نشریه علمی-پژوهشی مکانیک سنگ
JOURNAL OF ROCK MECHANICS
دوره اول، شماره ۱، بهار ۱۳۹۶، صفحه ۱۱ تا ۲۳

تحلیل قابلیت اعتماد ظرفیت باربری پی روی توده‌سنگ با استفاده از روش مونت‌کارلو

محمد حسین باقری پور[۱]؛ علی غلامحسین پور[۲*]

۱- استاد گروه مهندسی عمران دانشگاه شهید باهنر کرمان
۲- دانشجوی دکتری مکانیک خاک و پی دانشگاه شهید باهنر کرمان

دریافت: ۱۳۹۵/۰۱ **پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱**

چکیده

از جمله گزینه‌های محتمل برای احداث فونداسیون سازه‌های عظیم می‌توان به پی‌های واقع بر روی توده سنگ اشاره کرد. ظرفیت باربری این نوع از فونداسیون‌ها از جمله مسائل مهم مورد توجه مهندسین است که به‌واسطه ماهیت غیر همگن توده سنگ و عدم قطعیت پارامترهای آن، ضریب اطمینان نمی‌تواند منطقاً و تنهایی در تجزیه‌وتحلیل این‌گونه مسائل مورداتکا قرار گیرد. از طرفی مطالعات جدید نشان می‌دهد که قضاوت بهتر در مورد پایداری سازه بایستی متکی بر ضریب اطمینان و احتمال شکست به‌طور توأم باشد. این مسئله ضرورت استفاده از روش‌های قابلیت اعتمادپذیری را نشان می‌دهد. در این مقاله با در نظر گرفتن یک پی روی توده سنگ به‌عنوان مطالعه موردی و نسبت دادن دامنه‌ای از مقادیر محتمل برای پارامترهای مؤثر، قابلیت اطمینان ظرفیت باربری فونداسیون بررسی‌شده است. نتایج مطالعات، نشان‌دهنده این موضوع است که در صورت استفاده از روش‌های اطمینان‌پذیری، خروجی طراحی قابل‌اعتمادتر و سازه‌ها علاوه بر حفظ پایداری و ایمنی ازنظر اقتصادی به‌صرفه‌تر خواهد شد.

کلمات کلیدی ظرفیت باربری، توده‌سنگ، قابلیت اعتماد، مونت‌کارلو

* کرمان-بلوار امام خمینی- میدان پژوهش- دانشگاه شهید باهنر -بخش مهندسی عمران-۰۹۱۳۴۴۱۳۶۲۶-۰۳۴۳۲۵۱۷۴۰۲- alighhp@gmail.com

Archive of SID
www.SID.ir

۱- مقدمه

ازجمله گزینه‌های محتمل برای احداث فونداسیون سازه‌های عظیم می‌توان به پی‌های واقع بر روی توده‌سنگ اشاره کرد. یکی از شرایط عملکرد صحیح پی، تحمل بار وارده از سازه روی پی است. به‌عبارت‌دیگر ظرفیت باربری پی پاسخگوی بار تحمیلی باشد. در مقایسه با خاک، اغلب سنگ‌ها مقاوم‌تر هستند و باربری بیشتری دارند و بار وارده از سازه بر سنگ اغلب ازنظر باربری مشکلی ایجاد نمی‌کند. بااین‌وجود، بار سازه‌های بزرگ، همانند سدها، آسمان‌خراش یا پایه‌های پل می‌توانند برای ظرفیت باربری سنگ نسبتاً مقاوم نیز مشکل‌زا باشند. از طرفی در طبیعت، اکثر توده‌سنگ دارای درزه و گسل می‌باشند. درصورتی‌که سنگ درزه‌دار باشد؛ و یا هوازده باشد، دچار تغییر شکل‌های بیشتری می‌شود و در این حالت ظرفیت باربری نسبت به حالت سنگ بکر و سالم (سنگ بدون عوارض ساختاری) تحت تأثیر قرار می‌گیرد. درنتیجه در طراحی فونداسیونی واقع روی بستر سنگی باید تمام پارامترهای ساختاری توده‌سنگ و شرایط محیطی را بررسی کرد. در تحلیل ظرفیت باربری پی روی توده‌سنگ با استفاده از روشی قطعی، عدم قطعیت‌های موجود در پارامتری مقاومت سنگ نادیده گرفته می‌شوند و درنتیجه با استفاده از ضرایب اطمینان، جوابی محتاطانه‌تری را به‌دست می‌آورند[۱].

به‌طورکلی پی‌سازی سازه‌های واقع بر روی توده‌سنگ در مقایسه با سایر سازه از پیچیدگی بیشتری برخوردار بوده و نیازمند تحقیقات و برنامه‌ریزی دقیق‌تری است. این مطالعات شامل حفر گمانه و تونلی اکتشافی در سنگ زیر پی، انجام آزمایش‌های مقاومتی سنگ به‌صورت در جا و آزمایشگاهی و تحلیل کامل نیروی وارد بر پی است.

بدون شک بحث پی‌سازی مهم‌ترین و پیچیده‌ترین بخش در طراحی سازه‌های واقع بر روی توده‌سنگ است. نبود مطالعات کافی در این بخش و عدم دقت در انتخاب پارامتری طراحی پی، عواقب ناگواری به همراه خواهد داشت. به‌عنوان‌مثال، آمار موجود در مورد سدی تخریب‌شده یا آسیب‌دیده مؤید این مطلب است که مهم‌ترین عامل این‌گونه مشکلات، شرایط نامناسب پی و طراحی غیراصولی آن است. گسیختگی که منشأ سازه‌ای دارند در مقایسه با گسیختگی ناشی از طراحی نامناسب پی، درصد بسیار کمی از آمار تخریب سد را به خود اختصاص می‌دهند. همچنین با توجه به دشوار بودن انتخاب دقیق و قانع‌کننده ضریب اطمینان در مهندسی ژئوتکنیک و تحمیل هزینه‌های زیاد در صورت انتخاب نادرست، به‌خصوص وقتی‌که داده‌های ورودی تحلیل دارای نامعینی و پراکندگی باشند، ضرورت استفاده از روش‌های اعتمادپذیری را مشخص می‌شود.

در مطالعه حاضر، ابتدا به معرفی روش‌های تحلیل احتمالاتی در ژئوتکنیک پرداخته می‌شود، سپس با استفاده از روش اعتمادپذیری مونت‌کارلو، الگوریتم محاسبه ظرفیت باربری پی‌های روی توده‌سنگ با در نظر گرفتن پارامترهای ضریب اطمینان و احتمال شکست، ارائه می‌گردد. دقت این روش با استفاده از داده‌های مربوط به توده‌سنگ استفاده‌شده در منابع دیگر و در دسترس قابل‌کنترل و مقایسه است. مزیت روش پیشنهادشده، امکان قضاوت در ظرفیت باربری و تصمیم‌گیری هم‌زمان و مفید بر اساس ضریب اطمینان و احتمال گسیختگی فونداسیون است.

۲- مختصری از مطالعات گذشته

سنگ هم ازنظر مقاومت و هم‌تغییر شکل‌پذیری نیازمند بررسی دقیق‌تر هستند. در مورد رفتار فونداسیون‌های بر روی توده‌سنگ نسبت به خاک مطالعه کمتری انجام‌شده است. تحلیل احتمالاتی ظرفیت باربری ازجمله مواردی است که در سال‌های اخیر مطالعات متعددی بر روی آن صورت گرفته است. فنتون و همکاران تأثیر عمق، وزن فونداسیون و مقدار خروج از مرکزیت محور فونداسیون را بر قابلیت اعتماد ظرفیت باربری با استفاده از روش اجزا محدود احتمالاتی بررسی کردند. در این مطالعه، چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک به‌عنوان پارامتری متغیر در نظر گرفته شدند. درروش اجزا محدود احتمالاتی که ترکیبی از روش اجزا محدود کلاسیک و روش مونت‌کارلو است، مقادیر متفاوتی برای پارامتری متغیر با استفاده از روش تئوری انتخاب تصادفی محاسبه می‌شود. در مرحله بعد این مقادیر به مصالح مدل‌سازی شده در نرم‌افزار اجزا محدود اختصاص‌یافته و به تعداد موردنظر محاسبات انجام می‌شود [۲]. زو و بای ظرفیت باربری خمشی احتمالاتی برج خنک‌کننده را بررسی کردند. آن‌ها در این مطالعه خصوصیات مصالح مورداستفاده در بدنه برج و همچنین مقدار بار باد را به‌عنوان پارامترهای متغیر در نظر گرفتند. در مرحله اول فقط با متغیر در نظر گرفتن خصوصیات مصالح مشاهده شد که

