماهواره‌ای و نقشه‌ی موقعیت معدن مس سونگون را نشان می‌دهد.

در این مقاله، پتانسیل گسیختگی شیب‌های سنگی معدن مس سونگون با استفاده از روشهای طبقه‌بندی امتیاز توده شیب (SMR)، تحلیل سینماتیکی و پهنه‌بندی به روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) مورد بررسی قرار گرفته است. برای انجام پهنه‌بندی از معیارهای دگرسانی توده‌سنگ، زمین‌شناسی ساختاری، مورفولوژی، ژئومکانیکی، تحلیل سینماتیکی جهت-گیری درزه‌ها نسبت به امتداد دامنه و وضعیت آب‌زیرزمینی درزه‌ها استفاده شده است. هدف اصلی این تحقیق، انتخاب عوامل مؤثر بر گسیختگی، رتبه‌بندی معیارها و تهیه‌ی نقشه‌ی پهنه‌بندی پتانسیل گسیختگی شیب‌های سنگی و پله‌های استخراج معدن مس سونگون می‌باشد.





شکل ۱. راست) عکس ماهواره‌ای (برگرفته از Google earth) و چپ) موقعیت معدن مس سونگون

۲. پهنه‌بندی معدن بر اساس امتیاز توده‌ی شیب (SMR)

برای ارزیابی پایداری شیب‌های سنگی در محدوده مورد مطالعه ابتدا از امتیاز توده‌ی شیب (SMR) بر اساس (رابطه ۱) استفاده گردید(Romana, 1985).

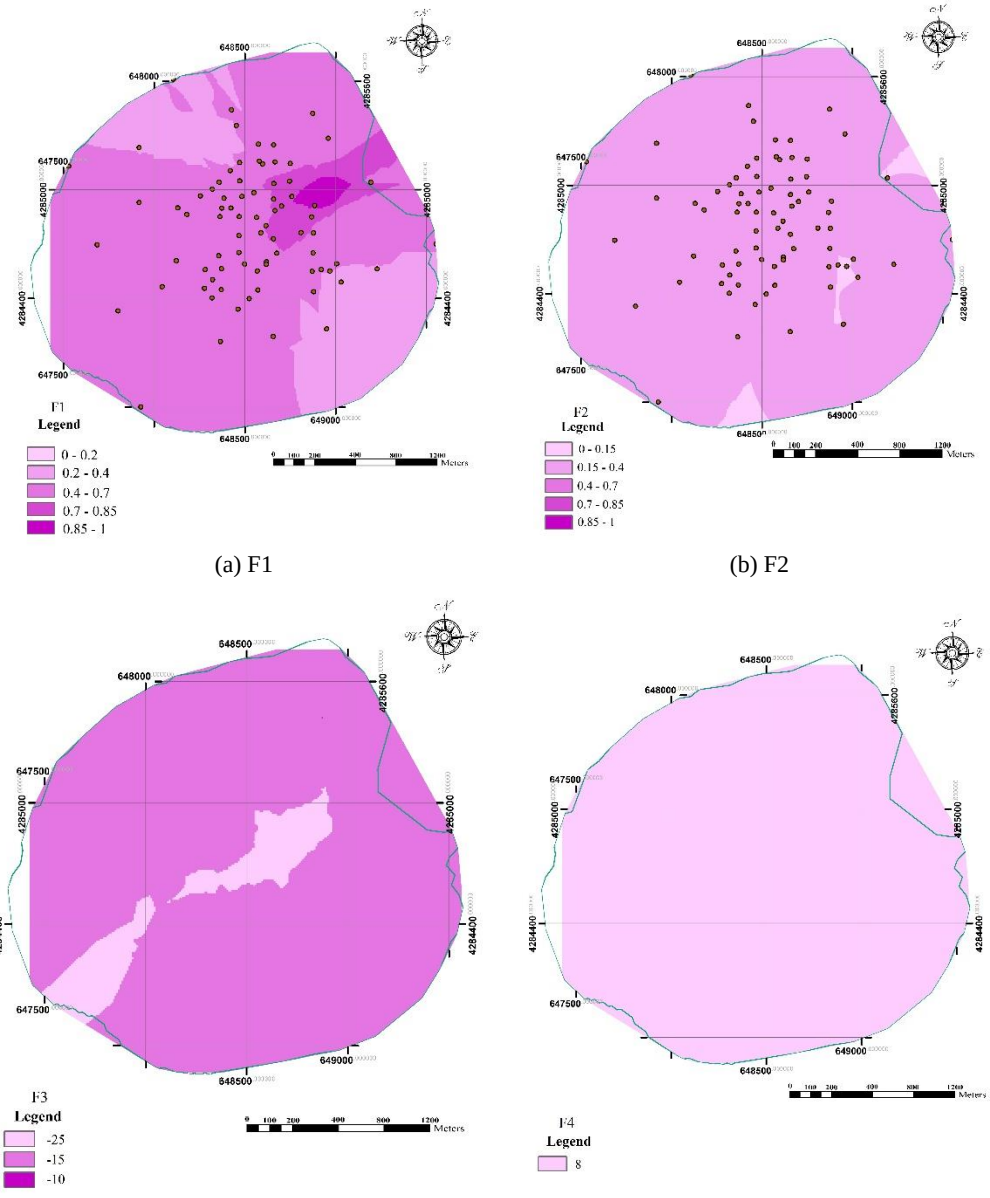
$$SMR = RMR_{basic} - (F1.F2.F3) + F4 \quad \text{رابطه‌ی (۱)}$$

که در آن RMRbasic، طبقه‌بندی ژئومکانیکی پایه برای توده‌ی سنگ بر اساس بنیاوسکی (۱۹۸۹)،F1 ، F2 و F3 ضرایب تصحیح و F4 ضریب وابسته به روش حفاری است.

بر اساس طبقه‌بندی رومانا (Romana, 1985)، ضریبF1 به اختلاف زاویه بین امتداد درزه‌ها و دامنه و ضریب F2 به زاویه شیب درزه بستگی دارند و مقدار آنها بین ۰/۱۵ تا ۱ قرار دارد(شکل۲ a). اگر زاویه شیب درزه کمتر از ۲۰ درجه باشد مقدار امتیاز F2 برابر ۰/۱۵ و زمانی که شیب درزه بیشتر از ٤٥ درجه باشد امتیاز این ضریب برابر یک خواهد بود(شکل۲ b). مقدار ضریب F3 بین صفر تا ٦٠- بسته به مکانیزم گسیختگی، شیب دامنه و درزه، متغیر است(شکل۲ c). ضریب F4 مربوط به تصحیح روش حفاری است. این ضریب شامل شیب طبیعی یا شیب حفاری به روش‌های مختلف پیش‌شکافی، آتشکاری ملایم، آتشکاری معمولی، آتشکاری ضعیف و حفاری مکانیکی است و مقدار این ضریب از ۸- تا ۱۵ بسته به نوع حفاری تغییر می‌کند(شکل۲ d).

امتیاز ژئومکانیکی پایه برای توده‌ی سنگ (RMRbasic) از مجموع امتیازهای مربوط به پارامترهای ضریب کیفی توده‌ی سنگ RQD، فاصله‌داری درزه‌ها، مقاومت فشاری تک محوری، وضعیت درزه‌ها و شرایط آب‌زیرزمینی به دست می-آید(Bieniawski, 1989).

