

توسعه روشی کاربردی برای تعیین پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ با در نظر گرفتن عدم قطعیت

مهدی محمدی^{*۱}

۱- استادیار، گروه معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی عصر (عج)، رفسنجان

(دریافت ۱۳۹۷/۰۵/۲۵، پذیرش ۱۳۹۷/۱۰/۲۳)

چکیده

در تحلیل و طراحی سازه‌های سنگی، تعیین پارامترهای ژئومکانیکی اهمیت فراوانی دارد. در تعیین این پارامترها، خصوصیات ناپیوستگی نقش مهمی را ایفا می‌کنند، اما عدم قطعیت موجود در ناپیوستگی‌ها و ناهمگنی ذاتی توده‌سنگ، اطمینان به پارامترهای تعیین شده را کاهش می‌دهد. در چنین شرایطی در نظر گرفتن دامنه‌ای از پارامترها ممکن است اطمینان به نتایج را افزایش دهد. در این مقاله روشی کاربردی با استفاده از منطق فازی و شبیه‌سازی مونت کارلو برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در توده‌سنگ ارائه شده است. تابع عملکرد استفاده شده در مطالعه، معیار هوک و براون است. برای انجام مطالعه موردی از داده‌های معتبر موجود در مطالعات گذشته استفاده شده است. ابتدا با در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای ورودی شامل شاخص مقاومت زمین‌شناسی، مقاومت فشاری سنگ بکر و فاکتور m_i مجموعه اعداد فازی برای ثوابت توده‌سنگ (S, a, m_b) تعیین و سپس با استفاده از نتایج به دست آمده، پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ به صورت مجموعه اعداد فازی محاسبه شده است. در نهایت با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو، داده‌های تصادفی، تولید شده و فاصله اطمینان برای هر پارامتر با سطح اطمینان ۹۵٪ به دست آمده است. نتایج نشان می‌دهد، در مسایلی که پارامترهای آنها عدم قطعیت دارند، روش پیشنهادی قابلیت بالایی داشته و ممکن است ریسک حاصل از عدم قطعیت را کاهش دهد.

کلمات کلیدی

عدم قطعیت، منطق فازی، پارامترهای ژئومکانیکی، شبیه‌سازی مونت کارلو، معیار هوک و براون.

۱- مقدمه

نتایج آزمایشات، از توان دوم کای استفاده کرد و نتایج مطلوبی به دست آورد. هوک [۱۵] برای پیش‌بینی پارامترهای معیار هوک و براون از روش احتمالاتی برآورد نقطه‌ای استفاده کرد. برای این منظور، پارامترهای ورودی مانند شاخص مقاومت زمین‌شناسی، مقاومت فشاری تک‌محوره و ثابت سنگ بکر (m_i) را به عنوان متغیر تصادفی و توزیع این متغیرها را نرمال در نظر گرفت. ساری [۱۶،۳]، برای برآورد پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ، با استفاده از شبیه‌سازی مونت‌کارلو یک روش عملی احتمالاتی را ارائه کرد. وی تابع هدف را معیار هوک و براون در نظر گرفت و در ابتدا توزیع پارامترهای مورد نیاز، مانند مقاومت فشاری تک‌محوره، فاصله‌داری، طول ناپیوستگی و دهانه ناپیوستگی (پارامترهای متغیر RMR) را تعیین و سپس بر اساس این پارامترها توزیع پارامترهای هوک و براون و پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ را شبیه‌سازی کرد و نتیجه گرفت، سطح اطمینان نتایج، با این روش بیشتر از روش‌های قطعی است. آیدریس و همکاران [۱۷] با ترکیب روش عددی اجزای محدود و شبیه‌سازی مونت‌کارلو، تغییرپذیری خواص توده‌سنگ را در پایداری طبقات معادن مطالعه کرد. وی در بررسی‌های خود توزیع پارامترهای ورودی به تحلیل را نرمال در نظر گرفت.

امروزه روش‌های مختلفی از جمله روش‌های فازی، هوش مصنوعی و نظایر آن، برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در علم ژئوتکنیک استفاده می‌شود. به عنوان مثال برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در پیش‌بینی مدول دگرشکلی، رضایی و همکاران [۱۸] از روش منطق فازی، اسراری و همکاران [۱۹]، از روش سیستم استنتاج فازی عصبی (انفیس)، اسدی‌زاده و فاروق حسینی [۲۰]، غلام‌نژاد و همکاران [۲۱] از روش شبکه عصبی و فتاحی [۱] از سیستم بردار پشتیبان، استفاده کردند. در بین این روش‌ها، منطق فازی در مسایلی که پارامترهای آنها عدم قطعیت دارند، کاربرد فراوانی دارد [۲۲،۲۳]، زیرا در این روش، با استفاده از تجربه افراد خبره و با انجام عملیات بیشتر به طور دقیق و منطقی، می‌توان عدم قطعیت موجود در پارامترهای یک مدل را در نظر گرفت [۲۴]. در حالی که سایر روش‌ها با استفاده از مجموعه داده‌ها، قابلیت خودآموزی دارند. بنابراین با توجه به این مزیت، در این مقاله با استفاده از منطق فازی، عدم قطعیت پارامترهای ورودی در مدل هوک و براون، شامل شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)، مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر (σ_c) و ثابت سنگ بکر (m_i)، در نظر گرفته خواهد شد و پارامترهای مقاومتی و

در طراحی و تحلیل سازه‌های سنگی تعیین مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول دگرشکلی توده‌سنگ اهمیت فراوانی دارد، زیرا پارامترهای مقاومتی بیانگر پایداری توده‌سنگ در برابر تنش‌های مخرب و مدول دگرشکلی بیانگر رفتار توده‌سنگ در مقابل تنش‌ها است [۱]، اما تعیین این پارامترها همواره با عدم قطعیت همراه و اعتماد به نتایج پیش‌بینی شده با تردید همراه است، زیرا عوامل مختلفی به صورت مستقیم بر نتایج تاثیر دارند. اگر ساختار یک توده‌سنگ که از سنگ بکر و ناپیوستگی تشکیل شده است در نظر گرفته شود؛ جهت‌یافتگی ناپیوستگی‌های موجود در توده‌سنگ و همچنین جهت بارگذاری، بر پارامترهای مورد نظر تاثیر دارد [۲]. از طرفی عوامل مختلفی مانند هوازدگی در سطوح توده‌سنگ باعث تخریب و تغییر در ویژگی‌های مقاومتی توده‌سنگ می‌شود [۳]. به علاوه مواد تشکیل‌دهنده سنگ‌ها نیز به صورت ذاتی ناهمسان‌گرد است که این ناهمسان‌گردی سبب می‌شود که ویژگی‌های ژئومکانیکی توده‌سنگ در جهت‌های مختلف متفاوت باشند [۳] و اعتماد به نتایج پیش‌بینی شده کاهش می‌یابد، زیرا طراحی با نتایج به دست آمده به صورت بهینه انجام نمی‌شود و یا تحلیل نادرست است [۳]. از این رو عدم قطعیت موجود در پارامترها عاملی است که از سطح دانش و تجربه طراح خارج است و ممکن است بر نتایج مورد نظر تاثیر داشته باشد.

برای تعیین پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی توده‌سنگ مدل‌های تجربی مختلفی توسط محققین توسعه داده شده است [۱۰-۴]. امروزه معیار هوک و براون یکی از معیارهای پرکاربرد در تعیین مدول دگرشکلی و پارامترهای مقاومتی سنگ است که مورد توجه محققین قرار گرفته است [۱۱،۱۲]. برای تعیین پارامترهای یاد شده اغلب در محاسبات، مقادیر پارامترهای ورودی به صورت یک مقدار قطعی که معمولاً میانگین است در نظر گرفته می‌شود، بنابراین با توجه به عدم قطعیتی که در توده‌سنگ وجود دارد، نتیجه حاصل شده اطمینان بالایی ندارد.

