University Of Qom

Civil Infrastructure Researches

Online ISSN: 2783-140X
journal homepage: https://cer.qom.ac.ir/

Probabilistic Prediction of Ground Reaction Curves in Poor Rock Masses Using MARS

Amir Hossein Shafiee[1]✉, **Hamzeh Yeganehmehr**[2]

1. Corresponding author, Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: am.shafiee@scu.ac.ir
2. MSc student, Department of Civil Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran. E-mail: Ha-yeganehmehr@stu.scu.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 01 Apr 2026
Accepted 06 Jun 2026
Published 07 Jun 2026

Keywords:
Poor Rock,
Ground Reaction Curve,
MARS,
Circular Tunnel,
Probabilistic Approach.

ABSTRACT

Tunnels are recognized as critical infrastructure components in modern societies. The optimal design of tunnels requires a comprehensive understanding of their behavior under various geotechnical conditions. The ground reaction curve (GRC), which describes the relationship between tunnel convergence and support pressure, is a fundamental element of the convergence–confinement method in tunnel design. To date, numerous approaches have been proposed for constructing ground reaction curves, most of which are deterministic in nature. In the present study, a probabilistic framework is developed to derive ground reaction curves for shallow tunnels excavated in poor rock masses. For this purpose, appropriate probability distributions were assigned to the geomechanical properties of the considered rock class. Subsequently, 100 stochastic realizations were generated from these distributions. All cases were analyzed using numerical modeling based on the finite element method, and the corresponding ground reaction curves were obtained. Finally, a predictive model for the ground reaction curve was established using multivariate adaptive regression splines (MARS). Statistical evaluation indicates that the proposed model achieves a coefficient of determination (R^2) of 0.982, demonstrating high predictive accuracy. Furthermore, the results reveal that the at-rest lateral earth pressure coefficient (K_0) has a negligible influence on the resulting ground reaction curves.

Cite this article: Shafiee AH, Yeganehmehr H. Probabilistic Prediction of Ground Reaction Curves in Poor Rock Masses Using MARS. Civil Infrastructure Researches. 2026; 12(1): 77-89. https://doi.org/10.22091/cer.2026.15638.1677

Publisher: University of Qom.
© The Authors.

Introduction

Tunnel excavation induces stress redistribution in the surrounding ground, which is accompanied by radial deformations, the formation of a plastic zone, and, in some cases, progressive softening of the rock mass. The ground reaction curve (GRC) plays a central role in the convergence–confinement method. This curve represents the relationship between internal tunnel pressure and radial displacement and enables the determination of the equilibrium point between the ground and the support system.

Numerical approaches are powerful tools for analyzing complex geomechanical conditions and deriving ground reaction curves under various scenarios. However, their results are generally dependent on modeling assumptions and input parameter values, and therefore may not be directly generalized to other conditions.

Despite significant progress, a limitation remains: extensive numerical studies are frequently conducted, yet their results are often presented only as case-specific plots without yielding general predictive relationships. Conversely, many statistical and machine learning techniques operate as black-box models and do not provide explicit and interpretable equations. Accordingly, integrating a comprehensive numerical dataset with a flexible regression-based machine learning approach can address this limitation.

In the present study, ground reaction curves for circular tunnels in poor rock masses are obtained using finite element analysis based on the Mohr– Coulomb failure criterion. The geomechanical parameters are treated as stochastic variables, and a comprehensive series of simulations is performed to capture their variability. Subsequently, multivariate adaptive regression splines (MARS) are employed to develop an explicit predictive model relating the input variables to the ground response.

Problem Definition and Methodology

The tunnel analysis using convergence-confinement method is based on three foundations: ground reaction curve (GRC), support characteristic curve, and the longitudinal displacement profile. The convergence-confinement method indeed substitutes the rigorous three-dimensional analysis with a simple two-dimensional one. The tunnel's face advance is simulated by reducing stress on the tunnel wall. This 2-D analysis, considers tunnel as a plane-strain problem, and defines stress on tunnel wall as follows:

$$\sigma_R = (1 - \lambda)\sigma_0 \qquad (1)$$

where σ_R is the radial stress on tunnel wall, and λ is called the deconfinement ratio.

The present problem consists of a circular tunnel with a diameter *D*, located in a depth *z* from the ground surface. The modeling was performed as plane-strain using finite element method. It should be mentioned that in the present study, the probabilistic approach is used to assign material properties of poor rocks. The Mohr-Coulomb criterion was used for material.

The probabilistic approach used in the present study is so that a distribution function was assigned to the friction angle, cohesion, and modulus of elasticity. In the next step, 100 data were extracted randomly from each of the mentioned distribution functions.

The modeling was carried out considering two diameters of 8 m and 12 m, and three depths of 20 m, 40 m, and 60 m. Thus, a total number of 600 cases including 6 geometries and 100 material properties was considered. At last, the average and average ± one standard deviation GRCs are obtained for each case.

Results and Discussion

It was observed that the average and average ± standard deviation GRCs are closer to each other as 1– λ increases in all cases. The comparison of average GRCs also showed that deformation increases with an increase in both tunnel depth and diameter.

The multivariate adaptive regression splines (MARS) method was implemented to derive a model for GRC prediction. The analysis of relative importance (*RI*) of each input parameter showed that the at-rest lateral

earth pressure coefficient (K_0) has negligible effect on the resulting GRC. Thus, K_0 was removed from the model derivation process. The final resulting model consisting of 13 basis functions and an intercept is as follows:

$$1-\lambda = -0.635397 + 6.9826BF_1 + 0.0441028BF_2 - 0.0927325BF_3 + 1.16763BF_4 - 1.434316BF_5 + 3.37815BF_6 - 6.28489\times10^{-6}BF_7 + 1.51866\times10^{-5}BF_8 + 0.00215096BF_9 - 11.0986BF_{10} + 16.318BF_{11} + 10.9219BF_{12} - 0.000489075BF_{13}) \quad (2)$$

where BF_i is the ith basis function. Table 1 shows the equation of basis functions.

Table 1. Equation of basis functions

BF	Equation
1	Max (0, 0.0291667−*u*/*R*%)
2	Max (0, *γz*/*c*−5.48602)
3	Max (0, 5.48602− *γz*/*c*)
4	Max (0, 0.11375− *u*/*R*%)
5	Max (0, 0.0291667− *u*/*R*%) ×max (0, *γz*/*c* −3.90836)
6	Max (0, 0.0291667− *u*/*R*%) ×max (0, 3.90836− *γz*/*c*)
7	Max (0, *E*/*c*−17763.3)
8	Max (0,17763.3− *E*/*c*)
9	Max (0, *E*/*c*−17763.3) ×max (0, 0.00166667− *u*/*R*%)
10	Max (0, *u*/*R*%−0.05375)
11	Max (0, 0.05375− *u*/*R*%)
12	Max (0, *u*/*R*%−0.00666667)
13	Max (0, 17763.3− *E*/*c*) ×max(0, 0.0191667− *u*/*R*%)

where u is the deformation of the tunnel crown, R is the tunnel radius, and E, c, and γ are modulus of elasticity, cohesion, and unit weight of the surrounding material, respectively.

The proposed model (Eq. 2) has a coefficient of determination (R^2) of 0.982 and a mean absolute error (*MAE*) of 0.025 showing the very high accuracy of it. Having determined the relative importance of each of the model parameters, it was observed that showed that u/R% has the highest importance, as expected. Next, $\gamma z/c$ with *RI* = 12.7%, and E/c with *RI* = 1. 3% lie in the subsequent ranks of *RI*.

Conclusions

In the present study, the GRC was obtained for poor rock class. For this purpose, a probabilistic approach was used, and the mean and mean ± standard deviation ground reaction curves were obtained for circular tunnels embedded in a Mohr-Coulomb material. The results showed that the standard deviation decreases with an increase in deformations. It was also observed that the crown deformation increases with increases in both tunnel depth and diameter.

Later, the MARS approach which is a machine learning method was implemented to propose a model for GRC estimation, as an innovation. The proposed model consists of 13 basis functions and an intercept. The statistical analysis of the model showed that the effect of at-rest lateral earth pressure coefficient is negligible. The model has a coefficient of determination of 0.982 showing the high accuracy of it.

Funding Statement

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

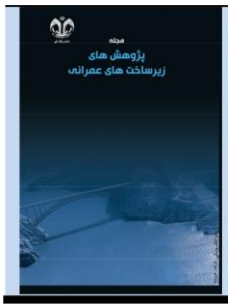
Declaration of Competing Interest

■ **No competing interests:** The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Authors' Contributions

Amir Hossein Shafiee:
Conceptualization; Methodology; Supervision; Roles/Writing – original draft;

Hamzeh Yeganehmehr:
Data curation; Formal analysis; Software; Writing – review & editing.



پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی

دانشگاه قم

شاپا الکترونیکی: ۲۷۸۳ -۱۴۰x

صفحه خانگی مجله: https://cer.qom.ac.ir/

پیش‌بینی احتمالاتی منحنی‌های مشخصه زمین در توده سنگ‌های ضعیف با استفاده از مارس

امیرحسین شفیعی[۱]✉، حمزه یگانه مهر[۲]

۱. نویسنده مسئول، استادیار، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: am.shafiee@scu.ac.ir

۲. دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، دانشکده مهندسی عمران و معماری، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران. رایانامه: ha-yeganehmehr@stu.scu.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۱/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۳/۱۶

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۳/۱۷

کلیدواژه‌ها:
تونل دایروی،
منحنی مشخصه زمین،
روش احتمالاتی،
سنگ ضعیف.

چکیده

امروزه، تونل‌ها به عنوان یکی از زیرساخت‌های حیاتی در جوامع توسعه یافته شناخته می‌شوند. طراحی بهینه تونل‌ها نیازمند شناخت رفتار تونل‌ها تحت شرایط مختلف است. منحنی مشخصه (واکنش) زمین که در واقع نمایانگر تغییرشکل تونل تحت سربار وارده است، یکی از مولفه‌های اصلی طراحی تونل به روش همگرایی- همجواری محسوب می‌شود. روش‌های مختلفی برای ترسیم منحنی مشخصه زمین تاکنون ارائه شده است که اکثر قریب به اتفاق آن‌ها روش‌های قطعی هستند. در مطالعه حاضر، تلاش شده است که به روشی احتمالاتی، منحنی‌های مشخصه برای تونل‌هایی با اعماق کم که در توده سنگ‌های رده ضعیف اجرا می‌شوند به‌دست آورده شوند. بدین منظور، ابتدا به مشخصات ژئومکانیکی این رده سنگ‌ها توابع توزیعی تخصیص داده شد. سپس از این توابع توزیع، داده هایی تصادفی استخراج گردید. پس از آن، به کمک مدل‌سازی عددی به روش اجزا محدود تمامی حالات مدنظر تحلیل و منحنی مشخصه زمین به‌دست آورده شد. در انتها، به روش اسپلاین‌های رگرسیونی تطبیقی چندمتغیره مدلی برای تخمین منحنی مشخصه زمین ارائه گردید. نتایج تحلیل‌های آماری نشان داد که مدل پیشنهادی دارای ضریب تعیین $R^2 = 0.982$ است. همچنین مشاهده گردید که ضریب فشار جانبی حالت سکون K_0 حداقل تأثیر را بر منحنی‌های مشخصه حاصله دارد.

استناد: شفیعی امیرحسین، یگانه مهر حمزه. پیش‌بینی احتمالاتی منحنی‌های مشخصه زمین در توده سنگ‌های ضعیف با استفاده از مارس. *پژوهش‌های زیرساخت‌های عمرانی*. ۱۴۰۵؛ ۱۲(۱): ۷۷-۸۹. https://doi.org/10.22091/cer.2026.15638.1677

ناشر: دانشگاه قم.

© نویسندگان.

شناسه دیجیتال: https://doi.org/10.22091/cer.2026.15638.1677

۱- مقدمه

طراحی ایمن و در عین حال اقتصادی تونل‌ها در سنگ‌های ضعیف از چالش‌های اساسی در مهندسی ژئوتکنیک به شمار می‌رود. حفاری تونل منجر به بازتوزیع تنش‌ها در اطراف مقطع شده و این فرآیند معمولا با بروز تغییرشکل‌های شعاعی، تشکیل ناحیه پلاستیک و در برخی موارد نرم‌شدگی تدریجی توده‌سنگ همراه است. از این‌رو، پیش‌بینی دقیق میزان تغییرشکل‌ها نقش مهمی در تعیین زمان مناسب نصب، همچنین سختی و ظرفیت سیستم نگهدارنده دارد. در این زمینه، روش همگرایی- همجواری به‌عنوان یکی از رویکردهای تحلیلی پرکاربرد، ارتباط میان رفتار زمین و عملکرد سیستم نگهدارنده را به‌خوبی تبیین می‌کند [۱].

در روش همگرایی- همجواری، منحنی مشخصه (واکنش) زمین[1]، جایگاه ویژه‌ای دارد. این منحنی، رابطه بین فشار داخلی تونل و جابه‌جایی شعاعی دیواره را نشان داده و امکان تعیین شرایط تعادل میان زمین و سیستم نگهدارنده را فراهم می‌سازد. براون[2] و همکاران با ارائه یک چارچوب تحلیلی بر مبنای رفتار الاستوپلاستیک محیط پیوسته، زمینه استخراج این منحنی را فراهم کردند [۲]. پس از آن، پژوهشگران متعددی با در نظر گرفتن شرایط مختلف تنش برجا، هندسه مقطع و مدل‌های رفتاری گوناگون، فرم‌های تحلیلی متنوعی برای منحنی مشخصه زمین ارائه کرده‌اند [۳-۵].

با توسعه روش‌های عددی، به‌ویژه تحلیل اجزای محدود، امکان شبیه‌سازی دقیق‌تر رفتار غیرخطی توده‌سنگ و بررسی اندرکنش زمین- پوشش فراهم شده است. در این راستا، مطالعاتی نظیر آلونسو[3] و همکاران، با استفاده از مدل‌سازی عددی، تأثیر پارامترهای مقاومتی و شرایط تنش اولیه را بر پاسخ تونل مورد بررسی قرار داده‌اند [۶]. همچنین در پژوهش اُرسته[4] رفتار سیستم نگهدارنده و توزیع تنش در اطراف تونل به‌صورت عددی تحلیل شده و نقش ویژگی‌های مکانیکی توده‌سنگ و سختی سیستم نگهدارنده در کنترل همگرایی تونل مورد ارزیابی قرار گرفته است [۷]. نتایج این‌گونه مطالعات نشان می‌دهد که روش‌های عددی ابزار مؤثری برای تحلیل شرایط پیچیده ژئومکانیکی و استخراج منحنی مشخصه زمین در سناریوهای مختلف هستند. با این حال، نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی به‌شدت به فرضیات مدل، شرایط مرزی و مقادیر پارامترهای ورودی وابسته‌اند و تعمیم مستقیم آن‌ها به سایر شرایط یا استفاده سریع از آن‌ها در طراحی مهندسی همواره با محدودیت‌هایی همراه است. از این‌رو، توسعه روابط صریح و کاربردی که بتوانند حجم زیادی از نتایج عددی را در قالب معادلات مهندسی ساده و قابل استفاده خلاصه کنند، همچنان یک نیاز مهم در این حوزه محسوب می‌شود.

در مرور مطالعات انجام‌شده در زمینه استخراج منحنی مشخصه زمین نیز مشاهده می‌شود که اغلب پژوهش‌ها بر حل‌های تحلیلی یا عددی با پارامترهای قطعی متمرکز بوده‌اند و عدم‌قطعیت پارامترهای ژئومکانیکی به‌صورت نظام‌مند در آن‌ها لحاظ نشده است. در میان مقالات بررسی‌شده، تنها پژوهشی که به‌طور مشخص تحلیل احتمالاتی را در چارچوب منحنی مشخصه زمین به‌کار گرفته است، مطالعه سانگ[5] و همکاران است. در این تحقیق، پارامترهای مقاومتی توده‌سنگ به‌صورت متغیرهای تصادفی با ضریب تغییرات مشخص در نظر گرفته شده و اثر پراکندگی آن‌ها بر پاسخ زمین و منحنی مشخصه مورد ارزیابی قرار گرفته است [۸].

از نظر مدل رفتاری، هرچند در بسیاری از مطالعات اخیر از معیار هوک- براون استفاده شده است، معیار موهر- کولمب همچنان به‌دلیل سادگی، شفافیت پارامترها و

[1]- Ground Reaction Curve
[2]- Brown
[3]- Alonso
[4]- Oreste
[5]- Song

کاربرد گسترده در پروژه‌های مهندسی، جایگاه خود را حفظ کرده است. استفاده از این معیار، امکان بیان نتایج برحسب پارامترهای متداول ژئوتکنیکی، نظیر چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی، را فراهم می‌کند و به همین دلیل، در آن دسته از مطالعاتی که هدف آن‌ها ارائه روابط مهندسی قابل استفاده در عمل است، گزینه‌ای مناسب به شمار می‌رود [۹ و ۱۰].