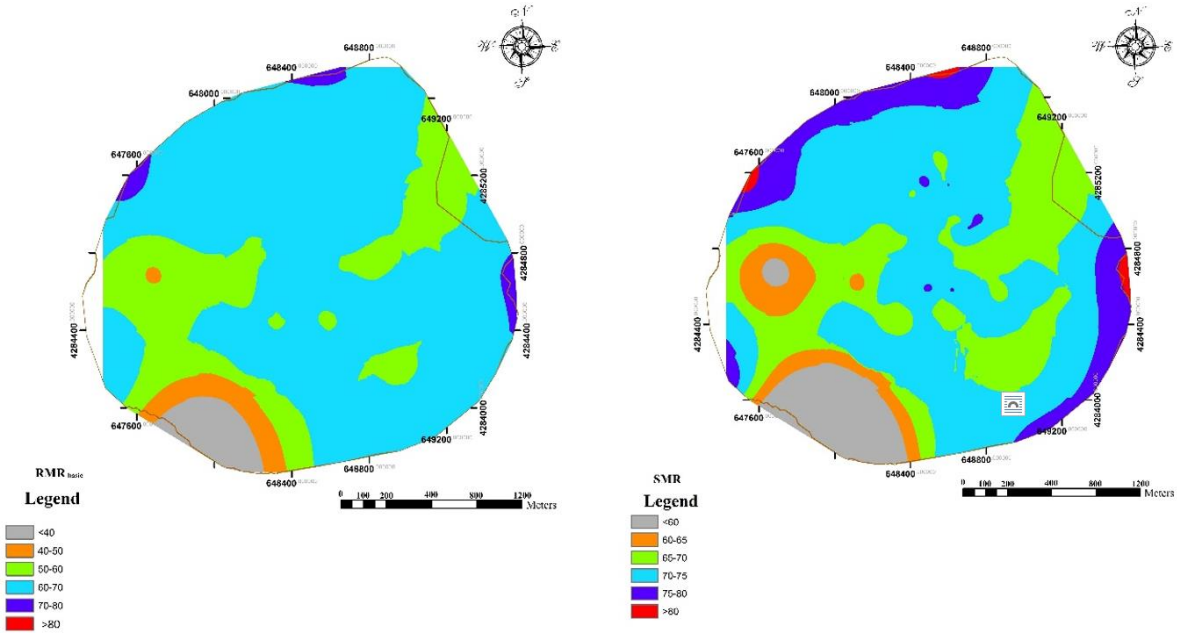
با توجه به اطلاعات ژئومکانیکی مغزه‌ها، میانگین امتیاز توده سنگ پایه برای کل محدوده در حد کمتر از ٤٠ تا ٨٠ بدست آمده است که کمترین آن مربوط به سنگ‌های آرژیلیکی دگرسان شده و بیشترین آن مربوط به زون دگرسانی سریسیتی (فیلیکی) می‌باشد (شرکت مهندسین مشاور ژرفاب، ١٣٨٨). بنابراین با توجه طبقه‌بندی بنیاوسکی، سنگهای محدوده معدن در رده متوسط تا خوب طبقه‌بندی می‌شوند(شکل٣ چپ). مقدار امتیاز توده‌ی شیب (SMR) در محدوده معدن بین کمتر از ٦٠ تا بیش از ٨٠ قرار دارد که بر اساس رومانا (Romana, 1985)، عمده‌ی محدوده‌ی معدن جزو سنگ‌های خوب و پایدار طبقه‌بندی می‌شوند(شکل٣ راست). بر اساس این طبقه-بندی برای اینکه یک شیب ایمن باشد باید امتیاز آن بیش از ٦٠ درصد باشد، لذا بر این اساس، احتمال گسیختگی شیب‌های سنگی فقط در قسمتی از غرب و جنوب‌غربی محدوده‌ی معدن وجود دارد و در سایر نقاط احتمال گسیختگی بسیار کم است.



(a) F1 (b) F2

(d) F4 (c) F3

شکل۲. تغییرات مقادیر F1 تا F4 (نقاط سیاه در نقشه‌های (a) و (b)، موقعیت گمانه‌ها را نشان می‌دهند)



شکل۳. پهنه‌بندی محدوده‌ی معدن بر اساس تغییرات (چپ) RMRbasic (راست) SMR

۳. معیارهای گسیختگی شیب‌های سنگی معدن سونگون

ارزیابی گسیختگی شیب‌های سنگی در معدن مورد مطالعه را می‌توان در پنج معیار کلی شامل دگرسانی، زمین‌شناسی-ساختاری، ژئومکانیکی، مورفولوژی و وضعیت آب‌زیرزمینی درزه‌ها دسته‌بندی کرد که هر کدام از این معیارها ممکن است دارای زیرمعیار باشند (جدول ۱). همچنین معیارهای آتشکاری و زلزله نیز از عوامل مؤثر در گسیختگی شیب‌ها هستند ولی به دلیل یکسان بودن تأثیر آنها در کل محدوده‌ی معدن، در پهنه-بندی مورد استفاده قرار نگرفتند.

جدول۱. معیارهای مؤثر در گسیختگی شیب‌های سنگی

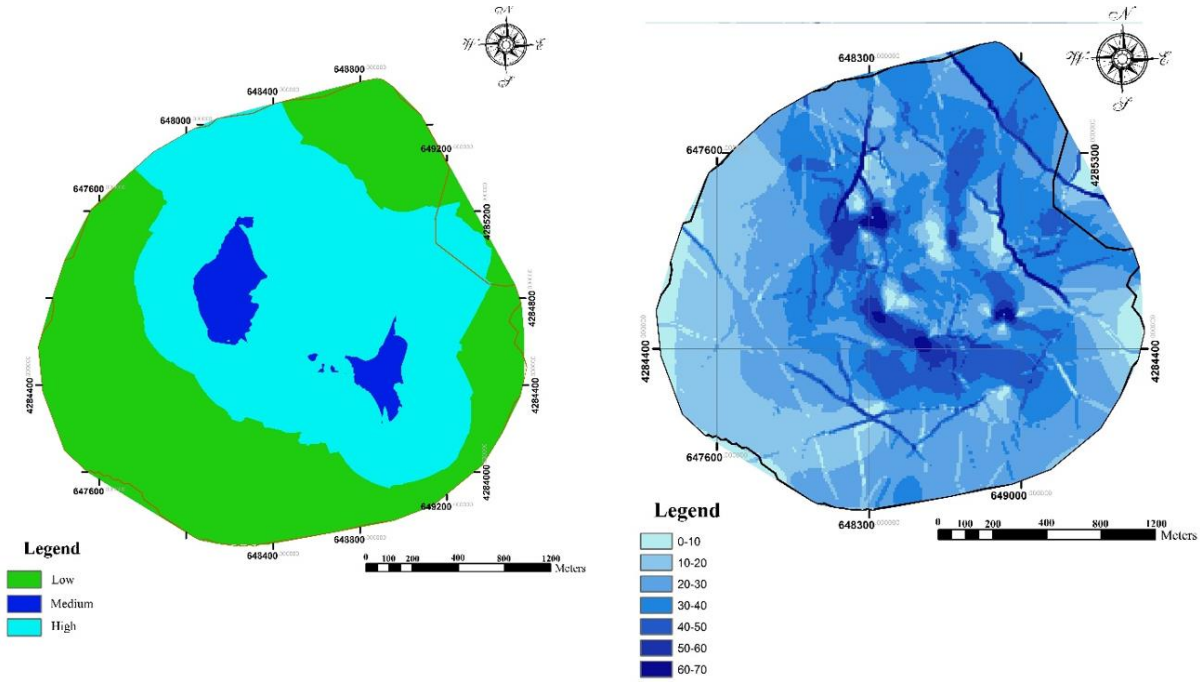
Criteria	Sub criteria	Alternatives
Alteration		low
		medium
		high
Structural geology	condition and spacing of joints	excellent (very rough surfaces, unweathered, very high spacing)
		good (rough surfaces, slightly weathered, high spacing)
		medium (slightly rough surfaces, medium spacing)
		weak (smooth surfaces, very weathered, low spacing)
		very weak (very smooth surfaces, exteremly weathered, very low spacing)
	failure possibility based on joints orientation (%)	0
		1-25
		25-50
		50-75
		>75
Geomechanics	uniaxial compressive strength (MPa)	>250
		100-250
		50-100
		25-50
		<25
Morphology	slope of rocky domains or extraction benches (degree)	0-30
		30-60
		60<
Groundwater condition of joints		completely dry
		inflow <10 lit/min (damp)
		inflow 10-25 lit/min (wet)
		inflow 25-125 lit/min (dripping)
		inflow >125 lit/min (flowing)

