

## تحلیل قابلیت اعتماد ظرفیت باربری پی روی توده سنگ با استفاده از روش مونت کارلو

محمد حسین باقری پور<sup>۱</sup>؛ علی غلامحسین پور<sup>۲\*</sup>

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

پذیرش: ۱۳۹۶/۰۱

دریافت: ۱۳۹۵/۰۱

### 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 مهندسان است که به واسطه ماهیت غیر همگن توده سنگ و عدم قطعیت پارامترهای آن، ضریب اطمینان نمی‌تواند منطقی و تنهایی در تجزیه و تحلیل این‌گونه مسائل موردانکا 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 بررسی شده 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 از نظر اقتصادی به‌صرفه‌تر خواهد شد.

### کلمات کلیدی

ظرفیت باربری، توده سنگ، قابلیت اعتماد، مونت کارلو

## ۱- مقدمه

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 وقتی که 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 از نظر مقاومت و هم تغییر شکل‌پذیری نیازمند بررسی دقیق‌تر هستند. در مورد رفتار فونداسیون‌های بر روی توده‌سنگ نسبت به خاک مطالعه کمتری انجام شده است. تحلیل احتمالاتی ظرفیت باربری از جمله 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. در روش اجزا محدود احتمالاتی که ترکیبی از روش اجزا محدود کلاسیک و روش مونت‌کارلو است، مقادیر متفاوتی برای پارامتری متغیر با استفاده از روش تنوری انتخاب تصادفی محاسبه می‌شود. در مرحله بعد این مقادیر به مصالح مدل‌سازی شده در نرم‌افزار اجزا محدود اختصاص یافته 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 مورد استفاده 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

از جمله 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 از نظر باربری مشکلی ایجاد نمی‌کند. با این وجود، 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. در صورتی که 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. در نتیجه 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 در نتیجه با استفاده از ضرایب اطمینان، جوابی محتاطانه‌تری را به‌دست می‌آورند [۱].

به‌طور کلی 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. به‌عنوان مثال، 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 سازه‌های دارند در مقایسه با گسیختگی ناشی از طراحی نامناسب پی، درصد بسیار کمی از آمار تخریب سد را به خود اختصاص

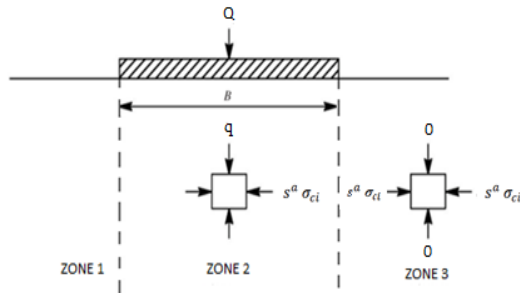
ارتباط عدد نفوذ استاندارد، احتمال وقوع روانگرایی و تنش برشی سیکی با استفاده از روش اعتمادپذیری بر اساس SPT را بررسی کردند. روش‌های ارزیابی پتانسیل روانگرایی در خاک‌های ماسه‌ای، عموماً بر اساس تحلیل قطعی است. در تحلیل قطعی، پارامترها معین، بدون پراکندگی و خطا در نظر گرفته می‌شوند. آن‌ها در این مطالعه، 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 توده سنگ

تاکنون روابط ظرفیت باربری متعددی توسط محققین مختلف از جمله ترزاقی، گودمن و دیگران ارائه شده 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])

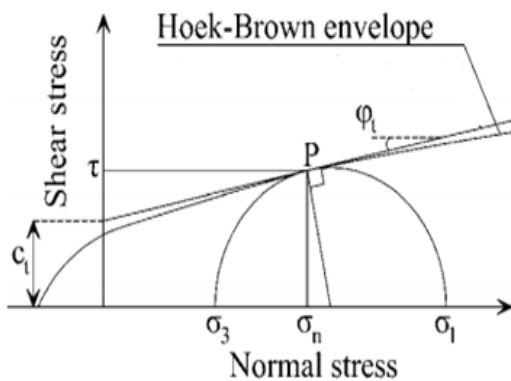
پیش‌بینی احتمال وقوع انواع شکستگی رایج در توده سنگ به پیش‌بینی و شناخت صحیحی از رفتار کلی توده سنگ در درازمدت کمک می‌کند. به دلیل پیچیدگی کاربرد معیاری تئوریک در پیش‌بینی رفتار توده سنگ، معیاری شکست تجربی متعددی برای سنگ پیشنهاد شده است. معیار شکست به‌طور کلی عبارت است از تابع یا قانونی که رابطه بین 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 مورد استفاده در مسائل عملی می‌توان به معیار موهر - کلمب و از روابط غیرخطی نیز می‌توان به معیار هوک - براون اشاره کرد. معیار غیرخطی هوک - براون از جمله معیاری تجربی است که با دقت مناسب رفتار توده سنگ را در شکست پیش‌بینی می‌کند. معیار شکست هوک - براون به‌طور وسیعی در گذشته استفاده شده است. نسخه‌های متعددی از معیار هوک - براون از سال ۱۹۸۰ تاکنون ارائه و معرفی شده 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.

