

Development of a Model for Predicting Elastic Modulus in the Alluvial Deposits of Mashhad Plain Using Basic Soil Parameters

Mehdi Abbasi¹, Gholamreza Lashkaripour², Naser Hafezi Moghaddas³, Hossein Sadeghi^{4✉}

1. Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: m.abbasi@mail.um.ac.ir

2. Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: lashkaripour@um.ac.ir

3. Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: nhafezi@um.ac.ir

4. Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran. Email: sadeghi@um.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 3 March 2025
Accepted 3 June 2025

Keywords:
Elastic Modulus, Multivariate Regression, Pressuremeter, Mashhad Alluvial Deposits, Cementation.

ABSTRACT

The elastic modulus is considered one of the most essential parameters in the analysing and designing deep foundations and underground structures. Accurate determination of this parameter usually requires expensive and time-consuming in-situ testing, and validating its accuracy poses significant challenges. Therefore, researchers have consistently focused on developing empirical models based on geotechnical parameters. In the present study, multiple linear regression models, including general, coarse-grained soil, and fine-grained soil models, were developed to predict the elastic modulus using data obtained from 180 boreholes totaling 5,783 meters in the Mashhad Metro Line 3 project. Out of 489 pressuremeter tests, 160 datasets were selected based on the availability of complete geotechnical parameters at the same depth. The analysis incorporated the influence of various parameters, including the percentage of sand, silt, and fine particles; grain size characteristics (D_{10} , D_{30} , D_{60} , uniformity coefficient, and coefficient of curvature); Atterberg limits; moisture content; natural and dry density; specific gravity; and cementation indicators (gypsum, carbonate, and organic matter), as well as depth and in-situ stress. The final regression models were developed using a backward stepwise method, implemented through Python programming. The resulting regression equations were derived, and comparative plots between predicted and actual elastic modulus values were presented. The findings demonstrate that the proposed model offers reliable accuracy in estimating the elastic modulus. To evaluate the accuracy of the proposed models in predicting soil elastic modulus, an independent dataset of 39 pressuremeter test results, including both fine- and coarse-grained soils, was used. Statistical indicators demonstrated that the overall model performed best ($R^2=0.79$, $MAPE=9.86\%$). Additionally, the low values of normalized RMSE confirmed the stability and acceptable accuracy of all models.

Introduction

Geotechnical investigations are essential in the early stages of engineering design, especially for large-scale infrastructure projects like urban subway lines. One of the key parameters in these studies is the pressuremeter modulus (E_p), which provides valuable information for evaluating ground deformation behavior and optimizing underground construction design. Due to the

high cost and limited availability of in-situ tests such as the pressuremeter test (PMT), researchers have increasingly sought to develop predictive models based on basic soil properties. These models aim to estimate mechanical parameters such as E_p using readily available laboratory data, including grain size distribution, Atterberg limits, natural moisture content, and dry density. Although such models are not

Cite this article: Abbasi, M., Lashkaripour, G. R., Hafezi Moghaddas, N., Sadeghi, H. (2025). Development of a Model for Predicting Elastic Modulus in the Alluvial Deposits of Mashhad Plain Using Basic Soil Parameters. *Journal of Engineering Geology*, 19 (1), 104-135. <https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.1.1020251>

substitutes for field tests, they can serve as reliable tools when direct measurements are not feasible or to verify field data. Previous studies have primarily focused on correlating E_p with corrected SPT-N values. However, only a few efforts have aimed to predict E_p directly from fundamental soil properties, especially in alluvial soils where natural cementation by organic matter or gypsum may significantly affect mechanical behavior. In most cases, the influence of cementation has been overlooked or qualitatively addressed. Numerous researchers have proposed empirical or statistical models for E_p prediction, such as Bozbey and Togrol (2010) in Istanbul, Yagiz et al. (2008) in Denizli, and Firuzi et al. (2019) in Tabriz, mainly focusing on SPT correlations. More recent efforts, including those by Nawaz et al. (2024) and Ozkaynak and Yilmaz (2024), have used machine learning approaches to estimate elastic moduli from soil indices. In comparison, the present study introduces a new approach by incorporating natural cementation (gypsum and organic content) quantitatively as independent variables in multivariate linear regression models. The database includes results from 180 boreholes with 489 PMT records across Mashhad Metro Line 3, totaling 5783 meters of drilling. Furthermore, the analyses are divided into fine-grained and coarse-grained soil groups to improve the interpretability and accuracy of the models.

Materials and Methods

The study area in this research is the city of Mashhad, the second-largest metropolis in Iran, located in the northeast of the country. This research utilizes data from 180 boreholes associated with Line 3 of the Mashhad Metro. The data used are derived from pressuremeter and laboratory tests conducted on 180 boreholes, with a total drilling length of 5,783 meters in the Mashhad Metro Line 3 project. The significance of this study lies in the fact that 160 relevant datasets were selected from 489 pressuremeter tests, which include basic soil parameters at the

same depth and also incorporate soil cementation parameters. The Pearson method was used to calculate the correlation coefficient between independent variables and the elastic modulus. The heat map analysis indicated that dry density, sand content, fine-grained fraction, liquid limit, density, and moisture content exhibit the highest correlation with the elastic modulus. The backward stepwise method was employed to determine the comprehensive multivariable linear model. This model demonstrates that an increase in D_{60} , natural soil density, depth, density, and organic matter content positively and significantly affect the elastic modulus. In contrast, an increase in the plastic limit, D_{30} , moisture percentage, and gypsum content negatively and significantly impact it. The final multiple linear regression model for predicting the soil elastic modulus (E_p) is as follows (Equation 1):

$$E_p = -2553.959 - 11.637 PL - 189.396 D_{30} + 24.767 D_{60} - 11.586 \omega + 615.21 \gamma_t + 782.639 G_s + 5.048 D + 241.498 OM - 35.021 G_y \quad (1)$$

The regression coefficients of the final model, obtained through the backward stepwise method for coarse-grained soils, indicate that an increase in natural soil density, depth, density, and organic matter content positively and significantly affects the elastic modulus. Meanwhile, an increase in the plastic limit, sand percentage, and moisture percentage negatively and significantly influences it. The final multiple linear regression model for predicting the elastic modulus of coarse-grained soils (E_p) is as follows (Equation 2):

$$E_p = -1672.468 - 14.709 PL - 4.793 SC - 11.802 \omega + 603.907 \gamma_t + 565.577 G_s + 5.624 D + 199.210 OM \quad (2)$$

The regression coefficients of the final model, obtained through the backward stepwise method for fine-grained soils, show that an increase in natural soil density, plastic limit, uniformity coefficient, and density positively and significantly affects the elastic modulus.

However, an increase in D_{60} and moisture content negatively and significantly impacts it. The final multiple linear regression model for predicting the elastic modulus in fine-grained soils (E_p) is as follows (Equation 3):

$$E_p = -8710.584 + 9.718 PL - 681.773 D_{60} + 1.866 Cu - 4.687w + 651.430 \gamma_t + 2909.014 G_s \quad (3)$$

Validation of Linear Models for Predicting Elastic Modulus

To evaluate the accuracy of the proposed linear regression models in predicting the elastic modulus, an independent dataset consisting of 39 pressuremeter test results—previously excluded from model development—was used. This dataset includes 12 fine-grained and 17 coarse-grained soil samples. Model performance was assessed using statistical indicators including the correlation coefficient (r), coefficient of determination (R^2), root mean square error (RMSE), mean absolute error (MAE), and mean absolute percentage error (MAPE). To ensure scale-independent evaluation, normalized RMSE based on range (NRMSE-range) and mean (NRMSE-mean) were also calculated.

Results showed that the combined (whole soil) model yielded the best performance with values of $r = 0.89$, $R^2 = 0.79$, $RMSE = 66.44$, and $MAPE = 9.86\%$. The fine-grained model exhibited the lowest RMSE and MAE (51.62 and 46.66, respectively), while the coarse-grained model showed slightly higher errors. Nonetheless, MAPE values were below or around 10% for all models, indicating acceptable prediction accuracy. Additionally, the low NRMSE values (ranging from 0.11 to 0.28) demonstrate the robustness and reliability of the models across different data scales, confirming that the proposed relationships offer a reasonable predictive capability for the elastic modulus based on fundamental soil parameters.

Results and Discussion

The analysis of effective parameters in multivariable linear regression models for

predicting soil elastic modulus reveals that different soil properties have distinct impacts on elasticity. For instance, in integrated models, an increase in D_{60} enhances the elastic modulus mainly due to the influence of coarse-grained soils while in fine-grained soils, higher D_{60} reduces the modulus. Similarly, an increase in D_{30} generally decreases the elastic modulus by affecting soil compaction. The plastic limit shows contrasting effects: it tends to reduce the elastic modulus in coarse-grained soils but increases it in fine-grained soils by improving deformation capacity. Furthermore, higher natural density, depth, overall density, and organic matter content generally lead to an increase in the elastic modulus, whereas increased moisture content consistently and significantly reduces it. Other factors, such as sand percentage and uniformity coefficient, also play key roles, with their impacts varying according to the soil type.

Conclusions

In this study, regression models were developed to predict the pressuremeter elastic modulus (E_p) based on fundamental soil parameters. The dataset consisted of pressuremeter and laboratory test results obtained from 180 boreholes totaling 5,783 meters of drilling on Mashhad Metro Line 3 project. A key innovation of this research was the inclusion of natural cementation parameters—specifically organic matter and gypsum—as quantitative variables in the regression models. This contrasts with prior studies, where such effects were considered only qualitatively. Furthermore, separating the data into fine- and coarse-grained soil groups enabled more accurate mechanical analysis and assessment of variable influence. Pearson correlation analysis showed that dry density, sand and fines content, liquid limit, specific gravity, and moisture content were the most relevant predictors of E_p . In the multivariate linear model for all soil types, moisture content had the strongest negative effect, while depth

and D60 had the most positive influence. For coarse-grained soils, depth and natural density were the most positive contributors, whereas sand content and moisture had the strongest negative impact. In fine-grained soils, uniformity coefficient showed the highest positive effect, while D60 had the most negative influence. Regarding natural cementation, results from the combined and coarse-grained soil models indicated that organic matter slightly increased E_p , whereas gypsum content had a minor negative effect. The multivariate models significantly outperformed simpler models in predicting E_p and can be used for preliminary estimates or validation of pressuremeter results. The coefficient of determination (R^2) from training data was 0.87 for the overall model, 0.74 for coarse-grained soils, and 0.72 for fine-grained soils. Testing data confirmed strong

model performance with correlation coefficients (r) of 0.89, 0.85, and 0.87, and R^2 values of 0.79, 0.72, and 0.76 for the combined, coarse-grained, and fine-grained models, respectively. Error metrics calculated for the test dataset yielded:

Combined soils: RMSE = 66.44, MAE = 57.49, MAPE = 9.86%

Coarse-grained soils: RMSE = 75.93, MAE = 65.85, MAPE = 9.55%

Fine-grained soils: RMSE = 51.62, MAE = 46.66, MAPE = 10.25%

Normalized RMSE values (NRMSE-range and NRMSE-mean) between 0.11 and 0.28 indicated strong reliability across different data scales.