۳-۱. زمین‌شناسی و دگرسانی (آلتراسیون)

توده‌ی سنگهای تشکیل دهنده‌ی معدن مس سونگون از لحاظ زمین‌شناسی و دگرسانی به دو بخش مونزونیت پورفیری با دگرسانی غالب از نوع فیلیکی و دایک‌های گرانودیوریتی و دیوریتی با دگرسانی غالب از نوع سریستیک قابل تقسیم‌بندی می‌باشد. در شکل (٤ چپ) پهنه‌بندی محدوده‌ی معدن از لحاظ دگرسانی توده‌ی سنگ تشکیل‌دهنده‌ی نشان داده شده است.

۳-۲. مورفولوژی

مورفولوژی معدن علاوه بر پایداری شیب‌های سنگی بر نوع عملیات معدنکاری، طراحی زهکش‌ها و نوع تجهیزات مورد نیاز برای استخراج نیز تأثیرگذار می‌باشد. با افزایش شیب‌های سنگی و پله‌های استخراج، احتمال گسیختگی افزایش می‌یابد. مقدار شیب عمومی در غالب محدوده‌ی معدن در حد بین ۱۰ تا ۳۰ درجه و در برخی نقاط مقدار شیب بین ۵۰ تا ٦۰ درجه می‌باشد. بطور کلی شیب عمومی معدن ۳۷ درجه و در رمپ‌ها و پله‌های استخراج در حد ٦۷ درجه در نظر گرفته شده است (شکل٤ راست).



شکل٤. پهنه‌بندی معدن مورد مطالعه (چپ) از لحاظ درجه دگرسانی (راست) شیب دامنه‌های سنگی برحسب درجه

۳-۳. زمین‌شناسی ساختاری

پایداری شیب‌های سنگی و مقاومت توده‌ی سنگ تابعی از فراوانی درزه‌هاست. زیرا در سنگ بسیار ترک‌خورده، درزه‌ها می‌توانند به سهولت به هم متصل شوند و زون ضعیفی را ایجاد کنند که موجب کاهش مقاومت، افزایش تغییرشکل‌پذیری و تراوایی توده‌ی سنگ شده و ناپایداری‌ها را سبب می‌شود. هر یک از درزه‌های منطقه با توجه به مشخصات شیب و جهت-شیب، به تنهایی و یا در ارتباط با سایر درزه‌ها می‌توانند گسیختگی‌های صفحه‌ای، گوه‌ای، واژگونی و یا دایره‌ای را در شیب‌ها و پله‌های معدن ایجاد کنند. به همین دلیل شناسایی درزه‌های با پتانسیل ایجاد ناپایداری بر روی شیب‌های سنگی معدن ضروری می‌باشد. بدین منظور عملیات درزه‌نگاری محدوده‌ی معدن در بلوک‌های مختلف معدن انجام گردید (شکل ۵). فراوانی و جهت‌یافتگی دسته‌درزه‌های موجود در محدوده‌ی معدن در جدول (۲) ارائه شده است.

شکل ۵. تصویری انجام عملیات درزه‌نگاری در محدوده‌ی معدن

جدول ۲. مشخصات هندسی سیستم درزه ها و پله های استخراج محدوده معدن مورد مطالعه

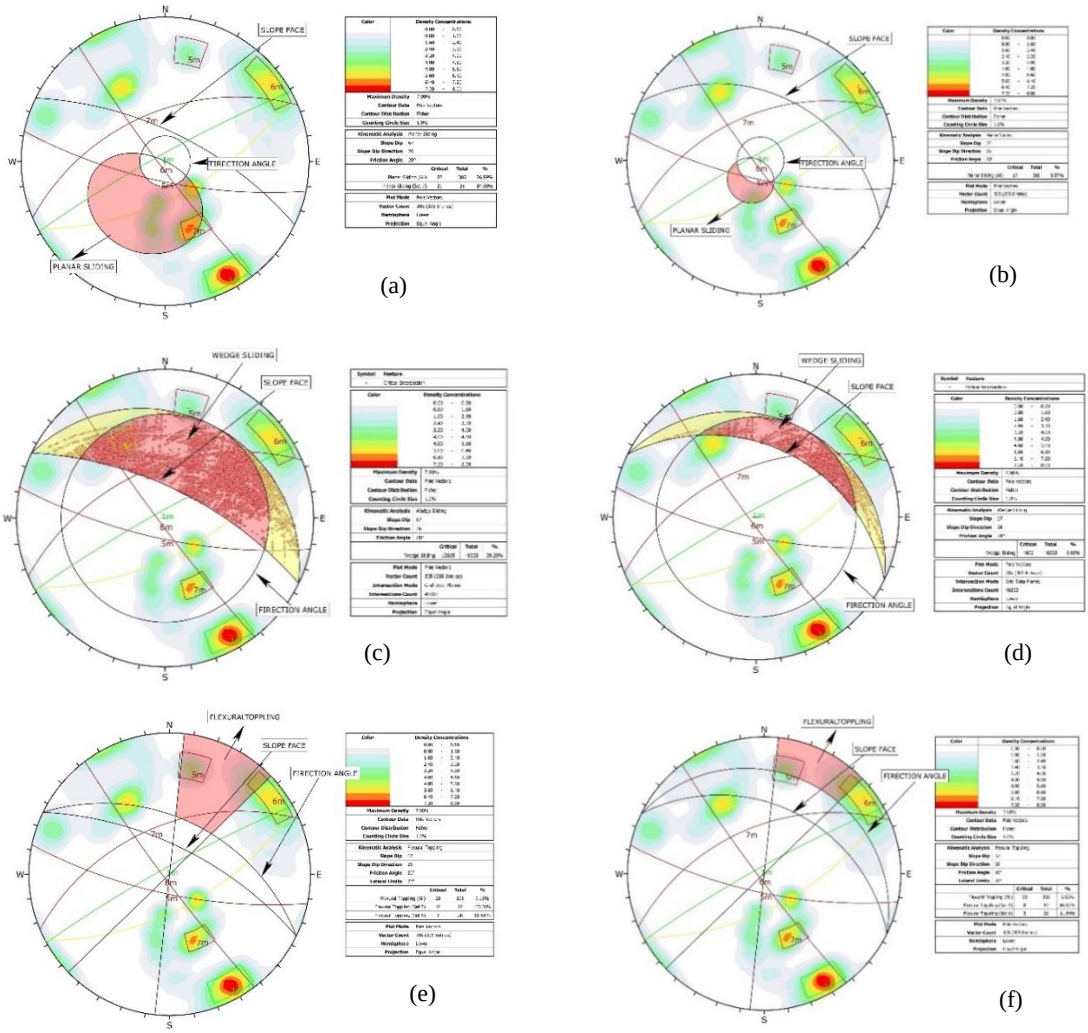
Block No.	Slop orientattion Dip / Dip direction	Extraction benches orientation Dip / Dip direction	Number of joints	Joints Dip / Dip direction					Possibility of failure (%)		
				J. Set 1	J. Set 2	J. Set 3	J. Set 4	J. Set 5	Plane Failure	Wedge Failure	Toppling Failure
1	37/143	67/143	231	85/133	87/332	81/095	79/011	-	18	8	100
2	37/143	67/143	360	83/175	56/226	78/261	74/349	-	3	85	12
3	37/143	67/143	300	80/273	79/351	-	-	-	7	19	8
4	37/090	67/090	320	84/248	84/166	30/352	-	-	4	16	40
5	37/090	67/090	252	78/270	-	-	-	-	6	10	100
6	37/026	67/026	252	76/274	17/096	82/173	-	-	15	8	15
7	37/026	67/026	250	76/265	17/096	82/170	84/101	-	14	20	100
8	37/089	67/089	250	73/349	76/176	83/330	-	-	18	25	66
9	37/026	67/026	305	84/331	62/152	74/192	85/233	52/337	84	37	100
10	37/026	67/026	275	84/332	52/328	74/192	85/234	-	6%	20	72

