Sharif University of Technology

Sharif Civil Engineering Journal

https://sjce.journals.sharif.edu



Research Note

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

Faraz Motamedi Mamaghani, Masoud Ranjbarnia* and Milad Zaheri

Faculty of Civil Engineering, University of Tabriz, Tabriz, Iran.
* corresponding author:(M.ranjbarnia@tabrizu.ac.ir)

Article Info

Article history:

Received: 8 April 2025

Revised: 18 May 2025

Accepted: 29 June 2025

Keywords:

Bearing capacity of rheological rock mass,
rock mass,
probabilistic analysis,
response surface methodology,
numerical method.

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 rhological 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.

Funding: This research did not receive any specific grant from funding agencies in the public, commercial, or not-for-profit sectors.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions: All authors contributed to the reported work for conceptualization, methodology, validation, writing-review and editing, and supervision.

To Cite this article:
Motamedi Mamaghani, F., Ranjbarnia, M. and Zaheri, M. 2026. Bearing capacity of strip foundations on shale rock masses with rheological behaviour: probabilistic based approach, Sharif Civil Engineering Journal, **41**(4), 109-122 .
https://doi.org/10.24200/j30.2025.66634.3422

E-ISSN: 2676-4776 © 2026 The Author(s). Sharif Civil Engineering Journal, Published by Sharif University of Technology

This is an open access article under the CC-BY 4.0 license.

مجله علمی مهندسی عمران شریف

https://sjce.journals.sharif.edu

یادداشت فنی

ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر توده‌سنگ‌های شیل با رفتار رئولوژیک: با درنظرگرفتن رویکرد احتمالاتی

فراز معتمدی ممقانی، مسعود رنجبرنیا * و میلاد ظاهری

دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران.

*نویسنده مسئول (M.ranjbarnia@tabrizu.ac.ir)

اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت : ۱۴۰۴/۰۱/۱۹

تاریخ اصلاحیه : ۱۴۰۴/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش : ۱۴۰۴/۰۴/۰۸

واژگان کلیدی:

ظرفیت باربری توده‌سنگ با رفتار وابسته به زمان، توده‌سنگ، تحلیل احتمالاتی، روش سطح پاسخ، روش عددی.

چکیده

وجود عدم‌قطعیت بالا در مقدار خصوصیات مختلف توده‌سنگ می‌تواند پیش‌بینی ظرفیت باربری توده‌سنگ‌ها را با چالش‌هایی همراه سازد. در شرایطی که توده‌سنگ، خواص وابسته به زمان نیز داشته باشد، این مشکل دوچندان خواهد شد. از این رو، در مطالعه‌ی حاضر، با فرض اینکه سنگ واقع در زیر پی، از نوع شیل است، به بررسی ظرفیت باربری پی‌های نواری با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان توده‌سنگ پرداخته شده است. برای این کار، از نرم‌افزار FLAC استفاده شده و مدل ویسکو-الاستوپلاستیک CVISC به توده‌سنگ اختصاص یافته است. همچنین، پارامترهای مقاومتی و رئولوژیکی توده‌سنگ به‌عنوان پارامترهای تصادفی انتخاب شده‌اند. سپس، با استفاده از روش سطح پاسخ، رابطه‌ی پارامترهای ورودی و ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان، تعیین و به هر یک از پارامترهای مذکور، توزیع نرمال و مقادیر میانگین و انحراف معیار اختصاص یافته است. در گام بعد، با استفاده از روش مونت-کارلو و رابطه‌ی محاسبه‌شده، توزیع احتمالاتی برای ظرفیت باربری تعیین شده است. نتایج پژوهش حاضر نشان داده است که پارامتر مدول برشی کلوین و GSI، بیشترین تأثیر را در مقدار ظرفیت باربری داشته و توزیع‌های حاصل از توزیع نرمال تبعیت کرده‌اند. همچنین، با درنظرگرفتن رویکرد احتمالاتی، کاهش ۱۰ درصدی مدول برشی کلوین می‌تواند مقدار ظرفیت باربری توده‌سنگ را ۱۰٪ کاهش دهد. به‌علاوه، حدود ۲٪ اختلاف بین نتایج روش‌های قطعی و تحلیلی وجود دارد و در نتیجه، با درنظرگرفتن عدم‌قطعیت، ظرفیت باربری توده‌سنگ کاهش پیدا کرده است.

۱. مقدمه

تعیین ظرفیت باربری خاک و یا توده‌سنگ، یکی از مهم‌ترین مراحل در طراحی سازه‌هایی نظیر ساختمان‌ها، پل‌ها، و سدهاست. با بررسی نوشتارهای پیشین می‌توان مشاهده کرد که پژوهش‌های نسبتاً زیادی در این خصوص انجام شده است. با این حال، عموماً توده‌سنگ‌ها نسبت به خاک‌ها، مقاومت و ظرفیت باربری بیشتری دارند؛ ولی وجود درزه‌ها و برخی شکستگی‌ها در داخل توده‌سنگ، سبب افزایش نشست‌ها و کاهش ظرفیت باربری می‌شوند. به‌علاوه، در شرایط واقعی، به‌علت شرایط زمین‌شناسی (نظیر وجود ناپیوستگی‌ها و گسل‌ها) و فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی پیچیده، خصوصیات توده‌سنگ ممکن است از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر متفاوت باشد. اگر مقدار پارامترهای مقاومتی و تغییرشکلی توده‌سنگ، عدم‌قطعیت بالایی داشته باشند، استفاده از مقادیر متوسط پارامترها در تحلیل‌ها منطقی نیست و باید به نحوی، اثر تغییرات پارامترهای ذکرشده در تحلیل‌ها در نظر گرفته شود. برای درنظرگرفتن چنین عدم‌قطعیتی، می‌توان از دو رویکرد استفاده کرد:[۱] در رویکرد اول، ابتدا به هر یک از پارامترهای مد نظر، توزیع احتمالی اختصاص داده می‌شود و با توجه به پارامترهای توزیع احتمالاتی مذکور، اعداد تصادفی تولید و به هر یک از زون‌های ایجادشده در روش عددی اختصاص داده می‌شوند. به عبارتی، خصوصیات توده‌سنگ (و یا خاک) از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر متفاوت است. این روش به روش میدان تصادفی[1] معروف است. در مقابل، در رویکرد دوم، ابتدا به هر یک از پارامترهای مد نظر، توزیع احتمالی اختصاص می‌یابد و در گام بعد، تعداد بسیار زیادی اعداد تصادفی برای هر یک از آن‌ها ایجاد می‌شود. در روش اخیر لازم است که به تعداد اعداد تصادفی ایجادشده برای هر لایه از توده‌سنگ و یا خاک، تحلیل انجام شود؛ و این مزیت را دارد که خصوصیات تمامی المان‌های توده‌سنگ و یا خاک یکسان در نظر گرفته می‌شوند.[۱]

گفتنی است، از روش‌های مذکور، علاوه‌بر تعیین ظرفیت باربری پی‌ها، برای تعیین پایداری تونل‌ها، شیروانی‌ها، و سدها نیز استفاده می‌شود.[۲-۱۱] فِنتون و گریفیتس[2] (۲۰۰۲)،[۱۲] با بررسی تأثیر فاصله بین پی‌ها و عرض پی‌ها در

[1] Random field method

[2] Fenton and Griffiths

استناد به این مقاله:

معتمدی ممقانی، فراز، رنجبرنیا، مسعود و ظاهری، میلاد، ۱۴۰۴. ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر توده‌سنگ‌های شیل با رفتار رئولوژیک: با درنظرگرفتن رویکرد احتمالاتی. مهندسی عمران شریف، ۴۱(۴)، صص.۱۰۹-۱۲۲. https://doi.org/10.24200/j30.2025.66634.3422

حق مولف © نویسندگان

ناشر: دانشگاه صنعتی شریف

شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۶-۴۷۷۶

نشست تفاضلی پی‌های واقع بر خاک، فرض کرده‌اند که فقط مقدار مدول الاستیسیته‌ی خاک (با درنظرگرفتن توزیع لوگ نرمال[1]) از نقطه‌ای به نقطه‌ی دیگر تغییر پیدا می‌کند. ایشان معیار گسیختگی خاک را موهر-کولمب[2] با رفتار الاستوپلاستیک کامل انتخاب کرده‌اند. همچنین ایشان در مطالعه‌ی دیگری در سال ۲۰۰۳، پارامتر چسبندگی خاک را به عنوان پارامتر تصادفی در نظر گرفته‌اند.[۱۳] رنجبر پویا[3] و همکاران (۲۰۱۴)، با بهره‌گیری از روش عددی (با استفاده از نرم‌افزار FLAC) به مطالعه‌ی تأثیر وجود تغییرپذیری مکانی خصوصیات خاک در ظرفیت باربری پی‌های سطحی صلب در شرایط زهکشی‌شده پرداخته و چسبندگی و زاویه‌ی اصطکاک خاک را به عنوان پارامترهای تصادفی انتخاب کرده‌اند.[۱۴] چن[4] و همکاران (۲۰۲۳)، نیز با استفاده از روش میدان تصادفی، ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر روی دو لایه خاک رسی را بررسی کرده‌اند.[۱۵] رنجبرنیا[5] و همکاران (۲۰۲۳)، در مطالعه‌ی ظرفیت باربری توده‌سنگ (براساس معیار گسیختگی توده‌سنگ)، پارامترهای معیار گسیختگی هوک- براون[6] را به‌عنوان پارامترهای تصادفی انتخاب کرده‌اند. شایان ذکر است که توابع توزیع احتمالاتی ظرفیت باربری توده‌سنگ هم برای پی مربعی و هم برای پی نواری به‌دست آمده است. نتایج حاصل نشان داده است که تحلیل قطعی[7]، که در آن از مقادیر متوسط پارامترها استفاده می‌شود، الزاماً مقدار ظرفیت باربری محتمل را بیان نمی‌کند.[۱۶]

گفتنی است، در صورتی که توده‌سنگ زیر پی دارای رفتار وابسته به زمان (رئولوژیک[8]) نیز باشد و تحت اثر اعمال تنش ثابت، نشست پی با گذشت زمان رفته‌رفته افزایش پیدا کند، لزوم درنظرگرفتن عدم‌قطعیت در تعیین ظرفیت باربری پی دوچندان می‌شود؛ زیرا علاوه‌بر خصوصیات مقاومتی و مدول تغییرشکل‌پذیری توده‌سنگ، پارامترهای دیگری نیز در پاسخ توده‌سنگ تأثیر می‌گذارند. به‌طور مثال، در مدل ویسکوالاستیک برگر و مدل ویسکو الاستوپلاستیک CVISC [9]، مقدار پارامترهای مدول برشی کلوین[10]، ویسکوزیته‌ی ماکسول[11]، و ویسکوزیته‌ی کلوین[12] نیز می‌توانند عدم‌قطعیت داشته باشند.[۱۷-۲۲] با این حال، تأثیر عدم‌قطعیت در پارامترهای رئولوژیکی توده‌سنگ در ظرفیت باربری توده‌سنگ تاکنون بررسی نشده است.

