نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن "
Iranian Journal of Mining Engineering
(IRJME)

دوره دهم، شماره ۲۷، سال ۱۳۹۴، صفحه ۶۹ تا ۸۰
Vol. 10, No. 27, 2015, pp.69-80

تخمین پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ با استفاده از روش مونت کارلو

مجتبی ربیعی وزیری[۱]، سعید کریمی نسب[۲*]، حمید رضا محمدی[۳]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک‌سنگ، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛mojtabavaziri@yahoo.com
۲- دانشیار بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان؛ kariminasab@uk.ac.ir
۳- کارشناس ارشد ژئوتکنیک، شرکت معدنی و صنعتی گل گهر؛ hamid_azizabadi@yahoo.com

(دریافت ۲۲ شهریور ۱۳۹۲، پذیرش ۱۴اردیبهشت ۱۳۹۴)

چکیده

پارامترهای مقاومت برشی توده‌های سنگی از مهم‌ترین اطلاعات مورد نیاز در طراحی و بررسی پایداری سازه‌هایی می‌باشند که در سنگ حفر می‌شوند. بر این اساس هوک و براون روشی را برای تخمین پارامترهای مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ‌های درزه‌دار پیشنهاد کردند. در طراحی‌های مهندسی سنگ اغلب از میانگین مقادیر پارامتر های هوک و براون استفاده می‌شود. در چنین مواردی تحلیل احتمالاتی خواص توده‌سنگ بسیار مهم است. در این مقاله بر اساس نتایج آزمایش‌های مکانیک‌سنگ روی نمونه‌های سنگی محدوده معدن گل‌گهر سیرجان به مدل‌سازی عدم اطمینان‌ها در تعیین پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ‌های موجود در معدن، بر اساس معیار شکست هوک و براون و با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو پرداخته شد. چون با تعیین پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ بر اساس یک سطح اطمینان مشخص در مراحل بعدی می‌توان طراحی‌های مورد نیاز را بر اساس یک سطح اطمینان مشخص انجام داد، مقادیر این پارامترها با سطح اطمینان مشخصی تعیین شد. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که ضریب تغییرات و در نتیجه پراکندگی داده‌های شبیه‌سازی شده می‌تواند ناشی از روابط استفاده شده در محاسبه پارامترهای خروجی باشد. رابطه‌ای که با وجود ورودی‌های یکسان در مقایسه با روابط دیگر، خروجی‌هایی با ضریب تغییرات بیشتر را ایجاد می‌کند نشان می‌دهد که عدم قطعیت بیشتری در مدل ریاضی حاکم بر آن رابطه و در نتیجه خروجی‌های محاسبه شده توسط آن رابطه وجود دارد. بر این اساس ضریب تغییرات و در نتیجه آن پراکندگی در داده‌های شبیه‌سازی شده زاویه اصطکاک داخلی به دلیل رابطه مثلثاتی کمتر از چسبندگی است. همچنین برتری استفاده از توابع توزیعی با کران صفر تا بی‌نهایت مثبت نسبت به توابع توزیعی که دارای دو کران باز هستند در مورد برازش بر داده‌هایی با مقدار عددی کم و پراکندگی زیاد در هنگام استفاده از روش مونت کارلو در شبیه‌سازی نشان داده شد.

کلمات کلیدی

شبیه‌سازی مونت کارلو، معدن آهن شماره یک گل‌گهر، معیار شکست هوک و براون، مقاومت برشی توده‌سنگ

Archive of SID
www.SID.ir

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

تعیین مقادیری مناسب و با سطح اطمینان مشخص برای پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ در مسائل مربوط به طراحی و پایداری سازه‌های حفر شده در سنگ مانند تونل‌ها، شیب‌های سنگی و غیره بسیار مهم است. اهمیت این موضوع زمانی بیشتر آشکار می‌شود که ناپایداری یک سازه سنگی باعث ایجاد خسارات قابل توجه و جبران ناپذیری شده است. در تعیین مقادیر مناسب برای پارامترهای طراحی مقاومت برشی سه دیدگاه مطرح است[۱]:

- انتخاب مقادیر متعارف از چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی

- استفاده مقادیری معقول از چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی بر اساس ارزیابی‌های صحرایی زمین‌شناسی و مکانیک-سنگی ساختگاه‌های مشابه

- ترکیبی از مقادیر حاصل از ارزیابی‌های صحرایی و آزمون-های آزمایشگاهی و برجا

مناسب‌ترین مورد از موارد پیش گفته، مورد سوم است اما این مورد نیز مانند دو دیدگاه دیگر پراکندگی مقادیر اندازه‌گیری شده برای پارامترهای مقاومت برشی و تغییر این مقادیر در دامنه وسیعی از اعداد و همچنین قابلیت اعتماد به این مقادیر را در نظر نمی‌گیرد.

بررسی‌های مربوط به قابلیت اعتماد در تعیین خواص مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری توده‌سنگ به‌خصوص پارامترهای مقاومت برشی یعنی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، از جمله موارد بسیار مهم در تعیین خواص توده‌سنگ با اطمینان بالا است. تعیین این خواص با سطح اطمینان مشخص به انجام طراحی با سطح اطمینان مورد نظر کمک می‌کند. مواد طبیعی نظیر خاک و سنگ به طور ذاتی ناهمگن هستند و تغییر-پذیری زیادی در خواص آن‌ها وجود دارد، این تغییرپذیری به علت ماهیت ناهمگن در مورد سنگ‌ها بیشتر از خاک است. ضروری است که این چنین خصوصیات طبیعی و تصادفی قبل از هر گونه طراحی به خوبی توصیف و تشریح شوند. طبیعت این خواص با عدم قطعیت همراه است. و بسیار منطقی‌تر است که به جای استفاده از یک مقدار قطعی که اغلب میانگین مقادیر است در محاسبات مربوط به طراحی از بررسی‌های مربوط به عدم قطعیت در به دست آوردن این مقادیر استفاده کرد. به هر حال تخمین‌های آماری و احتمالاتی می‌توانند در ملاحظه کردن دامنه وسیعی از مقادیر به پارامترهای تصادفی موجود در مسئله مفید باشند. این موضوع می‌تواند با به‌دست آوردن فراوانی نسبی و توزیع احتمال مربوط به مقادیر به آسانی به‌دست آید[۲]. اندازه‌گیری تغییرپذیری خواص مکانیکی توده‌های سنگی دشوار است. روش‌های مورد استفاده در مهندسی سنگ که برای محاسبه خصوصیات توده‌سنگ استفاده می‌شوند تنها بر جمع‌آوری تعداد محدودی داده مکانی استوار هستند.

به‌عنوان مثال روش‌های عددی تنها نیازمند یک مقدار عددی معین برای هر کدام از پارامترهای ورودی می‌باشند، که پس از انجام فرآیند محاسباتی مربوطه به یک مقدار معین برای پارامتر خروجی ختم می‌شود. این گونه روش‌ها توزیع احتمالی پارامترهای ورودی را در محاسبه پارامترهای مربوط به توده-سنگ در نظر نمی‌گیرند، بنابراین این قبیل روش‌های تجربی به‌طور ذاتی در مقادیر خروجی که نتیجه می‌دهند دچار نامعینی و شک و تردید هستند[۲].

