

طبقه‌بندی و تعیین عدم قطعیت‌های خصوصیات ذاتی توده سنگ معدن مس سونگون

محسن عباس‌زاده، کارشناس ارشد استخراج معدن

کوروش شهریار، دانشیار دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مصطفی شریف‌زاده استادیار دانشکده معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

مهرداد حیدری، عضو هیئت علمی دانشگاه بین‌المللی امام خمینی

پذیرش ۸۶/۸/۲۸

تاریخ: دریافت ۸۵/۹/۱۰

چکیده

ارزیابی مقاومت توده سنگ‌های درزه‌دار به منظور تحلیل رفتار سازه‌های سطحی و زیرزمینی از اهمیت بسیاری دارد. از آن‌جا که تنها آزمون‌های آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های بکر نمی‌تواند معرف خواص توده سنگ در حجم بزرگ باشد و از سوی دیگر انجام آزمایش‌های پر هزینه برای تعیین مقاومت‌های برجای توده سنگ به ویژه در مراحل ابتدایی پروژه، توجیه‌پذیر نیست، بنا بر این در صورتی که لغزش‌هایی در توده سنگ رخ داده باشد مناسب‌ترین روش برآورد مقادیر مقاومتی توده سنگ‌ها، انجام آنالیز برگشتی لغزش‌ها است. روش‌هایی که امروزه کم و بیش برای حل این مشکل مد نظر قرار می‌گیرند استفاده از معیارهای گسیختگی تجربی مانند معیار موهر-کولمب یا معیار هوک-براون است. در این روش‌ها شاخص‌های مورد نیاز توده سنگ به کمک روش‌های مختلف از جمله طبقه‌بندی توده سنگ‌ها از دیدگاه مهندسی برآورد می‌شود. با توجه به تغییرات شدید خصوصیات توده سنگ معدن مس سونگون به علت تنوع آلتراسیون و هوازدگی، همچنین محدودیت برای تعیین عدم قطعیت‌های مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی مصالح در برگزیده دیواره‌های معدن مس سونگون، شاخص‌های مؤثر در طبقه‌بندی توده سنگ به صورت متغیرهای تصادفی فرض

شده و طبقه‌بندی برای هر مرحله از حفاری صورت گرفته است. در این تحقیق طبقه‌بندی توده سنگ دیواره معدن مس سونگون با استفاده از دو روش RMR و GSI انجام شده است. شاخص‌های مؤثر در رده‌بندی به صورت متغیر تصادفی مورد تحلیل قرار گرفت. با توجه به تغییرات شدید خصوصیات توده سنگ، مقادیر مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی هر لیتولوژی-آلتراسیون موجود در مقاطع مختلف با سطح اطمینان ۹۰٪ برآورد شده است. سپس برای تولید توزیع چگالی احتمالی متناسب با متغیر تصادفی مورد بررسی (مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی)، از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که شبیه‌سازی متغیرهای تصادفی خصوصیات ذاتی توده سنگ با انحراف معیار و ضریب تغییرات مناسبی انجام شده است.

مقدمه

روش‌های تجربی دیدگاه مهندسی در طبقه‌بندی توده سنگ‌ها از دیرباز در مسائل کاربردی مهندسی مورد توجه قرار گرفته است. شناخته‌شده‌ترین این روش‌ها عبارتند از: رده‌بندی ژئومکانیکی پیشنهادی بناویسکی در سال ۱۹۷۶ (RMR)^۱ و اصلاح شده آن در سال ۱۹۸۹ [۱]، روش بارتون و همکاران در سال ۱۹۷۴ (روش Q) [۲] و روش شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)^۲ که در سال ۱۹۹۵ هوک، کایزر و باودن معرفی کردند و چندین بار اصلاح شده است [۳]. مواردی که در طبقه‌بندی Q جمع‌آوری و تحلیل شده است اغلب سازه‌های زیرزمینی (تونل‌ها و فضاها زیرسطحی) در سنگ‌های کم‌درزه و یا یک‌پارچه و در اعماق زیاد را دربرمی‌گیرد.

در طراحی و تحلیل‌های مرتبط با مهندسی ژئوتکنیک به دلیل فقدان اطلاعات کافی در محدوده پژوهش، انواع عدم قطعیت‌ها مطرح می‌شود. انواع مختلف عدم قطعیت در پروژه‌های ژئوتکنیکی عبارتند از: (۱) عدم قطعیت‌های محلی، (۲) عدم قطعیت‌های مربوط به مدل‌سازی و (۳) عدم قطعیت‌های داده‌ای. در طبقه‌بندی و تحلیل‌های ثابت از مقادیر میانگین شاخص‌های مؤثر برای ارزیابی و امتیازدهی توده سنگ ساختگاه مورد بررسی استفاده می‌شود. بررسی‌های

-
1. Rock Mass Rating
 2. Geological Strength Index

پایداری شیب شیروانی‌های سنگی یکی از مهم‌ترین و حساس‌ترین زمینه‌های مهندسی برای طراحان ژئوتکنیک است. این بررسی‌ها در روش استخراج روباز به منظور طراحی و انتخاب شیبی صورت می‌گیرد که باعث کاهش هزینه‌های معدن‌کاری، اطمینان از توانایی سنگ در پایدار ماندن، کاهش احتمال شکست، و نیز آسیب نرساندن به پرسنل و ماشین آلات شود. در مورد پایداری دیواره‌های معدن، پایداری شیب تماماً تابع ملاحظات زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی نیست، بلکه محدودیت‌های ناشی از نیاز تولید و اقتصاد کل عملیات در هر مقطع زمانی بر آن اثر می‌گذارد. بنا بر این برای این‌که مهندس معدن بتواند این مسئله را با سایر مسائل معدن‌کاری بررسی و ارزیابی کند لازم است که پایداری شیب را به‌صورت احتمال عمل‌کرد نامطلوب و یا احتمال لغزش در نظر گیرد و علاوه بر آن، حجم، موقعیت هندسی، نوع مکانیسم و زمان لغزش را نیز بداند. بدیهی است که با روش‌های ثابت تحلیل پایداری نمی‌توان چنین اطلاعاتی را به‌دست آورد و تنها با استفاده از آمار و احتمال می‌توان تا حدودی به این نیازها پاسخ داد.