لذا، در مطالعه‌ی حاضر به بررسی عدم قطعیت در مقدار پارامترهای توده‌سنگ و تأثیر آن در ظرفیت باربری توده‌سنگ واقع در زیر پی‌های نواری با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان پرداخته شده است. بدین منظور، برای انجام تحلیل‌ها، از نرم‌افزار FLAC استفاده شده است. گفتنی است که برای تعیین ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان، در ابتدا لازم بوده است که ظرفیت باربری توده‌سنگ بدون درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان محاسبه شود. در این حالت، برای توصیف رفتار و عملکرد توده‌سنگ از مدل رفتاری موهر– کولمب و در شرایطی که رفتار وابسته به زمان بوده است، از مدل رفتاری ویسکو الاستوپلاستیک CVISC استفاده شده است. در گام بعد، رابطه‌ی بین متغیرهای تصادفی ورودی و خروجی (ظرفیت باربری با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان) با استفاده از روش سطح پاسخ[13] به‌دست آمده است. سپس، برای هر یک از پارامترهای تصادفی مذکور، توزیع نرمال و مقادیر میانگین و انحراف معیار اختصاص یافته است. در گام بعد، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و استفاده از روش مونت-کارلو[14]، تعداد زیادی اعداد تصادفی تولید و با توجه به رابطه بین متغیرهای تصادفی ورودی و خروجی، توزیع احتمالاتی برای خروجی مسئله تعیین شده است.

۲. تعریف مسئله و فرضیات

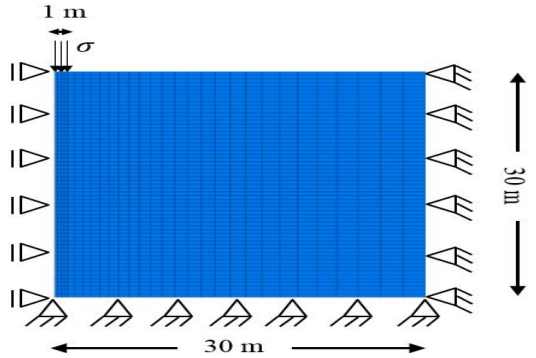
فرض شده است که یک پی نواری بر روی یک توده‌سنگ با رفتار وابسته به زمان (رئولوژیک) قرار گرفته است. به همین جهت، مدل ویسکو الاستوپلاستیک به توده‌سنگ اختصاص یافته و فرض شده است که رفتار توده‌سنگ در هنگام گسیختگی به‌صورت الاستوپلاستیک کامل[15] است. تنش‌های وارد بر پی به‌صورت یکنواخت بوده و از اثر بارهای لرزه‌ای و وجود آب زیرزمینی صرف‌نظر شده است. همچنین، توده‌سنگ‌ها، همگن بوده و درزه‌های سیستماتیک وجود نداشته است. به‌علاوه، فرض شده است که کلیه‌ی نقاط مدل، خصوصیات یکسانی داشته‌اند.

۳. مدل‌سازی عددی

برای شبیه‌سازی عملکرد رئولوژیک و بررسی ظرفیت باربری، از روش عددی استفاده شده است. گفتنی است، در ابتدا، ظرفیت باربری توده‌سنگ بدون درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان محاسبه و سپس ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان (با توجه به مراحلی که در ادامه به آن‌ها اشاره شده است) محاسبه شده‌اند.

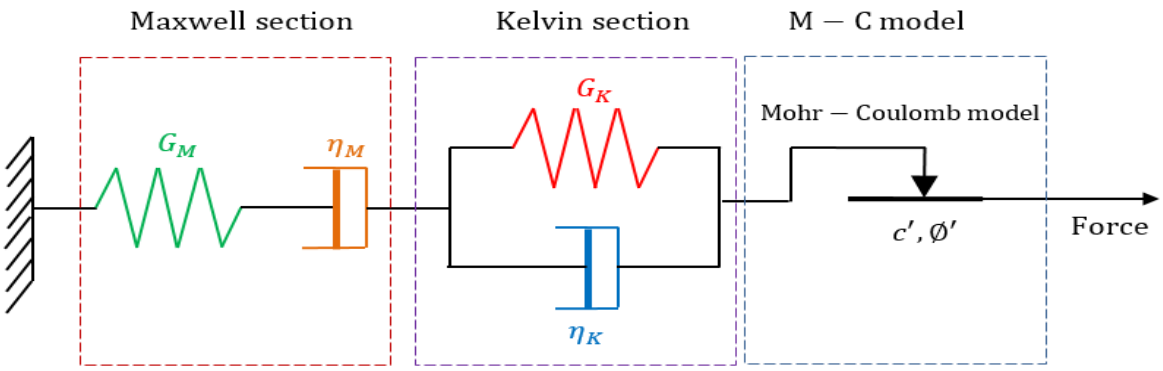
۱.۳. درنظرنگرفتن رفتار وابسته به زمان

از نرم‌افزار FLAC برای تعیین ظرفیت باربری توده‌سنگ استفاده شده است. هندسه‌ی مدل ساخته‌شده در شکل ۱ مشاهده می‌شود. شایان ذکر است که مش‌بندی و ابعاد مدل به‌نحوی انتخاب شده‌اند که موارد ذکرشده، تأثیر چندانی در نتایج به‌دست‌آمده نداشته باشند. بر این اساس، فاصله‌ی مرزهای جانبی به‌صورت تدریجی افزایش داده شده است تا اثر اصطکاک بین توده‌سنگ و



شکل ۱. هندسه‌ی مدل (مقدار تنش اعمالی در آزمون‌های مختلف متفاوت است).

[1] Log-normal
[2] Mohr-Coulomb
[3] Ranjbar Pouya
[4] Chen
[5] Ranjbarnia
[6] Hoek-Brown
[7] Deterministic analysis
[8] Rheological
[9] Burger-creep viscoplastic model
[10] Kelvin shear modulus
[11] Maxwell viscosity
[12] Kelvin viscosity
[13] Response Surface Methodology
[14] Monte Carlo method
[15] Elastic perfectly plastic



شکل ۲. مدل CVISC.

مرزهای جانبی در نتایج حاصل به میزان کمینه برسد. از این رو، ابعاد مدل در جهت‌های افقی و قائم مساوی ۳۰ متر در نظر گرفته شده است. در مقابل، اندازه‌ی مش‌ها به‌صورت تدریجی از بزرگ به کوچک تغییر داده شده‌اند تا اثر آن‌ها در نتایج به‌دست‌آمده کاهش یابد. به‌منظور افزایش دقت تحلیل، اندازه‌ی مش‌ها در ناحیه‌ی زیر پی، ریزتر انتخاب شده و با فاصله‌گرفتن از ناحیه‌ی اخیر و نزدیک‌شدن به مرزهای جانبی مدل، ابعاد المان‌ها به‌صورت تدریجی افزایش یافته‌اند تا حجم محاسبات کاهش یابد. ابعاد نهایی مش‌ها، که براساس این تحلیل به‌دست آمده‌اند، در شکل ۱ نشان داده شده‌اند. به‌علاوه، به‌دلیل وجود شرایط تقارن محوری در مسئله، فقط 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 آن (مدول برشی، مدول بالک، دانسیته، زاویه‌ی اصطکاک، چسبندگی، زاویه‌ی اتساع، و مقاومت کششی) به توده‌سنگ اختصاص یافته است. گفتنی است، با اینکه مدل هوک- براون مدل بهتری نسبت به مدل موهر- کولمب برای توده‌سنگ‌هاست، ولی برای اینکه مدل هوک- براون در مدل‌های خزشی موجود در نرم‌افزار وجود ندارد، با استفاده از پارامترهای آن، یعنی m_i (ثابت معیار هوک- براون)، σ_{ci} (مقاومت فشاری تک‌محوری توده‌سنگ)، و GSI (شاخص مقاومت زمین‌شناسی توده‌سنگ) می‌توان مقادیر مدول برشی، مدول بالک، زاویه‌ی اصطکاک، و چسبندگی معادل توده‌سنگ را به‌دست آورد (با استفاده از روابط ارائه‌شده توسط هوک[16] (۱۹۹۰)،[۲۳] و هوک و براون[17] (۲۰۱۹)،[۲۴]).