با وجود پیشرفت‌های صورت‌گرفته، همچنان یک خلأ پژوهشی قابل توجه در این حوزه دیده می‌شود. از یک‌سو، تحلیل‌های عددی گسترده‌ای انجام شده است، اما نتایج آن‌ها اغلب به‌صورت نمودارها یا بررسی‌های موردی باقی مانده و به روابط صریح قابل استفاده در طراحی تبدیل نشده‌اند. از سوی دیگر، بسیاری از روش‌های یادگیری ماشین، علی‌رغم دقت بالا، روابطی ارائه می‌کنند که تفسیر مهندسی آن‌ها به‌سادگی امکان‌پذیر نیست. از این‌رو، ترکیب یک پایگاه داده عددی جامع با یک روش رگرسیونی انعطاف‌پذیر و در عین حال قابل تفسیر، می‌تواند رویکردی مؤثر برای پر کردن این شکاف باشد.

در پژوهش حاضر، منحنی‌های مشخصه زمین برای تونل دایره‌ای در سنگ ضعیف با استفاده از تحلیل اجزای محدود و بر مبنای معیار گسیختگی موهر- کولمب به دست آورده شده‌اند. پارامترهای ژئومکانیکی به‌صورت متغیرهای تصادفی در نظر گرفته شده و مجموعه‌ای جامع از شبیه‌سازی‌ها برای پوشش دامنه تغییرپذیری آن‌ها انجام شده است. سپس، به‌منظور استخراج روابط صریح بین پارامترهای ورودی و پاسخ زمین، از روش مارس (MARS[۶]) استفاده شده است. این روش با استفاده از توابع پایه قطعه‌ای، قادر است روابط غیرخطی پیچیده را به‌صورت معادلات صریح و تفسیرپذیر ارائه کند.

نوآوری اصلی این تحقیق در به‌کارگیری رویکرد احتمال‌محور مبتنی بر شبیه‌سازی عددی و استخراج معادلات صریح پیش‌بینی‌کننده منحنی مشخصه زمین با استفاده از روش مارس است. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که صرفا به تحلیل عددی پرداخته‌اند، در این پژوهش تلاش شده است تا مدلی ارائه شود که هم دقت عددی کافی داشته باشد و هم در قالب روابط مهندسی قابل استفاده در طراحی اولیه تونل‌ها باشد.

ساختار مقاله به این صورت است: در بخش بعد، روش مارس با جزئیات شرح داده خواهد شد. پس از آن، به برخی روابط نظری منحنی مشخصه زمین اشاره می‌شود. آنگاه، به تعریف مساله و روش انجام این تحقیق پرداخته می شود. سپس، نتایج تحلیل‌ها و رابطه نهایی پیشنهادی مطرح شده و در پایان، جمع‌بندی و پیشنهادهایی برای کاربردهای مهندسی آینده ارائه می‌شود.

۲- مارس

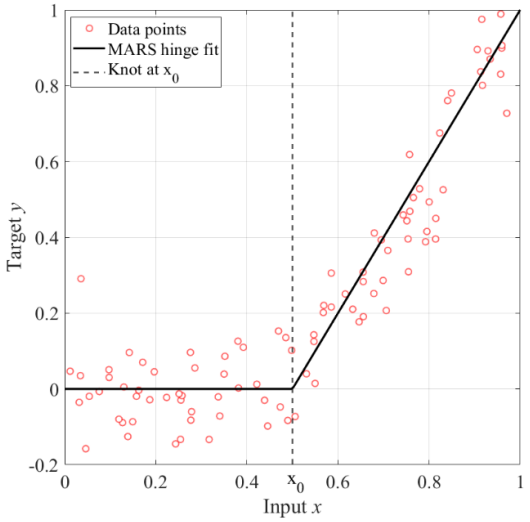
روش اسپلاین‌های رگرسیونی تطبیقی چندمتغیره (مارس) یک روش رگرسیون غیرپارامتریک و منعطف است که توسط فریدمن معرفی شد [۱۱]. این روش برای مدل‌سازی روابط غیرخطی و پیچیده بسیار مناسب است، زیرا تابع هدف را به چند بخش ساده‌تر تقسیم می‌کند و در هر بخش، یک تقریب خطی تکه‌ای به‌کار می‌گیرد. نقاطی که این تقسیم‌بندی در آن‌ها انجام می‌شود، به‌صورت خودکار از میان داده‌ها انتخاب می‌شوند و مدل فقط آن بخش‌هایی را نگه می‌دارد که واقعا به بهبود دقت پیش‌بینی کمک می‌کنند. پایه اصلی این روش، مجموعه‌ای از توابع پایه لولایی[۷] است که در یک سمت نقطه گره[۸] فعال می‌شوند. یک تابع پایه لولایی ساده به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\mathrm{b}(x, x_0) = \max(0, x_0 - x) \qquad (۱)$$

شکل ۱ نشان می‌دهد که چگونه یک تابع لولایی در نقطه x_0 می‌تواند مجموعه‌ای از داده‌های پراکنده را به یک

[6]- Multivariate Adaptive Regression Splines
[7]- Hinge Basis Functions
[8]- Knot

برازش خطی تکه‌ای تبدیل کند. همچنین، با ضرب این توابع در ورودی‌های مختلف، مارس قادر است اثرات متقابل بین متغیرها را نیز شناسایی کند.



شکل ۱- تابع پایه لولایی

فرایند مدل‌سازی در مارس به صورت داده‌محور است. در ابتدا یک جمله ثابت c_0 به مدل افزوده می‌شود و سپس در فاز جلو رونده[9]، توابع پایه به‌تدریج وارد مدل می‌شوند؛ به‌گونه‌ای که در هر گام، تابعی انتخاب می‌شود که بیشترین کاهش خطای آموزش را ایجاد کند. با ادامه این روند، مدل عمدا تا حدی بیش‌برازش می‌شود تا فضای مناسبی برای شناسایی روابط مهم فراهم گردد. پس از آن، در فاز هرس عقب‌رونده[10]، توابع پایه‌ای که نقش کمی در بهبود مدل دارند حذف می‌شوند تا ساختار نهایی بهینه به دست آید. شکل کلی مدل نهایی به صورت زیر است:

$$f(x) = c_0 + \sum_{i=1}^{N} c_i . BF_i(x) \qquad (۲)$$

که در آن $BF_i(x)$ می‌تواند یک تابع پایه لولایی یا حاصل‌ضرب چند تابع پایه (با درجه اندرکنش H) باشد و c_i ضرایب برآوردشده با روش حداقل مربعات است. حداکثر درجه اندرکنش نیز به‌عنوان یک پارامتر کنترلی در مدل در نظر گرفته می‌شود.

برای جلوگیری از بیش‌برازش، مارس از پارامتری به نام اعتبارسنجی متقاطع تعمیم‌یافته (GCV[11]) استفاده می‌کند. برای داده‌های آموزشی با m مشاهده و مدل شامل n تابع پایه (به جز جمله عرض از مبدأ) و ضریب هموارکننده d (پیش‌فرض مساوی ۳)، مقدار GCV به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$GCV = \frac{\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}[y_i - f(x_i)]^2}{\left[1-\frac{n + d \times (n-1)/2}{m}\right]^2} \qquad (۳)$$

این شاخص میان دو هدف مهم توازن برقرار می‌کند: از یک طرف دقت برازش، و از طرف دیگر، سادگی مدل. به بیان دیگر، GCV کمک می‌کند مدلی انتخاب شود که نه خیلی ساده باشد و نه آن‌قدر پیچیده که دچار بیش‌برازش شود. یکی از مزایای دیگر مارس وجود معیار اهمیت متغیرها است. برای هر متغیر پیش‌بینی j، با حذف تمام توابع پایه شامل x_j و محاسبه مجدد GCV، تغییر ΔGCV_j به دست می‌آید:

$$\Delta GCV_j = GCV_{j\,\text{بدون}} - GCV_{\text{کامل}} \qquad (۴)$$

اهمیت نسبی (RI) نیز به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$RI_j = \frac{\Delta GCV_j}{\max_k \Delta GCV_k} \times 100\% \qquad (۵)$$

این رتبه‌بندی نشان می‌دهد کدام متغیرها بیشترین تأثیر را بر عملکرد مدل دارند و به همین دلیل، برای تفسیر نتایج بسیار مفید است. مارس به دلیل ترکیب هم‌زمان انعطاف‌پذیری و قابلیت تفسیر، در میان روش‌های غیرخطی جایگاه ویژه‌ای دارد. از آنجا که مدل نهایی به صورت جمعی از توابع پایه قطعه‌ای نوشته می‌شود، می‌توان آن را به صورت یک رابطه جبری صریح بررسی و حتی مستقیما در محاسبات مهندسی به کار برد. نقاط گره و توابع پایه لولایی نیز به‌صورت خودکار تعیین می‌شوند، بنابراین نیازی به تنظیم دستی نواحی تقسیم‌بندی یا توابع عضویت وجود

[9]- Forward Phase
[10]- Backward Pruning
[11]- Generalized Cross-Validation

ندارد. از سوی دیگر، مرحله هرس عقب‌رونده که بر پایه GCV انجام می‌شود، هر تابعی را که سهم مؤثری در بهبود دقت نداشته باشد حذف می‌کند. همچنین با تعیین حداکثر درجه اندرکنش، مارس می‌تواند هم روابط جمعی ساده و هم اثرات مرتبه بالاتر را در نظر بگیرد. لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر، فرایند اجرای مارس تا زمانی ادامه یافت که کاهش مقدار GCV نسبت به گام قبل کمتر از ۰/۰۰۰۱ شود.