برای بررسی پتانسیل وقوع هر کدام از گسیختگی صفحه‌ای، گوه‌ای و واژگونی ناشی از تداخل دسته‌درزه‌ها و امتداد و شیب دامنه و پله‌های استخراج و از تحلیل سینماتیکی با نرم‌افزار Dips و با فرض زاویه اصطکاک درزه‌ها در حد ۲۰ درجه استفاده گردید. در شکل (٦) نمونه‌ای از تحلیل سینماتیکی نشان داده شده است. نقشه‌ی بلوک‌بندی و انواع گسیختگی محتمل در هر کدام از بلوک‌های درزه‌برداری شده بر اساس نتایج تحلیل سینماتیکی در شکل (۷) نشان داده است. در بلوکهای ۲، ۳ و ٦ که احتمال وقوع گسیختگی‌ها کمتر از ۲۰ درصد است به عنوان پایدار در نظر گرفته شده‌اند.

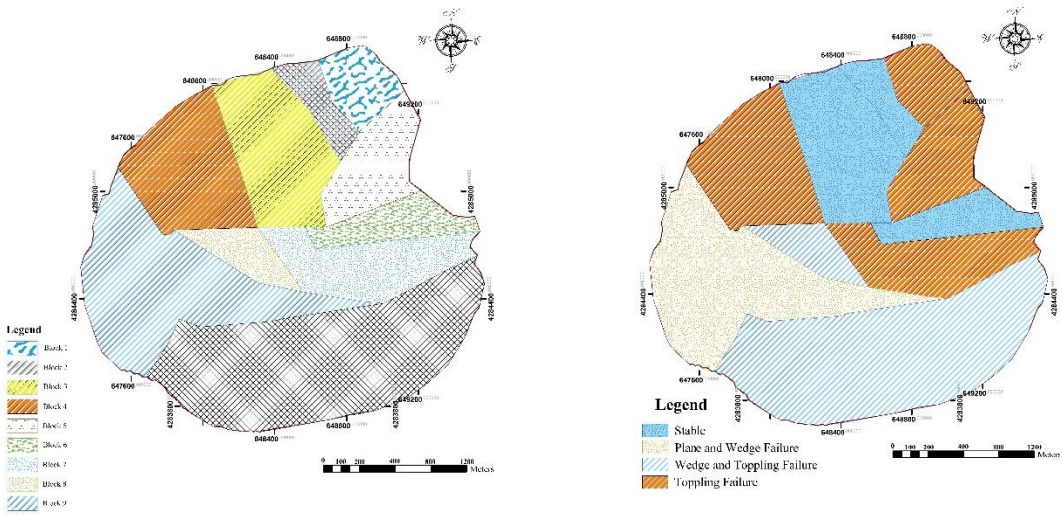
نتایج این تحلیل نشان داد که امکان وقوع گسیختگی صفحه‌ای و گوه‌ای در قسمت غربی معدن بیشتر بوده و در قسمت جنوبی معدن زمینه‌ی گسیختگی‌ها از نوع گوه‌ای و واژگونی بیشتر است. در نیمه شمالی بخشی از معدن پایدار بوده و در بخشی دیگر زمینه وقوع گسیختگی واژگونی بیشتر است. پهنه‌بندی خصوصیات و فاصله‌داری درزه‌ها و نتایج تحلیل سینماتیکی به منظور استفاده در فرآیند تحلیل سلسله مراتبی در شکل (۸) نشان داده شده است. در این پهنه‌بندی، محدوده‌ی معدن به پنج قسمت مختلف بر اساس احتمال وقوع هر کدام یک از انواع گسیختگی رده‌بندی شده است. در مناطقی که زمینه‌ی وقوع حتی یک نوع گسیختگی وجود داشته (حتی کمتر از ۲۰ درصد)، احتمال وقوع آن مدنظر قرار گرفته و در نقاطی که زمینه‌ی وقوع چند نوع گسیختگی وجود داشته حداکثر احتمال وقوع در نظر گرفته شده است.

۳-٤. ژئومکانیکی

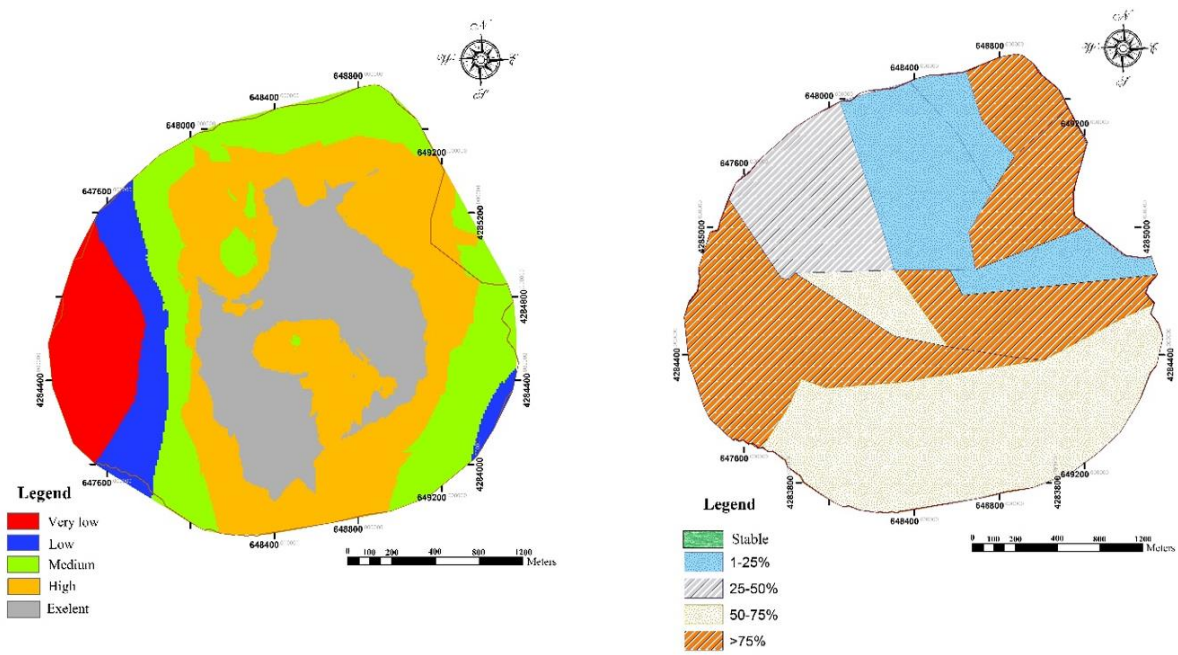
در این مطالعه از مقاومت فشاری تک محوری (UCS) به عنوان معیارهای ژئومکانیکی مؤثر در گسیختگی شیب‌های سنگی استفاده گردید. بر اساس نتایج آزمایشهای آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های حاصل از مغزه‌های حفاری، مقاومت فشاری تک محوری سنگ در محدوده معدن در عمدتاً محدوده‌ی ۱۰۰ تا ۲۵۰ مگاپاسکال و در قسمت مرکزی معدن کمی بیشتر از ۲۵۰ مگاپاسکال را بدست آمده است (شکل۹).