ویژگی‌های عمومی و زمین‌شناسی معدن مس سونگون

کانسار مس سونگون در استان آذربایجان شرقی واقع شده است. گسترش کانسار بین ۴۲° و ۴۶° تا ۴۳° و ۴۶° طول شرقی و ۴۵° و ۴۱° و ۳۸° تا ۴۳° عرض شمالی است. راه اصلی دسترسی معدن از طریق جاده تبریز- ورزقان- سونگون است. فاصله تبریز از طریق این جاده تا محل کانسار حدود ۱۳۰ کیلومتر است. این منطقه در ۳۲ کیلومتری شمال ورزقان قرار گرفته است. ذخیره قابل استخراج ماده معدنی در این محدوده برابر ۳۶۰ تا ۳۸۰ میلیون تن و ذخیره زمین‌شناسی در حدود ۸۵۰ میلیون تن تا یک میلیارد برآورد شده است. کان‌سنگ معدن مس سونگون به‌صورت پورفیری بوده و دایک‌ها آن را قطع کرده‌اند. محدوده معدن از نظر لیتولوژیکی به توده پورفیری سونگون (SP)، دایک A، دایک B و اسکارن تقسیم می‌شود. جنس سنگ توده پورفیری مونزونیت تا کوارتز مونزونیت، نوع سنگ دایک A مونزونیت و جنس سنگ دایک B از دیوریت است. در محدوده معدن انواع دگرسانی شامل فلیک، پورپلیتیک، آرژیلیک و پتاسیک وجود دارد.

برداشت‌های ژئوتکنیک معدن مس سونگون

با توجه به اهمیت تحلیل شیب دیواره نهایی معدن مس سونگون، در سال ۱۳۸۳ حفاری ژئوتکنیک به منظور دستیابی به اطلاعاتی نظیر سنگ‌شناسی، دگرسانی، طول مغزه به دست آمده (TCR)، شاخص کیفی سنگ (RQD)، تعداد و بررسی ناپیوستگی‌های باز و پر شده، تخمینی از مقاومت سنگ بکر، تناوب رگه و رگچه‌ها و هوازدگی شروع شد. اما یکی از مهم‌ترین شاخص‌های مورد نظر در طراحی گمانه‌ها تعیین روند دسته درزه‌ها با استفاده از جهت‌یابی مغزه‌های حفاری شده بوده است. از آنجا که برای اولین بار در ایران حفاری ژئوتکنیک به منظور دستیابی به خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها صورت می‌گرفت، به همین منظور برای طراحی و نحوه برداشت‌ها از مشاوران خارجی استفاده شده است. نام و موقعیت گمانه‌های ژئوتکنیک معدن مس سونگون در جدول ۱ ارائه شده است. موقعیت گمانه‌های ژئوتکنیک در محدوده نهایی معدن مس سونگون در شکل ۱ نشان داده شده است. نام‌گذاری مقاطع مورد بررسی براساس روند گمانه‌های ژئوتکنیک در محدوده معدن مس سونگون صورت گرفته است. برای برداشت و بررسی مغزه‌های حفاری، استفاده از فرم‌ها و دستورالعمل‌های استاندارد ژئوتکنیکی حائز اهمیت است. این دستورالعمل‌ها که بر اساس آئین‌نامه‌های انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM)^۳ تدوین گردیده باعث می‌شود تا برداشت‌ها هرچه بیش‌تر به استانداردها نزدیک‌تر شود.

تعیین شیب^۴ و جهت بزرگترین شیب^۵ ناپیوستگی‌ها

یکی از شاخص‌های مهم در طبقه‌بندی توده سنگ و همچنین تحلیل پایداری شیروانی‌های معادن روباز، تعیین خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌های موجود در توده سنگ مورد بررسی است [۴]. برای تعیین خصوصیات هندسی، به عنوان عاملی مهم از دو روش برداشت‌های سطحی و برداشت‌های حاصل از جهت‌یابی مغزه‌های حفاری استفاده شده است. در برداشت‌های سطحی که با دقت کافی نیز همراه است هیچ تضمینی وجود ندارد تا روند ناپیوستگی‌های موجود

3. International Society of Rock Mechanics

4. Dip

5. Dip Direction

جدول ۱. موقعیت، روند و شیب گمانه‌های ژئوتکنیک معدن مس سونگون

گمانه	مختصات			آزیموت (از راستای شمال)	شیب	طول گمانه (متر)
	Z	Y	X			
GT1	۲۱۱۷/۸۰	۴۲۱۰	۸۹۱۹	صفر	۶۰	۲۷۵
GT2	۲۰۵۹/۵۹	۴۵۵۰	۸۹۲۰	صفر	۶۰	۶۰۰
GT3	۱۸۵۲	۴۹۰۰	۹۰۶۰	۲۷۰	۶۰	۲۵۰
GT4	۲۲۷۶/۴۸	۴۱۵۰	۸۳۷۰	۳۰	۶۵	۱۷۰
GT5	۲۲۲۷/۷۸	۴۳۵۰	۸۴۸۰	۳۰	۶۰	۳۰۰
GT6	۲۱۲۴/۱۴	۴۶۰۰	۸۶۲۵	۳۰	۶۵	۵۵۰
GT7	۲۳۰۲/۵۴	۴۴۸۰	۸۰۸۰	۶۰	۶۵	۴۵۰
GT8	۲۱۷۵/۳۷	۴۶۲۵	۸۳۵۰	۶۰	۶۰	۲۰۰
GT9	۲۲۷۶/۶۵	۴۹۲۹	۷۹۰۶	۹۰	۶۰	۱۵۰
GT10	۲۲۴۹/۹۵	۴۹۰۰	۸۱۰۰	۹۰	۶۰	۳۰۰
GT11	۲۱۶۲/۳۴	۴۹۰۰	۸۴۰۰	۹۰	۶۰	۵۵۰
GT12	۲۱۳۶/۷۳	۵۳۴۰	۸۴۴۹	۱۴۰	۶۰	۲۵۰
GT13	۲۰۷۵/۰۱	۵۱۵۰	۸۵۹۰	۱۴۰	۶۵	۵۰۰
GT14	۱۸۲۴	۵۲۰۰	۹۰۱۰	۹۸	۶۰	۱۵۰
GT15	۱۹۰۴	۵۵۰۰	۸۹۰۰	صفر	۶۵	۳۰۰