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 در نتیجه 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 مونت کارلو، ضرایب اطمینان را برای طراحی پی نواری مورد مطالعه 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 در نهایت 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 راثو 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 مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین عدم اطمینان را خطاهای انسانی موجب می‌شوند [۸]. فوون و کولوی 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 مونت کارلو، ظرفیت باربری را به‌صورت احتمالاتی بررسی کردند [۱۰]. باقری پور و افضل‌ی راد (۱۳۸۸)



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

همچنین با ترسیم دایره موهر مربوط به معیار شکست هوک - براون همان گونه که در شکل شماره (۲) نشان داده شده است می توان پارامترهای برشی مربوط به توده سنگ 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<sub>i</sub> به صورت تجربی تعیین می‌شوند [۱۳]. رابطه هوک - براون (۱۹۹۲) به صورت زیر است:

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

$$m = m_i * \exp\left(\frac{RMR-100}{a}\right) \quad (3)$$

$$s = \exp\left(\frac{RMR-100}{b}\right) \quad (4)$$

در طبیعت توده‌سنگ در حقیقت سنگ‌های شکسته‌ای شامل درزه، ترک و گسل هستند که قابل آزمایش کششی و یا فشاری نیستند و یا آن آزمایش بسیار مشکل هستند. هنگامی که سازه‌ای در درون و یا بر روی این توده‌سنگ قرار می‌گیرد، بایستی واکنش توده را در حالت تنش 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) را بین 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.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = (m * \sigma_3 * \sigma_{ci} + \sigma_{ci}^2)^{0.5} \quad (1)$$

در روابط فوق  $\sigma_1$  و  $\sigma_3$  به ترتیب تنش‌های اصلی بزرگ‌تر و کوچک‌تر،  $\sigma_{ci}$  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 می‌تواند 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.

## ۳-۲- معیار شکست هوک- براون اصلاح شده

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

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha \quad (5)$$

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

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

$$\alpha = 0.5 + \frac{1}{6} \left( \exp\left(\frac{-GSI}{15}\right) - \exp\left(\frac{-20}{3}\right) \right) \quad (8)$$

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

با توجه به توضیحات فوق و مطالعات انجام شده، از روش هوک - براون جهت ارزیابی ظرفیت باربری پی‌های کم عمق روی توده سنگ استفاده می‌گردد. با مقایسه نسخه‌های متعدد این روش، نسخه هوک-براون اصلاح شده نسبت به سایر نسخه، از تکامل و جامعیت بیشتری نسبت به نسخه‌های قبلی برخوردار است. به گونه‌ای که با اصلاحات متعدد صورت گرفته برای انواع سنگ قابل استفاده است. لذا از بین نسخه‌های ذکر شده روش هوک - براون، نسخه اصلاح شده (۲۰۰۲) مورد استفاده 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 استفاده شده برای ساده‌سازی مسئله، خطای مدل، روش‌های ساخت و مصالح استفاده شده اشاره کرد [۱۵].

مفهوم تحلیل احتمالاتی هنگامی روشن‌تر می‌گردد که در مقابل تحلیل قطعی مطرح و مورد بحث 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 مهندسی ژئوتکنیک بر این باورند که ضریب اطمینان دارای معنی و مفهوم فیزیکی ضعیفی است و انتخاب مقدار قانع کننده آن دشوار است. این پارامتر نمی‌تواند به تنهایی نشان دهنده ایمنی سازه باشد. مخصوصاً وقتی که پارامترهای ورودی تحلیل دارای نامعینی و پراکندگی در توزیع خود باشند، در این موارد از تحلیل اعتماد پذیری 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 به دست آمده از محاسبات، راه‌حلی مناسب است. روش‌های ارائه شده 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 مورد توافق قرار گرفته است؛ مخصوصاً در ژئوتکنیک که منابع نامعینی 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