Overall, the proposed models demonstrate robust predictive capability and may serve as useful tools in preliminary geotechnical design or in cases where pressuremeter testing is unavailable.



توسعه مدلی برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته در آبرفت شهر مشهد با استفاده از پارامترهای پایه خاک

مهدی عباسی^۱، غلامرضا لشکری پور^۲، ناصر حافظی مقدس^۳، حسین صادقی^۴

۱. دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: m.abbasi@mail.um.ac.ir

۲. استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: lashkaripour@um.ac.ir

۳. استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: nhafezi@um.ac.ir

۴. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران. رایانامه: sadeghi@um.ac.ir

چکیده

اطلاعات مقاله

مدول الاستیسیته از جمله پارامترهای کلیدی در تحلیل و طراحی پی‌های عمیق و سازه‌های زیرزمینی محسوب می‌شود. اندازه‌گیری دقیق این پارامتر معمولاً نیازمند اجرای آزمایش‌های میدانی پرهزینه و زمان‌بر بوده و صحت‌سنجی آن نیز با چالش‌هایی همراه است. از این رو، توسعه مدل‌های تجربی جهت پیش‌بینی مدول الاستیسیته بر پایه پارامترهای ژئوتکنیکی، همواره مورد توجه پژوهشگران بوده است. در این پژوهش، با بهره‌گیری از داده‌های حاصل از ۱۸۰ گمانه حفاری شده به طول مجموع ۵۷۸۳ متر در مسیر خط ۳ متروی مشهد، مدل‌های رگرسیون خطی چندمتغیره شامل مدل جامع (ریزدانه و درشت‌دانه)، مدل ویژه خاک‌های درشت‌دانه و مدل ویژه خاک‌های ریزدانه برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته توسعه یافته‌اند. از میان ۴۸۹ آزمون پرسیمتری، ۱۶۰ داده که به صورت هم‌عمق دارای اطلاعات دقیق پارامترهای پایه خاک بودند، انتخاب گردیدند. در این تحلیل، اثر متغیرهایی نظیر درصد ذرات شن، ماسه و ریزدانه، پارامترهای دانه‌بندی (D_{60} , D_{30} , D_{10} ، ضریب یکنواختی و ضریب دانه‌بندی)، حدود ات‌برگ، میزان رطوبت، دانسیته طبیعی و خشک، چگالی، مواد سیمانی (گچ، کربنات و مواد آلی)، عمق و تنش برجا بر مدول الاستیسیته حاصل از آزمون پرسیمتری مورد بررسی قرار گرفت. جهت توسعه مدل نهایی، از روش گام‌به‌گام رو به عقب در چارچوب تحلیل رگرسیون و با استفاده از زبان برنامه‌نویسی Python بهره گرفته شد. در پایان، معادله نهایی رگرسیون استخراج گردید و نمودارهای مقایسه‌ای بین مقادیر پیش‌بینی شده و واقعی ترسیم شد که حاکی از دقت مطلوب مدل ارائه‌شده در تخمین مدول الاستیسیته می‌باشد. برای صحت‌سنجی و ارزیابی دقت مدل‌های پیشنهادی در پیش‌بینی مدول الاستیسیته، مجموعه‌ای مستقل از ۳۹ داده آزمایش پرسیمتری شامل خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه مورد استفاده قرار گرفت. شاخص‌های آماری مختلف نشان دادند که مدل جامع عملکرد بهتری دارد ($R^2=0.79$ و $MAPE=9.86\%$). همچنین، مقادیر پایین RMSE نرمال شده پایداری و دقت قابل قبول همه مدل‌ها را تأیید می‌کند.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۲/۱۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۳/۱۳

کلیدواژه‌ها:

مدول الاستیسیته، رگرسیون چند متغیره، پرسیمتری، آبرفت مشهد، سیمان‌شدگی.

مقدمه

زیرسطحی را در بر می‌گیرد. یکی از مؤلفه‌های مهم در این زمینه، تعیین مدول الاستیسیته در مصالح آبرفتی است که اطلاعات بنیادینی را برای طراحی ایمن سازه‌های زیرزمینی فراهم می‌سازد. به‌ویژه در پروژه‌های کلان شهری نظیر

پیش از اجرای سازه‌های مهندسی، انجام مطالعات ژئوتکنیکی به منظور تعیین پارامترهای ژئومکانیکی خاک، گامی اساسی و اجتناب‌ناپذیر در فرایند طراحی محسوب می‌شود. این مطالعات، طیف وسیعی از اندازه‌گیری‌های سطحی و

استناد: عباسی، م.، لشکری پور، غ. ر.، حافظی مقدس، ن.، صادقی، ح. (۱۴۰۴). توسعه مدلی برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته در آبرفت شهر مشهد با استفاده از پارامترهای

پایه خاک. مجله زمین‌شناسی مهندسی، ۱۹ (۱)، ۱۰۴-۱۳۵. <https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.1.1020251>

روابط می‌توانند در تخمین پارامترهای تغییرشکل‌پذیری خاک در پروژه‌های طراحی ژئوتکنیکی، به‌ویژه در مواردی که فقط داده‌های SPT در دسترس است، کاربردی ارزیابی شده است.

در پژوهش دیگری در ناحیه آبرفتی شهر دنیلی ترکیه، یاغیز و همکاران (Yagiz et al., 2008) روابط بین عدد آزمون نفوذ استاندارد اصلاح‌شده (Ncor) و پارامترهای حاصل از آزمون پرسویمتری (مدول الاستیسیته E_m و فشار حدی P_L) را مورد بررسی قرار دادند. داده‌ها از ۱۵ گمانه شامل خاک‌های سیلتی، رسی و ماسه‌ای در اعماق ۱/۵ تا ۲ متر استخراج شد. تحلیل رگرسیون، نشان داد که بین Ncor و E_m با ضریب همبستگی ۰/۹۱ و بین Ncor و P_L با ضریب همبستگی ۰/۹۷، روابط خطی معناداری وجود دارد.

فیروزی و همکاران (Firuzi et al., 2019) در مسیر خط ۲ متروی تبریز، بر پایه داده‌های حاصل از ۸۵ گمانه (با عمق ۲۰ تا ۴۰ متر)، ۲۲۰ داده SPT، ۶۴ داده آزمون PMT و ۵ داده آزمون CPT را برای سه نوع خاک شامل سیلتی‌رسی، سیلت‌رسی و ماسه‌سیلتی دسته‌بندی نمودند. سپس با استفاده از رگرسیون آماری، روابط بین مدول پرسویمتری (E_m)، فشار حدی (P_L)، مدول برشی (G) و مدول عکس‌العمل بستر (K_s)، با مقادیر اصلاح‌شده SPT و همچنین بین P_L و مقاومت مخروطی (qc) از آزمون CPT استخراج گردیده است. علاوه بر این، نسبت E_m/P_L و ارتباط مستقیم بین E_m و P_L نیز بررسی شده است. نتایج حاکی از وجود همبستگی‌های خطی و معنادار بین پارامترهای مذکور بوده، به‌گونه‌ای که این روابط می‌توانند برای تخمین پارامترهای مکانیکی خاک‌های آبرفتی سودمند باشند.

چشمی و قدرتی (Cheshomi and Ghodrati, 2015) در مطالعه‌ای مشابه در مسیر متروی خط ۲ مشهد، داده‌های حاصل از ۱۷ گمانه، شامل ۳۸ داده برای خاک رس‌سیلتی و ۱۵ داده برای خاک ماسه‌سیلتی را بررسی نمودند. مقادیر

خطوط مترو، شناخت دقیق رفتار مکانیکی خاک، به کاهش ریسک، بهینه‌سازی طراحی و مدیریت مؤثر هزینه‌ها کمک می‌نماید.

با توجه به هزینه‌های بالای مطالعات زیرسطحی و آزمون‌های برجاء، به‌ویژه آزمون پرسویمتری، پژوهشگران همواره در پی توسعه مدل‌هایی هستند که بتوانند با اتکا به پارامترهای پایه‌ای خاک، به‌صورت غیرمستقیم پارامترهای پیشرفته مکانیکی را تخمین بزنند. هرچند چنین مدل‌هایی نمی‌توانند جایگزین قطعی آزمون‌های میدانی باشند، اما در شرایطی که امکان اجرای این آزمایش‌ها فراهم نباشد یا به‌منظور صحت‌سنجی نتایج آن‌ها، می‌توانند به‌عنوان ابزار پشتیبان مفید واقع شوند. یکی از این تلاش‌ها، پیش‌بینی مدول الاستیسیته حاصل از آزمون پرسویمتری (E_p) بر مبنای داده‌های قابل اندازه‌گیری آزمایشگاهی است.

اغلب پژوهش‌های پیشین به بررسی ارتباط بین نتایج آزمون نفوذ استاندارد (SPT) و مدول الاستیسیته پرداخته‌اند، درحالی‌که مطالعاتی که به پیش‌بینی E_p با استفاده از پارامترهای پایه‌ای خاک مانند دانه‌بندی، چگالی، حدود ات‌برگ و رطوبت (بدون استفاده از داده‌های SPT) بپردازند، بسیار محدودتر هستند. این مسئله به‌ویژه در مورد خاک‌های آبرفتی اهمیت می‌یابد، زیرا اغلب روابط ارائه‌شده در گذشته، اثر سیمان‌شدگی طبیعی ناشی از مواد آلی یا گچ را نادیده گرفته‌اند یا صرفاً به‌صورت کیفی بررسی نموده‌اند.

در مطالعه‌ای میدانی در شهر استانبول، بزبی و طغرل (Bozbey and Togrol, 2010) به بررسی روابط بین نتایج آزمون SPT و پرسویمتری در خاک‌های دانه‌ای و ریزدانه در محدوده‌ای با شرایط زمین‌شناسی یکنواخت پرداختند. تحلیل ۱۸۲ داده برداشت شده برای خاک‌های ماسه‌ای و رسی نشان داد که روابط لگاریتمی بین عدد آزمون نفوذ استاندارد اصلاح‌شده ($SPT-N_{60}$) با مدول پرسویمتری (E_{PMT}) دارای ضریب تعیین بالا (تا ۰/۸۲) می‌باشد. این

شاخص شیمیایی هوازدگی (VR)، در سه محل در کره جنوبی انجام شده است. در این مطالعه، ابتدا با استفاده از رگرسیون ساده، روابط بین E_m و P_L با $SPT-N_{60}$ و نیز با VR به‌طور جداگانه بررسی و سپس با کاربرد از رگرسیون چندگانه غیرخطی، مدل‌هایی ترکیبی از $SPT-N_{60}$ و VR برای تخمین E_m و P_L توسعه یافته که همبستگی بالاتری (به ترتیب $R^2=0.76$ و $R^2=0.46$) نسبت به مدل‌های ساده دارند.