در مرحله‌ی بعد، شرایط مرزی و اولیه اختصاص داده شده است. بدین ترتیب، امکان حرکت تمامی گره‌های واقع در کف مدل در جهت‌های افقی و عمودی و همچنین حرکت تمامی گره‌های واقع در مرزهای کناری در جهت افقی بسته (مهار) شده است. این تذکر لازم است که به جهت وجود شرایط کرنش مسطح، توده‌سنگ امکان حرکت در جهت عمود بر صفحه را نیز ندارد. پس از اعمال تنش‌های اولیه، مدل تحلیل و جابجایی‌ها و سرعت‌ها در کل مدل به مقدار صفر، مقداردهی اولیه شده است؛ 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 اینکه سختی پی بیش از ۲۰ برابر سختی توده‌سنگ است، می‌توان پی را صلب فرض کرد و به جای مدل‌سازی خود پی در نرم‌افزار، در محدوده‌ی پی، سرعت ثابتی را در جهت قائم اعمال کرد (به‌عبارتی، رفته‌رفته جابجایی پی افزایش می‌یابد).[۲۵] با این کار، امکان به‌دست‌آوردن نمودار تنش– نشست با سهولت بیشتری صورت می‌گیرد. در این مرحله می‌توان ظرفیت باربری توده‌سنگ را بدون درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان به‌دست آورد؛ لذا، دو معیار زیر در نظر گرفته شده است. سپس، مقدار کمینه‌ی تنش حاصل از دو معیار مذکور، به‌عنوان ظرفیت باربری توده‌سنگ گزارش شده است:

۱) تنشی که در آن، مقدار نشست برابر ۵ سانتی‌متر شود (به‌عبارت بهتر، نشست مجاز توده‌سنگ برابر ۵ سانتی‌متر است).[۲۶]

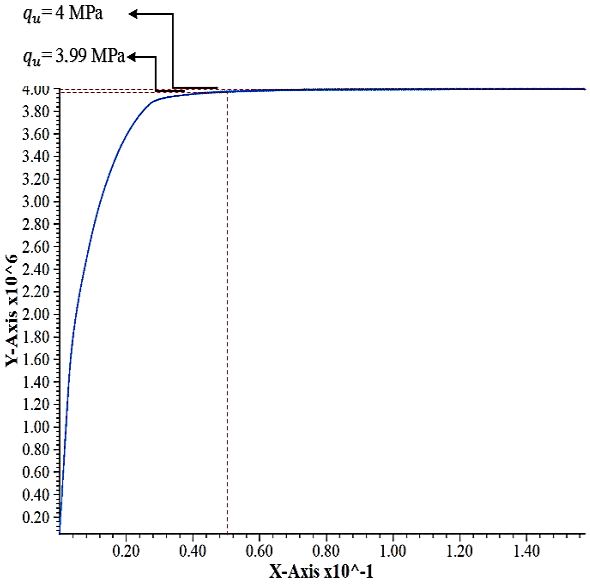
۲) در نمودار تنش– نشست، تنشی که تحت اثر آن، مقدار نشست رفته‌رفته افزایش یابد (گسیختگی برشی در توده‌سنگ رخ دهد).

۲.۳. درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان

در مرحله‌ی کنونی، مدل ویسکو الاستوپلاستیک CVISC به توده‌سنگ اختصاص یافته است؛ که یک مدل ترکیبی از مدل برگر (متشکل از مدل‌های ماکسول و کلوین) و مدل موهر– کولمب است (شکل ۲). شایان ذکر است که ورودی‌های مدل رفتاری اخیر، عبارت‌اند از: ویسکوزیته‌ی کلوین (η_K)، ویسکوزیته‌ی ماکسول (η_M)، مدول برشی کلوین (G_K)، مدول برشی ماکسول (G_M)، مدول بالک، دانسیته، زاویه‌ی اصطکاک، چسبندگی، زاویه‌ی اتساع، و مقاومت کششی. در مدل مذکور، η_M شیب منحنی تنش در برابر کرنش را در مرحله‌ی خزش ثانویه کنترل می‌کند. در صورتی که تنش ثابتی به توده‌سنگ اعمال شود، در توده‌سنگی که مقدار پارامتر η_M بیشتر باشد، کرنش کمتری ایجاد می‌شود. در مقابل، پارامتر η_K فقط در مقدار کرنش‌ها در مرحله‌ی خزش اولیه تأثیرگذار است و 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 و ۲۷] این در حالی است که پارامتر G_K مقدار کرنش الاستیک تأخیری را کنترل می‌کند؛ که هر چه مقدار آن بیشتر باشد، کرنش و یا تغییرشکل نهایی کمتر خواهد بود. لازم به توضیح است که با وجود اینکه در تحلیل‌ها، مدول برشی ماکسول (G_M)، تعیین‌کننده‌ی سختی مصالح در ناحیه‌ی کرنش‌های کوچک است؛ در مدل برگر، پارامتر (G_M)، در کنار ضرایب ویسکوزیته به‌منظور شبیه‌سازی پاسخ وابسته به زمان توده‌سنگ به‌کار می‌رود. در این شرایط، همان‌طور که

[16] Hoek

[17] Hoek and Brown



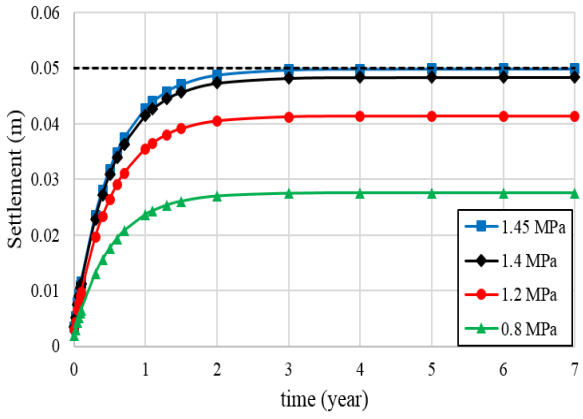
شکل ۳. نمودار بارگذاری- نشست پی نواری (محور افقی، بیانگر نشست بر حسب متر و محور قائم بیانگر ظرفیت باربری بر حسب پاسکال است).

پیش‌تر اشاره شد، مدول‌های برشی ماکسول و کلوین به ترتیب میزان سختی در رفتار ویسکوالاستیک آنی و تأخیری را کنترل می‌کنند.

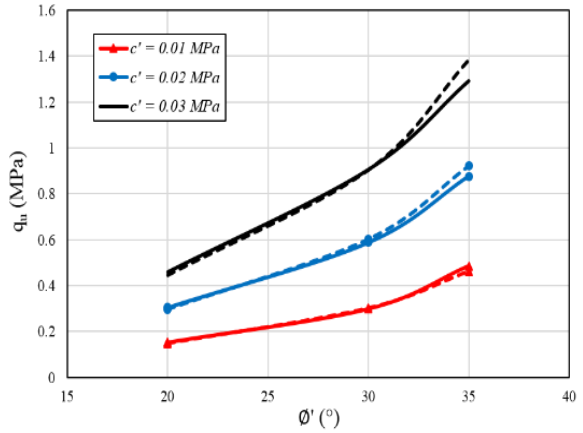
در گام بعد، مشابه روند قبل، شرایط مرزی و تنش‌های اولیه به مدل اعمال و پس از تحلیل مدل، جابجایی‌ها و سرعت‌ها در کل مدل به مقدار صفر، مقداردهی اولیه می‌شوند. در مرحله‌ی بعد، تنش‌های کمتر از ظرفیت باربری توده‌سنگ بدون درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان به مدل اعمال و مدل تحت بار ثابت مذکور، تحلیل می‌شود و نمودار نشست– زمان به‌دست می‌آید. در صورتی که بعد از گذشت مدت زمان طولانی (مثلاً ۲۰۰ سال)، مقدار نشست از مقدار نشست مجاز (یعنی ۵ سانتی‌متر) فراتر رود، تحلیل متوقف می‌شود و دوباره با اعمال تنش کمتری در محدوده‌ی پی، تحلیل خزشی دوباره انجام می‌پذیرد. به‌طور مشابه، در صورتی که مقدار نشست در طی این مدت بسیار کمتر از نشست مجاز باشد، تحلیل متوقف و تنش بیشتری در محدوده‌ی پی به مدل اعمال می‌شود. روند سعی و خطای اخیر تا جایی ادامه پیدا می‌کند که تحت اعمال تنش، مقدار نشست پی بعد از گذشت این مدت زمان طولانی به مقدار نشست ۵ سانتی‌متر میل کند. تنش حاصل، ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان نامیده می‌شود.

به‌عنوان مثال، برای حالتی که GSI برابر ۳۰، مقاومت فشاری تک‌محوری توده‌سنگ برابر ۲۰ مگاپاسکال، m_i برابر ۵، مدول برشی کلوین برابر ۳۰ مگاپاسکال، ویسکوزیته‌ی کلوین برابر $5e^{8}$ مگاپاسکال ثانیه، ویسکوزیته‌ی ماکسول برابر $1e^{13}$ مگاپاسکال ثانیه، و عرض پی نواری برابر ۲ متر است، ظرفیت باربری توده‌سنگ بدون درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان برابر ۴ مگاپاسکال به‌دست می‌آید (شکل ۳).

برای تعیین ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان از روش سعی و خطا استفاده شده است (شکل ۴). می‌توان مشاهده کرد زمانی که مقدار تنش برابر ۰/۸ و یا ۱/۲ مگاپاسکال بوده است، مقدار نشست بسیار کمتر از نشست مجاز (۵ سانتی‌متر) شده است. لذا، مقدار تنش افزایش یافته و



شکل ۴. نمودار نشست- زمان.



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

مقدار آن برابر ۱/۴۵ مگاپاسکال انتخاب شده است. همچنین، می‌توان ملاحظه کرد که در اثر اعمال تنش اخیر، نشست مجاز ۵ سانتی‌متری رد شده است؛ و در نتیجه، این تنش را نمی‌توان به‌عنوان ظرفیت باربری در نظر گرفت. بدین منظور، مقدار تنش کاهش داده می‌شود. در سعی بعدی، مقدار تنش برابر ۱/۴ مگاپاسکال انتخاب شده است. مشاهده می‌شود که در این حالت، مقدار نشست در زمان بسیار طولانی به مقدار ۵ سانتی‌متر میل کرده است. از این رو، مقدار تنش مذکور به عنوان ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان انتخاب شده است.