در عمق مورد نظر نیز ثابت باقی بماند[۵]. از این رو برای بررسی و تهیه اطلاعات دقیق‌تر علاوه بر برداشت‌های سطحی از حفر ترانشه و گمانه نیز استفاده می‌شود. مغزه جهت‌یابی شده در تعیین این خصوصیات نقش مهمی را ایفا می‌کند[۶]. برای جهت‌یابی مغزه‌های حفاری شده از دستگاهی به نام جهت یاب در گمانه‌ها استفاده می‌شود به منظور افزایش دقت در برداشت‌ها بسته به شرایط متفاوت از سه دستگاه جهت‌یاب رسی^۶، وانروث^۷ و ایزی مارک^۸ برای تعیین

6. Clay Imprint

7. Vanruth

8. Ezy-Mark

خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها در معدن مس سونگون استفاده شده است. پس از جمع‌آوری و پردازش داده‌ها، شیب و جهت شیب درزه‌ها تعیین و بر حسب فراوانی و تعداد تکرار آن‌ها به دو دسته فرعی و اصلی تقسیم شد [۶].

طبقه‌بندی توده سنگ معدن مس سونگون

یکی از روش‌های طبقه‌بندی مطرح و متداول شیروانی‌ها استفاده از روش طبقه‌بندی ژئومکانیکی بنیاویسکی^۹ است که در سال ۱۹۸۹ ارائه شده است [۱]. و شاخص مقاومت زمین‌شناسی^{۱۰} به شمار می‌رود. برای طبقه‌بندی توده سنگ مقاطع مختلف معدن مس سونگون از برداشت‌های حاصل از حفاری گمانه‌های ژئوتکنیک محدوده معدن استفاده شده است. طبقه‌بندی توده سنگ دیواره غربی (مقطع آزمون ۹۰ درجه) معدن مس سونگون بر اساس اطلاعات به دست آمده از دو گمانه GT9 و GT11 صورت گرفته است. شکل ۱، وضعیت قرارگیری دو گمانه مذکور را در محدوده نهایی معدن مس سونگون نشان می‌دهد. شش شاخص ($i=1,2,...,6$) مؤثر در طبقه‌بندی و امتیازدهی توده سنگ با استفاده از طبقه‌بندی توده سنگ به روش RMR عبارتند از: (۱) مقاومت فشاری تک‌محوره، (۲) شاخص کیفی سنگ (RQD)، (۳) متوسط فاصله‌داری درزه‌ها، (۴) شرایط عمومی درزه‌ها، (۵) شرایط آب زیرزمینی و (۶) شیب و جهت شیب ناپیوستگی‌ها نسبت به راستای شیروانی مورد نظر [۱]. مقدار امتیاز توده سنگ با استفاده از روش بنیاویسکی، مجموع جبری شش شاخص مذکور خواهد بود [7]:

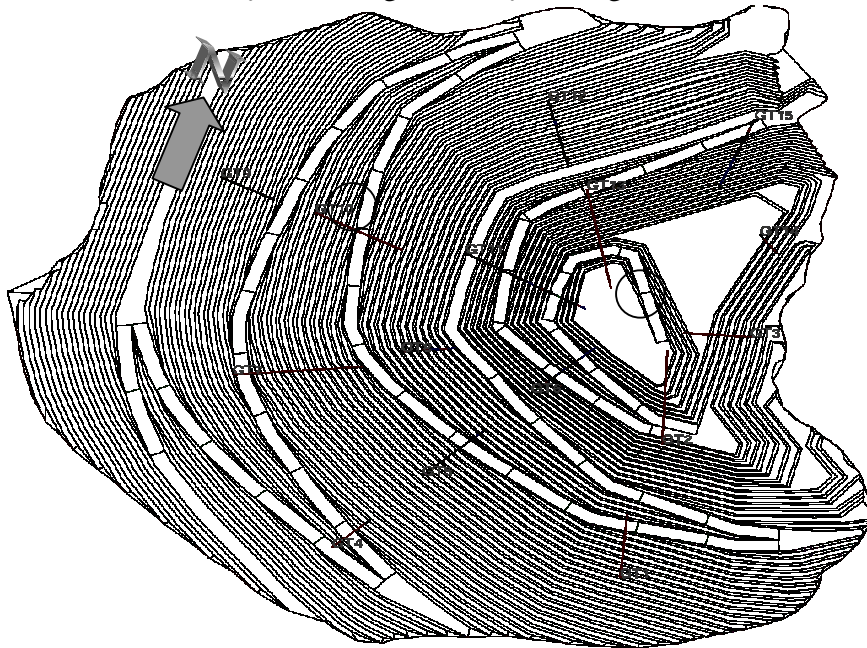
$$RMR = R_{v1} + R_{v2} + \dots + R_{v6} \quad (1)$$

در این رابطه RMR، مقدار امتیاز توده سنگ بررسی شده با استفاده از روش بنیاویسکی و R_{v1} تا R_{v6} عوامل مؤثر در طبقه‌بندی و امتیازدهی توده سنگ به روش RMR است.