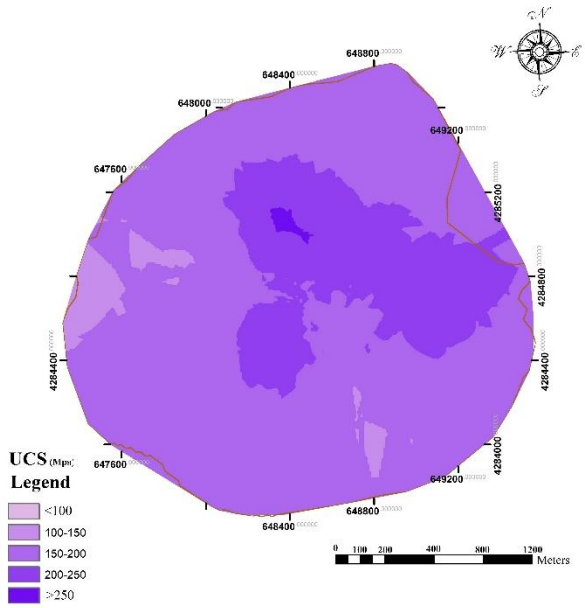
شکل ٦. نمونه‌ای از تحلیل سینماتیکی برای بلوک شماره ۹ a) صفحه‌ای با شیب ۳۷ درجه b) صفحه‌ای با شیب ٦۷ درجه c) گوه‌ای باشیب ۳۷ درجه d) گوه‌ای با شیب ٦۷ درجه e) واژگونی با شیب ۳۷ درجه f) واژگونی با شیب ٦۷ درجه



شکل ۷. (چپ) بلوک‌های عملیات درزه‌نگاری (راست) نوع گسیختگی محتمل در محدوده‌ی معدن بر اساس تحلیل سینماتیکی (مناطق با احتمال کمتر از ۲۰ درصد به عنوان پایدار در نظر گرفته شده است)



شکل ۸. (چپ) نقشه‌ی پهنه‌بندی وضعیت و فاصله‌داری درزه‌ها (راست) احتمال وقوع گسیختگی بر اساس تحلیل سینماتیکی



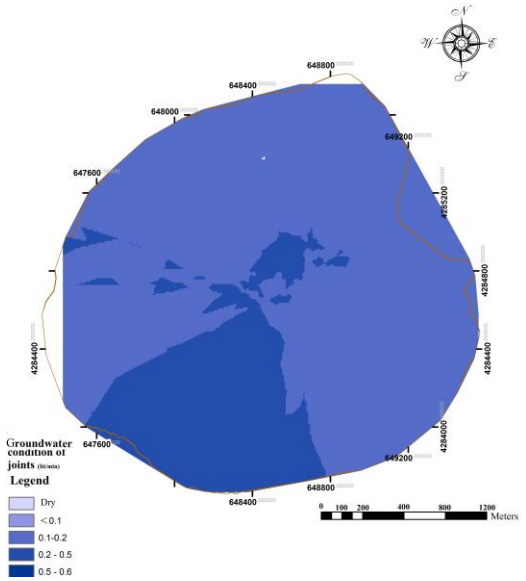
شکل۹. تغییرات مقاومت فشاری تک‌محوری (UCS)

۳-۵. وضعیت آب‌زیرزمینی در درزه‌ها

وضعیت آب زیرزمینی موجود در درزه‌ها نقش مهمی در پایداری شیب‌های سنگی ایفا می‌کند. حضور آب در درزه‌ها همواره باعث افزایش فشار منفذی و کاهش مقاومت برشی می‌شود و بنابراین در مناطق با اقلیم پر بارش، وضعیت سطح آب درزه‌ها باید همواره در تحلیل پایداری شیب های سنگی مدنظر قرار گیرد.

توده‌سنگهای سطحی از جنس گدازه‌های تراکیتی و تراکی-آندزیتی که ارتفاعات محدوده مورد بررسی را تشکیل داده‌اند، به دلیل درزه‌داری فراوان، آب‌های سطحی ناشی از نزولات جوی و ذوب برف را از خود عبور داده و به طبقات زیرین که شامل توده‌ی دگرسان شده مونزونیت پورفیری با خردشدگی فراوان هستند، منتقل می‌نمایند. در مناطقی که سطح آب زیرزمینی در عمقهای کمتری قرار دارد بدلیل پرشدگی درزه و اشباع شدن لایه سطحی، امکان نشت و جریان آن وجود دارد.

در شکل (۱۰) تغییرات وضعیت آب زیرزمینی برداشت شده در عملیات درزه‌نگاری نشان داده شده است. همانطور که ملاحظه می‌شود مقدار رطوبت موجود در درزه‌های محدوده جنوبی و جنوب‌غربی معدن و بطور پراکنده در نقاط مرکزی معدن نسبت به سایر نقاط بیشتر است.