۴. راستی‌آزمایی مدل عددی

برای اطمینان از درستی مدل‌سازی، ظرفیت باربری توده‌سنگ بدون درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان (q_u) حاصل از نرم‌افزار FLAC با نتایج حاصل از پژوهش مایرهوف[18] (۱۹۵۷)،[۲۸] مقایسه شده است. در شکل ۵ می‌توان مشاهده کرد که مقدار ظرفیت باربری برای مقادیر مختلف چسبندگی (c') و زاویه‌ی اصطکاک (ϕ') ارائه شده است. شایان ذکر است که در پژوهش حاضر، عرض پی برابر ۲ متر در نظر گرفته شده است. همان‌طور که در شکل می‌توان مشاهده کرد، اختلاف نتایج حاصل از روش‌های عددی و تحلیلی بسیار کم است.

[18] Meyerhof

۵. مدل‌سازی احتمالاتی

با توجه به اینکه مقدار پارامترهای رئولوژیکی توده‌سنگ (یعنی ویسکوزیته‌ی کلوین، ویسکوزیته‌ی ماکسول، و مدول برشی کلوین) و همچنین خصوصیات مقاومتی توده‌سنگ، مقدار واحد ندارند؛ بلکه در محدوده‌ای تغییر پیدا می‌کنند، می‌توان از روش‌های احتمالاتی استفاده کرد و تأثیر تغییر متغیرهای مذکور را در خروجی (ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان) بررسی کرد. با این حال، در شرایطی که از مقدار متوسط (میانگین) پارامترهای مذکور استفاده شود، باید مقدار ظرفیت باربری به‌دست‌آمده را در ضریب اطمینان تقسیم کرد و عدد حاصل را به‌عنوان ظرفیت باربری مجاز توده‌سنگ اعلام کرد. به عبارتی، عملاً با استفاده از ضریب اطمینان، عدم‌قطعیت پارامترها در نظر گرفته می‌شود. لذا، اگر پارامترها، عدم‌قطعیت بالایی داشته باشند، خطا افزایش می‌یابد و ضرورت استفاده از روش‌های احتمالاتی احساس می‌شود.

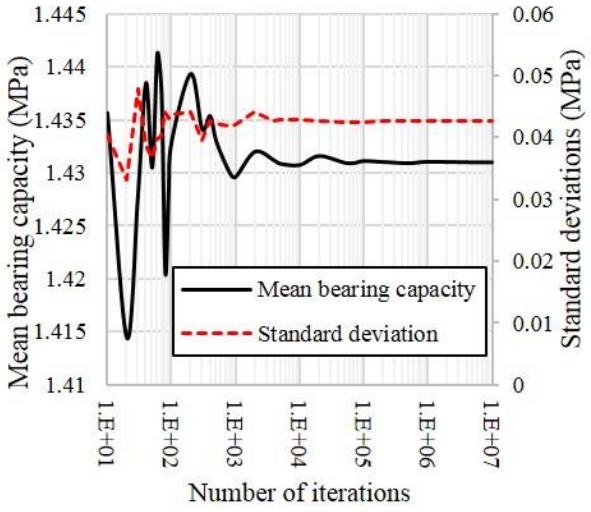
روش مونت- کارلو، یکی از روش‌های احتمالاتی پرکاربرد است، که در واقع، یک روش عددی برای حل مسائل با استفاده از شبیه‌سازی و تولید اعداد تصادفی است؛ که در آن، اگر اعداد زیادی برای هر یک از پارامترها تولید شود و براساس پارامترهای مذکور مسئله تحلیل شود، توزیع احتمالاتی خروجی‌ها حاصل می‌شوند.

در روش مونت-کارلو، برای هر یک از پارامترهای تصادفی، یک توزیع احتمالاتی اختصاص می‌یابد و با درنظرگرفتن پارامترهای توزیع اخیر، تعداد زیادی نمونه‌ی تصادفی تولید می‌شود. اعداد حاصل به‌عنوان ورودی، وارد نرم‌افزار می‌شوند و بعد از تحلیل، خروجی موردنظر تعیین می‌شود.

در مطالعه‌ی حاضر، پارامترهای رئولوژیکی توده‌سنگ (یعنی ویسکوزیته‌ی کلوین، ویسکوزیته‌ی ماکسول، و مدول برشی کلوین) و همچنین پارامترهای m_i، σ_{ci}، و GSI به‌عنوان پارامترهای تصادفی انتخاب شده‌اند. شایان ذکر است که طبقه‌بندی‌های RMR و GSI دو سیستم طبقه‌بندی مهندسی توده‌سنگ هستند، که برای ارزیابی کیفیت و مقاومت توده‌سنگ استفاده می‌شوند. روش RMR بر پایه‌ی ۵ پارامتر اصلی است:

۱) مقاومت تک‌محوره‌ی سنگ سالم، ۲) شاخص کیفیت درزه‌داری، ۳) فاصله‌ی بین درزه‌ها، ۴) شرایط درزه‌ها (شامل زبری، پرشدگی، تداوم، میزان بازشدگی، و درجه‌ی هوازدگی سطح درزه‌ها)، و ۵) شرایط آب زیرزمینی. در واقع مقدار GSI را می‌توان براساس نمره‌ی 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 پارامترهای تصادفی مذکور لازم است که توزیع نرمال و مقادیر میانگین و انحراف معیار انتخاب شوند. از آنجایی که بیشتر متغیرهای تصادفی در مهندسی ژئوتکنیک از توزیع نرمال تبعیت می‌کنند،[۳۰] توزیع اخیر به‌عنوان توزیع‌های تصادفی در نظر گرفته شده و در مطالعه‌ی حاضر هم اختصاص یافته است. با استفاده از نرم‌افزار MATLAB و با توجه به توزیع احتمالاتی اختصاص داده‌شده و مقادیر میانگین و انحراف معیار، تعداد زیادی عدد تصادفی تولید می‌شوند. به‌عنوان نمونه برای حالت ۳ (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، نوسان‌های نتایج کاهش یافته و همگرایی قابل‌قبولی حاصل شده است؛ بنابراین، در مطالعه‌ی حاضر، از این تعداد نمونه برای انجام تحلیل‌ها استفاده



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

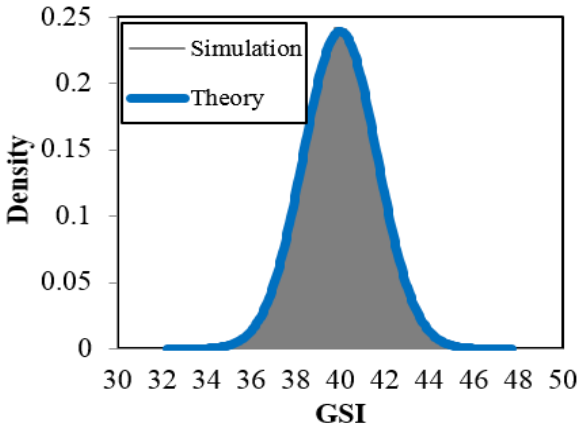
شده است. اعداد پارامترهای مذکور باید با هم ترکیب شوند و خروجی (ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان) با استفاده از نرم‌افزار تفاضل محدودی FLAC مشخص شود. در ادامه، با استفاده از نرم‌افزار MATLAB توزیع احتمالاتی برای خروجی مسئله تعیین شده است.

از آنجایی که به‌دست‌آوردن خروجی برای هر یک از ترکیب‌های اعداد تصادفی ذکرشده، بسیار زمان‌بر است؛ می‌توان با استفاده از روش سطح پاسخ، رابطه‌ی بین چند ورودی و مقدار خروجی را مشخص کرد. برای استفاده از روش اخیر می‌توان از نرم‌افزار Design-Expert استفاده کرد؛ که در آن، بسته به تعداد متغیرهای احتمالاتی و مقادیر کمینه و بیشینه‌ی آن‌ها، تعدادی آزمون 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 آزمون‌های اخیر در نرم‌افزار FLAC تحلیل و مقدار خروجی وارد نرم‌افزار Design-Expert شود. در گام بعد، رابطه‌ی به‌دست‌آمده 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 می‌شود و توزیع احتمالاتی ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان به‌دست می‌آید.

در جدول ۱، میانگین (μ) و انحراف معیار (σ) در حالت‌های مختلف (حالت‌های ۱ الی ۴) ارائه شده است. گفتنی است که مطابق توصیه‌ی هوک و مارینوس (۲۰۰۰)،[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) پارامتر GSI برابر ۱/۶۷ می‌شود. در مقابل، درخصوص پارامترهای تصادفی دیگر، از آنجایی که تاکنون درخصوص مقدار انحراف معیار و واریانس پارامترهای رئولوژیکی توده‌سنگ مطالعه‌ای صورت نپذیرفته است، در مطالعه‌ی حاضر فرض شده است که تغییرات پارامترهای اخیر می‌توانند ۱۰ و یا ۲۰٪ کمتر و یا بیشتر از مقدار میانگین باشند. بر این اساس، فرض شده است که ۹۹/۷۳٪ 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 محدوده‌ی $\mu \pm 3\sigma$ قرار دارند).

جدول ۱. مقادیر پارامترهای احتمالاتی در حالت‌های مختلف.

