مجله انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران
تابستان ۱۴۰۱، جلد پانزدهم، شماره ۲ صفحه ۹۱ تا ۱۱۲

بررسی ناپایداری ترانشه‌های معدن روباز مس سونگون با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)

رضا بابازاده *[۱]، ابراهیم اصغری کلجاهی[۲]

دریافت مقاله: ۱۳۹۹/۱۱/۰۲ پذیرش مقاله: ۱۴۰۱/۰۱/۲۱

چکیده

بهره‌برداری بهینه و پایدار از یک معدن روباز نیازمند توجه خاص به مسائل ژئوتکنیکی و بررسی پایداری شیبها و ترانشه‌های پیرامونی می‌باشد. چنین بررسی‌هایی بایستی بطور مستمر انجام شده و نتایج حاصله در طراحی معدن و همچنین مطالعات توسعه‌ای مورد استفاده قرار گیرد. فاکتورهای موثر در ناپایداری شیبهای معادن روباز متنوع بوده و بایستی در ارزیابی ریسک، شناسایی شده و مورد بررسی قرار گیرند. در این مطالعه، سعی شده که مهمترین فاکتورهای موثر در ناپایداری ترانشه‌های معدن مس سونگون واقع در آذربایجان شرقی شناسایی شده و بر اساس میزان اهمیت رتبه بندی گردند. برای این منظور روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) مورد استفاده قرار گرفته است. در مرحله اول، با تهیه پرسشنامه‌ای از متخصصین شاغل در این زمینه نظرخواهی شده و بر این اساس مهمترین فاکتورهای ریسک در ۳ لایه گردآوری و سپس ساختار سلسله مراتبی ترسیم گردیده است. در مرحله بعدی با استفاده از روش سلسه مراتبی فازی، وزن نسبی هر کدام از فاکتورها در رابطه با ریسک ناپایداری شیب محاسبه شده و میزان اهمیت هر کدام از آنها تعیین گردیده است. نتایج بررسی‌های میدانی و پایش طولانی مدت رفتار شیبهای معدن نیز با نتایج به دست آمده از روش تحلیلی مقایسه شده و مورد بررسی قرار گرفته است. بر این اساس فاکتور تاخیر در عملیات معدنکاری (لایه ۱)، گسیختگی با ابعاد وسیع (بیش از یک پله) (لایه ۲) و سیستم ناپیوستگی (لایه ۳) دارای بیشترین اهمیت در ارزیابی ریسک ناشی از ناپایداری ترانشه های معدن مس سونگون تشخیص داده شده است.

کلید واژه‌ها: *معدن مس سونگون، ناپایداری ترانشه، فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی، ارزیابی ریسک*

۱. پژوهشگر فرادکتری زمین شناسی مهندسی، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز babazadeh64@gmail.com
۲. دانشیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز e-asghari@tabrizu.ac.ir
* مسئول مکاتبات

۱. مقدمه

به منظور کاهش حجم عملیات باطله‌برداری جهت رسیدن به توده معدنی در عملیات استخراج معادن روباز، معمولا شیب دیواره‌های اطراف معدن تا حد امکان زیاد در نظر گرفته می-شود. همچنین با توجه به افزایش عمق معدنکاری در معادن فعال و بزرگ، ناپایداری شیب در مقیاسهای بزرگی می‌تواند روی داده و در نهایت باعث ایجاد ناپایداری کل معدن شود. به منظور دستیابی به برداشت ایمن و اقتصادی در معادن روباز، هدف اصلی طراحی شیب یا شیب‌هایی برای جلوگیری از وقوع ناپایداریهایی هست که ممکن است باعث ایجاد خسارات جانی شده و یا روند استخراج ماده معدنی را مختل نماید. بنابر این، در طراحی شیب پیت (Pit) نهایی معدن علاوه بر در نظر گرفتن توزیع عیار ماده معدنی و نیز هزینه‌های تولید، بایستی ملاحظات مربوط به خصوصیات ژئوتکنیکی مواد تشکیل دهنده شیبهای معدن و نیز ناپیوستگیهای موجود در نظر گرفته شوند. در مواردی مشاهده می‌شود که گسیختگی‌های روی داده در شیبها می‌تواند اقتصادی بودن معدنکاری را تحت تاثیر قرار دهد. بنابر این ارزیابی پیوسته پایداری شیبهای نهایی معدن بخش مهمی از یک برنامه جامع در معادن روباز می‌باشد. از آنجایی که وجود ناپیوستگیها و نیز خصوصیات آنها می‌تواند نقش مهمی در پایداری شیبهای سنگی داشته باشد، ارزیابی آنها نقش بارزی در طرحهای پایدارسازی خواهد داشت. بررسی‌های ژئوتکنیکی انجام شده به هنگام بهره برداری از معادن روباز عمدتا شامل مطالعات پایداری شیبها می‌باشد. داده‌های ژئوتکنیکی معمولا به عنوان یک فاکتور با عدم قطعیت زیاد در طراحی معادن روباز شناخته می‌شوند و بنابر این بیانگر یک نوع ریسک مهم در هر پروژه معدنی می‌باشند. با فراهم شدن داده بیشتر، ریسک مواجهه با شرایط غیرقابل پیش بینی کاهش یافته و بنابر این ایمنی محیط و همچنین میزان بهره برداری افزایش می‌یابد (Bye and Bell, 2001).

در یک معدن روباز، طراحی شیبها یکی از مسائل چالش برانگیز در تمام مراحل طراحی و عملیات است. چنین اقداماتی عمدتا نیازمند درک صحیحی از زمین شناسی معدن (که دارای شرایط پیچیده‌ای در مجاورت توده معدنی است) و همچنین خصوصیات مصالح می‌باشد. ناپایداری های کنترل نشده در معادن می‌توانند منجر به نتایج ناخواسته‌ای گردند که برخی از آنها به شرح زیر است (Canmet, 1977):

۱: فاکتورهای اجتماعی/ ایمنی از قبیل تلفات جانی، کاهش میزان درآمد کارگران و کاهش روحیه همکاری.

۲: فاکتورهای اقتصادی شامل اختلال در عملیات معدنکاری، استهلاک تجهیزات و ماشین آلات معدنکاری، از بین رفتن ماده معدنی و همچنین افزایش حجم باطله‌برداری و از دست دادن بازار فروش مواد استخراجی.

۳: فاکتورهای زیست محیطی از قبیل تاثیرات مخرب زیست محیطی.

به منظور افزایش حجم داده‌های ژئوتکنیکی و نیز تقویت آنها، برنامه مطالعاتی جامعی در معدن مس سونگون طراحی شده و در حال اجرا می‌باشد (مهندسین مشاور پارس اولنگ، ۱۳۹۲). همچنین برنامه کنترل و پایش مداوم شیبهای معدن جهت جلوگیری از تلفات ناخواسته به عنوان یکی از پارامترهای ورودی عملیات طراحی معدن مطرح است.

در مطالعه حاضر سعی شده که علاوه بر بررسیهای گسترده میدانی و نیز نتایج حاصل از پایشهای انجام شده، نظرات متخصصین و افراد شاغل در معدن مس سونگون جهت تعیین میزان اهمیت فاکتورهای موثر در ریسک ناشی از ناپایداری شیب مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) مورد استفاده قرار گرفته است.

۲. موقعیت جغرافیایی و مشخصات زمین شناسی معدن مس سونگون

کانسار مس پورفیری سونگون در استان آذربایجان شرقی و در ۳۰ کیلومتری شمال شهر ورزقان واقع شده است (شکل ۱). ارتفاع متوسط این منطقه از سطح دریا ۲۰۰۰ متر است. مرز جنوبی و شرقی این کانسار، منطبق بر رودخانه سونگون و مرز شمالی آن در محل برخورد با رودخانه پخیر و حد غربی آن ارتفاعات مشرف به کانسار است. بر اساس مطالعات زمین

شناسی انجام شده به وسیله مهندسین مشاور پارس اولنگ (۱۳۹۲) همان طور که در شکل ۲ نشان داده شده است، واحدهای عمده تشکیل دهنده معدن مس سونگون عبارت است از:

۱- توده اصلی سونگون با فابریک پورفیری و با ترکیبی در حد کوارتز مونزونیت (Sungun Porphyry یا SP) که مرز آن با آهکهای کرتاسه در شمال و شرق ناحیه معدنی سونگون سبب پیدایش زون اسکارن شده است، ۲ – دایکهای تاخیری که توده سونگون پورفیری را قطع کرده اند و برحسب تنوع بافتی و ترکیب به چهار دسته (شامل دو زیرگروه a و b) DK-1 ، DK-2، DK-3 و DK-4 تقسیم می شوند، ۳- سنگهای ولکانیک و ساب ولکانیک پلیوکواترنر با ترکیبی در حد تراکیت – لاتیت تا تراکی آندزیت بازالتی (به ترتیب با TL و TB مشخص می-شوند)، ۴- نهشته های آذر آواری (PC). دگرسانی در محدوده معدن شامل انوع پتاسیک، فیلیک و پروپلیتیک می باشد.

۳. روش تحقیق

بعد از بررسیهای زمین شناسی مهندسی، خلاصه روش تحقیق به شرح زیر است:

۱- انتخاب افراد متخصص شاغل در معدن مس سونگون که با فعالیتهای اجرایی و زمین شناسی معدن در ارتباط هستند.

۲- تهیه و توزیع پرسشنامه جهت جمع آوری نظر افراد مذکور در رابطه با دلایل وقوع ناپایداری شیبها و تعیین اهمیت نسبی فاکتورهای ریسک.

۳- استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی جهت ورود داده‌های پرسشنامه‌های تهیه شده و تعیین وزن نسبی هر کدام از فاکتورها.

۴- بررسی‌های جامع زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیکی معدن و شناسایی مکانیسمهای غالب ناپایداری شیب و تطبیق نتایج حاصله با نتایج به دست آمده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی.