در چنین مواردی راه حل مناسب، استفاده از روش‌هایی است که عدم قطعیت را برای هر پارامتر در نظر می‌گیرند [۱۳]. در این راستا مطالعات محدودی با استفاده از روش‌های آماری انجام شده است. کیم [۱۴] برای تخمین خواص مقاومتی توده‌سنگ بازالت از روش مونت‌کارلو و برای برازش

$$A = \{(x, \alpha_A(x) \mid x \in X)\} \quad (1)$$

که در آن:

$\alpha_A(x)$: تابع عضویت است و برای یک مجموعه فازی A به صورت رابطه ۲ تعریف می‌شود:

$$\alpha_A(x) : X \rightarrow [0,1] \quad (2)$$

تابع عضویت نشان‌دهنده درجه سازگاری X در A یا درجه تعلق X به A است. برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در مسایل ژئومکانیک و ژئوتکنیک، استفاده از یک زیرمجموعه که عدد فازی نامیده می‌شود، کافی است [۲۶].

۲-۲- مجموعه اعداد فازی

یکی از روش‌های نمایش مجموعه‌های فازی، مجموعه اعداد فازی است. شکل تابع عضویت عدد فازی، محدب است و حداقل یک مقدار با درجه عضویت ۱ دارد [۲۴].

یکی از انواع اعداد فازی، عدد فازی مثلثی است. اگر شکل تابع عضویت، مثلثی باشد، عدد فازی مثلثی نامیده می‌شود. این تابع عضویت با سه پارامتر کمینه، محتمل‌ترین و بیشینه بیان می‌شود که a, c به ترتیب کران بالا و کران پایین (مقادیر X در $\alpha = 0$) و b مقدار X متناظر با $\alpha = 1$ یا محتمل‌ترین مقدار را نشان می‌دهد (شکل ۲) [۲۷].

$$A = (a, b, c)$$

$$A(x) = \begin{cases} 0 & x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & a \leq x \leq b \\ \frac{x-c}{b-c} & b \leq x \leq c \\ 0 & c < x \end{cases} \quad (3)$$

$$a \leq b \leq c$$

۲-۳- مفهوم برش (α) برای مجموعه اعداد فازی

مفهوم برش برای یک مجموعه اعداد فازی A به صورت رابطه ۴ تعریف می‌شود [۲۸]:

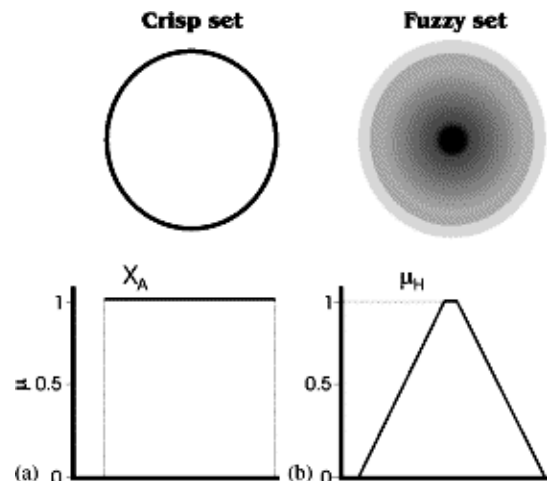
$$A_\alpha = \{x \in X \mid \alpha_A(x) \geq \alpha\}, \forall \alpha \in [0,1] \quad (4)$$

برش یک مجموعه فازی A به صورت یک مجموعه قطعی A_α که شامل همه عناصر مجموعه مرجع X که درجه عضویت آنها در A بزرگتر یا مساوی (یا فقط بزرگتر از) یک مقدار ویژه α است، تعریف می‌شود. هدف اصلی مفهوم برش

مدول دگرشکلی توده سنگ تعیین می‌شود، سپس با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو فاصله اطمینان برای پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ، با سطح اطمینان ۹۵٪ پیش‌بینی می‌شود. برتری روش توسعه داده شده در این است که با استفاده از منطق فازی و بر اساس تجربه افراد خبره می‌توان عدم قطعیت موجود در پارامترهای مدل را در نظر گرفت و در نتیجه دامنه نتایج را به واقعیت نزدیک‌تر کرد.

۲- مفاهیم تئوری مجموعه‌های فازی

داده‌های کمی به دست آمده از زمین شامل پارامترهای مقاومت برشی، وزن مخصوص و خصوصیات ناپیوستگی همواره با عدم قطعیت همراه است، زیرا مواد و مصالح تشکیل‌دهنده زمین یکنواخت نیستند. از این رو این پارامترها را می‌توان به صورت مجموعه‌های فازی بیان کرد تا رفتار سنگ را در دامنه وسیع‌تری از تغییرات پارامترهای ژئوتکنیکی در نظر گرفت [۲۵]. تفاوت مجموعه‌های قطعی با مجموعه‌های فازی در توابع عضویت است. یک مجموعه کلاسیک یک تابع مشخصه دارد که نشان‌دهنده عضویت یا عدم عضویت اعضای آن به مجموعه است. در صورتی که در مجموعه فازی، برای پارامترهای ورودی دامنه تغییرات تعریف می‌شود (شکل ۱) [۲۴].



شکل ۱: تفاوت مجموعه کلاسیک و مجموعه فازی [۲۵]

۲-۱- مجموعه‌های فازی و درجه عضویت

اگر X مجموعه مرجع باشد، هر مجموعه فازی A در X به صورت زوج مرتب‌های $(x, \alpha_A(x))$ نشان داده می‌شود [۲۵]:

که در آن:

m_i : ثابت سنگ بکر

D : فاکتور صدمه دیدگی توده سنگ ناشی از خسارت انفجار و آزادسازی تنش
 GSI : شاخص مقاومت زمین شناسی است.

مقاومت فشاری یا مقاومت موضعی توده سنگ از رابطه ۹ و مقاومت کششی توده سنگ از رابطه ۱۰ که توسط هوک پیشنهاد شده تعیین می شود [۱۵]:

$$\sigma_{c(m)} = \sigma_c S^a \quad (9)$$

$$\sigma_{t(mass)} = -\frac{S\sigma_c}{m_b} \quad (10)$$

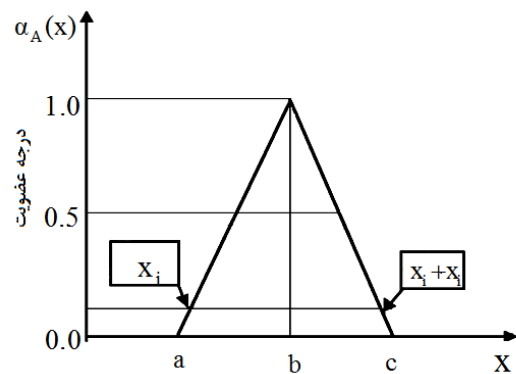
رابطه ۱۱ نیز برای تعیین مدول دگرشکلی توده سنگ کاربرد دارد و برای $\sigma_{c(mass)} < 100MPa$ مفید است [۱۵]:

$$E_{(mass)} = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{((GSI-10)/40)} \quad (11)$$

در این تحقیق برای تعیین پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی توده سنگ از رابطه هوک و براون به عنوان تابع عملگر استفاده می شود.

۴- داده های مورد استفاده در تحقیق (مطالعه موردی)

در این پژوهش تمرکز بر در نظر گرفتن عدم قطعیت در پارامترهای مقاومتی ($\sigma_{c(mass)}, \sigma_{t(mass)}$) و مدول دگرشکلی توده سنگ ($E_{(mass)}$) با روش منطق فازی و تعیین فاصله اطمینان با روش شبیه سازی مونت کارلو است. از این رو در رابطه هوک و براون (رابطه ۵) که در این مقاله به عنوان تابع عملگر در نظر گرفته شده است، تمامی پارامترهای موثر به صورت متغیر تصادفی در نظر گرفته می شوند. پارامتر مقاومت فشاری تک محوره به صورت مستقیم در رابطه هوک و براون تاثیر گذار و یکی از شاخص های مهم خواص مکانیکی سنگ است و از طریق آزمایش هایی مانند آزمایش فشاری تک محوره در آزمایشگاه و یا آزمایش بارگذاری نقطه ای تعیین می شود. از این رو عدم قطعیت (خطای انسانی و یا اندازه گیری) دارد. همچنین فاکتورهای GSI, m_i, D نیز که به صورت غیرمستقیم بر رابطه تاثیر گذارند عدم قطعیت دارند. فاکتور GSI به خصوصیات ناپیوستگی توده سنگ و فاکتور m_i به کانی های تشکیل دهنده سنگ، قفل شدگی دانه ها و اندازه دانه ها وابسته است، بنابراین برای مطالعه نیاز به مجموعه داده هایی استاندارد است که بتوان



شکل ۲: نمایش عدد فازی مثلثی برای پارامتر X [۲۴]

تقسیم کردن یک عدد فازی به مجموعه ای از فواصل برش است. برای هر پارامتر نامطمئن، برش یک مجموعه فازی، یک فاصله با دو نقطه کران بالا و کران پایین متعلق به آن برش را نمایش می دهد که مفهوم برآورد نقطه ای فازی است. هر مجموعه فازی A ممکن است به تعداد بی نهایت برش تبدیل شود چون بی نهایت عدد α در بازه $[0,1]$ وجود دارد [۲۸].