9. Rock Mass Rating (RMR)

10. Geological Strength Index (GSI)

در روش‌های قطعی^{۱۱}، برای امتیازدهی توده سنگ از مقادیر میانگین عوامل مؤثر در طبقه‌بندی توده سنگ استفاده می‌شود اما برای دستیابی به نحوه تغییرات خصوصیات توده



شکل ۱. موقعیت گمانه‌های ژئوتکنیک در محدوده نهایی معدن مس سونگون

سنگ بررسی شده می‌توان هر عامل مورد استفاده در طبقه‌بندی توده سنگ با استفاده از رده‌بندی ژئومکانیکی بنیایوسی را به صورت یک متغیر تصادفی در نظر گرفت [۷]. برای این منظور طبقه‌بندی توده سنگ به ازای هر مرحله حفاری (حدود هر مرحله حفاری بین ۱ تا ۱/۵ متر)، یعنی هر مغزه حفاری شده صورت می‌گیرد. بنا بر این برای هر نوع سنگ درگیر در دیواره بررسی شده، مجموعه‌ای از مقادیر RMR ایجاد می‌شود که نشان‌دهنده تغییرات امتیازدهی توده سنگ بررسی شده از کم‌ترین مقدار تا بیش‌ترین مقدار خواهد بود. برای این منظور از برنامه کامپیوتری مخصوص در نرم افزار ACCSES و با توجه به جداول امتیازدهی بنیایوسی استفاده شده است. با توجه به آب‌خور بودن گمانه‌های GT9 و GT11 (۷۵ تا ۹۰ درصد) در دیواره غربی مقدار امتیاز مربوط به شرایط آب زیرزمینی معادل ۱۰ در نظر گرفته

شده است. مشکل‌ترین شاخص برای امتیازدهی در روش طبقه‌بندی بنیادیسکی، شاخص جهت‌یابی درزه‌ها است. تغییرات این شاخص که از صفر برای حالت خیلی مطلوب تا ۶۰- برای حالت خیلی نامطلوب، نشان می‌دهد که این شاخص نقش مهمی در امتیازدهی توده سنگ ایفا می‌کند [۷]. برای امتیازدهی این عامل در روش طبقه‌بندی RMR، از زاویه γ استفاده می‌شود. این زاویه که همواره بین صفر تا ۹۰ متغیر است مبین زاویه بین قطب صفحه دسته درزه اصلی و قطب صفحه رخساره است. جدول ۲، میزان امتیاز مربوط به مقادیر مختلف γ را نشان می‌دهد. برای امتیازدهی مقادیر حد واسط γ می‌توان از درون یابی استفاده نمود.

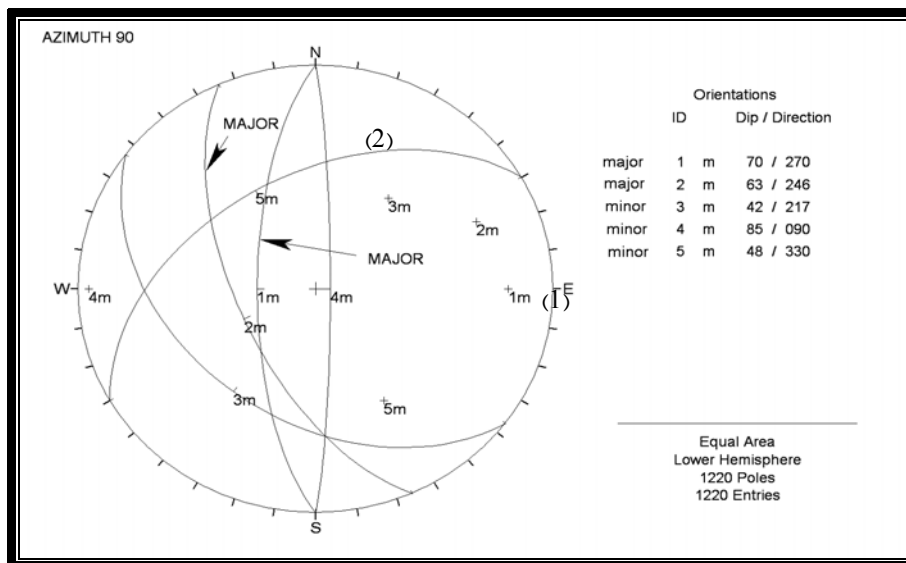
برای تعیین خصوصیات هندسی دسته درزه‌های موجود در دیواره غربی، از اطلاعات موجود جهت‌یابی مغزه‌های حفاری شده استفاده شده است. تعیین و تحلیل خصوصیات هندسی دسته درزه‌های موجود با استفاده از نرم‌افزار Dips V.5، انجام شده است. نتایج حاصل از تحلیل‌های صورت گرفته خصوصیات هندسی دسته درزه‌ها در دیواره غربی در شکل ۲ ارائه شده است.

با توجه به تعداد و فراوانی به‌دست آمده از دسته درزه‌های تعیین شده و دسته بندی آن‌ها، دسته درزه‌ها به دو گروه اصلی (major) و فرعی (minor) تقسیم شده است. با توجه به اهمیت بیشتر دسته درزه‌های اصلی نسبت به دسته درزه‌های فرعی در فرآیند امتیازدهی توده سنگ بررسی شده از دسته درزه‌های اصلی استفاده شده است. با توجه به اختلاف زاویه دو قطب صفحه ناپیوستگی و صفحه دیواره بررسی شده (۶۹ درجه)، مقدار امتیاز در نظر گرفته شده برای این شاخص در این مقطع معادل ۳/۷- بوده است. شش لیتولوژی-آلتراسیون در توده سنگ دیواره غربی وجود داشته که نحوه قرارگیری آن‌ها در شکل ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲. امتیازدهی توده سنگ بر اساس جهت دسته درزه‌های اصلی [۷]

توضیح کیفی	γ (درجه)	امتیاز
خیلی مساعد	۹۰	صفر
مساعد	۶۷/۵	-۵
متوسط	۴۵	-۲۵
نا مساعد	۲۲/۵	-۵۰
خیلی نا مساعد	صفر	-۶۰

شکل ۴، نتایج به‌دست آمده از طبقه‌بندی توده سنگ بر اساس لیتولوژی-آلتراسیون SP_PHY دیواره غربی معدن را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌کنید تغییرات موجود در امتیازدهی توده سنگ بسیار زیاد است. با توجه به شکل ۴ که توزیع فراوانی مقادیر RMR لیتولوژی-آلتراسیون SP_PHY (توده پورفیری معدن مس سونگون با آلتراسیون فیلک) را نشان می‌دهد، مقدار RMR از کم‌ترین مقدار یعنی ۱۳ تا بیش‌ترین مقدار یعنی ۶۸ تغییر می‌کند.