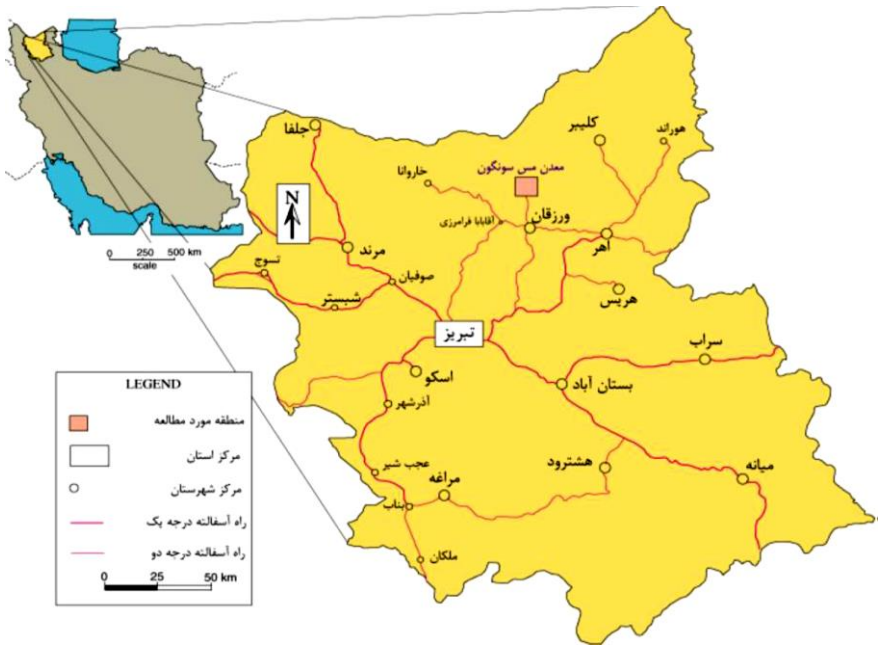
در ابتدا اشاره‌ای به روش انجام تحلیل سلسله مراتبی فازی شده و در ادامه چگونگی کاربرد آن در ارزیابی ریسک ناشی از ناپایداری شیبهای معدن مس سونگون مورد بررسی قرار گرفته است.

۳-۱. فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP)

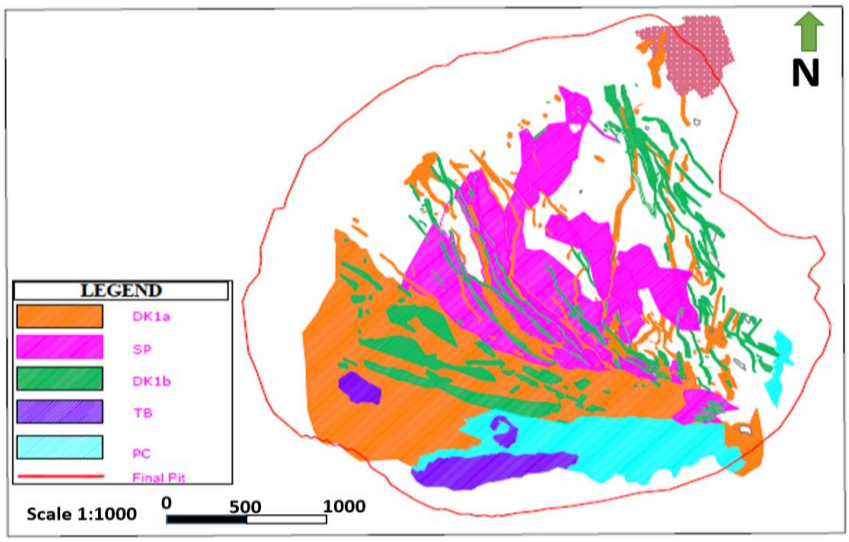
روش تحلیل سلسله مراتبی معمولی (AHP)، روشی مناسب برای کسب نظر کارشناسان و متخصصان می‌باشد، اما به درستی نحوه تفکر انسانی را منعکس نمی‌کند. زیرا کارشناسی که در حال پاسخگویی است، می‌بایست نظر خود را با اعداد دقیق بیان کند. در حالی که طبیعت مقایسه های زوجی، فازی بوده و کارشناس قاعدتا مایل است در قضاوت‌های خود یک بازه را اعلام کند نه این که یک عدد ثابت و قطعی را بیان کند (Torabi et al., 2016). در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی اکثر اصول همانند تحلیل سلسله مراتبی معمولی (AHP) است، با این تفاوت که به جای اعداد ثابت برای قضاوت، از اعداد فازی استفاده می‌شود. در روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، پس از تهیه نمودار سلسله مراتبی از تصمیم گیرنده یا تصمیم گیرندگان خواسته می‌شود تا عناصر هر سطح را نسبت به هم مقایسه کنند و اهمیت نسبی عناصر را با استفاده از اعداد فازی بیان کنند. این روش به طور گسترده‌ای در علوم مختلف از جمله علوم زمین مورد استفاده قرار گرفته است که در جدول ۱ به تعدادی از این موارد اشاره شده است.

۳-۱-۱. طیف فازی و عبارات کلامی متناظر با آن

همان طور که اشاره شد، در روش فازی خبرگان و کارشناسان در قضاوت هایشان به جای یک عدد ثابت به ارائه یک بازه تمایل دارند. در مطالعه حاضر و به منظور تسهیل محاسبات، از اعداد فازی مثلثی شکل استفاده شده است. در این حالت، عدد فازی مربوطه به صورت $M = (l , m , u)$ نشان داده می‌شود که پارامترهای l و m و u به ترتیب بیانگر کمترین مقدار ممکن، محتمل‌ترین مقدار و بیشترین مقدار ممکن برای عدد مورد نظر هستند و عدد مورد نظر می تواند بین l و u تغییر کند. متغیرهای زبانی و طیف های فازی به صورت های مختلفی می‌توانند باشند، اما یکی از کاملترین طیف ها به صورت ۹ تایی می‌باشد که اعداد فازی و عبارات کلامی (متغیرهای زبانی) آن مطابق جدول ۲ است.



شکل ۱ . موقعیت معدن مس سونگون بر روی نقشه استان آذربایجان شرقی و راههای دسترسی به معدن



شکل ۲. نقشه زمین شناسی ساده شده محدوده پیت معدن مس سونگون

جدول ۱. کاربردهای مختلف فرایند تحلیل سلسله مراتبی فازی در علوم مختلف

Row	Application Field	References
1	Water management	Şener and Şener (2015); Srdjevic and Medeiros (2008); Aryafar et al. (2013)
2	Rock Mechanic	Ataei et al. (2011); Aalianvari et al. (2012); Mikaeil et al. (2009); Mikaeil and Ataei (2011), Nikmanesh et al. (2012)
3	Mining Engineering	Zhao et al. (2019), Naghadehi et al. (2009); Shahabi et al. (2018)
4	Solid Waste management	Beskese et al. (2015); Nazari et al. (2012); Torabi-Kaveh et al. (2016)
5	Environmental Problems	Li et al. (2009); Gorsevski et al. (2006); Dehban Avan Stakhri et al. (2014)

جدول ۲. محدوده اعداد فازی مثلثی و توصیف کلامی هر محدوده

Linguistic variables	Triangular fuzzy numbers	Reciprocal triangular fuzzy numbers
Extremely strong	(9,9,9)	(1/9,1/9,1/9)
Very strong	(6,7,8)	(1/8,1/7,1/6)
Strong	(4,5,6)	(1/6,1/5,1/4)
Moderately strong	(2,3,4)	(1/4,1/3,1/2)
Equally strong	(1,1,1)	(1,1,1)
Intermediate	(7,8,9), (5,6,7), (3,4,5), (1,2,3)	(1/9,1/8,1/7), (1/7,1/6,1/5), (1/5,1/4,1/3), (1/3,1/2,1)

۳-۱-۲. مراحل روش تحلیل سلسله مراتبی فازی (روش چانگ)

روش چانگ (Chang, 1996) معروف‌ترین و متداول ترین روش تحلیل سلسله مراتبی فازی می‌باشد که نوع توسعه داده شده آن بیشتر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این روش و بر اساس نظرات متخصصین، مقادیر قطعی به اعداد فازی و توابع عضویت تبدیل می‌شوند. در نهایت و با استفاده از آنالیزهای انجام شده می‌توان یک ارزیابی منطقی از وزن معیارهای موثر در مسئله مورد نظر داشت (Aryafar et al., 2013). روش مورد اشاره از مراحل مختلف به شرح زیر تشکیل شده است:

مرحله ۱: رسم نمودار سلسله مراتبی

یکی از مراحل ابتدایی و مهم در تحلیلهای چند معیاره رسم نمودار سلسله مراتبی (درخت تصمیم) می‌باشد که با انجام آن می‌توان درک درستی از هدف مسئله، ساختار سلسله مراتب شاخص‌ها و زیرشاخص‌ها و گزینه‌ها داشت. در مطالعه حاضر نیز نمودار سلسله مراتبی جهت ارزیابی ریسک ناشی از ناپایداری ترانشه‌های پیت معدن مس سونگون ترسیم شد و بر اساس آن تلاش شده است میزان اهمیت نسبی هر کدام از فاکتورها در لایه‌های مختلف تعیین گردد.

مرحله ۲: تعریف اعداد فازی و تشکیل ماتریس مقایسه زوجی

در این مرحله سعی می‌شود اعداد فازی مناسب جهت انجام مقایسه های زوجی تعیین شود. برای این منظور از نظرات کارشناسان شاغل در معدن مس سونگون استفاده شده و بر اساس پرسشنامه طراحی شده و مطابق روند ارائه شده در ادامه بحث، اعداد فازی مثلثی تعیین گردید. پس از تعیین اعداد فازی، ماتریس مقایسه زوجی در برگیرنده اعداد فازی مثلثی برای فاکتورهای تعریف شده در هر کدام از لایه‌ها تهیه شد.

مرحله ۳: محاسبه وزن معیارها و گزینه‌ها در ماتریسهای مقایسه زوجی

مطابق روش پیشنهادی چانگ، مجموعه $M_{gi}^{j}\,(j=1,2,...,m)$ اعداد فازی مثلثی می‌باشند و زمانی که قضاوتهای متخصصین با استفاده از این اعداد بیان شوند، ماتریس مقایسه فازی مثلثی به شکل زیر تشکیل می‌شود:

$$\tilde{A}=\left(\tilde{a}_{ij}\right)_{n\times m}=\begin{bmatrix}(1,1,1) & (l_{12},m_{12},u_{12}) & \dots & (l_{1n},m_{1n},u_{1n})\\ (l_{21},m_{21},u_{21}) & (1,1,1) & \dots & (l_{2n},m_{2n},u_{2n})\\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots\\ (l_{n1},m_{n1},u_{n1}) & (l_{n2},m_{n2},u_{n2}) & \dots & (1,1,1)\end{bmatrix} \quad (۱)$$

که در ماتریس تشکیل شده برای حالتی که $i, j=1, \dots, n$ و $i \neq j$، عدد فازی مثلثی به شکل $\tilde{a}_{ij}=(l_{ij},m_{ij},u_{ij})$ بوده و معکوس آن نیز برابر $\tilde{a}_{ij}^{-1}=(1/l_{ij},1/m_{ij},1/u_{ij})$ خواهد بود.