۳- معیار شکست هوک و براون

معیار تجربی و غیرخطی هوک و براون [۱۵] در سال ۱۹۸۰ توسط هوک و براون توسعه داده شد و به تدریج تکامل یافت تا در سال ۲۰۰۲ بهترین و کامل ترین نسخه آن ارائه شد. اساس این معیار بر اساس طبقه بندی امتیازدهی توده سنگ است. معیار هوک و براون به صورت رابطه ۵ است:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (5)$$

که در آن:

σ'_1, σ'_3 : به ترتیب تنش اصلی کمینه موثر و تنش اصلی بیشینه موثر

s, m_b و a : پارامترهای ثابت توده سنگ

σ_{ci} : مقاومت فشاری تک محوره سنگ بکر است.

برای تعیین ثابت توده سنگ از روابط ۶ تا ۸ استفاده می شود [۱۵]:

$$m_b = m_i \times e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right)} \quad (6)$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)} \quad (7)$$

$$a = 0.5 + \frac{e^{\left(\frac{-GSI}{15}\right)} - e^{\left(\frac{-20}{3}\right)}}{6} \quad (8)$$

می‌شود. روابط یاد شده تابعی از پارامترهای S, a, m_b و σ_c هستند. شکل ۳ این موضوع را به صورت فلوجارت نمایش می‌دهد. به عنوان مثال مقاومت کششی توده سنگ (σ_t) تابعی از پارامترهای S, m_b, σ_c و S, m_b نیز تابع GSI است. از این رو GSI, σ_c عدم قطعیت دارند و به عنوان متغیر تصادفی در نظر گرفته می‌شوند، بنابراین با توجه به این موضوع ابتدا پارامترهای ورودی (جدول ۱) به صورت مجموعه فازی در نظر گرفته شده و با استفاده از روابط ۶ تا ۸ مقادیر S, a, m_b تعیین و به صورت مجموعه‌های فازی نمایش داده می‌شوند. در نهایت پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ تعیین می‌شوند. در گام بعد با استفاده از روش مونت کارلو، برای مجموعه اعداد فازی، اعداد تصادفی تولید شده و بر اساس آن فاصله اطمینان برای هر پارامتر با سطح اطمینان ۹۵٪ پیش‌بینی می‌شود.

۶- بحث

۶-۱- تعیین ثوابت توده سنگ با استفاده از منطق فازی

برای تبدیل پارامترهای GSI, m_i و σ_c به مجموعه فازی از مقادیر میانگین، کمینه و بیشینه موجود در جدول ۱ استفاده شده است. برای این منظور میانگین به عنوان محتمل‌ترین مقدار و مقادیر کمینه و بیشینه نیز به ترتیب به عنوان کران پایین و بالا در نظر گرفته شده است. شکل ۴ مجموعه اعداد

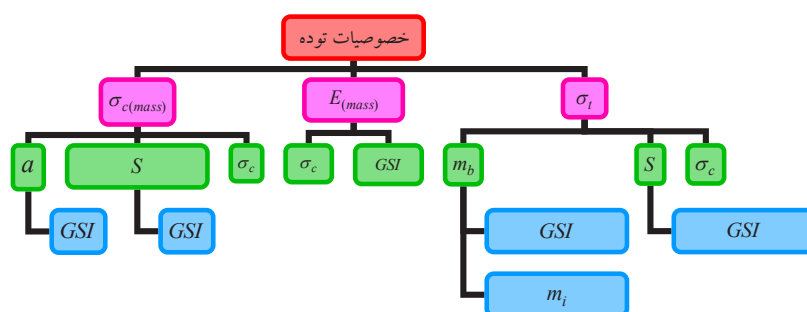
عدم قطعیت را برای پارامترهای یاد شده در نظر گرفت. برای این منظور مجموعه داده‌هایی معتبر از مطالعات گذشته که توسط ساری [۱۶] انجام شده است، جمع‌آوری شد. منطقه مورد مطالعه در نواحی مرکزی آنتالیا در کشور ترکیه قرار دارد و مطالعه بر روی توده‌های توف انجام شده است. منطقه مورد نظر از نظر باستان‌شناسی، کشاورزی و گردشگری اهمیت دارد. ساری [۱۶] برای تعیین پارامتر مقاومت فشاری، ۱۱۲ نمونه را با استفاده از آزمایش تک محوره مورد آزمایش قرار داد و سپس با استفاده از آزمون کای اسکوار، توزیع نرمال را برای این پارامتر به دست آورد. وی برای تعیین فاکتور GSI توزیع آماری پارامترهای RMR را تعیین کرد و بر اساس آن توزیع آماری شاخص مقاومت زمین‌شناسی را نرمال به دست آورد. پارامتر m_i نیز بر اساس مقادیر پیشنهادی توسط هوک [۱۵] در نظر گرفته و توزیع آن را نیز نرمال در نظر گرفت [۱۶]. توصیف آماری استفاده شده در این مطالعه در جدول ۱ نمایش داده شده است. در مطالعه یاد شده فاکتور صدمه دیدگی توده سنگ (D) برابر با صفر در نظر گرفته شده است. زیرا آشفنگی در سنگ مورد نظر تحت تاثیر تنش القایی وجود ندارد [۱۶].

۵- روش تحقیق

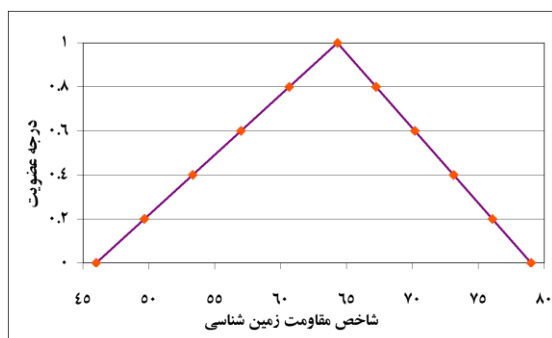
برای تعیین پارامترهای مقاومتی ($\sigma_c(mass), \sigma_t(mass)$) و مدول دگرشکلی توده سنگ ($E(mass)$) از روابط ۹ تا ۱۱ استفاده

جدول ۱: داده‌های استفاده شده در تحقیق [۱۶]

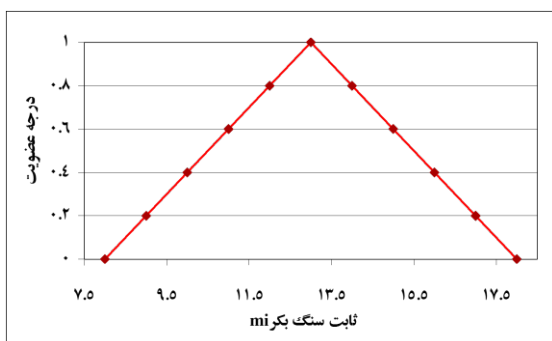
پارامتر	کمینه	میانگین	بیشینه	دامنه	انحراف معیار
$\sigma_c (MPa)$	۱۰/۸۷	۴۶/۰۶	۸۷/۲۸	۷۶/۴۱	۸/۶۳۳
GSI	۴۶	۶۴/۳۴	۷۹	۳۳	۴/۶۲
m_i	۸	۱۳	۱۸	۱۰	۱/۹۱



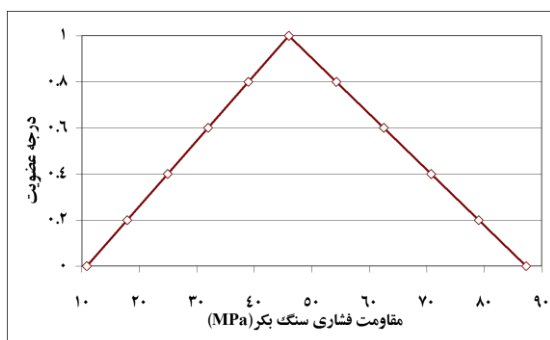
شکل ۳: پارامترهای ورودی برای تعیین ویژگی‌های مقاومتی و مدول دگرشکلی توده سنگ



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۴: تبدیل پارامترهای شاخص مقاومت زمین‌شناسی، فاکتور m_i و مقاومت فشاری تک‌محوره به مجموعه اعداد فازی

فازی برای GSI, m_i و σ_c را نمایش می‌دهد. بعد از تعیین مجموعه اعداد فازی، با استفاده از مفهوم درجه عضویت یا برش، اعداد فازی را به یک دسته فواصل تقسیم کرده، به طوری که در هر درجه عضویت، یک فاصله $[X_u, X_l]$ شامل کران بالا و پایین از پارامتر مورد نظر به دست می‌آید (شکل ۴). مقادیر درجه عضویت را نمایش می‌دهد. جدول ۲ مقادیر متناظر با هر درجه عضویت برای مجموعه اعداد فازی GSI, m_i و σ_c را نشان می‌دهد.