در حقیقت همه پارامترهای معیار هوک و براون اغلب یک توزیع آماری دارند. این توزیع‌های آماری می‌توانند محاسبات مربوط به طراحی را به شدت معنی‌دار کنند. این توزیع‌ها اغلب در بررسی قابلیت اعتماد در پایداری شیب‌ها و طراحی نگهداری تونل‌ها اهمیت دارند[۳].

مطالعات معدودی در زمینه برآورد احتمالاتی خواص توده-سنگ وجود دارد. در سال ۱۹۹۵ کیم[۱] یک روش احتمالاتی برای تخمین خواص مقاومتی توده‌سنگ ارائه کرد. وی از روش مونت کارلو[۲] برای شبیه‌سازی و توان دوم کای[۳] برای برازش نتایج آزمایش‌ها در سنگ بازالت استفاده نمود. هوک[۴] در سال ۱۹۹۸ روش تخمین نقطه‌ای[۵] را برای تخمین پارامترهای موجود در رابطه هوک و براون به کاربرد و فرض کرد که سه پارامتر GSI، σ_i و m_i دارای توزیع نرمال[۶] هستند[۲]. ساری[۷] درسال ۲۰۰۹ همانند روش هوک بررسی‌هایی را با تعداد محدودی داده آماری انجام داد[۴]. به هر حال در نظر گرفتن توزیع قرار دادی نرمال برای پارامترهای رابطه هوک و براون ممکن است صحیح نباشد و منطقی‌تر است که توزیع را همان توزیع مشاهده شده در هیستوگرام فراوانی داده‌ها در نظر گرفت[۲]. ساری در سال ۲۰۱۰ و در ادامه بررسی‌های قبلی و با استفاده از روش مونت کارلو اقدام به شبیه‌سازی خواص توده‌سنگ نمود. وی تأثیر توزیع آماری عوامل تأثیرگذار روی تمامی پارامترهای ورودی معیار هوک و براون را هم در محاسبات خود اعمال کرد. وی توزیع‌های مربوط به

Archive of SID
www.SID.ir

پارامترهای سنگ بکر و نیز ناپیوستگی‌ها را که همان ورودی-های سیستم طبقه‌بندی RMR بودند را هم در شبیه‌سازی خود دخالت داد[۲]. آیدریس[۸] در سال ۲۰۱۱ و در بررسی-های خود در زمینه تحلیل عددی تغییرپذیری خواص توده-سنگ از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده کرد، وی در بررسی‌های خود توزیع پارامترهای ورودی به تحلیل را نرمال در نظر گرفت[۵].

در تحقیق حاضر به تحلیل احتمالاتی پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ با استفاده از رابطه هوک و براون و با روش شبیه‌سازی مونت کارلو پرداخته شده است و ضمن تعیین مقادیر این پارامترها با سطح اطمینان مشخص، به بررسی ضریب تغییرات و میزان پراکندگی در میان پارامترهای شبیه-سازی شده چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ پرداخته شده است. همچنین همبستگی بین پارامترهای متغیر شبیه‌سازی شده موجود در تحلیل نیز بررسی گردیده است. لازم به ذکر است که در این مطالعه منظور از پارامترهای مقاومت برشی، پارامترهای خطی مقاومت برشی موهر و کولمب است، که از این به بعد به اختصار پارامترهای مقاومت برشی خوانده می‌شوند.

۲- معدن سنگ آهن گل‌گهر

معدن شماره یک سنگ آهن گل‌گهر در فاصله ۵۵ کیلومتری جنوب غربی شهر سیرجان واقع است، معدن دارای ۲۲۰۰ متر طول و ۷۵۰ متر عرض است عمق فعلی آن حدود ۱۵۰ متر از سطح زمین است و عمق نهایی آن به ۲۶۰ متر می‌رسد[۶]. توده‌سنگ‌های در برگیرنده این معدن شامل شش گروه سنگی تحت عناوین: آمفیبولیت، کوارتزشیست، گنایس، مگنتیت، میکاشیست و هماتیت می‌باشند. که در بحث‌های مربوط به طراحی و تولید و همچنین پایداری دیواره نهایی معدن تأثیر-گذار هستند (جدول ۱).

تعیین مقادیر دقیق پارامترهای مقاومتی برخی از گروه‌های سنگی مانند کوارتزشیست، مگنتیت و هماتیت به دلیل داشتن بیشترین فراوانی در معدن اهمیت ویژه‌ای دارد. از طرفی گروه-های سنگی آمفیبولیت، گنایس و میکاشیست با وجود این‌که فراوانی کمتری نسبت به سه گروه قبل در معدن دارد اما تعیین مقادیر دقیق پارامترهای مقاومتی آن‌ها به دلیل داشتن پارامترهای مقاومتی ضعیف، در بحث‌های مربوط به طراحی و پایداری شیب دیواره‌های معدن مهم است.

۳- روش شبیه‌سازی مونت کارلو

اغلب پارامترهایی که در بررسی‌های ژئوتکنیکی وجود دارند، عدم قطعیت‌هایی دارند که طراح قادر به پیش‌بینی آن‌ها نیست. به عبارت دیگر پارامترهای مختلف در مکان و یا زمان-های گوناگون فراوانی‌های متفاوتی دارند، بنابراین خروجی‌های چندگانه و بدون هیچ الگوی مشخصی با عباراتی همچون شانس و یا احتمال بیان می‌شوند. بنابراین روش‌هایی که عدم قطعیت‌ها و برآیند آن‌ها را در نظر بگیرند، می‌توانند بسیار با ارزش باشند. این روش‌ها به نام روش‌های تعیین قابلیت اعتماد مشهور می‌باشند. در یک تقسیم‌بندی کلی، روش‌های بررسی قابلیت اعتماد به سه دسته تقسیم می‌شوند. دسته اول: روش‌های تحلیلی مانند روش ترکیب توزیع متغیرها[۹] [۷]، دسته دوم: روش‌های تقریبی مانند تخمین نقطه‌ای، و مرتبه اول ممان دوم[۱۰] و دسته سوم: روش‌های شبیه‌سازی مانند روش مونت کارلو[۸]، می‌باشند. که در این میان روش مونت کارلو با توجه به سهولت در کاربری و دقت در جواب‌های به-دست آمده بیش از سایر روش‌ها استفاده شده است[۹]. شبیه‌سازی در مسائلی که نقش عامل زمان مهم نیست کاربرد دارد، بنابراین شبیه‌سازی مونت کارلو یک روش استاتیک است تا دینامیک. این روش به دلیل کاربرد ساده‌تر نسبت به روش-های تحلیل احتمالاتی دیگر، برای تحلیل احتمالاتی و بررسی قابلیت اعتماد مناسب‌تر است.