که همیشه ۲ گرم سنگین تر نشان می‌دهد.<sup>۵</sup>

در طراحی و تحلیل مربوط به مهندسی ژئوتکنیک، اصولاً تصمیم‌گیری، وابستگی زیادی به پاسخ سیستم تحت شرایط طراحی دارد. در صورت غیرقطعی بودن برخی از اجزای یک سیستم پاسخ این سیستم را نمی‌توان با اطمینان کافی و دقیق ارزیابی نمود. در واقع به علت وجود عدم قطعیت، طراحی به روش قدیمی و متداول یعنی طراحی به صورت قطعی به دلیل ناتوانی آن در به حساب آوردن خطاهای پاسخ سیستم و در واقع عدم قطعیت‌های خروجی، زیر سؤال است؛ در حالی که در طراحی و تحلیل با در نظر گرفتن عدم قطعیت، مسئله در واقع به صورت چندبعدی بررسی شده و پاسخ سیستم به صورت یک متغیر تصادفی بررسی می‌گردد. هدف اصلی تحلیل عدم قطعیت، ارزیابی و بررسی خصوصیات آماری خروجی یک سیستم به صورت 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 به صورت کاملاً دقیق و صحیح تعیین کرد. وظیفه تحلیل عدم قطعیت تعیین عدم قطعیت‌های خروجی سیستم، به صورت تابعی از عدم قطعیت‌های خود مدل سیستم و پارامترهای تأثیرگذار در سیستم می‌باشند. این روش تحلیل، در واقع یک چارچوب مشخص و سیستماتیک به منظور کمی کردن عدم قطعیت خروجی سیستم به دست می‌دهد. به علاوه 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 گریفیتیس [۱۵]، چرابینی [۸] و سوپرا [۱۹] اشاره کرد. تمام این مدل بر اساس آنالیز آماری به دست آمده‌اند. برای محاسبه احتمال شکست با استفاده

اندازه‌گیری شده حول میانگین ۲- خطاهای سیستماتیک طبقه‌بندی کردند [۱۸]. در شکل (۳) نیز نمودار تصمیم‌گیری بر اساس احتمال شکست نشان داده شده 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.<sup>۲</sup>

پراکندگی در اندازه‌گیری‌های مربوط به یک نقطه به این ترتیب که هرگاه یک کمیت در یک نقطه به دفعات اندازه‌گیری گردد، مقادیر به دست آمده متفاوت خواهد بود.<sup>۳</sup>

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

خطای سیستماتیک در مقدار میانگین محاسبه شده 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 در نتیجه افزایش مقدار داده کاهش می‌یابد.<sup>۴</sup>

خطایی که به علت روش اندازه‌گیری نادرست اتفاق می‌افتد و با تکرار آزمایش برطرف نمی‌گردد. مثل نامیزان بودن ترازویی

بی شماری توسط معادلات غیرخطی به یکدیگر مرتبط هستند، بدون محدودیت خاصی قابل کاربرد است. در یافتن برآوردهای مناسب برای حل مسائلی که یا نمی توان آن را به صورت ریاضی مدل بندی کرد و یا حل ریاضی آن مشکل است، این روش دستیابی به جواب را ممکن می سازد. اگر قادر باشیم که یک آزمایش سازه ای را هزاران بار تکرار نماییم، توزیعی از جواب به دست خواهد آمد. این توزیع عملکرد سازه را برای نمونه های مورد آزمایش نشان خواهد داد. انجام دادن چنین آزمایش هایی عملاً غیرممکن است اما می توان آن را به صورت ریاضی مدل سازی نمود.

در شبیه سازی مونت کارلو، ابتدا  $n$  عدد تصادفی برای هر یک از پارامترهای تصادفی موجود در معادله پاسخ تولید می شود. سپس معادله پاسخ به ازای تک تک اعداد تصادفی تولید شده حل و در نهایت  $n$  مقدار برای معادله پاسخ سازه به دست می آید که با به کارگیری روابط مذکور می توان اطلاعات آماری نمونه را برای پاسخ سازه به دست آورد.

محاسبه احتمال شکست سازه با استفاده از آنالیز مونت کارلو نیز قابل بررسی است. بدین منظور باید در ابتدا تعریف شکست مشخص باشد. سپس آنالیز مونت کارلو برای هر نمونه انجام و بررسی می شود که آیا شکست اتفاق می افتد یا خیر. با تقسیم تعداد نمونه های آنالیز مونت کارلو که در آن ها شکست حادث می شود، بر کل نمونه، احتمال شکست سازه به دست می آید [۲۰].

با استفاده از مفهوم روش کار مونت کارلو، احتمال شکست به آسانی از رابطه ذیل به دست می آید:

$$P_f = \frac{1}{N_f} \sum_{i=1}^{N_f} I(X) \quad (9)$$

تعداد کل تحلیل های تابع شرایط حدی با  $N_f$  نشان داده شده است. تابع  $I(X)$  بیانگر بودن یا نبودن نقطه شبیه سازی شده در ناحیه شکست است و به صورت رابطه ذیل تعریف می شود [۲۰].

$$I(X) = \begin{cases} 1 & \text{if } g(X) \leq 0 \\ 0 & \text{if } g(X) > 0 \end{cases} \quad (10)$$

بر اساس رابطه (۹)،  $N_f$  مجموعه از متغیری طراحی مستقل بر اساس توزیعشان به دست می آیند. سپس تابع شکست یا تابع شرایط حدی برای آن ها محاسبه می شود. در نهایت برآوردی از احتمال شکست به صورت رابطه ذیل حاصل می شود [۲۰]:

$$P_f = \frac{N_f}{N_f} \quad (11)$$

که در آن  $N_f$  نشان دهنده تعداد وقوع شکست در سازه است.