با تعیین مقادیر متناظر با کران‌های بالا و پایین برای پارامترهای ورودی (جدول ۲)، می‌توان مقادیر S, a, m_b را با در نظر گرفتن تابع عملگر (روابط ۶ تا ۸) برای هر درجه عضویت تخمین زد. برای این منظور در هر درجه عضویت، با توجه به تابع عملگر، باید ترکیب کران‌های بالا و پایین برای همه پارامترهای ورودی در نظر گرفته شود و با تعیین کمینه و بیشینه مقادیر به دست آمده، پارامترهای S, a, m_b را به صورت فواصلی از کران‌های بالا و پایین برای هر درجه عضویت بیان کرد. به عنوان مثال برای تعیین مقادیر m_b در هر درجه عضویت، با در نظر گرفتن رابطه ۶ که تابع پارامترهای GSI, m_i است، برای هر درجه عضویت چهار ترکیب مقادیر m_b پیش‌بینی می‌شود که در نهایت بر اساس نتایج پیش‌بینی شده کران‌های بالا و پایین تعیین می‌شود. جدول ۳ مقادیر m_b را برای درجه عضویت ۰.۶ نشان می‌دهد. با توجه به نتایج به دست آمده کران پایین برابر با ۲/۳۶ و کران بالا برابر با ۵/۱۷ در نظر گرفته می‌شود.

پس از تعیین کران بالا و پایین برای هر درجه عضویت می‌توان پارامترهای S, a, m_b را به صورت اعداد فازی داد. اعداد فازی متناسب با هر پارامتر در شکل ۵ نشان داده شده است که در سه مجموعه اعداد فازی تولید شده S, a, m_b ، محتمل‌ترین مقدار یا عدد فازی مرکزی گرایش بیشتری به کران پایین دارد

جدول ۲: مقادیر متناظر با هر درجه عضویت برای اعداد فازی GSI, m_i و σ_c

$\sigma_c (MPa)$		m_i		GSI		درجه عضویت
کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	
۸۷٫۲۸	۱۰٫۸۷	۱۸	۸	۷۹٫۰۰	۴۶٫۰۰	۰٫۰
۷۹٫۰۲	۱۷٫۸۹	۱۷	۹	۷۶٫۰۶	۴۹٫۶۶	۰٫۲
۷۰٫۷۷	۲۴٫۹۲	۱۶	۱۰	۷۳٫۱۲	۵۳٫۳۲	۰٫۴
۶۲٫۵۱	۳۱٫۹۵	۱۵	۱۱	۷۰٫۱۸	۵۶٫۹۸	۰٫۶
۵۴٫۲۶	۳۸٫۹۷	۱۴	۱۲	۶۷٫۲۴	۶۰٫۶۴	۰٫۸
۴۶٫۰۰	۴۶٫۰۰	۱۳	۱۳	۶۴٫۳۰	۶۴٫۳۰	۱٫۰

که علت آن نوع تابع یا مدل‌های موجود است که در محاسبه پارامترهای خروجی استفاده می‌شود.

۲-۶- تعیین پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی توده‌سنگ با استفاده از منطق فازی

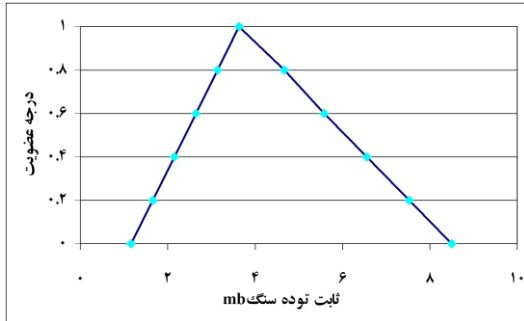
با تولید مجموعه فازی برای ثوابت توده‌سنگ شامل s, a, m_b ، اکنون می‌توان پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی توده‌سنگ را با در نظر گرفتن عدم قطعیت تخمین زد. برای این منظور برش‌هایی برای مجموعه اعداد فازی (شکل ۵)، در نظر گرفته شده و برای هر برش (درجه عضویت) کران بالا و پایین تعیین شده است. مقادیر کران بالا و پایین متناظر با هر درجه عضویت در جدول ۴ ارائه شده است.

با تعیین مقادیر متناظر با کران بالا و پایین و با در نظر گرفتن تابع عملگر (روابط ۹ تا ۱۱) برای هر درجه عضویت، در نهایت، پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی توده‌سنگ به صورت مجموعه اعداد فازی نشان داده می‌شود (شکل ۶).

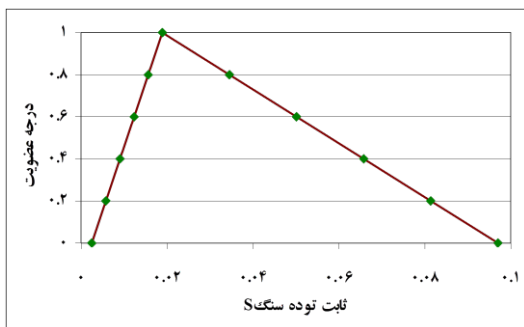
شکل ۶-الف و ج نشان می‌دهد که محتمل‌ترین مقادیر به کران پایین گرایش دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این موضوع تحت تاثیر نوع تابع عملگر رخ می‌دهد و ناشی از عدم قطعیت در تابع عملگر است.

جدول ۳: محاسبه m_b در تابع عضویت ۰/۶

m_b	m_i	GSI
۵/۱۷	کران بالا	کران بالا
۳/۷۹	کران پایین	کران بالا
۳/۲۲	کران بالا	کران پایین
۲/۳۶	کران پایین	کران پایین



(الف)



(ب)

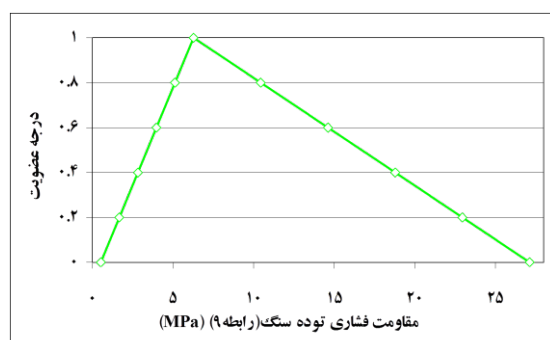


(ج)