شکل ۲. تصویر صفحات اصلی و فرعی ناپیوستگی‌های دیواره غربی بر روی شبکه استریونت

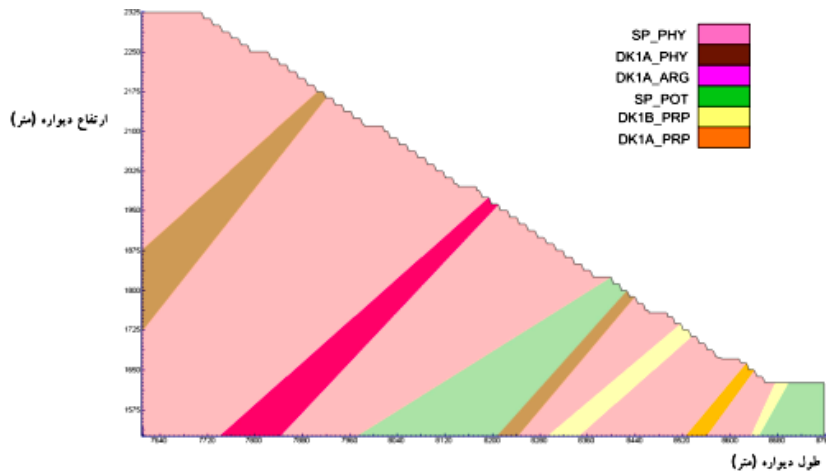
تعیین خواص ذاتی مصالح

در بخش قبل به بررسی طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ به روش RMR پرداخته شده است. مقدار RMR تعیین شده برای طبقه‌بندی مذکور، برای هر مرحله از حفاری به‌طور مجزا بوده است و همان‌طور که مشاهده شد مقدار RMR به‌صورت یک بازه برای هر نوع لیتولوژی-آلتراسیون در هر مقطع به‌دست آمد. برای تعیین خصوصیات ذاتی هر لیتولوژی-آلتراسیون موجود در سطح محتمل لغزش، با توجه به عدم احتمال لغزش‌های صفحه‌ای و گوه‌ای مقطع

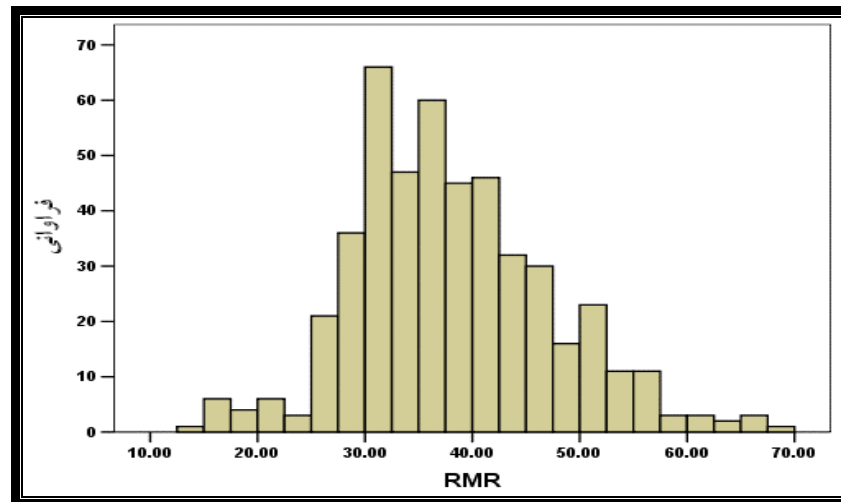
بررسی شده از معیار گسیختگی هوک-براون و موهر-کولمب استفاده شده است. با توجه به کیفی بودن طبقه‌بندی توده سنگ روش GSI با استفاده از روابط ارائه شده هوک-براون، مقادیر به‌دست آمده RMR به مقادیر GSI تبدیل شده است. این روابط بدین‌صورت ارائه شده است [۸]:

$$\text{GSI} = \text{RMR} - 5 \quad \text{برای} \quad \text{GSI} > 18 \quad \text{یا} \quad \text{RMR} > 23 \quad (۲)$$

$$\text{GSI} = 9 \ln Q + 44 \quad \text{برای} \quad \text{GSI} < 18 \quad (۳)$$



شکل ۳. مدل لیتولوژی-آلتراسیون دیواره غربی دیواره نهایی غربی معدن مس سونگون



شکل ۴. توزیع فراوانی به‌دست آمده از امتیازدهی لیتولوژی-آلتراسیون SP-PHY دیواره غربی