روش شبیه‌سازی مونت کارلو روشی است که با استفاده از یک سری اعداد تصادفی از توزیع احتمالی متغیرها، تابع نهایی را شبیه‌سازی می‌کند. امروزه روش مونت کارلو در مسائل بسیار پیچیده که دارای ماهیتی غیرقطعی هستند، کاربرد بسیاری دارد. شیوه نمونه‌گیری در روش مونت کارلو تصادفی است به این معنی که هر نمونه به شکل تصادفی از بازه توزیع داده‌های ورودی انتخاب می‌شود[۱۰].

مراحل مختلف این روش به شرح زیر است:

۱ - گرفتن نمونه‌های محدودی از پارامترهای ورودی مورد نظر

۲ - تجزیه و تحلیل اطلاعات خام به‌دست آمده

۳ - تخمین و تعیین نوع توزیع آماری حاکم بر نمونه‌ها و به دست آوردن خصوصیات آماری آن

۴ - تولید مقادیر تصادفی برحسب نوع توزیع تطابق یافته و تعیین خصوصیات جدید آماری توزیع مربوط به پارامترهای ورودی

Archive of SID
www.SID.ir

۵ - تخمین پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ با استفاده از مقادیر تصادفی تولید شده در مرحله قبل

۴- تابع توزیع متغیرهای تصادفی

پدیده‌هایی که از موردی به مورد دیگر به صورت تصادفی تغییر کنند را متغیر تصادفی می‌نامند. متغیرهای تصادفی را می‌توان به دو دسته متغیرهای تصادفی گسسته[۱۱] و متغیرهای تصادفی پیوسته[۱۲] تقسیم‌بندی کرد. متغیر تصادفی گسسته، متغیری است که برد آن فضای متناهی یا نامتناهی شمارش-پذیر دارد. متغیر تصادفی پیوسته، متغیری است که برد آن فضای نامتناهی شمارش‌ناپذیر دارد[۱۱]. متغیرهای تصادفی بسته به گسسته یا پیوسته بودن از توابع توزیع مختلفی پیروی می‌کنند. از جمله توزیع‌های مهم و معروف در متغیرهای تصادفی گسسته می‌توان به توزیع‌های: برنولی[۱۳]، دو جمله-ای[۱۴]، دو جمله‌ای منفی[۱۵]، هندسی[۱۶]، فوق هندسی[۱۷]، گسسته[۱۸] و پواسون[۱۹] اشاره کرد. از جمله مهم‌ترین توزیع‌های مربوط به متغیرهای پیوسته نیز می‌توان به توزیع‌های: نرمال، لاگ نرمال[۲۰]، گاما[۲۱]، وایبل[۲۲]، بتا[۲۳]، نمایی[۲۴]، کای اسکور، F، t، کوشی[۲۵] و یکنواخت[۲۶] اشاره کرد[۱۲].

در این بخش به‌طور مختصر برخی از خواص توزیع‌های شناسایی شده برای متغیرهای تصادفی پارامترهای ورودی در تحلیل پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ بررسی می-شود[۱۱]:

۴-۱- توزیع نرمال

مهم‌ترین توزیع پیوسته توزیع نرمال است. این توزیع به‌طور گسترده در علم آمار استفاده می‌شود چون از یک سو بسیاری از پدیده‌های طبیعی از این توزیع پیروی می‌کنند و از سوی دیگر شکل حدی بسیاری از توزیع‌های دیگر نیز نرمال است. تابع چگالی توزیع نرمال به شکل زیر است:

(۱)

$$f_X(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{\frac{-1}{2\sigma^2}(x-\mu)^2} \qquad -\infty<x<+\infty$$

امید ریاضی و واریانس توزیع نرمال از روابط زیر محاسبه می-شوند:

(۲)

$$E(x)=\mu$$

(۳)

$$V(x)=\sigma^2$$

در روابط بالا x، متغیر تصادفی پیوسته، μ، میانگین، σ، انحراف معیار می‌باشند.

۴-۲- توزیع وایبل

اگر متغیر تصادفی پیوسته x دارای تابع چگالی احتمالی به شکل زیر باشد آن‌گاه این متغیر دارای توزیع وایبل با پارامترهای λ, ω, r است.

(۴)

$$f_X(x)=\frac{r(x-\lambda)^{r-1}}{\omega^r}\exp\left[-\left((x-\lambda)/\omega\right)^r\right]$$

امید ریاضی و واریانس توزیع وایبل از روابط زیر محاسبه می-شوند:

(۵)

$$E(x)=\lambda+\omega\Gamma(1+1/r)$$

(۶)

$$V(x)=\omega^2\left\{\Gamma(1+2/r)-\left[\Gamma(1+1/r)\right]^2\right\}$$

در روابط بالا x، متغیر تصادفی پیوسته، ω، پارامتر مقیاس[۲۷]، r، پارامتر شکل[۲۸]، λ، پارامتر آستانه[۲۹] و Γ، تابع گاما می‌باشند.

۵- معیار شکست هوک و براون

برای تخمین پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ در این مقاله از معیار شکست هوک و براون استفاده شد. هوک و براون معتقد هستند که یک معیار شکست وقتی دقیق و موفق است که سه شرط زیر در آن صدق کند.

الف) معیار باید بتواند یک توصیف کاملی از عکس‌العمل و پاسخ سنگ در مقابل تمامی وضعیت تنش‌هایی که ممکن است در زیر زمین پیش آید را بدهد. این وضعیت تنش‌ها

Archive of SID
www.SID.ir

شامل تنش‌های کششی تک‌محوره و تنش‌های فشاری سه-محوره است.

ب) معیار باید قادر به پیش‌بینی تأثیر و نفوذ یک و یا چند دسته شکستگی بر روی رفتار یک نمونه سنگ باشد. این رفتار ممکن است به‌طور کامل آنیزوتروپ باشد و ارتباط تنگاتنگی با شکستگی‌ها و راستای آن‌ها نسبت به جهت تنش‌های اعمال شده داشته باشد.

ج) معیار مورد نظر باید بتواند از لحاظ تکنیکی نمایش خاصی، هر چند تقریبی، را برای نشان دادن رفتار یک توده سنگی که چند سری دسته درزه دارد در مقیاس کاملی ارائه دهد.

هوک و براون معتقد هستند که تاکنون هیچکدام از معیارها نتوانسته است سه شرط بالا را به‌طور کامل برآورده کند. بنابراین آن‌ها معیار خود را بر این اساس پایه‌گذاری کردند. صورت کلی این معیار به شکل زیر است:

(۷)

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_C (m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_C} + S)^a$$

(۸)

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

(۹)

$$S = \exp(\frac{GSI - 100}{9 - 3D})$$

(۱۰)

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

در روابط فوق σ'_1 تنش مؤثر اصلی حداکثر، σ'_3 تنش مؤثر اصلی حداقل، σ_c مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر[۳۰] (UCS)، GSI شاخص مقاومت زمین‌شناسی، D فاکتور اغتشاش و m_i ثابت سنگ بکر می‌باشند. مقدار m_i را می‌توان با توجه به جنس سنگ و وضعیت کانی‌شناسی و بافت‌شناسی از جدولی که به این منظور طراحی شده است به‌دست آورد. m_b ثابت کاهش یافته ثابت ماده‌سنگ (m_i) بوده، همچنین s و a پارامترهایی هستند که مطابق روابط بالا محاسبه می-شوند[۱۳].