شکل ۱۰. وضعیت آب‌زیرزمینی درزه‌ها

٤. تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

فرآیند تحلیل سلسه مراتبی شامل گام های زیر می-باشد(Lee et al., 2008; Bogdanovic et al., 2012):

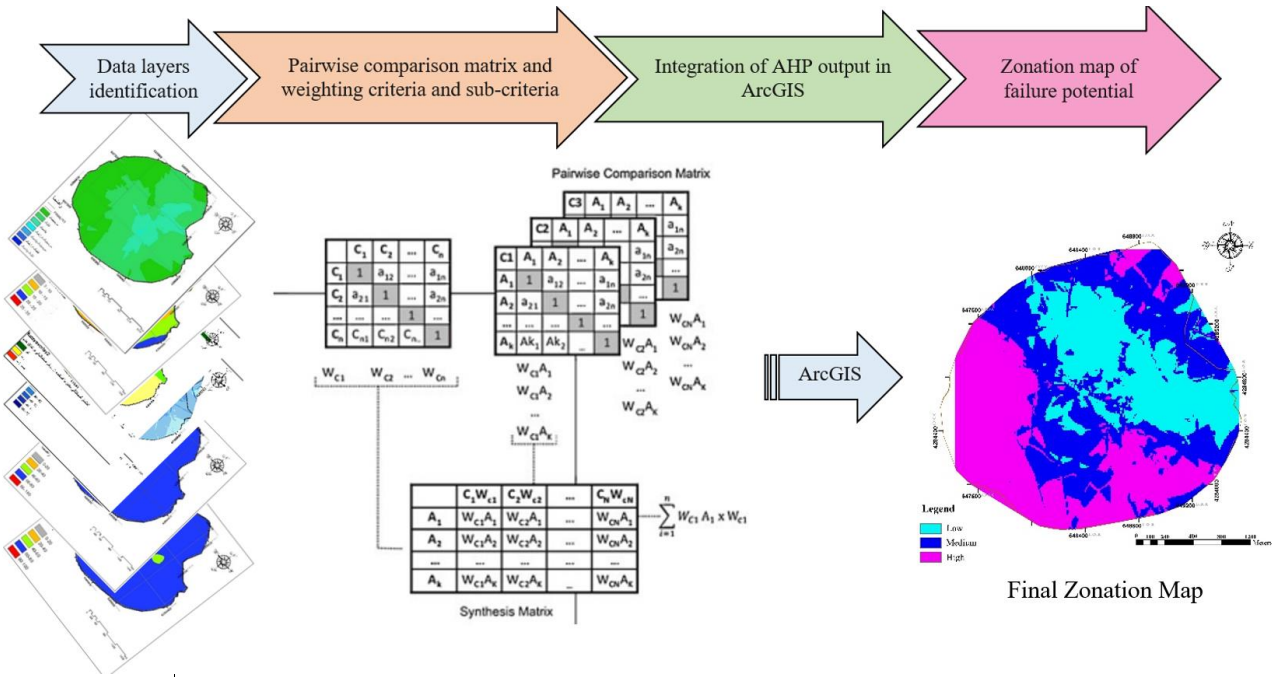
الف) تشکیل ساختار تحلیل سلسله مراتبی (شامل هدف، معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها)

ب) مقایسه‌های زوجی و تعیین ضریب اهمیت معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها

ج) محاسبه وزن و تعیین امتیازدهی نهایی

د) محاسبه نرخ سازگاری (Inconsistency ratio)

در شکل (۱۱) تصویر شماتیکی از مراتب انجام تحلیل سلسله مراتبی نشان داده شده است. در این روش پس از تعیین معیارهای دخیل در هدف مورد بررسی، اهمیت هر معیار نسبت به سایر معیارها با تشکیل ماتریس مقایسه زوجی و با استفاده از اعداد ویژه‌ای مشخص می‌گردد. طیف اعداد مورد استفاده برای نشان دادن اهمیت هر کدام از معیارها بر اساس ساعتی در جدول (۳) نشان داده شده است (Saaty, 1980). این عدد از ۱ برای معیارهای با اهمیت یکسان شروع و تا اهمیت مطلق یعنی عدد ۹ ختم می‌شود.



شکل ۱۱. نمایش شماتیکی از مراحل پهنه‌بندی با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP)

جدول۳. طیف اعداد مقایسه زوجی (Saaty, 1980)

Definition	Intensity of importance
Extreme importance	9
Very strong importance	7
Strong importance	5
Moderate importance	3
Equal importance	1
Intermediate values	2,4,6,8

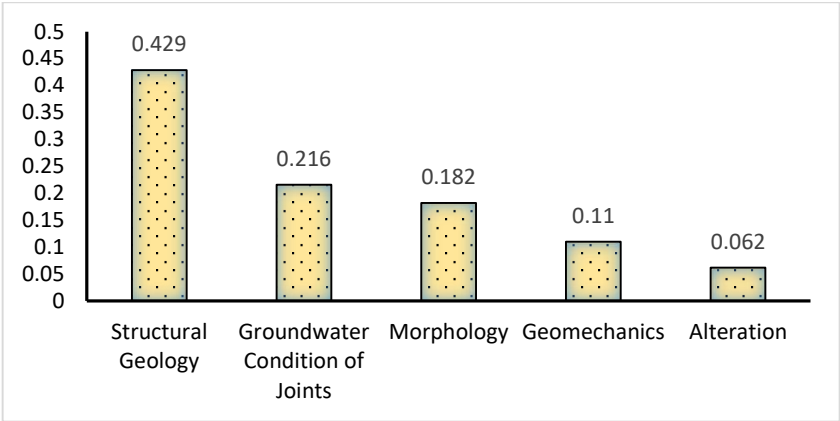
بعد از مقایسه زوجی پارامترها، وزن نسبی معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها که در واقع نشان‌دهنده اهمیت آنها محاسبه می‌شود. از تلفیق وزن‌های نسبی، وزن نهایی هر گزینه بدست می‌آید. برای محاسبه وزن، ابتدا اعداد متعلق به هر ستون ماتریسی را جمع کرده، سپس هر عضو ماتریس به جمع اعداد آن ستون تقسیم می‌گردد. ماتریس جدیدی که به این صورت بدست می‌آید ماتریس مقایسات نرمال شده نامیده می‌شود. میانگین اعداد هر سطر از ماتریس مقایسات نرمال شده، وزن نسبی معیار و زیرمعیارهای پهنه را با سطرهای ماتریس ارائه می‌کند. به منظور رتبه بندی گزینه‌های تصمیم، در این مرحله بایستی وزن نسبی هر معیار را در وزن معیار بالاتر ضرب شود تا وزن نهایی آن بدست آید. به عبارتی دیگر وزن هر گزینه نسبت به معیارها، سهم آن گزینه در معیار مربوط می‌باشد. لذا وزن نهایی هر گزینه از مجموع حاصل‌ضرب وزن هرمعیار در وزن گزینه از آن معیار بدست می‌آید. با توجه به جدول (٤) وزن نسبی معیارهای مورد استفاده در این مطالعه با استفاده از نرم‌افزار Eexpert Choice و با استفاده از روش مجموع سطری بدست آمده است.

بر این اساس معیار زمین‌شناسی ساختاری بالاترین وزن نسبی را به خود اختصاص داده است و پس از آن به ترتیب معیارهای وضعیت سطح آب‌زیرزمینی درزه‌ها، مورفولوژی، ژئومکانیکی و دگرسانی وزن نسبی بیشتر را به خود اختصاص می‌دهند(شکل ۱۲). وزن‌دهی زیرمعیارها و گزینه‌ها بر اساس اهمیت آنها در گسیختگی در جدول (۵) ارائه شده است.

بنابراین انتخاب آگاهانه وقضاوت صحیح در وزن‌دهی تأثیر خیلی زیادی در نتیجه تحلیل خواهد داشت. لذا از ضریبی به نام «نرخ سازگاری» برای تعیین میزان هماهنگی بین نتایج استفاده می‌گردد. چنانچه این ضریب کوچکتر از یک دهم باشد، سازگاری در قضاوت‌ها مورد قبول است و در غیر این صورت لازم است در قضاوت‌ها تجدیدنظر شود (Saaty, 1980).