نواز و همکاران (Nawaz et al., 2024) به توسعه مدلی دقیق برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته خاک‌های چسبنده نرم بر اساس ویژگی‌های پایه‌ای خاک و با استفاده از روش رگرسیون فرآیند گاوسی (GPR) پرداخته‌اند. پایگاه داده شامل ۱۹۹ نمونه خاک از اعماق ۱ تا ۲۰ متر در پروژه‌های مختلف شهر اسلام‌آباد، پاکستان است. ویژگی‌های ورودی شامل درصد ماسه، درصد ریزدانه، حد روانی، حد خمیری، رطوبت و چگالی خشک بوده‌اند. چهار مدل با ترکیب‌های مختلفی از این ویژگی‌ها توسعه یافته و ارزیابی شده است. مدل بهینه (با شش ویژگی ورودی) توانسته با $R^2=0.99$ عملکرد بسیار خوبی ارائه دهد. این مدل همچنین با داده‌های میدانی حاصل از آزمون نفوذ مخروط (CPT) اعتبارسنجی شده و همبستگی خوبی نشان داده است ($R^2=0.87$). نتایج تحلیل حساسیت و مطالعه پارامتریک نشان داده که حدود اثربرگ و چگالی خشک بیشترین تأثیر را بر E_s دارند، در حالی که درصد شن کمترین تأثیر را دارد. این پژوهش نشان‌دهنده آن است که استفاده از نمونه‌های دست‌نخورده و ویژگی‌های شاخص خاک، می‌تواند تخمین دقیقی از مدول الاستیسیته ارائه دهد.

پژوهش اوزکاینک و ییلماز (Ozkaynak and Yilmaz, 2024) به توسعه مدل‌های پیش‌بینی مدول خزشی (MR) خاک زیر روسازی جاده، با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌پردازد. برای این منظور،

عدد نفوذ استاندارد اصلاح شده (N_{60})، مدول پرسیمتری (E_{PMT}) و فشار حدی (P_L) در دو گروه خاکی تفکیک و با استفاده از رگرسیون خطی، روابط آماری بین N_{60} و E_{PMT} ، P_L و N_{60} و همچنین P_L و E_{PMT} استخراج گردیده است. روابط به‌دست‌آمده، ضرایب همبستگی نسبتاً بالایی (۰/۷۲ تا ۰/۸۵) داشته و بیانگر آن است که با افزایش N_{60} ، مقادیر E_{PMT} و P_L نیز افزایش می‌یابد.

مرزوق و همکاران (Marzouk et al., 2024) با توسعه چارچوبی تحت عنوان APD مبتنی بر الگوریتم‌های مبتنی بر نمودار که با ترکیب داده‌های حاصل از آزمون‌های صحرایی از جمله نفوذ مخروط (CPT)، دیلاتومتر (DMT) و سرعت موج برشی (Vs)، به تخمین پارامترهای مکانیکی و مدل‌های رفتاری خاک می‌پردازد. مطالعه موردی انجام‌شده در سایت Onsøy کشور نروژ، داده‌های ۱۸ لایه خاک نرم رسی در قالب ۱۸ نمودار مجزا، تحلیل شده است. نتایج این پژوهش نشان داد که استفاده هم‌زمان از داده‌های آزمون‌های مذکور در کنار الگوریتم‌های پیشرفته می‌تواند موجب افزایش دقت در برآورد پارامترهای الاستیک خاک شود.

طباطبایی و همکاران (Tabatabaei et al., 2022) با استفاده از ۷۶ داده حاصل از آزمون‌های SPT و PMT در استان هرمزگان، در سه گروه سیلت، ماسه و رس، با استفاده از تحلیل رگرسیونی، روابطی میان N_{SPT} و E_p ارائه نمودند که ضرایب همبستگی نسبتاً بالایی تا ۰/۸۴ داشتند. نتایج نشان داده که روابط ارائه‌شده در این مطالعه، با شرایط محلی سازگارتر و دقیق‌تر بوده و می‌تواند به‌عنوان ابزاری مناسب برای تخمین مدول الاستیسیته در خاک‌های مختلف منطقه استفاده شود.

پژوهش لی و همکاران (Lee et al., 2021) به منظور ارائه روابط تجربی برای تخمین مدول پرسیمتری (E_m) و فشار حدی (P_L) در گرانیت هوازده، با استفاده از داده‌های آزمون پرسیمتری (PMT) آزمون نفوذ استاندارد ($SPT-N_{60}$) و

مانند میزان سیمان، مقدار و نوع الیاف، رطوبت و زمان عمل‌آوری بیشترین تأثیر را بر مدول الاستیسیته دارند. در این میان، پژوهش راشد (Rashed, 2010) از نخستین مطالعاتی است که با استفاده از ۱۰۶ آزمون در مسیر خط ۲ مترو مشهد، نخستین گام‌های مؤثر را در مدل‌سازی E_p بر پایه پارامترهای FC ، CC ، D_{10} ، D_{30} ، D_{60} ، C_u ، C_c ، L_L ، PI ، W و γ_d برداشته است. در این تحقیق با استفاده از روش کلاسیک آماری، مدلی با استفاده از روش رگرسیون کوچترین مربعات (LSR) بسط داده شده و فرمولی برای تعیین مدول الاستیسیته خاک ریزدانه براساس پارامترهای پایه خاک شامل FC ، W ، γ_d و C_u ارائه گردیده است. نتایج نشان داده که این مدل برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته پرسیمتری، دارای $r^2 = 0.89$ برای داده‌های صحت‌سنجی می‌باشد.

در مقایسه با مطالعات پیشین، پژوهش حاضر واجد سه مزیت مهم است. نخست، بهره‌گیری از حجم گسترده داده شامل ۱۶۰ داده هم‌عمق از میان ۴۸۹ آزمون پرسیمتری در ۱۸۰ گمانه حفاری‌شده به‌طول مجموع ۵۷۸۳ متر؛ دوم، لحاظ‌کردن اثر سیمان‌شدگی طبیعی (شامل مواد آلی و گچی) به‌عنوان متغیری مستقل در مدل؛ و سوم، تفکیک تحلیل‌ها برای خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه به‌منظور مدیریت دقیق‌تر اثرات متقابل متغیرها. بر این اساس، هدف اصلی این تحقیق، توسعه مدلی دقیق برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته با استفاده از پارامترهای پایه‌ای خاک، از طریق تحلیل رگرسیون چندگانه بین داده‌های صحرایی و آزمایشگاهی است.

مواد و روش‌ها

محدوده مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه در این پژوهش، شهر مشهد، دومین کلان‌شهر ایران است که در شمال‌شرقی کشور واقع شده

۷۰ نمونه خاک دست‌نخورده از یک بزرگراه برداشت شده و ویژگی‌های فیزیکی و مهندسی آن‌ها شامل رطوبت، چگالی، حدود اتربرگ، مقاومت فشاری، فشار و درصد تورم، دانه‌بندی، به همراه آزمون مدول خزشی اندازه‌گیری گردیده است. ابتدا یک مدل رگرسیون خطی چندگانه (MLR) و سپس مدل‌های غیرخطی شامل جنگل تصادفی (RF) و تقویت‌گرایان توسعه یافته‌اند. نتایج نشان داد مدل‌های غیرخطی به‌طور قابل‌توجهی دقیق‌تر از MLR عمل نموده و مدل XGBoost بهترین عملکرد را با $R^2 = 0.90$ در داده‌های آزمون به دست آورده است. همچنین با انتخاب ۵ پارامتر مؤثرتر، شامل تنش انحرافی، فشار جانبی، مقاومت فشاری بدون محدودیت، رطوبت طبیعی و درصد تورم، مدل XGBoost همچنان دقت قابل‌قبولی نشان داده ($R^2 = 0.844$) و بیانگر آن است که می‌توان تعداد پارامترهای ورودی را بدون افت چشمگیر در عملکرد مدل کاهش داد.

در مطالعه‌ای دیگر، اووسو-آنسا و همکاران (Owusu-Ansah et al., 2022) با هدف پیش‌بینی مدول الاستیسیته مخلوط‌های خاک و سیمان تقویت‌شده با الیاف با استفاده از پارامترهای پایه‌ای و روش‌های داده‌محور انجام شده است. برای این منظور، چهار الگوریتم شامل شبکه عصبی مصنوعی (ANN)، جنگل تصادفی (RF)، ماشین بردار پشتیبان (SVM) و رگرسیون چندگانه (MR) به‌کار گرفته شده‌اند. پایگاه داده شامل ۱۲۱ داده، حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی روی مخلوط‌های خاک، سیمان و الیاف با ۱۶ ویژگی ورودی شامل درصد‌های دانه‌بندی، حدود اتربرگ، رطوبت، محتوای سیمان، زمان عمل‌آوری و مشخصات الیاف بوده است. مدل‌ها با استفاده از اعتبارسنجی متقاطع (k-fold) آموزش داده شده و نتایج نشان داد که مدل ANN بالاترین دقت را در پیش‌بینی مدول الاستیسیته داشته است ($R^2 = 0.95$). تحلیل حساسیت نیز نشان داده که متغیرهایی

در شکل‌گیری این لایه‌های رسوبی به شمار می‌روند (Nasseh et al., 2016).