۵-۱- تعیین پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ توسط معیار هوک و براون

یکی از روش‌های متداول برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ نظیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، استفاده از معیار شکست هوک و براون است.

چون محاسبه پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ یعنی زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی در مباحث مربوط به طراحی و پایداری سازه‌های سنگی بسیار مهم است، لازم است که زاویه اصطکاک داخلی و مقاومت چسبندگی معادل برای یک توده-سنگ در دامنه تنش مشخص، تعیین شود. درنتیجه روابط زیر برای محاسبه زاویه اصطکاک ϕ' و مقاومت چسبندگی c' ارائه شده است:

(۱۱)

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

(۱۲)

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

$$\sigma'_{3n} = \frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma_{ci}} \qquad (۱۳)$$

که مقدار σ'_{3max} حد بالای تنش محصور کننده است.

برای تعیین σ'_{3max} مطالعاتی برای شیب‌ها با استفاده از تحلیل شکست دایره‌ای بیشاپ[۳۱] در دامنه وسیعی از هندسه شیب‌ها و خواص توده‌سنگ، رابطه زیر را می‌دهد:

(۱۴)

$$\frac{\sigma'_{3\max}}{\sigma'_{cm}} = 0.72\left(\frac{\sigma'_{cm}}{\gamma H}\right)^{-0.91}$$

که σ'_{cm} مقاومت کلی توده‌سنگ است که با استفاده از رابطه ۱۵ تعیین می‌شود، γ وزن واحد حجم توده‌سنگ و H ارتفاع شیب است. در مواردی که تنش افقی از تنش قائم بیشتر است، مقدار تنش افقی باید به جای γH استفاده شود[۱۳].

مقاومت کلی توده‌سنگ نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود[۱۴]:

Archive of SID
www.SID.ir

(۱۵)

$$\sigma'_{cm} = \sigma_{ci} \frac{\left(m_b + 4s - a\left(m_b - 8s\right)\right)\left(m_b/4 + s\right)^{a-1}}{2\left(1+a\right)\left(2+a\right)}$$

۶- تخمین پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت کارلو

اطلاعات ورودی برای تخمین پارامترهای مقاومت برشی توده-سنگ با استفاده از رابطه هوک و براون عبارتند از:

۱- شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI): این پارامتر ورودی بر اساس چارت اصلاح شده GSI و از روی مغزه‌های حاصل از حفاری‌های ژئوتکنیکی برداشت شد[۱۵]. برداشت شاخص مقاومت زمین‌شناسی بر اساس طول سنگ موجود در مغزه‌ها و تعداد ران‌های حفاری انجام شد چون میانگین حسابی شاخص مقاومت زمین‌شناسی برداشت‌شده برای هر گروه سنگی با میانگین وزن‌دار آن اختلاف ناچیز زیر یک واحد را داشت از وزن‌دار کردن داده‌های شاخص مقاومت زمین‌شناسی صرف نظر شد. و داده‌های اولیه به‌طور مستقیم وارد محاسبات شد.

۲- مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر (σ_c): این پارامتر بر اساس نتایج آزمون تک‌محوره ماده‌سنگ تعیین می‌شود. برای به‌دست آوردن داده‌های مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر، در مجموع تعداد ۱۹۲ مورد آزمایش تک‌محوره روی شش گروه سنگی موجود در دیواره نهایی معدن شماره یک گل‌گهر انجام شد، تعداد این آزمایش‌ها برای هر گروه سنگی بر اساس فراوانی و همچنین اهمیت آن نوع سنگ در مباحث استخراج و نیز پایداری شیب دیواره نهایی تعیین شد، بر این اساس بیشترین آزمون بر روی ماده معدنی اصلی یعنی مگنتیت و همچنین روی توده‌سنگ اصلی موجود در دیواره نهایی یعنی کوارتزشیست انجام شد (جدول۱).

جدول۱: خصوصیات پارامترهای متغییر موجود در محاسبات

توده‌سنگ	UCS(MPa)		GSI	
	تعداد	بازه تغییرات	تعداد	بازه تغییرات
آمفیبولیت	۱۲	۱۹/۶-۱۴۹/۲	۵۴	۲۸-۵۸
گنایس	۱۶	۱۵/۰-۷۹/۶	۹۹	۲۰-۴۶
هماتیت	۲۰	۱۴/۲-۱۶۲/۳	۲۵	۲۸-۴۸
میکاشیست	۱۱	۳۰/۶-۲۲۲/۱	۲۳۳	۲۰-۵۲
مگنتیت	۱۰۲	۱۷/۰-۳۰۰/۴	۶۴	۳۰-۵۹
کوارتزشیست	۳۱	۱۸/۱-۹۶/۰	۵۷۱	۲۰-۵۶

۳- ثابت وابسته به کانی‌شناسی و بافت سنگ (m_i): این ثابت وابسته به وضعیت کانی‌شناسی و بافت‌شناسی سنگ می‌باشد که مقدار آن از جدول ارائه شده توسط هوک و براون استخراج گردید (جدول۲).

۴- فاکتور اغتشاش (D): در اثر حفاری، تنش‌های محصور کننده توده‌سنگ به علت حذف وزن روباره رها می‌شوند و به توده‌سنگ اجازه اتساع و افزایش حجم را می‌دهند. آسیب‌های ناشی از انفجار نیز با ایجاد ترک‌های جدید و بازشدگی ترک-های موجود موجب کاهش درهم قفل‌شدگی توده‌سنگ می-شوند که این عوامل بر مقاومت توده‌سنگ اثر منفی می‌گذارند. مقدار این فاکتور از صفر برای توده‌سنگ دست نخورده تا یک برای توده‌سنگ دست خورده تغییر می‌کند.

در این تحقیق به دلیل انجام انفجارهای استخراجی در معدن آهن شماره یک گل‌گهر فاکتور اغتشاش برابر یک (D=1) در نظر گرفته شد.

۵- پارامتر γH: این پارامتر با توجه به انواع سنگ‌های موجود در شیب مورد نظر و وزن واحد حجم طبیعی و ارتفاع هر کدام از آن‌ها محاسبه می‌شود.

برای محاسبه این پارامتر برای هر سازه سنگی چه سطحی و چه زیرسطحی ابتدا باید لایه‌های مختلف سنگی که در بالای توده‌سنگ مورد نظر قرار دارند شناسایی شوند، با مشخص شدن ارتفاع هر کدام از لایه‌های سنگی و وزن واحد حجم آن-ها، برای هر لایه پارامتر γH محاسبه می‌شود. در نهایت مجموع γHهای مربوط به لایه‌های مختلف γH نهایی را نتیجه می‌دهد.

جدول۲: مقدار پارامترهای ثابت موجود در محاسبات[۱۶]

توده‌سنگ	m_i	γH(MPa)
آمفیبولیت	۲۰	۶/۰۴
گنایس	۲۳	۴/۶۹
هماتیت	۱۷	۲/۳۸
میکاشیست	۱۵	۳/۷۰
مگنتیت	۱۷	۵/۶۳
کوارتزشیست	۱۵	۶/۲۸

Archive of SID
www.SID.ir

در اولین گام برای تخمین پارامترهای مقاومت برشی توده-سنگ با استفاده از روش مونت کارلو، باید بهترین تابع توزیع آماری منطبق شده بر پارامترهای متغیر ورودی بر اساس واقعیت انتخاب شود.