Parameter		GSI	σ_{ci}	m_i	G_K	η_K	η_M
Unit		-	MPa	-	MPa	MPa. s	MPa. s
Case 1	μ	40	20	5	30	5e8	1e13
	σ	1.66	0.67	0.167	1	1.6e7	3.3e11
Case 2	μ	40	20	5	30	5e8	1e13
	σ	1.66	1.33	0.33	2	3.3e7	6.6e11
Case 3	μ	30	10	5	30	5e8	1e13
	σ	1.66	0.33	0.167	1	1.6e7	3.3e11
Case 4	μ	30	10	5	30	5e8	1e13
	σ	1.66	0.67	0.33	2	3.3e7	6.6e11



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

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

۶. نتایج

نرم‌افزار Design-Expert به‌منظور تجزیه‌وتحلیل نتایج از ابزاری با نام ANOVA (تحلیل واریانس) استفاده می‌کند.

در صورتی که خروجی f باشد، رابطه‌ی بین مقادیر ورودی و خروجی می‌تواند به‌صورت رابطه‌ی ۱ باشد:

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

که در آن، a_0، a_i، b_{ij}، c_i، و d_0 ضرایب محاسبه‌شده توسط نرم‌افزار هستند. همچنین، x_i و x_j متغیرهای ورودی و n تعداد پارامترهای تصادفی هستند.

در نرم‌افزار Design-Expert، از طرح مرکب مرکزی[19] استفاده می‌شود؛ که در آن، براساس تعداد متغیرهای تصادفی و تعداد تکرار نقاط مرکزی (میانگین هر یک از پارامترهای در نظر گرفته‌شده در تحلیل)، تعداد آزمون‌ها تعیین می‌شود. همچنین با توجه به مقادیر بیشینه، کمینه، و میانگین پارامترها، مقدار پارامترهای مختلف در هر یک از آزمون‌های ذکرشده مشخص می‌شود. لذا، برای هر یک از حالت‌های مطرح‌شده در جدول ۱، ۸۴ آزمون مختلف به‌دست آمده

جدول ۲. مقایسه‌ی مدل‌ها برای حالت ۳.

model	R^2	Standard deviation
Linear	0.9223	0.2030
2FI	0.9719	0.1220
Quadratic	0.9886	0.0613

است، که خروجی هر یک از آن‌ها با استفاده از نرم‌افزار FLAC تعیین شده است. در گام بعد، برای بهینه‌سازی مسئله، سه مدل خطی (Linear)، خطی با درنظرگرفتن برهمکنش‌های دوتایی (2FI)، و درجه دو (Quadratic) بررسی شده‌اند. در جدول ۲، مقایسه‌ی مدل‌های مذکور برای حالت ۳ (به عنوان نمونه) برای تعیین ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان ارائه شده است. می‌توان مشاهده کرد که مدل درجه دو، دارای ضریب R^2 (ضریب تعیین (Coefficient of Determination)) بالاتر و مقدار انحراف معیار کمتر است. در نتیجه، مدل مذکور، انتخاب شده است.

نمودار احتمال نرمال باقی‌مانده‌ها در شکل ۸- الف، مشاهده می‌شود؛ که مطابق آن، نقاط باقی‌مانده‌ها تقریباً در امتداد خط با شرایط توزیع نرمال هستند و تقریباً به‌صورت خطی تغییر می‌کنند. پس می‌توان گفت که احتمال خطای تصادفی کم و اعتبار مدل بالاست. به‌علاوه، در شکل ۸- ب، مقدار باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی‌شده مشاهده می‌شوند. در واقع، مقادیر باقیمانده‌ها نباید از حدود نشان داده‌شده در شکل اخیر 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. درنهایت، مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی در شکل ۸- ج رسم شده است. می‌توان ملاحظه کرد که اختلاف بسیار کمی بین نتایج به‌دست‌آمده وجود دارد و نقاط حاصل تقریباً در امتداد خط ۴۵ درجه قرار گرفته‌اند.

درنهایت، رابطه‌ای همانند رابطه‌ی ۲ به‌دست می‌آید. لازم به توضیح است که پارامتر GSI شاخص مقاومت زمین‌شناسی توده‌سنگ، m_i ثابت معیار هوک-براون، σ_{ci} مقاومت فشاری تک‌محوری توده‌سنگ، G_K مدول برشی کلوین، و R^2 بیانگر ضریب تعیین هستند.

[19] Central Composite Design

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

برای سایر حالت‌ها نیز مشابه روند فوق، روابطی برای تعیین ارتباط بین ورودی‌ها و خروجی‌ها به دست آمده است.

حالت ۱:

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

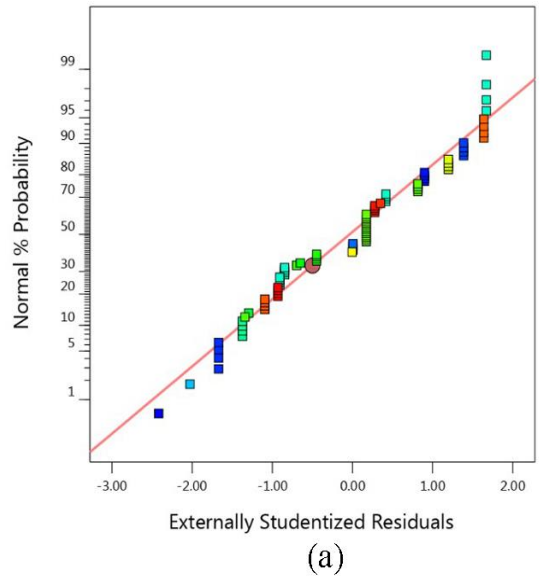
حالت ۲:

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

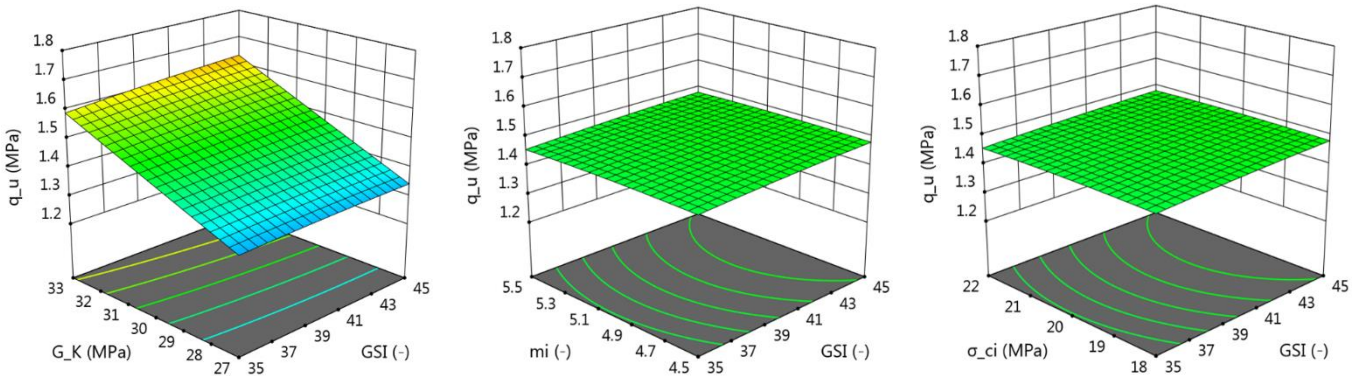
حالت ۴:

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

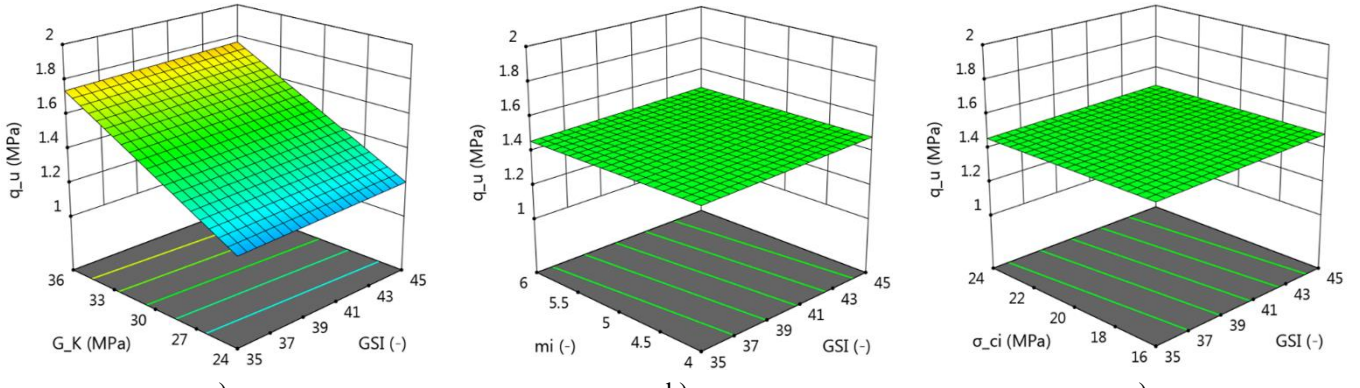
در شکل‌های ۹ و ۱۰، به ترتیب می‌توان تغییرات مقدار ظرفیت باربری را با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان در حالت‌های ۱ و ۲ با تغییرات m_i ، σ_{ci} ، GSI و G_K مشاهده کرد (عرض پی در کلیه‌ی حالت‌ها برابر ۲ متر است). البته شایان ذکر است که مطابق بررسی‌های صورت‌گرفته و روابط اخیر، ویسکوزیته‌های ماکسول و کلوین هیچ تأثیری در ظرفیت باربری نداشته و در نتیجه، در نمودارهای مذکور، این موارد نشان داده نشده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، افزایش ۱۰ و یا ۲۰ درصدی مقدار پارامترهای m_i و σ_{ci} تأثیر چندانی در مقدار ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان ندارد؛ زیرا مقدار تنش وارده بر توده‌سنگ در حالتی که رفتار توده‌سنگ به‌صورت رئولوژیک است، بسیار کمتر بوده و تحت تنش مذکور، توده‌سنگ در بسیاری از ۸۴ آزمون اخیر، پلاستیک نشده است. به‌طور مثال، برای حالتی که GSI برابر ۴۰، σ_{ci} برابر ۲۲ مگاپاسکال، m_i برابر ۵، و مدول برشی کلوین برابر ۳۰ مگاپاسکال بوده است، ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار