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

در این تحقیق از آنالیز اعتماد پذیری که عدم قطعیت پارامتر و مدل انتخابی را مدنظر قرار می دهد استفاده گردیده و در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

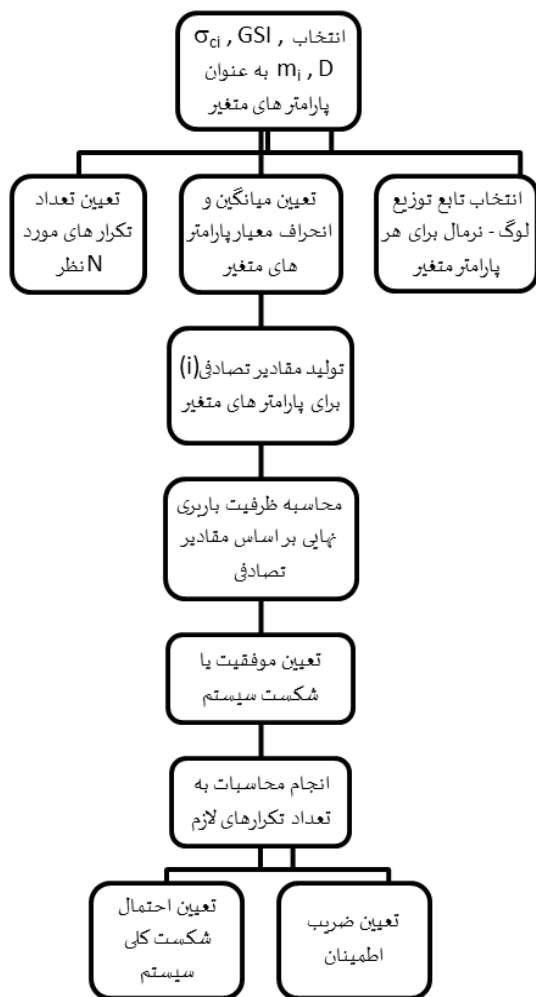
## ۵- روش شبیه سازی مونت کارلو

یکی از روش های تحلیل اعتماد پذیری، روش های شبیه سازی هستند. پرکاربردترین روش شبیه سازی، روش مونت کارلو است. روش های شبیه سازی، به هر روش عددی برای ایجاد شرایط سیستم در حالت واقعی و طبیعی اطلاق می شود. نتایج این روش بسیار شبیه به جواب واقعی است. آنالیز مونت کارلو یکی از مهم ترین 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 مدل سازی احتمالاتی و کمی سازی تغییرات آن
- نمونه گیری تصادفی برای هر پارامتر که از تابع چگالی احتمال و یا ستون داده های مربوط به آن پارامتر انتخاب می شوند.
- حل مسئله از روش تحلیلی قطعی با مجموعه ی پارامترهای انتخاب شده برای محاسبه تابع عملکرد
- عملیات با تکرار دو مرحله ی اخیر تا رسیدن به تعداد کافی شبیه سازی ادامه می یابد و با استفاده از مقادیر خروجی، تابع توزیع عملکرد و در نتیجه احتمال شکست مشخص می گردد.
- شبیه سازی مونت کارلو روشی است که در اکثر کارهای عمرانی همانند روانگرایی، پایداری شیروانی، دیوار حائل و نشت استفاده شده است و به علت سهولت استفاده و فرض های ساده کننده آن در بسیاری تحقیقات به کار برده شده است. همچنین به علت جواب های دقیق تری که در مقایسه با سایر روش اعتماد پذیری به دست می دهد، در میان محققین مسئله قابلیت اعتماد به روشی متداول تبدیل گشته است که در این مقاله هم از آن استفاده شده است.
- این روش به خصوص در مسائل پیچیده ای که متغیری تصادفی

دلیل ارائه مقدار تنش فشاری وارده در مطالعات این منطقه، امکان مقایسه نتایج حاصل از محاسبات با تنش وارده امکان پذیر است و در نتیجه اعتبار سنجی نتایج به خوبی میسر است



شکل ۴: الگوریتم آنالیز اعتمادپذیری بر پایه روش MCS

توده سنگ مورد مطالعه مربوط به منطقه ای در ترکیه از نوع آندزیت سیاه<sup>۶</sup> است که در شکل ۵ مشخص شده است. در این منطقه به طور غالب از نوع آندزیت است. در این منطقه، از این سنگ به علت قابلیت دوام خوب به طور گسترده در ساخت و ساز و مخصوصاً بستر و تکیه گاه پی استفاده می شود. برخی خصوصیات فیزیکی و مکانیکی سنگ آندزیت در جدول ۱ نشان داده شده اند [۲۱].

