

ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر توده سنگ‌های شیل با رفتار رئولوژیک: با در نظرگیری رویکرد احتمالاتی

فراز معتمدی ممقانی^۱، مسعود رنجبرنیا^{۲*}، میلاد ظاهری^۳

۱- فارغ‌التحصیل کارشناسی ارشد عمران گرایش ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

۳- فارغ‌التحصیل دکتری عمران گرایش ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

پست الکترونیکی نویسندگان:

۱- F.moatamedi@ms.tabrizu.ac.ir

۲- M.ranjbarnia@tabrizu.ac.ir

۳- Miladzaheri@tabrizu.ac.ir

چکیده:

وجود عدم قطعیت بالا در مقدار خصوصیات مختلف توده سنگ می‌تواند پیش‌بینی ظرفیت باربری توده سنگ‌ها را با چالش‌هایی همراه سازد. در شرایطی که این توده سنگ دارای خواص وابسته به زمان نیز باشد، این مشکل دوجندان خواهد شد. از این رو، در این مطالعه، با فرض این که سنگ واقع در زیر پی شیل بوده، به بررسی ظرفیت باربری پی‌های نواری با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان توده سنگ پرداخته می‌شود. برای این کار، از نرم‌افزار FLAC استفاده شده و مدل ویسکو-الاستوپلاستیک CVISC به توده سنگ اختصاص داده می‌شود. همچنین، پارامترهای مقاومتی و رئولوژیکی توده سنگ به عنوان پارامترهای تصادفی انتخاب می‌شوند. سپس، با استفاده از روش سطح پاسخ، رابطه این پارامترهای ورودی و ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان تعیین می‌گردد. سپس، به هر یک از این پارامترها، توزیع نرمال و مقادیر میانگین و انحراف معیار اختصاص داده می‌شود. در گام بعد، با استفاده از روش مونت-کارلو و رابطه محاسبه شده، توزیع احتمالاتی برای ظرفیت باربری تعیین می‌گردد. نتایج این تحقیق حاکی از آن است که پارامتر مدول برشی کلونین و GSI بیشترین تأثیر را در مقدار ظرفیت باربری دارند و توزیع‌های حاصله از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند. همچنین، با در نظرگیری رویکرد احتمالاتی، کاهش ۱۰ درصدی مدول برشی کلونین می‌تواند مقدار ظرفیت باربری توده سنگ را ۱۰ درصد کاهش دهد. بعلاوه، حدود ۲٪ اختلاف بین نتایج روش‌های قطعی و تحلیلی وجود دارد و در نتیجه، با در نظر گرفتن عدم قطعیت، ظرفیت باربری توده سنگ کاهش پیدا می‌کند.

واژگان کلیدی:

ظرفیت باربری توده سنگ دارای رفتار وابسته به زمان، توده سنگ، تحلیل احتمالاتی، روش سطح پاسخ، روش عددی.

* مسعود رنجبرنیا، دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تبریز.

ایمیل: M.ranjbarnia@tabrizu.ac.ir (نویسنده مسئول مقاله)

Bearing Capacity of Strip Foundations on Shale Rock Masses with Rheological Behaviour: Probabilistic Based Approach

F. Motamedi Mamaghani^۱, M. Ranjbarnia^۲, M. Zaheri^۳

۱- MSc of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

۲- Associate professor, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

۳- Ph.D. of Geotechnical Engineering, Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.

Abstract:

Predicting the bearing capacity of rock masses can be challenging when the values of rock mass properties have high uncertainty. This challenge becomes even greater when the rock mass exhibits time-dependent behavior. Therefore, in this paper, the bearing capacity of strip foundations located on rock masses with time-dependent behavior is investigated. For this purpose, FLAC software is used and the visco-elasto-plastic CVISC model is assigned to the rock mass. Also, the Hoek-Brown criterion constant, uniaxial compressive strength of rock mass, GSI (geological strength index of rock mass), Kelvin shear modulus, Maxwell viscosity, and Kelvin viscosity are selected as random parameters. Initially, using the results obtained from this software and using the response surface methodology, the relationship between these input parameters and the bearing capacity of the rheological rock mass is determined. Then, a normal distribution and mean and standard deviation values are assigned to each of these parameters. In the next step, using the Monte Carlo method, a large number of random numbers are generated and, considering the relationship between the above input random variables and the resulting output (bearing capacity of the rock mass with the time-dependent behaviour), probability distributions for the output of the problem are determined. The results of this research indicate that the Kelvin shear modulus of the rock mass is the most effective parameter in predicting of the value of the bearing capacity, and the resulting distributions follow the normal distribution. Besides, if the uncertainty of the rock mass parameters increases, the standard deviation of the results also increases. Also, the amount of positive skewness also increases. As a result, the probability that the bearing capacity of the rock mass is less than the average value is greater. Thus, in various construction projects, the bearing capacity of rock masses needs to be examined based on probabilistic methods.

Keywords: Bearing capacity of rheological rock mass, Rock mass, Probabilistic analysis, Response surface methodology, Numerical method.

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

تعیین ظرفیت باربری خاک و یا توده سنگ یکی از مهمترین مراحل در طراحی سازه‌هایی نظیر ساختمان‌ها، پل‌ها و سدها می‌باشد. با بررسی مقالات پیشین می‌توان مشاهده کرد که تحقیقات نسبتاً زیادی در این خصوص انجام گرفته است. با این حال، عموماً توده سنگ‌ها نسبت به خاک‌ها دارای مقاومت و ظرفیت باربری بیشتری می‌باشند ولی وجود درزه‌ها و برخی شکستگی‌ها در داخل توده سنگ سبب افزایش نشست‌ها و کاهش ظرفیت باربری می‌شوند. بعلاوه، در شرایط واقعی، به علت شرایط زمین-شناسی (نظیر وجود ناپیوستگی‌ها و گسل‌ها)، محیط زیستی و فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی پیچیده، خصوصیات توده سنگ ممکن است از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت باشد. اگر مقدار پارامترهای مقاومتی و تغییر شکلی توده سنگ از عدم قطعیت بالایی برخوردار باشند، استفاده از مقادیر متوسط پارامترها در تحلیل‌ها منطقی نبوده و بایستی به نحوی، اثر تغییرات این پارامترها در تحلیل‌ها در نظر گرفته شود. برای در نظرگیری چنین عدم قطعیتی می‌توان از دو رویکرد بهره گرفت [۱]. رویکرد اول این است که ابتدا به هر یک از پارامترهای مد نظر، توزیع احتمالی اختصاص داده می‌شود و با توجه به پارامترهای این توزیع احتمالاتی، اعداد تصادفی تولید شده و به هر یک از زون‌های ایجاد شده در روش عددی این اعداد اختصاص داده می‌شود. به عبارتی، خصوصیات توده سنگ (و یا خاک) از نقطه‌ای به نقطه دیگر متفاوت است. این روش به روش میدان تصادفی^۱ معروف است. در مقابل، در روش دوم، ابتدا به هر یک از پارامترهای مد نظر، توزیع احتمالی اختصاص داده شده و در گام بعد، به تعداد بسیار زیادی اعداد تصادفی برای هر یک از این پارامترها ایجاد می‌گردد. در این روش لازم است که به تعداد اعداد تصادفی ایجاد شده برای هر لایه از توده سنگ و یا خاک، تحلیل صورت پذیرد. مزیت این روش این است که خصوصیات تمامی المان‌های توده سنگ و یا خاک یکسان در نظر گرفته می‌شود [۱].

گفتنی است، از این روش‌ها، علاوه بر تعیین ظرفیت باربری پی‌ها، برای تعیین پایداری تونل‌ها، شیروانی‌ها و سدها نیز استفاده می‌شود [۱۱-۲]. فنتون و گریفیثس^۲ تأثیر فاصله بین پی‌ها و عرض پی‌ها را

بر روی نشست تفاضلی پی‌های واقع بر خاک مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور فرض شد که صرفاً مقدار مدول الاستیسیته خاک (با در نظرگیری توزیع لوگ نرمال^۳) از نقطه‌ای به نقطه دیگر تغییر پیدا می‌کند. ایشان معیار گسیختگی خاک را موهر-کولمب^۴ با رفتار الاستوپلاستیک کامل انتخاب نمودند [۱۲]. در تحقیقی دیگر، این محققین پارامتر چسبندگی خاک را به عنوان پارامتر تصادفی در نظر گرفتند [۱۳]. رنجبر پویا^۵ و همکاران با بهره‌گیری از روش عددی (با استفاده از نرم‌افزار FLAC) به مطالعه تأثیر وجود تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک بر ظرفیت باربری پی‌های سطحی صلب در شرایط زهکشی شده پرداختند. در این تحقیق، چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک به عنوان پارامترهای تصادفی انتخاب گردید [۱۴]. در تحقیقی دیگر، چن^۶ و همکاران با استفاده از روش میدان تصادفی، ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر روی دو لایه خاک رسی را مورد بررسی قرار دادند [۱۵]. رنجبرنیا^۷ و همکاران ظرفیت باربری توده سنگ (بر اساس معیار گسیختگی توده سنگ) را مورد مطالعه قرار دادند و پارامترهای معیار گسیختگی هوک-براون^۸ به عنوان پارامترهای تصادفی انتخاب شد. شایان ذکر است که توابع توزیع احتمالاتی ظرفیت باربری توده سنگ هم برای پی مربعی و هم برای پی نواری به دست آمد. نتایج حاصله بیانگر این بود که تحلیل قطعی^۹ که در آن، از مقادیر متوسط پارامترها استفاده می‌شود، الزاماً مقدار ظرفیت باربری محتمل را بیان نمی‌کند [۱۶].

گفتنی است، در صورتی که توده سنگ زیر پی دارای رفتار وابسته به زمان (رئولوژیک^{۱۰}) نیز باشد و تحت اثر اعمال تنش ثابت، نشست پی با گذشت زمان رفته رفته افزایش پیدا کند، لزوم در نظرگیری عدم قطعیت در تعیین ظرفیت باربری پی دوچندان می‌شود؛ زیرا علاوه بر خصوصیات مقاومتی و مدول تغییر شکل‌پذیری توده سنگ، پارامترهای دیگری نیز بر پاسخ توده سنگ

^۳ Log-normal

^۴ Mohr-Coulomb

^۵ Ranjbar Pouya

^۶ Chen

^۷ Ranjbarnia

^۸ Hoek-Brown

^۹ Deterministic analysis

^{۱۰} Rheological

^۱ Random field method

^۲ Fenton and Griffiths

ویسکو الاستوپلاستیک به توده سنگ اختصاص داده شده و فرض می‌شود که رفتار توده سنگ در هنگام گسیختگی به صورت الاستوپلاستیک کامل^۲ است. تنش‌های وارد بر پی به صورت یکنواخت بوده و از اثر بارهای لرزه‌ای و وجود آب زیرزمینی صرف نظر می‌شود. همچنین، توده سنگ‌های همگن بوده و درزه‌های سیستماتیک وجود ندارد. بعلاوه، فرض می‌شود که کلیه نقاط مدل دارای خصوصیات یکسانی می‌باشند.