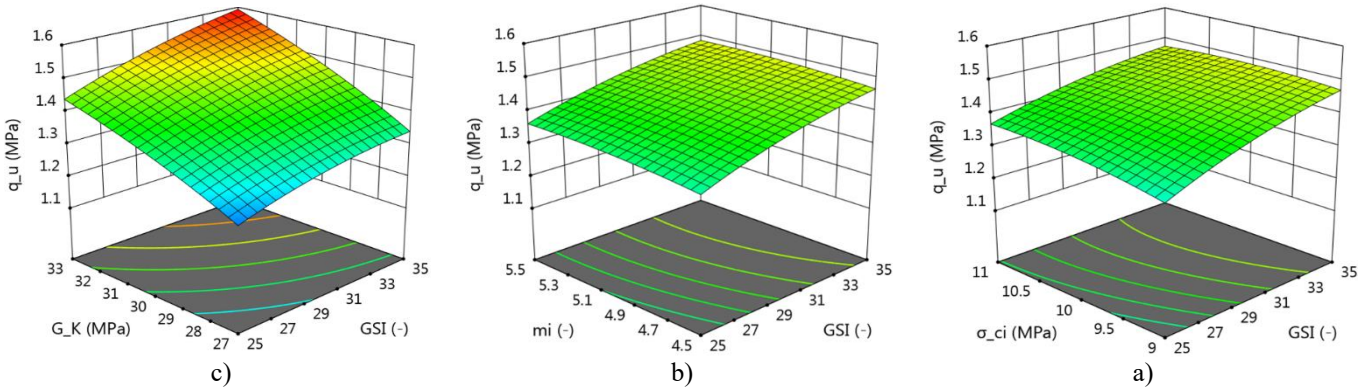
شکل ۸. (a) احتمال نرمال در برابر مقادیر پیش‌بینی‌شده، (b) مقدار باقی‌مانده‌ها در مقابل مقادیر پیش‌بینی‌شده ، (c) مقادیر پیش‌بینی‌شده و واقعی.



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).



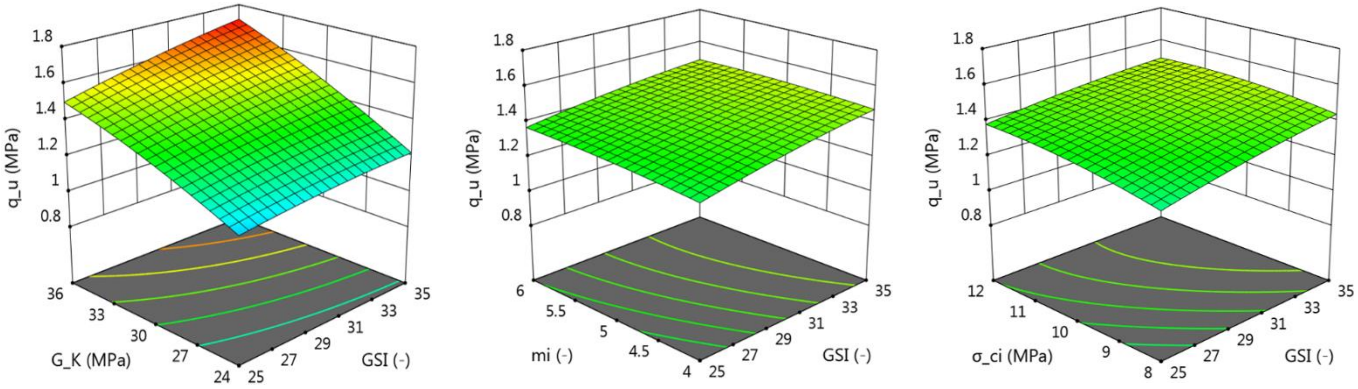
شکل ۱۰: تأثیر تغییرات پارامترها بر مقدار ظرفیت باربری در حالت ۲ (مقدار سایر پارامترها برابر مقدار میانگین نوشته شده در جدول (۱) در نظر گرفته شده‌اند).



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).

وابسته به زمان برابر ۱/۴۷ مگاپاسکال به‌دست آمده است. این در حالی است که ظرفیت باربری توده‌سنگ مذکور بدون درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان ۱۲/۷ مگاپاسکال است. این بدان معناست که ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان حدوداً ۰/۱۲ برابر ظرفیت باربری بدون درنظرگرفتن 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 توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان (q_u) افزایش یافته‌اند. اگر σ_{ci} برابر ۲۰ مگاپاسکال، m_i برابر ۵ باشد، در حالت ۱، با افزایش ۲۰ درصدی مقدار GSI مقدار q_u افزایش ناچیز ۱/۸ درصدی داشته است (G_K برابر ۳۳ مگاپاسکال است). ولی با افزایش ۲۰ درصدی مقاومت فشاری تک‌محوری توده‌سنگ، افزایش حدود ۲۰ درصدی مقدار ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان مشاهده می‌شود (GSI برابر ۳۵).

تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین شکل‌های ۱۱ و ۱۲ و شکل‌های ۹ و ۱۰ وجود دارد و آن هم تأثیر بیشتر پارامترهای σ_{ci} و m_i در حالت‌های ۳ و ۴ است. شایان ذکر است که در 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 شده است. می‌توان مشاهده کرد در حالتی که مقدار GSI برابر ۲۵ است، افزایش مقدار σ_{ci} از ۹ به ۱۱ مگاپاسکال، منجر به افزایش ۴٪ ظرفیت باربری



c) b) a)

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).

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

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Best-fit probability distribution	Normal	Normal	Normal	Normal
Mean (MPa)	1.47	1.47	1.43	1.42
Standard deviation (MPa)	0.045	0.093	0.042	0.077
Variance (MPa²)	0.002	0.008	0.0018	0.0059
Mode (MPa)	1.47	1.47	1.43	1.42
Skewness	0	0	0	0

شده است. 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 نکرده است؛ که به دلیل پلاستیک‌شدن توده‌سنگ است. به‌طور مثال، اگر GSI برابر ۲۵ در نظر گرفته شود و تنشی کمتر از ظرفیت باربری توده‌سنگ بدون درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان اعمال شود، در شرایطی که مقدار σ_{ci} برابر ۹ مگاپاسکال باشد، تعداد نقاط و زون‌های پلاستیک توده‌سنگ بیشتر از حالتی است که مقدار σ_{ci} برابر ۱۱ مگاپاسکال است. این بیشترشدن تعداد زون‌های پلاستیک منجر به افزایش کرنش و نشست آنی می‌شود. این بدان معناست که در طول زمان، مقدار نشست توده‌سنگی که σ_{ci} آن برابر ۹ مگاپاسکال است، بیشتر است. اگر تحت اعمال تنش اخیر، مقدار نشست توده‌سنگی که مقدار σ_{ci} آن برابر ۱۱ مگاپاسکال است، در طولانی‌مدت به مقدار ۵ سانتی‌متر (مقدار مجاز) برسد، قطعاً در توده‌سنگی که مقاومت فشاری تک‌محوری توده‌سنگ آن کمتر است، مقدار نشست از مقدار نشست مجاز رد می‌شود و باید تنش کمتری را به توده‌سنگ اعمال کرد. به همین دلیل است که با افزایش مقدار σ_{ci}، ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن 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 توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان (q_u) افزایش می‌یابد. به‌طور مثال، در حالت ۳، اگر σ_{ci} برابر ۱۰ مگاپاسکال و m_i برابر ۵ باشد، با افزایش ۲۲ درصدی مقدار GSI، مقدار q_u افزایش ۷ درصدی خواهد داشت (G_K برابر ۳۳ مگاپاسکال است). با این حال، با افزایش ۲۰ درصدی σ_{ci} می‌توان افزایش حدود ۱۶ درصدی مقدار ظرفیت باربری را با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان ملاحظه کرد (GSI برابر ۲۵ است).

همان‌طور که قبلاً گفته شد، روابطی که پیش‌تر به‌دست آمده‌اند، برای استفاده در روش مونت-کارلو در نرم‌افزار MATLAB و به‌دست‌آوردن توزیع احتمالاتی ظرفیت باربری توده‌سنگ هستند.