Archive of SID

www.SID.ir

نتایج روش احتمالاتی به‌صورت تقریبی با نتایج روش قطعی مطابقت دارند؛ اما در مرحله بعد با لحاظ کردن عدم قطعیت مقدار بار باد، شاهد افزایش انحراف معیار و درنتیجه پراکندگی بیشتر نتایج بودند. این امر تأثیر بیشتر مقدار بار باد بر نتایج و لزوم توجه بیشتر به آن را در طراحی نشان می‌دهد[۳]. شاهین و چنگ آنالیز قابلیت اعتماد ظرفیت باربری پی نواری را مطالعه کردند. در این تحقیق، آن‌ها با استفاده از روش مونت‌کارلو، ضرایب اطمینان را برای طراحی پی نواری موردمطالعه قراردادند و نتیجه‌گیری کردند که استفاده از روش قابلیت اعتماد نسبت به ضریب اطمینان از کارایی بیشتری دارد[۴]. ماسین و همکاران آنالیز احتمالاتی نشست پی‌های نواری را در خاک ماسه‌ای بررسی کردند. آن‌ها در این مطالعه با در نظر گرفتن ضریب همبستگی بین چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی خاک و در نظر گرفتن تابع توزیع لوگ – نرمال برای آن‌ها، ثابت کردند که در این حالت نتایج به حالت آزمایشگاهی نزدیک‌تر می‌شوند[۵]. در تحقیق دیگری احتمال شکست ناشی از ظرفیت باربری را بررسی شد. در این مطالعه آن‌ها با استفاده از روش گشتاور مرتبه اول (بسط سری تیلور) و در نظر گرفتن ضرایب رابطه ترزاقی به‌عنوان پارامتری متغیر، احتمال شکست را بررسی کردند و درنهایت روشی بر اساس بسط سری تیلور ارائه دادند[۶]. کرابینی کاربرد ترکیب روش اجزای محدود تصادفی و قابلیت اعتماد را در طراحی پی نواری مطالعه کردند. آن‌ها با متغیر در نظر گرفتن چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی برای منطقه‌ای در تارانتو ایتالیا، نتیجه گرفتند که توزیع ظرفیت باربری از تابع توزیع چگالی احتمال لوگ – نرمال پیروی می‌کند[۷]. داساکو و رائو آنالیز قابلیت اعتماد پی نواری را در خاک فاقد چسبندگی بررسی کردند. آن‌ها در این مطالعه هر سه منبع عدم اطمینان یعنی اندازه‌گیری، انسانی و محاسبات را موردبررسی قراردادند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین عدم اطمینان را خطاهای انسانی موجب می‌شوند[۸]. فوون و کولاوی عوامل عدم قطعیت در طراحی فونداسیون بر اساس اعتمادپذیری را ارزیابی کردند[۹]. فنتون و گریفیتس ظرفیت باربری پی نواری صلب بر روی خاک چسبنده را به‌صورت احتمالاتی بررسی کردند. این دو نفر که از پیشگامان بحث قابلیت اعتماد در ژئوتکنیک به شمار می‌آیند و با ترکیب روش اجزا محدود و مونت‌کارلو، ظرفیت باربری را به‌صورت احتمالاتی بررسی کردند[۱۰]. باقری پور و افضلی راد (۱۳۸۸) ارتباط عدد نفوذ استاندارد، احتمال وقوع روانگرایی و تنش برشی سیکلی با استفاده از روش اعتمادپذیری بر اساس SPT را بررسی کردند. روش‌های ارزیابی پتانسیل روانگرایی در خاک‌های ماسه‌ای، عموماً بر اساس تحلیل قطعی است. در تحلیل قطعی، پارامترها معین، بدون پراکندگی و خطا در نظر گرفته می‌شوند. آن‌ها در این مطالعه، با ارائه رابطه‌ای جدید، ارزیابی پتانسیل روانگرایی را بر پایه اعتمادپذیری و مبتنی بر نتایج آزمایش نفوذ استاندارد بررسی کردند. مزیت روش ارائه‌شده توسط این دو نفر، امکان ارزیابی احتمال وقوع روانگرایی بر اساس نتایج شاخص اعتمادپذیری و ضریب اطمینان است[۱۱،۱۲].

۳- مقاومت و ظرفیت باربری توده‌سنگ

تاکنون روابط ظرفیت باربری متعددی توسط محققین مختلف ازجمله ترزاقی، گودمن و دیگران ارائه‌شده است که این روابط در مراجع متعددی آورده شده‌اند که از ذکر آن‌ها در این مقاله، خودداری می‌شود. برای اطلاعات بیشتر می‌توان به منابع رجوع نمایند. (مثال [۱۳،۱۴])

پیش‌بینی احتمال وقوع انواع شکستگی رایج در توده‌سنگ به پیش‌بینی و شناخت صحیحی از رفتار کلی توده‌سنگ در درازمدت کمک می‌کند. به دلیل پیچیدگی کاربرد معیاری تئوریک در پیش‌بینی رفتار توده‌سنگ، معیاری شکست تجربی متعددی برای سنگ پیشنهادشده است. معیار شکست به‌طورکلی عبارت است از تابع یا قانونی که رابطه بین تنش و خصوصیات مصالح خاک یا سنگ را در لحظه و شرایط گسیختگی و شکست بیان می‌کند. این معیار به دو صورت خطی و غیرخطی بیان می‌شوند. از روابط خطی مورداستفاده در مسائل عملی می‌توان به معیار موهر – کلمب و از روابط غیرخطی نیز می‌توان به معیار هوک – براون اشاره کرد. معیار غیرخطی هوک – براون ازجمله معیاری تجربی است که با دقت مناسب رفتار توده‌سنگ را در شکست پیش‌بینی می‌کند. معیار شکست هوک – براون به‌طور وسیعی درگذشته استفاده‌شده است. نسخه‌های متعددی از معیار هوک – براون از سال ۱۹۸۰ تاکنون ارائه و معرفی‌شده است که همگی غیرخطی هستند. این معیار بر اساس تجارب حاصل از معیاری شکست سنگ سالم به دست آمد. نسخه‌های اولیه این معیار تنها برای سنگ‌های سالم کاربرد داشتند.

Archive of SID

www.SID.ir

در طبیعت توده‌سنگ در حقیقت سنگ‌های شکسته‌ای شامل درزه، ترک و گسل هستند که قابل‌آزمایش کششی و یا فشاری نیستند و یا آن آزمایش بسیار مشکل هستند. هنگامی‌که سازه‌ای در درون و یا بر روی این توده‌سنگ قرار می‌گیرد، بایستی واکنش توده را در حالت تنشی فشاری همه‌جانبه بررسی نمود لذا معیار گسیختگی توده‌سنگ است که می‌تواند شرایط شکست و گسیختگی را در حجم وسیع‌تر سنگ که توده‌وار عمل می‌کند برآورد کند.

۳-۱- معیار شکست هوک-براون

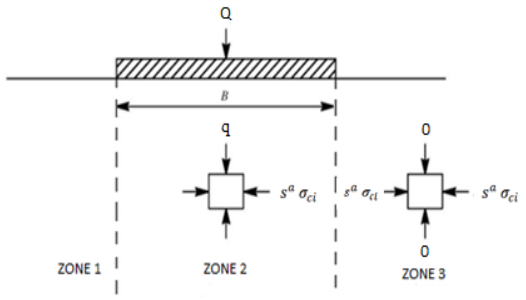
معروف‌ترین و کاربردی‌ترین معیار شکست، معیار هوک – براون (تعمیم آن برای توده‌سنگ) است[۱۳]. هوک و براون (۱۹۸۰) رابطه (۱) رابین تنش‌های اصلی حداقل و حداکثر برای تشخیص شکست در سنگ‌های سالم پیشنهاد کردند[۱۴]. معیار شکست هوک – براون جهت تخمین مقاومت برشی در محل اتصال توده‌سنگ توسعه پیدا کرد.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (m * \sigma_3 * \sigma_{ci} + \sigma_{ci}^2)^{0.5} \qquad (۱)$$

در روابط فوق σ_1 و σ_3 به ترتیب تنش‌های اصلی بزرگ‌تر و کوچک‌تر، σ_{ci} مقاومت فشاری تک‌محوره سنگ بکر است.