۳- مدل‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی عملکرد رئولوژیک و بررسی ظرفیت باربری، از روش عددی بهره گرفته می‌شود. گفتنی است، در ابتدا لازم است که ظرفیت باربری توده سنگ بدون در نظرگیری رفتار وابسته به زمان محاسبه شده و سپس ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان (با توجه به مراحل که در ادامه به آن‌ها اشاره خواهد شد) محاسبه گردد.

۳-۱- عدم در نظرگیری رفتار وابسته به زمان

از نرم‌افزار FLAC برای تعیین ظرفیت باربری توده سنگ استفاده می‌شود. هندسه مدل ساخته شده در شکل (۱) نشان داده شده است. شایان ذکر است که مش‌بندی و ابعاد مدل به نحوی انتخاب شده‌اند که این موارد، تأثیر چندانی بر نتایج به دست آمده نداشته باشند. بر این اساس، فاصله مرزهای جانبی به صورت تدریجی افزایش داده شد تا اثر اصطکاک بین توده سنگ و مرزهای جانبی بر نتایج حاصله حداقل شود. از این رو، ابعاد مدل در جهت‌های افقی و قائم برابر ۳۰ متر در نظر گرفته شد. در مقابل، اندازه مش‌ها به صورت تدریجی از بزرگ به کوچک تغییر داده شد تا اثر آن‌ها در نتایج به دست آمده کاهش یابد. به منظور افزایش دقت تحلیل، اندازه مش‌ها در ناحیه زیر پی، ریزتر انتخاب گردید و با فاصله گرفتن از این ناحیه و نزدیک شدن به مرزهای جانبی مدل، ابعاد المان‌ها به صورت تدریجی افزایش داده شد تا حجم محاسبات کاهش یابد. ابعاد نهایی مش‌ها که بر اساس این تحلیل به دست آمده است، در شکل (۱) نشان داده شده است. بعلاوه، به دلیل

تأثیر می‌گذارند. به طور مثال، در مدل ویسکوالاستیک برگر و مدل ویسکو الاستوپلاستیک CVISC^۱، مقدار پارامترهای مدول برشی کلوین^۲، ویسکوزیته ماکسول^۳ و ویسکوزیته کلوین^۴ نیز می‌توانند دارای عدم قطعیت باشند [۱۷-۲۲]. با این حال، تأثیر عدم قطعیت در پارامترهای رئولوژیکی توده سنگ در ظرفیت باربری توده سنگ تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته است.

از این رو، در این مطالعه به بررسی عدم قطعیت در مقدار پارامترهای توده سنگ و تأثیر آن در ظرفیت باربری توده سنگ واقع در زیر پی‌های نواری با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان پرداخته شده است. بدین منظور، برای انجام تحلیل‌ها، از نرم‌افزار FLAC استفاده شده است. گفتنی است، برای تعیین ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان، در ابتدا لازم است که ظرفیت باربری توده سنگ بدون در نظرگیری رفتار وابسته به زمان محاسبه شود. در این حالت، برای توصیف رفتار عملکرد توده سنگ از مدل رفتاری موهر - کولمب و در شرایطی که رفتار وابسته به زمان در نظر گرفته می‌شود، از مدل رفتاری ویسکو الاستوپلاستیک CVISC استفاده می‌شود. در گام بعد، رابطه بین متغیرهای تصادفی ورودی و خروجی (ظرفیت باربری با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان) با استفاده از روش سطح پاسخ^۵ به دست می‌آید. سپس، برای هر یک از این پارامترهای تصادفی، توزیع نرمال و مقادیر میانگین و انحراف معیار اختصاص داده می‌شود. در گام بعد، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و استفاده از روش مونت-کارلو^۶ تعداد زیادی عدد تصادفی تولید شده و با توجه به رابطه بین متغیرهای تصادفی ورودی و خروجی، توزیع احتمالاتی برای خروجی مسئله تعیین می‌گردد.

۲- تعریف مسئله و فرضیات

فرض می‌شود که یک پی نواری بر روی یک توده سنگ با رفتار وابسته به زمان (رئولوژیک) قرار گرفته است. به همین جهت، مدل

^۱ Burger-creep viscoplastic model

^۲ Kelvin shear modulus

^۳ Maxwell viscosity

^۴ Kelvin viscosity

^۵ Response Surface Methodology

^۶ Monte Carlo method

^۷ Elastic perfectly plastic

در مرزهای کناری در جهت افقی بسته (مهار) می‌شود. لازم به ذکر است که به جهت وجود شرایط کرنش مسطح، توده سنگ امکان حرکت در جهت عمود بر صفحه را نیز ندارد. پس از اعمال تنش‌های اولیه، مدل تحلیل شده و جابجایی‌ها و سرعت‌ها در کل مدل به مقدار صفر، مقداردهی اولیه می‌شود؛ زیرا ملاک تعیین نشست، مقدار نشست بعد از اعمال تنش وارد بر پی است.

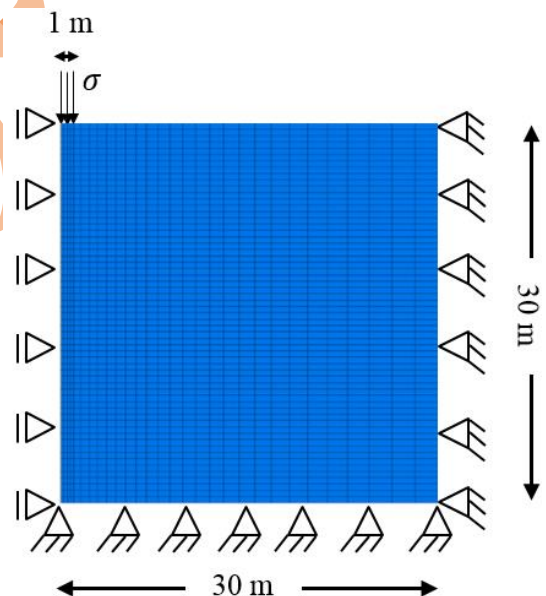
در گام بعد، نوبت به اعمال تنش وارد بر پی است. به جهت این که سختی پی بیش از ۲۰ برابر سختی توده سنگ است، می‌توان پی را صلب فرض کرده و به جای مدل‌سازی خود پی در نرم‌افزار، در محدوده پی، سرعت ثابتی را در جهت قائم اعمال نمود (به عبارتی، رفته رفته جابجایی پی افزایش می‌یابد) [۲۵]. با این کار، امکان به دست آوردن نمودار تنش - نشست با سهولت بیشتری صورت می‌گیرد. در این مرحله می‌توان ظرفیت باربری توده سنگ بدون در نظرگیری رفتار وابسته به زمان را به دست آورد. برای این کار، دو معیار زیر در نظر گرفته شده و مقدار حداقل تنش حاصله از این دو معیار، به عنوان ظرفیت باربری توده سنگ گزارش می‌شود:

- ۱- تنش‌ی که در آن، مقدار نشست برابر ۵ سانتی‌متر گردد (به عبارت بهتر، نشست مجاز توده سنگ برابر ۵ سانتی‌متر است) [۲۶]؛
- ۲- در نمودار تنش - نشست، تنش‌ی که تحت اثر آن، مقدار نشست رفته رفته افزایش یابد (گیسختگی برشی در توده سنگ رخ دهد).

۳-۲- در نظرگیری رفتار وابسته به زمان

در این مرحله مدل ویسکو الاستوپلاستیک CVISC به توده سنگ اختصاص داده می‌شود. این مدل رفتاری ترکیبی از مدل برگرد (متشکل از مدل‌های ماکسول و کلوین) و مدل موهر - کولمب است (شکل (۲)). شایان ذکر است که ورودی‌های این مدل رفتاری، عبارت‌اند از: ویسکوزیته کلوین (η_K)، ویسکوزیته ماکسول (η_M)، مدول برشی کلوین (G_K)، مدول برشی ماکسول (G_M)، مدول بالک، دانسیته، زاویه اصطکاک، چسبندگی، زاویه اتساع و مقاومت کششی. در این مدل، η_M شیب منحنی تنش در برابر کرنش را در مرحله خزش ثانویه کنترل می‌کند. در صورتی که تنش ثابتی به

وجود شرایط تقارن محوری در مسئله، صرفاً یک دوم از کل مدل، مدل‌سازی شده است تا زمان محاسبات کاهش چشمگیری داشته باشد. در گام بعد، مدل رفتاری موهر - کولمب و مقادیر پارامترهای این مدل (مدول برشی، مدول بالک، دانسیته، زاویه اصطکاک، چسبندگی، زاویه اتساع و مقاومت کششی) به توده سنگ اختصاص داده می‌شود. گفتنی است، با این که مدل هوک - براون مدل بهتری نسبت به مدل موهر - کولمب برای توده سنگ‌ها می‌باشد ولی به جهت این که مدل هوک - براون در مدل‌های خزشی موجود در نرم‌افزار وجود ندارد، با استفاده از پارامترهای این مدل یعنی m_i (ثابت معیار هوک - براون)، σ_{ci} (مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ) و GSI (شاخص مقاومت زمین‌شناسی توده سنگ) می‌توان مقادیر مدول برشی، مدول بالک، زاویه اصطکاک و چسبندگی معادل توده سنگ را به دست آورد (با استفاده از روابط ارائه شده توسط هوک^۱ [۲۳] و هوک و براون^۲ [۲۴]).



شکل ۱: هندسه مدل (مقدار تنش اعمالی در تست‌های مختلف متفاوت است)

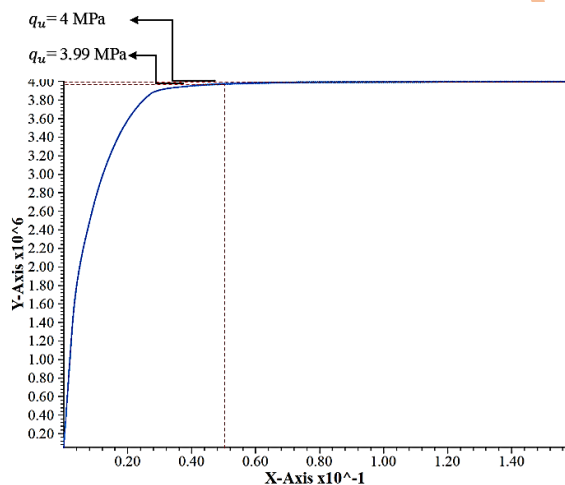
در مرحله بعد، شرایط مرزی و اولیه اختصاص داده می‌شود. بدین ترتیب، امکان حرکت تمامی گره‌های واقع در کف مدل در جهت‌های افقی و عمودی و همچنین حرکت تمامی گره‌های واقع

^۱ Hoek

^۲ Hoek and Brown

بعد از گذشت مدت زمان طولانی (مثلاً ۲۰۰ سال)، مقدار نشست از مقدار نشست مجاز (یعنی ۵ سانتی متر) فراتر رود، تحلیل متوقف شده و دوباره با اعمال تنش کمتری در محدوده پی، تحلیل خزشی دوباره انجام می‌پذیرد. به طور مشابه، در صورتی که مقدار نشست در طی این مدت بسیار کمتر از نشست مجاز بود، تحلیل متوقف شده و تنش بیشتری در محدوده پی به مدل اعمال می‌شود. این روند سعی و خطایی تا جایی ادامه پیدا می‌کند که تحت اعمال تنش، مقدار نشست پی بعد از گذشت این مدت زمان طولانی به مقدار نشست ۵ سانتی متر میل نماید. تنش حاصله، ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان نامیده می‌شود.