پس از تعیین ماتریس مقایسه زوجی بر اساس اعداد فازی به دست آمده، روش چانگ (Chang, 1996)، جهت تعیین اهمیت نسبی فاکتورها (وزن نسبی) بکار گرفته شد. در ادامه به طور خلاصه به چگونگی انجام این روش ارائه شده است:

الف- تعیین اندازه ترکیب فازی (S_i)

$$S_i=\sum_{j=1}^{m}M_{gi}^{j}\otimes\left[\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}M_{gi}^{j}\right]^{-1} \quad (۲)$$

به منظور محاسبه اندازه ترکیب فازی، بخش اول رابطه S_i مطابق

رابطه ۳ تعیین می شود که در حقیقت مجموع هر کدام از ردیفهای ماتریس مقایسه فازی می باشد. همچنین بخش دوم معادله نیز با رابطه ۴ و ۵ محاسبه می‌گردد.

$$\sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} = \left(\sum_{j=1}^{m} lj, \sum_{j=1}^{m} mj, \sum_{j=1}^{m} uj \right) \quad (۳)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} = \left(\sum_{j=1}^{n} l_i, \sum_{j=1}^{n} m_i, \sum_{j=1}^{n} u_i \right) \quad (۴)$$

نهایتا معکوس بردار ذکر شده در رابطه ۴ به صورت زیر می-تواند، نوشته شود:

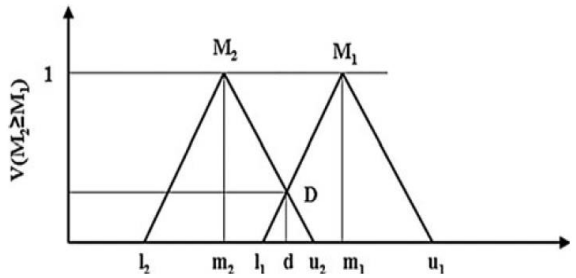
$$\left[\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m} M_{gi}^{j} \right]^{-1} = \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^{n} u_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} m_i}, \frac{1}{\sum_{i=1}^{n} l_i} \right) \quad (۵)$$

ب- تعیین درجه اهمیت دو عدد فازی مثلثی M_1 $(l_1, m_1, u_1) =$ و $M_2 = (l_2, m_2, u_2)$ به صورتی که $M_2 = (l_2, m_2,$ u2) . این پارامتر مطابق رابطه زیر می‌تواند $M_1 = (l_1, m_1, u_1) \geq$ تعیین گردد:

$$V(M_2 \geq M_1) = hgt(M_1 \cap M_2) = \mu M_2(d) \quad (۶)$$

$$= \begin{cases} 1 & if\ M_2 \geq M_1 \\ 0 & if\ l_1 \leq u_2 \\ \dfrac{(l_1 - u_2)}{(m_2 - u_2) - (m_1 - l_1)} & Otherwise \end{cases} \quad (۷)$$

معادله ۶ جهت محاسبه درجه بزرگی اعداد فازی به صورت گرافیکی در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۳. درجه اهمیت اعداد فازی نسبت به یکدیگر (Chang 1996) V $(M_2 \geq M_1)$

بر این اساس مختصات محل تقاطع μM_1 و μM_2 با نقطه D نشان داده می‌شود. به منظور مقایسه M_1 و M_2، مقادیر V $(M_2$ و $M_1 \geq)$ بایستی محاسبه گردند.

ج- محاسبه بردار وزن: با فرض $d(A_i) = \min V(S_i \geq S_k)$ برای حالتی که $k = 1, 2, \ldots, n$ و $k \neq i$، بنابر این بردار وزن به صورت رابطه ۸ خواهد بود:

$$W' = (d'(A_1), d'(A_2), \ldots, d'(A_n))^T \quad (۸)$$

در این رابطه A_i $(i=1, 2, \ldots, n)$ مولفه‌های n تایی می‌باشند. در نهایت با داشتن بردار وزن نرمالیزه نشده، می‌توان وزن نرمالیزه شده فاکتورها را محاسبه کرد که معادل عددی غیرفازی می‌باشد (رابطه ۹).

$$W = (d(A_1), d(A_2), \ldots, d(A_n))^T \quad (۹)$$

۳-۲. *آماده سازی پرسشنامه*

محدودیتهای موجود به هنگام استفاده از پرسشنامه‌های مرسوم موجود جهت جمع آوری نظرات متخصصین باعث کاهش کارایی آنها شده که عمدتا مربوط به مشکلاتی در رابطه با برقراری ماتریس قضاوت سازگار و همچنین فرایند جمع آوری نظرات متخصصین می‌باشد که زمانبر و خسته کننده است (Li et al. 2013). برای این منظور جدیدترین و کارآمدترین الگوی پیشنهادی جهت تهیه و تنظیم پرسشنامه مورد استفاده قرار می-گیرد (Lyu et al. 2020).

در این تحقیق، نظرات فنی گروهی از کارشناسان شاغل به کار در واحدهای مختلف معدن مس سونگون شامل زمین شناس، مهندسین استخراج و ژئوتکنیک جمع آوری شده است. بر این اساس، نظرات کارشناسان مذکور جهت شناسایی و رده بندی ریسکهای ناشی از ناپایداری شیب های معدن مس سونگون مورد استفاده قرار گرفته است.

این ریسکها عمدتاً عبارتند از ریسکهای مالی (A_1)، فنی و طراحی معدن (A_2)، تاخیر در عملیات معدنکاری (A_3) و ایمنی (A_4). به منظور ایجاد یک ساختار سلسله مراتبی از مسئله، تعیین لایه های مختلف موثر در ناپایداری شیبهای معدن مس سونگون ضروری است. در این رابطه و بر اساس نظرات کارشناسان مشغول در واحدهای مختلف امور معدن مس سونگون و همچنین بازدیدهای انجام گرفته در طی بازه زمانی یک ساله،

عمده خطرات ناشی از ناپایداری شیب می‌تواند در ۴ دسته مختلف از قبیل ایجاد ترکهای کششی (B_1)، گسیختگی درون پله‌ای (B_2)، گسیختگی با ابعاد وسیع (بیش از یک پله) (B_3)، نشست و گودافتادگی کف پله (B_4) قرار گیرد. موارد ذکر شده به عنوان معیار نامگذاری شده و در لایه دوم ساختار سلسله مراتبی قرار می‌گیرند. همچنین به منظور یافتن دلایل وقوع خطرات اشاره شده، بررسی‌های مختلفی انجام شده و بر اساس آن ۷ فاکتور از قبیل آبهای سطحی و زیرزمینی (C_1)، سیستم ناپیوستگی (گسل و درزه) (C2)، جنس مصالح (C3)، مقاومت مصالح (C4)، انفجار (C5)، میزان هوازدگی (C6) و شیب پله-های معدن (C7) شناسایی شدند که این موارد نیز به عنوان زیرمعیار نامگذاری شده و در لایه سوم ساختار سلسله مراتبی قرار می‌گیرند و می‌توانند به صورت مستقیم یا غیرمستقیم باعث ایجاد ناپایداری در شیب گردند.

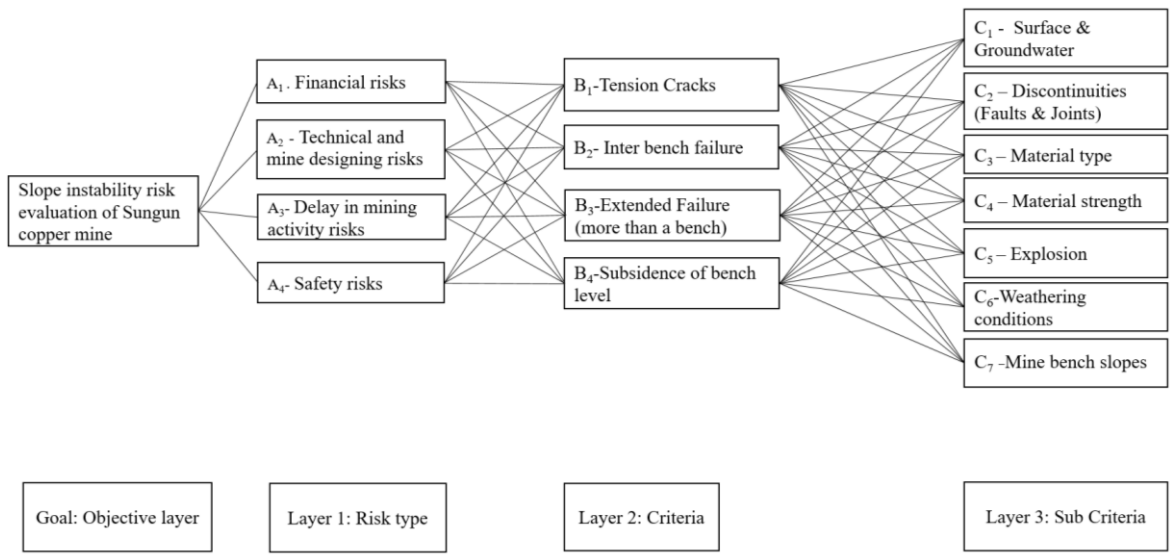
در شکل ۴، نمونه‌ای از پرسشنامه طراحی شده برای هدف مورد بررسی نشان داده شده که تاثیر هر فاکتور بر ناپایداری شیب معدن در لایه‌های مختلف بایستی به صورت مقادیر امتیازی از ۱ تا ۹ مشخص گردد. بر اساس داده های به دست آمده از طریق فرایند ذکر شده، ساختار سلسله مراتبی جهت ارزیابی ریسک ناشی از ناپایداری شیبهای معدن مس سونگون ایجاد شد (شکل ۵). بر اساس این ساختار، تغییرات نامطلوب در سطوح پایین می‌تواند منجر به ایجاد نتایج ناخواسته‌ای در سطوح بالاتر گردد. برای مثال تغییرات نامطلوب در فاکتورهای تعریف شده در لایه ۳ ساختار از قبیل افزایش ورود آبهای سطحی، کاهش میزان مقاومت مصالح، افزایش شیب پله ها و افزایش میزان هوازدگی می‌تواند به نتایج نامطلوبی در سطوح بالاتر (لایه ۲) از قبیل گسیختگی ها و نشستهای کف پله منجر گردد که در نهایت منجر به ایجاد ریسکها یا نتایج نامطلوبی بر عملکرد بخشهای مختلف معدن خواهد داشت.

1 2 3 4 5 6 7 8 9

Lowest importance — Highest importance

Factor	Impact of each factor on Sungun Copper mine Slopes Stability								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Layer 1									
Factor 1									
Factor 2									
……									
Factor 4									
Layer 2									
Factor 1									
Factor 2									
……									
Factor 4									
……									
Layer 3									
Factor 1									
Factor 2									
……									
Factor 7									

شکل ۴. پرسشنامه تهیه شده جهت نظرسنجی از کارشناسان شاغل در معدن مس سونگون



شکل ۵. ساختار سلسله مراتبی جهت ارزیابی ریسک ناشی از ناپایداری ترانشه های معدن مس سونگون

۳-۳. توصیف فاکتورهای موثر در ریسک ناشی از ناپایداری شیب

بر اساس تلفیق نتایج حاصل از نظر سنجی از افراد شاغل در معدن مس سونگون و نیز بررسی‌های زمین شناسی مهندسی در بازه زمانی ۱ تا ۲ ساله، تعدادی فاکتور و یا به عبارتی عوامل موثر در ناپایداری شیبهای معدن مس سونگون شناسایی شدند. به منظور داشتن درک صحیح از تاثیر هر کدام از فاکتورها در ریسکهای ناشی از ناپایداری شیب معدن مس سونگون، ضروری است که هر کدام از عوامل ذکر شده به دقت مورد بررسی قرار گیرند که در ادامه به تفصیل شرح داده شده است:
در عملیات معدنکاری اغلب مقادیری از ریسکهای مربوط به مسائل ایمنی، اقتصادی و مالی چندان مشخص نبوده و نمی‌توان به طور قطع در مورد آنها با قطعیت اظهار نظر نمود. در معادن روباز، ناپایداری شیبهای معدن یکی از اصلی‌ترین دلایل ریسک می‌باشد که عمدتاً به واسطه عدم قطعیتهای موجود در گردآوری داده‌های مورد نیاز برای تحلیل پایداری می‌باشد.