معدن

در روابط بالا، GSI شاخص مقاومت زمین‌شناسی توده سنگ، RMR امتیاز توده سنگ بر اساس طبقه‌بندی ژئومکانیکی و Q امتیاز توده سنگ بر اساس طبقه‌بندی بارتن است. برای تعیین خصوصیات ذاتی هر نوع لیتولوژی-آلتراسیون موجود در مقطع بررسی شده از این روابط استفاده شده است [۹]:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a \quad (4)$$

$$m_b = m_i \exp \left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D} \right) \quad (5)$$

$$s = \exp \left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D} \right) \quad (6)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right) \quad (7)$$

$$\phi' = \sin^{-1} \left[\frac{6am_b(s + m_b\sigma_{3n}')^{a-1}}{2(1+a)(2+a) + 6am_b(s + m_b\sigma_{3n}')^{a-1}} \right] \quad (8)$$

$$c' = \frac{\sigma_{ci} [(1+2a)s + (1-a)m_b\sigma_{3n}'] (s + m_b\sigma_{3n}')^{a-1}}{(1+a)(2+a) \sqrt{1 + (6am_b(s + m_b\sigma_{3n}')^{a-1}) / ((1+a)(2+a))}} \quad (9)$$

$$\sigma_{3n} = \sigma'_{3\max} / \sigma_{ci} \quad (10)$$

در روابط بالا، σ'_1 و σ'_3 به ترتیب تنش‌های اصلی حداکثر و حداقل مؤثر، σ_{ci} مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر، m و s ثابت‌های توده سنگ، GSI اندیس مقاومت زمین‌شناسی، D درجه برهم خوردگی یا آشفستگی توده سنگ است که به شاخص‌هایی نظیر اثرات ناشی از انفجار و تنش‌های آزادشده وابسته است، ϕ' و c' نیز به ترتیب زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت چسبندگی توده سنگ و $\sigma'_{3\max}$ حد بالایی تنش تعیین شده از ارتباط بین دو معیار هوک-براون و موهر-کولمب خواهد بود. به ازای افزایش عمق و با افزایش تنش نرمال در توده سنگ، مقادیر مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی نیز تغییر خواهند کرد [۹]. بنا بر این با توجه به این نکته که تمام سطوح محتمل لغزش مقاطع در عمقی بیش از ۵۰ متر صورت گرفته است، مقادیر مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای حالت بحرانی ۵۰ متر در نظر گرفته شده است. مقادیر مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی هر نوع لیتولوژی-آلتراسیون برای هر مغزه محاسبه شده و پس از تشکیل توزیع به‌دست آمده، مقادیر میانگین و انحراف معیار این خصوصیات تعیین شده است.

با توجه به تغییرات زیاد ایجاد شده در مقادیر مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، برای کاهش ضریب تغییرات به‌وجود آمده از ۹۰٪ سطح اطمینان اطلاعات به‌دست آمده استفاده شده است. جدول ۳ محدوده تغییرات RMR، GSI و شاخص‌های مقاومتی توده سنگ دربرگیرنده دیواره دیواره غربی را ارائه می‌کند. همچنین در این جدول میانگین، انحراف معیار و ضریب تغییرات مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ارائه شده است.

روش شبیه‌سازی مونت کارلو

در تحلیل پایداری شیروانی‌ها که با روش‌های ثابت صورت می‌گیرد، مقادیر امتیازدهی توده سنگ به‌صورت میانگین بررسی می‌شود که منجر به ارائه ضریب ایمنی به‌صورت عددی واحد خواهد شد. این عدد واحد قادر به ارائه اطلاعات پیرامون تغییرات توده سنگ بررسی شده نخواهد بود. برای دستیابی به این اطلاعات لازم است که از روش‌های احتمالاتی استفاده شود. یکی از روش‌های مؤثر در تحلیل احتمالاتی شیروانی‌ها استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو

جدول ۳. شاخص‌های ژئومکانیکی به‌دست آمده در دیواره غربی با سطح اطمینان ۹۰٪

ردیف	لیتولوژی - آلتراسیون	RMR	GSI	C(KPa) Φ(Degree)	میانگین	انحراف معیار	ضریب تغییرات(درصد)
۱	DK1A_ARG	۲۸-۳۵	-۳۰ ۲۳	(KPa) -۱۲۷(KPa) ۹۲	(KPa) ۱۰۹/۵	۵/۸	۵/۳
				(درجه) ۵-۲۶(درجه) ۲۱	(درجه) ۲۳/۸	۱/۶	۶/۷
۲	DK1A_PHY	۲۱-۴۴	-۳۹ ۱۶	(KPa) -۲۶۹(KPa) ۱۶۱	(KPa) ۱۹۷/۵	۱۸	۹/۱
				(درجه) ۵-۴۰(درجه) ۳۰	(درجه) ۳۴	۲/۷	۷/۹
۳	DK1A_PRP	۲۹-۵۶	-۵۱ ۲۴	(KPa) -۴۴۰(KPa) ۱۵۲	(KPa) ۲۹۱/۵	۴۸	۱۶/۵
				(درجه) ۴۸/۴(درجه) ۲۹/۶	(درجه) ۴۰/۳	۳/۱	۷/۷
۴	DK1B_PRP	۱۸-۶۲	-۵۷ ۱۳	(KPa) -۳۷۴(KPa) ۱۵۸	(KPa) ۲۳۸/۴	۳۶	۱۵/۱
				(درجه) ۴۵/۶(درجه) ۳۰/۶	(درجه) ۳۶/۷	۵/۲	۱۴/۱
۵	SP_PHY	۱۶-۸۵	-۸۰ ۱۱	(KPa) -۳۲۷(KPa) ۷۸	(KPa) ۱۸۸	۴۱/۵	۲۲/۱
				(درجه) ۲۰-۴۴(درجه) ۳۳	(درجه) ۳۳	۴	۱۲/۱
۶	SP_POT	۲۱-۷۷	-۷۲ ۱۶	(KPa) -۵۳۰(KPa) ۹۵	(KPa) ۲۰۳/۲	۷۲/۵	۳۵/۶
				(درجه) ۵۰/۸(درجه) ۲۲/۶	(درجه) ۳۲/۸	۴/۷	۱۴/۳