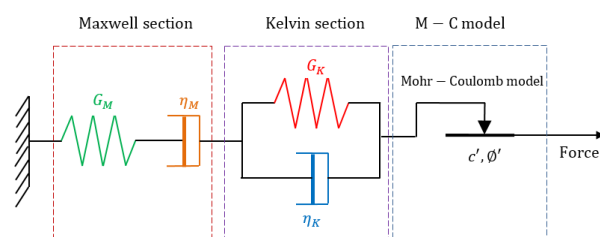
به عنوان مثال، برای حالتی که GSI برابر ۳۰، مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ برابر ۲۰ مگا پاسکال، m_i برابر ۵، مدول برشی کلونین برابر ۳۰ مگا پاسکال، ویسکوزیته کلونین برابر ۵۸ مگا پاسکال ثانیه، ویسکوزیته ماکسول برابر ۱۰۱۳ مگا پاسکال ثانیه و عرض پی نواری برابر ۲ متر است، ظرفیت باربری توده سنگ بدون در نظرگیری رفتار وابسته به زمان برابر ۴ مگا پاسکال به دست می‌آید (رجوع به شکل (۳)).



شکل ۳: نمودار بارگذاری - نشست پی نواری (محور افقی، بیانگر نشست بر حسب متر و محور قائم بیانگر ظرفیت باربری بر حسب پاسکال است)

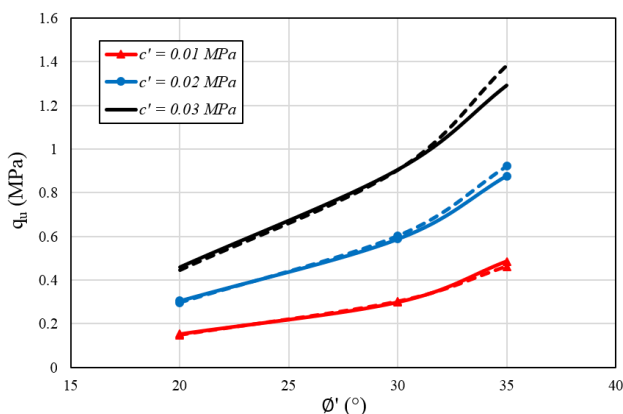
برای تعیین ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان از روش سعی و خطا استفاده می‌شود (رجوع به شکل (۴)). می‌توان دید زمانی که مقدار تنش برابر ۰/۸ و ۱/۲

توده سنگ اعمال شود، در توده سنگی که مقدار این پارامتر بیشتر باشد، کرنش کمتری ایجاد می‌شود. در مقابل، η_K فقط بر مقدار کرنش‌ها در مرحله خزش اولیه تأثیرگذار است. مدول برشی ماکسول مقدار کرنش‌های آنی را تحت تأثیر قرار می‌دهد. شایان ذکر است که مقدار مدول برشی ماکسول برابر مدول برشی در معیار موهر-کولمب است [۹، ۲۷]. این در حالی است که G_K مقدار کرنش الاستیک تأخیری را کنترل می‌کند. هرچه مقدار این پارامتر بیشتر باشد، کرنش و یا تغییر شکل نهایی کمتر خواهد بود. لازم به توضیح است که با وجود این که در تحلیل‌ها، مدول برشی ماکسول تعیین کننده سختی مصالح در ناحیه کرنش‌های کوچک می‌باشد، در مدل برگر، این پارامتر در کنار ضرایب ویسکوزیته به منظور شبیه‌سازی پاسخ وابسته به زمان توده سنگ به کار می‌رود. در این شرایط، همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، مدول‌های برشی ماکسول و کلونین به ترتیب میزان سختی در رفتار ویسکوالاستیک آنی و تأخیری را کنترل می‌کنند. بنابراین، استفاده از این پارامترها به منظور تعیین ظرفیت باربری توده سنگ، بر پایه مدل‌سازی رفتاری بوده و صرفاً محدود به کرنش‌های کوچک نمی‌باشد. از سوی دیگر، در غیاب داده‌های دقیق آزمایشگاهی در ناحیه کرنش‌های بزرگ، بهره‌گیری از این مدل‌سازی به‌عنوان ابزاری مناسب برای برآورد تأثیر نسبی پارامترها بر نتایج تحلیل به شمار می‌رود.



شکل ۲: مدل CVISC

در گام بعد، مشابه روند قبل، شرایط مرزی و تنش‌های اولیه به مدل اعمال شده و پس از تحلیل مدل، جابجایی‌ها و سرعت‌ها در کل مدل به مقدار صفر، مقداردهی اولیه می‌شود. در مرحله بعد، تنش‌های کمتر از ظرفیت باربری توده سنگ بدون در نظرگیری رفتار وابسته به زمان به مدل اعمال شده و مدل تحت این بار ثابت تحلیل شده و نمودار نشست - زمان به دست می‌آید. در صورتی که



شکل ۵: مقایسه نتایج حاصله از روش‌های عددی و تحلیلی (نتایج حاصل از نرم‌افزار FLAC و نتایج حاصله از روش تحلیلی به ترتیب با خطوط پیوسته و خط‌چین نمایش داده شده‌اند)

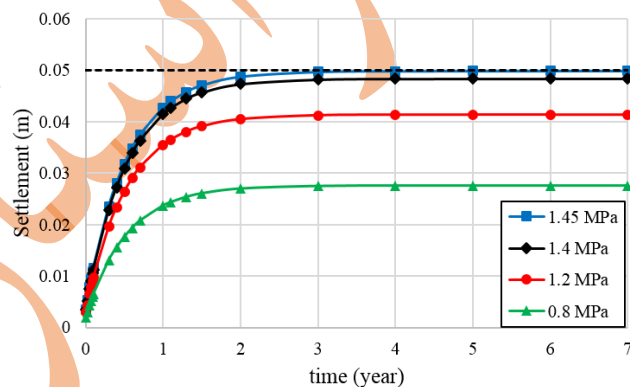
۵- مدل‌سازی احتمالاتی

با توجه به این که مقدار پارامترهای رئولوژیکی توده سنگ (یعنی ویسکوزیته کلوین، ویسکوزیته ماکسول و مدول برشی کلوین) و همچنین خصوصیات مقاومتی توده سنگ دارای مقدار واحد نبوده بلکه در محدوده‌ای تغییر پیدا می‌کنند، می‌توان از روش‌های احتمالاتی استفاده کرد و تأثیر تغییر این متغیرها را در خروجی (ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان) مورد بررسی قرار داد. با این حال، در شرایطی که از مقدار متوسط (میانگین) این پارامترها استفاده شود، مقدار ظرفیت باربری به دست آمده را در ضریب اطمینان تقسیم کرده و آن عدد حاصله به عنوان ظرفیت باربری مجاز توده سنگ اعلام می‌شود. به عبارتی، عملاً با استفاده از ضریب اطمینان، عدم قطعیت پارامترها در نظر گرفته می‌شود. با این حال، اگر پارامترها دارای عدم قطعیت بالایی باشند، خطا افزایش یافته و ضرورت استفاده از روش‌های احتمالاتی احساس می‌شود.

روش مونت-کارلو یکی از روش‌های احتمالاتی پرکاربرد می‌باشد که در واقع، یک روش عددی برای حل مسائل با استفاده از شبیه‌سازی و تولید اعداد تصادفی می‌باشد. در این روش، اگر اعداد زیادی برای هر یک از پارامترها تولید شود و بر اساس این پارامترها، مسئله تحلیل شود، توزیع احتمالاتی خروجی‌ها حاصل می‌شوند.

در این روش، برای هر یک از پارامترهای تصادفی، یک توزیع احتمالاتی اختصاص داده شده و با در نظرگیری پارامترهای این

مگا پاسکال است، مقدار نشست بسیار کمتر از نشست مجاز (۵ سانتی‌متر) است. از این رو مقدار تنش را افزایش داده و مقدار آن برابر ۱/۴۵ مگا پاسکال انتخاب می‌گردد. می‌توان مشاهده کرد که در اثر اعمال این تنش، نشست مجاز ۵ سانتی‌متری رد شده و در نتیجه، این تنش را نمی‌توان به عنوان ظرفیت باربری بیان نمود. بدین منظور، مقدار تنش کاهش داده می‌شود. در سعی بعدی، مقدار تنش برابر ۱/۴ انتخاب می‌شود. مشاهده می‌شود که در این حالت، مقدار نشست در زمان بسیار طولانی به مقدار ۵ سانتی‌متر میل می‌کند. از این رو، مقدار تنش فوق به عنوان ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان انتخاب می‌شود.

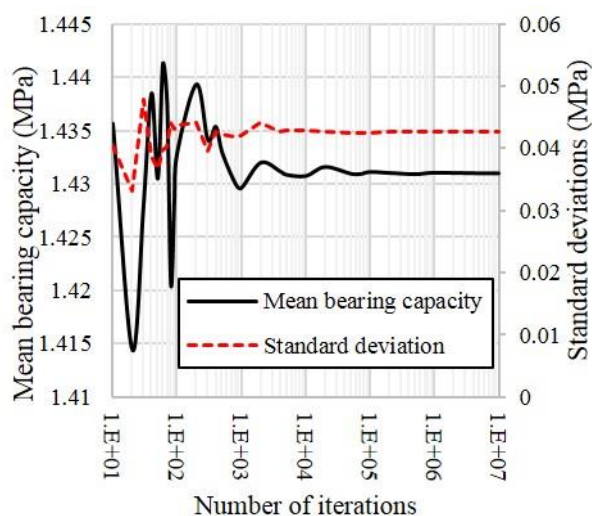


شکل ۴: نمودار نشست - زمان

۴- صحت سنجی مدل عددی

برای اطمینان از صحت مدل‌سازی، ظرفیت باربری توده سنگ بدون در نظرگیری رفتار وابسته به زمان (q_u) حاصل از نرم‌افزار FLAC با نتایج حاصل از تحقیق مایرهوف^۱ [۲۸] مقایسه می‌شود. در شکل (۵) می‌توان مشاهده کرد که مقدار ظرفیت باربری برای مقادیر مختلف چسبندگی (c') و زاویه اصطکاک (ϕ') ارائه شده است. شایان ذکر است که در اینجا، عرض پی برابر ۲ متر در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل می‌توان مشاهده کرد، اختلاف نتایج حاصله از روش عددی و روش تحلیلی بسیار کم می‌باشد.