تعیین تابع توزیع آماری پارامترهای ورودی به تحلیل بر اساس یک سطح اطمینان مشخص به طراح کمک می‌کند تا مقادیر دور از واقعیت پارامترهای ورودی را از جریان مطالعه و تحلیل داده‌ها حذف کند. درضمن جامعه آماری مورد نیاز در تحلیل احتمالاتی برای محاسبه خروجی‌های مورد نظر را بر اساس یک سطح اطمینان مشخص در اختیار طراح قرار می-دهد. در موارد مطالعاتی گذشته تابع توزیع پارامترهای ورودی در اغلب موارد نرمال در نظر گرفته شده بود (جدول۳).

در این تحقیق برای تعیین بهترین تابع توزیع آماری قابل برازش بر داده‌های ورودی از آزمون‌های اندرسون – دارلینگ[۳۲]، راین – جوینر[۳۳]، کولمرگوروف – اسمیرنوف[۳۴] و کمترین مقدار خطای نوع اول که منجر به رد شدن فرض صفر می‌شود[۳۵] استفاده شد. به این ترتیب که قابلیت برازش توزیع-های مختلف بر داده‌های ورودی توسط این آزمون‌های آماری و با سطح اطمینان ۹۵٪ ارزیابی شد و نوع توزیع آماری پارامتر مورد نظر با توجه به نتیجه این آزمون‌ها تعیین شد.

همان‌طور که در جدول۴ مشاهده می‌شود برای شاخص مقاومت زمین‌شناسی توزیع نرمال و برای مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر توزیع وایبل با پارامتر آستانه صفر شناسایی شد. چون تعداد نمونه‌گیری از تابع توزیع آماری باید به تعدادی باشد که ضمن حفظ دقت محاسبات، زمان پردازش اطلاعات نیز افزایش پیدا نکند، در گام بعدی اقدام به تولید[۵] ۱۰، داده تصادفی از تابع توزیع شناسایی شده شد (شکل ۱ و ۲).

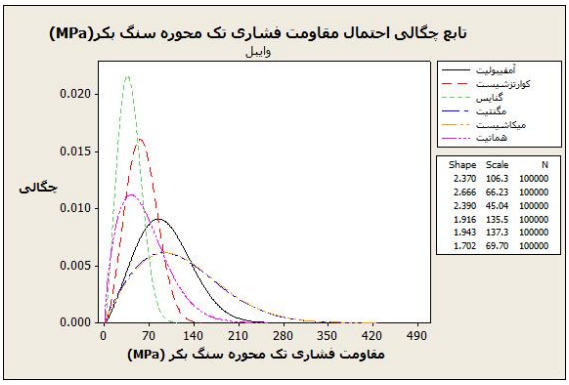
جدول۳: مقایسه بین توابع توزیع آماری برازش یافته بر پارامترهای متغییر ورودی

پارامتر مورد نظر		شاخص مقاومت زمین‌شناسی	مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر
مطالعات گذشته	کیم (۱۹۹۵)	نرمال	توان دوم کای
	هوک (۱۹۹۸)	نرمال	نرمال
	ساری (۲۰۰۹)	نرمال	نرمال
	ساری (۲۰۱۰)	عدم برازش توزیع مشخص	نرمال
	آیدریس (۲۰۱۱)	نرمال	نرمال
مورد مطالعاتی فعلی		نرمال	وایبل

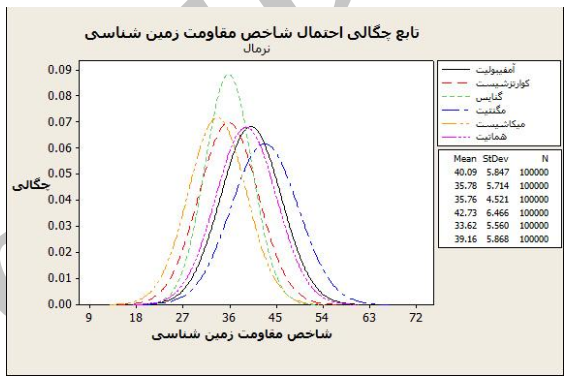
جدول۴: خصوصیات توزیع آماری اولیه شناسایی شده برای پارامترهای متغیر ورودی برای نمونه‌گیری تصادفی

توده‌سنگ	شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)			مقاومت فشاری تک‌محوره (UCS)		
	نوع توزیع آماری حاکم بر داده‌ها	پارامترهای توزیع		نوع توزیع آماری حاکم بر داده‌ها	پارامترهای توزیع	
		میانگین	انحراف معیار		شکل	مقیاس
آمفیبولیت	نرمال	۴۰/۰۶	۵/۸۳۹	وایبل	۲/۳۸۲	۱۰۶/۵۰
گنایس	نرمال	۳۵/۷۷	۴/۵۲۸	وایبل	۲/۳۸۳	۴۵/۰۶
هماتیت	نرمال	۳۹/۱۳	۵/۸۷۸	وایبل	۱/۶۹۷	۶۹/۶۵
میکاشیست	نرمال	۳۳/۶۴	۵/۵۵۰	وایبل	۱/۹۴۵	۱۳۷/۱۰
مگنتیت	نرمال	۴۲/۷۳	۶/۴۳۰	وایبل	۱/۹۱۸	۱۳۵/۹۰
کوارتزشیست	نرمال	۳۵/۷۶	۵/۷۰۷	وایبل	۲/۶۶۶	۶۶/۲۷

Archive of SID
www.SID.ir



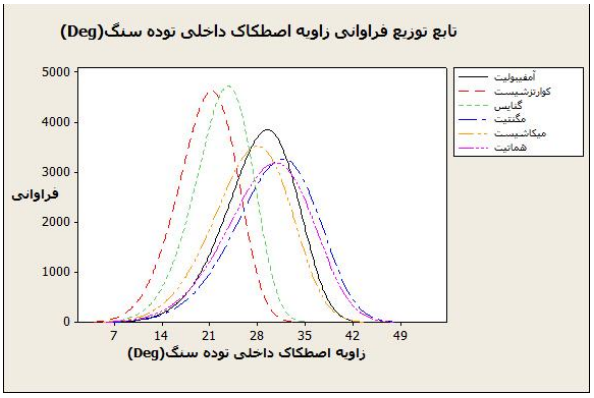
شکل ۱: تابع چگالی احتمال حاصل از شبیه‌سازی پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوره



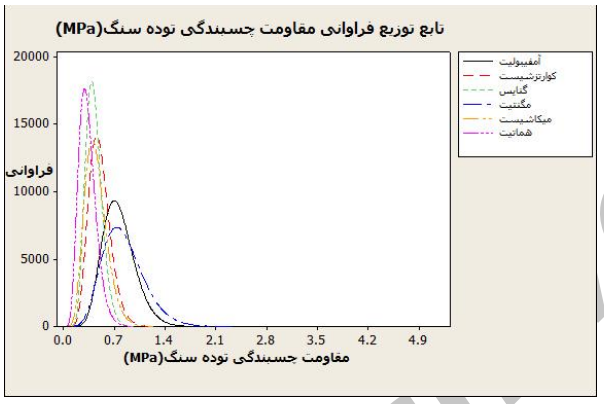
شکل ۲: تابع چگالی احتمال حاصل از شبیه‌سازی پارامتر شاخص مقاومت زمین‌شناسی

بعد از تولید اعداد تصادفی از روی تابع توزیع آماری شناسایی شده، با توجه به روابط ارائه شده برای محاسبه پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ، اقدام به تخمین پارامترهای زاویه اصطکاک داخلی و چسبندگی توده‌سنگ‌ها با استفاده از مقادیر تصادفی تولید شده در مرحله قبل شد.