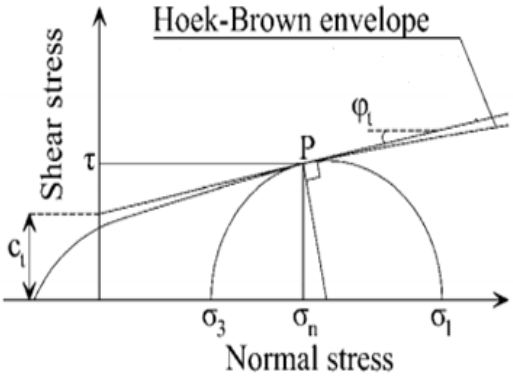
شکل (۱) نشان‌دهنده یک پی نواری با عرض B بر روی توده‌سنگ افقی است که تنش Q_u بر آن وارد می‌شود. همان‌طور که در شکل پیداست، سنگ واقع در زیر سازه در حالت تنش فشاری سه محوری است. تنش اصلی بزرگ‌تر برابر با ظرفیت باربری و تنش اصلی کوچک‌تر برابر با فشار محصورکننده‌ای است که توسط سنگ اطراف وارد می‌شود. حداکثر فشاری که سنگ اطراف می‌توانند ایجاد کنند برابر با مقاومت فشاری تک‌محوره توده‌سنگ در منطقه یک است. این شرایط در حالتی اتفاق می‌افتد که سطح ضعیف مشخصی برای گسیختگی توده‌سنگ وجود نداشته باشد. این روش، روشی ساده و محافظه‌کارانه است که بر اساس آن ظرفیت باربری پی تخمین زده می‌شود.

در لحظه گسیختگی پی، هر دو منطقه به‌طور هم‌زمان برش خورده و تنش اصلی کوچک‌تر در منطقه دو، برابر با تنش اصلی بزرگ‌تر در منطقه یک خواهد بود. تنش اصلی کوچک‌تر در منطقه دو توسط مقاومت منطقه یک در مقابل فشردگی به وجود می‌آید و برابر با مقاومت فشاری تک‌محوره توده‌سنگ است. مقاومت در فشار سه محوری را می‌توان با معیار هوک – براون توصیف نمود.



شکل ۱: پی نواری با عرض B بر روی توده‌سنگ افقی [۱۳]

همچنین با ترسیم دایره موهر مربوط به معیار شکست هوک - براون همان‌گونه که در شکل شماره (۲) نشان داده‌شده است می‌توان پارامترهای برشی مربوط به توده‌سنگ را تعیین نمود.



شکل ۲: نمودار دایره موهر معیار شکست هوک - براون [۱۳]

در سال ۱۹۹۲ نسخه‌ای از معیار هوک – براون ارائه شد که فقط برای سنگ‌های بکر و توده‌سنگ‌های شدیداً درزه‌دار صادق است. روشی که هوک و براون برای رسیدن به معیار شکست استفاده کردند، یک روش آزمایشگاهی خالص و با خطا همراه بود. البته به نظر می‌رسد که قابلیت اعتماد این معیار برای سنگ‌های سالم بیشتر باشد تا برای سنگ درزه‌دار. زیرا مقادیر m یا m_i به‌صورت تجربی تعیین می‌شوند [۱۳].

رابطه هوک – براون (۱۹۹۲) به‌صورت زیر است:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (m * \sigma_3 * \sigma_{ci} + s * \sigma_{ci}^2)^{0.5} \qquad (۲)$$

$$m = m_i * exp\left(\frac{RMR-100}{a}\right) \qquad (۳)$$

$$s = exp\left(\frac{RMR-100}{b}\right) \qquad (۴)$$

Archive of SID

www.SID.ir

۳-۲- معیار شکست هوک-براون اصلاح‌شده

آخرین نسخه معیار شکست هوک و براون (۲۰۰۲) [۱۴] مطابق رابطه زیر تعریف می‌گردد:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci}(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s)^a \quad (۵)$$

$$m_b = m_i * \exp(\frac{GSI-100}{28-14D}) \quad (۶)$$

$$s = \exp(\frac{GSI-100}{9-3D}) \quad (۷)$$

$$a = 0.5 + \frac{1}{6}(\exp\left(\frac{-GSI}{15}\right) - \exp\left(\frac{-20}{3}\right)) \quad (۸)$$

اگر بار تنها از یک‌جهت بر سنگ وارد شود، مقاومت فشاری تک‌محوری آن تعیین می‌شود. GSI[1] شاخص مقاومتی زمین‌شناسی است که کیفیت توده‌سنگ را مشخص می‌کند. مقدار GSI بستگی به ساختار توده‌سنگ و شرایط سطحی درزه دارد. کاربرد اصلی مقادیر GSI برای تعیین ثابت‌های معیار هوک – براون برای توده‌سنگ است. استفاده از GSI نیازمند درک صحیح جنبه‌های مهندسی و همچنین زمین‌شناسی توده‌سنگ است. D (ضریب آشفتگی و دست‌خوردگی توده‌سنگ) نیز مقداری بین صفر و یک دارد و به‌صورت تجربی تعیین می‌شود. ضریب D بستگی به عملیات احداث سازه، هوازدگی و خسارات ناشی از انفجاری احتمالی نزدیک به توده‌سنگ دارد. مقدار a نیز مقداری بین ۰/۵ تا ۰/۶۵ را شامل می‌شود[۱۳].

با توجه به توضیحات فوق و مطالعات انجام‌شده، از روش هوک – براون جهت ارزیابی ظرفیت باربری پی‌های کم‌عمق روی توده‌سنگ استفاده می‌گردد. با مقایسه نسخه‌های متعدد این روش، نسخه هوک–براون اصلاح‌شده نسبت به سایر نسخه، از تکامل و جامعیت بیشتری نسبت به نسخه‌های قبلی برخوردار است. به‌گونه‌ای که با اصلاحات متعدد صورت گرفته برای انواع سنگ قابل‌استفاده است. لذا از بین نسخه‌های ذکرشده روش هوک – براون، نسخه اصلاح‌شده (۲۰۰۲) مورداستفاده قرار می‌گیرد.

۴- روش تحلیل احتمالاتی در ژئوتکنیک

از عواملی که استفاده از روش‌های احتمالاتی را در مهندسی ژئوتکنیک به امری ضروری تبدیل کرده است، می‌توان به تغییرات خصوصیات خاک یا سنگ در یک محدوده، تکنیکی مدل‌سازی، شرایط آزمایشگاهی، انتخاب پارامتری طراحی، فرضیات استفاده‌شده برای ساده‌سازی مسئله، خطای مدل، روش‌های ساخت و مصالح استفاده‌شده اشاره کرد[۱۵].

مفهوم تحلیل احتمالاتی هنگامی روشن‌تر می‌گردد که در مقابل تحلیل قطعی مطرح و موردبحث قرار گیرد. در تحلیل قطعی پارامترها معین، بدون پراکندگی و خطا در نظر گرفته می‌شوند. سپس با اعمال یک ضریب اطمینان پارامترهای طراحی محاسبه و استفاده می‌گردند. گروهی از مهندسین ژئوتکنیک بر این باورند که ضریب اطمینان دارای معنی و مفهوم فیزیکی ضعیفی است و انتخاب مقدار قانع‌کننده آن دشوار است. این پارامتر نمی‌تواند به‌تنهایی نشان‌دهنده ایمنی سازه باشد. مخصوصاً وقتی‌که پارامترهای ورودی تحلیل دارای نامعینی و پراکندگی در توزیع خود باشند، در این موارد از تحلیل اعتمادپذیری استفاده می‌شود.