از مزایای روش مونت کارلو نسبت به سایر روش می توان موارد زیر را برشمرد:

۱. عدم محدودیت در تعداد پارامترها
۲. زمان کمتر
۳. امکان استفاده از محیط نرم افزار Excel
۴. امکان بهینه سازی 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 شبیه سازی مونت کارلو و در هر نقطه دلخواه از محل مورد نظر، ابتدا برای هر یک از متغیری تصادفی ورودی، بهترین توزیع احتمال را به دست می آورند، که در این مقاله، برای متغیری تصادفی توزیع احتمال لوگ نرمال در نظر گرفته شده است، زیرا این توزیع فقط مقادیر مثبت را ارائه می دهد. تابع چگالی احتمال مربوط به توزیع احتمال لوگ نرمال از رابطه ذیل حاصل می گردد:

$$f(x) = \frac{\exp(-0.5(\frac{\ln(x)-\mu}{\sigma})^2)}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \quad (12)$$

در این رابطه،  $\mu$  و  $\sigma$  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 مورد نظر (اعداد تصادفی بین کمترین و بیشترین داده)، به تعداد مورد نظر، داده تولید می شود. این پروسه بار و برای تک تک متغیری تصادفی تکرار می گردد و در هر مرحله، از روی چگالی های احتمال حاصل و رابطه ظرفیت باربری نهایی مقادیر مورد نظر به دست می آیند.

فلوچارت آنالیز اعتمادپذیری بر پایه روش MCS به صورت شکل ۴ پیشنهاد می گردد.

## ۶- مدل سازی مطالعه موردی

در بخش های قبل روش های اعتمادپذیری و پارامتری مرتبط با این روش مورد بررسی قرار گرفت. به منظور مقایسه روش های اعتمادپذیری و بررسی دقت نتایج هر یک از این روش، ابتدا مطالعات موردی برای توده سنگ مورد مطالعه در دیگر نقاط دنیا انجام شده و برای مقادیر مختلف، احتمال شکست و ضریب اطمینان با استفاده از روش مونت کارلو به دست آمده است. به



جدول ۲: عدم قطعیت پارامتری استفاده شده

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

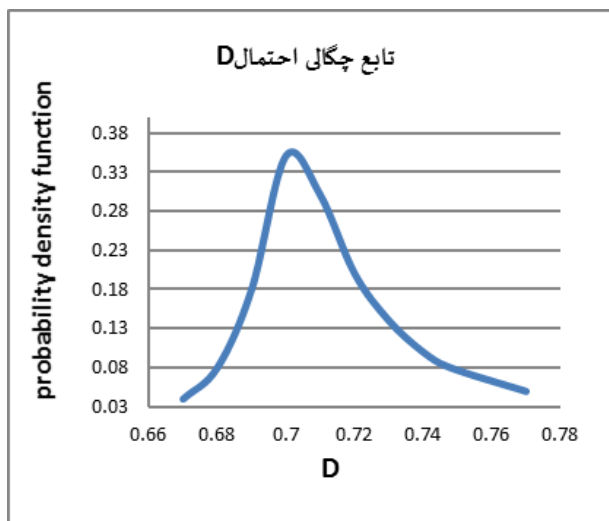


شکل ۵: توده سنگ مورد مطالعه [۲۱]

برای محاسبه احتمال شکست پی، با استفاده از روش شبیه سازی مونت کارلو، ابتدا تابع چگالی احتمال مربوط به هر یک از متغیری تصادفی رسم می گردد. در اشکال ۶ تا ۹ به ترتیب توابع چگالی احتمال مربوط به متغیری  $\sigma_{ci}$ ,  $GSI$ ,  $m_i$ ,  $D$  ترسیم شده است. سپس با استفاده از برنامه نویسی مطلب، پروسه محاسبه مقدار ظرفیت باربری نهایی به تعداد تکراری  $10^3$ ،  $10^4$ ،  $10^5$  و  $10^6$  بار انجام شده و در نهایت از رابطه (۱۱) احتمال شکست محاسبه می گردد.

در ادامه با توجه به شکل ۴ که فلوجارت پیشنهادی جهت تحلیل قابلیت اعتماد ظرفیت باربری پی با استفاده از روش شبیه سازی مونت کارلو، ارائه گردیده است؛ برنامه مورد نظر در نرم افزار مطلب نوشته می شود.

نتایج حاصل از روش شبیه سازی مونت کارلو در جداول ۳ و ۴ نشان داده شده اند.