بعد از محاسبه این پارامترها تابع توزیع فراوانی آن‌ها رسم شد (شکل ۳ و ۴) و میانگین، انحراف معیار، میانه و ضریب تغییرات داده‌ها با توجه به 10^5، داده محاسبه شده برای هر پارامتر و نوع توزیع محاسبه شد(جدول۵).



شکل ۳: توزیع فراوانی پارامتر زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ



شکل ۴: توزیع فراوانی پارامتر مقاومت چسبندگی توده‌سنگ

جدول۵: اطلاعات آماری حاصل از شبیه‌سازی پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ

توده‌سنگ	زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ (Deg)				چسبندگی توده‌سنگ (MPa)			
	میانگین	انحراف معیار	میانه	ضریب تغییرات	میانگین	انحراف معیار	میانه	ضریب تغییرات
آمفیبولیت	۲۸/۲	۵/۰	۲۸/۳	۰/۱۸۰	۰/۷۶۶	۰/۲۱۶	۰/۷۵۳	۰/۲۸۱
گنایس	۲۲/۶	۴/۱	۲۲/۸	۰/۱۸۲	۰/۴۲۱	۰/۱۰۹	۰/۴۱۷	۰/۲۵۸
هماتیت	۲۹/۳	۶/۲	۲۹/۷	۰/۲۱۲	۰/۳۳۴	۰/۱۱۶	۰/۳۲۵	۰/۳۴۷
میکاشیست	۲۶/۸	۵/۵	۲۷/۰	۰/۲۰۷	۰/۴۵۰	۰/۱۴۸	۰/۴۳۸	۰/۳۲۸
مگنتیت	۳۰/۳	۶/۰	۳۰/۶	۰/۱۹۹	۰/۸۳۲	۰/۲۸۱	۰/۸۰۸	۰/۳۳۷
کوارتزشیست	۲۰/۴	۴/۱	۲۰/۴	۰/۲۰۱	۰/۵۰۰	۰/۱۴۳	۰/۴۹۱	۰/۲۸۶

Archive of SID
www.SID.ir

برای دستیابی به مشخصات تابع توزیع فراوانی داده‌ها همیشه لازم نیست که تمام اطلاعات مربوط به تابع را به‌طور دقیق دانست. تعریف پارامترهایی مثل میانگین، انحراف معیار، میانه و ضریب تغییرات، می‌تواند تا حد زیادی کافی باشد. ضریب تغییرات که به‌صورت نسبت انحراف معیار به میانگین داده‌ها تعریف می‌شود نشان‌دهنده میزان پراکندگی و تغییرات در مقادیر پارامتر مورد نظر است.

یکی از دلایل اصلی تحلیل احتمالاتی پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ تعیین مقادیری با سطح اطمینان مشخص برای این پارامترها است. همان‌طور که بیان شد طراحان در هنگام استفاده از این مقادیر در محاسبات مربوط به طراحی با عدم اطمینان‌هایی در تعیین مقادیر عددی لازم روبه‌رو هستند. در نتیجه تعیین مقادیر این پارامترها با سطح اطمینان مشخص می‌تواند در انجام طراحی با اطمینانی مشخص مفید باشد. فاصله اطمینان[۳۶] نشان می‌دهد که با یک سطح اطمینان مشخص داده‌های مورد نظر در چه فاصله‌ای قرار می‌گیرند[۵].

با توجه به مطالب ذکر شده، در این مطالعه فاصله‌های اطمینان (بر اساس سطح اطمینان ۹۵٪) برای پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ تعیین شد(جدول۶).

جدول۶: فاصله اطمینان بر اساس سطح اطمینان ۹۵٪ برای پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ

توده‌سنگ	$c(\mathrm{MPa})$	$\phi(\mathrm{Deg})$
آمفیبولیت	۰/۷۶۵-۰/۷۶۸	۲۸/۱-۲۸/۲
گنایس	۰/۴۲۰-۰/۴۲۱	۲۲/۶-۲۲/۷
هماتیت	۰/۳۳۳-۰/۳۳۴	۲۹/۳-۲۹/۴
میکاشیست	۰/۴۴۹-۰/۴۵۰	۲۶/۷-۲۶/۸
مگنتیت	۰/۸۳۱-۰/۸۳۴	۳۰/۳-۳۰/۴
کوارتزشیست	۰/۴۹۹-۰/۵۰۱	۲۰/۴-۲۰/۵

در این مطالعه اقدام به بررسی همبستگی میان پارامترهای ورودی به شبیه‌سازی و پارامترهای خروجی شبیه‌سازی شد. مدل‌های مختلف رگرسیونی با حذف مقادیر دور از واقعیت موجود در داده‌ها، بهترین رابطه را میان دو پارامتر ارائه می‌دهند. بررسی همبستگی میان پارامترهای مختلف به وسیله مدل‌های مختلف رگرسیونی به طراح کمک می‌کند تا همبستگی میان پارامترهای مختلف را بررسی کرده و در صورت وجود همبستگی میان دو پارامتر بتواند مدلی را که بهترین رابطه رگرسیونی را بین دو پارامتر ارائه می‌دهد انتخاب کند و در مطالعات خود به کار گیرد. به این منظور همبستگی میان پارامترهای ژئومکانیکی مختلف در این تحقیق به صورت دو به دو و به وسیله سه مدل رایج رگرسیونی، خطی، درجه۲ و درجه۳ بررسی شد. برای بررسی همبستگی میان دو پارامتر به وسیله سه مدل بیان شده از ضریبی به نام ضریب قطعیت استفاده شد. هرچه ضریب قطعیت یک مدل رگرسیونی نسبت به مدل دیگر بیشتر باشد نشان دهنده این نکته است که مدل مورد نظر در بررسی همبستگی و ارائه رابطه بین دو پارامتر موفق‌تر عمل می‌کند.

بررسی ضرایب همبستگی میان پارامترهای مختلف شبیه-سازی شده در تحلیل احتمالاتی نشان داد که میان پارامترهای متغیر ورودی یعنی شاخص مقاومت زمین‌شناسی و مقاومت فشاری تک‌محوره شبیه‌سازی شده همبستگی وجود ندارد. همچنین میان این پارامترها و خروجی‌های تحلیل یعنی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ نیز همبستگی دیده نمی‌شود. اما میان پارامترهای مقاومت برشی حاصل از شبیه‌سازی یعنی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده-سنگ همبستگی مثبت مشاهده شد.