در سال‌های اخیر، مارس در مسائل مختلف ژئوتکنیک کاربرد داشته است، از جمله بررسی پایداری تونل‌های زیردریا، ظرفیت کششی مهارهای دفن‌شده در ماسه، پیش‌بینی نشست حاصل از روانگرایی، پیش‌بینی قابلیت زمین لغزش و تخمین ضریب بازگشت سنگ آهک [۱۲-۱۶]. برای مشاهده سایر کاربردهای روش مارس در مسائل ژئوتکنیکی می‌توان به ژانگ[12] و همکاران رجوع نمود [۱۷].

۳- منحنی مشخصه زمین

روش همگرایی- همجواری برای تحلیل رفتار تونل بر سه مؤلفه اصلی تکیه دارد: منحنی مشخصه زمین، منحنی مشخصه پوشش و نیمرخ جابه‌جایی در امتداد طول تونل. ارزیابی کمی اندرکنش میان زمین و پوشش، کار ساده‌ای نیست، زیرا به عوامل متعددی وابسته است؛ از جمله وضعیت اولیه تنش‌ها، پارامترهای مدل‌های رفتاری زمین و پوشش و همچنین توالی حفاری و زمان نصب سیستم نگهدارنده. از سوی دیگر، برای در نظر گرفتن اثر پیشروی جبهه تونل، تحلیل سه‌بعدی نیز به‌طور طبیعی مطرح می‌شود. با این حال، در روش همگرایی- همجواری تلاش می‌شود این مسئله پیچیده سه‌بعدی با یک چارچوب ساده‌تر دوبعدی بیان شود. در این رویکرد، اثر پیشروی جبهه حفاری به‌صورت کاهش تدریجی تنش وارد بر دیواره تونل شبیه‌سازی می‌شود. تحلیل انجام‌شده در این حالت بر پایه فرض کرنش صفحه‌ای است و بر همین اساس، وضعیت تنش در دیواره تونل به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\sigma_R = (1-\lambda)\sigma_0 \qquad (۶)$$

که در آن σ_R تنش شعاعی در دیواره تونل و ضریب λ را نرخ ناهمجواری[13] می‌نامند که در وضعیت اولیه برابر صفر است و چنانچه تونل بدون پوشش باشد با پیشروی جبهه تونل این ضریب نیز افزایش می‌یابد تا در وضعیت نهایی به مقدار یک برسد. منحنی مشخصه زمین در واقع رابطه بین تنش و جابه‌جایی شعاعی دیواره تونل است. برای توضیحات بیشتر درباره روش همگرایی- همجواری می‌توان به مقالات پانه و سولم[14] و کارانزا- تورست و فیرهرست[15] رجوع نمود [۱ و ۴].

برای یک تونل با سطح مقطع دایروی که در یک محیط الاستیک تحت شرایط تنش ناهمسانگرد واقع شده است می‌توان نشان داد که تغییرشکل شعاعی تاج تونل (u_R) از رابطه زیر بدست می‌آید [۱]:

$$\frac{u_R}{R} = \frac{1}{2}\left(\frac{\lambda\sigma_0}{2G}\right)\left[\begin{matrix}(1+K_0)+\\(3-4\nu)(1-K_0)\end{matrix}\right] \qquad (۷)$$

که در آن G، ν و K_0 به ترتیب مدول برشی، نسبت پوآسون و ضریب فشار جانبی در حالت سکون هستند و R شعاع تونل است. با استفاده از روابط (۶) و (۷) می‌توان منحنی مشخصه زمین را برای یک محیط الاستیک ناهمسانگرد ترسیم نمود. چنانچه محیط رفتاری الاستوپلاستیک داشته باشد و از معیاری همچون موهر- کولمب پیروی کند در این صورت ترسیم منحنی مشخصه زمین به مراتب پیچیده‌تر خواهد شد. در این حالت، چنانچه مقدار λ از مقدار آستانه λ_e بیشتر باشد ناحیه‌ای حلقه‌ای به شعاع (R_p) پیرامون تونل به حالت پلاستیک در می‌آید (شکل ۲).

مقادیر λ_e و R_p را می‌توان از روابط (۸) و (۹) به‌دست آورد:

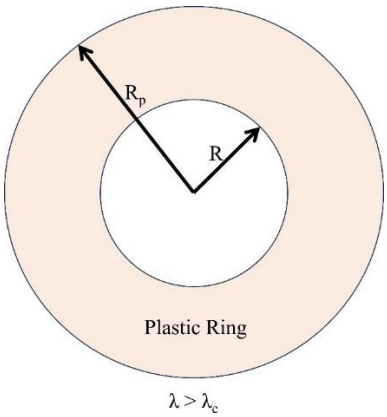
[12]- Zhang
[13]- Deconfinement Ratio
[14]- Panet and Sulem
[15]- Carranza-Torres and Fairhurst

$$\lambda_e = \frac{1}{K_P + 1}\left(K_p - 1 + \frac{\sigma_c}{\sigma_0}\right) \quad (۸)$$

$$\frac{R_p}{R} = \left[\frac{2\lambda_e}{(K_p+1)\lambda_e-(K_p-1)\lambda}\right]^{\frac{1}{K_p-1}} \quad (۹)$$

که در آن K_p ضریب فشار جانبی حالت مقاوم و σ_c مقاومت فشاری تک محوری ماده است که از رابطه (۱۰) حاصل می‌شود:

$$\sigma_c = \frac{2c\cos\varphi}{1-\sin\varphi} \quad (۱۰)$$



شکل ۲- تشکیل ناحیه پلاستیک پیرامون تونل

تغییرشکل جداره تونل برای مصالحی با زاویه اتساع ψ نیز از رابطه (۱۱) به‌دست می‌آید:

$$\frac{u_R}{R} = \left(\frac{\lambda_e\sigma_0}{2G}\right)\left[F_1 + F_2\left(\frac{R}{R_p}\right)^{K_p-1} + F_3\left(\frac{R_p}{R}\right)^{K_\psi+1}\right] \quad (۱۱)$$

که در آن:

$$F_1 = -(1-2\nu)\frac{K_p+1}{K_p-1}$$

$$F_2 = 2\frac{1+K_pK_\psi-\nu(K_p+1)(K_\psi+1)}{(K_p-1)(K_p+K_\psi)}$$

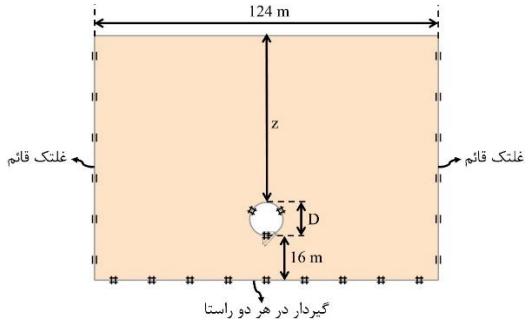
$$F_3 = 2(1-\nu)\frac{K_p+1}{K_p+K_\psi}$$

$$K_\psi = \frac{1+\sin\psi}{1-\sin\psi}$$

روند ترسیم منحنی مشخصه زمین در معیار موهر-کولمب بدین گونه است که ابتدا شعاع ناحیه پلاستیک از رابطه (۹) تعیین شود. سپس، برای نواحی درون ناحیه پلاستیک با استفاده از رابطه (۱۱) منحنی مشخصه ترسیم گردد و برای سایر نواحی از روابط الاستیک استفاده گردد.