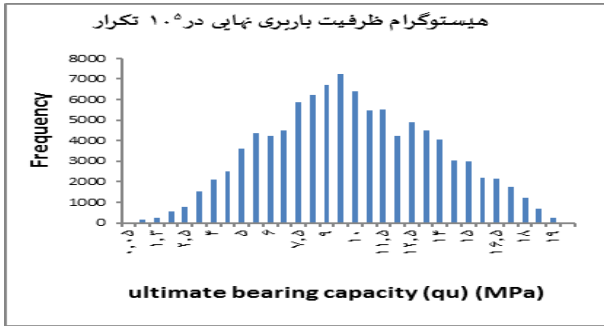


شکل ۶: تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی D

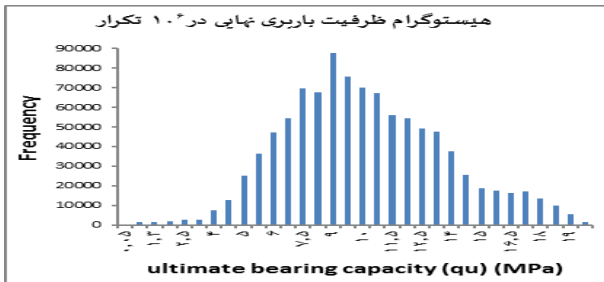
در رابطه هوک - براون اصلاح شده (۲۰۰۲) که در این مقاله استفاده می شود، تمام پارامتری مؤثر به صورت متغیر تصادفی در نظر گرفته می شوند. بدین گونه که پارامتر مقاومت فشاری تک محوری  $\sigma_{ci}$  به صورت مستقیم در رابطه تأثیر گذار است. مقاومت فشاری تک محوری سنگ که یکی از شاخص های مهم خواص مکانیکی سنگ است از طریق آزمایش هایی نظیر آزمایش فشاری تک محوری در آزمایشگاه و یا به طریق آزمایش بارگذاری نقطه ای حاصل می شود که می تواند دارای عدم اطمینان (خطای انسانی یا اندازه گیری) باشد. فاکتوری  $m$ ،  $s$ ،  $a$  نیز خود وابسته به مقادیر  $GSI$ ،  $m_i$ ،  $D$  می باشند. به همین دلیل این سه پارامتر نیز به عنوان متغیری تصادفی در نظر گرفته می شوند. همچنین عدم قطعیت پارامتری مؤثر در رابطه ظرفیت باربری در جدول ۲ نشان داده شده است.

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

پارامتر	محدوده تغییرات	میانگین
وزن واحد حجم ( $\gamma$ ) (kN/m <sup>3</sup> )	۲۵/۵-۲۱/۶۵	۲۳/۵۷
تخلخل (e)	۴/۱۳-۳/۲۶	۳/۷
مقاومت فشاری تک محوره ( $\sigma_{ci}$ ) (MPa)	۱۴۸-۴۰	۹۴
مقاومت کششی ( $\sigma_{ti}$ ) (MPa)	۹/۶-۷/۵۵	۸/۵۸
چسبندگی (c) (MPa)	۱۲/۳۱-۷/۱۳	۹/۷۲
زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) (درجه)	۵۶/۷-۴۹/۷	۵۳/۲۱
مدول الاستیسته (E) (GPa)	۴۳/۳-۴۰/۵	۴۱/۹
ضریب پواسون ( $\nu$ )	۰/۲۴-۰/۲۰	۰/۲۲
RQD	۵۸-۴۶	۵۲



شکل ۱۰: نمودار هیستوگرام ظرفیت باربری نهایی در ۱۰<sup>۵</sup> تکرار



شکل ۱۱: نمودار هیستوگرام ظرفیت باربری نهایی در ۱۰<sup>۶</sup> تکرار

جدول ۳: مقادیر میانگین و انحراف معیار ظرفیت باربری

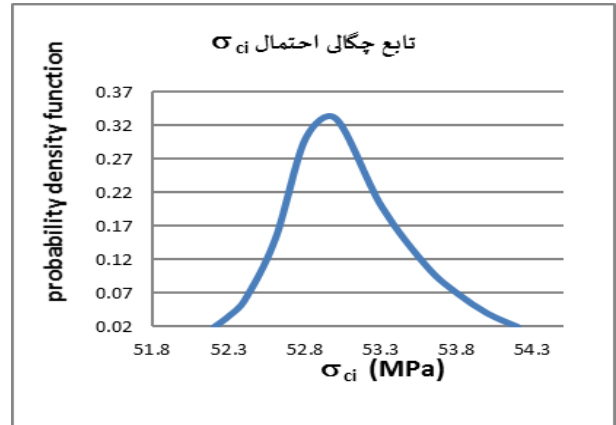
تعداد تکرار	میانگین (MPa)	انحراف معیار
۱۰ <sup>۲</sup>	۹/۱۲۱	۴/۵۲۲
۱۰ <sup>۴</sup>	۹/۲۲۸	۴/۵۵۲
۱۰ <sup>۵</sup>	۹/۳۶۷	۴/۵۷۰
۱۰ <sup>۶</sup>	۹/۴۵۲	۴/۵۶۳