جدول٤. ماتریس مقایسه زوجی و وزن‌دهی معیارها

Criteria	Structural geology	Groundwater condition of joints	Morphology	Geomechanics	Alteration	Priorities
Structural geology	1	3	5	2	5	0.429
Groundwater condition of joints	1/3	1	2	1/2	5	0.216
Morphology	1/5	1/2	1	1/2	3	0.182
Geomechanics	1/2	2	2	1	2	0.110
Alteration	1/5	1/5	1/3	1/2	1	0.062
Inconsistency ratio = 0.06						1



شکل ۱۲. اهمیت معیارها نسبت به هم

جدول ۵. وزن‌دهی معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها

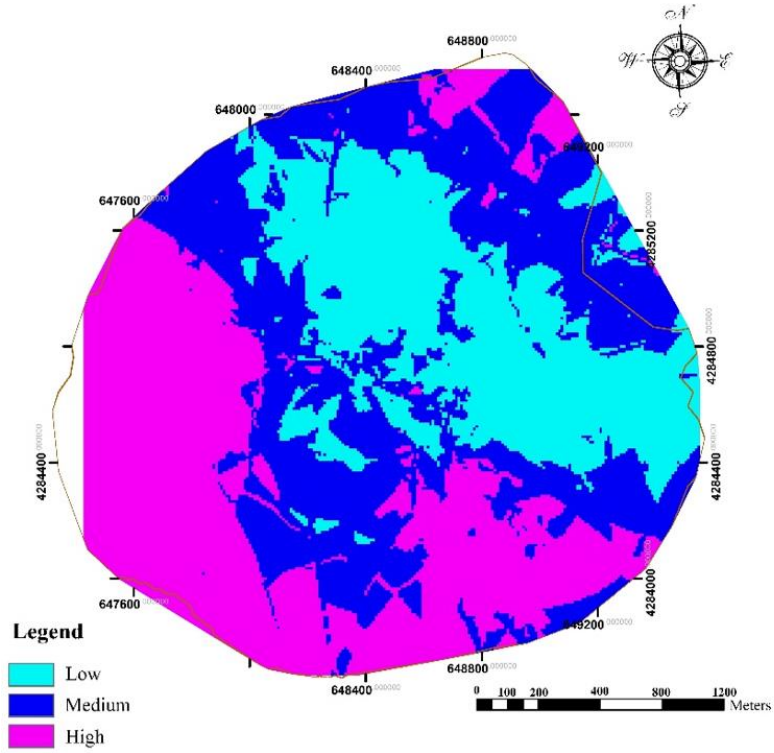
Criteria	Sub-criteria	Alternatives	Weight of criteria	Weight of Sub-criteria	Weight of alternatives	Inconsistency ratio	Total weight of Sub criteria
Alteration		low	0.062	1	0.105	0.04	0.062
		medium			0.257		
		high			0.627		
Structural geology	condition and spacing of joints	excellent	0.429	0.25	0.033	0.05	0.107
		high			0.063		
		medium			0.129		
		weak			0.261		
		very weak			0.513		
	failure possibility based on joints orientation (%)	0		0.75	0.033	0.05	0.332
		1-25			0.063		
		25-50			0.129		
		50-75			0.261		
		>75			0.513		
Geomechanics	uniaxial compressive strength (MPa)	>250	0.110	1	0.033	0.05	0.110
		100-250			0.063		
		50-100			0.129		
		25-50			0.261		
		<25			0.513		
Morphology	slope of rocky domains or extraction benches (degree)	0-30	0.182	1	0.105	0.04	0.182
		30-60			0.257		
		60-90			0.627		
Groundwater condition of joints		dry	0.216	1	0.033	0.05	0.16
		damp			0.063		
		wet			0.129		
		dripping			0.261		
		flowing			0.513		

۵. پهنه‌بندی پتانسیل گسیختگی

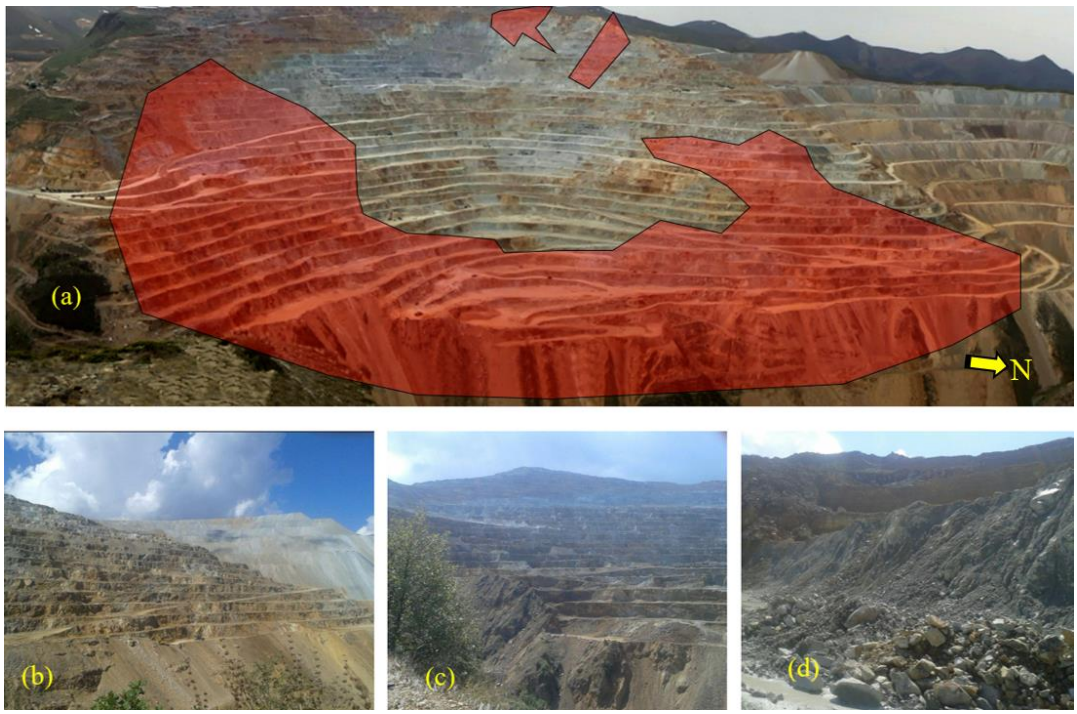
برای تهیه نقشه‌ی پهنه‌بندی پتانسیل گسیختگی، ابتدا معیارهای دخیل در پایداری شیب‌ها شامل دگرسانی، ساختاری، ژئومکانیکی، مورفولوژی و وضعیت آب زیرزمینی درزه‌ها انتخاب شده و سپس با استفاده از ماتریس مقایسه زوجی ارزش و اهمیت هر کدام نسبت به همدیگر مشخص گردید. سپس هر کدام از معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌ها با استفاده از روش مجموع سطری وزن‌دهی شده و بصورت لایه‌ای از اطلاعات در نرم‌افزار ArcGIS پهنه‌بندی شدند. در نهایت از تلفیق لایه-های اطلاعاتی بدست آمده، نقشه پهنه‌بندی گسیختگی برای کل محدوده مورد مطالعه به دست آمده است. طبق نتایج حاصله، مناطق غربی، جنوبی، جنوب‌شرقی و بطور پراکنده در قسمت شمالی که با رنگ بنفش مشخص شده است، جزو مناطقی هستند که پتانسیل وقوع گسیختگی زیاد است که تقریباً حدود

۳۰ تا ٤٠ درصد از محدوده‌ی معدن را شامل می‌شود (شکل ۱۳).