الف: لایه ۱

معدنکاری به دلیل ویژگی‌های خاص خود از جمله صنایع پرمخاطره بوده و ارزیابی ریسک یکی از مهم‌ترین مراحل مدیریت پروژه محسوب می‌شود. هدف از این تحقیق ارائه رویکردی جهت شناسایی و رتبه‌بندی ریسک ناشی از ناپایداری شیب‌ها در معادن روباز است. برای این منظور بالاترین سطح ساختار سلسله مراتبی که تحت عنوان لایه ۱ شناخته می‌شود و در حقیقت ناشی از عملکرد فاکتورهای سطوح پایین تر می‌باشد. در این بخش فاکتورهای مربوط به این لایه مورد بررسی قرار گرفته‌اند:

- ریسک فنی و طراحی

ناپایداری شیبها در معادن روباز به ویژه در مقیاس بزرگ می‌تواند طرحهای استخراجی و بهره برداری از معادن را با مشکلات متعددی روبرو سازد. وقوع گسیختگیهایی از این دست در بخشهایی از معدن در حال فعالیت باعث می‌شود طرح استخراجی جدیدی متناسب با شرایط پیشنهاد شود که در مواردی باعث ایجاد مشکلات متعددی می‌گردد. در موارد بسیار شدیدتر حتی ممکن است طرح سالانه در نظر گرفته شده برای استخراج مواد معدنی در بخشهایی از معدن به علت جابجایی لایه های سنگی و تخریب بخشهایی از معدن نیاز به بازنگری اساسی داشته باشد.

- ریسک مالی

یکی از پارامترهای مهم در عملیات معدنکاری مسائل مالی و اقتصادی است که می تواند ادامه عملیات را تحت تاثیر قرار دهد. وقوع لغزشهایی در پله‌های استخراجی معادن روباز طبیعتا باعث ایجاد هزینه‌های اضافی متعددی از قبیل بازطراحی معدن، جابجایی مصالح لغزش یافته، هزینه تفکیک باطله از مواد معدنی و ... می گردد که می‌تواند سودآوری معدن را تحت تاثیر قرار دهد. همچنین در صورتی که مواد معدنی در زمان معین وارد بازار فروش نشوند، ممکن است منجر به از دست رفتن مشتریان و در نتیجه صرف زمان و هزینه اضافی برای کسب مشتری جدید گردد.

– ریسک ایمنی

شاید بتوان ناپایداری شیبهای معادن روباز را مهمترین عامل فنی تهدید کننده ایمنی معدن به حساب آورد. مقدار اهمیت ناپایداری شیب در وقوع ریسک ایمنی بستگی به مقیاس لغزش دارد که در موارد شدیدتر می تواند باعث وارد آمدن تلفات جانی و مالی گسترده‌ای شود. فعالیت ماشین آلات معدنی مختلف در مناطقی با پتانسیل وقوع لغزش زیاد، می تواند به لحاظ ایمنی مخاطره آمیز بوده و اقدامات ایمنی را با شکست روبرو سازد.

– ریسک تاخیر در عملیات معدنکاری

وقوع لغزشها می‌توانند باعث صرف وقت و هزینه اضافی جهت جابجایی مواد لغزش یافته، صرف زمان زیاد جهت جایگزینی تجهیزات و نفرات آسیب دیده احتمالی گردد. آماده‌سازی شرایط مساعد برای معدن کاری ایمن، اقتصادی و بر اساس اصول فنی و طراحی پس از وقوع ناپایداری شیبهای معادن روباز، باعث اتلاف وقت و هزینه زیادی شده و عملیات برداشت و جابجایی مواد معدنی را به تاخیر می‌اندازد.

ب– لایه ۲

پس از شناسایی ریسکهای ناشی از ناپایداری شیب معدن مس سونگون در لایه ۱ ساختار سلسله مراتبی، خطرات ناشی از ناپایداری و یا به عبارتی انواعی از پدیده‌های مرتبط با لغزش که باعث ایجاد این نوع ریسکها می‌شوند شناسایی شده و در لایه ۲ ساختار سلسله مراتبی قرار داده شدند که در ادامه به هر کدام از آنها پرداخته شده است:

– ترکهای کششی

همانند بسیاری از زمین لغزشها در مصالح خاکی و سنگی، معمولا وجود ترکهای کششی در پله‌های معادن روباز نیز به عنوان اولین علامت لغزش مطرح می‌شود. در این مطالعه نیز فاکتور مذکور به عنوان یکی از علائم وقوع لغزش و یا به عبارتی پدیده همراه لغزش مورد بررسی قرار گرفته که در اکثر موارد با بررسیهای زمین شناسی مهندسی پیوسته معدن مس سونگون شناسایی شده و هشدارهای لازم صادر گردید (شکل ۶).

– گسیختگی درون پله‌ای

در تقسیم بندی انجام شده برای مطالعه حاضر سعی شده که اندازه لغزش و یا به عبارتی مقیاس آن در ارزیابی‌ها در نظر گرفته شود. طبیعتا لغزشهایی که محدود به یک پله استخراج بوده و درون پله‌ای هستند با سهولت بیشتری قابل کنترل بوده و خطرات ناشی از آن نیز کمتر می‌باشد.

– گسیختگیهای با ابعاد وسیع (بیش از یک پله)

بر اساس بررسی‌های انجام شده در بازه زمانی ۴ ساله و همچنین نظرات کارشناسان مصاحبه شده، از مهمترین نوع پدیده های مرتبط با ناپایداری شیب معدن مس سونگون گسیختگیهایی می‌باشند که بیش از یک پله را تحت تاثیر قرار داده‌اند. این نوع ناپایداریها باعث ایجاد خسارات مالی و ایمنی قابل ملاحظه‌ای در طی مراحل استخراج معدن مس سونگون شده‌اند و بنابر این به عنوان یکی از فاکتورهای تاثیرگذار در ریسک ناشی از ناپایداری شیب در نظر گرفته می‌شوند. در شکل ۷ زمین لغزش بزرگ مقیاس روی داده در بخش جنوبی معدن سونگون نشان داده شده که عملیات معدنکاری در ۸ تا ۱۰ پله معدن را متوقف ساخته است.

– نشست و گودافتادگی کف پله

بر خلاف گسیختگیهای درون پله‌ای و گسیختگیهای با مقیاس بزرگتر، این نوع از پدیده‌های مرتبط با ناپایداری شیبها در معدن اغلب نمی‌توانند سبب صدمات جدی گردند. هر چند که همانند ترکهای کششی می‌توانند به عنوان هشداری جهت پیش بینی

گسیختگی در نظر گرفته شوند و در مواردی نیز می‌توانند باعث ایجاد وقفه‌هایی در عملیات استخراج گردند.

ج: لایه ۳

پایین‌ترین لایه یا سطح مساله حاضر مربوط به فاکتورهایی است که به طور مستقیم فاکتورهای تعریف شده در لایه های بالاتر را تحت تاثیر قرار می‌دهند.

شکل ۶. ترکهای کششی مربوط به لغزش سنگهای دگرسان شده در تراز ۲۱۰۰ (دید عکس به سمت جنوب)

شکل ۷. نمایی از ناپایداری رخداده در بخش جنوبی معدن در سنگهای سست آذرآواری (دید عکس به سمت جنوب شرقی)

به منظور ارزیابی تاثیر هر کدام از این فاکتورها، شرایط آنها در ادامه بررسی شده است:

- ناپیوستگیها

ناپیوستگیها نقش مهمی در طراحی و نگهداری از پله‌های معادن روباز دارند و وجود آنها می‌تواند خصوصیات مکانیکی و هیدروژئولوژیکی توده سنگها را تحت تاثیر قرار دهد. گسیختگی شیبهای سنگی معمولا در طول عوارض زمین شناسی به ویژه ناپیوستگیها روی می‌دهد و تنها در مواردی که شیب خیلی تند بوده و یا سنگ ضعیف باشد، گسیختگی سنگ بکر اهمیت پیدا می‌کند. بنابر این بررسی روابط بین ناپیوستگیها و شیب بایستی به عنوان یکی از معیارهای مهم در مباحث مربوط به ارزیابی ریسک مطرح شود. بر اساس بررسیهای جامع انجام شده در محدوده معدن مس سونگون مشخص شد که گسلها از مهمترین نوع ناپیوستگیها بوده که تاثیر به سزایی بر ریسک ناشی از ناپایداری شیبها داشته و در برنامه‌های کاهش ریسک بایستی حضور آنها بررسی گردد. علاوه بر گسلها، درزه ها نیز باعث ایجاد ضعف ساختاری گسترده ای در جبهه های کاری معدن مس سونگون شده است.

– آبهای سطحی و زیرزمینی

وجود آب همواره می‌تواند باعث کاهش پایداری شیبهای معدن شود. فشار آب حفره‌ای در هر کدام از ناپیوستگیها و یا فضای خالی توده‌های سنگی منجر به کاهش تنش موثر شده و در نهایت مقاومت برشی توده سنگ را کاهش می‌دهد. همچنین در مواردی که فشارهای آب حفره‌ای اضافی در زیر کف معدن ایجاد می‌شود، احتمال وقوع بالازدگی وجود دارد. عدم وجود سیستم زهکشی مناسب در بخشهایی از معدن مس سونگون و به ویژه در بخشهای جنوبی می‌تواند باعث نفوذ روانابهای ناشی از نزولات جوی به بخشهای عمیقتر شده و باعث مطرح شدن مسائل ناپایداری شیب گردد. همچنین بالا بودن تراز سطح آب زیرزمینی نیز می‌تواند مقاومت برشی بین بلوکهای سنگی را کاهش داده و منجر به ناپایداری شیب گردد. اخیراً و با توجه به اهمیت موضوع، پیزومترهای الکتریکی جهت کنترل دقیق سطح آب زیرزمینی در نقاط مختلف معدن نصب شده است.