۴- تعریف مساله و روش انجام پژوهش

مساله مورد مطالعه از یک تونل دایروی به قطر D تشکیل شده است که در عمق z از سطح زمین قرار دارد. مدل‌سازی به صورت کرنش صفحه‌ای در نرم‌افزار OPTUM G2 انجام گردید (شکل ۳) [۱۸]. ابعاد مدل به گونه‌ای انتخاب گردید که شرایط مرزی تاثیری بر پاسخ مساله نداشته باشند. پس از چندین مرتبه آزمون و خطا مشاهده گردید که مدلی با طول ۱۲۴ متر و فاصله قائم کف مدل تا کف تونل ۱۶ متر مناسب تمامی مدل‌های مدنظر است.



شکل ۳- هندسه مدل و شرایط مرزی

شرایط مرزی مدل به گونه‌ای در نظر گرفته شد که کف مدل در هر دو راستای افقی و قائم کاملا گیردار باشد و مرزهای قائم طرفین مدل صرفاً اجازه تغییرشکل در راستای قائم را داشته باشند. این نوع شرایط مرزی در مدل‌سازی‌های ژئوتکنیکی متداول است و در گذشته به دفعات در حل عددی مسائل مختلف به کار گرفته شده است [۱۹-۲۱].

لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر به منظور اختصاص ویژگی‌های مصالح محیط از ویژگی‌های رده سنگ‌های ضعیف[16] به صورت احتمالاتی استفاده گردید.

[16]- Poor Rocks

منظور از سنگ ضعیف، سنگی است که براساس طبقه‌بندی امتیاز توده سنگ، مقدار RMR آن در بازه ۲۱ تا ۴۰ (کلاس IV) قرار گیرد [۲۲]. دلیل انتخاب این دسته از سنگ‌ها برای مطالعه حاضر این است که مدل‌های اولیه نشان داد که چنانچه سنگ‌هایی با RMR بالاتر متعلق به کلاس‌های I تا III در نظر گرفته شود مقدار تغییرشکل تونل به شدت کم است و چنانچه از ویژگی‌های سنگ کلاس V با RMR کوچکتر از ۲۰ استفاده شد مقدار تغییرشکل محیط تونل به قدری بالا است که تونل در بسیاری از حالات دچار گسیختگی می‌شود و عملا امکان ترسیم کامل منحنی مشخصه زمین وجود نخواهد داشت. از مدل رفتاری موهر- کولمب برای مصالح استفاده گردید. طبق پیشنهاد بینیاوسکی زاویه اصطکاک (φ) سنگ‌های ضعیف در محدوده ۱۵ تا ۲۵ درجه و چسبندگی (c) آن ها در محدوده ۱۰۰ تا ۲۰۰ کیلوپاسکال قرار دارد [۲۲].

روش احتمالاتی به کار گرفته شده در مطالعه حاضر بدین صورت است که در ابتدا یک تابع توزیع به زاویه اصطکاک، چسبندگی و مدول الاستیسیته (E) اختصاص داده شد. بدین منظور، از روشی به نام قاعده 3σ استفاده گردید [۲۳]. این قاعده از این واقعیت بهره می‌گیرد که در یک تابع توزیع نرمال، ۹۹/۷٪ داده‌ها در بازه منفی و مثبت سه برابر انحراف معیار از میانگین قرار می‌گیرند. در این روش یک تابع توزیع نرمال به داده‌ها تخصیص داده می‌شود که مقدار میانگین (μ) و انحراف معیار (σ) آن از روابط (۱۲) و (۱۳) که در ادامه می‌آید، حاصل می‌شود:

$$\mu = \frac{HCV + LCV}{2} \qquad (۱۲)$$

$$\sigma = \frac{HCV - LCV}{6} \qquad (۱۳)$$

که در آن HCV حداکثر مقدار ممکن و LCV حداقل مقدار ممکن است. با اعمال قاعده 3σ، به زاویه اصطکاک یک تابع توزیع نرمال با میانگین ۲۰ درجه و انحراف معیار ۱/۷ درجه و به چسبندگی یک تابع توزیع نرمال با میانگین ۱۵۰ کیلوپاسکال و انحراف معیار ۱۶/۷ کیلوپاسکال تخصیص داده شد. پارامتر دیگری که نقشی تعیین کننده در میزان تغییرشکل تونل و در نتیجه منحنی مشخصه زمین دارد مدول الاستیسیته است. سرافیم[17] رابطه زیر را برای بدست آوردن E برحسب RMR پیشنهاد دادند [۲۴]:

$$E\ (GPa) = 10^{\left(\frac{RMR-10}{40}\right)} \qquad (۱۴)$$

رابطه (۱۴) برای مقادیر RMR کوچکتر از ۵۰ برقرار است که شامل مساله حاضر نیز می‌شود. چنانچه مقادیر حداقل و حداکثر RMR متناظر با دسته سنگ ضعیف (مقادیر ۲۱ و ۴۰) در رابطه (۱۴) جایگذاری شود به ترتیب دو مقدار ۱/۹ گیگاپاسکال و ۵/۶ گیگاپاسکال برای E به‌دست می‌آید. حال مجددا از قاعده 3σ استفاده کرده و تابع توزیع نرمالی به میانگین ۳/۷۵ گیگاپاسکال و انحراف معیار ۰/۶۲ گیگاپاسکال به مدول الاستیسیته تخصیص داده می‌شود. در گام بعد، به صورت تصادفی ۱۰۰ داده از هریک از توابع توزیع اشاره شده در پیش استخراج می‌شود. همچنین، برای تمامی مدل‌ها وزن مخصوص و نسبت پوآسون به ترتیب برابر ۲۵ کیلونیوتن بر مترمکعب و ۰/۳ در نظر گرفته شد که مقادیری منطقی برای بسیاری از انواع سنگ‌ها به شمار می رود.

از سوی دیگر، مدل‌سازی به ازای دو قطر متفاوت ۸ و ۱۲ متر و سه عمق مدفون ۲۰، ۴۰ و ۶۰ متر صورت پذیرفت. بنابراین، در کل ۶۰۰ حالت مختلف مشتمل بر شش هندسه مختلف و ۱۰۰ ویژگی مصالح متفاوت در نظر گرفته شد. در هریک از این حالات مقدار تغییرشکل در تاج تونل بازای مقادیر مختلف λ به شرح زیر به‌دست آورده شد:

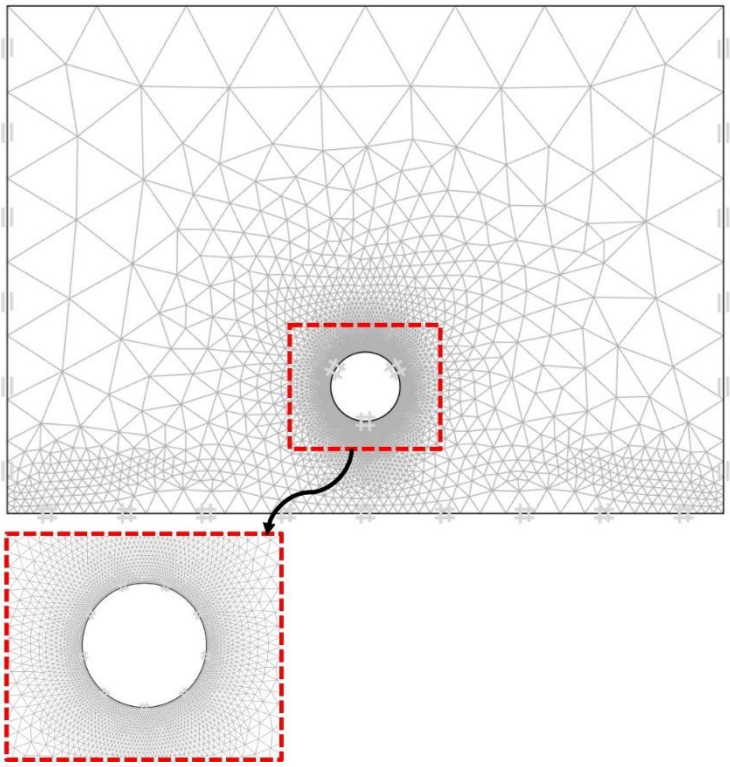
$1 - \lambda = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$

لازم به ذکر است که مقدار تغییرشکل در $\lambda = 0$ برابر صفر است. همچنین نرم‌افزار OPTUM G2 عملا مقدار 1λ (و نه خود λ) را به عنوان ورودی می‌گیرد. در انتها،

[17]- Serafim

منحنی مشخصه زمین میانگین و میانگین به علاوه و منهای انحراف معیار برای هریک از شش حالت اشاره شده به‌دست آورده شد.