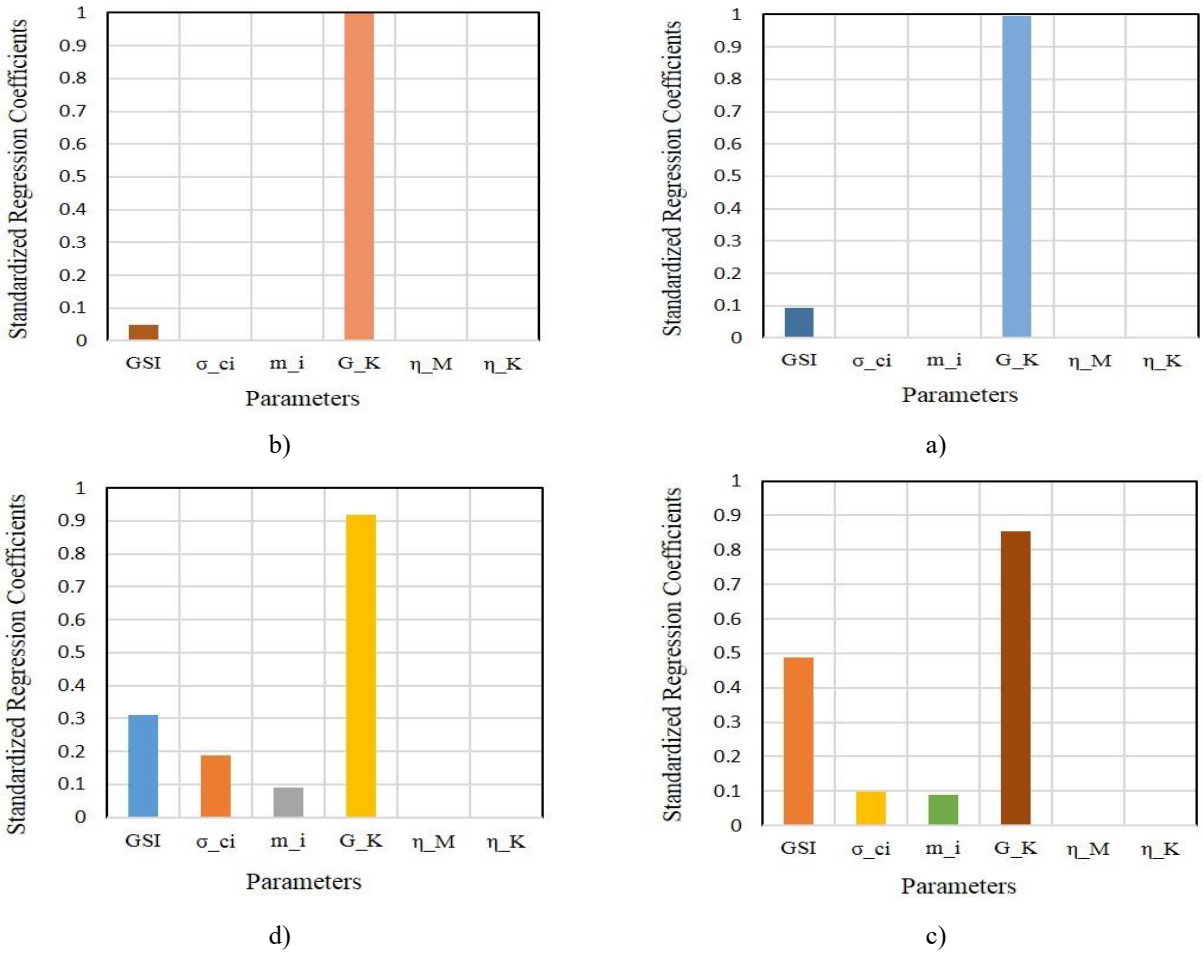
برای تعیین مؤثرترین پارامترها در ظرفیت باربری بلندمدت توده‌سنگ، از تحلیل حساسیت به‌صورت احتمالاتی (غیرقطعی) استفاده شده است. با انجام تحلیل مونت-کارلو، خروجی‌های مدل‌سازی برای هر یک از حالت‌های مختلف تعیین و سپس، ضریب همبستگی استاندارد (SRC)[20] بین پارامترها و پاسخ نهایی محاسبه شده است. ضرایب مذکور برای پارامترهای مختلف در شکل ۱۳ مشاهده می‌شوند؛ که مطابق آن، پارامترهای GSI و G_K بیشترین تأثیر را در مقدار خروجی مسئله (ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان) داشته‌اند. در مقابل، پارامترهای η_K و η_M تأثیر معناداری در خروجی مدل نداشته و پارامترهای σ_{ci} و m_i تأثیر به مراتب کمتری نسبت به پارامترهای GSI و G_K داشته‌اند.

به‌عنوان نمونه، در شکل ۱۴- الف، می‌توان توزیع احتمالاتی ظرفیت باربری توده‌سنگ را برای حالت ۱ مشاهده کرد (در جدول‌های ۳ و ۴، خلاصه‌ای از خصوصیات توزیع‌های ذکرشده ارائه شده است).

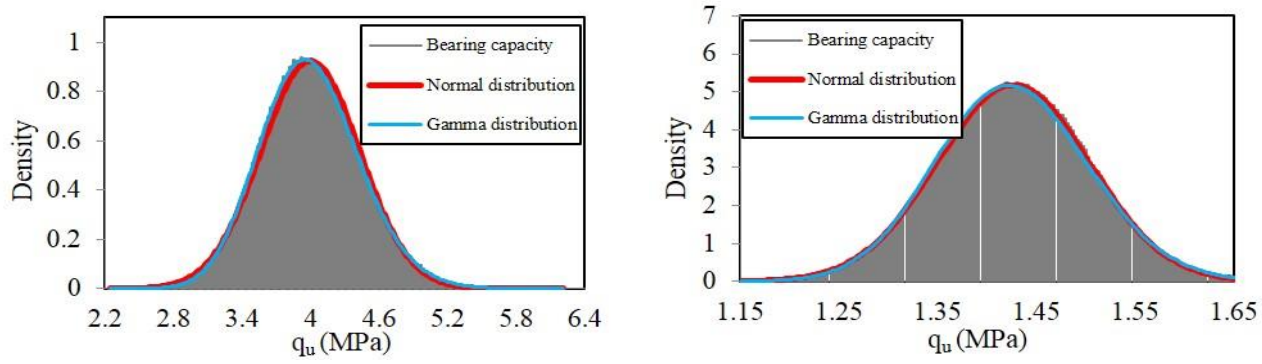
همان‌طور که ملاحظه می‌شود، بهترین توزیع برای ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان در تمامی حالت‌های اخیر، توزیع نرمال است.

دلیل این اتفاق را می‌توان به تأثیر بسیار زیاد پارامتر مدول برشی کلوین در ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان دانست.

[20] Standardized Regression Coefficients (SRC)



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



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.

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

Case	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Best-fit probability distribution	Gamma	Gamma	Gamma	Gamma
Mean (MPa)	11.45	11.6	3.99	3.99
Standard deviation (MPa)	0.9	1.1	0.31	0.43
Variance (MPa^2)	0.826	1.21	0.098	0.18
Mode (MPa)	11.38	11.5	3.97	3.94
Skewness	0.158	0.189	0.157	0.215

برای آنکه مقایسه‌ای صورت بگیرد، توزیع احتمالاتی ظرفیت باربری توده‌سنگ بدون درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان نیز در شکل ۱۴- ب ترسیم شده است.

در واقع، برخلاف توزیع احتمالاتی ظرفیت باربری با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان، ظرفیت باربری توده‌سنگ بدون درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان از توزیع گاما تبعیت می‌کند. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، با مقایسه‌ی حالت‌های ۱ و ۲ می‌توان ملاحظه کرد که هر چه عدم‌قطعیت پارامترهای توده‌سنگ بیشتر باشد، مقدار مد ظرفیت باربری توده‌سنگ بدون درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان (مقداری که بیشترین احتمال وقوع را دارد) بیشتر می‌شود؛ که می‌تواند به‌دلیل اثر GSI باشد؛ زیرا با افزایش پارامتر مذکور، مقاومت توده‌سنگ به شدت افزایش می‌یابد. همچنین چولگی حالت‌های ۲ و ۴ نیز نسبت به حالت‌های ۱ و ۳ افزایش یافته است. این چولگی مثبت است و بدین معناست که دنباله‌ی منحنی توزیع در سمت راست طولانی‌تر بوده و بیشتر خروجی‌ها در سمت چپ منحنی واقع شده‌اند. این بدان معناست که احتمال اینکه ظرفیت باربری کمتر از مقدار میانگین باشد، بیشتر است. این تذکر لازم است که تفاوت چندانی در مقدار مد ظرفیت باربری با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان در حالت‌های ۱ و ۲ و حالت‌های ۳ و ۴ وجود ندارد؛ که به‌دلیل تأثیر به شدت زیاد مقدار مدول برشی کلوین است. به‌علاوه، در صورتی که عدم‌قطعیت در مقدار پارامترها بیشتر شود، انحراف معیار نتایج هم بیشتر می‌شود.

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 درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان در تحلیل قطعی برابر ۱/۴۷ مگاپاسکال بوده است، مقدار مد در حالت ۱ دقیقاً برابر مقدار حاصل از تحلیل قطعی و در حالت ۲، اختلاف بسیار اندک داشته است.

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

با این حال باید توجه داشت که به‌طور مثال، تغییر ۱۰ درصدی در مقدار مدول برشی کلوین می‌تواند مقدار ظرفیت باربری توده‌سنگ را با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان تحت تأثیر قرار دهد. برای نمونه، کاهش ۱۰ درصدی پارامتر مذکور می‌تواند ۱۰٪ مقدار ظرفیت باربری توده‌سنگ را کاهش دهد. از این رو می‌توان به لزوم تحلیل احتمالاتی مسئله پی برد.

۷. نتیجه‌گیری

در مطالعه‌ی حاضر، به بررسی وجود عدم‌قطعیت در تعیین ظرفیت باربری پی‌های نواری واقع بر توده‌سنگ پرداخته شده است. لذا، رفتار توده‌سنگ به‌صورت ویسکو الاستوپلاستیک بوده و به همین دلیل، مدل رئولوژیک CVISC به توده‌سنگ اختصاص داده شده است. بعد از راستی‌آزمایی مسئله، با استفاده از روش سطح پاسخ، رابطه‌ای بین ورودی‌ها (GSI، ثابت معیار هوک- براون، مقاومت فشاری تک‌محوری توده‌سنگ، مدول برشی کلوین، ویسکوزیته‌ی ماکسول و ویسکوزیته‌ی کلوین) و خروجی (ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان) یافت شده است. در گام بعد، با بهره‌گیری از روش مونت-کارلو، تعداد زیادی عدد تصادفی برای هر یک از پارامترهای مذکور تولید و با توجه به رابطه بین متغیرهای تصادفی ورودی و خروجی، توزیع احتمالاتی برای خروجی مسئله تعیین شده است. مهم‌ترین نتایج حاصل از پژوهش حاضر به این شرح بوده است:

۱- در صورتی که مقدار میانگین GSI توده‌سنگ بزرگ باشد، ابتدا پارامتر مدول برشی کلوین و سپس GSI، بیشترین تأثیر را در ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان دارند. این در حالی است که در توده‌سنگ با مشخصات مکانیکی ضعیف‌تر، علاوه‌بر مدول برشی کلوین و GSI، مقاومت فشاری تک‌محوری توده‌سنگ و ثابت معیار هوک- براون هم در ظرفیت باربری اخیر تأثیر می‌گذارند.