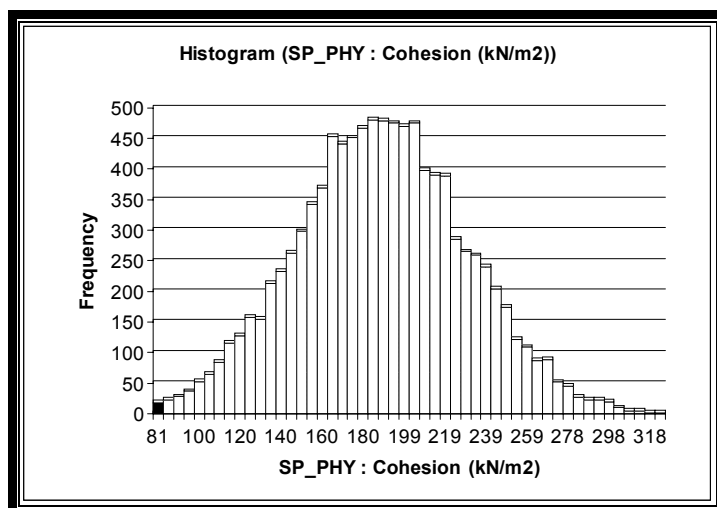
است. استفاده از این روش که مبتنی بر تکنیک‌های عددی است، این امکان را فراهم می‌سازد تا پس از تعیین و برآورد مقادیر خصوصیات توده سنگ نمونه‌گیری شده، خصوصیات مشابه اندازگیری شده را پیرامون نمونه بررسی شده پیش‌بینی کرد [۱۰]. به‌طور کلی روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو را می‌توان به چهار مرحله تقسیم کرد: (۱) تخمین تابع چگالی احتمالی متغیر تصادفی بررسی شده (۲) تولید اعداد تصادفی در بازه صفر تا یک (۳) تعیین میانگین و انحراف معیار مقادیر متغیرهای تصادفی (۴) تعیین تابع چگالی احتمالی متغیرهای تصادفی بر اساس اعداد تصادفی تولید شده. بهترین راه برای تخمین تابع چگالی احتمالی متغیرهای تصادفی مؤثر در تحلیل پایداری شیروانی‌ها استفاده از برداشت‌های سطحی و نمونه‌های حاصل از حفاری گمانه‌ها است. متأسفانه در پروژه‌های ژئوتکنیکی به دلیل ارتباط مستقیم با دنیای ناشناخته زمین و عدم دسترسی به داده‌های کافی، اغلب تعیین و تهیه یک تابع چگالی احتمالی ممکن نیست. بنا بر این، برای تهیه یک تابع توزیع احتمالی مناسب از متغیرهای موجود باید به تجربیات و پروژه‌های گذشته که به شرایط محیط و شاخص‌های بررسی شده کنونی شباهت دارد رجوع کرد. در جدول ۴، انواع مختلف تابع چگالی احتمالی شاخص‌های مورد استفاده در مهندسی ژئوتکنیک ارائه شده است.

جدول ۴. انواع مختلف تابع چگالی احتمالی متغیرهای تصادفی در مهندسی ژئوتکنیک [11]

خصوصیات	تابع چگالی احتمالی
وزن مخصوص	نرمال لگاریتمی
تخلخل	نرمال
زاویه اصطکاک داخلی	نرمال
شاخص‌های مقاومت برشی	نرمال

برای شبیه‌سازی متغیرهای تصادفی (مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی) خصوصیات ذاتی هر لیتولوژی-آلتراسیون در مقاطع بررسی شده از ۱۰۰۰۰ عدد تصادفی استفاده شده است. تابع چگالی احتمالی در نظر گرفته شده برای هر متغیر تصادفی به‌صورت توزیع نرمال

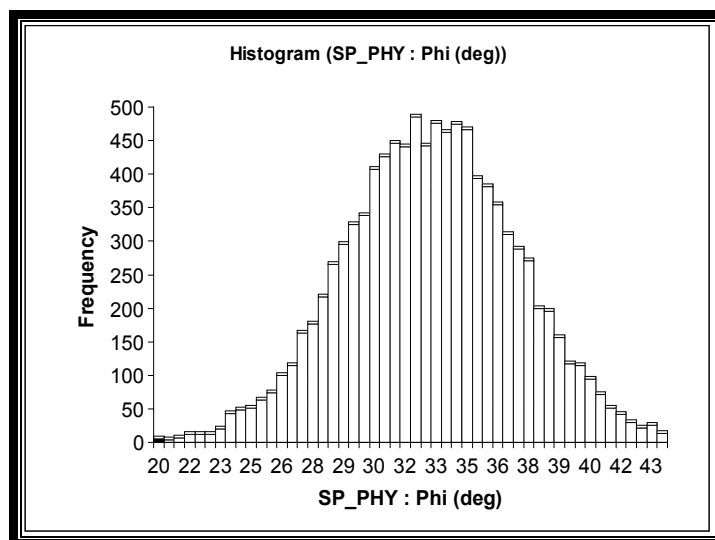
بوده است. شکل ۵ و ۶ به ترتیب تابع چگالی احتمالی مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی لیتولوژی-آلتراسیون SP_PHY را در دیواره غربی نشان می‌دهد. همان‌طور که در اشکال مذکور مشاهده می‌کنید، میانگین و انحراف معیار مقاومت چسبندگی به ترتیب برابر ۱۸۸/۵ کیلو پاسکال، ۴۰/۶۱ و میانگین و انحراف معیار زاویه اصطکاک داخلی برابر ۳۳/۰ درجه، ۳/۹۳ است. مطابق روش ذکر شده، تابع چگالی احتمالی مقادیر مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی هر لیتولوژی-آلتراسیون موجود در مقاطع بررسی شده تولید شده است.