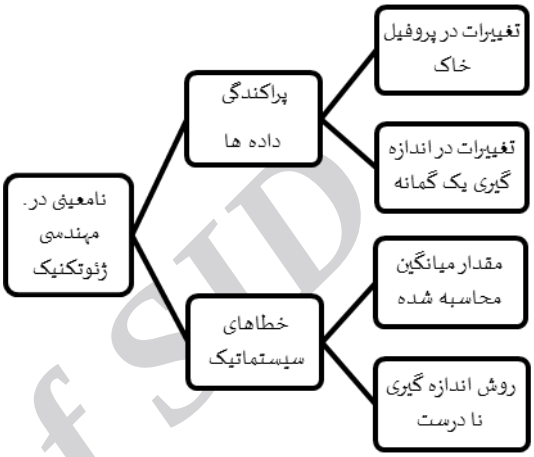
وقتی نامعینی و خطاها در اندازه‌گیری پارامترها به حدی باشد که میزان اعتبار محاسبات را کاهش دهد، استفاده از روش تحلیل احتمالاتی برای اطمینان سنجی جواب‌های به‌دست‌آمده از محاسبات، راه‌حلی مناسب است. روش‌های ارائه‌شده برای تحلیل احتمالاتی، مبتنی بر وجود نامعینی به علت نقص دانش بشری و اطلاعات کافی از خواص مصالح و شرایط بارگذاری است. از نتایج احتمالاتی در برآورد ایمنی و آنالیز هزینه استفاده می‌شود[۱۶]. در مهندسی عمران ضریب اطمینان معمولاً بر اساس تجربه و رسیدن به سازه‌های کاملاً مطمئن انتخاب می‌شوند. بنابراین خرابی در اثر اشتباهات و یا نقص دانش فنی و یا ضعف در اجرا رخ می‌دهد. تحلیل و طراحی نیز برای رسیدن به اطمینان عدم خرابی و با توجه به خواست عمومی جامعه و هزینه‌ای که بر آن می‌پردازد انجام می‌پذیرد[۱۷]. تحلیل احتمالاتی و اطمینان سنجی به علت مسائل اقتصادی و همچنین ایمنی بیشتر در مهندسی عمران موردتوافق قرارگرفته است؛ مخصوصاً در ژئوتکنیک که منابع نامیعنی زیاد است. نامعینی در مهندسی ژئوتکنیک و مخصوصاً در مهندسی مکانیک سنگ عوامل مختلف بسیار دارد. برخی مانند: جزئیات زمین‌شناسی، تحلیل را بسیار پیچیده می‌کنند و برخی دیگر مثل پراکندگی خواص مصالح را می‌توان در آنالیز آماری در نظر گرفت. کریستین و همکاران خطاها را به دو صورت کلی: ۱- خطاهای ناشی از پراکندگی داده‌های

Archive of SID

www.SID.ir

اندازه‌گیری شده حول میانگین ۲- خطاهای سیستماتیک طبقه‌بندی کردند[۱۸]. در شکل (۳) نیز نمودار تصمیم‌گیری بر اساس احتمال شکست نشان داده‌شده است.

خطاهای دسته اول ناشی از پراکندگی داده حول میانگین است و در مهندسی ژئوتکنیک به دو صورت زیر می‌تواند اتفاق بیافتد:



شکل ۳: نمودار تصمیم‌گیری بر اساس احتمال شکست [۱۸]

- پراکندگی در اندازه‌گیری‌های مربوط به تغییرات در پروفیل خاک از نقطه‌ای به نقطه دیگر که باعث تفاوت در اندازه‌گیری می‌شود.[۲]

- پراکندگی در اندازه‌گیری‌های مربوط به یک نقطه به‌این‌ترتیب که هرگاه یک کمیت در یک نقطه به‌دفعات اندازه‌گیری گردد، مقادیر به‌دست‌آمده متفاوت خواهد بود.[۳]

خطاهای دسته دوم یعنی خطای سیستماتیک مربوط به میانگین محاسبه‌شده است و باعث ایجاد فاصله میان میانگین مقادیر به‌دست‌آمده از آزمایشات و مقدار واقعی آن می‌شود. این خطا را می‌توان به دو گروه زیر تقسیم کرد:

- خطای سیستماتیک در مقدار میانگین محاسبه‌شده مربوط به محدودیت تعداد آزمایش است که باعث نامعینی آماری در مقدار میانگین می‌شود. به این معنی که به علت تعداد محدود آزمایش، مقدار میانگین نتایج آن همواره با مقدار واقعی فاصله دارد. این خطا با افزایش تعداد آزمایش و درنتیجه افزایش مقدار داده کاهش می‌یابد.[۴]

- خطایی که به علت روش اندازه‌گیری نادرست اتفاق می‌افتد و با تکرار آزمایش برطرف نمی‌گردد. مثل نامیزان بودن ترازویی که همیشه ۲ گرم سنگین‌تر نشان می‌دهد.[۵]

در طراحی و تحلیل مربوط به مهندسی ژئوتکنیک، اصولاً تصمیم‌گیری، وابستگی زیادی به پاسخ سیستم تحت شرایط طراحی دارد. در صور غیرقطعی بودن برخی از اجزای یک سیستم پاسخ این سیستم را نمی‌توان با اطمینان کافی و دقیق ارزیابی نمود. درواقع به علت وجود عدم قطعیت، طراحی به روش قدیمی و متداول یعنی طراحی به‌صورت قطعی به دلیل ناتوانی آن در به‌حساب آوردن خطاهای پاسخ سیستم و درواقع عدم قطعیت‌های خروجی، زیر سؤال است؛ درحالی‌که در طراحی و تحلیل با در نظر گرفتن عدم قطعیت، مسئله درواقع به‌صورت چندبعدی بررسی‌شده و پاسخ سیستم به‌صورت یک متغیر تصادفی بررسی می‌گردد. هدف اصلی تحلیل عدم قطعیت، ارزیابی و بررسی خصوصیات آماری خروجی یک سیستم به‌صورت تابعی از پارامترهای غیرقطعی مؤثر در آن است. در طراحی و شبیه‌سازی‌های مربوط به مهندسی ژئوتکنیک، پارامترهای طراحی و خروجی‌های سیستم، تابعی از پارامترهای متعدد هستند که مقدار و اندازه اکثر آن را نمی‌توان به‌صورت کاملاً دقیق و صحیح تعیین کرد. وظیفه تحلیل عدم قطعیت تعیین عدم قطعیت‌های خروجی سیستم، به‌صورت تابعی از عدم قطعیت‌های خود مدل سیستم و پارامترهای تأثیرگذار در سیستم می‌باشند. این روش تحلیل، درواقع یک چارچوب مشخص و سیستماتیک به‌منظور کمی کردن عدم قطعیت خروجی سیستم به‌دست می‌دهد. به‌علاوه این تحلیل به طراحی کمک می‌کند تا دید مناسبی نسبت به میزان مشارکت هر یک از پارامترهای غیرقطعی در عدم قطعیت کلی خروجی سیستم پیدا کند.

مشخصه احتمالاتی خواص توده‌سنگ بسیار پیچیده‌تر از خاک است. تغییرات فاصله‌ای توده‌سنگ تحت تأثیر خواص سنگ بکر، پراکندگی ترک بین سنگ و خواص مصالح در محل اتصال قرار دارند. یک مدل برای سنگ باید بتواند تغییرپذیری مقاومت ترک و مهم‌تر از آن تغییرپذیری فاصله‌ای طول و جهت ترک را توصیف کند.

مدل احتمالاتی متفاوتی برای تخمین و برآورد احتمال شکست پی پیشنهاد گردیده‌اند. از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به روش‌های ارائه‌شده توسط فنتون و گریفیتس [۱۵]، چرابینی [۸] و سوبرا [۱۹] اشاره کرد. تمام این مدل بر اساس آنالیز آماری به‌دست‌آمده‌اند. برای محاسبه احتمال شکست با استفاده

Archive of SID

www.SID.ir

از این روش، تنها مقادیر میانگین و انحراف معیار پارامتری ورودی موردنیاز بوده و عدم قطعیت در مدل انتخابی، در محاسبات وارد نمی‌گردند. بنابراین نتایج این روش با مقداری خطا همراه است.

در این تحقیق از آنالیز اعتمادپذیری که عدم قطعیت پارامتر و مدل انتخابی را مدنظر قرار می‌دهد استفاده گردیده و در ادامه موردبررسی قرارگرفته است.

۵- روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو

یکی از روش‌های تحلیل اعتمادپذیری، روش‌های شبیه‌سازی هستند. پرکاربردترین روش شبیه‌سازی، روش مونت‌کارلو است. روش‌های شبیه‌سازی، به هر روش عددی برای ایجاد شرایط سیستم در حالت واقعی و طبیعی اطلاق می‌شود. نتایج این روش بسیار شبیه به جواب واقعی است. آنالیز مونت‌کارلو یکی از مهم‌ترین ابزار مهندسی برای تحلیل آماری عدم قطعیت موجود در مسائل است[۲۰].

این روش شامل مراحل زیر است:

- انتخاب روش حل تحلیلی قطعی مناسب
- انتخاب پارامترهای ورودی برای مدل‌سازی احتمالاتی و کمی‌سازی تغییرات آن
- نمونه‌گیری تصادفی برای هر پارامتر که از تابع چگالی احتمال و یا ستون داده‌های مربوط به آن پارامتر انتخاب می‌شوند.
- حل مسئله از روش تحلیلی قطعی با مجموعه‌ی پارامترهای انتخاب‌شده برای محاسبه تابع عملکرد
- عملیات با تکرار دو مرحله‌ی اخیر تا رسیدن به تعداد کافی شبیه‌سازی ادامه می‌یابد و با استفاده از مقادیر خروجی، تابع توزیع عملکرد و درنتیجه احتمال شکست مشخص می‌گردد.