^۱ Meyerhof



شکل ۶: تغییرات تعداد عدد تصادفی در روش مونت-کارلو بر مقدار میانگین و انحراف معیار نتایج (حالت ۳)

از آنجایی که به دست آوردن خروجی برای هر یک از این ترکیبات اعداد تصادفی بسیار زمان‌بر می‌باشد، می‌توان از روش سطح پاسخ استفاده نمود. با استفاده از این روش می‌توان رابطه بین چند ورودی و مقدار خروجی را مشخص نمود. برای استفاده از این روش می‌توان از نرم‌افزار Design-Expert استفاده کرد. در این نرم‌افزار، بسته به تعداد متغیرهای احتمالاتی و مقادیر حداقل و حداکثر آن‌ها، تعدادی تست ایجاد می‌شود که در هر یک از آن‌ها، مقدار هر یک از پارامترهای ورودی متفاوت است. برای تعیین رابطه بین ورودی‌ها و مقدار خروجی، باید این تست‌ها در نرم‌افزار FLAC تحلیل شده و مقدار خروجی وارد نرم‌افزار Design-Expert شود. در گام بعد، رابطه به دست آمده برای استفاده در روش مونت-کارلو در نرم‌افزار MATLAB تعریف می‌شود. بر این اساس، مقادیر خروجی هر یک از مجموعه نمونه‌های حاصل از روش مونت-کارلو، تعیین شده و توزیع احتمالاتی ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان به دست می‌آید.

جدول (۱) نشانگر میانگین (μ) و انحراف معیار (σ) در حالت‌های مختلف (حالت‌های ۱ الی ۴) است. گفتنی است، مطابق توصیه هوک و مارینوس [۳۱]، تغییرات پارامتر GSI می‌تواند به گونه‌ای باشد که مقدار GSI نسبت به مقدار متوسط آن ۵ واحد بیشتر و یا کمتر باشد. در چنین حالتی، مقدار انحراف معیار (σ)

توزیع، تعداد زیادی نمونه تصادفی تولید می‌شود. اعداد حاصله به عنوان ورودی وارد نرم‌افزار شده و بعد از تحلیل، خروجی مورد نظر تعیین می‌شود.

در این مطالعه، پارامترهای رئولوژیکی توده سنگ (یعنی ویسکوزیته کلین، ویسکوزیته ماکسول و مدول برشی کلین) و همچنین پارامترهای m_i ، σ_{ci} و GSI به عنوان پارامترهای تصادفی انتخاب می‌شوند. لازم به ذکر است که روش‌های RMR و GSI دو سیستم طبقه‌بندی مهندسی توده سنگ هستند که برای ارزیابی کیفیت و مقاومت توده سنگ استفاده می‌شوند. روش RMR بر پایه ۵ پارامتر اصلی است: ۱- مقاومت تک‌محوره سنگ سالم، ۲- شاخص کیفیت درزه‌داری، ۳- فاصله بین درزه‌ها، ۴- شرایط درزه‌ها (شامل زبری، پرشدگی، پیوستگی، میزان بازشدگی و درجه هوازدگی سطح درزه‌ها) و ۵- شرایط آب زیرزمینی. در واقع مقدار GSI را می‌توان بر اساس نمره حاصل از روش RMR تخمین زد [۲۹]. در واقع تغییر در مقدار RMR باعث تغییر مقدار GSI نیز می‌شود.

در گام بعد، برای هر یک از این پارامترهای تصادفی لازم است که توزیع نرمال و مقادیر میانگین و انحراف معیار انتخاب شود. از آنجایی که اکثر متغیرهای تصادفی در مهندسی ژئوتکنیک از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند [۳۰]، این توزیع به متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده در این مطالعه هم اختصاص داده شده است. با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و با توجه به توزیع احتمالاتی اختصاص داده شده و مقادیر میانگین و انحراف معیار، تعداد زیادی عدد تصادفی تولید می‌شود. به عنوان نمونه برای حالت ۳، در شکل (۶) تغییرات تعداد عدد تصادفی در روش مونت-کارلو بر مقدار میانگین و انحراف معیار نتایج نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که بعد از ۱۰۰۰۰۰۰ عدد تصادفی، نوسانات نتایج کاهش یافته و همگرایی قابل قبولی حاصل شده است؛ بنابراین، در این مطالعه از این تعداد نمونه برای انجام تحلیل‌ها استفاده شده است. این اعداد پارامترها باید باهم ترکیب شده و خروجی (ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان) با بهره‌گیری از نرم‌افزار تفاضل محدودی FLAC مشخص می‌گردد. در ادامه، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB توزیع احتمالاتی برای خروجی مسئله تعیین می‌شود.

۶- نتایج

نرم افزار Design-Expert به منظور تجزیه و تحلیل نتایج از ابزاری با نام ANOVA (تحلیل واریانس) استفاده می‌کند. در صورتی که خروجی f باشد، رابطه بین مقادیر ورودی و خروجی می‌تواند به صورت زیر باشد:

$$f^{d_0} = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i x_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n c_i x_i^2 \quad (1)$$

که $a_0, a_i, b_{ij}, c_i, d_0$ ضرایب محاسبه شده توسط نرم افزار می‌باشند. همچنین، x_i و x_j متغیرهای ورودی هستند. همچنین، n تعداد پارامترهای تصادفی است.

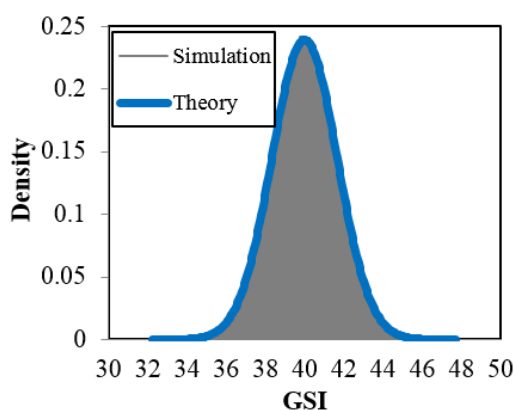
در این نرم افزار، از طرح مرکب مرکزی^۱ استفاده شده است. در این طرح، بر اساس تعداد متغیرهای تصادفی و تعداد تکرار نقاط مرکزی (میانگین هر یک از پارامترهای در نظر گرفته شده در تحلیل)، تعداد تست‌ها تعیین می‌گردد. همچنین با توجه به مقادیر حداکثر، حداقل و میانگین پارامترها، مقدار پارامترهای مختلف در هر یک از این تست‌ها مشخص می‌شود. از این رو، برای هر یک از این حالت‌های مطرح در جدول (۱)، تعداد ۸۴ تست مختلف به دست آمد که خروجی هر یک از آن‌ها با استفاده از نرم افزار FLAC تعیین گردید. در گام بعد، برای بهینه‌سازی مسئله، سه مدل خطی (Linear)، خطی با در نظرگیری برهمکنش‌های دوتایی (۲FI) و درجه دو (Quadratic) مورد بررسی قرار گرفت. در جدول (۲)، مقایسه این مدل‌ها برای حالت ۳ (به عنوان نمونه) برای تعیین ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان آورده شده است. می‌توان مشاهده کرد که مدل درجه دو، دارای R^2 (ضریب تعیین) Coefficient of Determination (بالا تر و مقدار انحراف معیار کمتر است. در نتیجه، این مدل، انتخاب می‌شود.

این پارامتر برابر ۱/۶۷ می‌گردد. در مقابل، در خصوص پارامترهای تصادفی دیگر، از آنجایی که تاکنون در خصوص مقدار انحراف معیار و واریانس پارامترهای رئولوژیکی توده سنگ مطالعه‌ای صورت نپذیرفته است، در این مطالعه فرض شده است که تغییرات مقدار این پارامترها می‌توانند ۱۰ و یا ۲۰ درصد کمتر و یا بیشتر از مقدار میانگین باشند. بر این اساس، فرض می‌شود که ۹۹/۷۳ درصد اعداد تصادفی در حد فاصل ۰/۸ برابر مقدار میانگین و ۱/۲ برابر مقدار میانگین در حالت‌های ۲ و ۴ و ۰/۹ برابر مقدار میانگین و ۱/۱ برابر مقدار میانگین در حالت‌های ۱ و ۳ است (یعنی در محدوده $\mu \pm 3\sigma$ قرار دارند).

جدول ۱: مقادیر پارامترهای احتمالاتی در حالت‌های مختلف [۳۲]

Parameter		GSI	σ_{ci}	m_i	G_K	η_K	η_M
Unit		-	MPa	-	MPa	MPa. s	MPa. s
Case ۱	μ	۴۰	۲۰	۵	۳۰	۵e۸	۱e۱۳
	σ	۱,۶۶	۰,۶۷	۰,۱۶۷	۱	۱,۶e۷	۳,۳e۱۱
Case ۲	μ	۴۰	۲۰	۵	۳۰	۵e۸	۱e۱۳
	σ	۱,۶۶	۱,۳۳	۰,۳۳	۲	۳,۳e۷	۶,۶e۱۱
Case ۳	μ	۳۰	۱۰	۵	۳۰	۵e۸	۱e۱۳
	σ	۱,۶۶	۰,۳۳	۰,۱۶۷	۱	۱,۶e۷	۳,۳e۱۱
Case ۴	μ	۳۰	۱۰	۵	۳۰	۵e۸	۱e۱۳
	σ	۱,۶۶	۰,۶۷	۰,۳۳	۲	۳,۳e۷	۶,۶e۱۱

در شکل (۷)، تابع توزیع احتمال (Probability distribution function) و یا همان PDF برای حالت ۱ و برای پارامتر GSI (به عنوان نمونه) نمایش داده شده است.



شکل ۷: تابع توزیع احتمال برای پارامتر GSI (حالت ۱)

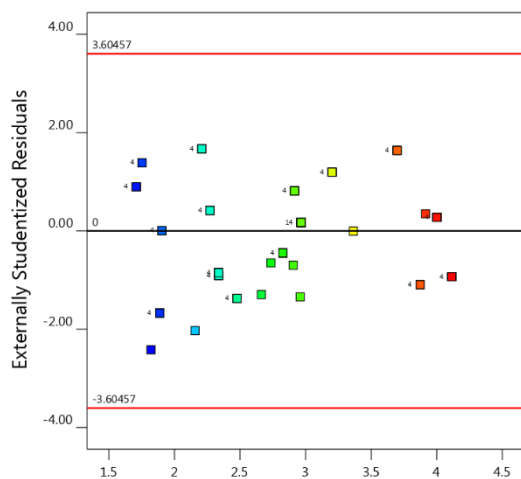
^۱ Central Composite Design

جدول ۲: مقایسه مدل‌ها برای حالت ۳

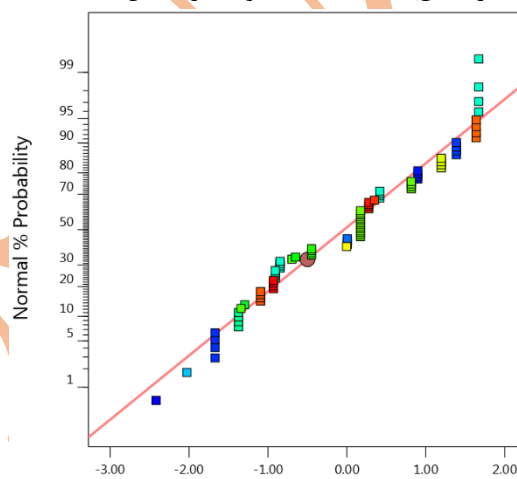
Standard deviation	R^2	model
۰.۲۰۳۰	۰.۹۲۲۳	Linear
۰.۱۲۲۰	۰.۹۷۱۹	۲FI
۰.۰۶۱۳	۰.۹۸۸۶	Quadratic

باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی شده نشان داده شده‌اند. در واقع، مقادیر باقیمانده‌ها نباید از حدود نشان داده شده در این شکل که با رنگ قرمز نشان داده شده‌اند، تجاوز کند. از آنجایی که این مسئله نیز رعایت شده است، در نتیجه، مقدار خطاها در حد قابل قبولی است. در نهایت، مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی در شکل (۸-ج) رسم شده است. می‌توان دید که اختلاف بسیار کمی بین این نتایج وجود داشته و نقاط حاصله تقریباً در امتداد این خط ۴۵ درجه قرار دارند.