– جنس و مقاومت مصالح، میزان هوازدگی

بر اساس اطلاعات به دست آمده از پرسشنامه طراحی شده و نیز بررسی‌های محلی، ناپایداری شیب در سنگهای با جنسهای خاص و مقادیر مشخصی از مقاومت و درجه هوازدگی روی می‌دهد. برای مثال در بخشهایی از معدن با لیتولوژی از نوع تراکی آندزیت با مقادیر مقاومت بسیار زیاد و میزان هوازدگی بسیار کم ناپایداری شیب بسیار محدود بوده و بالعکس در بخشهای جنوبی که عمدتاً مصالح آذرآواری سست با میزان مقاومت کم می‌باشند، بیشترین میزان ناپایداری روی می‌دهد. همچنین در محدوده مرکزی معدن و توده سنگ SP نیز درجات دگرسانی و هوازدگی متغیر بوده که باعث شده پیش بینی ناپایداری شیب در آنها با عدم قطعیتهای زیادی صورت گیرد.

– انفجار

در صورتی که عملیات انفجار در معادن روباز به صورت کنترل نشده‌ای انجام گیرد، می تواند به عنوان یک عامل محرک ناپایداری شیب مطرح گردد. با توجه به گستردگی عملیات انفجار در معدن مس سونگون، این فاکتور به عنوان عاملی در ایجاد و یا تحریک ناپایداری شیب در نظر گرفته شده است.

– شیب پله‌های معدن

یکی دیگر از پارامترهای موثر در فرایند ارزیابی ریسک، مقادیر شیب پله‌های معدن است. با افزایش شیب پله‌های استخراج در معادن روباز، احتمال گسیختگی افزایش یافته و می‌تواند عملیات معدنکاری را تحت تاثیر قرار دهد. شیب کلی معدن مس سونگون ۳۷ درجه بوده و در رمپ ها و پله های استخراج نیز در حد ۶۷ درجه است. از لحاظ فنی در صورتی که شیب دیواره معدن روباز بیش از حد مورد نیاز باشد، احتمال ناپایداری افزایش می‌یابد و در حالتی که این مقدار کمتر از حد بهینه باشد، به لحاظ اقتصادی مقرون به صرفه نبوده و نسبت باطله برداری افزایش می‌یابد. بنابر این، فاکتور مذکور نیز به عنوان یکی از عوامل تاثیر گذار در ارزیابی ریسک در نظر گرفته شد.

۴. نتایج و بحث

۴-۱. *تعیین عدد فازی مثلثی* (TFN)

در این تحقیق پرسشنامه پیشنهادی جهت ارزیابی ریسک ناشی از ناپایداری شیبهای معدن مس سونگون مورد استفاده قرار گرفته است. برای این منظور، پرسشنامه تکمیل شده توسط کارشناسان مشغول در معدن به عنوان مبنایی جهت تعیین ماتریس قضاوتی مورد استفاده قرار گرفت. قبل از شروع فرایند نظر سنجی تمامی جزئیات پرسشنامه از قبیل فاکتورهای موجود در هر لایه و چگونگی استفاده از مقیاس امتیازدهی ۱ تا ۹ به شرکت کنندگان شرح داده شد. سپس از هر کدام از افراد خواسته شد تا امتیاز فاکتورها را تعیین کنند. با استفاده از این فرایند امکان به دست آوردن قضاوت کارشناسان در رابطه با اهمیت هر کدام از فاکتورهای تعریف شده در لایه‌های سه گانه نسبت به ریسک ناشی از ناپایداری شیبهای معدن مس سونگون میسر می گردد (جدول ۳). با استفاده از این جدول و مطابق ذیل می‌توان اعداد فازی مثلثی را تعیین نمود (Lyu et al. 2020):

۱. تعیین بازه اعداد تخصیص داده (Interval number) شده توسط کارشناسان به هر کدام از فاکتورهای تعریف شده

۲. تعیین عدد امتیازی با بیشترین تکرار در بازه اعداد (امتیاز

ترجیحی)

نظرات گردآوری شده کارشناسان با پرسشنامه، به عنوان مبنایی جهت ایجاد ماتریسهای قضاوتی مورد استفاده قرار گرفته است. برای این منظور عناصر ماتریسهای قضاوتی به صورت نسبت بین دو بازه اعداد تعریف شد. برای توضیح بیشتر در رابطه با چگونگی انجام این فرایند، فاکتورهای موجود در لایه ۱ به عنوان مثال در نظر گرفته شده‌اند. مطابق اعداد ذکر شده در جدول ۳ با استفاده از نظرات متخصصین، امتیاز فاکتور A1 بین اعداد ۲ تا ۴ در تغییر بوده و امتیاز ترجیحی آن نیز عدد ۳ (با ۵ مرتبه تکرار) می‌باشد. برای فاکتور A2 نیز مقادیر اعداد بین ۵ تا ۷ متغیر بوده و عدد ۶ نیز به عنوان امتیاز ترجیحی شناخته می‌شود. امتیازهای در نظر گرفته شده برای فاکتور A_3 بین ۷ تا ۹ متغیر بوده و عدد ۸ با بیشترین انتخاب توسط کارشناسان، امتیاز ترجیحی تشخیص داده می‌شود. در نهایت مقادیر امتیازهای در نظر گرفته شده برای فاکتور A_4 بین ۶ تا ۸ متغیر بوده و امتیاز ترجیی آن نیز ۷ می‌باشد. جهت تشکیل ماتریس قضاوت، تمامی عناصر آن به صورت نسبتی از دو بازه اعداد همانند (۷-۵)/ (۴-۲) =A_1 / A_2 تعریف می‌گردد. چنین فرایندی می‌تواند جهت تشکیل ماتریس مقایسه زوجی برای سایر فاکتورهای تعریف شده در لایه های دیگر به کار رود. مطابق روش پیشنهادی لیو وهمکاران (Lyu et al. 2020)، با تشکیل چنین ماتریسی می‌توان اعداد فازی مثلثی را تعیین نمود. برای مثال در لایه ۱ در صورتی که نسبت A_1 / A_2 در نظر گرفته شود مقادیر حداکثر و حداقل آن به ترتیب (۰/۸ = (۵) / (۴)) و (۰/۲۸ = (۷)/ (۲)) خواهد بود. جهت تعیین عدد فازی مثلثی، نسبت امتیازهای ترجیحی فاکتورها نیز بایستی تعیین شوند که برای مثال مورد بررسی عبارتست از: ۰/۵ =۶/ ۳

بنابر این با در نظر گرفتن مقدار ۰/۵ به عنوان یکی از اعداد فازی، اعداد فازی مثلثی برای فاکتورهای مقایسه شده A_1 / A_2 به صورت (۱، ۰/۵، ۰/۲۵) خواهد بود (Saaty, 2008). برای فاکتورهای دیگر نیز به طریق مشابهی مقادیر اعداد فازی مثلثی تعیین می‌گردد (جدول ۴). در شکل ۸، فرایند ارائه شده در این بخش از مطالعه جهت تعیین اعداد فازی مثلثی برای فاکتورهای لایه ۱ به عنوان مثال ارائه شده است.

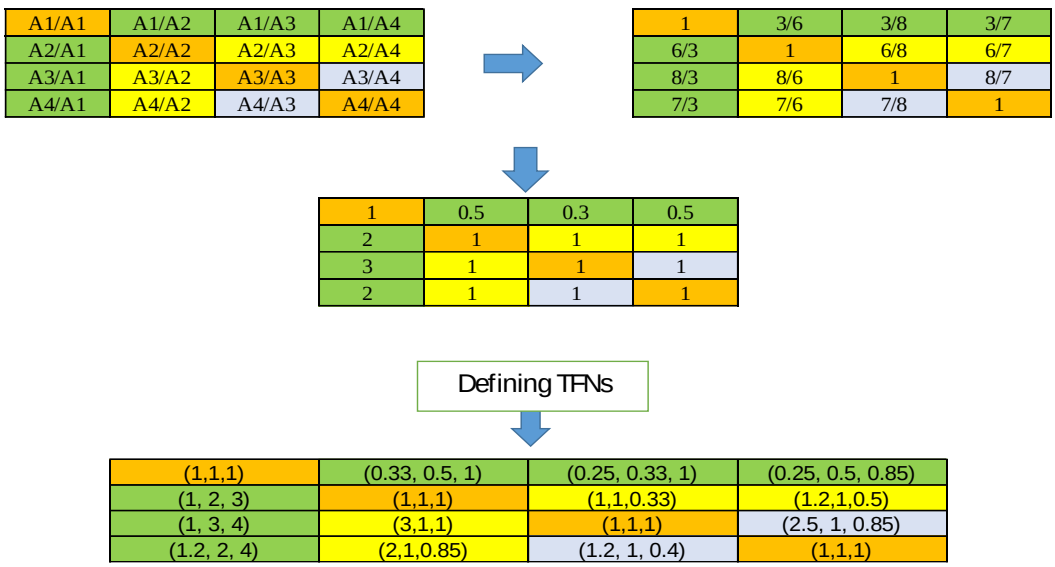
جدول ۳. نتایج حاصل از پرسشنامه تکمیل شده توسط ۱۰ نفر از کارشناسان مشغول در معدن مس سونگون

Layer	Factor	Impact of each factor on Sungun Copper mine Slopes Stability								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Financial risks		I	V	IV					
	Technical and mine designing risks					II	V	III		
	Delay in mining activity risks							II	VI	II
	Safety risks						III	VI	I	
2	Tension Cracks		III	VI	I					
	Inter bench failure					I	III	V	II	
	Extended Failure (more than a bench)								VI	V
	Subsidence of bench level					V	VI	I		
3	Surface & Groundwater					V	III	II		
	Discontinuities (Faults & Joints)						II	III	V	
	Material type				II	III	V			
	Material strength				II	V	III			
	Explosion	VI	V	I						
	Weathering conditions		III	III	IV					
	Mine bench slopes				VI	III	I			

توضیح: حروف لاتین نشان داده شده در جدول بیانگر تعداد دفعات انتخاب یک امتیاز معین (بین ۱ تا ۹) توسط کارشناسان مصاحبه شونده (برای مثال در ردیف ۱، ۴ نفر از افراد امتیاز ۴، ۵ نفر امتیاز ۳ و ۱ نفر نیز امتیاز ۲ را انتخاب کرده‌اند)

جدول ۴. تعیین بازه امتیازی و امتیاز ترجیحی اختصاص داده شده برای هر فاکتور

Layer	Factor	Interval number	Preferred score
1	Financial risks	2-4	3
	Technical and mine designing risks	5-7	6
	Delay in mining activity risks	7-9	8
	Safety risks	6-8	7
2	Tension Cracks	2-4	3
	Inter bench failure	5-8	7
	Extended Failure (more than a bench)	8-9	9
	Subsidence of bench level	5-7	5
3	Surface & Groundwater	5-7	5
	Discontinuities (Faults & Joints)	6-8	8
	Material type	4-6	6
	Material strength	4-6	5
	Explosion	1-3	2
	Weathering conditions	2-4	4
	Mine bench slopes	4-6	4



شکل ۸. مقایسه دوتایی فاکتورهای لایه ۱ و تعیین اعداد فازی مثلثی برای هر فاکتور

۴-۲. *تشکیل ماتریس مقایسه‌ای*

پس از تعیین اعداد فازی مثلثی مطابق فرایند ارائه شده در بخش پیشین، امکان تشکیل ماتریس مقایسه‌ای بین فاکتورهای موجود در یک لایه نسبت به فاکتورهای سطح بالاتر ایجاد می‌شود (شکل ۸). به منظور به دست آوردن وزن هر کدام از فاکتورهای لایه‌های سه گانه، چنین فرایندی برای هر کدام از آنها انجام شده و با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی فازی، مقادیر وزن نسبی (اهمیت نسبی) فاکتورها نسبت به سطح بالاتر و در نهایت نسبت به هدف مساله (ریسک ناشی از ناپایداری شیب معدن مس سونگون) تعیین گردید.