در این مطالعه از تحلیل اجزای محدود الاستوپلاستیک با المان‌های مثلثی ۱۵ گره‌ای گوسی استفاده گردید. یکی از ویژگی‌های قابل توجه نرم‌افزار OPTUM G2 قابلیت مش‌بندی تطبیقی است. بدین صورت که ابتدا نرم‌افزار تعداد اولیه المان را از کاربر دریافت می‌کند. سپس در تعداد مشخصی تکرار[18]، به صورت خودکار و براساس اینکه در کدام نواحی اتلاف انرژی برشی[19] بیشتر است المان‌ها را ریزتر می‌کند. در مطالعه حاضر، تعداد ۱۰۰۰ المان اولیه، سه تکرار و ۵۰۰۰ تعداد نهایی المان برگزیده شد. انتخاب این مقادیر پس از چندین آزمون و خطا انتخاب گردید به گونه‌ای که تعداد المان‌ها به حدی باشد که هم از دقت کافی برخوردار باشد و هم بیش از حد زمانبر نباشد. یک نمونه مش‌بندی تطبیقی در شکل ۴ نشان داده شده است.



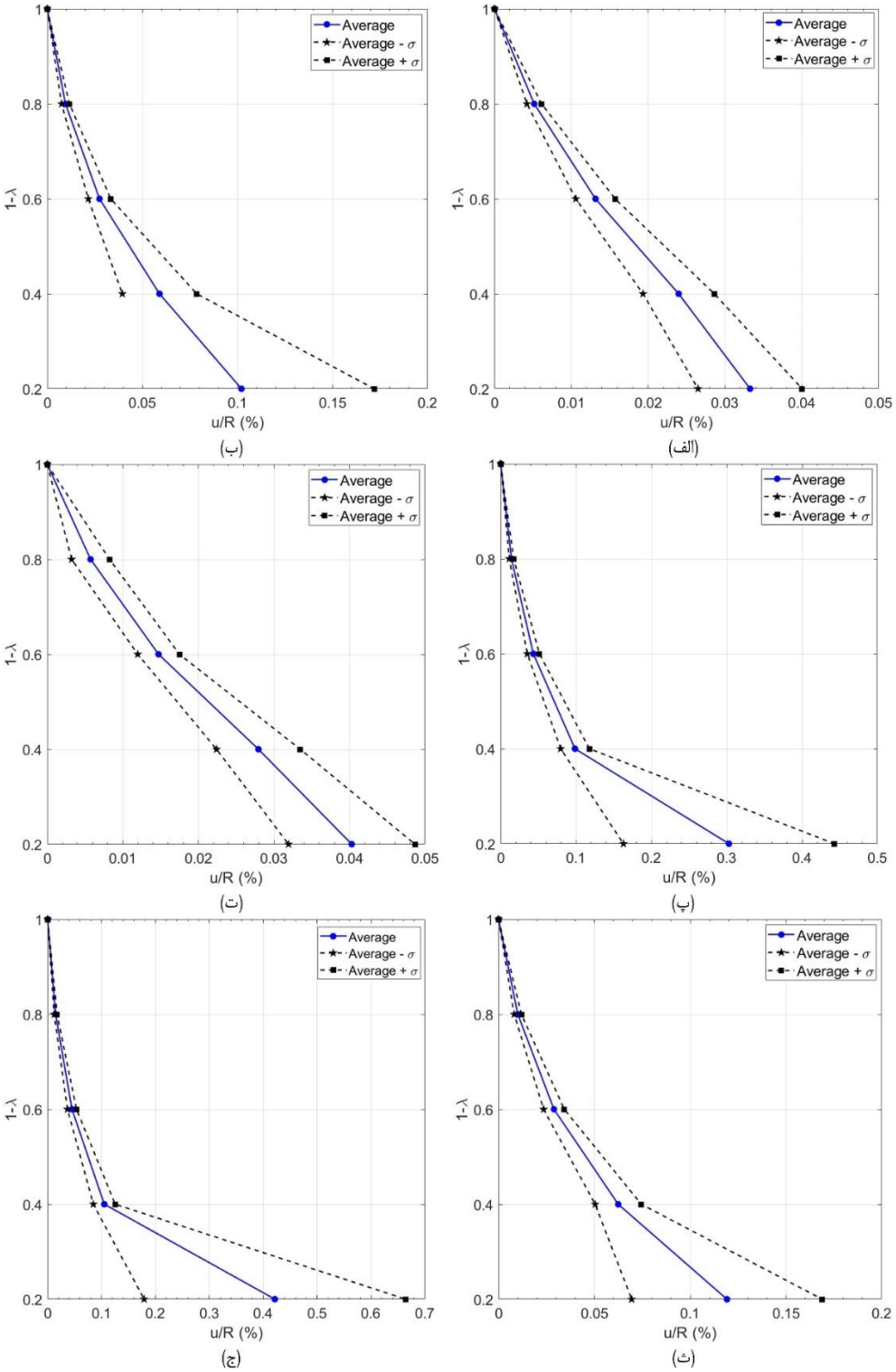
شکل ۴- یک نمونه مش تطبیقی

۵- نتایج

در شکل ۵، منحنی مشخصه زمین میانگین و میانگین به علاوه و منهای انحراف معیار برای هریک از شش حالت بررسی شده نشان داده شده است. لازم به یادآوری است که هرکدام از منحنی‌ها از نتایج تحلیل الاستوپلاستیک ۱۰۰ مدل با ویژگی‌های مصالح متفاوت و بازای مقادیر متفاوت λ به‌دست آمده‌اند. همانطور که در این شکل‌ها مشاهده می‌شود با افزایش مقدار λ-۱، در تمامی حالات، نمودارها به یکدیگر نزدیک‌تر می‌شوند که بیانگر این نکته است که انحراف معیار با λ-۱ نسبت عکس دارد. همچنین از شکل‌های ۵- پ و ۵- ج به روشنی دیده می‌شود که بازای مقادیر λ -۱ کوچک‌تر از ۰/۴، مقدار تغییرشکل‌ها با شیب تندتری افزایش می‌یابد و رفتار به وضوح غیرخطی است.

[18]- Iteration

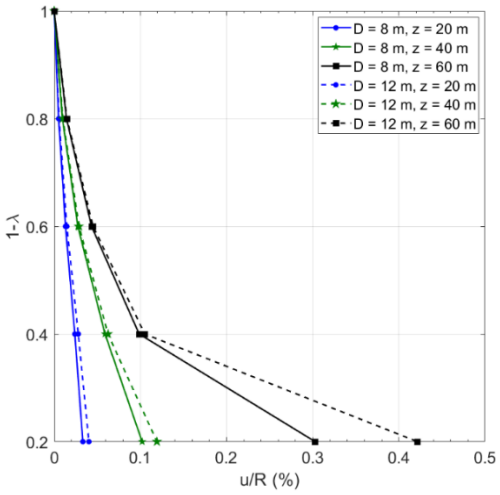
[19]- Shear Dissipation



شکل ۵- منحنی مشخصه زمین به ازای (الف) $z = 20\text{m}$ و $D = 8\text{ m}$، (ب) $z = 40\text{m}$ و $D = 8\text{ m}$، (پ) $z = 60\text{m}$ و $D = 8\text{ m}$، (ت) $z = 20\text{m}$ و $D = 12\text{ m}$، (ث) $z = 40\text{m}$ و $D = 12\text{ m}$، (ج) $z = 60\text{m}$ و $D = 12\text{ m}$.

به منظور مقایسه بهتر شش حالت مورد بحث، منحنی‌های مشخصه زمین میانگین این حالات در یک نمودار ترسیم شده‌اند (شکل ۶). شکل ۶، نشان می‌دهد که اولا با افزایش عمق تونل، میزان تغییرشکل‌ها نیز افزایش می‌یابد. این موضوع قابل پیش‌بینی بود زیرا با افزایش عمق، تنش بیشتری به تونل وارد می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که در عمق‌های مشخص، افزایش قطر از ۸ متر به ۱۲ متر موجب تغییرشکل اندکی بیشتر تاج تونل می‌شود.

این نکته نیز منطبق بر روابط نظری ارائه شده است (رابطه ۱۱).