شبیه‌سازی مونت‌کارلو روشی است که در اکثر کارهای عمرانی همانند روانگرایی، پایداری شیروانی، دیوار حائل و نشت استفاده‌شده است و به علت سهولت استفاده و فرض‌های ساده کننده آن در بسیاری تحقیقات به‌کاربرده شده است. همچنین به علت جواب‌های دقیق‌تری که در مقایسه با سایر روش اعتمادپذیری به‌دست می‌دهد، در میان محققین مسئله قابلیت اعتماد به روشی متداول تبدیل گشته است که در این مقاله هم از آن استفاده‌شده است.

این روش به‌خصوص در مسائل پیچیده‌ای که متغیری تصادفی بی‌شماری توسط معادلات غیرخطی به یکدیگر مرتبط هستند، بدون محدودیت خاصی قابل کاربرد است. در یافتن برآوردهای مناسب برای حل مسائلی که یا نمی‌توان آن را به‌صورت ریاضی مدل بندی کرد و یا حل ریاضی آن مشکل است، این روش دستیابی به جواب را ممکن می‌سازد. اگر قادر باشیم که یک آزمایش سازه‌ای را هزاران بار تکرار نماییم، توزیعی از جواب به دست خواهد آمد. این توزیع عملکرد سازه را برای نمونه‌های مورد آزمایش نشان خواهد داد. انجام دادن چنین آزمایش‌هایی عملاً غیرممکن است اما می‌توان آن را به‌صورت ریاضی مدل‌سازی نمود.

در شبیه‌سازی مونت‌کارلو، ابتدا n عدد تصادفی برای هر یک از پارامترهای تصادفی موجود در معادله پاسخ تولید می‌شود. سپس معادله پاسخ به ازای تک‌تک اعداد تصادفی تولیدشده حل و درنهایت n مقدار برای معادله پاسخ سازه به دست می‌آید که با به‌کارگیری روابط مذکور می‌توان اطلاعات آماری نمونه را برای پاسخ سازه به دست آورد.

محاسبه احتمال شکست سازه با استفاده از آنالیز مونت‌کارلو نیز قابل‌بررسی است. بدین منظور باید در ابتدا تعریف شکست مشخص باشد. سپس آنالیز مونت‌کارلو برای هر نمونه انجام و بررسی می‌شود که آیا شکست اتفاق می‌افتد یا خیر. با تقسیم تعداد نمونه‌های آنالیز مونت‌کارلو که در آن‌ها شکست حادث می‌شود، بر کل نمونه، احتمال شکست سازه به دست می‌آید [۲۰].

با استفاده از مفهوم روش کار مونت‌کارلو، احتمال شکست به‌آسانی از رابطه ذیل به دست می‌آید:

$$p_f = \frac{1}{N_t}\sum_{i=1}^{N_t} I(X) \qquad (۹)$$

تعداد کل تحلیل‌های تابع شرایط حدی با N_t نشان داده‌شده است. تابع $I(X)$ بیانگر بودن یا نبودن نقطه شبیه‌سازی‌شده در ناحیه شکست است و به‌صورت رابطه ذیل تعریف می‌شود[۲۰].

$$I(X) = \begin{cases} 1 & if \quad g(X) \le 0 \\ 0 & if \quad g(X) > 0 \end{cases} \qquad (۱۰)$$

بر اساس رابطه (۹)، N_t مجموعه از متغیری طراحی مستقل بر اساس توزیعشان به‌دست می‌آیند. سپس تابع شکست یا تابع شرایط حدی برای آن‌ها محاسبه می‌شود. درنهایت برآوردی از احتمال شکست به‌صورت رابطه ذیل حاصل می‌شود [۲۰]:

$$P_f = \frac{N_f}{N_t} \qquad (۱۱)$$

که در آن N_f نشان‌دهنده تعداد وقوع شکست در سازه است.

Archive of SID

www.SID.ir

از مزایای روش مونت‌کارلو نسبت به سایر روش می‌توان موارد زیر را برشمرد:

۱. عدم محدودیت در تعداد پارامترها
۲. زمان کمتر
۳. امکان استفاده از محیط نرم‌افزار Excel
۴. امکان بهینه‌سازی تابع
۵. سادگی و راحتی استفاده
۶. هماهنگی با انواع توابع و عدم نیاز به شرایط مرزی

در تحلیل ظرفیت باربری با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو و در هر نقطه دلخواه از محل موردنظر، ابتدا برای هر یک از متغیری تصادفی ورودی، بهترین توزیع احتمال را به دست می‌آورند، که در این مقاله، برای متغیری تصادفی توزیع احتمال لوگ نرمال در نظر گرفته‌شده است، زیرا این توزیع فقط مقادیر مثبت را ارائه می‌دهد. تابع چگالی احتمال مربوط به توزیع احتمال لوگ نرمال از رابطه ذیل حاصل می‌گردد:

$$f(x)=\frac{exp(-0.5\left(\frac{Ln(x)-\mu}{\sigma}\right)^2)}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \qquad (۱۲)$$

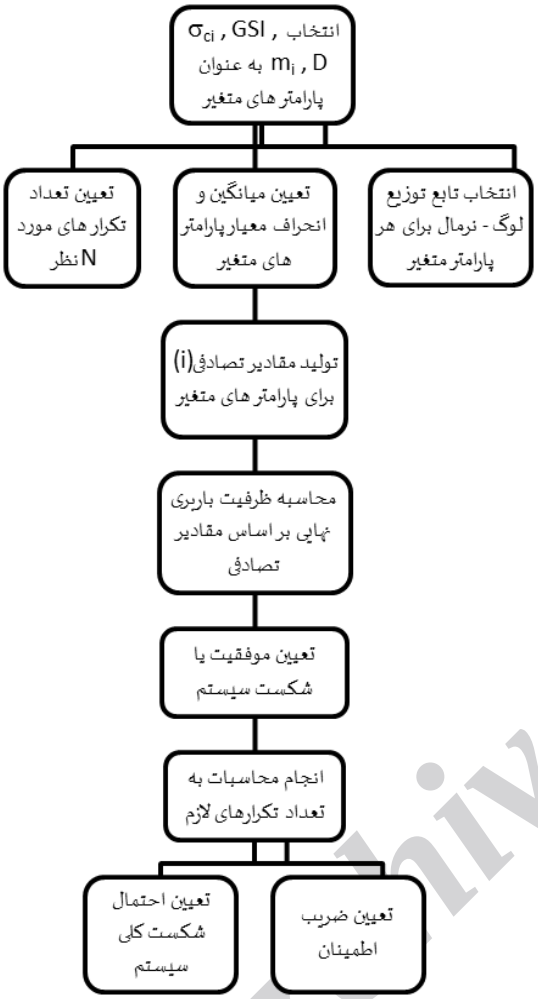
در این رابطه، μ و σ به ترتیب بیانگر مقادیر میانگین و انحراف معیار استاندارد متغیر تصادفی و x متغیر تصادفی است.

سپس به ازای مقادیر تصادفی از تابع چگالی احتمال پارامتر موردنظر (اعداد تصادفی بین کمترین و بیشترین داده)، به تعداد موردنظر، داده تولید می‌شود. این پروسه بار و برای تک‌تک متغیری تصادفی تکرار می‌گردد و در هر مرحله، از روی چگالی‌های احتمال حاصل و رابطه ظرفیت باربری نهایی مقادیر موردنظر به دست می‌آیند.

فلوچارت آنالیز اعتمادپذیری بر پایه روش MCS به‌صورت شکل ۴ پیشنهاد می‌گردد.

۶- مدل‌سازی مطالعه موردی

در بخش‌های قبل روش‌های اعتمادپذیری و پارامتری مرتبط با این روش موردبررسی قرار گرفت. به‌منظور مقایسه روش‌های اعتمادپذیری و بررسی دقت نتایج هر یک از این روش، ابتدا مطالعات موردی برای توده‌سنگ موردمطالعه در دیگر نقاط دنیا انجام‌شده و برای مقادیر مختلف، احتمال شکست و ضریب اطمینان با استفاده از روش مونت‌کارلو به‌دست‌آمده است. به دلیل ارائه مقدار تنش فشاری وارده در مطالعات این منطقه، امکان مقایسه نتایج حاصل از محاسبات با تنش وارده امکان‌پذیر است و درنتیجه اعتبار سنجی نتایج به‌خوبی میسر است



شکل ۴: الگوریتم آنالیز اعتمادپذیری بر پایه روش MCS

توده‌سنگ موردمطالعه مربوط به منطقه‌ای در ترکیه از نوع آندزیت سیاه[۶] است که در شکل ۵ مشخص‌شده است. در این منطقه به‌طور غالب از نوع آندزیت است. در این منطقه، از این سنگ به علت قابلیت دوام خوب به‌طور گسترده در ساخت‌وساز و مخصوصاً بستر و تکیه‌گاه پی استفاده می‌شود. برخی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ آندزیت در جدول ۱ نشان داده‌شده‌اند [۲۱].