نتایج بررسی‌های ضریب قطعیت برای مدل‌های رگرسیونی مختلف در جدول۷، قابل مشاهده است.

هرچند ضریب قطعیت برای مدل رگرسیونی درجه۳ بیشترین مقدار است اما به دلیل نزدیکی نتایج برای مدل‌های رگرسیونی درجه۲ و ۳ و با توجه به این نکته که رابطه بین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ در مدل‌های خطی و مدل رگرسیونی درجه ۳ در مواردی برای این مقادیر اعداد منفی را نتیجه می‌دهد و چون این پارامترها نمی‌توانند مقدار عددی منفی را بپذیرند، مدل رگرسیونی درجه۲ در مورد بررسی همبستگی بین این پارامترها مناسب‌تر است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله با استفاده از روش تحلیل احتمالاتی شبیه‌سازی مونت کارلو اقدام به تخمین و تعیین پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ گردید. با توجه به این نکته که در اکثر پدیده‌های زمین‌شناسی و مکانیک‌سنگ و خاک درجات بالایی از نامعینی وجود دارد روش‌های تحلیل احتمالاتی مانند روش شبیه‌سازی مونت کارلو می‌تواند مشکل عدم قطعیت موجود در پارامترهای مورد نیاز برای طراحی سازه‌های سنگی مانند تونل‌ها و شیب‌های سنگی را تا حد زیادی مرتفع نمایند. نتایج زیر از این مطالعه استخراج شد:

Archive of SID
www.SID.ir

جدول۷: ضرایب قطعیت* برای مدل‌های مختلف رگرسیونی میان چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی

توده‌سنگ	ضریب قطعیت برای مدل خطی (٪) $C = A+B\varphi$	ضریب قطعیت برای مدل درجه۲ (٪) $C = A+B\varphi+D\varphi^2$	ضریب قطعیت برای مدل درجه۳ (٪) $C = A+B\varphi+D\varphi^2+E\varphi^3$
آمفیبولیت	۹۸	۹۹/۹	۱۰۰
گنایس	۹۹/۱	۱۰۰	۱۰۰
هماتیت	۹۶/۱	۹۹/۶	۹۹/۹
میکاشیست	۹۷/۲	۹۹/۸	۱۰۰
مگنتیت	۹۵/۴	۹۹/۴	۹۹/۸
کوارتزشیست	۹۹/۱	۱۰۰	۱۰۰

* ضریب همبستگی برابر است با جذر ضریب قطعیت، در مدل‌های رگرسیونی بالا A، B، D و E عدد ثابت، C چسبندگی توده‌سنگ و φ زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ می‌باشند.

۱- در مواردی که داده‌های ورودی برای تعیین نوع تابع توزیع آماری اولیه مقادیر عددی کوچکی (نزدیک به صفر) را دارا هستند و یا علاوه بر آن پراکندگی در مقادیر آن‌ها زیاد است و از طرفی با توجه به نوع داده‌ها، استفاده از مقادیر منفی برای آن‌ها صحیح نیست، استفاده از توابع توزیعی با کران‌های باز (بی‌نهایت مثبت تا بی‌نهایت منفی) باعث تولید اعداد منفی در مرحله شبیه‌سازی می‌شود که این امر نمی‌تواند صحیح باشد. در نتیجه در اینگونه موارد استفاده از توابعی با دامنه مثبت مانند وایبل می‌تواند مفید باشد. در موارد مطالعاتی پیشین در اغلب موارد تابع توزیع آماری مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر و شاخص مقاومت زمین‌شناسی نرمال در نظر گرفته شده بود. در این مورد مطالعاتی برای شاخص مقاومت زمین‌شناسی تابع توزیع نرمال و برای مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر تابع توزیع وایبل شناسایی شد.

۲- ضریب تغییرات، یک پارامتر بسیار مفید برای سنجش میزان پراکندگی و تغییرات داده‌ها است. این ضریب که همان انحراف معیار نسبت به میانگین نرمالیزه شده است، می‌تواند برای سنجش و مقایسه میزان پراکندگی و تغییرات پارامترهای مختلف مفید باشد. در مورد پارامترهای مقاومت برشی توده-سنگ، زاویه اصطکاک داخلی دارای کمترین ضریب تغییرات و در نتیجه کمترین پراکندگی در میان داده‌های شبیه‌سازی شده است. همچنین ضریب تغییرات و در نتیجه آن پراکندگی داده‌ها برای چسبندگی توده‌سنگ نسبت به زاویه اصطکاک داخلی بیشتر است. این تغییرات در داده‌های شبیه‌سازی شده علاوه بر اینکه می‌تواند ناشی از پراکندگی در اطلاعات ورودی به شبیه‌سازی و همچنین برخواسته از طبیعت فیزیکی مواد و توده‌های تشکیل دهنده پوسته زمین باشد، می‌تواند تحت تأثیر نوع رابطه استفاده شده در محاسبه پارامترهای خروجی نیز قرار گیرد. در مورد پراکندگی و ضریب تغییرات پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ در این مطالعه، چون اطلاعات ورودی در محاسبه پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی یکسان بود این پراکندگی در داده‌های شبیه‌سازی شده تنها تحت تأثیر رابطه استفاده شده در محاسبات قرار گرفت، به این صورت که داده‌های شبیه‌سازی شده زاویه اصطکاک داخلی به دلیل رابطه مثلثاتی که نسبت به رابطه چسبندگی غیرخطی‌تر است ضریب تغییرات و در نتیجه پراکندگی کمتری دارد و از نظر آماری جامعه یکنواخت‌تری محسوب می‌شوند. رابطه‌ای که با وجود ورودی‌های یکسان در مقایسه با رابطه دیگر، خروجی‌هایی با پراکندگی بیشتر (ضریب تغییرات بیشتر) را ایجاد می‌کند نشان می‌دهد که عدم قطعیت بیشتری در مدل ریاضی حاکم بر آن رابطه و در نتیجه خروجی‌های محاسبه شده توسط آن رابطه وجود دارد. در این مورد مطالعاتی نشان داده شد که عدم قطعیت موجود در مدل ریاضی حاکم بر رابطه محاسبه زاویه اصطکاک داخلی توده-سنگ، کمتر از رابطه محاسبه چسبندگی توده سنگ است.

۳- در شبیه‌سازی هرچه تعداد داده‌های شبیه‌سازی شده افزایش یابد دقت نتایج نیز افزایش می‌یابد اما اگر تعداد داده‌ها از یک حد فراتر رود برازش یک تابع توزیع آماری خاص بر نتایج شبیه‌سازی ناممکن می‌شود. اما این امر مشکلی را در روند محاسبات ایجاد نمی‌کند زیرا می‌توان پارامترهای آماری مورد نیاز را به طور مستقیم و از تابع توزیع فراوانی داده‌های

www.SID.ir
Archive of SID

شبیه‌سازی شده بدون نیاز به تشخیص نوع توزیع آماری حاکم بر داده‌ها استخراج کرد.