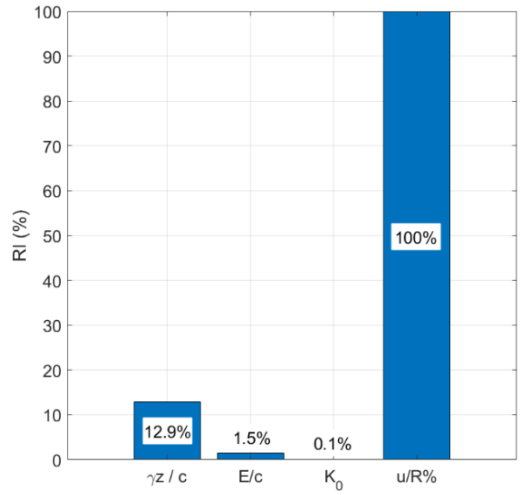


شکل ۶- مقایسه منحنی مشخصه زمین میانگین به ازای قطرها و اعماق مختلف

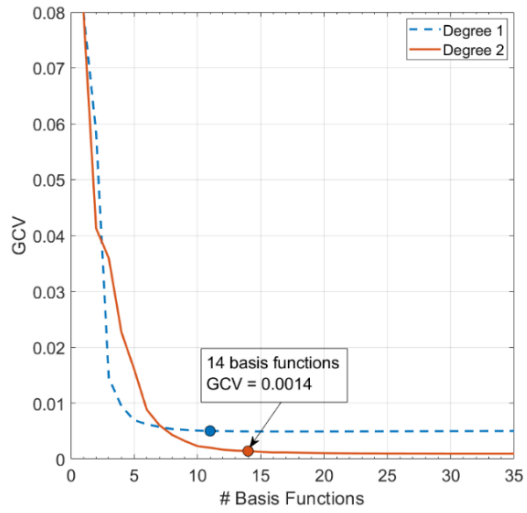
همانطور که در بخش پیشین اشاره شد از مارس برای به‌دست آوردن یک مدل جهت تخمین منحنی مشخصه زمین استفاده گردید. در کل، ۳۰۰۰ داده برای این منظور در دسترس بود که از ۱۰۰ ویژگی مصالح مختلف در شش هندسه مختلف و پنج مقدار λ متنوع تشکیل یافته بود. با توجه به تعداد بالای متغیرها، تصمیم بر این شد که رابطه‌ای به صورت زیر بین پارامترهای بی بعد استخراج شود:

$$1-\lambda = f(\frac{\gamma z}{c}, \frac{E}{c}, K_0, \frac{u}{R}\%) \qquad (۱۵)$$

لازم به ذکر است که نسبت‌های بی‌بعد موجود در رابطه (۱۵) از طریق تحلیل ابعادی به‌دست می‌آیند. در ابتدا، برای به دست آوردن درک درستی از میزان تأثیر هریک از پارامترهای رابطه (۱۵)، میزان اهمیت نسبی (RI) هریک از آن‌ها به‌دست آورده شد (شکل ۷). همان طور که در این شکل مشخص است میزان اهمیت نسبی K_0 نزدیک به صفر است. این موضوع در واقع به این دلیل است که از آنجا که در دسته سنگ‌های مورد بررسی، زاویه اصطکاک از ۱۵ درجه تا ۲۵ درجه متغیر است، مقدار K_0 در بازه ۰/۵۸ تا ۰/۷۴ تغییر می‌کند که در مقایسه بازه تغییرات سایر پارامترها ناچیز محسوب می‌شود و عملا تأثیر محسوسی ندارد. بنابراین مقدار K_0 از مدل حذف شد و مجددا روش مارس برای دستیابی به مدلی بهینه بر داده‌ها اعمال شد.



شکل ۷- اهمیت نسبی پارامترها در مدل اولیه.



شکل ۸- تغییرات GCV با تعداد توابع پایه

لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر دو مدل با درجات اندرکنش ۱ و ۲ استخراج گردید و از معیار GCV برای یافتن مدل بهینه استفاده شد. منظور از مدل با درجه یک مدلی است که توابع پایه آن هیچ اندرکنشی با یکدیگر ندارند و این در حالی است که مدل با درجه ۲ مدلی است که توابع پایه آن اندرکنشی از مرتبه اول با یکدیگر دارند. شکل ۸، تغییرات GCV با تعداد توابع پایه برای مدل‌هایی با درجه ۱ و ۲ را نشان می‌دهد. این شکل نشان می‌دهد که یک مدل درجه ۲ با تعداد ۱۴ عبارت، شامل یک عرض از مبدأ و ۱۳ تابع پایه، بهینه‌ترین مدل می‌باشد. رابطه مدل نهایی انتخابی با درجه اندرکنش ۲ به صورت زیر است:

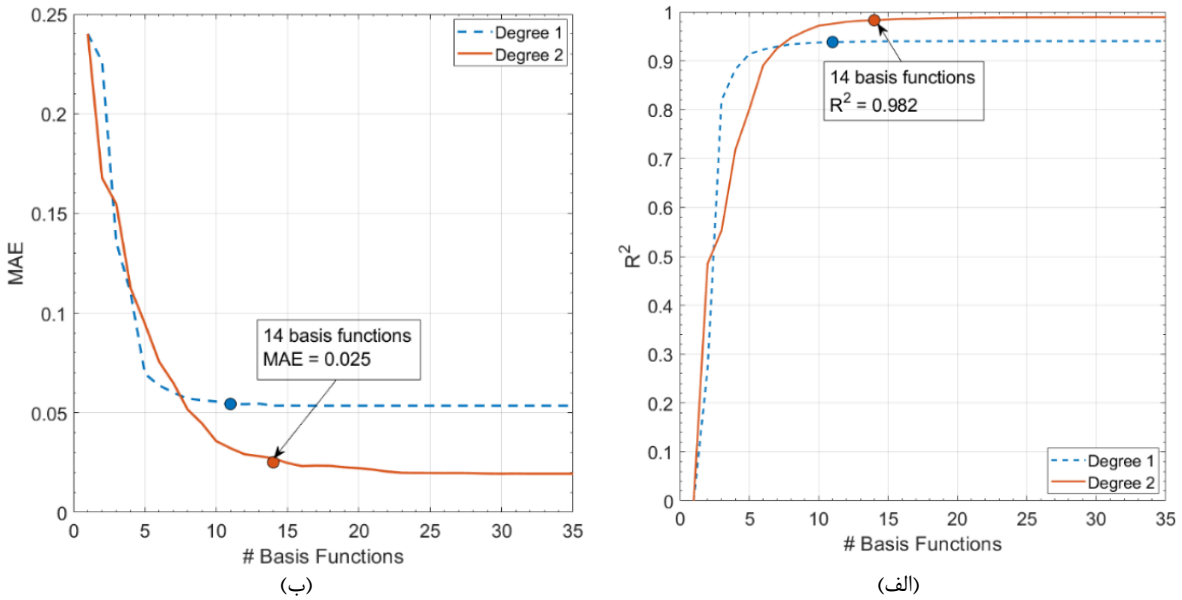
$$1-\lambda = -0.635397 + 6.9826BF_1 + 0.0441028BF_2 - 0.0927325BF_3 + 1.16763BF_4 - 1.434316BF_5 + 3.37815BF_6 - 6.28489\times10^{-6}BF_7 + 1.51866\times10^{-5}BF_8 + 0.00215096BF_9 - 11.0986BF_{10} + 16.318BF_{11} + 10.9219BF_{12} - 0.000489075BF_{13}) \quad (۱۶)$$

که در آن BFها همان توابع پایه هستند که روابط آن ها در جدول ۱ ارائه شده است.

تغییرات ضریب تعیین (R^2) و متوسط خطای مطلق (MAE) با تعداد توابع پایه در شکل ۹ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مدل نهایی انتخابی دارای R^2 برابر ۰/۹۸۲ و MAE برابر ۰/۰۲۵ است که نشان‌دهنده دقت بسیار بالای مدل پیشنهادی است. این معیارهای آماری نیز نشان می‌دهد که مدل با درجه ۲ از دقت بالاتری نسبت به مدل با درجه یک برخوردار است.

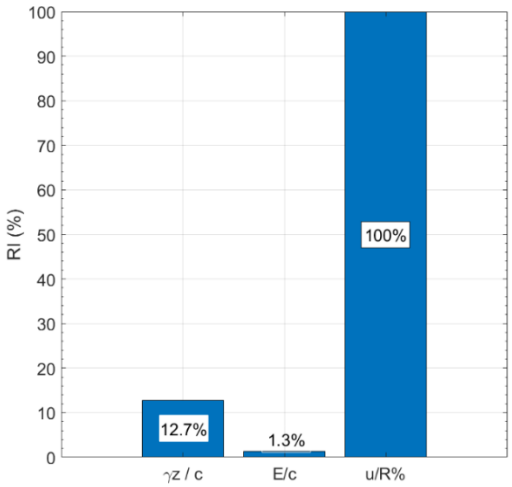
جدول ۱- رابطه توابع پایه در مدل انتخابی (درجه ۲)

BF	رابطه
۱	max(0, 0.0291667−u/R%)
۲	max(0, $\gamma z/c$−5.48602)
۳	max(0, 5.48602− $\gamma z/c$)
۴	max(0, 0.11375− u/R%)
۵	max(0, 0.0291667− u/R%) max(0, $\gamma z/c$ −3.90836)
۶	max(0, 0.0291667− u/R%) max(0, 3.90836− $\gamma z/c$)
۷	max(0, E/c−17763.3)
۸	max(0,17763.3− E/c)
۹	max(0, E/c−17763.3) max(0, 0.00166667− u/R%)
۱۰	max(0, u/R%−0.05375)
۱۱	max(0, 0.05375− u/R%)
۱۲	max(0, u/R%−0.00666667)
۱۳	max(0, 17763.3− E/c) max(0, 0.0191667− u/R%)



شکل ۹- تغییرات (الف) R^2 و (ب) MAE با تعداد توابع پایه

در انتها، به منظور ارزیابی میزان تاثیر هریک از پارامترها در مدل نهایی، میزان اهمیت نسبی هریک از پارامترها تعیین شد که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود پس از u/R٪ که مطابق انتظار بیشترین تاثیر را در مدل پیشنهادی دارد، پارامترهای $\gamma z/c$ با ۱۲/۷ و E/c با ۱/۳ درصد به ترتیب در رده‌های بعدی از نظر اهمیت نسبی قرار می‌گیرند.