Archive of SID

www.SID.ir

شکل ۵: توده‌سنگ موردمطالعه [۲۱]

در رابطه هوک – براون اصلاح‌شده (۲۰۰۲) که در این مقاله استفاده می‌شود، تمام پارامتری مؤثر به‌صورت متغیر تصادفی در نظر گرفته می‌شوند. بدین گونه که پارامتر مقاومت فشاری تک‌محوری σ_{ci} به‌صورت مستقیم در رابطه تأثیرگذار است. مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ که یکی از شاخص‌های مهم خواص مکانیکی سنگ است از طریق آزمایش‌هایی نظیر آزمایش فشاری تک‌محوری در آزمایشگاه و یا به طریق آزمایش بارگذاری نقطه‌ای حاصل می‌شود که می‌تواند دارای عدم اطمینان (خطای انسانی یا اندازه‌گیری) باشد. فاکتوری m, s, a نیز خود وابسته به مقادیر GSI, m_i, D می‌باشند. به همین دلیل این سه پارامتر نیز به‌عنوان متغیری تصادفی در نظر گرفته می‌شوند. همچنین عدم قطعیت پارامتری مؤثر در رابطه ظرفیت باربری در جدول ۲ نشان داده‌شده است.

جدول ۱: خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ آندزیت [۲۱]

پارامتر	محدوده تغییرات	میانگین
وزن واحد حجم(γ)(kN/m^3)	۲۵/۵-۲۱/۶۵	۲۳/۵۷
تخلخل(e)	۴/۱۳-۳/۲۶	۳/۷
مقاومت فشاری تک‌محوره (σ_{ci}) (MPa)	۱۴۸-۴۰	۹۴
مقاومت کششی(σ_{ti}) (MPa)	۹/۶-۷/۵۵	۸/۵۸
چسبندگی(c) (MPa)	۱۲/۳۱-۷/۱۳	۹/۷۲
زاویه اصطکاک داخلی(ϕ) (درجه)	۵۶/۷-۴۹/۷	۵۳/۲۱
مدول الاستیسته(E) (GPa)	۴۳/۳-۴۰/۵	۴۱/۹
ضریب پوآسون(υ)	۰/۲۴-۰/۲۰	۰/۲۲
RQD	۵۸-۴۶	۵۲

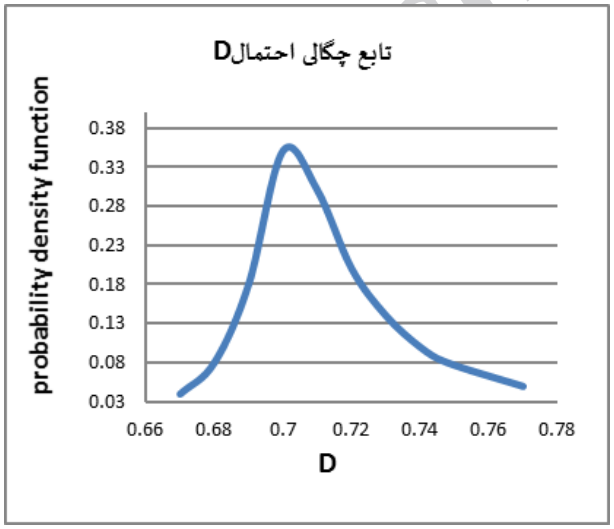
جدول ۲: عدم قطعیت پارامتری استفاده‌شده

پارامتر	میانگین	انحراف معیار	چولگی
GSI	۵۲	۱/۳۵۵	۰/۱۷۹
σ_{ci} (MPa)	۵۳	۱/۵	۰/۲۴۲
m_i	۷/۱	۱/۵۱۳	۰/۳۵۳
D	۰/۷	۰/۳۹۲	۰/۰۳۷

برای محاسبه احتمال شکست پی، با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، ابتدا تابع چگالی احتمال مربوط به هر یک از متغیری تصادفی رسم می‌گردد. در اشکال ۶ تا ۹ به ترتیب توابع چگالی احتمال مربوط به متغیری σ_{ci},GSI,m_i,D ترسیم‌شده است. سپس با استفاده از برنامه‌نویسی مطلب، پروسه محاسبه مقدار ظرفیت باربری نهایی به تعداد تکراری 10^3، 10^4، 10^5 و 10^6 بار انجام‌شده و درنهایت از رابطه (۱۱) احتمال شکست محاسبه می‌گردد.

در ادامه با توجه به شکل ۴ که فلوچارت پیشنهادی جهت تحلیل قابلیت اعتماد ظرفیت باربری پی با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، ارائه گردیده است؛ برنامه موردنظر در نرم‌افزار مطلب نوشته می‌شود.

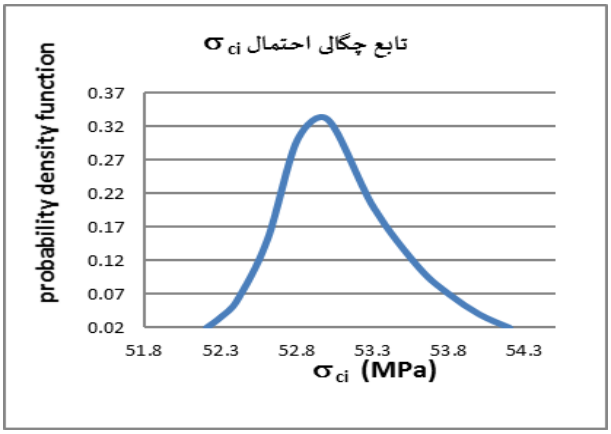
نتایج حاصل از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو در جداول ۳ و ۴ نشان داده‌شده‌اند.



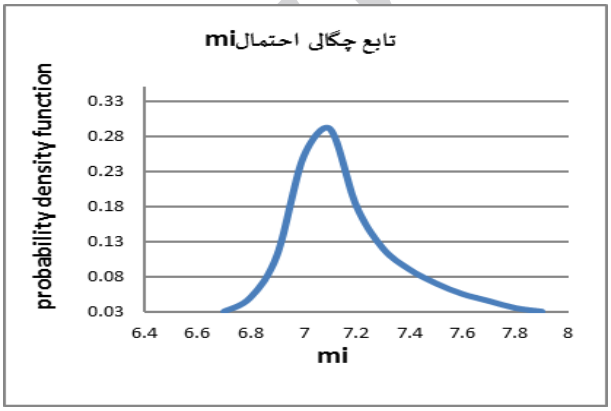
شکل ۶: تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی D

Archive of SID

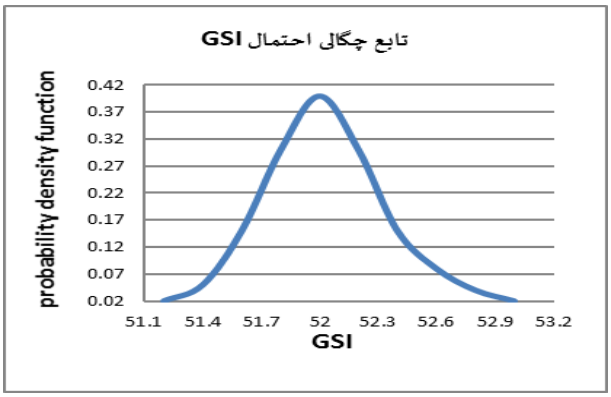
www.SID.ir



شکل ۷: تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی σ_{ci}

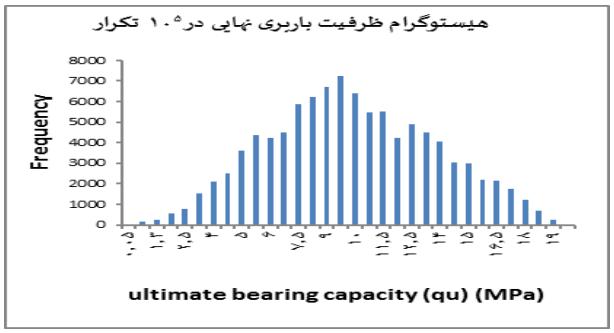


شکل ۸:تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی m_i

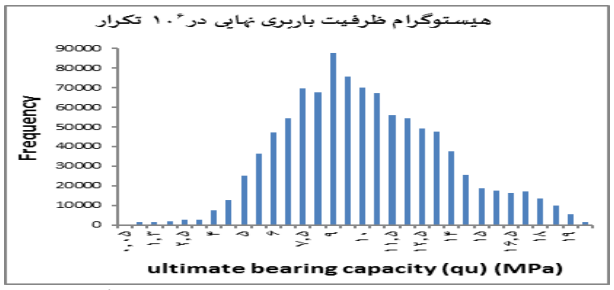


شکل ۹: تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی GSI

همچنین نمودار هیستوگرام ظرفیت باربری نهایی در 10^5 و 10^6 تکرار در اشکال (۱۰) و (۱۱) نشان داده‌شده‌اند. مقادیر ظرفیت باربری نهایی محاسبه‌شده توسط روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو با تکراری مختلف، در جدول (۵) مشاهده می‌شوند.