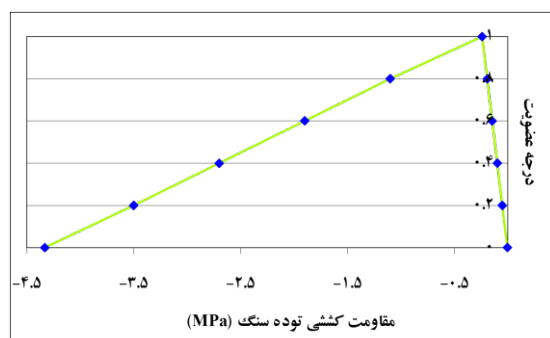
شکل ۵: مجموعه فازی پارامترهای S, a, m_b

جدول ۴: مقادیر متناظر با هر درجه عضویت برای اعداد فازی s, a, m_b

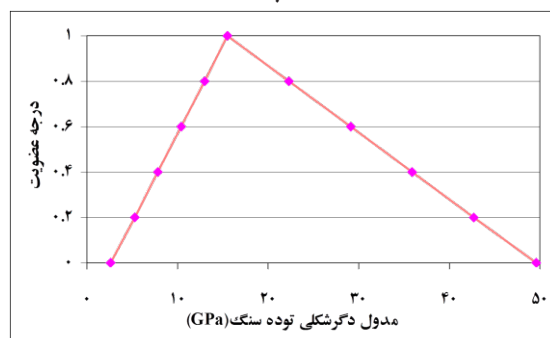
s		a		m_b		درجه عضویت
کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	
۰/۰۹۷۰	۰/۰۰۲۵	۰/۵۰۸۰	۰/۵۰۱۰	۸/۵۰	۱/۱۶	۰/۰
۰/۰۸۱۴	۰/۰۰۵۸	۰/۵۰۶۸	۰/۵۰۱۲	۷/۵۳	۱/۶۶	۰/۲
۰/۰۶۵۷	۰/۰۰۹۰	۰/۵۰۵۶	۰/۵۰۱۴	۶/۵۵	۲/۱۵	۰/۴
۰/۰۵۰۱	۰/۰۱۲۳	۰/۵۰۴۴	۰/۵۰۱۶	۵/۵۸	۲/۶۵	۰/۶
۰/۰۳۴۵	۰/۰۱۵۶	۰/۵۰۳۲	۰/۵۰۱۸	۴/۶۷	۳/۱۴	۰/۸
۰/۰۱۸۹	۰/۰۱۸۹	۰/۵۰۲۰	۰/۵۰۲۰	۳/۶۳	۳/۶۳	۱/۰



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۶: مجموعه اعداد فازی پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی توده سنگ

همچنین شکل ۶-ب بر خلاف شکل‌های یاد شده نشان می‌دهد که محتمل‌ترین مقدار به کران بالا تمایل دارد. جدول ۵ مقادیر متناظر با هر درجه عضویت را برای پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی نشان می‌دهد.

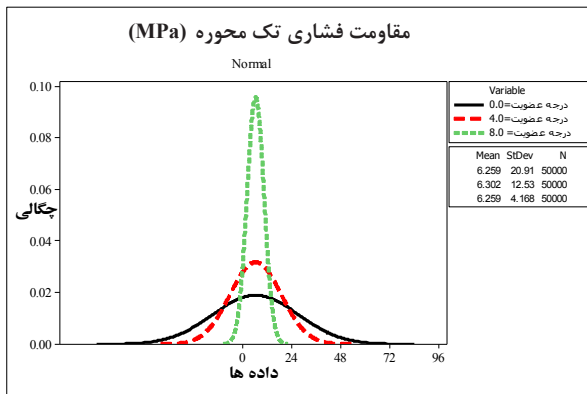
جدول ۵ نشان می‌دهد که مقادیر مرکزی در پارامترهای مقاومت فشاری و مقاومت کششی به ترتیب برابر با $6,27 \text{ MPa}$ و $0,24 \text{ MPa}$ و مدول دگرشکلی توده سنگ $15,5 \text{ GPa}$ است. پس از تعیین مجموعه اعداد فازی، برای تعیین فاصله اطمینان یا دامنه با سطح اطمینان 95% برای هر پارامتر، از روش شبیه‌سازی مونت کارلو که یک روش آماری است، استفاده شده است.

۶-۳- تعیین فاصله اطمینان برای پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ

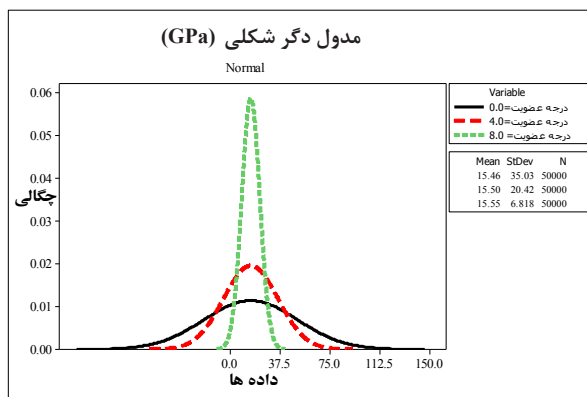
یکی از روش‌های تحلیل قابلیت اعتماد، شبیه‌سازی مونت کارلو است. شبیه‌سازی مونت کارلو یکی از ابزارهای مهم مهندسی برای تحلیل آماری عدم قطعیت موجود در مسایل است [۱۳]. برای تعیین فاصله اطمینان، باید بر اساس توزیع آماری هر پارامتر، اعداد تصادفی شبیه‌سازی شود. بر این اساس، هوک [۱۵] تابع توزیع آماری پارامترهای ژئومکانیکی را نرمال، در نظر گرفت. در این تحقیق نیز توزیع آماری پارامترهای ژئومکانیکی، نرمال در نظر گرفته شده است. پارامترهای مورد نیاز در توزیع نرمال مقدار میانگین و انحراف معیار یک جامعه آماری است [۱۵]. برای این منظور از نتایج موجود در جدول ۵ استفاده شده است. بدین ترتیب که مقادیر گرایش مرکزی (درجه عضویت برابر با یک)، به عنوان مقدار میانگین و مقادیر اختلاف دو کران تا مقدار میانگین به عنوان انحراف معیار یا

جدول ۵: مقادیر متناظر با هر درجه عضویت برای مجموعه فازی پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی

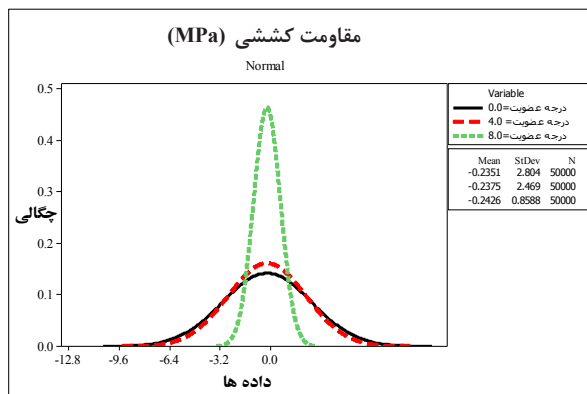
$E_m (GPa)$		$\sigma_t (MPa)$		$\sigma_{c(m)} (MPa)$		درجه عضویت
کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	کران بالا	کران پایین	
۴۹,۶۰	۲,۶۲	-۰,۰۰۵	-۴,۳	۲۷,۱۲	۰,۵۱۸	۰,۰
۴۲,۷۰	۵,۲۹	-۰,۰۵۲	-۳,۵	۲۲,۹۵	۱,۶۶۸	۰,۲
۳۵,۹۰	۷,۸۲	-۰,۰۹۹	-۲,۷	۱۸,۷۸	۲,۸۱۸	۰,۴
۲۹,۱۲	۱۰,۴۰	-۰,۱۴۶	-۱,۹	۱۴,۶۱	۳,۹۶۸	۰,۶
۲۲,۳۰	۱۳,۰۰	-۰,۱۹۳	-۱,۱	۱۰,۴۴	۵,۱۱۸	۰,۸
۱۵,۵۰	۱۵,۵۰	-۰,۲۴۰	-۰,۲۴۰	۶,۲۷۰	۶,۲۷۰	۱,۰



(الف)



(ب)



(ج)

شکل ۷: توزیع نرمال شبیه‌سازی شده برای پارامترهای ژئومکانیکی

مقایسه دو جدول ۶ (نتایج حاصل از روش توسعه یافته) و ۷ (نتایج حاصل از روش قطعی) نشان می‌دهد که روش ارایه شده بر مبنای منطق فازی و مونت کارلو در پارامترهایی که عدم قطعیت دارند، نسبت به روش قطعی مناسب‌تر است، زیرا بر اساس تجربه افراد خبره و بنا به شرایط توده‌سنگ می‌توان دامنه تغییرات را (بر اساس درجه عضویت‌های مجموعه فازی) در نظر

پراکندگی داده‌ها در نظر گرفته شده است. طبق جدول ۵ با توجه به اینکه دامنه دو کران بالا و پایین برای هر درجه عضویت متفاوت است، بنابراین برای هر پارامتر در هر درجه عضویت یک مقدار انحراف معیار می‌توان در نظر گرفت. از این رو ابتدا، تاثیر انحراف معیار (دامنه دو کران بالا و پایین در هر درجه عضویت) در تعیین فاصله اطمینان یا دامنه با سطح اطمینان ۹۵٪ برای پارامترهای مورد نظر بررسی می‌شود. برای این منظور سه درجه عضویت ۰٫۱، ۰٫۴، ۰٫۸ (جدول ۵) به عنوان نمونه انتخاب و در گام بعدی برای پارامترهای میانگین و انحراف معیار در هر درجه عضویت با استفاده از شبیه‌ساز مونت کارلو ۵۰۰۰۰ عدد تصادفی تولید شده و توزیع نرمال تعیین و در شکل ۷ نشان داده شده است.