در شکل (١٤) تصاویری از محدوده‌ی معدن و پهنه‌های مختلف آن با پتانسیل گسیختگی نشان داده شده است.



شکل ۱۳. نقشه‌ی پهنه‌بندی پتانسیل گسیختگی در محدوده‌ی معدن مورد مطالعه



شکل ١٤. (a) تصویری از مناطق با پتانسیل وقوع گسیختگی در محدوده‌ی معدن (b) پهنه‌ی شمال‌شرقی (c) پهنه‌ی جنوبی و (d) پهنه‌ی غربی

٦. نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای بررسی پتانسیل گسیختگی شیب‌های سنگی در محدوده‌ی معدن مس سونگون از تلفیق روشهای امتیاز توده‌ی شیب (SMR)، تحلیل سینماتیکی با استفاده از نرم‌افزار Dips 6.0 و تحلیل سلسله مراتبی (AHP) استفاده شده است. بر اساس طبقه‌بندی امتیاز توده‌ی شیب، احتمال گسیختگی شیب‌های سنگی فقط در قسمتی از غرب و جنوب غربی محدوده معدن وجود دارد. نتایج تحلیل سینماتیکی نشان داد که امکان وقوع گسیختگی صفحه‌ای و گوه‌ای در قسمت غربی معدن بیشتر بوده و در قسمت جنوبی معدن زمینه‌ی گسیختگی‌ها از نوع گوه‌ای و واژگونی بیشتر است. در بخشی از نیمه شمالی معدن زمینه‌ی وقوع گسیختگی واژگونی وجود دارد.

برای پهنه‌بندی به روش تحلیل سلسله مراتبی، ابتدا معیارها، زیرمعیارها و گزینه‌های مؤثر در ناپایداری شیب‌های سنگی شناسایی شدند. سپس براساس میزان اهمیت، معیارها و زیرمعیارها نسبت به یکدیگر با تشکیل ماتریس مقایسه زوجی و با استفاده از نرم‌افزار Expert Choice به روش مجموع سطری وزن‌دهی شدند. با توجه به نقشه‌ی پهنه‌بندی گیسختگی تهیه شده از هم‌پوشانی لایه‌های اطلاعاتی در محیط GIS، محدوده مورد مطالعه به سه دسته با احتمال وقوع گسیختگی کم، متوسط و زیاد تقسیم‌بندی گردید. بر این اساس، همانطوری که در پیمایش‌های میدانی هم مشاهده گردید در مناطق غربی، جنوبی، جنوب‌شرقی و بصورت پراکنده قسمتی از شمال محدوده‌ی معدن بویژه در پله‌های استخراج، پتانسیل گسیختگی بیشتر است. بررسی‌ها نشان می‌دهد بین نتایج بدست آمده از روشهای مورد استفاده در این تحقیق، همخوانی خوبی وجود دارند ولی استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی بخاطر اینکه سایر معیارهای دخیل در گسیختگی نیز در نظر گرفته می‌شود نتایج بهتری می‌دهد. در ادامه مطالعات، برای بدست آوردن میزان ضریب اطمینان در برابر گسیختگی در مناطق شناسایی شده بویژه برای اعمال اثرات زلزله و ارتعاشات ناشی از انفجار و آتشباری، از روش‌های مدلسازی عددی استفاده خواهد شد تا در صورت لزوم از روشهای پایدارسازی مناسب و یا کاهش ارتفاع و شیب دامنه استفاده گردد.

تشکر و قدردانی: بدینوسیله از کمکهای ارزنده آقای مهندس حبیب شمسی بویژه در جمع‌آوری داده‌های میدانی و داوران محترم مقاله که نظراتشان بسیار مفید واقع گردید تشکر و قدردانی می‌شود.

منابع

دهبان، م.، غفوری، م.، لشکری‌پور، م.، زارع صفت، م.، سیار، ا.، ۱۳۹۳. ارزیابی پتانسیل زمین لغزش در مخزن سد خاکی پلرود با رویکرد چند معیاره فازی، مجله زمین‌شناسی مهندسی، دوره ۷، شماره ۱ و۲، ۱ تا ١٤.

رحیمی‌شهید، م.، رحیمی، ن.، ۱۳۹٦. پهنه‌بندی خطر زمین لرزه با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و سامانه اطلاعات جغرافیایی، یافته‌های نوین زمین شناسی‌کاربردی، دوره ۱۱، شماره ۲۲، ۱۰۹ تا ۱۱۸.

ستایشی‌راد، م.، نیکودل، م.، ارومیه‌ای، ع.، ۱۳۸۹. بررسی خطر زمین‌لغزش به روشAHP در ساحل دریای خزر، مجله زمین‌شناسی مهندسی ایران، دوره ۳، شماره ۱ و ۲، ۱تا ١٤.

شرکت مهندسین مشاور زمین ژرفاب.، ۱۳۸۸. مطالعه میزان ریسک پایداری و سیستم رفتار نگاری دیواره مشرف به نوار نقاله و سنگ شکن، گزارشات زمین‌شناسی و تحلیل پایداری، ارائه سیستم پایدارسازی و طراحی سیستم پایش، شرکت ملی صنایع مس ایران مجتمع مس سونگون.

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

Bieniawski, Z.T., 1989. Engineering Rock Mass Classification. Wiley, New York, 251.

Bogdanovic, D., Nikolic, D. and Ilic, I., 2012. Mining method selection by integrated AHP and PROMETHEE method. Anais da Academia Brasileira de Ciências, 84(1): 219-233.

Hirnawan, F., 2010. Slope instability zoning mapping of landslide hazardous area for the stabilization system (3991), FIG Congress 2010, Facing the Challenges – Building the Capacity, Sydney, Australia.

Kasap, Y., Subasi E., 2017. Risk assessment of occupational groups working in open pit mining: Analytic Hierarchy Process. Journal of Sustainable Mining, 16 (2): 38-46.

Lee, A.H., Chen, W.C. and Chang, C.J., 2008. A fuzzy AHP and BSC approach for evaluating performance of IT department in the manufacturing industry in Taiwan. Expert systems with applications, 34(1): 96-107.

Luo, H., He, Y., Li, G. and Li, J., 2016. Slope stability analysis of open pit mine based on AHP and entropy weight method. International Journal of Security and Its Applications, 10(3): 283-294.

Lo, C.M., Feng, Z.Y. and Chang, K.T., 2018. Landslide hazard zoning based on numerical simulation and hazard assessment. Geomatics, Natural Hazards and Risk, 9(1): 368-388.

Noorollahi. Y., Sadeghi. S., Yousefi. H., Nohegar. A., 2018. Landslide Modelling and Susceptibility Mapping Using Ahp and Fuzzy Approaches. International Journal of Hydrology, 2(2): 137-148.

Romana, M., 1985. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. In Proceedings of the international symposium on role of rock mechanics. Zacatecas, Mexico, 49-53.

Saaty, TL., 1980. The analytical hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation. McGraw Hill, New York.

Qi, K., Tan, Z. and Li, W., 2017. Stability analysis and optimum reinforcement design for an intense weathered rock slope. Earth and Environmental Science, 64(1)

Yazdadi, EA., and Ghanavati, E., 2017. Landslide Hazard Zonation by Using AHP (Analytical Hierarchy Process) Model in GIS (Geographic Information System) Environment (Case Study: Kordan Watershed). Research Journal of Applied Sciences, 12: 161-173.