جدول ۴: مقادیر احتمال شکست و ضریب اطمینان ظرفیت باربری

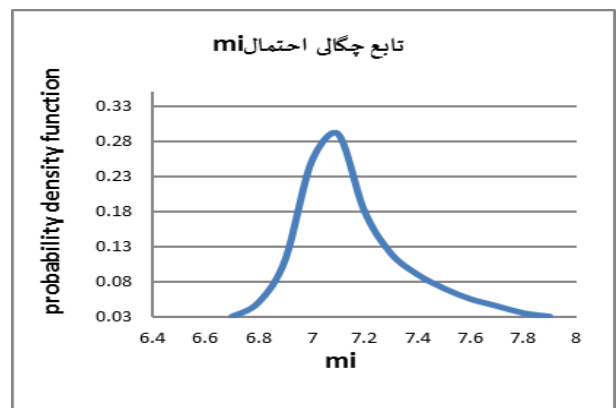
تعداد تکرار	احتمال شکست	میانگین ضریب اطمینان
۱۰ <sup>۲</sup>	۰/۰۵۱	۳/۱۱۶
۱۰ <sup>۴</sup>	۰/۰۲۲۱	۲/۶۱۱
۱۰ <sup>۵</sup>	۰/۰۱۰۶	۲/۲۷۴
۱۰ <sup>۶</sup>	۰/۰۰۷۵	۱/۵۸۸

جدول ۵: مقادیر ظرفیت باربری نهایی برآورد شده توسط روش مونت کارلو

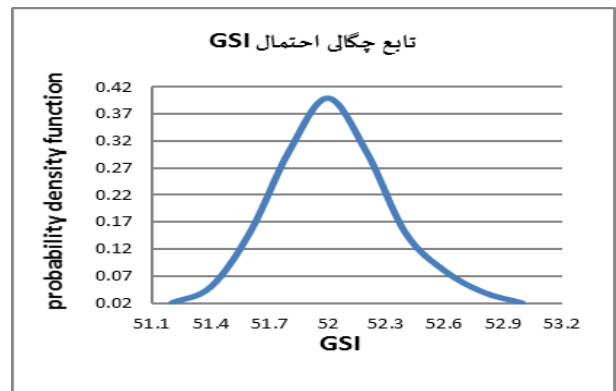
روش اعتمادپذیری	ظرفیت باربری نهایی (qu) (MPa)	
تعداد تکرار	۱۰ <sup>۲</sup>	۹/۱۲۱
	۱۰ <sup>۴</sup>	۹/۲۲۸
	۱۰ <sup>۵</sup>	۹/۳۶۷
	۱۰ <sup>۶</sup>	۹/۴۵۲



شکل ۷: تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی  $\sigma_{ci}$



شکل ۸: تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی  $m_i$



شکل ۹: تابع چگالی احتمال متغیر تصادفی GSI

همچنین نمودار هیستوگرام ظرفیت باربری نهایی در ۱۰<sup>۵</sup> و ۱۰<sup>۶</sup> تکرار در اشکال (۱۰) و (۱۱) نشان داده شده‌اند. مقادیر ظرفیت باربری نهایی محاسبه شده توسط روش شبیه‌سازی مونت کارلو با تکراری مختلف، در جدول (۵) مشاهده می‌شوند.

## 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 توده سنگ مورد بحث (ترکیه) حاصل می‌گردد:

$$q_u = \sigma_{ci} * s^a [(m * s^{a-1})^a + 1] = 10.96 \text{ MPa} \quad (10)$$

$$m_b = m_i * \exp\left(\frac{GSI-100}{28-14D}\right) = 0.722 \quad (11)$$

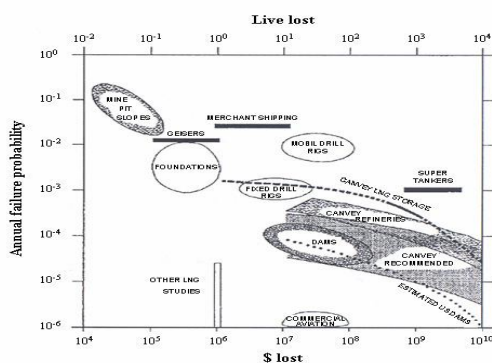
$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right) = 0.017 \quad (12)$$

$$a = 0.5 + \frac{1}{6} \left( \exp\left(\frac{-GSI}{15}\right) - \exp\left(\frac{-20}{3}\right) \right) = 0.505 \quad (13)$$

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، ظرفیت باربری نهایی برای توده سنگ مورد مطالعه 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 ارائه شده توسط بیچر [۲۲] در شکل ۱۲ استفاده می‌کنند. این‌گونه نمودار به‌عنوان یک ابزار مفید برای تشریح احتمال شکست و ریسک شناخته شده هستند.



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

در شکل ۱۲ احتمال شکست سازه مهندسی شناخته شده در برابر هزینه به دلار یا تعداد نفرات جان‌باخته در یک سال مشخص شده است. محور به‌صورت لگاریتمی نشان داده شده‌اند. این نمودار تجربی، نرخ شکست یا هزینه را که قابل قبول هستند، ارائه می‌دهد.

در این نمودار برای فونداسیون، احتمال شکست قابل قبول در محدوده  $10^{-3}$  -  $10^{-2}$  در نظر گرفته شده است و یا در مقایسه با سد احتمال شکست بیشتر اما خسارات جانی و مالی کمتر.