طبق شکل ۷ سه توزیع برای درجه عضویت ۰٫۱، ۰٫۴، ۰٫۸ و برای هر پارامتر به دست آمده است، سپس فاصله اطمینان یا دامنه با سطح اطمینان ۹۵٪ برای هر توزیع تعیین و نتایج در جدول ۶ برای پارامترهای مورد نظر ارایه شده است. حدود فاصله‌های اطمینان تعیین شده برای پارامترهای توده‌سنگ تا دو رقم اعشار گرد شده است. طبق جدول ۶ با افزایش مقادیر درجه عضویت از ۰٫۱ به ۰٫۸ دامنه تغییرات فاصله اطمینان با سطح اطمینان ۹۵٪ برای هر پارامتر کاهش پیدا می‌کند. از این‌رو بر اساس تجربه افراد متخصص، چنانچه توده‌سنگ ساختگاه پروژه عدم قطعیت کمتری داشته باشد، می‌توان از مقادیر درجه عضویت‌های نزدیک به برش متناظر با عدد یک استفاده کرد و برعکس. به عنوان مثال برای مطالعه حاضر چنانچه عدم قطعیت زیاد باشد، فاصله اطمینان بر اساس درجه عضویت ۰٫۱ برای هر پارامتر در نظر گرفته می‌شود، بنابراین بر اساس جدول ۶ مقاومت فشاری تک‌محوره MPa ۶۹۵-۵۵۵، مقاومت کششی توده‌سنگ MPa ۰٫۱۱-۰٫۴۹ و مدول دگرشکلی توده‌سنگ GPa ۱۶٫۶۷-۱۴٫۳۲ تعیین می‌شود. همچنین در صورتی که عدم قطعیت کمتر باشد بر اساس تجربه افراد متخصص از یکی از درجه عضویت‌های ۰٫۴ و یا ۰٫۸ استفاده می‌شود، زیرا در سطح اطمینان ۹۵٪ دامنه کوچکتری از نتایج را شامل می‌شود. این موضوع مهم‌ترین مزیت روش توسعه یافته است که بر اساس عدم قطعیت موجود در پارامترها، فاصله اطمینان متناسب با سطح اطمینان ۹۵٪ در برش مورد نظر انتخاب شود.

جدول ۷ پارامترهای ژئومکانیکی توده‌سنگ را که به روش قطعی با استفاده از روابط ۹ تا ۱۱ تعیین شده‌اند نشان می‌دهد.

جدول ۶: فاصله اطمینان پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ با سطح اطمینان ۹۵٪

درجه عضویت = ۰٫۸	درجه عضویت = ۰٫۴	درجه عضویت = ۰٫۰	
۶٫۲۲ - ۶٫۲۹	۶٫۱۹ - ۶٫۴۱	۵٫۵۵ - ۶٫۹۵	(MPa) مقاومت فشاری
-۰٫۲۵ - ۰٫۲۳	-۰٫۲۵ - ۰٫۲۱	-۰٫۴۹ - ۰٫۱۱	(MPa) مقاومت کششی
۱۵٫۴۸ - ۱۵٫۶۰	۱۵٫۳۲ - ۱۵٫۶۸	۱۴٫۳۲ - ۱۶٫۶۷	(GPa) مدول دگرشکلی

هر مجموعه فازی انجام شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقادیر برش از ۰٫۴ به ۰٫۸ دامنه تغییرات فاصله اطمینان با سطح اطمینان ۹۵٪ برای هر پارامتر کاهش پیدا می‌کند. از این رو بر اساس تجربه افراد متخصص، چنانچه توده سنگ ساختگاه پروژه عدم قطعیت کمتری داشته باشد، می‌توان از مقادیر برش‌های نزدیک به برش متناظر با عدد یک استفاده کرد و برعکس. این موضوع مهم‌ترین مزیت روش توسعه یافته است که می‌توان برای هر متغیر تصادفی، سطح اطمینان منطقی در نظر گرفت.

همچنین برای توده سنگ مورد مطالعه در سطح اطمینان ۹۵٪، برای درجه عضویت ۰٫۴، مقاومت فشاری توده سنگ (MPa) ۶٫۱۹-۶٫۴۱، مقاومت کششی (MPa) ۰٫۲۱-۰٫۲۵ و مدول دگرشکلی (GPa) ۱۵٫۳۲-۱۵٫۶۸ پیش‌بینی شد که در مقایسه با نتایج قطعی، قابلیت اعتماد بالاتری دارد. بررسی‌ها نشان می‌دهد، روش توسعه داده شده که تلفیقی از دو روش منطق فازی و مونت کارلو است، برای پارامترهایی که عدم قطعیت دارند، کارایی بسیار بالایی دارد و ممکن است ریسک حاصل از عدم قطعیت را در پروژه‌های مختلف کاهش دهد.

۸- مراجع

- [1] Fattahi, H. (2016). "Application of improved support vector regression model for prediction of deformation modulus of a rock mass". *Engineering with Computers*, 32: 567-580. DOI: 10.1007/s00366-016-0433-6.
- [2] Park, H. J., West, T. R., and Woo, L. (2005). "Probabilistic analysis of rock slope stability and random properties of discontinuity parameters, Interstate Highway 40, Western North Colorado". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 13: 135-148.
- [3] Sari, M., Karpuz, C., and Ayday, C. (2010). "Estimating rock mass properties using Monte Carlo simulation: Ankara andesites". *Computers & Geosciences*, 36: 959-969.
- [4] Minaeian, B., and Ahangari, K. (2013). "Estimation

جدول ۷: فاصله اطمینان پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ به روش قطعی

۶٫۲۷۰	(MPa) مقاومت فشاری
-۰٫۲۴	(MPa) مقاومت کششی
۱۵٫۵۰	(GPa) مدول دگرشکلی

گرفت تا ریسک حاصل از عدم قطعیت در پروژه کاهش پیدا کند. همچنین روش توسعه داده شده در مقایسه با روش‌های قطعی (نتایج جدول ۷) نشان می‌دهد که تعیین پارامترهای ژئومکانیکی با روش توسعه داده شده قطعیت بیشتری دارد و ریسک حاصل از عدم قطعیت در پروژه کاهش پیدا می‌کند.

۷- نتیجه‌گیری

پارامترهای ژئومکانیکی توده سنگ، در طراحی و تحلیل سازه‌های سنگی اهمیت فراوانی دارند، اما تعیین این پارامترها با توجه به ناهمگن بودن ذاتی توده سنگ، همواره با عدم قطعیت همراه است. در این مقاله برای در نظر گرفتن عدم قطعیت ویژگی‌های توده سنگ، از روش منطق فازی و برای تعیین فاصله اطمینان از روش شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده است.

برای این منظور ابتدا پارامترهای ثابت توده سنگ (S, a, m_b) به صورت مجموعه اعداد فازی تولید شد و سپس پارامترهای مقاومتی و مدول دگرشکلی توده سنگ به صورت مجموعه فازی تولید شدند. نتایج نشان داد که مقادیر مرکزی در مقاومت فشاری و مدول دگرشکلی توده سنگ به کران پایین و مقاومت کششی به کران بالا بیشتر گرایش دارند. این موضوع ناشی از نوع تابع عملگر مورد استفاده در تعیین پارامترهای ژئومکانیکی است.