شکل ۱۰: نمودار هیستوگرام ظرفیت باربری نهایی در 10^5 تکرار



شکل ۱۱: نمودار هیستوگرام ظرفیت باربری نهایی در 10^6 تکرار

جدول ۳: مقادیر میانگین و انحراف معیار ظرفیت باربری

انحراف معیار	میانگین(MPa)	تعداد تکرار
۴/۵۲۲	۹/۱۲۱	10^3
۴/۵۵۲	۹/۲۲۸	10^4
۴/۵۷۰	۹/۳۶۷	10^5
۴/۵۶۳	۹/۴۵۲	10^6

جدول ۴: مقادیر احتمال شکست و ضریب اطمینان ظرفیت باربری

میانگین ضریب اطمینان	احتمال شکست	تعداد تکرار
۳/۱۱۶	۰/۰۵۱	10^3
۲/۶۱۱	۰/۰۲۲۱	10^4
۲/۲۷۴	۰/۰۱۰۶	10^5
۱/۵۸۸	۰/۰۰۷۵	10^6

جدول ۵: مقادیر ظرفیت باربری نهایی برآورد شده توسط روش مونت‌کارلو

ظرفیت باربری نهایی(qu) (MPa)	روش اعتمادپذیری	
۹/۱۲۱	10^3	تعداد تکرار
۹/۲۲۸	10^4	
۹/۳۶۷	10^5	
۹/۴۵۲	10^6	

Archive
www.SID.ir

۶-۱- مقایسه نتایج با روش قطعی

برای بررسی صحت نتایج، مقادیر حاصل از روش‌های اعتمادپذیری با روش قطعی (هوک – براون) مقایسه می‌گردد. در این حالت مقادیر میانگین داده را در رابطه وارد گردید که مقادیر ذیل برای توده‌سنگ موردبحث (ترکیه) حاصل می‌گردد:

$$q_u = \sigma_{ci} * s^a[(m * s^{a-1})^a + 1] = ۱۰/۹۶\text{MPa} \quad (۱۰)$$

$$m_b = m_i * exp(\frac{GSI-100}{28-14D}) = ۰/۷۲۲ \quad (۱۱)$$

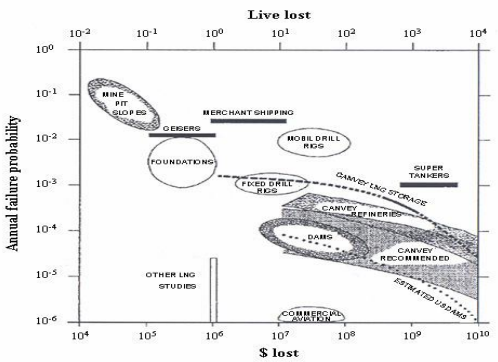
$$s = exp(\frac{GSI-100}{9-3D}) = ۰/۰۰۱۷ \quad (۱۲)$$

$$a = 0.5 + \frac{1}{6}(exp\left(\frac{-GSI}{15}\right) - exp\left(\frac{-20}{3}\right)) = ۰/۵۰۵ \quad (۱۳)$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ظرفیت باربری نهایی برای توده‌سنگ موردمطالعه با استفاده از روش قطعی هوک – براون، بیشتر از مقادیر حاصل از روش‌های اعتمادپذیری است. می‌توان بیان داشت که در حالت مطالعه شده، ظرفیت باربری متوسط (روش‌های اعتمادپذیری) کمتر از ظرفیت باربری قطعی با مقادیر متوسط است.

۶-۲- کاربرد احتمال شکست در مسئله ظرفیت باربری

پس از محاسبه احتمال شکست ظرفیت باربری مسئله در قسمت قبل، گام بعدی بررسی کاربردی بودن آن است. معمولاً برای این کار از جداول احتمال شکست بر اساس شاخص قابلیت اعتماد و یا از نموداری تصمیم‌گیری بر اساس احتمال شکست همانند نمودار ارائه‌شده توسط بیچر [۲۲] در شکل ۱۲ استفاده می‌کنند. این‌گونه نمودار به‌عنوان یک ابزار مفید برای تشریح احتمال شکست و ریسک شناخته‌شده هستند.



شکل ۱۲: نمودار تصمیم‌گیری بر اساس احتمال شکست [۲۲]

در شکل ۱۲ احتمال شکست سازه مهندسی شناخته‌شده در برابر هزینه به دلار یا تعداد نفرات جان‌باخته در یک سال مشخص‌شده است. محور به‌صورت لگاریتمی نشان داده‌شده‌اند. این نمودار تجربی، نرخ شکست یا هزینه را که قابل‌قبول هستند، ارائه می‌دهد.

در این نمودار برای فونداسیون، احتمال شکست قابل‌قبول در محدوده 10^{-2} _ 10^{-3} در نظر گرفته‌شده است و یا در مقایسه با سد احتمال شکست بیشتر اما خسارات جانی و مالی کمتر.

در مسئله ظرفیت باربری پی نواری استفاده‌شده در این مقاله، مقادیر احتمال شکست محاسبه‌شده در جدول ۶ آورده شده‌اند که مقادیری بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۰۶ دارند. درنتیجه احتمال شکست محاسبه‌شده برای ظرفیت باربری در مقایسه با مقادیر نشان داده‌شده در شکل ۱۲ مطابقت دارند.

درهرصورت، پس از محاسبه احتمال شکست، باید در نظر داشت که این مقادیر نیز بدون خطا نیستند. این مطلب به علت در نظر نگرفتن بعضی پارامتری مهم و مؤثر در تحلیل قابلیت اعتماد است که ممکن است باعث شکست پی شوند. درنتیجه مهندسین باید در استفاده از این مقادیر مراقب باشند.

جدول ۶: مقادیر احتمال شکست محاسبه‌شده توسط روش مونت‌کارلو

روش اعتمادپذیری		احتمال شکست (P_L)
تعداد تکرار	$۱۰^۳$	۰/۰۵۱۰
	$۱۰^۴$	۰/۰۲۲۱
	$۱۰^۵$	۰/۰۱۰۶
	$۱۰^۶$	۰/۰۰۷۵

۶-۳- محاسبه ضرایب اطمینان

همچنین در هر سیکل و به ازای هر مقدار از ظرفیت باربری نهایی محاسبه‌شده، با تقسیم این مقادیر بر مقدار تنش وارده، ضریب اطمینان به دست می‌آید که این مقادیر در جدول ۷ نشان داده‌شده‌اند. همان‌گونه که در جدول مشخص است با افزایش تعداد تکراری روش مونت‌کارلو، ضریب اطمینان مورداستفاده نیز افزایش می‌یابد که نتیجه‌ای قابل‌انتظار است، زیرا با افزایش تکرار، مقادیر میانگین ظرفیت باربری نیز افزایش می‌یابد.

همچنین با مقایسه احتمال شکست و ضریب اطمینان در تکرار مختلف مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد تکرار، احتمال

Archive of SID

www.SID.ir

شکست کاهش و میانگین ضریب اطمینان افزایش می‌یابد، به‌عبارت‌دیگر افزایش ضریب اطمینان، کاهش احتمال شکست را به همراه دارد که امری طبیعی است. این بدین معناست که با افزایش تعداد مدل‌سازی، شرایط احتمال شکست و درنتیجه گسیختگی بیشتری به وقوع پیوسته است و درنتیجه در طراحی باید از ضرایب اطمینان بزرگ‌تری استفاده نمود.

از مزیت دیگر این روش، تعیین عددی دقیق‌تر به‌عنوان ضریب اطمینان بر پایه روش اعتمادپذیری و جلوگیری از تحمیل هزینه‌های اضافی است.