۴- در صورت نیاز به شناسایی نوع تابع توزیع آماری داده‌های نهایی می‌توان در یک مرحله با تعداد شبیه‌سازی کمتر نوع توزیع را به‌دست آورد و در مرحله بعد با تعداد شبیه‌سازی بیشتر دقت محاسبات را بالا برد.

۵- یکی از دلایل اصلی تحلیل احتمالاتی پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ تعیین مقادیری با سطح اطمینان مشخص برای این پارامترها است. با این عمل امکان انجام طراحی‌های مربوط به پایداری شیب معدن بر اساس یک سطح اطمینان مشخص امکان‌پذیر می‌شود. همان‌طور که از جدول۶ مشاهده می‌شود فاصله‌های اطمینان تعیین شده برای پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ دارای دامنه محدودی می‌باشند. این نکته به خوبی افزایش اطمینان به داده‌ها را بعد از شبیه‌سازی نشان می‌دهد. چون با شبیه‌سازی تمامی حالات ممکن برای پارامتر مورد نظر شناسایی شده و در محاسبات وارد می‌شوند و کمتر حالتی وجود دارد که در محاسبات لحاظ نشده باشد، در هنگام تعیین فاصله اطمینان برای پارامتر مورد نظر دامنه بسیار محدود شده و با اطمینان بالا مقادیر دقیق‌تری از پارامتر مورد نظر تعیین‌می شود.

۶- بررسی همبستگی میان پارامترهای متغیر شبیه‌سازی شده در تحلیل احتمالاتی به روش شبیه‌سازی مونت کارلو نشان داد که تنها میان خروجی‌های تحلیل یعنی چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ همبستگی وجود دارد، این همبستگی مثبت بوده و برای آن مدل رگرسیونی درجه ۲ بهترین پاسخ را ارائه می‌دهد. در نتیجه می‌توان گفت که در این مورد مطالعاتی مدل رگرسیونی درجه۲ نسبت به دو مدل رگرسیونی خطی و درجه۳ در بررسی همبستگی و ارائه رابطه بین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی توده‌سنگ موفق‌تر عمل می‌کند.

در نهایت می‌توان گفت که استفاده از نتایج تحلیل احتمالی به روش شبیه‌سازی مونت کارلو می‌تواند در به‌کارگیری دامنه وسیعی از مقادیر ممکن از پارامترهای مورد نیاز در طراحی که به دلایل مختلف مانند محدودیت تعداد بررسی‌ها یا خطاهای معمول لحاظ نشده‌اند مفید باشد و دید بهتری را نسبت به اطلاعات موجود در اختیار طراحان قرار دهد. با افزایش اطمینان طراحان به پارامترهای مورد نیاز در طراحی از طریق لحاظ کردن تمامی مقادیر ممکن برای پارامترهای مورد نظر، موجب کاهش خطر شکست طراحی و نیز کاهش هزینه‌های پروژه به دلیل عدم اطمینان موجود در پارامترهای طراحی، می‌شود. خروجی‌های این مطالعه در قالب فاصله‌های اطمینان و همچنین توابع توزیع فراوانی تعیین شده برای پارامترهای مقاومت برشی توده‌سنگ می‌تواند به ترتیب ورودی‌های لازم برای روش‌های قطعی و احتمالاتی را در بررسی پایداری شیب‌های سنگی بر اساس سطح مشخصی از اطمینان فراهم کند.

مراجع

[1] Deer, D. U; 1976; "ASCE Geotechnical engineering division specialty conference, Rock Engineering for foundation and Slopes", University of Colorado, Boulder, Colorado.

[2] Sari, M; Karpuz, C; Ayday, C; 2010; "Estimating rock mass properties using Monte Carlo simulation: Ankara andesites", Computers & Geosciences, Vol. 36, PP. 959–969.

[3] Hoek, E; 1998; "Reliability of the Hoek–Brown estimates of rock mass properties and their impact on design", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 35, PP. 63–68.

[4] Sari, M; 2009; "The stochastic assessment of strength and deformability characteristics for a pyroclastic rock mass", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 46, PP. 613–626.

[5] Idris, M. A; Saiang, D; Nordlund, E; 2011; "Numerical Analyses of the Effects of Rock Mass Property Variability on Open Stope Stability", American Rock Mechanics Association.

[6] Kusha Madan Consulting Engineering Company; 2005; "Golgohar Iron Ore Mine Exploitation plane", Mining department of Golgohar Iron Ore Company.

[7] Hoel, P. G; Port, S. C; Stone, C. J; 1971; "Introduction to probability Theory", Houghton Mifflin Company.

[8] Baecher, G. B; christen, J. T; 2003; "Reliability and statistic in geotechnical engineering", John wiley.

[9] Tobutt, D; 1982; "Monte Carlo simulation methods for slope stability", Computers & Geosciences, Vol. 8, PP. 199-208.

[10] Robert, C; and casella; 2004; "Monte Carlo statistical methods", 2nd edG. Springer-verlag, New York.

[11] Zarei, A; 2004; "Applied Statistics", Danesh Parvar Press, Tehran.

[12] Frond, J; 2005; "Math Statistics", Nashr-E-Daneshgahi Press, Tehran.

Archive of SID
www.SID.ir

[13] Hoek, E; Carranza-Torres, C. T; Corkum, B; 2002; "Hoek-Brown failure criterion-2002 edition", In: Proceedings of the fifth North American rock mechanics symposium, Toronto, Canada, Vol. 1, PP. 267-273. (www.Rockscience.com).

[14] Hack, R; Price, D; Rengers, N; 2003; "A new approach to rock slope stability-a probability classification (SSPC)", Bull Eng Geol Environ, Vol. 62, PP. 167-184.

[15] Sonmez, H; Ulusay, R; 1999; "Modification to the geological strength index(GSI) and their applicability to stability of slopes", International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 36, PP. 743-760.

[16] Hustrulid, W. A; Mc Carter, M. K; Van Zyl, D. J. A; 2000; "Slope Stability in Surface Mining", Society for Mining, Metallurgical and Exploration (SME), USA.

پی نوشت

[1] Kim
[2] Monte Carlo method
[3] Chi-Square
[4] Hoek
[5] Point estimation method
[6] Normal
[7] Sari
[8] Idris
[9] Jointed distribution method
[10] First Order Second Moment
[11] Discrete random variable
[12] Continuous random variable
[13] Bernoulli
[14] Binomial
[15] Negative Binomial
[16] Geometric
[17] Hypergeometric
[18] Discrete
[19] Poisson
[20] Lognormal
[21] Gamma
[22] Weibull
[23] Beta
[24] Exponential
[25] Cauchy
[26] Uniform
[27] Scale parameter
[28] Shape parameter
[29] Threshold parameter
[30] Unconfined Compressive Strength
[31] Bishop
[32] Anderson-Darling
[33] Ryan-Joiner
[34] Kolmogorov-Smirnov
[35] p-value
[36] Confidence Interval

Archive of SID

www.SID.ir