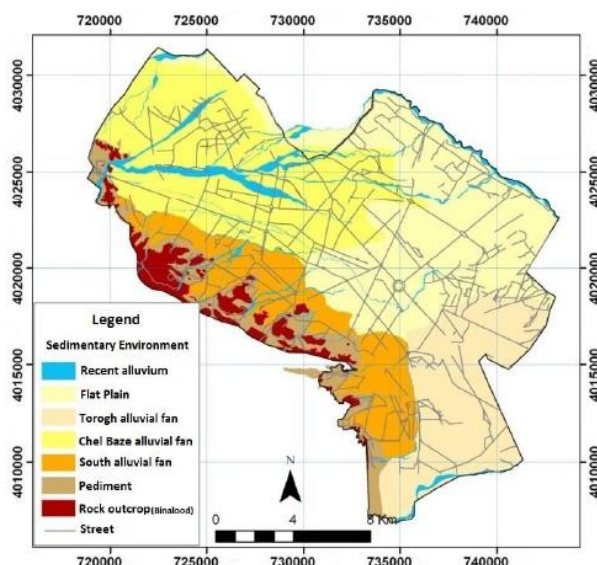
موقعیت جغرافیایی شهر مشهد در دامنه‌های شمالی رشته‌کوه بینالود، وجود واحدهای سنگی در حاشیه جنوبی و جنوب‌غربی شهر، عبور رودخانه‌هایی از ارتفاعات جنوبی و غربی و همچنین جریان رودخانه کشف‌رود در بخش شمال‌شرقی شهر، تاثیر به‌سزایی در ترکیب فیزیکی و مکانیکی رسوبات منطقه گذاشته‌اند. بخش عمده‌ای از اراضی مشهد، بر روی نهشته‌های مخروط‌افکنه‌ای حاصل از جریان‌های رودخانه‌ای واقع شده است. این مخروط‌افکنه‌ها را می‌توان در سه دسته عمده شامل: مخروط‌افکنه‌های جنوبی، مخروط‌افکنه رودخانه گلستان (چهل‌بازه) و مخروط‌افکنه رودخانه طرق (شکل ۱) طبقه‌بندی کرد (Ghazi et al., 2015).

منشأ مخروط‌افکنه‌های جنوبی شهر عمدتاً سنگ‌های اولترامافیک و دگرگونی موجود در ارتفاعات مجاور است. به‌عنوان نمونه، در محدوده مخروط‌افکنه کوهسنگی، مقادیر قابل‌توجهی گچ گزارش شده است. همچنین در جنوب مشهد، سه نوع گرانیات به همراه مارن‌های گچی سرخ رنگ متعلق به دوره میوسن مشاهده می‌شود. این گرانیات منشأ احتمالی پیدایش کانی‌های رسی مانند پالیگورسکیت هستند. انتقال محصولات هوازدگی این واحدهای سنگی به واسطه باد به سمت شهر، می‌تواند علت حضور رس و گچ به میزان زیاد در بخش‌های جنوبی شهر مشهد باشد (Karimi et al., 2008).

است. در این مطالعه، از اطلاعات حاصل از ۱۸۰ گمانه ماشین‌حفری‌شده مربوط به خط ۳ متروی مشهد استفاده شده است. در این گمانه‌ها، آزمون برجا پرسویمتری تا عمق حداکثر ۶۰ متر انجام شده است. خط ۳ متروی مشهد، پروژه‌ای زیرزمینی است که شمال‌غرب شهر را از طریق تونلی به طول ۲۸/۵ کیلومتر به جنوب‌شرق آن متصل می‌سازد. قطر داخلی تونل ۸/۴ متر بوده و پوشش داخلی آن از قطعات بتنی پیش‌ساخته تشکیل شده است. این پروژه شامل ۲۴ ایستگاه با عمق‌هایی در بازه ۷ تا ۳۶ متر است (Abbasi et al., 2024). نمونه‌برداری از اعماق مشخص و مطابق با استانداردهای ASTM انجام گرفته تا پارامترهای پایه خاک به‌طور دقیق مورد ارزیابی قرار گیرد.

زمین‌شناسی آبرفت شهر مشهد

شهر مشهد، با مساحتی در حدود ۳۱۱ کیلومتر مربع، در پهنه‌ای از نهشته‌های آبرفتی کواترنری قرار دارد که در میان ارتفاعات کپه‌داغ در شمال و رشته‌کوه بینالود در جنوب واقع شده است. این رسوبات حاصل فرآیندهای زمین‌شناسی و رسوب‌گذاری متنوعی هستند که شامل عملکرد محیط‌های سیلابی، نوسانات انرژی محیط رسوبی در طول فصول مختلف و تأثیر سنگ منشأ بر سیمان‌شدگی طبیعی خاک‌ها، شده است. همچنین فرآیندهایی نظیر نابرجایی، فرسایش و دیاژنز در تحول ساختاری نهشته‌های آبرفت‌های منطقه، نقش تعیین‌کننده‌ای داشته‌اند. عواملی نظیر اندازه ذرات، میزان هوازدگی و ترکیب کانی‌شناسی خاک، از مولفه‌های کلیدی



شکل ۱. نقشه محیط رسوبی شهر مشهد (Ghazi et al., 2015)

Fig. 1. Map of the sedimentary environment of Mashhad city (Ghazi et al., 2015)

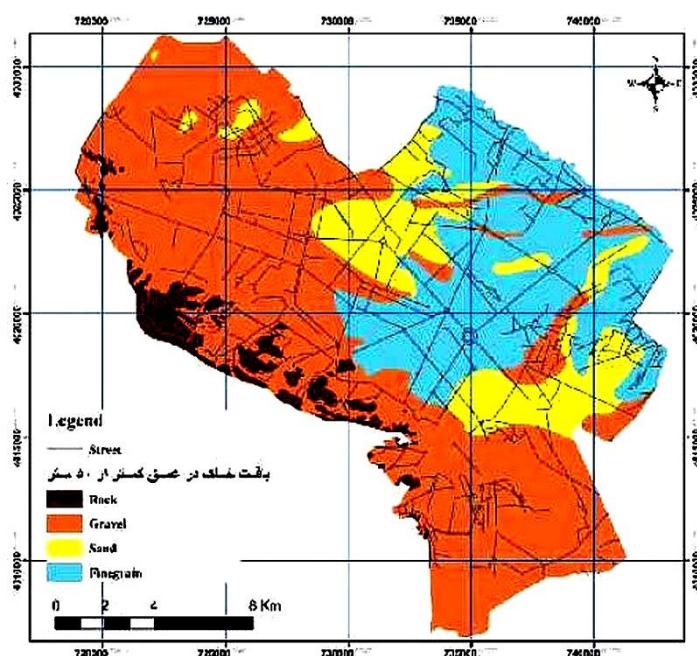
جایگزینی ترکیبی از سیلت و رس به جای مواد درشت‌دانه شده است (شکل ۲).

دشت سیلابی رودخانه کشف‌رود که در شمال‌شرقی شهر مشهد قرار دارد، عمدتاً از رسوبات ریزدانه با درصد بالای رس تشکیل شده است. در مجموع، ترکیب دانه‌بندی رسوبات در بخش‌های انتهایی مخروط‌افکنه‌ها و بستر دشت سیلابی، در محدوده ماسه ریز، سیلت و رس قرار می‌گیرد (Nasseh, 2017). این ویژگی‌ها از منظر ژئوتکنیکی و رفتار مکانیکی خاک حائز اهمیت فراوان است، چرا که تغییرات دانه‌بندی در مقیاس منطقه‌ای می‌تواند به‌طور مستقیم بر پارامترهای مهندسی نظیر مدول الاستیسیته اثرگذار باشد.

بر اساس داده‌های زمین‌شناسی، محدوده شهر مشهد را می‌توان به دو پهنه متمایز شرقی و غربی تفکیک نمود. بخش شرقی عمدتاً از خاک‌های ریزدانه تشکیل شده و با حرکت از شمال‌غرب به سمت جنوب‌شرق، درصد ذرات ریزدانه افزایش می‌یابد. این تغییر تدریجی در ویژگی‌های فیزیکی خاک، بازتابی از تغییرات محیط نهشته‌گذاری و منشأ رسوبات است که در تحلیل‌های ژئوتکنیکی باید به‌دقت مدنظر قرار گیرد.

مخروط‌افکنه چهل‌بازه، که از ارتفاعات اسلیتی و فیلیتی واقع در غرب شهر مشهد منشاء می‌گیرد، از مهم‌ترین واحدهای رسوبی منطقه محسوب می‌شود. بخش قابل توجهی از شهر، بر روی رسوبات این مخروط‌افکنه قرار دارد. مسیر رودخانه گلستان، که عامل اصلی تغذیه این مخروط‌افکنه است، تحت تأثیر گسل‌های فعال قرار داشته و تغییر جهت حاصل از این تکتونیک، نهشته‌گذاری در راستای شرقی را در پی داشته است.

از سوی دیگر، رودخانه طرق که از ارتفاعات مافیکی جنوب‌شرقی مشهد سرچشمه می‌گیرد، پس از عبور از بخش‌های میانی مشهد، مخروط‌افکنه‌ای با وسعت تقریبی ۱۰ کیلومتر را تشکیل داده است. این مخروط‌افکنه عمدتاً از رسوبات درشت‌دانه‌ای نظیر شن و ماسه تشکیل شده که نشان‌دهنده انرژی بالای محیط رسوبی در نواحی بالادست می‌باشد. در ادامه مسیر، این رسوبات با پیوستن به دشت سیلابی رودخانه کشف‌رود، منطقه‌ای وسیع و نسبتاً مسطح از آبرفت‌های دانه‌ریز را در شمال‌شرق و مرکز شهر پدید آورده‌اند. در بخش‌های انتهایی مخروط‌افکنه‌ها، کاهش تدریجی انرژی جریان موجب ریزتر شدن بافت خاک و



شکل ۲. نقشه بافت خاک در شهر مشهد در عمق کمتر از ۵۰ متر (Ghazi, 2015)

Fig. 2. Soil texture map in Mashhad city at a depth of less than 50 meters (Ghazi, 2015)

مطالعات آماری و تحلیل مجموعه داده

در این بخش، تحلیل آماری توصیفی به منظور ارائه شناخت اولیه از مجموعه داده‌های مورد بررسی صورت گرفته است. هدف از این تحلیل، فراهم ساختن درکی روشن‌تر از توزیع متغیرها، میزان پراکندگی آن‌ها و بررسی ویژگی‌های آماری اولیه هر یک از پارامترهای مورد استفاده در مدل‌سازی است. جدول ۱ آمار توصیفی متغیرهای جمع‌آوری شده را نمایش می‌دهد. بر اساس این جدول مشاهده می‌شود که متغیرهای مورد مطالعه از نظر آماری دارای توزیع‌های متفاوتی هستند. در برخی موارد، میزان پراکندگی قابل توجهی مشاهده می‌گردد که احتمالاً ناشی از ناهمگنی ذاتی خاک‌های منطقه مورد مطالعه و تنوع شرایط زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی آن است. چنین پراکندگی‌هایی می‌توانند بر نتایج مدل‌سازی تأثیرگذار باشند و در انتخاب نوع تحلیل آماری و تفسیر نتایج نهایی باید مورد توجه قرار گیرند.