در مسئله ظرفیت باربری پی نواری استفاده شده در این مقاله، مقادیر احتمال شکست محاسبه شده در جدول ۶ آورده شده‌اند که مقادیری بین ۰/۰۵ تا ۰/۰۰۶ دارند. در نتیجه احتمال شکست محاسبه شده برای ظرفیت باربری در مقایسه با مقادیر نشان داده شده در شکل ۱۲ مطابقت دارند.

در هر صورت، 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. در نتیجه مهندسی باید در استفاده از این مقادیر مراقب باشند.

جدول ۶: مقادیر احتمال شکست محاسبه شده توسط روش مونت کارلو

روش اعتمادپذیری	احتمال شکست (P <sub>L</sub> )
۱۰ <sup>۳</sup>	۰/۰۵۱۰
۱۰ <sup>۴</sup>	۰/۰۲۲۱
۱۰ <sup>۵</sup>	۰/۰۱۰۶
۱۰ <sup>۶</sup>	۰/۰۰۷۵

## ۶-۳- محاسبه ضرایب اطمینان

همچنین در هر سیکل و به ازای هر مقدار از ظرفیت باربری نهایی محاسبه شده، با تقسیم این مقادیر بر مقدار تنش وارده، ضریب اطمینان به دست می‌آید که این مقادیر در جدول ۷ نشان داده شده‌اند. همان‌گونه که در جدول مشخص است با افزایش تعداد تکراری روش مونت کارلو، ضریب اطمینان مورد استفاده نیز افزایش می‌یابد که نتیجه‌ای قابل انتظار 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

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 مهندسیین ژئوتکنیک، که از روش‌های رایج مبتنی بر ضریب اطمینان برای طراحی فونداسیون استفاده می‌کنند.

در روش 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  $10^3$  تکرار تا  $10^5$  تکرار روندی صعودی دارند، که این افزایش به دلیل افزایش تعداد تکرار منطقی است. از طرفی مقدار انحراف معیار و یا پراکندگی در  $10^6$  تکرار نسبت به  $10^5$  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
$\sigma_1$	Pa	تنش اصلی بزرگ‌تر	GSI	شاخص مقاومت زمین‌شناسی
$\sigma_3$	Pa	تنش اصلی کوچک‌تر	$N_i$	تعداد کل تحلیل
$\sigma_{ci}$	Pa	مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ بکر	$N_f$	تعداد دفعات شکست
m - s		ثوابت هوک-براون برای سنگ بکر	RMR	شاخص نرخ‌گذاری توده‌سنگ

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 در نتیجه گسیختگی بیشتری به وقوع پیوسته است و در نتیجه 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

میانگین ضریب اطمینان (FS)	روش اعتمادپذیری
۱/۵۸۵	$10^3$
۲/۰۱۷	$10^4$
۲/۳۸۱	$10^5$
۲/۴۷۲	$10^6$

#### 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. در نتیجه 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 بررسی شده 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،

## ۹- مراجع

- [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 مونت کارلو. 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] 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. & Mašin, 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.

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



## Reliability Analysis of Bearing Capacity of Foundations on Rock Masses Using Monte Carlo Method

Gholamhoseinpour A.<sup>1</sup>, Bagheripour M.S.<sup>2</sup>

1- Ph.D. Candidate of Geotechnical Engineering, Shahid Bahonar University, Kerman

2- Professor of Civil Engineering of Shahid Bahonar University, Kerman

Received: Mar. 2016

Accepted: Mar. 2017

---

### **KEYWORDS**

Reliability  
Bearing Capacity  
Footings on Rock Masses  
Rock Mechanics  
Monte Carlo

---

### **ABSTRACT**

#### **Summary**

One of the possible choices for the foundation of large scale structures like dams and bridges is to build it on rock masses. In comparison with soils, most rocks have more strength- and that means more bearing capacity. So, the load of structures on rock mass usually causes no problem from bearing point of view. One of the terms of safe application of foundations is to bear the load structures or in the other hand bearing capacity of foundation is adequate for load structures.

Estimating bearing capacity of foundations has been one of the most important problems for geotechnical engineers and because of its importance; several relations have been suggested with different researches. A typical method in design of structures in geotechnical engineering is safety factor that is a stuffy method and even in most cases lead to increase in project costs. However, not paying attention to the reliability of soil or rock parameters, even in a small scale, and using just a number as safety factor is not logical. Reliability and error is a common problem in geotechnical engineering and especially in rock mechanics. So, using reliability methods in geotechnical engineering has been common. In these methods, by using a range of probable values for parameters, variation of the function will be determined. Since using probability methods especially in geotechnical engineering is so limited, in this study, the most common method for reliability analysis "Monte Carlo" was introduced and reliability relations for bearing capacity of footing on rock masses was proposed. Using the proposed method in this research, bearing capacity of a strip footing on rock mass located in Ankara (Turkey) was studied and finally, the accuracy of results from different probabilistic methods is compared with results of deterministic method. The modified Hoek-Brown failure criterion was used to study the bearing capacity. Finally, a probability distribution of the bearing capacity was estimated and the probability of failure was calculated.