شکل ۱۱- اهمیت نسبی پارامترها در مدل نهایی.

۶- نتیجه‌گیری

تعیین منحنی مشخصه زمین به عنوان یکی از ستون‌های طراحی تونل به روش همگرایی- همجواری محسوب می‌شود. در مطالعه حاضر، منحنی مشخصه زمین برای رده سنگ‌های ضعیف به‌دست آورده شد. بدین منظور، از رویکردی احتمالاتی بهره گرفته شد و به روش اجزای محدود، منحنی‌های مشخصه زمین میانگین و میانگین به علاوه و منهای انحراف معیار برای تونل‌های دایروی مدفون در مصالح موهر- کولمب به ازای چندین هندسه مختلف به دست آورده شد. نتایج حاصل نشان داد که مقدار انحراف معیار با افزایش تغییرشکل، کاهش می‌یابد. به بیان دیگر، در تغییرشکل‌های بالاتر منحنی‌های میانگین و میانگین به علاوه و منهای انحراف معیار از یکدیگر دورتر می‌شوند. همچنین مشاهده گردید که تغییرشکل تاج تونل با افزایش عمق و قطر تونل افزایش می‌یابد.

سپس، به عنوان یک نوآوری، از روش مارس که نوعی روش یادگیری ماشین محسوب می‌شود مدلی برای تخمین منحنی‌های مشخصه ارائه گردید. مدل پیشنهادی از ۱۳ تابع پایه و یک عرض از مبدا تشکیل شده است. تحلیل آماری مدل ارائه شده نشان داد که اثر ضریب فشار جانبی در حالت سکون ناچیز و قابل صرف‌نظر کردن است. ضریب تعیین ۰/۹۸۲ مدل پیشنهادی از دقت بالای آن حکایت دارد. پیشنهاد می‌شود که در مطالعات آتی از سایر روش‌های یادگیری ماشین به منظور پیش‌بینی منحنی مشخصه زمین در شرایط پیچیده زمین شناختی و هندسی استفاده شود.

References

[1] Panet M, Sulem J. Convergence-confinement method for tunnel design. Springer; 2022 .
[2] Brown ET, Bray JW, Ladanyi B, Hoek E. Ground response curves for rock tunnels. J Geotech Eng. 1983; 109(1): 15-39. **doi: 10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:1(15)**
[3] Carranza-Torres C, Fairhurst C. On the stability of tunnels under gravity loading, with post-peak softening of the ground. Int J Rock Mech Min Sci. 1997; 34(3-4): 75-e1. **doi: 10.1016/S1365-1609(97)00253-0**
[4] Carranza-Torres C, Fairhurst C. Application of the convergence-confinement method of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-Brown failure criterion. Tunn Undergr Sp Technol. 2000; 15(2): 187-213. **doi: 10.1016/S0886-7798(00)00046-8**
[5] Carranza-Torres C. Dimensionless graphical representation of the exact elasto-plastic solution of a circular tunnel in a Mohr-Coulomb material subject to uniform far-field stresses. Rock Mech Rock Eng. 2003; 36(3): 237-233. **doi: 10.1007/s00603-002-0048-7**
[6] Alonso E, Alejano LR, Varas F, Fdez-Manin G, Carranza-Torres C. Ground response curves for rock masses exhibiting strain-softening behaviour. Int J Numer Anal methods Geomech. 2003; 27(13): 1153-1185. **doi: 101002/nag.315**
[7] Oreste P, Hedayat A, Spagnoli G. Effect of gravity of the plastic zones on the behavior of supports in very deep tunnels excavated in rock masses. Int J Geomech. 2019; 19(9): 4019107. **doi: 10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001490**

[8] Song KI, Cho GC, Lee SW. Effects of spatially variable weathered rock properties on tunnel behavior. Probabilistic Eng Mech. 2011; 26(3): 413-426. **doi: 10.1016/j.probengmech.2010.11.010**
[9] Lee YL, Hsu WK, Lee CM, Xin YX, Zhou BY. Direct calculation method for the analysis of non-linear behavior of ground-support interaction of a circular tunnel using convergence confinement approach. Geotech Geol Eng. 2021; 39(2): 973-990. **doi: 10.1007/s10706-020-01539-4**
[10] Liu K, Zhao W, Li J, Ding W. Design of tunnel initial support in silty clay stratum based on the convergence-confinement method. Sustainability. 2023; 15(3): 2386. **doi: 10.3390/su15032386**
[11] Friedman JH. Multivariate adaptive regression splines. Ann Stat. 1991;19(1):1–67.
[12] Shafiee AH, Oulapour M, Abdlkadhim MAA. Stability of subsea circular tunnels using finite element limit analysis and adaptive neuro-fuzzy inference system. Earth Sci Informatics. 2024; 17(3): 2417-2427. **doi: 10.1007/s12145-024-01287-6**
[13] Eskandarinejad A, Shiau J, Lai VQ, Keawsawasvong S. Predicting uplift capacity of group anchors in sand using 3D FELA and MARS. Marine Georesources & Geotechnology. 2025; 43(4): 607-621. **doi: 10.1080/1064119X.2024.2346832**
[14] Zheng G, Zhang W, Zhou H, Yang P. Multivariate adaptive regression splines model for prediction of the liquefaction-induced settlement of shallow foundations. Soil Dyn Earthq Eng. 2020; 132: 106097. **doi: 10.1016/j.soildyn.2020.106097**
[15] Pourghasemi HR, Rahmati O. Prediction of the landslide susceptibility: Which algorithm, which precision? Catena. 2018; 162: 177-192. **doi: 10.1016/j.catena.2017.11.022**
[16] Shafiee AH, Aein N. Prediction of Coefficient of Restitution of Limestone in Rockfall Dynamics Using Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System and Multivariate Adaptive Regression Splines. J Rehabil Civ Eng. 2026; 14(2): 1-25. **doi: 10.22075/jrce.2025.2168**
[17] Zhang W. MARS applications in geotechnical engineering systems. Springer; 2020.
[18] Krabbenhoft K, Lyamin A, Krabbenhoft J. Optum computational engineering (OptumG2). Comput Softw. 2015.
[19] Shafiee AH, Eskandarinejad A. Bearing capacity of single stone column in clay using finite element limit analysis. Eur J Environ Civ Eng. 2022; 26(15): 7958-7971. **doi: 10.1080/19648189.2021.2019616**
[20] Ahmadi M, Bagherieh AR, Mohammadipour F. Evaluating the Seismic Bearing Capacity of Strip Foundation Adjacent to Geogrid-Reinforced Slopes Using Finite Element Limit Analysis Method. Civil Infrastructure Researches. 2024; 10(1): 169-185. **doi: 10.22091/cer.2024.10058.1519** [In Persian]
[21] Shafiee AH, Neamani AR, Eskandarinejad A, Hosseini R, Gholami A. Undrained stability of wide rectangular subsea tunnels using finite element limit analysis and multivariate adaptive regression splines. Earth Sci Informatics. 2025; 18(1): 60. **doi: 10.1007/s12145-024-01584-0**
[22] Bieniawski ZT. Engineering rock mass classifications: a complete manual for engineers and geologists in mining, civil, and petroleum engineering. John Wiley & Sons. 1989.
[23] Dai SH, Wang MO. Reliability analysis in engineering applications. Van Nostrand Reinhold. 1992.
[24] Serafim JL. Consideration of the geomechanical classification of Bieniawski. In: Proc int symp on engineering geology and underground construction. 1983; 1: 33-44.