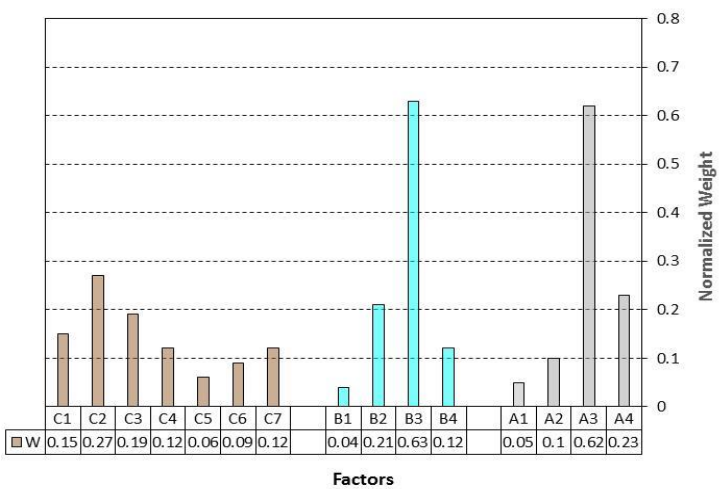
در جدول ۵ مقادیر وزن نرمالیزه شده فاکتورهای لایه ۱ نسبت به سطح بالاتر یا به عبارتی هدف مساله و همچنین مقادیر نرخ سازگاری (CR) تعیین شده است. در جدول ۶ نیز مقادیر وزن نسبی محاسبه شده برای هر کدام از فاکتورهای لایه دوم و سوم نسبت به هدف مساله و یا میزان تاثیرگذاری آنها در وقوع ریسک ناشی از ناپایداری شیب معدن مس سونگون ارائه شده است. در شکل ۹ مقادیر وزن نسبی هرکدام از فاکتورهای لایه‌های سه گانه با هم مقایسه شده‌اند.

جدول ۵. ماتریس مقایسه فازی فاکتورهای لایه اول (CR=0.03) نسبت به هدف مساله

Factor	A1	A2	A3	A4	W(Normalized)
A1	(1,1,1)	(0.33,0.5,1)	(0.25,0.33,1)	(0.25,0.5,0.85)	0/01
A2	(1,2,3)	(1,1,1)	(1, 1, 0.33)	(1.2, 1,0.5)	0/03
A3	(1,3,4)	(3, 1, 1)	(1,1,1)	(2.5,1,0.85)	0/9
A4	(1.2,2,4)	(2, 1, 0.85)	(1.2, 1, 0.4)	(1,1,1)	0/06

جدول ۶. مقادیر وزن نرمالیزه شده فاکتورهای لایه های دوم و سوم نسبت به هدف مساله

Factor	(Normalized) W
B1	04.0
B2	63.0
B3	21.0
B4	12.0
C1	15.0
C2	27.0
C3	19.0
C4	12.0
C5	06.0
C6	09.0
C7	12.0



شکل ۹. وزن نهایی به دست آمده برای فاکتورهای واقع شده در هر سه لایه

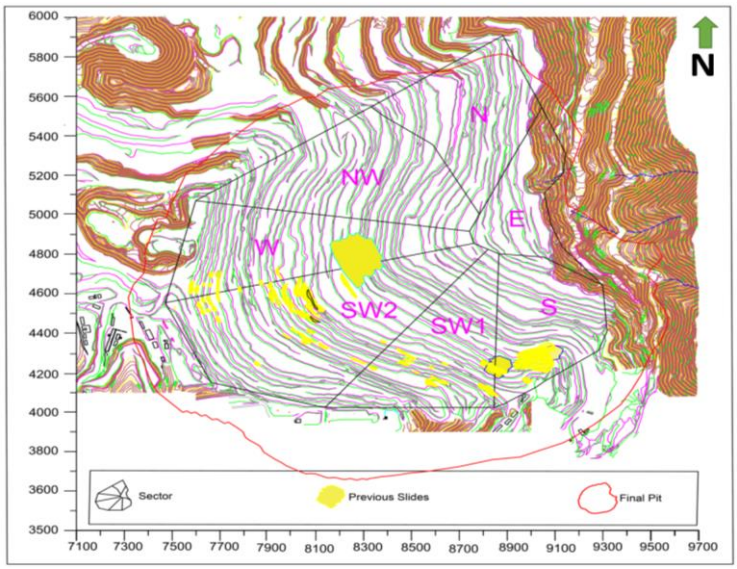
۴-۳. کنترل نتایج به دست آمده

همان طور که قبلا ذکر شد هدف اصلی این مطالعه تعیین مهمترین فاکتورهای تاثیرگذار بر ناپایداری شیب پیت معدن مس سونگون است که در این راستا علاوه بر روش نظری و توسعه داده شده توسط محققین مختلف سعی گردید طی یک برنامه پایش و کنترل میان مدت (۱ تا ۴ ساله)، مهمترین عوامل ناپایداری شیب شناسایی شده و در برنامه های توسعه‌ای معدن و نیز اهداف طراحی مورد استفاده قرار گیرد. برای این منظور علاوه بر بررسی ناپیوستگیها و ضعفهای ساختاری محدوده معدن، لغزشهای وقوع افتاده در بخشهای مختلف معدن

شناسایی شده و به دقت مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفتند.

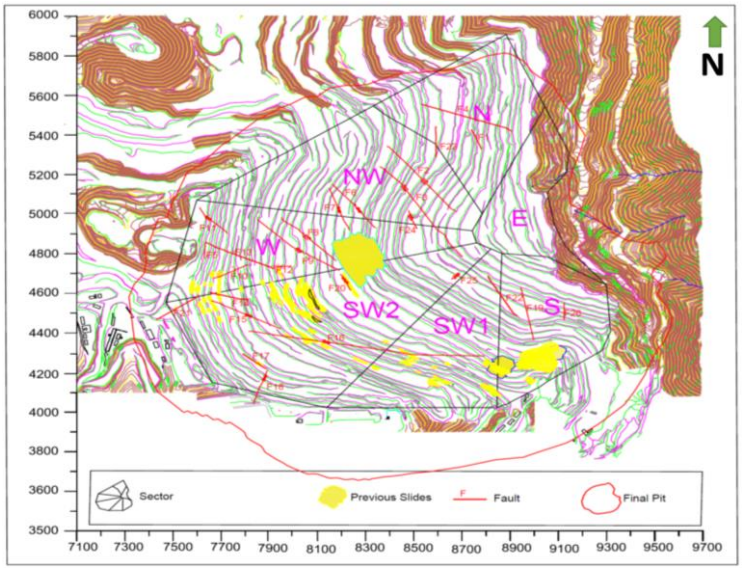
۴-۳-۱. تجزیه و تحلیل لغزشهای روی داده در محدوده معدن

لغزشهای روی داده در نواحی مختلف معدن طی سالهای ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹ به دقت شناسایی شده و پارامترهای آنها از قبیل وسعت لغزش، نوع مواد لغزش یافته، عوامل موثر در لغزش و ... مورد ارزیابی قرار گرفتند. جهت سهولت در انجام مطالعات، محدوده معدن به ۷ بخش متفاوت تقسیم شده و موقعیت لغزشها بر روی نقشه توپوگرافی معدن (با مقیاس ۱:۱۰۰۰) نمایش داده شده است (شکل ۱۰). بر این اساس مشاهده می‌شود که عمده ناپایداریهای ثبت شده در محدوده های جنوبی (S)، جنوب غربی (SW_1 و SW_2) و غربی (W) معدن می‌باشد.

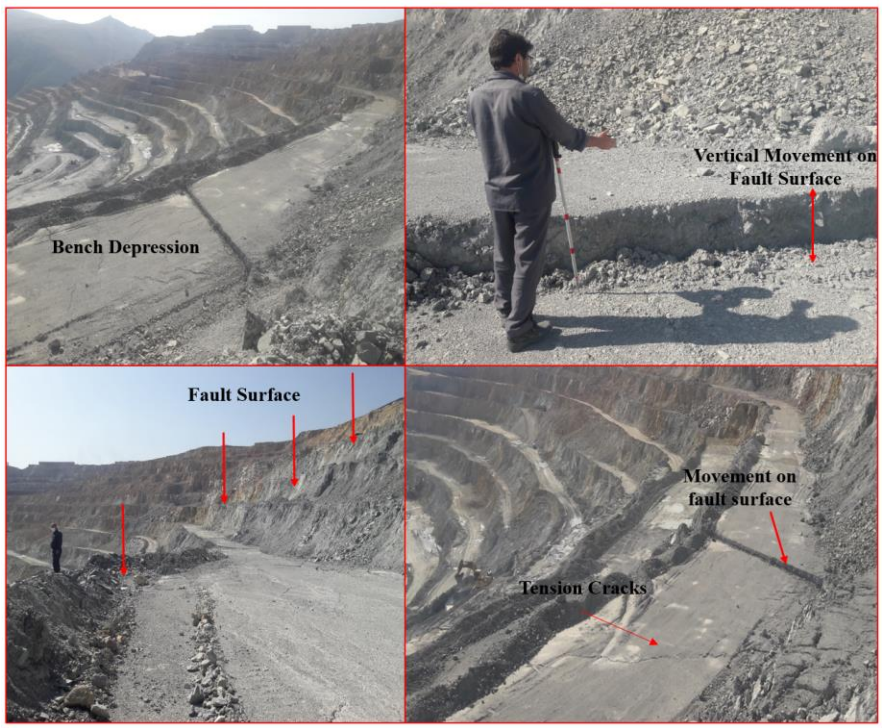


شکل ۱۰. موقعیت لغزشهای ثبت شده بین سالهای ۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹ در داخل محدوده معدن و بر روی نقشه توپوگرافی ۱:۱۰۰۰

با بررسی موقعیت و شرایط ناپایداریهای روی داده در معدن مس سونگون، مهمترین دلایل وقوع لغزشها شناسایی شده و در مرحله بعد، میزان اهمیت نسبی پارامترها که با روش FAHP تعیین شده است، مورد تحقیق و بررسی قرار گیرد. بررسی لغزشها نشان می‌دهد که اغلب این نوع ناپایداریها در امتداد ساختارهای مهم معدن و به ویژه گسلهای شناخته شده روی داده است. در شکل ۱۱ موقعیت گسلهای اصلی معدن نسبت به ناپایداریهای مذکور نشان داده شده است. در شکل ۱۲ نیز تصاویری از لغزش وقوع یافته در ترازهای ۲۲۳۵ تا ۲۱۶۲/۵ متر نشان داده شده است. بر این اساس مشخص شد که گسل F14 با ساز و کار نرمال مسبب اصلی این ناپایداری است، به طوری که گسیختگی در بیش از ۵ پله کاری معدن قابل مشاهده بوده و سایر علائم لغزش نیز از فروافتادگیها و ترکهای کششی قابل مشاهده است. بنابر این اهمیت ناپیوستگیها در ایجاد ریسک ناشی از ناپایداری شیب معدن به راحتی قابل شناسایی می‌باشد. به عبارت دیگر، عمده ناپایداریهای شیب توسط سیستم ناپیوستگی یا ساختار توده سنگ کنترل می گردد. علاوه بر ناپیوستگیها، عامل دیگری که بر اساس نظرات متخصصین در وقوع ریسک ناشی از ناپایداری معدن مس سونگون نقش مهمی دارد، آبهای سطحی و زیرزمینی است (شکل ۱۳).