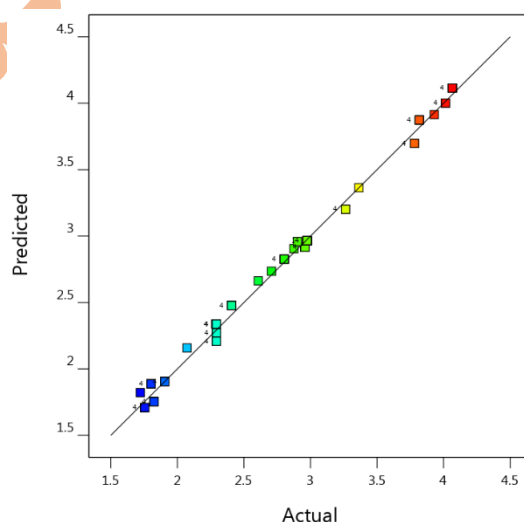
نمودار احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها در شکل (۸-الف) نشان داده شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، نقاط باقی‌مانده‌ها تقریباً در امتداد خط با شرایط توزیع نرمال بوده و تقریباً به صورت خطی تغییر می‌کنند. پس می‌توان گفت که احتمال خطای تصادفی کم بوده و اعتبار مدل بالا است. بعلاوه، در شکل (۸-ب)، مقدار



(ب)



(الف)



(ج)

شکل ۸: الف) احتمال نرمال در برابر مقادیر پیش بینی شده، ب) مقدار باقی مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش بینی شده، ج) مقادیر پیش بینی شده و واقعی

در شکل‌های (۹) و (۱۰) به ترتیب می‌توان تغییرات مقدار ظرفیت باربری با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان در حالت‌های ۱ و ۲ را با تغییرات GSI ، σ_{ci} ، m_i و G_K مشاهده کرد (عرض پی در کلیه حالات برابر ۲ متر است). البته لازم به ذکر است که مطابق بررسی‌های صورت گرفته و روابط فوق، ویسکوزیته‌های ماکسول و کلون هیچ تأثیری بر ظرفیت باربری نداشتند و در نتیجه، در نمودارها این موارد نشان داده نشده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش ۱۰ و یا ۲۰ درصدی مقدار پارامترهای σ_{ci} و m_i تأثیر چندانی بر مقدار ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان ندارد. دلیل این امر آن است که مقدار تنش وارده بر توده سنگ در حالتی که رفتار توده سنگ به صورت رئولوژیک است، بسیار کمتر بوده و تحت این تنش، در بسیاری از این ۸۴ تست، توده سنگ پلاستیک نمی‌شود. به طور مثال، برای حالتی که GSI برابر ۴۰، σ_{ci} برابر ۲۲ مگا پاسکال، m_i برابر ۵ و مدول برشی کلون برابر ۳۰ مگا پاسکال باشد، ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان برابر ۱/۴۷ مگا پاسکال به دست می‌آید. این در حالی است که ظرفیت باربری این توده سنگ بدون در نظرگیری رفتار وابسته به زمان ۱۲/۷ مگا پاسکال است. این بدان معنی است که ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان حدوداً ۰/۱۲ برابر ظرفیت باربری بدون در نظرگیری رفتار وابسته به زمان است. در مقابل، همان‌طور که در شکل‌های (۹) و (۱۰) می‌توان ملاحظه کرد، با افزایش GSI و G_K ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان (q_u) افزایش می‌یابد. اگر σ_{ci} برابر ۲۰ مگا پاسکال، m_i برابر ۵ باشد، در حالت ۱، با افزایش ۲۰ درصدی مقدار GSI مقدار q_u افزایش ناچیز ۱/۸ درصدی خواهد داشت (G_K برابر ۳۳ مگا پاسکال است). ولی با افزایش ۲۰ درصدی مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ، شاهد افزایش حدود ۲۰ درصدی مقدار ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان می‌باشیم (GSI برابر ۳۵).

تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین شکل‌های (۱۱) و (۱۲) و شکل‌های (۹) و (۱۰) وجود دارد و آن هم تأثیر بیشتر پارامترهای m_i و σ_{ci} در حالت‌های ۳ و ۴ است. شایان ذکر است که در

در نهایت، رابطه‌ای همانند رابطه زیر به دست می‌آید. لازم به توضیح است که GSI شاخص مقاومت زمین‌شناسی توده سنگ، m_i ثابت معیار هوک-براون، σ_{ci} مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ و G_K مدول برشی کلون و R^2 بیانگر ضریب تعیین است.

$$(q_u)^3 = 10.418389483142 + 0.13602804923701 \times GSI + 1.5023862191212 \times \sigma_{ci} + 1.009720719 \times m_i - 0.262421288 \times G_K - 0.013118966 \times GSI \times \sigma_{ci} - 0.004577045 \times GSI \times m_i + 0.050594775 \times m_i \times G_K + 0.0098579783670643 \times GSI \times G_K - 0.031418723 \times \sigma_{ci} \times m_i + 0.020158656 \times \sigma_{ci} \times G_K + 0.003344008 \times GSI^2 - 0.073949974 \times \sigma_{ci}^2 - 0.193328611 \times m_i^2 - 0.004416535 \times G_K^2; R^2 = 0.9950$$

برای سایر حالات نیز مشابه روند فوق، روابطی برای تعیین ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها به دست آورده می‌شود.

حالت ۱:

$$(q_u)^{0.85} = -0.12170074055633 - 0.002633 \times GSI + 0.035099 \times \sigma_{ci} + 0.140397 \times m_i + 0.018569 \times G_K + 0.000446 \times GSI \times G_K - 0.000109 \times GSI^2 - 0.000877 \times \sigma_{ci}^2 - 0.01404 \times m_i^2; R^2 = 0.9981$$

حالت ۲:

$$(q_u)^{1.05} = -0.131839 + 0.002976 \times GSI + 0.000369 \times \sigma_{ci} + 0.001475 \times m_i + 0.050022 \times G_K; R^2 = 0.9992$$

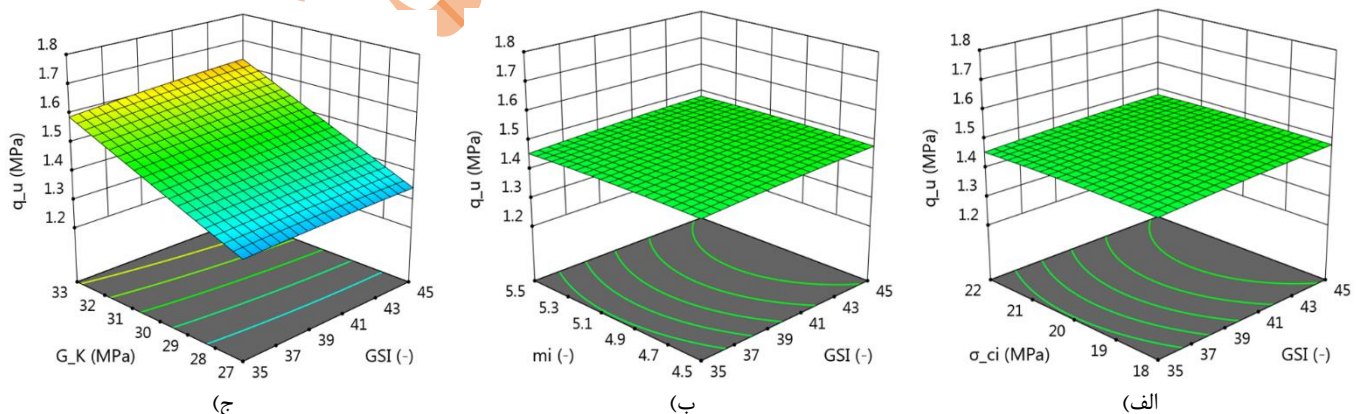
حالت ۴:

$$(q_u)^{0.82} = -1.053193399 + 0.03432132 \times GSI + 0.134251911 \times \sigma_{ci} + 0.141065387 \times m_i + 0.010601599 \times G_K - 0.001314223 \times GSI \times \sigma_{ci} - 0.001770839 \times GSI \times m_i + 0.000830692 \times GSI \times G_K - 0.005555988 \times \sigma_{ci} \times m_i + 0.001719136 \times \sigma_{ci} \times G_K + 0.002365364 \times m_i \times G_K - 0.000435838 \times GSI^2 - 0.005092203 \times \sigma_{ci}^2 - 0.008704278 \times m_i^2 - 0.000621193 \times G_K^2; R^2 = 0.9954$$