همچنین برای بررسی تاثیر انحراف معیار بر سطح فاصله اطمینان، تولید اعداد تصادفی با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو در درجه عضویت متناظر با ۰٫۰، ۰٫۴، ۰٫۸ برای

- [15] Hoek, E. T. (1998). "Reliability of the Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design". International Journal of Rock Mechanics and Mining Science, 35: 63-68.
- [16] Sari, M. (2009). "The stochastic assessment of strength and deformability characteristics for a pyroclastic rock mass". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 46: 613-626.
- [17] Idris, M. A., Saiang, D., and Nordlund, E. (2011). "Numerical analyses of the effects of rock mass property variability on open slope stability". The 45th US rock mechanics/geomechanics symposium, San Francisco, USA, American Rock Mechanics Association (AMRA), 1530-1540.
- [18] Rezaei, M., Asadizadeh, M., Majdi, A., and Farouq Hossaini, M. (2015). "Prediction of representative deformation modulus of longwall panel roof rock strata using Mamdani fuzzy system". International Journal of Mining Science and Technology, 25: 23-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.11.007>.
- [19] Asrari, A. A., Shahriar, K., and Ataee pour, M. (2015). "The performance of ANFIS model for prediction of deformation modulus of rock mass". Arabian Journal of Geosciences, 8: 357-365.
- [20] Asadizadeh, M., and Farouq Hossaini, M. (2016). "Predicting rock mass deformation modulus by artificial intelligence approach based on dilatometer tests". Arabian Journal of Geosciences, DOI: 10.1007/s12517-015-2189-5.
- [21] Gholamnejad, J., Bahaaddini, H. R., and Rastegar, M. (2013). "Prediction of the deformation modulus of rock masses using Artificial Neural Networks and Regression methods". Journal of Mining & Environment, 4(1): 35-43.
- [22] Tutmez, B., Kahraman, S., and Günaydin, O. (2007). "Multifactorial fuzzy approach to the sawability classification of building stones, Construction and Building Materials". Construction and Building Materials, 21: 1672-1679.
- [23] Ming-Wu, W., Chen, G. Y., and Jin, J. L. (2011). "Risk evaluation of surrounding rock stability based on stochastic simulation of multi-element connection number and triangular fuzzy numbers". Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 33: 643-647.
- [۲۴] عطایی، م.، ۱۳۸۵؛ "تصمیم گیری چند معیاره فازی". انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود، ۳۴۱ صفحه.
- [25] Juang, C. H., Jhi, Y. Y., and Lee, D. H. (1998). "Stability analysis of existing slopes considering uncertainty". Engineering Geology, 49: 111-133.
- of uniaxial compressive strength based on P-wave and Schmidt hammer rebound using statistical method". Arabian Journal of Geosciences, 6: 1925- 1931.
- [5] Alemdag, S., Gurocak, Z., and Gokceoglu, C. (2015). "A simple regression based approach to estimate deformation modulus of rock masses". Journal of African Earth Sciences, 110: 75-80.
- [6] Kavur, B., Cvitanovic, N. S., and Hrzenjak, P. (2015). "Comparison between plate jacking and large flat jack test results of rock mass deformation modulus". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 73: 102-114.
- [7] Armaghani, D. J., Amin, M. A. M., Yagiz, S., Faradonbeh, R. S., and Abdullah, R. A. (2016). "Prediction of uniaxial compressive strength of granitic rocks by various nonlinear tools and comparison of their performances". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 85: 174-186.
- [8] Feng, X., and Jimenez, R. (2015). "Estimation of deformation modulus of rock masses based on Bayesian model selection and Bayesian updating approach". Engineering Geology, 199: 19-27.
- [9] Ajalloeian, R., and Mohammadi, M. (2014). "Estimation of limestone rock mass deformation modulus using empirical equations". Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73: 541-550.
- [10] Nejati, H. R., Ghazvinian, A. H., Moosavi, S. A., and Sarfarazi, V. (2014). "On the use of the RMR system for estimation of rock mass deformation modulus". Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 73: 531-540.
- [11] Hoek, E., Carranza-Torres, C. T., and Corkum, B. (2002). "Hoek-Brown failure criterion-2002 edition, In: Proceedings of the fifth North American rock mechanics symposium". Toronto, Canada, 1: 267-273.
- [12] Hoek, E., and Brown, E. T. (2018). "The Hoek-Brown failure criterion and GSI-2018 edition". Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 11(3): 445-463. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>.
- [۱۳] ربیعی وزیر، م.، شفیع، ش.، پناهی، م. ح؛ ۱۳۹۴؛ "تحلیل سینماتیکی ریزش های سنگی به وسیله روش های احتمالاتی و با در نظر گرفتن قابلیت اعتماد (بررسی موردی: معدن شماره یک گل گهر)". نشریه زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱۵، ص ۶۷-۷۴.
- [14] Kim, K., and Gao, H. (1995). "Probabilistic approaches to estimating variation in the mechanical properties of rock masses". International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34: 111-120.

- Science, 36: 339-349.
- [28] Wiczorek, G. F., and works, C. O. (2000). "Debris flow and flooding-hazards associated with the December 1999 storm in coastal venezuela and strategies for mitigation". U.S. Geological Survey, Open File Report 01-0144, <http://pubs.usgs.gov/of/2001/ofr-01-0144/>.
- [26] Dodagoudar, G. R. (2000). "Reliability analysis of slopes using fuzzy sets theory". Computers and Geotechnics, 27: 101-115.
- [27] Alvarez Grima, M. (1999). "Fuzzy model for prediction of unconfined compressive strength of rock samples". International Journal of Rock Mechanics and Mining



Developing an Applied Method for Determining Geomechanical Parameters of Rock Mass Considering Uncertainty

Mohammadi M.^{1*}

1- Assistant Professor, Dept. of Mining Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran
mehdi.mohammadi@vru.ac.ir

(Received: 16 Aug. 2018, Accepted: 13 Jan. 2019)

Abstract: In analysis and design of rock structures, determination of geomechanical parameters is very important. Discontinuity characteristics severely affect these parameters. But uncertainty in discontinuities and inherent inhomogeneity of rock mass decreases the reliability toward the determined parameters. In this situation, considering a range of parameters leads to more reliable results. In this paper, fuzzy logic and Monte Carlo simulation are developed for considering the uncertainty in rock mass. Hoek and Brown criterion is used as the performance function. For evaluating the efficiency of this method, available data sets in the literature are used. First, by considering the uncertainty in input parameters consist of geological strength index, constant of intact rock (m_i) and uniaxial compressive strength of intact rock, sets of fuzzy numbers for S , a , m_b are determined. Latter, utilizing the obtained results, geomechanical parameters of rock mass are obtained as sets of fuzzy numbers. Finally by the Monte Carlo simulation, random data are generated and for each parameter, confidence interval is determined by the 95% of confidence. Results indicate that the proposed method is reliable in problems with uncertainty in parameters and reduces the risk of design and analysis.

Keywords: Uncertainty, Fuzzy Logic, Geomechanics Parameters, Monte Carlo Simulation, Hoek and Brown Criterion.

INTRUDOCATION

In design and analysis of rock structures, determination of compressive strength, tensile strength and deformation modulus of rock mass are very important [1]. But for determining these parameters there is uncertainty which leads to suspicious results [2].

Researches developed various experimental models for determining strength parameters and deformation modulus of rock mass. One of the useful criteria in determining deformation modulus and strength parameters is Hoek and Brown criterion [3]. To determine theses parameters, input parameters are considered as a crisp value, which is usually average value. Therefore, due to the uncertainty in the rock mass, results are not very reliable.

Therefore, the solution is the use of methods that consider uncertainty for each parameter. In this regard, statistical methods may be useful for determining the deformation modulus and strength parameters with a



higher level of confidence. For example, point estimation method that was proposed by Hoek for predicting the Hoek and Brown criterion parameters [4,5]. For this purpose, input parameters such as geological strength index, uniaxial compressive strength, and m_i were considered as random variables with normal distribution.

Today various methods such as fuzzy logic, artificial intelligence, etc. are used for considering uncertainty in geotechnics. For example, to consider the uncertainty in estimation of deformation modulus, Fatahi [1] and Rezaei et al. [6] utilized system vector machine and fuzzy logic methods respectively. Among these methods, fuzzy logic is applied widely in determination of parameters with uncertainty. Because this method, uses skilled people experience and uncertainty is considered more preciously, while the other methods use the ability of learning on the basis of data sets [7,8].