شکل ۱۱. موقعیت لغزشهای روی داده در محدوده معدن در ارتباط با گسلهای اصلی



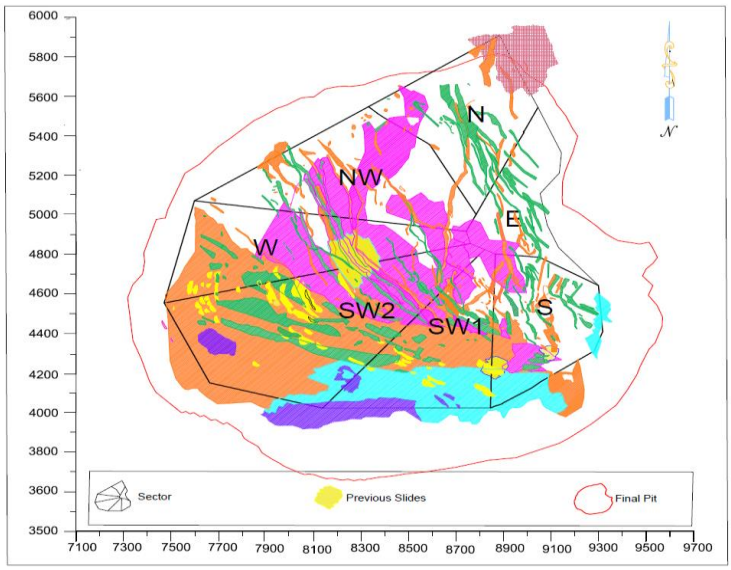
شکل ۱۲. تصاویری از ناپایداری ترانشه ها در بین ترازهای ۲۱۶۲/۵ تا ۲۲۳۵ متر

شکل ۱۳. تجمع آبهای سطحی بر روی بخش فروافتاده پله و تشدید حرکت آن

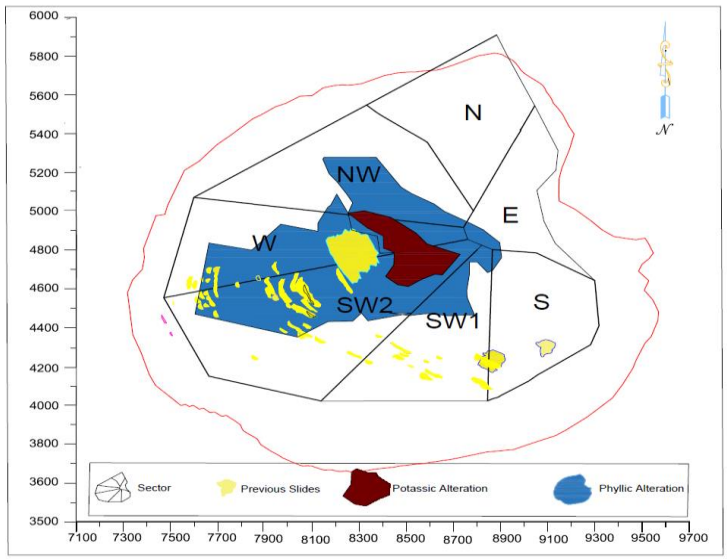
جهت کنترل این عامل نیز، سعی شد به زمان وقوع لغزش توجه گردد. مطابق داده های ثبت شده، عمده لغزشهای روی داده معدن در محدوده زمانی فروردین تا خرداد ماه می‌باشند که اصلی‌ترین دلیل آن را می‌توان به ذوب برفها، بارندگیهای شدید و ایجاد روانابهای گسترده و عدم وجود زهکشی مناسب ارتباط داد. همچنین در بازه زمانی ذکر شده، آبهای نفوذ یافته به داخل مصالح مختلف (که در فصول سرد سال دچار انجماد شده اند) ذوب شده و زمینه را جهت ایجاد ناپایداری مساعد می‌کنند.

جنس توده سنگ نیز از دیگر پارامترهای موثر بر ناپایداری شیبهای معدن مس سونگون شناسایی شده و مورد بررسی قرار گرفت. همان طور که در شکل ۱۴ نشان داده شده است، تمرکز لغزشها اتفاقی نبوده و در لایه‌هایی با جنس مشخص روی داده‌اند. بر این اساس بیشترین تعداد ناپایداری شیبها به ترتیب در مصالحی از نوع دایکهای پس از کانی سازی (DK-1)، رسوبات آذرآواری (PC) و توده سونگون پورفیری SP گزارش شده‌اند. در شکلهای ۷ و نیز ۱۲ به ترتیب ناپایداریهای روی داده در مصالح سست آذرآواری و دایکها نشان داده شده که بیانگر اهمیت بالای این نوع از مصالح در ایجاد لغزش است.

توده سنگهای معدن مس سونگون به طور قابل توجهی دچار دگرسانی گرمابی شده‌اند که می‌توان به انواع فیلیک (سریسیت، کائولینیت، کوارتز و پیریت)، پتاسیک (فلدسپار پتاسیک، کوارتز و بیوتیت ثانویه)، پروپیلیتیک (اپیدوت، کلریت و کلسیت)، آرژیلیک (کائولینیت و سریسیت) و سیلیسیک (عمدتا کوارتز ریزدانه) اشاره کرد (مهندسین مشاور پارس اولنگ، ۱۳۹۲) از میان موارد ذکر شده، دگرسانی نوع فیلیک و پتاسیک دارای گسترش قابل توجهی بوده و می‌توانند مقاومت توده سنگ را به طور چشمگیری تحت تاثیر قرار دهند، به ویژه که دگرسانی فیلیک با تبدیل فلدسپارها به سریسیت و کانی‌های رسی می‌تواند مقاومت سنگ بکر را کاهش دهد. بر اساس بررسی‌های صورت گرفته، میزان ناپایداری شیب در مناطق با گسترش دگرسانی پتاسیک کم بوده و می‌توان ترانشه‌هایی با شیب تندتر ایجاد کرد. در شکل ۱۵، موقعیت لغزشهای روی داده در معدن در ارتباط با زونهای دگرسان شده اصلی نشان داده شده است. بر این اساس، عمده ناپایداریها در زون فیلیک مشاهده شده و زون پتاسیک فاقد شواهدی از لغزشهای عمده است. پارامترهای مقاومت برشی و نیز مقاومت فشاری سنگ بکر مصالح مختلف معدن مس سونگون جهت تحلیل ریسک ناشی از ناپایداری شیب مورد استفاده قرار گرفته است (جدول ۷).



شکل ۱۴. موقعیت لغزشها بر روی نقشه زمین شناسی معدن



شکل ۱۵. موقعیت لغزشهای روی داده در معدن در ارتباط با زونهای دگرسان شده اصلی

جدول ۷. نتایج آزمون های آزمایشگاهی بر روی مصالح سنگی معدن مس سونگون در دو حالت طبیعی (Nat) و اشباع (Sat) (SRK, 2008)

Lithology			**σ_c (MPa)**		**Shear tests on saw cut surfaces**			
					Cohesion (MPa)		**Friction angle (degrees)**	
Type	Alteration	Test moist condition	max	min	max	min	max	min
SP	Phyllic	Nat	14	75	0	0.79	23	35
		Sat	10	73	0.02	0.08	20	32
	Potassic	Nat	13	87	0.01	0.067	21	34
		Sat	10	76	0.02	0.053	22	30
DK1a	Phyllic	Nat	20	147	0	0.76	25	33
		Sat	16	136	0.04	0.36	14	25
	Propylitic	Nat	-	-	-	-	-	-

		Sat	51	116	0.09	0.31	29	33
DK1b	Phyllic	Nat	72	147	0	0.36	25	36
		Sat	65	107	0.01	0.15	21	33
	Propylitic	Nat	20	166	0	0.4	26	31
		Sat	-	-	0	0.31	22	28

برای این منظور سعی شد ارتباط مشخصی بین مقادیر این پارامترها و توزیع لغزش شیبها برقرار گردد. مطابق جدول ۷، مقادیر مقاومت فشاری تک محوری و پارامترهای مقاومت برشی دارای تغییرات گسترده‌ای بوده و بنابر این امکان تفکیک واحدهای زمین شناسی بر اساس آنها میسر نبود. یکی از دلایل این امر را می‌توان به ماهیت کانسارهای مس پورفیری و فراوانی درز و شکاف و گسل در آنها ارتباط داد که باعث ناهمگنی پارامترهای مقاومتی می‌شود. با این وجود، می توان تاثیر این پارامترها را در تمامی مصالح معدن مس سونگون مهم ارزیابی نمود. برای مثال در لغزش نشان داده شده در شکل ۱۲، عمده سنگهای لغزش یافته از نوع DK_{1a} و با دگرسانی فیلیک است که مقادیر مقاومت فشاری متوسط آنها ۲۵ مگاپاسکال می‌باشد. این در حالی است که در بخشهایی از معدن به ویژه در بخشهای جنوبی و جنوب غربی، مصالحی با این نوع و دگرسانی از نوع فیلیک دارای مقادیر مقاومت فشاری بالاتری بوده (بالاتر از ۱۰۰ مگاپاسکال) و در صورت کنترل شرایط آب و مسائل فنی و همچنین عدم قطع گسلهای اصلی، مشکلی به لحاظ پایداری وجود ندارد.