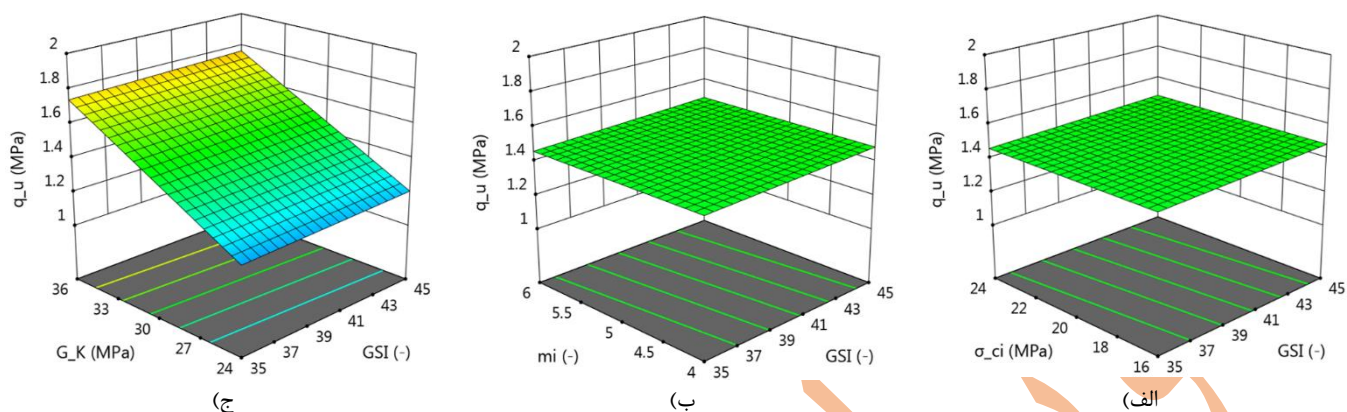
حالت‌های ۳ و ۴ مقدار متوسط GSI برابر ۳۰ و در حالت‌های ۱ و ۲ این مقدار برابر ۴۰ در نظر گرفته شده است. در ابتدا، حالت ۳ و حالتی که پارامترهای G_K و m_i ثابت فرض شده‌اند (شکل ۱۱-الف)) در نظر گرفته می‌شود. می‌توان مشاهده کرد که در حالتی که مقدار GSI برابر ۲۵ است، افزایش مقدار σ_{ci} از ۹ به ۱۱ مگا پاسکال، منجر به افزایش ۴٪ ظرفیت باربری می‌شود. این در شرایطی است که این مقدار افزایش پارامتر σ_{ci} ، در حالتی که GSI برابر ۳۵ است، هیچ تغییری در مقدار ظرفیت باربری ایجاد نمی‌کند. دلیل چنین امری پلاستیک شدن توده سنگ است. به طور مثال، اگر GSI برابر ۲۵ در نظر گرفته شود و تنش کمتر از ظرفیت باربری توده سنگ بدون در نظرگیری رفتار وابسته به زمان اعمال شود، در شرایطی که مقدار σ_{ci} برابر ۹ مگا پاسکال باشد، تعداد نقاط و زون‌های پلاستیک توده سنگ بیشتر از حالتی است که مقدار σ_{ci} برابر ۱۱ مگا پاسکال می‌باشد. این بیشتر شدن تعداد زون‌های پلاستیک منجر افزایش کرنش و نشست آنی می‌شود. این بدان معنی است که در طول زمان، مقدار نشست توده سنگی که σ_{ci} آن برابر ۹ مگا پاسکال است، بیشتر می‌باشد. اگر تحت اعمال این تنش، مقدار نشست توده سنگی که مقدار σ_{ci} آن برابر ۱۱ مگا پاسکال است، در طولانی مدت به مقدار ۵ سانتی‌متر (مقدار مجاز) برسد، قطعاً در توده سنگی که مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ آن کمتر است، مقدار نشست از مقدار نشست مجاز رد شده و

بایستی تنش کمتری را به توده سنگ اعمال کرد. به همین دلیل است که با افزایش مقدار σ_{ci} ، ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان افزایش می‌یابد. در مقابل، در حالت‌های ۳ و ۴، افزایش مقدار m_i منجر به افزایش ظرفیت باربری می‌شود (رجوع به شکل‌های ۱۱-ب) و ۱۲-ب)). در حالت‌های ۳ و ۴ نیز با افزایش GSI و G_K ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان (q_u) افزایش می‌یابد. به طور مثال، در حالت ۳، اگر σ_{ci} برابر ۱۰ مگا پاسکال و m_i برابر ۵ باشد، با افزایش ۲۲ درصدی مقدار GSI، مقدار q_u افزایش ۷ درصدی خواهد داشت (G_K برابر ۳۳ مگا پاسکال است). با این حال، با افزایش ۲۰ درصدی σ_{ci} می‌توان افزایش حدود ۱۶ درصدی مقدار ظرفیت باربری با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان را ملاحظه کرد (GSI برابر ۲۵ است).

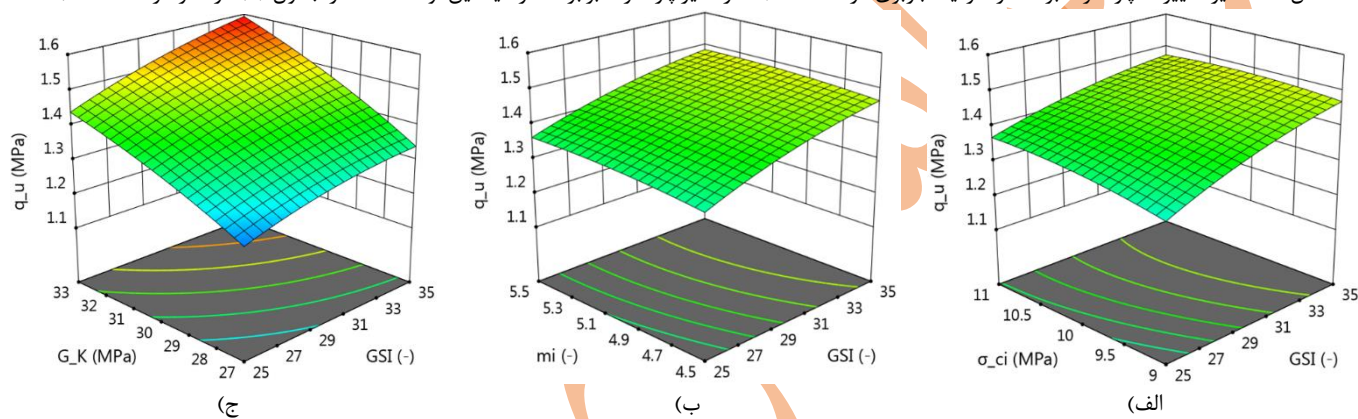
همان‌طور که قبلاً گفته شد، روابطی که پیش‌تر به دست آمد برای استفاده در روش مونت-کارلو در نرم‌افزار MATLAB تعریف شده و توزیع احتمالاتی ظرفیت باربری توده سنگ به دست آورده می‌شود.



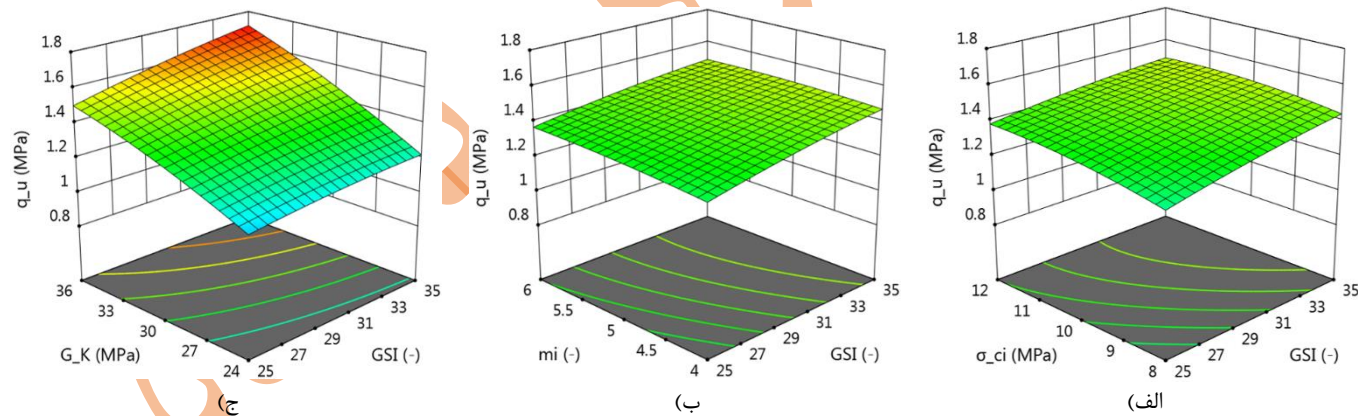
شکل ۹: تأثیر تغییرات پارامترها بر مقدار ظرفیت باربری در حالت ۱ (مقدار سایر پارامترها برابر مقدار میانگین نوشته شده در جدول (۱) در نظر گرفته شده‌اند)



شکل ۱۰: تأثیر تغییرات پارامترها بر مقدار ظرفیت باربری در حالت ۲ (مقدار سایر پارامترها برابر مقدار میانگین نوشته شده در جدول (۱) در نظر گرفته شده‌اند)



شکل ۱۱: تأثیر تغییرات پارامترها بر مقدار ظرفیت باربری در حالت ۳ (مقدار سایر پارامترها برابر مقدار میانگین نوشته شده در جدول (۱) در نظر گرفته شده‌اند)



شکل ۱۲: تأثیر تغییرات پارامترها بر مقدار ظرفیت باربری در حالت ۴ (مقدار سایر پارامترها برابر مقدار میانگین نوشته شده در جدول (۱) در نظر گرفته شده‌اند)

ضریب همبستگی استاندارد^۱ بین پارامترها و پاسخ نهایی محاسبه می‌شود. این ضرایب برای پارامترهای مختلف در شکل (۱۳) نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، پارامترهای GSI و

برای تعیین مؤثرترین پارامترها در ظرفیت باربری بلندمدت توده سنگ، از تحلیل حساسیت به صورت احتمالاتی (غیر قطعی) استفاده می‌شود. با انجام تحلیل مونت-کارلو، خروجی‌های مدل‌سازی برای هر یک از حالات مختلف تعیین می‌گردد و سپس،

^۱ Standardized Regression Coefficients (SRC)

G_K بیشترین تأثیر را بر مقدار خروجی مسئله (ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان) دارند. در مقابل، پارامترهای η_K و η_M تأثیر معناداری بر خروجی مدل نداشته‌اند و پارامترهای σ_{ci} و m_i تأثیر به مراتب کمتری نسبت به پارامترهای G_K دارند.

به عنوان نمونه، در شکل (۱۴-الف) می‌توان توزیع احتمالاتی ظرفیت باربری توده سنگ را برای حالت ۱ مشاهده کرد (در جداول (۳) و (۴) خلاصه‌ای از خصوصیات این توزیع‌ها آورده شده است).