In this paper fuzzy logic is used to study the uncertainty for Hoek and Brown criterion's input parameters including Geology Strength Index (GSI), uniaxial compressive strength of rock material (σ_c), intact rock constant (m_i) and the strength parameters and deformation modulus of rock mass are determined. Finally, using the Mont Carlo simulation, confidence interval for geomechanical parameters is predicted with confidence limited 95%. The superiority of the developed method is that fuzzy logic method and Mont Carlo simulation are used simultaneously that leads to more exact results.

DATA USED IN THE RESEARCH

In this research, fuzzy logic is applied for study the uncertainty in strength parameters ($\sigma_{c(mass)}$, $\sigma_{t(mass)}$) and deformation modulus ($E_{(mass)}$) and Mont Carlo simulation is used to determine confidence limited. Therefore, standard data sets are needed.

Sari [5] reported experimental results of Tuff rock masses located in central Antalya, Turkey. Results are tabulated in Table 1. In this research distributed factor was set zero, because there is no induced stress in the area.

Table 1. Data used by Sari [5]

Parameter	Minimum	Average	Maximum	Range	Standard deviation
$\sigma_c(MPa)$	10.87	46.06	87.28	76.41	8.633
GSI	46	64.34	79	33	4.62
m_i	8	13	18	10	1.91

σ_c : Uniaxial compressive strength, GSI : Geology Strength Index, m_i : Intact rock constant

RESEARCH METHOD

To determine strength parameters and deformation modulus of rock mass, relations proposed by Hoek are used [3]. Presented relations are functions of S, a, m_b, σ_c parameters. Figure 1 shows the dependency as a flowchart. For example tensile strength of rock mass is function of S, m_b, σ_c parameters and S, m_b are functions of GSI . Since GSI and σ_c have uncertainty, thus are considered as random variables. In the following, input parameters (Table 1) are considered as fuzzy sets and S, a, m_b values are determined and are show on as fuzzy set. Later, geomechanical parameters of rock mass are obtained. Finally, by applying Mont Carlo simulation for fuzzy set, random samples are generated and confidence interval for each parameter is predicted to confidence limited 95%.

DISCUSSION

For convert GSI, m_i and σ_c parameters to fuzzy sets, minimum, maximum and average values are used that are shown in Table 1. By determination of fuzzy sets and on the basis of membership's degree concept, fuzzy numbers are divided into various intervals, so that for each degree of membership, an interval such as $[X_u, X_l]$ includes upper and lower bounds is obtained. By determining values corresponding to upper and lower bonds for input parameters, S, a, m_b parameters are predicted for each membership degree. By production of fuzzy set for rock mass constants consist of S, a, m_b , it is now possible to estimate strength

parameters and deformation modulus of rock mass as fuzzy sets. Table 2 shows strength parameters and deformation modulus of rock mass as fuzzy sets. By determining the sets of fuzzy, Mont Carlo simulation is used to determine confidence interval for each parameter.

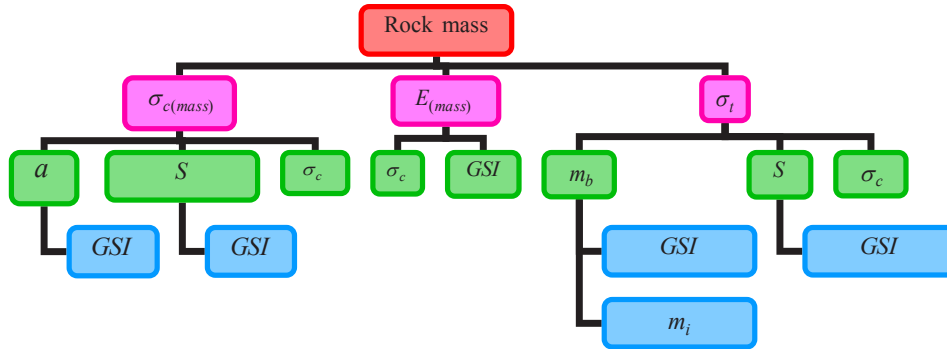


Figure 1. Input parameters for determination of strength and deformation modulus of rock mass

Table 2. Lower and upper bonds correspond to each degree of membership for fuzzy set of strength and deformation modulus parameters

Membership degree	$\sigma_{c(m)} (MPa)$		$\sigma_t (MPa)$		$E_m (GPa)$	
	Lower bonded	Upper bonded	Lower bonded	Upper bonded	Lower bonded	Upper bonded
0.0	0.518	27.12	-4.3	-0.005	2.62	49.60
0.2	1.668	22.95	-3.5	-0.052	5.29	42.70
0.4	2.818	18.78	-2.7	-0.099	7.82	35.90
0.6	3.968	14.61	-1.9	-0.146	10.40	29.12
0.8	5.118	10.44	-1.1	-0.193	13.00	23.30
1.0	6.270	6.270	-0.24	-0.240	15.50	15.50

To determine the confidence interval, random numbers must be generated according to the statistical distribution of each parameter. In this research, normal statistical distribution is considered for geomechanical parameters. According to the presented results in Table 2, corresponds to each parameter in various degree of membership, standard division is obtained. As a result, for each degree of membership, a domain with a confidence level 95% is considered.

Thus, for three of membership degrees consist of 0.0, 0.4 and 0.8, and according to the Mont Carlo simulation, 50000 random samples are generated. Results are shown in Table 3 for each parameter. Hence on the basis of skilled people experience, rock mass with less uncertainty can uses range corresponds to degree of memberships close to number one.

Table 3. Confidence interval of geomechanical parameters of rock mass with confidence limited 95%

	Membership degree=0.0	Membership degree=0.4	Membership degree=0.8
Compressive strength (MPa)	5.55- 6.95	6.19-6.41	6.22-6.29
Tensile strength (MPa)	-0.49-0.11	-0.25-0.21	-0.25-0.23
Deformation modulus (GPa)	14.32- 16.67	15.32-15.68	15.48-15.60

CONCLUSIONS

In analysis and design of rock structures, determination of geomechanical parameters is very important. But determination of these parameters due to inherent inhomogeneity of rock mass is associated with uncertainty. In this paper, in order to consider the uncertainty of rock mass properties, fuzzy logic method was used where to determine confidence limit, Monte Carlo simulation was applied. The production of random numbers was performed based on the Monte Carlo simulation corresponds to the degree of membership 0, 0.4, 0.8 for each fuzzy set. Results show that by increasing the membership degree from 0.4 to 0.8, the range of confidence intervals with confidence level 95% for each parameter decreases. Hence, on the basis of skilled people experience, rock mass with less uncertainty can use range corresponds to degree of memberships close to number one and vice versa.

REFERENCES

- [1] Fattahi, H. (2016). "Application of improved support vector regression model for prediction of deformation modulus of a rock mass". *Engineering with Computers*, 32: 567-580. DOI: 10.1007/s00366-016-0433-6.
- [2] Sari, M., Karpuz, C., and Ayday, C. (2010). "Estimating rock mass properties using Monte Carlo simulation: Ankara andesites". *Computers & Geosciences*, 36: 959-969.
- [3] Hoek, E., Carranza-Torres, C. T., and Corkum, B. (2002). "Hoek-Brown failure criterion-2002 edition, In: *Proceedings of the fifth North American rock mechanics symposium*". Toronto, Canada, 1: 267-273.
- [4] Hoek, E. T. (1998). "Reliability of the Hoek-Brown estimates of rock mass properties and their impact on design". *International journal of rock Mechanics and Mining Science*, 35: 63-68.
- [5] Sari, M. (2009). "The stochastic assessment of strength and deformability characteristics for a pyroclastic rock mass". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46: 613-626.
- [6] Rezaei, M., Asadizadeh, M., Majdi, A., and Farouq Hossaini, M. (2015). "Prediction of representative deformation modulus of longwall panel roof rock strata using Mamdani fuzzy system". *International Journal of Mining Science and Technology*, 25: 23-30. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmst.2014.11.007>.
- [7] Juang, C. H., Jhi, Y. Y., and Lee, D. H. (1998). "Stability analysis of existing slopes considering uncertainty". *Engineering Geology*, 49: 111-133.
- [8] Dodagoudar, G. R. (2000). "Reliability Analysis of Slopes Using Fuzzy Sets Theory". *Computers and Geotechnics*, 27: 101-115.