از دیگر فاکتورهای مهم که در این پژوهش اهمیت آن در ایجاد ریسک ناشی از ناپایداری شیب معدن مس سونگون مورد بررسی قرار گرفت، مساله انفجار و شیب پله‌ای استخراجی است. همان طور که ذکر گردید شیب مناسب در نظر گرفته شده برای پله‌های استخراج که هم مسائل پایداری شیب و هم مباحث اقتصادی در نظر گرفته شود در حدود ۶۷ درجه می-باشد. متاسفانه در بخشهایی از معدن به ویژه در بخشهای جنوبی (از جنس عمدتا سنگهای آذرآورای)، ایجاد پله‌هایی با مقادیر زاویه شیب بیشتر از این مقدار باعث ایجاد ناپایداریهایی شده است. هر چند در بخشهایی از سکتور (قطعه) جنوب غربی که عمدتا جنس آنها تراکی بازالت تا تراکی آندزیت می‌باشد، می-توان پله‌هایی با شیب بیشتر نیز ایجاد کرد و بنابر این مشکلی به لحاظ ناپایداری وجود نخواهد داشت (شکل ۱۶). عامل انفجار نیز می‌تواند باعث تحریک ناپیوستگیها شده و زمینه را برای ناپایداری شیب مساعد سازد.

شکل ۱۶. زاویه شیب پله‌های استخراجی معدن مس سونگون در مصالح مختلف، ایجاد پله‌هایی با شیب زیادتر از حد طراحی در سنگهای تراکیت و دایک (عکس سمت راست) و سنگهای آذرآواری (عکس سمت چپ)

۵. نتیجه گیری

با افزایش عمق پیت معدن مس سونگون، طبیعتا احتمال وقوع ناپایداری شیبها افزایش می‌یابد. در صورت عدم توجه به این مسئله، تبعات مالی و جانی آن غیرقابل جبران خواهد بود. علی-رغم پیچیده بودن پیش بینی وقوع این پدیده در پروژه‌های معدنکاری روباز، می‌توان فاکتورهای تاثیرگذار بر آن را شناسایی و رتبه بندی نمود که در نهایت با برنامه ریزی دقیق رفتار معدن قابل کنترل خواهد بود. در این تحقیق سعی شده است که پایداری شیبهای پیت معدن مس سونگون واقع در استان آذربایجان شرقی مورد بررسی قرار گیرد. روش سلسله مراتبی فازی (FAHP) به عنوان یکی از روش های شناخته شده جهت تحلیل مسائل چند متغیره، جهت ارزیابی و رتبه بندی مهمترین فاکتورهای تاثیرگذار در ریسک ناشی از ناپایداری شیبهای معدن مورد استفاده قرار گرفته است. برای این منظور، نظرات کارشناسان مشغول در معدن با استفاده از پرسشنامه جامعی گردآوری شده و بر این اساس فاکتورها در سه لایه یا سطح مختلف قرار گرفتند. مطابق روش FAHP، وزن نسبی هر کدام از فاکتورهای لایه های سه گانه در ارتباط با ایجاد ریسک تعیین گردید که در لایه ۱ فاکتور A_3 (تاخیر در عملیات معدنکاری)، لایه ۲ فاکتور B_3 (گسیختگی با ابعاد بیش از یک پله) و در لایه ۳ نیز فاکتور C_2 (ناپیوستگیها از قبیل گسل و درز) به عنوان فاکتورهای با اهمیت نسبی بیشتر تعیین شدند. همچنین نتایج بررسی‌ها و کنترل رفتار شیبهای معدن طی ۴ سال (۱۳۹۵ تا ۱۳۹۹) جهت تعیین مهمترین عوامل تاثیرگذار در ریسک ناشی از ناپایداری شیب مورد استفاده قرار گرفته است. بررسی‌ها نشان داد که در طی بازه مذکور، لغزشهای معدن عمدتا تحت تاثیر فاکتورهای مشخصی روی داده اند که با عناصر لایه ۳ ساختار سلسله مراتبی همخوانی دارند. به طوری که گسلها، آبهای سطحی و زیرزمینی، میزان هوازدگی و شیب پله‌ها فاکتورهایی بوده‌اند که بیشترین تاثیر را در وقوع لغزش داشته‌اند. همچنین نتایج این بررسی نشان داد که گسیختگیهای با ابعاد بیش از یک پله (مهمترین فاکتور تعیین شده در لایه ۲ بر اساس نظرات کارشناسان) در مواردی در محدوده معدن روی داده‌اند که باعث تاخیرات گسترده در عملیات معدنکاری و نیز آسیب به تجهیزات و کارگران (فاکتورهای A3 و A4 لایه ۱ بر اساس نظرات کارشناسان) شده‌اند. با شناسایی این فاکتورها می‌توان اقدامات پیشگیرانه‌ای از قبیل موارد زیر جهت کنترل ریسک انجام داد:

۱- بایستی نقشه‌های بزرگ مقیاس گسلهای محدوده معدن به طور مداوم تهیه و بروز رسانی شده و در تهیه طرحهای استخراجی معدن، توجه زیادی به آنها مبذول گردد.

۲- روشهای مناسب زهکشی و آبزدایی معدن جهت کاستن از تاثیرات نامطلوب آن در ناپایداری شیبها اتخاذ شود.

۳- به مقادیر زاویه شیب در نظر گرفته شده برای پله‌های استخراج که باعث تحریک ناپایداری نشده و بتوان حداکثر ماده معدنی را استخراج نمود، توجه شود.

۴- با شناخت دقیق ابعاد هندسی لغزشها و نصب علائم هشدار دهنده در سطح پله‌ها و نیز پایش مداوم جابجایی‌ها، بایستی از وقوع ناگهانی این نوع لغزشها جلوگیری کرده و میزان خسارت را به حداقل رساند.

سپاسگزاری

از مدیریت محترم معدن مس سونگون به خاطر مساعدت در انجام مطالعات قدردانی می‌شود.

منابع

دهبان ایوان استخری، م.، غفوری، م.، لشکری پور، غ.، زارع صفت، م.، سیّار، ا.، ۱۳۹۳. ارزیابی پتانسیل زمین‌لغزش در مخزن سد خاکی پلرود با رویکرد چند معیاره فازی، نشریه علمی- پژوهشی زمین شناسی مهندسی انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، دوره ۷ شماره ۱ و ۲، ۱-۱۴.

مهندسین مشاور پارس اولنگ، ۱۳۹۲. گزارش مطالعات زمین شناسی معدن مس سونگون، جلد ۱، صفحه ۱ تا ۲۴۰.

نیک‌منش، م.، حسینی، م.، فضلی، ص.، ۱۳۹۱. انتخاب مناسب‌ترین روش حفاری تونل انتقال آب بهشت‌آباد، نشریه علمی- پژوهشی زمین شناسی

مهندسی انجمن زمین شناسی مهندسی ایران، دوره ۵ شماره ۱ و۲، ۶۹ – ۸۲.

Aalianvari A, Katibeh H, Sharifzadeh M, 2012, Application of fuzzy Delphi AHP method for the estimation and classification of Ghomrud tunnel from groundwater flow hazard. Arab J Geosci 5(2): 275–284.

Aryafar A, Yousefi S, Ardejani FD, 2013, The weight of interaction of mining activities: groundwater in environmental impact assessment using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP), Environ Earth Sci, 68(8), 2313–2324. https://doi.org/10.1007/s12665-012-1910-x.

Ataei M, Mikaeil R, Hoseinie S, Hosseini SM, 2011, Fuzzy analytical hierarchy process approach for ranking the sawability of carbonate rock. Int J Rock Mech Min Sci 50:83–93.

Beskese A, Demir H, Ozcan HK, Okten HE, 2015, Landfill site selection using fuzzy AHP and fuzzy TOPSIS: a case study for Istanbul. Environ Earth Sci 73:3513–3521.

Bye AR, Bell FG, 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.

Chang DY, 1996, Applications of the extent analysis method on fuzzy AHP. Eur J Oper Res 95:649–655.

Dehban Avan Stakhri M, Ghafoori, M., Lashkaripour, G., Zare sefat, M., Sayyar, A., 2014. Landslide potential assessment for Poulrood earth fill dam reservoir by fuzzy multi criteria decision analysis. Journal of Iranian Association of Engineering Geology, 7 (1&2):1-14.

Gorsevski PV, Jankowski P and Gessle PE, 2006, An heuristic approach for mapping landslide hazard by integrating fuzzy logic with analytic hierarchy process. Control Cybern 35:121–146

Li FK, Phoon XD and Zhang M, 2013, "Improved AHP method and its application in risk identification" J. Constr. Eng. Manage, 139 (3), 312–320. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000605.

Li L, Shi ZH, Yin W, Zhu D, Leung NGS, Cai CF and Lei AL, 2009, A fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to eco environmental vulnerability assessment for the Danjiangkou reservoir area, China, Ecological Modeling 220 (23), 3439-3447.

Lyu HM, Sun WJ, Shen SL and Zhou AN, 2020, Risk assessment using a new consulting process in fuzzy AHP, J. Constr. Eng. Manage, 146(3), 04019112. https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0001757.

Mikaeil R and Ataei M, 2011, Application of a fuzzy analytical hierarchy process to the prediction ofvibration during rock sawing. Min Sci Tech 21:611–619.

Mikaeil R, Naghadehi MZ, Ataei M and KhaloKakaie R, 2009, A decision support system using fuzzy analytical hierarchy process (FAHP) and TOPSIS approaches for selection of the optimum underground mining method. Arch Min Sci 54(2):341–368.

Naghadehi MZ, Mikaeil R and Ataei M, 2009, The application of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to selection of optimum underground mining method for Jajarm Bauxite Mine, Iran. Exp Sys Appl. 36:8218–8226.

Nazari A, Salarirad MM and Aghajani-Bazzazi A, 2012, Landfill site selection by decision-making tools based on fuzzy multiattribute decision-making method. Environ Earth Sci 65:1631–1642.

Nikmanesh M, Hosseini M, Fazli S, 2012, The selection of the most suitable excavation method of Beheshtabad water conveyance tunnel. Journal of Iranian Association of Engineering Geology, 13 (2):69-82.

Saaty TL, 2008, Decision making with the analytic hierarchy process, International Journal of Services Sciences, 1(1), 83–98. https://doi.org/10.1504/IJSSCI.2008.017590.

Şener E and Şener Ş, 2015, Evaluation of groundwater vulnerability to pollution using fuzzy analytic hierarchy process method, Environ Earth Sci, 73(12), 8405–8424. https://doi.org/10.1007/s12665-014-4001-3.

Shahabi RS, Basiri MH and Rashidi Kahag M, 2018, Ranking of productivity improvement strategies in Iran mineral sector based on integrated SWOT-FAHP-FTOPSIS analysis, Arabian Journal of Geosciences 11:65.

Srdjevic B and Medeiros YDP, 2008, Fuzzy AHP assessment of water management plans, Water Resour Manag, 22(7):877–894.

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

Torabi–Kaveh M, Babazadeh R, Mohammadi SD, Zaresefat M, 2016, Landfill site selection using combination

of GIS and fuzzy AHP, a case study: Iranshahr, Iran. Waste Manag Res. doi: 10.1177/0734242X16633777.
Zhao Z, Gao XJ and Chen S, 2019, Impact hazard assessment of mine roadway excavation based on FAHP method. Geotech Geol Eng, 37:1859–1868.