جدول ۳: خصوصیات بهترین تابع توزیع احتمال برای خروجی (با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان)

Case	Case ۱	Case ۲	Case ۳	Case ۴
Best-fit probability distribution	Normal	Normal	Normal	Normal
Mean (MPa)	۱,۴۷	۱,۴۷	۱,۴۳	۱,۴۲
Standard deviation (MPa)	۰,۰۴۵	۰,۰۹۳	۰,۰۴۲	۰,۰۷۷
Variance (MPa ²)	۰,۰۰۲	۰,۰۰۸	۰,۰۰۱۸	۰,۰۰۵۹
Mode (MPa)	۱,۴۷	۱,۴۷	۱,۴۳	۱,۴۲
Skewness	۰	۰	۰	۰

جدول ۴: خصوصیات بهترین تابع توزیع احتمال برای خروجی (بدون در نظرگیری رفتار وابسته به زمان)

Case	Case ۱	Case ۲	Case ۳	Case ۴
Best-fit probability distribution	Gamma	Gamma	Gamma	Gamma
Mean (MPa)	۱۱,۴۵	۱۱,۶	۳,۹۹	۳,۹۹
Standard deviation (MPa)	۰,۹	۱,۱	۰,۳۱	۰,۴۳
Variance (MPa ²)	۰,۸۲۶	۱,۲۱	۰,۰۹۸	۰,۱۸
Mode (MPa)	۱۱,۳۸	۱۱,۵	۳,۹۷	۳,۹۴
Skewness	۰,۱۵۸	۰,۱۸۹	۰,۱۵۷	۰,۲۱۵

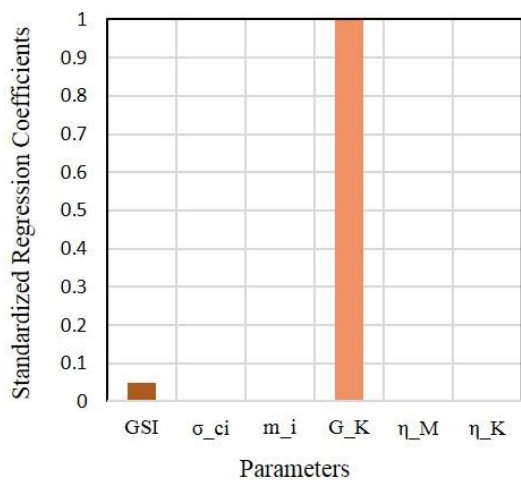
همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بهترین توزیع برای ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان در تمامی این حالات، توزیع نرمال است. دلیل این اتفاق را می‌توان به تأثیر بسیار

زیاد پارامتر مدول برشی کلون بر ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان دانست.

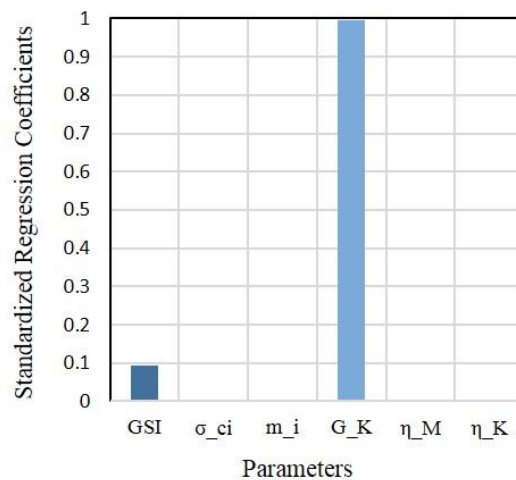
برای آن که مقایسه‌ای صورت بگیرد، توزیع احتمالاتی ظرفیت باربری توده سنگ بدون در نظرگیری رفتار وابسته به زمان نیز در شکل (۱۴-ب) ترسیم شده است. در واقع، بر خلاف توزیع احتمالاتی ظرفیت باربری با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان، ظرفیت باربری توده سنگ بدون در نظرگیری رفتار وابسته به زمان از توزیع گاما تبعیت می‌کند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با مقایسه حالت‌های ۱ و ۲ می‌توان ملاحظه کرد که هرچه عدم قطعیت پارامترهای توده سنگ بیشتر باشد، مقدار مد ظرفیت باربری توده سنگ بدون در نظرگیری رفتار وابسته به زمان (مقداری که دارای بیشترین احتمال وقوع است) بیشتر می‌شود. دلیل امر را می‌توان به اثر GSI اختصاص داد؛ زیرا با افزایش این پارامتر، مقاومت توده سنگ به شدت افزایش می‌یابد. همچنین چولگی حالت‌های ۲ و ۴ نیز نسبت به حالت‌های ۱ و ۳ افزایش یافته است. این چولگی مثبت بوده و به معنای این است که دنباله منحنی توزیع در سمت راست طولانی‌تر بوده و اکثر خروجی‌ها در سمت چپ منحنی واقع شده‌اند. این بدان معنی است که احتمال این که ظرفیت باربری کمتر از مقدار میانگین باشد، بیشتر است. لازم به ذکر است که تفاوت چندانی در مقدار مد ظرفیت باربری با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان در حالت‌های ۱ و ۲ و حالت‌های ۳ و ۴ وجود ندارد که دلیل آن تأثیر به شدت زیاد مقدار مدول برشی کلون است. بعلاوه، در صورتی که عدم قطعیت در مقدار پارامترها بیشتر شود، انحراف معیار نتایج هم بیشتر می‌گردد.

در صورتی که مقدار حاصل از مقادیر متوسط پارامترها (تحلیل قطعی) (رجوع به جدول (۱)) با مقادیر مد مقایسه شود، می‌توان ملاحظه کرد که در حالت‌های ۱ و ۲ که مقدار ظرفیت باربری با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان در تحلیل قطعی برابر ۱/۴۷ مگا پاسکال است، مقدار مد در حالت ۱ دقیقاً برابر مقدار حاصل از تحلیل قطعی و در حالت ۲، دارای اختلاف بسیار اندک است.

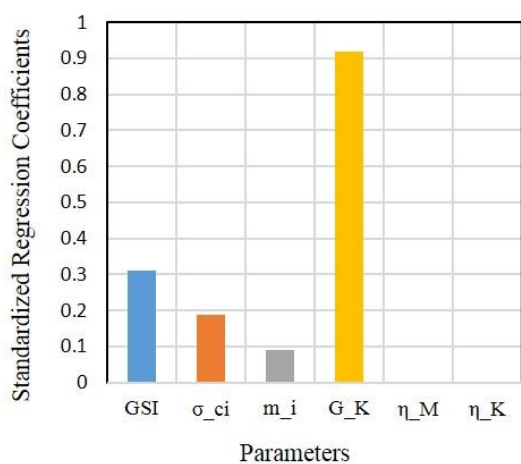
در مقابل، در حالت‌های ۳ و ۴، این مقدار ظرفیت باربری در تحلیل قطعی مساوی ۱/۴۴ مگا پاسکال و مقدار مد در حالت‌های ۳ و ۴ به ترتیب برابر ۱/۴۳ و ۱/۴۲ مگا پاسکال است و به معنای آن است که حدود ۲٪ اختلاف نتایج وجود دارد.



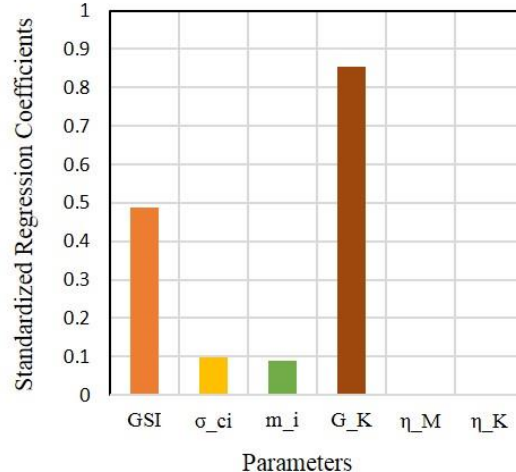
(ب)



(الف)

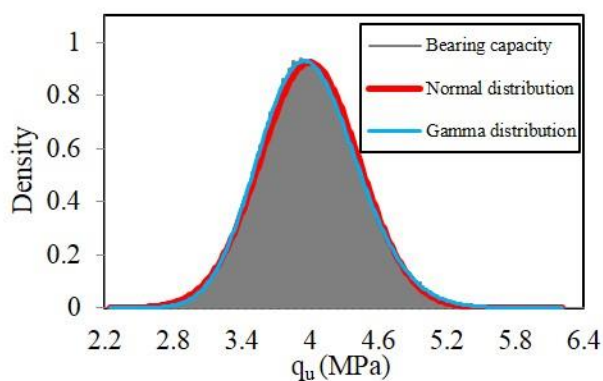


(د)

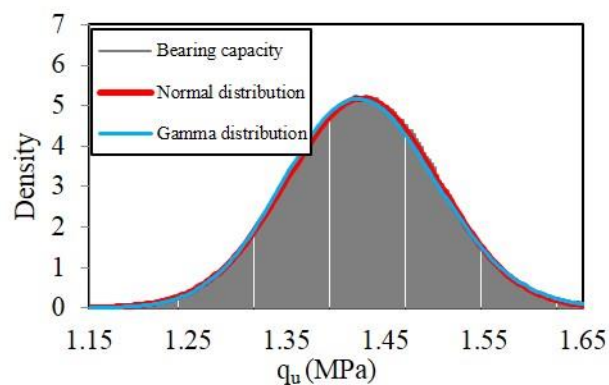


(ج)

شکل ۱۳: ضریب همبستگی استاندارد برای پارامترهای مختلف الف) حالت ۱، ب) حالت ۲، ج) حالت ۳، د) حالت ۴



(ب)



(الف)

شکل ۱۴: تابع توزیع چگالی برای حالت ۴ الف) ظرفیت باربری با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان، ب) ظرفیت باربری بدون در نظرگیری رفتار وابسته به زمان

با این حال باید توجه داشت که به طور مثال، تغییر ۱۰ درصدی در مقدار مدول برشی کلوین می‌تواند مقدار ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان را تحت تأثیر قرار دهد. به طور مثال، کاهش ۱۰ درصدی این پارامتر می‌تواند ۱۰ درصد مقدار ظرفیت باربری توده سنگ را کاهش دهد. از این رو می‌توان به لزوم تحلیل احتمالاتی مسئله پی برد.

۷ - نتیجه‌گیری

در این مطالعه به بررسی وجود عدم قطعیت در تعیین ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر توده سنگ پرداخته شد. برای این منظور فرض گردید که سنگ واقع در زیر پی، شیل بوده و رفتار توده سنگ به صورت ویسکو الاستوپلاستیک بوده و به همین دلیل، مدل رئولوژیک CVISC به توده سنگ اختصاص داده شد. بعد از صحت سنجی مسئله، با استفاده از روش سطح پاسخ، رابطه‌ای بین ورودی‌ها (GSI، ثابت معیار هوک-براون، مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ، مدول برشی کلوین، ویسکوزیته ماکسول و ویسکوزیته کلوین) و خروجی (ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان) یافت شد. در گام بعد، با بهره‌گیری از روش مونت-کارلو، تعداد زیادی عدد تصادفی برای هر یک از این پارامترها تولید کرده و با توجه به رابطه بین متغیرهای تصادفی ورودی و خروجی، توزیع احتمالاتی برای خروجی مسئله تعیین گردید. مهم‌ترین نتایج حاصل از این تحقیق به شرح زیر است:

۱- در صورتی که مقدار میانگین GSI توده سنگ بزرگ باشد، ابتدا پارامتر مدول برشی کلوین و سپس GSI بیشترین تأثیر را در ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان دارند. این در حالی است که در توده سنگ با مشخصات مکانیکی ضعیف‌تر، علاوه بر مدول برشی کلوین و GSI، مقاومت فشاری تک محوری توده سنگ و ثابت معیار هوک-براون هم بر این ظرفیت باربری تأثیر می‌گذارند.

۲- با اختصاص توزیع نرمال به پارامترهای احتمالاتی، تابع توزیع احتمال ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان نیز از این توزیع پیروی می‌نماید.