بر اساس نقشه‌های تهیه‌شده از بافت خاک شهر مشهد تا عمق ۴۰ متر، نشان‌دهنده آن است که در مناطق غربی شهر و همچنین در حاشیه ارتفاعات جنوبی، خاک‌ها عمدتاً بافت شنی داشته و این ترکیب شنی در عمق نیز ادامه می‌یابد و توسعه عمودی بیشتری دارد. در نواحی مرکزی شهر، به‌ویژه در محدوده‌ای میان میدان فردوسی تا حرم مطهر رضوی، ترکیب خاک در لایه‌های سطحی غالباً از نوع سیلت‌رسی ماسه‌دار است که با افزایش عمق، درصد ماسه به‌تدریج افزایش می‌یابد. با این حال، در هر دو راستای قائم و افقی، تغییرات بافت خاک در این نواحی به‌طور محسوسی مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده ناهمگنی قابل‌توجه در رسوبات آبرفتی منطقه است (Hafezi Moghaddas et al., 2011).

جدول ۱. توصیف آماری متغیرهای نمونه‌های خاک

Table 1. Statistical description of soil sample variables

متغیر	تعداد	میانگین	انحراف معیار	کمینه	بیشینه
عمق (D)	۱۶۰	۱۹/۵۷	۰/۸۴	۴	۳۹/۳۰
درصد شن (GC%)	۱۶۰	۲۱/۵۳	۱/۲۷	۰	۵۶
درصد ماسه (SC%)	۱۶۰	۳۴/۱۵	۱/۲۷	۱	۵۸
درصد ریز دانه (FC%)	۱۶۰	۴۴/۴۴	۲/۳۴	۱۱/۶۰	۹۹
قطر مربوط به عبوری ۱۰ درصد (D ₁₀)	۱۶۰	۰/۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۰۱	۰/۰۸
قطر مربوط به عبوری ۳۰ درصد (D ₃₀)	۱۶۰	۰/۱۹	۰/۰۲	۰/۰۰۵	۱/۲۰
قطر مربوط به عبوری ۶۰ درصد (D ₆₀)	۱۶۰	۲/۰۸	۰/۱۶	۰/۰۲	۱۱
ضریب یکنواختی (C _u)	۱۶۰	۱۱۸/۹۲	۷/۳۶	۸/۵۰	۴۶۶
ضریب دانه‌بندی (C _c)	۱۶۰	۱/۶۱	۰/۰۹	۰/۱۰	۵/۶۰
حد روانی (LL%)	۱۶۰	۲۲/۹۸	۰/۳۶	۱۷/۶۰	۳۴/۱۰
حد پلاستیک (PL%)	۱۶۰	۱۷/۷۴	۰/۱۶	۱۳/۹۰	۲۳/۲۰
درصد رطوبت (ω%)	۱۶۰	۷/۵۸	۰/۴۲	۱/۴۰	۲۱/۵۰
دانسیته طبیعی خاک (γ _t)	۱۶۰	۱/۸۹	۰/۰۰۵	۱/۷۲	۲/۰۵
دانسیته خشک خاک (γ _d)	۱۶۰	۱/۷۷	۰/۰۰۹	۱/۵۳	۲
چگالی (Gs)	۱۶۰	۲/۶۹	۰/۰۰۲	۲/۶۴	۲/۷۴
درصد گچ (Gy)	۱۶۰	۰/۱۵	۰/۰۳	۰/۰۲	۳/۴۰
درصد کربنات (CaCO ₃)	۱۶۰	۸/۰۱	۰/۳۶	۰	۲۲/۹۰
درصد مواد آلی (OM)	۱۶۰	۰/۱۰	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۷۸
تنش برجا (σ)	۱۶۰	۳۶۲/۴۰	۱۵/۶۰	۶۵/۵۰	۷۴۶/۹۰
مدول پرسیومتري (E _p)	۱۶۰	۵۰۷/۲۵	۱۷۷/۶۹	۱۰۳	۹۳۶/۹۰

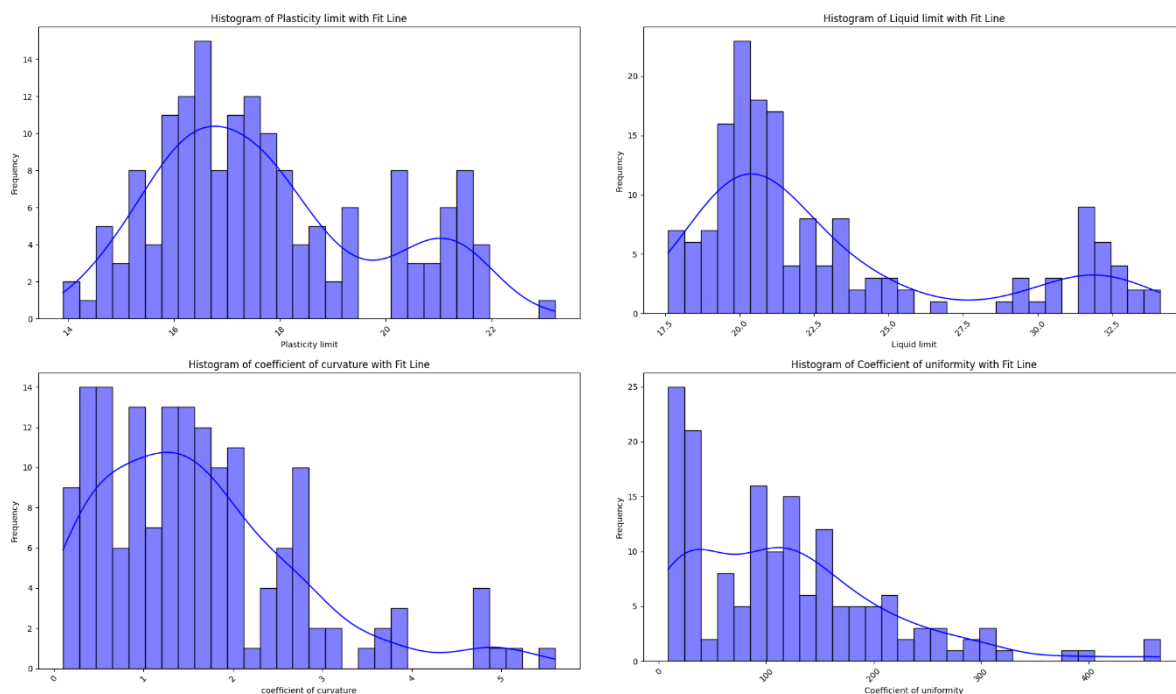
تحلیل پراکندگی و هیستوگرام متغیرهای نمونه‌های خاک

در این بخش به تحلیل هیستوگرام‌های متغیرهای فیزیکی و ژئوتکنیکی نمونه‌های خاک پرداخته شده است. شکل ۳ تا شکل ۷، توزیع فراوانی متغیرهای کلیدی نظیر درصد رطوبت، حد پلاستیک، قطر عبوری ۶۰ درصد، دانسیته طبیعی و چگالی را نشان می‌دهند. این نمودارها به درک دقیق‌تری از ماهیت داده‌ها، تشخیص الگوهای موجود و شناسایی پراکندگی و تمرکز مقادیر کمک می‌کنند.

تحلیل شکل‌های مذکور نشان می‌دهد که متغیرهایی مانند دانسیته طبیعی و چگالی دارای توزیع نسبتاً متقارن هستند که بیانگر همگنی نسبی در داده‌های برداشت شده در این

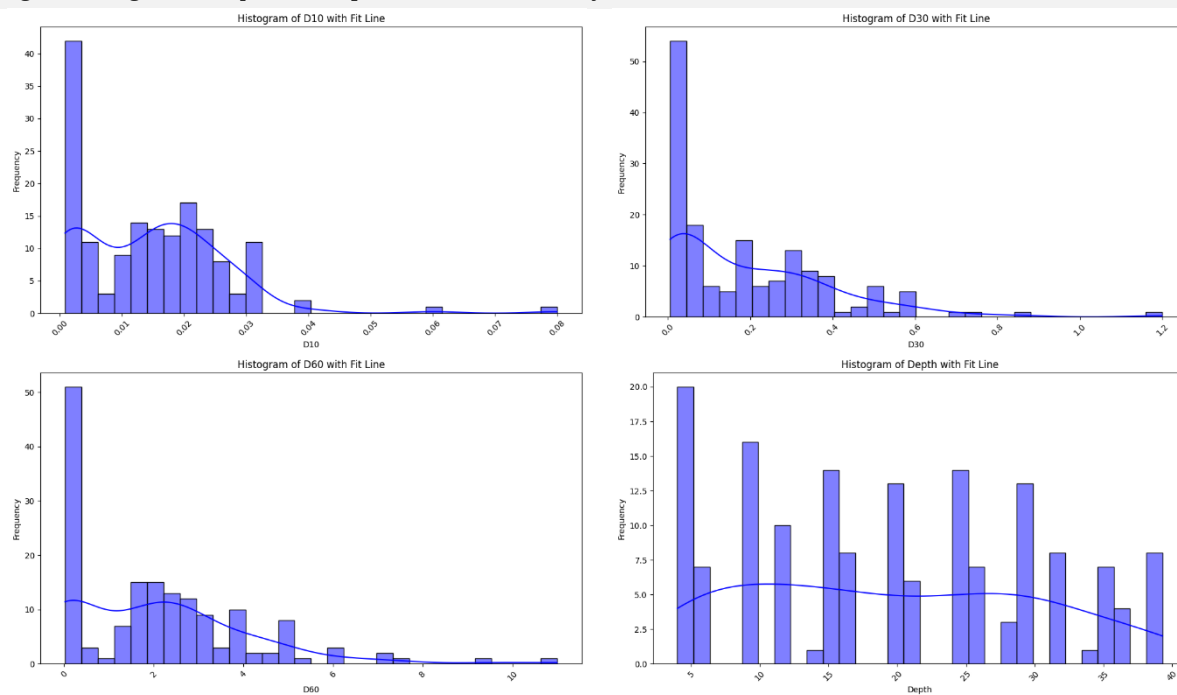
زمینه است. در مقابل، متغیرهایی مانند درصد رطوبت و حد پلاستیک دارای چولگی مثبت و تمایل به تمرکز در مقادیر پایین‌تر هستند که بیانگر ناهمگنی در شرایط رطوبتی و ترکیب ریزدانه‌ها در منطقه مطالعه است. همچنین، متغیر قطر عبوری ۶۰ درصد دارای پراکندگی نسبتاً وسیعی است که ممکن است ناشی از تفاوت در نوع و منشأ رسوبات آبرفتی باشد. این تفاوت‌ها می‌توانند به شرایط زمین‌شناسی موضعی، نحوه رسوب‌گذاری و تاریخچه تراکم‌پذیری در نواحی مختلف محدوده مورد مطالعه مرتبط باشند. در مجموع، تحلیل هیستوگرام‌ها بیانگر تنوع قابل توجه در ویژگی‌های نمونه‌ها بوده و نشان می‌دهد که مدل‌سازی آماری چندمتغیره

می‌تواند ابزاری مؤثر برای استخراج روابط معنادار میان این متغیرها و مدول الاستیسیته باشد.