شکل ۵. تابع چگالی احتمالی مقاومت چسبندگی SP_PHY شبیه‌سازی شده در دیواره غربی

بحث

هنگامی که شاخص‌های مورد استفاده در طبقه‌بندی توده سنگ به صورت متغیرهای تصادفی در نظر گرفته می‌شود باعث خواهد شد تا امتیاز به دست آمده از طبقه‌بندی توده سنگ بررسی شده به صورت یک تابع چگالی احتمالی ارائه شود. پس از طبقه‌بندی توده سنگ دیواره بررسی شده، خواص ذاتی توده سنگ قابل ارزیابی است. با توجه به عدم احتمال لغزش بر روی ناپیوستگی‌ها در مقاطع بررسی شده محدوده نهایی معدن مس سونگون، مقادیر مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی هر لیتولوژی-آلتراسیون بر اساس خصوصیات توده سنگ



شکل ۶. تابع چگالی احتمالی زاویه اصطکاک داخلی SP_PHY شبیه‌سازی شده در دیواره غربی

موجود در سطح محتمل لغزش و بر اساس تنش‌های اصلی مؤثر تعیین شده است. استفاده از روش‌های ثابت در طبقه‌بندی توده سنگ ساخت‌گاه بررسی شده، اطلاعات مناسبی از خصوصیات محدوده مورد نظر ارائه نخواهد کرد؛ اما استفاده از روش‌های احتمالاتی نظیر شبیه‌سازی مونت‌کارلو باعث می‌شود تا پیش‌بینی مناسبی از خصوصیات تعیین شده نمونه به‌دست آمده پیرامون محدوده بررسی شده ارائه گردد. استفاده از تعداد بیش‌تر اعداد تصادفی برای تعیین تابع چگالی احتمالی مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی باعث می‌شود تا شکل مناسب‌تری از توزیع در نظر گرفته شده ایجاد شود.

نتیجه‌گیری

طبقه‌بندی توده سنگ محدوده معدن مس سونگون به عنوان روشی مؤثر برای تحلیل پایداری شیروانی معدن به‌کار گرفته شد. طبقه‌بندی توده سنگ بررسی شده بر اساس استفاده از شاخص‌های مؤثر در طبقه‌بندی توده سنگ به‌عنوان متغیرهای تصادفی انجام شد. در نهایت برای تعیین خصوصیات ذاتی توده سنگ از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شد. نتایج

حاصل از تحلیل‌های انجام شده در محدوده‌ی نهایی معدن مس سونگون در این‌جا آورده شده است:

۱. استفاده از جهت‌یابی مغزه‌های حفاری شده در تعیین خصوصیات هندسی ناپیوستگی‌ها باعث ارائه و پیش‌بینی مناسبی از روند ناپیوستگی‌ها در اعماق مورد نظر می‌شود.
۲. استفاده از طبقه‌بندی توده سنگ، بر اساس امتیازدهی هر مرحله از حفاری (هر مغزه به‌دست آمده) باعث به‌وجود آمدن جامعه آماری مناسب خصوصیات مقاومتی هر لیتولوژی-آلتراسیون می‌شود.
۳. با توجه به تغییرات شدید خواص ذاتی توده سنگ بررسی شده محدوده‌ی نهایی معدن مس سونگون، استفاده از ۹۰٪ سطح اطمینان اطلاعات به‌دست آمده باعث می‌شود تا مقدار انحراف معیار و ضریب تغییرات مناسبی از مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی ایجاد شود.
۴. نتایج حاصل از طبقه‌بندی توده سنگ دیواره‌های معدن مس سونگون نشان می‌دهد که هر چه از جنوب و جنوب غربی معدن به سمت شمال غرب و شمال معدن می‌رویم وضعیت توده سنگ از لحاظ کیفی مناسب‌تر خواهد شد.
۵. استفاده از محدوده وسیع تغییرات مقاومت چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی که توسط روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو ایجاد می‌شود باعث خواهد شد تا پیش‌بینی قابل قبولی از وضعیت تغییرات خواص ذاتی توده سنگ در اختیار قرار گیرد.
۶. استفاده از تعداد بیش‌تر اعداد تصادفی در روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو باعث کاهش ضریب تغییرات متغیرهای تصادفی و در نتیجه افزایش دقت شبیه‌سازی خواهد شد.
۷. با توجه به کاستی‌های اطلاعات موجود، با حفر کامل گمانه‌های ژئوتکنیکی در نظر گرفته شده در معدن مس سونگون و همچنین انجام آزمایش‌های مکانیک سنگی مورد نیاز می‌توان به اطلاعات کامل تری نسبت به خصوصیات توده سنگ محدوده بررسی شده دست یافت.

منابع

1. Bieniawsky, Z.T., "Engineering Rock Mass Classifications" John Wiley and Sons (1989) P. 251.

2. Barton, N., Lien, R., and Lunde, J. "Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support" Rock Mechanics, Springer-Verlag,, Vol.6(1974) 189-236.
3. Hoek, E. "Strength of Rock and Rock Masses" News Journal of ISRM, Vol. 2(1994) 4-16.
4. Priest. Stephen, "Discontinuity Analysis for Rock Engineering" Chapman & Hall (1993) 473.
5. Savely, J. and Call, R.D. "Clay Imprint Core Orientor Manual" SRK Co-England(1980) 27.
۶. عباس‌زاده محسن، "تحلیل پایداری شیب معادن روباز توسط روش‌های احتمالاتی (مطالعه موردی معدن مس سونگون)"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، (۱۳۸۵) ۲۶۴ صفحه.
7. Priest, S.D., Brown, E.T. "Probabilistic Stability Analysis of Variable Rock Slopes" Institution of Mining and Metallurgy, Vol. 92(1983)A1-A13.
8. Hoek, E., Brown, E.T. "Practical Estimates of Rock Mass Strength" Int. J. Rock Mech. and Min. Sci., Vol. 34 , No. 8(1997)1165-1186.
9. Hoek. E. "Hoek-Brown Failure Criterion" Consulting Engineer Vancouver, Canada, (2002 Edition).
10. Christian, J.T., Ladd, C.C., Baecher, G.B., "Reliability Applied to Slope Stability Analysis" Journal of Geotechnical Engineering Division, Vol. 120, No. 12(1994)2180-2207.
11. Abramson, L.W. Slope Stability and Stabilization Methods. Balkema pub., McGraw-Hill (2002).