این در حالی است که ظرفیت باربری توده سنگ بدون در نظرگیری رفتار وابسته به زمان از توزیع گاما پیروی می‌کند.

۳- در صورتی که عدم قطعیت پارامترهای توده سنگ بیشتر شود، انحراف معیار نتایج هم بیشتر می‌گردد. همچنین مقدار چولگی مثبت نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه، احتمال این که ظرفیت باربری توده سنگ کمتر از مقدار میانگین باشد، بیشتر است.

۴- ظرفیت باربری توده سنگ با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان حدوداً ۰/۱ برابر ظرفیت باربری بدون در نظرگیری رفتار وابسته به زمان است. همچنین، با در نظرگیری رویکرد احتمالاتی، کاهش ۱۰ درصدی مدول برشی کلوین می‌تواند مقدار ظرفیت باربری توده سنگ را ۱۰ درصد کاهش دهد.

۵- در صورتی که مقدار میانگین GSI توده سنگ برابر ۴۰ باشد، مقدار ظرفیت باربری با در نظرگیری رفتار وابسته به زمان در تحلیل قطعی برابر ۱/۴۷ مگا پاسکال به دست می‌آید. در این حالت، با انجام تحلیل‌های احتمالاتی می‌توان مشاهده کرد که مقدار مد دارای اختلاف بسیار اندکی با مقدار مذکور می‌باشد. در مقابل، برای حالتی که مقدار میانگین پارامتر GSI برابر ۳۰ است، مقدار ظرفیت باربری در تحلیل قطعی برابر ۱/۴۴ مگا پاسکال و مقدار مد تقریباً برابر ۱/۴۲ حاصل می‌شود. این به معنای آن است که حدود ۲٪ اختلاف بین نتایج روش‌های قطعی و تحلیلی وجود دارد و در نتیجه، با در نظر گرفتن عدم قطعیت، ظرفیت باربری توده سنگ کاهش پیدا می‌کند.

۶- در پروژه‌های مختلف، با توجه به تأثیرات زیاد پارامترها بر ظرفیت باربری توده سنگ، لزوم بررسی ظرفیت باربری بر اساس روش‌های احتمالاتی وجود دارد.

۱۱. Sharafati, A., Kolachian, R., Nayyeri, M., & Nemati, M. (۲۰۱۸). Extraction of probability distribution of stability safety factor using lhs and glue methods (case study: parsian dam. *Sharif Journal of Civil Engineering*, 34(۱,۲), ۲۰-۴۲. [in Persian] <https://doi.org/10.1001.1.26764768.1397.34.1.2.0.1>
۱۲. Fenton, G. A., & Griffiths, D. V. (۲۰۰۲). Probabilistic Foundation Settlement on Spatially Random Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ۱۲۸(۵), ۳۸۱-۳۹۰. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:5\(381\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:5(381))
۱۳. Fenton, G. A., & Griffiths, D. V. (۲۰۰۳). Bearing-capacity prediction of spatially random $c - \phi$ soils. *Canadian Geotechnical Journal*, 40(۱), ۵۴-۶۵. <https://doi.org/10.1139/t.2003-081>
۱۴. Ranjbar Pouya, K., Zhalehjo, N., & Jamshidi Chenari, R. (۲۰۱۴). Influence of Random Heterogeneity of Cross-Correlated Strength Parameters on Bearing Capacity of Shallow Foundations. *Indian Geotechnical Journal*, 44(۴), ۴۲۷-۴۳۵. <https://doi.org/10.1007/s40098-013-0096-9>
۱۵. Chen, H., Wang, L., Tian, Y., & Qi, C. (۲۰۲۳). Probabilistic bearing capacities of strip foundation on two-layered clay. *Ocean Engineering*, ۲۶۹, ۱۱۳۵۷۲. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113572>
۱۶. Ranjbarnia, M., Zarei, F., & Goudarzy, M. (۲۰۲۳). Probabilistic Analysis of Bearing Capacity of Square and Strip Foundations on Rock Mass by the Response Surface Methodology. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 56(۱), ۳۴۳-۳۶۲. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-03900-0>
۱۷. Chu, Z., Wu, Z., Liu, Q., & Liu, B. (۲۰۲۰). Analytical Solutions for Deep-Buried Lined Tunnels Considering Longitudinal Discontinuous Excavation in Rheological Rock Mass. *Journal of Engineering Mechanics*, 146(۶), ۰۴۰۲۰۰۴۷. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EM.1943-7889.0001784](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001784)
۱۸. Zaheri, M., & Ranjbarnia, M. (۲۰۲۳). Long-Term Analysis of Tunnels in Rheological Rock Masses Considering the Excavation-Damaged Zone. *International Journal of Geomechanics*, 23(۱), ۰۴۰۲۲۲۶۶. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-0622.0002642](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-0622.0002642)
۱۹. Zaheri, M., & Ranjbarnia, M. (۲۰۲۳). Theoretical and numerical analyses of squeezing rock mass around a spherical opening considering the existence of a damaged zone. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*.
۲۰. Li, X.-Y., Zhang, L.-M., Gao, L., & Zhu, H. (۲۰۱۷). Simplified slope reliability analysis considering spatial soil variability. *Engineering Geology*, 216, ۹۰-۹۷. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.11.013>
۲۱. Johari, A., Hosseini, S. M., & Keshavarz, A. (۲۰۱۷). Reliability analysis of seismic bearing capacity of strip footing by stochastic slip lines method. *Computers and Geotechnics*, 91, ۲۰۳-۲۱۷. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.07.019>
۲۲. Johari, A., & Sabzi, A. (۲۰۱۷). Reliability analysis of foundation settlement by stochastic response surface and random finite element method. *Scientia Iranica*, 24(۶), ۲۷۴۱-۲۷۵۱. <https://doi.org/10.24200/SCI.2017.4169>
۲۳. Shahsavari, J., Johari, A., & Binesh, S. (۲۰۲۱, December). Stochastic analysis of rock slope stability considering cracked rock masses. In *Proceedings of the International Conference on Civil Engineering: Modern and Practical Findings, Shiraz, Iran* (Vol. ۱۵).
۲۴. Zhu, J. Q., & Yang, X. L. (۲۰۱۸). Probabilistic stability analysis of rock slopes with cracks. *Geomechanics and Engineering*, 16(۶), ۶۵۵-۶۶۷. <https://doi.org/10.12989/gae.2018.16.6.655>
۲۵. Cundall, P. A., Damjanac, B., & Varun, _ (۲۰۱۶, June). Considerations on slope stability in a jointed rock mass. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium* (pp. ARMA-۲۰۱۶). ARMA.
۲۶. Hoek, E., & Marinos, P. (۲۰۰۰). Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. *Tunnels and tunnelling international*, ۳۲(۱۱), ۴۵-۵۱.
۲۷. Tajdid Khaje, M., Ranjbarnia, M., & Nourani, V. (۲۰۱۹). Study of Geotechnical Parameters Uncertainties in Analysis of New Tunnel Construction Over the Existing Tunnel. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, ۵۱(۴), ۸۱۷-۸۳۰. [in Persian] <https://doi.org/10.22060/CEEJ.2018.13969.0022>
۲۸. Zaheri, M., Ranjbarnia, M., & Oreste, P. (۲۰۲۴). Reliability analysis of deep pressurized tunnels excavated in the rock mass with rheological behavior. *Transportation Geotechnics*, 45, ۱۰۱۲۱۲. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101212>
۲۹. Jafarian, Y., & Miraei, M. (۲۰۱۶). Probabilistic seismic vulnerability of caisson quay walls: case study of kobe port. *Sharif Journal of Civil Engineering*, ۳۱(۴,۲), ۳-۱۲. [in Persian] <https://doi.org/10.1001.1.26764768.1394.312.42.2.1>

- mechanics and mining sciences, ۳۴(۸), ۱۱۶۵-۱۱۸۶. [https://doi.org/10.1016/S1365-1609\(97\)8069-X](https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)8069-X)
۳۰. Hoek, E., Kaiser, P. K., & Bawden, W. F. (۲۰۰۰). Support of underground excavations in hard rock. CRC Press.
۳۱. Hoek E, Marinos P. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. *Tunnels and tunnelling international* ۲۰۰۰;۳۲(۱۱):۴۵-۵۱.
۳۲. Paraskevopoulou, C., Perras, M., Diederichs, M., Loew, S., Lam, T., & Jensen, M. (۲۰۱۸). Time-dependent behaviour of brittle rocks based on static load laboratory tests. *Geotechnical and Geological Engineering*, 36, ۳۳۷-۳۷۶. <https://doi.org/10.1007/s10706-017-0331-8>
- [in Persian] <https://doi.org/10.2206/CEEJ.2022.20029,7502>
۲۰. Zaheri, M., Ranjbarnia, M., & Goudarzy, M. (۲۰۲۲). Analytical and Numerical Simulations to Predict the Long-Term Behavior of Lined Tunnels Considering Excavation-Induced Damaged Zone. *Rock Mechanics and Rock Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s00635-022-02962-0>.
۲۱. Zaheri, M., Ranjbarnia, M., & Zareifard, M. R. (۲۰۲۳). A theoretical solution to investigate long-term behavior of pressurized tunnels in severe squeezing conditions. *Computers and Geotechnics*, 159, ۱۰۵۹۹. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105999>
۲۲. Zaheri, M., Ranjbarnia, M., & Oreste, P. (۲۰۲۵). Long-Term Interaction of Submerged Tunnels with Rheological Rock Masses & Time-Dependent Permeability. *Geotechnical and Geological Engineering*, 43(۴), ۱-۲۳. <https://doi.org/10.1007/s10706-020-03103-4>
۲۳. Hoek, E. (۱۹۹۰, June). Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* (Vol. ۲۷, No. ۳, pp. ۲۲۷-۲۲۹). Amsterdam, The Netherlands: Elsevier BV.
۲۴. Hoek, E., and Brown, E. T. (۲۰۱۹). The Hoek-Brown failure criterion and GSI – ۲۰۱۸ edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, ۱۱(۳), ۴۴۵-۴۶۳. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2018.08.001>.
۲۵. Zaheri, M., Rahimpour, N. (۲۰۲۲). A guide to FLAC3D software based on practical examples, ۲۰۲۲, Jihad Amirkabir University Publishing, Tehran, Iran. [in Persian]
۲۶. Wyllie, D. C. (۲۰۰۳). Foundations on rock: engineering practice. CRC Press.
۲۷. Zaheri, M., & Ranjbarnia, M. (۲۰۲۴). An analytical-numerical method for the hydraulic-mechanical coupling analysis of time-dependent behavior of pressurized tunnels: impact of an excavation damaged zone. *Computers and Geotechnics*, 170, ۱۰۶۲۹۹. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106299>
۲۸. Meyerhof, G. G. (۱۹۵۷, August). The ultimate bearing capacity of foundations on slopes. In *Proc., ۴th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (Vol. ۱, pp. ۳۸۴-۳۸۶).
۲۹. Hoek, E., & Brown, E. T. (۱۹۹۷). Practical estimates of rock mass strength. *International journal of rock*