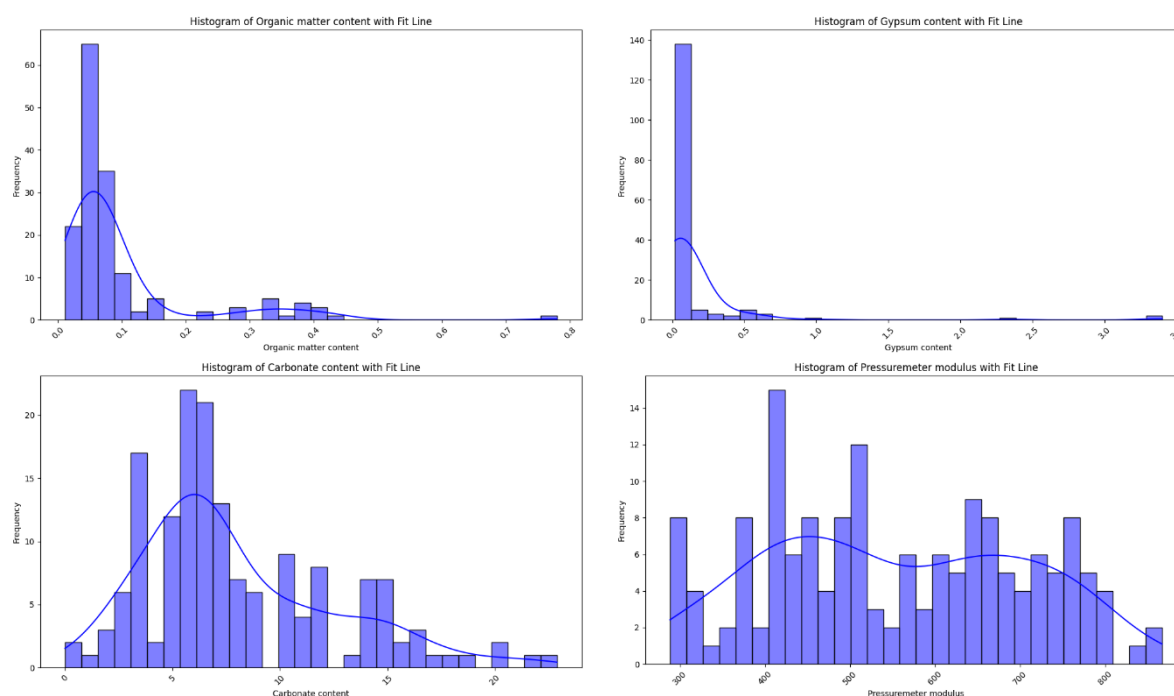
شکل ۳. هیستوگرام پارامترهای حد روانی، حد پلاستیک، ضریب یکنواختی و ضریب دانه‌بندی

Fig. 3. Histogram of liquid limit, plastic limit, uniformity coefficient and coefficient of curvature



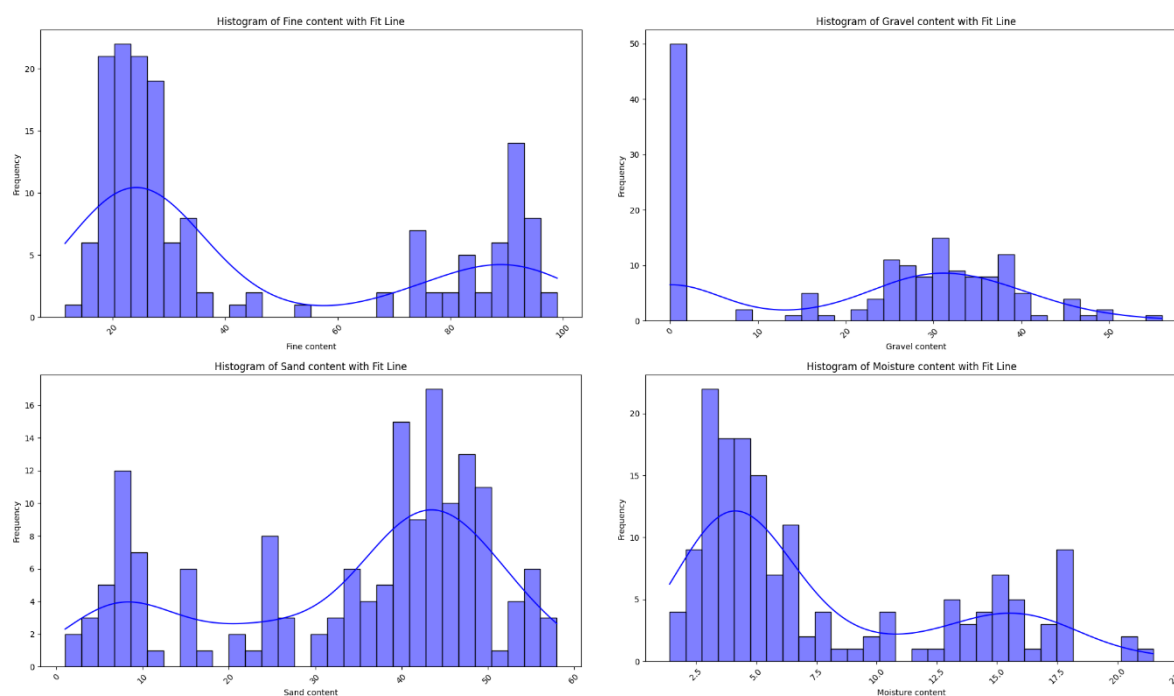
شکل ۴. هیستوگرام پارامترهای قطره‌های مربوط به عبوری ۱۰، ۳۰ و ۶۰ درصد و عمق

Fig. 4. Histogram of D_{10} , D_{30} , D_{60} and depth



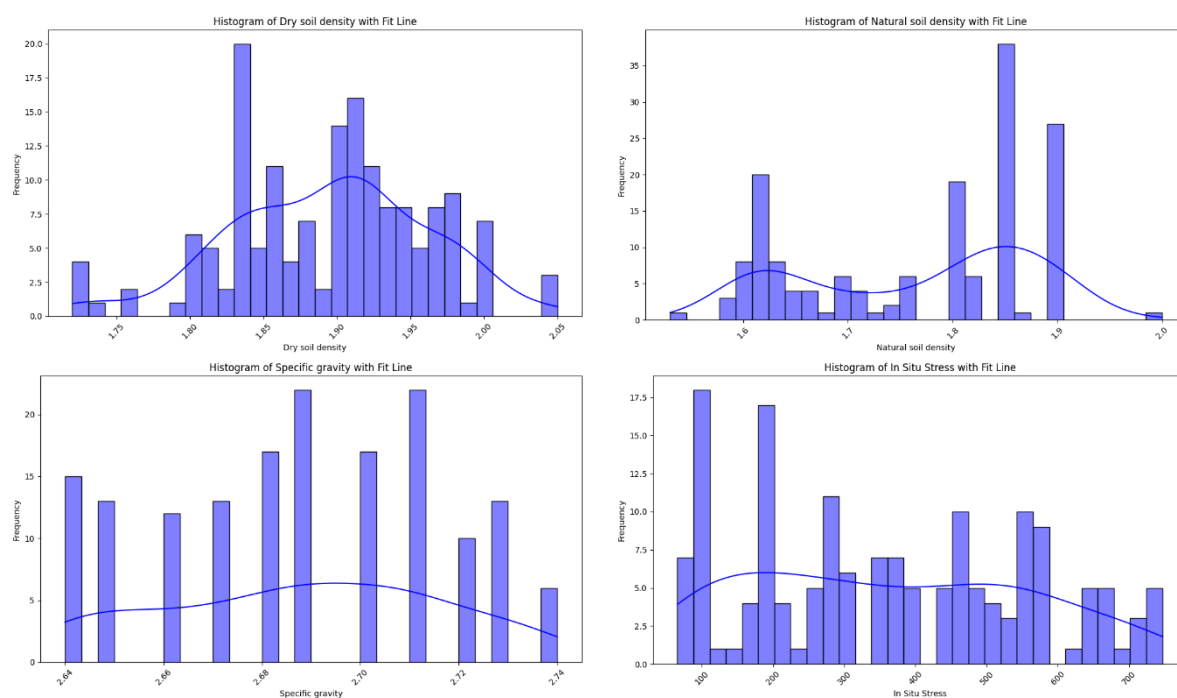
شکل ۵. هیستوگرام پارامترهای محتوای مواد آلی، گچ و کربنات کلسیم و مدول الاستیسیت

Fig. 5. Histogram of organic matter, gypsum, calcium carbonate content, and elastic modulus



شکل ۶. هیستوگرام پارامترهای محتوای درصد شن، ماسه، ریزدانه (رس و سیلت) و رطوبت

Fig. 6. Histogram of percentage content of sand, gravel, fine grain (clay and silt) and moisture content



شکل ۷. هیستوگرام پارامترهای دانسیته طبیعی، دانسیته خشک، چگالی و تنش برجا

Fig. 7. Histogram of natural density, dry density, specific gravity and in-situ stress

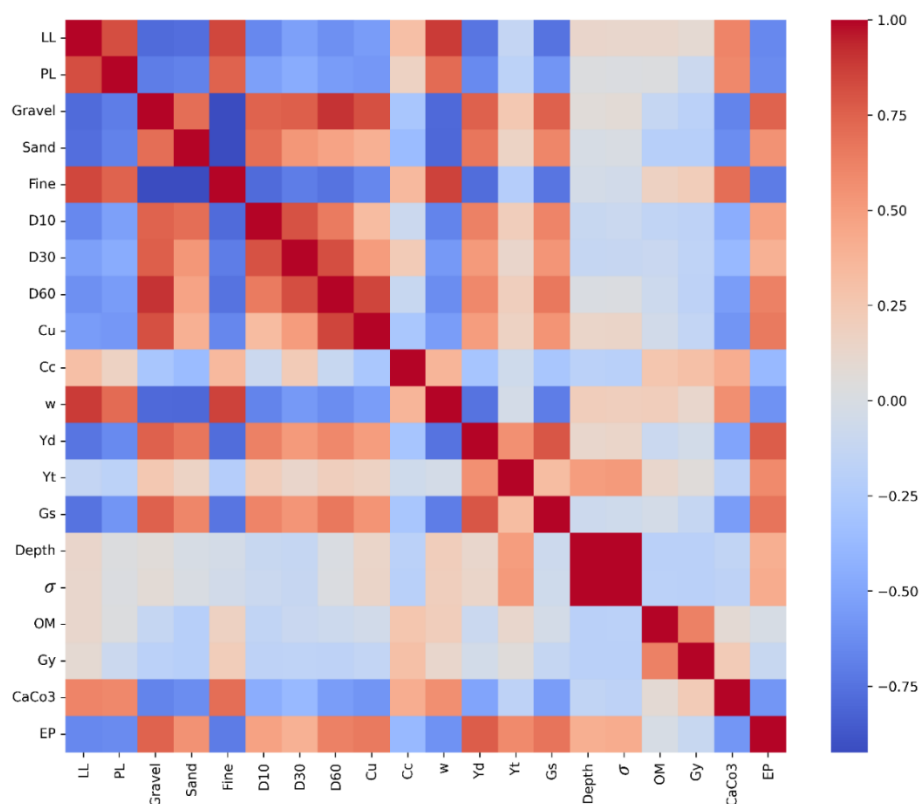
دقیق‌تر، از تحلیل رگرسیون خطی بهره گرفته شده تا اثر هم‌زمان متغیرهای مستقل بر مدول الاستیسیته بررسی گردد. برازش مدل رگرسیون، نحوه تأثیرگذاری هر یک از متغیرهای پایه‌ای خاک بر مقدار مدول الاستیسیته حاصل از آزمون پرسپومتری (E_p) را مشخص می‌سازد.