جدول ۷: مقادیر میانگین ضریب اطمینان محاسبه‌شده توسط روش مونت‌کارلو

روش اعتمادپذیری	میانگین ضریب اطمینان(FS)
تعداد تکرار ۱۰^۳	۱/۵۸۵
۱۰^۴	۲/۰۱۷
۱۰^۵	۲/۳۸۱
۱۰^۶	۲/۴۷۲

۷- نتیجه‌گیری

در تحلیل ظرفیت باربری پی روی توده‌سنگ با استفاده از روش قطعی، عدم قطعیت موجود در سنگ نادیده گرفته می‌شوند و لذا جواب دقیقی به‌دست نمی‌آید. درنتیجه با استفاده از ضرایب اطمینان، جواب قابل‌اعتمادتری را به‌دست می‌آورند. این مسئله ضرورت استفاده از روش‌های اعتمادپذیری را نشان می‌دهد. در این تحقیق ظرفیت باربری پی روی توده‌سنگ با استفاده از روش‌های احتمالاتی بررسی‌شده است و به‌عنوان نمونه توده‌سنگی در منطقه آنکارای ترکیه مطالعه شده است.

با مقایسه حاصل از روش‌های مختلف ظرفیت باربری، روش هوک - براون اصلاح‌شده (۲۰۰۲) انتخاب‌شده است. همچنین روش احتمالاتی موردنظر نیز، روش مونت‌کارلو انتخاب‌شده است. با مقایسه ضریب اطمینان و مقادیر احتمال شکست به‌دست‌آمده از مطالعه موردی، می‌توان نتیجه گرفت که با افزایش تعداد تکرار، احتمال شکست کاهش و میانگین ضریب اطمینان افزایش می‌یابد، به‌عبارت‌دیگر افزایش ضریب اطمینان، کاهش احتمال شکست را به همراه دارد که امری طبیعی است. این بدان معناست که ضریب اطمینان بزرگ‌تر، علی‌رغم تحمیل هزینه‌های اضافی، احتمال گسیختگی فونداسیون را کاهش می‌دهد. برای طراحی بهینه فونداسیون بر بستر سنگی، استفاده از روش ارائه‌شده توصیه می‌شود که تصمیم‌گیری بر پایه ریسک را با استفاده از روش قطعی امکان‌پذیر می‌کند. این مزیت بزرگی است برای مهندسین ژئوتکنیک، که از روش‌های رایج مبتنی بر ضریب اطمینان برای طراحی فونداسیون استفاده می‌کنند.

درروش مونت‌کارلو، یکی از مهم‌ترین فاکتور، تعیین تعداد تکرار موردنیاز برای انجام محاسبات به‌وسیله رابطه قطعی است. با مقایسه نتایج ظرفیت باربری حاصل از روش مونت‌کارلو، مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد تکرار، مقدار ظرفیت باربری افزایش می‌یابد. مقادیر انحراف معیار در $۱۰^{۳}$ تکرار تا $۱۰^{۵}$ تکرار روندی صعودی دارند، که این افزایش به دلیل افزایش تعداد تکرار منطقی است. از طرفی مقدار انحراف معیار و یا پراکندگی در $۱۰^{۶}$ تکرار نسبت به $۱۰^{۵}$ تکرار کاهش می‌یابد، به‌عبارت‌دیگر نتایج همگراتر و قابل‌اطمینان‌تر می‌شوند و از پراکندگی آن‌ها کاسته می‌شود. با مقایسه مقادیر احتمال شکست حاصل از مونت‌کارلو، مشاهده می‌شود که هرچه تعداد تکرار بیشتر می‌شود، احتمال شکست نیز کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده می‌شود که هر چه تعداد تکرار بیشتر می‌شود، احتمال شکست با سرعت کمتری کاهش می‌یابد؛ از این مسئله می‌توان نتیجه گرفت که نتایج، در مقادیر تکرار بالاتر همگرا و ثابت می‌شوند و تکرار بیشتر باعث کاهش احتمال شکست نمی‌گردد.

۸- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	شرح
σ_1	Pa	تنش اصلی بزرگ‌تر	GSI	شاخص مقاومت زمین‌شناسی
σ_3	Pa	تنش اصلی کوچک‌تر	N_t	تعداد کل تحلیل
σ_{ci}	Pa	مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر	N_f	تعداد دفعات شکست
m - s		ثوابت هوک-براون برای سنگ بکر	RMR	شاخص نرخ‌گذاری توده‌سنگ

Archive of SID

www.SID.ir

۹- مراجع

[1] LRFD Design and Construction of Shallow Foundations for Highway Bridge Structures. (2010). *NCHRP report 651*, Washington DC.

[2] Fenton, G.A. et al. (2015). Influence of embedment, self-weight and anisotropy on bearing capacity reliability using the random finite element method. *Computers and Geotechnics*, 67, 229–238.

[3] Yazhou, Xu. & Guoliang, Bai. (2013). Random buckling bearing capacity of super-large cooling towers considering stochastic material properties and wind loads. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 33, 18–25

[4] Shahin, M. A. & Cheung, E. M. (2011). Probabilistic Analysis of Bearing Capacity of Strip Footings. *Proceeding of ISGSR*.

[5] Suchomel, R. & Mašín, D. (2011). Probabilistic analyses of a strip footing on_horizontally stratified sandy deposit using advanced constitutive model. *Computers and Geotechnics*, 38, 363–374.

[6] Thomas, M. & Tina, K. (2011). Reliability analysis of the bearing failure problem considering uncertain stochastic parameters. *Computers and Geotechnics*, 37, 299–310.

[7] Cherrubini & et al. (2009). Application of Random Finite Element Method to Bearing Capacity Design of Strip Footing. *Journal of GeoEngineering*, 4(3), 103-112.

[8] Dasaka, S. & Rao, R. (2005). Reliability analysis of allowable pressure of strip footing in spatially varying cohesionless soil. *Proceeding of ICOSSAR*, Rotterdam.

[9] Phoon, K. & Kulhawy, H. (2003). Evaluation of model uncertainties for reliability-based foundation design. *Applications of Statistics and Probability in Civil Engineering*, *Millpress*, Rotterdam, *ISBN 90 5966 004 8*.

[10] fenton, A. & Griffiths, D.V. (2002). Bearing Capacity of Rough Rigid Strip Footing on Cohesive Soil: Probabilistic Study. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(9), 743-755.

[۱۱] باقری پور، محمدحسین. افضلی راد، مبین. (۱۳۸۷). بررسی ارتباط عدد نفوذ استاندارد و احتمال وقوع روانگرایی با استفاده از روش اعتمادپذیری بر اساس SPT، مجله علمی و پژوهشی دانشگاه صنعتی شریف، شماره ۴۲، صفحه ۱۳-۲۰.

[۱۲] باقری پور، محمدحسین. و همکاران. بررسی ارتباط بین احتمال وقوع روانگرایی، عدد نفوذ استاندارد و تنش برشی سیکلی با استفاده از روش اعتمادپذیری. (۱۳۸۶) پنجمین کنفرانس. زلزله‌شناسی.

[13] Wyllie, D.C. (1999). *Foundations on Rock. FN spon*, London.

[14] Hoek, E. (2007). A Brief History of the Hoek-Brown Failure Criterion,. *Soils and Rocks*, 2, 23-35.

[15] fenton, A. & Griffiths, D.V. (2008). *Risk Assessment in* Geotechnical *Engineering*. John Wiley & Sons. ISBN: 9780470178201

[16] Beacher, G.B. & Christian, J.T. (2003). *Reliability and Statistics in Geotechnical Engineering*. John Wiley & Sons. ISBN: 978-0-471-49833-9

[۱۷] غلام پور، سیروس. (۱۳۸۷). *مطالعه اثرات میزان پیش تنیدگی بر انعطاف‌پذیری و اعتمادپذیری سازه‌های سبک فضا کار*، تز دوره دکترا، دانشگاه علوم و تحقیقات

[18] Christian, J.T. & Beacher, G.B. (1992). *Reliability and Probability in Stability Analysis*. ASCE, Geotechnical Spatial Publication. 1071 – 1111,

[19] Subra, A. (2012). *Probabilistic Analysis and Design of Strip* Foundations *Resting on Rocks Obeying Hoek–Brown Failure Criterion*. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences. 49, 45–58.

[۲۰] بهجتی، حسام. (۱۳۹۰). آنالیز خطر روانگرایی با استفاده از روش شبیه‌سازی مونت‌کارلو، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید باهنر کرمان.

[21] Mehmet, S. (2010). Estimating rock mass properties using Monte Carlo simulation: Ankara andesites. *Computers & Geosciences* 36, 959–969.

Beacher, G.B. (1982). *Statistical methods in site characterization*. Santa Barbara. California. 463-492.

1 Geological Strength Index
2 Spatial Variation
3 Random Testing Errors
4 Statistical Errors in Mean
5 bias in Measurement Procedure
6 Black Andesite

Archive of SID

www.SID.ir