۲- با اختصاص توزیع نرمال به پارامترهای احتمالاتی، تابع توزیع احتمال ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان نیز از توزیع اخیر پیروی می‌کند. این در حالی است که ظرفیت باربری توده‌سنگ بدون درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان از توزیع گاما پیروی می‌کند.

۳- در صورتی که عدم‌قطعیت پارامترهای توده‌سنگ بیشتر شود، انحراف معیار نتایج هم بیشتر می‌شود. همچنین مقدار چولگی مثبت نیز افزایش می‌یابد. در نتیجه، احتمال اینکه ظرفیت باربری توده‌سنگ کمتر از مقدار میانگین باشد، بیشتر است.

۴- ظرفیت باربری توده‌سنگ با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان حدوداً ۰/۱ برابر ظرفیت باربری بدون درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان است. همچنین، با درنظرگرفتن رویکرد احتمالاتی، کاهش ۱۰ درصدی مدول برشی کلوین می‌تواند مقدار ظرفیت باربری توده‌سنگ را ۱۰٪ کاهش دهد.

۵- در صورتی که مقدار میانگین GSI توده‌سنگ برابر ۴۰ باشد، مقدار ظرفیت باربری با درنظرگرفتن رفتار وابسته به زمان در تحلیل قطعی برابر ۱/۴۷ مگاپاسکال به‌دست می‌آید. در این حالت، با انجام تحلیل‌های احتمالاتی می‌توان مشاهده کرد که مقدار مد، اختلاف بسیار اندکی با مقدار مذکور دارد. در مقابل، برای حالتی که مقدار میانگین پارامتر GSI مساوی ۳۰ است، مقدار ظرفیت باربری در تحلیل قطعی برابر ۱/۴۴ مگاپاسکال و مقدار مد تقریباً برابر ۱/۴۲ به‌دست آمده‌اند؛ یعنی حدود ۲٪ اختلاف بین نتایج روش‌های قطعی و تحلیلی وجود دارد و در نتیجه، با درنظرگرفتن عدم‌قطعیت، ظرفیت باربری توده‌سنگ کاهش پیدا می‌کند.

۶- در پروژه‌های مختلف، با توجه به آثار زیاد پارامترها در ظرفیت باربری توده‌سنگ، لزوم بررسی ظرفیت باربری براساس روش‌های احتمالاتی وجود دارد.

References- منابع

1. Li, X.-Y., Zhang, L.-M., Gao, L., and Zhu, H., 2017. Simplified slope reliability analysis considering spatial soil variability. *Engineering Geology, 216*, pp. 90-97. DOI: https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2016.11.013.

2. Johari, A., Hosseini, S. M., and Keshavarz, A., 2017. Reliability analysis of seismic bearing capacity of strip footing by stochastic slip lines method. *Computers and*

Geotechnics, *91*, pp. 203-217. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2017.07.019.

3. Johari, A., and Sabzi, A., 2017. Reliability analysis of foundation settlement by stochastic response surface and random finite element method. *Scientia Iranica*, *24*(6), pp. 2741-2751. DOI: https://doi.org/10.24200/SCI.2017.4169.

4. Shahsavar, J., Johari, A., and Binesh, S., 2021. 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).

5. Zhu, J. Q., and Yang, X. L., 2018. Probabilistic stability analysis of rock slopes with cracks. *Geomechanics and Engineering*, *16*(6), pp. 655-667. DOI: https://doi.org/10.12989/gae.2018.16.6.655.

6. Cundall, P. A., Damjanac, B., and Varun, 2016. Considerations on slope stability in a jointed rock mass. In *ARMA US Rock Mechanics/Geomechanics Symposium*.

7. Hoek, E., and Marinos, P., 2000. Predicting tunnel squeezing problems in weak heterogeneous rock masses. *Tunnels and Tunnelling International*, *32*(11), pp. 45-51.

8. Tajdid Khaje, M., Ranjbarnia, M., and Nourani, V., 2019. Study of geotechnical parameters uncertainties in analysis of new tunnel construction over the existing tunnel. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, *51*(4), pp. 817-830 [in Persian]. DOI: https://doi.org/10.22060/CEEJ.2018.13969.5522.

9. Zaheri, M., Ranjbarnia, M., and Oreste, P., 2024. Reliability analysis of deep pressurized tunnels excavated in the rock mass with rheological behavior. *Transportation Geotechnics*, *45*, pp. 101212. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101212.

10. Jafarian, Y., and Miraei, M., 2016. Probabilistic seismic vulnerability of caisson quay walls: case study of kobe port. *Sharif Journal of Civil Engineering*, *31*(4.2), pp. 3-12 [in Persian]. DOI: https://doi.org/20.1001.1.26764768.1394.312.42.2.1.

11. Sharafati, A., Kolachian, R., Nayyeri, M., and Nemati, M., 2018. Extraction of probability distribution of stability safety factor using lhs and glue methods (case study: parsian dam. *Sharif Journal of Civil Engineering*, *34*(1.2), pp. 25-42 [in Persian]. DOI: https://doi.org/20.1001.1.26764768.1397.342.12.5.6.

12. Fenton, G. A., and Griffiths, D. V., 2002. Probabilistic Foundation Settlement on Spatially Random Soil. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, *128*(5), pp. 381-390. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:5(381).

13. Fenton, G. A., and Griffiths, D. V., 2003. Bearing-capacity prediction of spatially random c - ϕ soils. *Canadian Geotechnical Journal, 40*(1), pp. 54-65. DOI: https://doi.org/10.1139/t02-086.

14. Ranjbar Pouya, K., Zhalehjoo, N., and Jamshidi Chenari, R., 2014. Influence of random heterogeneity of cross-correlated strength parameters on bearing capacity of shallow foundations. *Indian Geotechnical Journal, 44*(4), pp. 427-435. DOI: https://doi.org/10.1007/s40098-013-0096-9.

15. Chen, H., Wang, L., Tian, Y., and Qi, C., 2023. Probabilistic bearing capacities of strip foundation on two-layered clay. *Ocean Engineering*, *269*, pp. 113572. DOI: https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.113572.

16. Ranjbarnia, M., Zarei, F., and Goudarzy, M., 2023. Probabilistic analysis of bearing capacity of square and strip foundations on rock mass by the response surface methodology. *Rock Mechanics and Rock Engineering, 56*(1), pp. 343-362. DOI: https://doi.org/10.1007/s00603-022-03090-5.

17. Chu, Z., Wu, Z., Liu, Q., and Liu, B., 2020. Analytical solutions for deep-buried lined tunnels considering longitudinal discontinuous excavation in rheological rock mass. *Journal of Engineering Mechanics, 146*(6), pp. 04020047. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)EM.1943-7889.0001784.

18. Zaheri, M., and Ranjbarnia, M., 2023. Long-term analysis of tunnels in rheological rock masses considering the excavation-damaged zone. *International Journal of Geomechanics, 23*(1), pp. 04022266. DOI: https://doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0002642.

19. Zaheri, M., and Ranjbarnia, M., 2023. Theoretical and numerical analyses of squeezing rock mass around a spherical opening considering the existence of a damaged zone. *Amirkabir Journal of Civil Engineering*, *54*(11), pp. 4215-4238 [in Persian] DOI: https://doi.org/10.22060/CEEJ.2022.20529.7452.

20. Zaheri, M., Ranjbarnia, M., and Goudarzy, M., 2022. Analytical and numerical simulations to predict the long-term behavior of lined tunnels considering excavation-induced damaged zone. *Rock Mechanics and Rock Engineering, 55*(10), pp. 5879-5904. DOI: https://doi.org/10.1007/s00603-022-02962-0.

21. Zaheri, M., Ranjbarnia, M., and Zareifard, M. R., 2023. A theoretical solution to investigate long-term behavior of pressurized tunnels in severe squeezing conditions. *Computers and Geotechnics, 159*, 105499. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2023.105499.

22. Zaheri, M., Ranjbarnia, M., and Oreste, P., 2025. Long-term interaction of submerged tunnels with rheological rock masses and time-dependent permeability. *Geotechnical and Geological Engineering*, *43*(4), pp. 1-23. https://doi.org/10.1007/s10706-025-03103-4

23. Hoek, E., 1990. Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, *27*(3), pp. 227-229.

24. Hoek, E., and Brown, E. T., 2019. The Hoek–Brown failure criterion and GSI – 2018 edition. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, *11*(3).

25. Zaheri, M., Rahimpour, N., 2022. A guide to FLAC3D software based on practical examples, *Jihad Amirkabir University Publishing*, Tehran, Iran. [In Persian].

26. Wyllie, D. C., 2003. Foundations on rock: engineering practice. *CRC Press*.

27. Zaheri, M., and Ranjbarnia, M., 2024. 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*, pp. 106299. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106299.

28. Meyerhof, G. G., 1957. The ultimate bearing capacity of foundations on slopes. In *Proc., 4th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering,* pp. 384-386.

29. Hoek, E., and Brown, E. T., 1997. Practical estimates of rock mass strength. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, *34*(8), pp. 1165-1186. DOI: https://doi.org/10.1016/S1365-1609(97)80069-X.

30. Hoek, E., Kaiser, P. K., and Bawden, W. F., 2000. Support of underground excavations in hard rock. *CRC Press*.