در شکل ۸، نمودار حرارتی (Heatmap) ضرایب همبستگی پیرسون میان متغیرهای مستقل و مدول الاستیسیته پرسپومتری (E_p) به صورت بصری نمایش داده شده است. این نمودار با استفاده از طیف رنگی، شدت و جهت همبستگی را نشان می‌دهد؛ به گونه‌ای که رنگ‌های متمایل به قرمز بیانگر همبستگی مثبت و رنگ‌های متمایل به آبی نمایانگر همبستگی منفی بین متغیرها هستند. هدف از ارائه این نمودار، شناسایی اولیه متغیرهای تأثیرگذار بر مدول الاستیسیته و نیز بررسی هم‌خطی احتمالی میان پارامترها است. براساس مشاهدات بصری، متغیرهایی نظیر دانسیته خشک، درصد شن، درصد ریزدانه، حد روانی، چگالی ویژه و محتوای رطوبت بیشترین ارتباط را با E_p نشان می‌دهند.

بررسی رابطه خطی بین متغیرهای مستقل و مدول الاستیسیته

تحلیل همبستگی و تعیین روابط خطی میان متغیرهای مستقل و مدول الاستیسیته، از اهمیت بالایی در مطالعات ژئوتکنیکی برخوردار است. شناخت این روابط به پژوهشگران این امکان را می‌دهد تا تأثیر نسبی هر یک از عوامل فیزیکی و مکانیکی خاک را بر رفتار تغییرشکل‌پذیری مصالح آبرفتی به درستی ارزیابی نمایند. انجام چنین تحلیل‌هایی، به‌ویژه در چارچوب توسعه مدل‌های پیش‌بینی، می‌تواند نقش مؤثری در بهینه‌سازی طراحی‌های مهندسی و ارتقای دقت تصمیم‌گیری‌ها ایفا کند.

در گام نخست، برای ارزیابی شدت و جهت رابطه خطی میان متغیرهای مستقل و مدول الاستیسیته، از ضریب همبستگی پیرسون استفاده شده است. این ضریب، رابطه خطی دو متغیر را از لحاظ مثبت یا منفی بودن و میزان وابستگی کمی آن‌ها مشخص می‌سازد. در ادامه، به منظور مدل‌سازی



شکل ۸. تجسم الگوهای ارتباطی متغیرها با مدول الاستیسیته با استفاده از نمودار حرارتی

Fig. 8. Visualizing the relationship patterns of variables with the modulus of elasticity using a heatmap

متغیرهای مستقل در مدل اولیه وارد می‌شوند. در گام بعد، متغیرهایی که کمترین اهمیت آماری را دارند (براساس معیارهایی نظیر سطح معنی‌داری یا P-Value) شناسایی و به صورت تدریجی حذف می‌شوند. این فرآیند به صورت تکرارشونده ادامه می‌یابد تا زمانی که تنها متغیرهای دارای معناداری آماری در مدل باقی بمانند و حذف بیشتر متغیرها موجب تضعیف معناداری مدل نشود.

در این تحقیق، فرآیند حذف متغیرها طی ۱۱ مرحله متوالی انجام شده که نتایج کامل آن در جدول ۲ ارائه شده است. همچنین، جدول ۳ شامل نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) مربوط به مدل نهایی است که دلالت بر برازش آماری مطلوب مدل نهایی و معناداری متغیرهای باقی‌مانده دارد.

تعیین مدل جامع خطی چند متغیره برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته

مدل ارائه‌شده در این پژوهش، به صورت یکپارچه و با هدف پوشش طیف وسیعی از خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه تدوین شده است. برای دستیابی به یک مدل جامع رگرسیون خطی چندمتغیره، از روش گام‌به‌گام رو به عقب (Backward Elimination) به عنوان تکنیک انتخاب متغیر استفاده گردید. این روش به دلیل توانایی آن در شناسایی مؤثر متغیرهای معنادار آماری و حذف تدریجی عوامل کم اهمیت، یکی از ابزارهای رایج در مدل‌سازی رگرسیونی محسوب می‌شود.

فرآیند تحلیل آماری در محیط نرم‌افزار Python انجام شده و شامل سه مرحله اصلی است. در مرحله نخست، تمامی

جدول ۲. مراحل و نتایج تحلیل رگرسیون چندگانه به روش گام‌به‌گام رو به عقب

Table 2. Steps and results of multiple regression analysis using the backward stepwise method

مرحله	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل شده	تغییر ضریب تعیین	متغیرهای مورد استفاده
۱	۰/۸۸	۰/۸۶	۰/۸۸	GC, SC, FC, LL, PL, ω , γ_t , γ_d , Gs, Gy, CaCO ₃ , OM, σ , D, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ , C _C , C _U
۲	۰/۸۸	۰/۸۶	۰	GC, SC, FC, LL, PL, ω , γ_t , γ_d , Gs, Gy, CaCO ₃ , OM, σ , D, D ₁₀ , C _U , D ₃₀ , D ₆₀
۳	۰/۸۸	۰/۸۶	۰	GC, SC, FC, PL, ω , γ_t , γ_d , Gs, Gy, CaCO ₃ , OM, σ , D, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ , C _U
۴	۰/۸۸	۰/۸۶	۰	GC, SC, FC, PL, ω , γ_t , γ_d , Gs, Gy, CaCO ₃ , OM, D, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ , C _U
۵	۰/۸۸	۰/۸۶	۰	GC, SC, FC, PL, ω , γ_t , γ_d , Gs, Gy, OM, D, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ , C _U
۶	۰/۸۸	۰/۸۶	۰	GC, SC, FC, PL, ω , γ_t , γ_d , Gs, Gy, OM, D, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀
۷	۰/۸۸	۰/۸۶	۰	GC, SC, FC, PL, ω , γ_t , γ_d , Gs, Gy, OM, D, D ₃₀ , D ₆₀
۸	۰/۸۷	۰/۸۶	-۰/۰۰۱	GC, SC, FC, PL, ω , γ_t , Gs, Gy, OM, D, D ₃₀ , D ₆₀
۹	۰/۸۷	۰/۸۶	-۰/۰۰۱	SC, FC, PL, ω , γ_t , Gs, Gy, OM, D, D ₃₀ , D ₆₀
۱۰	۰/۸۷	۰/۸۶	-۰/۰۰۲	SC, PL, ω , γ_t , Gs, Gy, OM, D, D ₃₀ , D ₆₀
۱۱	۰/۸۷	۰/۸۶	-۰/۰۰۱	PL, ω , γ_t , Gs, Gy, OM, D, D ₃₀ , D ₆₀

جدول ۳. نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) مدل نهایی

Table 3. Analysis of variance (ANOVA) results of the final model

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره F	مقدار p
رگرسیون	۹	۳۱۴۳۱۱۳	۳۴۹۲۳۴	۱۱۲/۱۹	۰
باقیمانده	۱۵۰	۴۶۶۹۳۰	۳۱۱۲	-	-
کل	۱۵۹	۳۶۱۰۰۴۴	-	-	-

ضرایب مدل رگرسیون چندگانه نهایی که با استفاده از روش گام‌به‌گام رو به عقب به‌دست آمده‌اند، در جدول ۴ ارائه شده است. نتایج این مدل نشان می‌دهد که متغیرهای حد پلاستیک، قطر معادل عبوری ۳۰ درصد و ۶۰ درصد ذرات از الک (D₃₀ و D₆₀)، دانسیته طبیعی، درصد رطوبت، چگالی، عمق نمونه‌برداری و میزان سیمان‌شدگی خاک (شامل درصد مواد آلی و گچ) تأثیر آماری معناداری بر مدول الاستیسیته خاک دارند و می‌توان از آن‌ها برای پیش‌بینی دقیق این پارامتر مکانیکی استفاده نمود.

بر اساس یافته‌های مدل، متغیرهای D₆₀، دانسیته طبیعی، چگالی، عمق و درصد مواد آلی دارای تأثیر مثبت و معنادار بر افزایش مدول الاستیسیته می‌باشند. در مقابل، افزایش حد

پلاستیک، D₃₀، درصد رطوبت و محتوای گچ منجر به کاهش معنادار در مقدار مدول الاستیسیته می‌گردد. این نتایج بر تأثیر هم‌زمان ویژگی‌های فیزیکی، ژئوشیمیایی و وضعیت لایه‌بندی خاک بر رفتار تغییرشکل‌پذیری آن دلالت دارد. علاوه بر این، مقادیر آماره تورم واریانس (VIF) برای متغیرهای مستقل، همگی کمتر از عدد بحرانی ۵ هستند که نشان می‌دهد پدیده هم‌خطی (Multicollinearity) میان متغیرها در مدل وجود نداشته و متغیرها از استقلال نسبی قابل قبولی برخوردارند.

جدول ۴. ضرایب مدل رگرسیون چند متغیره

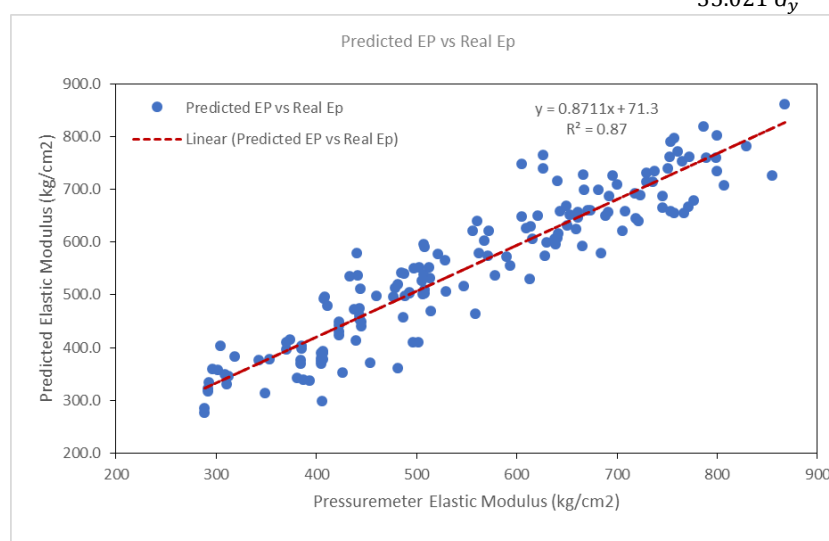
Table 4. Multivariate regression model coefficients

متغیر	ضریب	ضریب استاندارد شده بتا	آماره t	مقدار p	آماره هم خطی VIF (عامل تورم واریانس)
عرض از مبدا	-۲۵۵۳/۹۶		-۳/۷۶	۰	
حد پلاستیک	-۱۱/۶۴	-۰/۱۶	-۳/۴۵	۰/۰۰۱	۲/۴۹
قطر مربوط به عبوری ۳۰ درصد	-۱۸۹/۴۰	-۰/۲۵	-۴/۷۱	۰	۳/۳۹
قطر مربوط به عبوری ۶۰ درصد	۲۴/۷۷	۰/۳۳	۵/۳۵	۰	۴/۳۹
درصد رطوبت	-۱۱/۵۹	-۰/۴۱	-۷/۲۱	۰	۳/۷۵
دانسیته طبیعی	۶۱۵/۲۱	۰/۲۷	۶/۷۲	۰	۱/۹۱
چگالی	۷۸۲/۶۴	۰/۱۵	۲/۹۱	۰/۰۴	۳/۰۲
عمق	۵/۰۵	۰/۳۵	۸/۶۳	۰	۱/۹۵
مواد آلی	۲۴۱/۵۰	۰/۱۸	۴/۴۱	۰	۱/۹۱
گچ	-۳۵/۰۲	-۰/۱	-۲/۴۷	۰/۰۱	۱/۹۰

مدل نهایی رگرسیون چندگانه خطی برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته خاک (Ep) به صورت زیر (معادله ۱) است:

$$Ep = -2553.959 - 11.637 PL - 189.396 D_{30} + 24.767 D_{60} - 11.586 \omega + 615.21 \gamma_t + 782.639 G_s + 5.048 D + 241.498 OM - 35.021 G_y \quad (1)$$

نمودار پراکندگی داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده مدول الاستیسیته و برازش مدل رگرسیون چندگانه در شکل ۹ آورده شده است.



شکل ۹. پراکندگی داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده مدول الاستیسیته و نمودار برازش مدل رگرسیون چندگانه

Fig. 9. Scatterplot of actual and predicted elastic modulus data and multiple regression model fit plot

تعیین مدل خطی پیش‌بینی مدول الاستیسیته بر اساس دانه‌بندی

در مطالعات ژئوتکنیکی، تفکیک خاک‌ها به دو گروه اصلی ریزدانه (شامل رس و سیلت) و درشت‌دانه (شامل ماسه و شن) از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. این دسته‌بندی بر پایه تفاوت‌های بنیادی در رفتار مکانیکی، فیزیکی و هیدرولیکی این دو نوع خاک انجام می‌گیرد. به‌طور خاص، خاک‌های ریزدانه به دلیل ابعاد بسیار کوچک ذرات و چسبندگی بالا، در برابر تنش‌های اعمال‌شده واکنشی متفاوت نسبت به خاک‌های درشت‌دانه نشان می‌دهند. این تفاوت‌ها در تحلیل و برآورد پارامترهایی نظیر مدول الاستیسیته، که از جمله مهم‌ترین ویژگی‌های مکانیکی خاک در طراحی‌های مهندسی محسوب می‌شود، بسیار اثرگذار است.

بر همین اساس، در ادامه این پژوهش، پایگاه داده با توجه به خصوصیت غالب دانه‌بندی، به دو زیرمجموعه مستقل شامل خاک‌های عمدتاً درشت‌دانه و خاک‌های غالباً ریزدانه تقسیم گردید. سپس برای هر گروه، به‌طور جداگانه مدل رگرسیونی جهت پیش‌بینی مدول الاستیسیته توسعه داده شد. این تفکیک امکان بررسی دقیق‌تر اثرات نسبی متغیرها و بهبود دقت پیش‌بینی در هر دسته خاک را فراهم می‌سازد.

تعیین مدل خطی پیش‌بینی مدول الاستیسیته خاک درشت‌دانه

به منظور تعیین مدل خطی چندمتغیره برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته خاک درشت‌دانه، از روش گام‌به‌گام رو به عقب استفاده شده است. بر اساس این روش به منظور رسیدن به مدل نهایی ۱۳ مرحله طی شده که در جدول ۵ نتایج تحلیل رگرسیون این مراحل شرح داده شده است. جدول ۶ نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) مدل نهایی را نشان می‌دهد.

ضریب استاندارد شده بتا در تحلیل رگرسیون خطی، ابزاری مهم برای سنجش اهمیت نسبی متغیرهای مستقل در مدل محسوب می‌شود. این ضریب، به دلیل حذف واحد اندازه‌گیری از طریق استانداردسازی، امکان مقایسه مستقیم میزان تأثیرگذاری هر متغیر مستقل بر متغیر وابسته را فراهم می‌سازد.

نتایج تحلیل ضرایب استاندارد شده مدل حاضر نشان می‌دهد که برخی متغیرها اثر مثبت و برخی دیگر اثر منفی بر مدول الاستیسیته دارند. در این میان، متغیر درصد رطوبت، با ضریب بتای منفی معادل $-0/410$ ، بیشترین تأثیر منفی را بر مدول الاستیسیته داشته و کاهش آن را به‌طور معنادار نشان می‌دهد. در مقابل، متغیر عمق، با ضریب بتای مثبت $0/354$ ، دارای یکی از قوی‌ترین تأثیرات افزایشی بر مدول الاستیسیته است.

علاوه بر این، متغیرهای دیگری نظیر قطر عبوری 60 درصد (D_{60})، دانسیته طبیعی، چگالی و محتوای مواد آلی نیز تأثیر مثبت بر متغیر وابسته دارند، اگرچه میزان تأثیرگذاری چگالی و مواد آلی نسبتاً کمتر است. در سوی مقابل، متغیرهایی چون حد پلاستیک و قطر عبوری 30 درصد (D_{30})، اثر منفی بر مدول الاستیسیته از خود نشان داده‌اند. همچنین، متغیر گچ، با ضریب بتای منفی بسیار پایین، کمترین نقش را در میان متغیرهای بررسی‌شده ایفا کرده است.

بر اساس این تحلیل می‌توان نتیجه گرفت که متغیر درصد رطوبت، بیشترین تأثیر منفی و متغیرهای عمق و D_{60} ، بیشترین تأثیر مثبت را بر مدول الاستیسیته در مدل نهایی دارا می‌باشند.

جدول ۵. مراحل و نتایج تحلیل رگرسیون چندگانه به روش گام‌به‌گام رو به عقب برای خاک درشت دانه

Table 5. Steps and results of multiple regression analysis using the backward stepwise method for coarse-grained soil

مرحله	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل شده	تغییر ضریب تعیین	متغیرهای مورد استفاده
۱	۰/۷۷	۰/۷۲	۰/۷۷	GC, SC, FC, LL, PL, ω , γ_t , γ_d , Gs, Gy, CaCO ₃ , OM, σ , D, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ , C _C , C _U
۲	۰/۷۷	۰/۷۲	۰	GC, SC, FC, PL, ω , γ_t , γ_d , Gs, Gy, CaCO ₃ , OM, σ , D, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ , C _C , C _U
۳	۰/۷۶	۰/۷۲	۰	GC, SC, FC, PL, ω , γ_t , γ_d , Gs, Gy, CaCO ₃ , OM, σ , D, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ , C _U
۴	۰/۷۶	۰/۷۲	۰	GC, SC, FC, PL, ω , γ_t , γ_d , Gs, Gy, CaCO ₃ , OM, D, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ , C _U
۵	۰/۷۶	۰/۷۳	۰	GC, SC, FC, PL, ω , γ_t , Gs, Gy, CaCO ₃ , OM, D, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ , C _U
۶	۰/۷۶	۰/۷۳	-۰/۰۰۱	GC, SC, FC, PL, ω , γ_t , Gs, Gy, CaCO ₃ , OM, D, D ₁₀ , D ₃₀ , C _U
۷	۰/۷۶	۰/۷۳	-۰/۰۰۱	SC, FC, PL, ω , γ_t , Gs, Gy, CaCO ₃ , OM, D, D ₁₀ , D ₃₀ , C _U
۸	۰/۷۶	۰/۷۳	-۰/۰۰۱	SC, FC, PL, ω , γ_t , Gs, Gy, OM, D, D ₁₀ , D ₃₀ , C _U
۹	۰/۷۶	۰/۷۳	-۰/۰۰۲	SC, PL, ω , γ_t , Gs, Gy, OM, D, D ₁₀ , D ₃₀ , C _U
۱۰	۰/۷۵	۰/۷۳۰	-۰/۰۰۴	SC, PL, ω , γ_t , Gs, OM, D, D ₁₀ , D ₃₀ , C _U
۱۱	۰/۷۵	۰/۷۳	-۰/۰۰۶	SC, PL, ω , γ_t , Gs, OM, D, D ₃₀ , C _U
۱۲	۰/۷۴	۰/۷۲	-۰/۰۰۳	SC, PL, ω , γ_t , Gs, OM, D, C _U
۱۳	۰/۷۴	۰/۷۲	-۰/۰۰۳	SC, PL, ω , γ_t , Gs, OM, D

جدول ۶. نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) مدل نهایی خاک درشت دانه

Table 6. Analysis of variance (ANOVA) results of the final model for coarse-grained soil

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره F	مقدار p
رگرسیون	۷	۱۰۶۵۸۴۵	۱۵۲۲۶۳	۴۱/۵۸	۰
باقیمانده	۱۰۱	۳۶۹۸۹۴	۳۶۶۲	-	-
کل	۱۰۸	۱۴۳۵۷۴۰	-	-	-

ضرایب رگرسیون چندگانه مدل نهایی به دست آمده به روش گام‌به‌گام رو به عقب برای گروه خاک‌های درشت‌دانه در جدول ۷ ارائه شده است. بر اساس نتایج این مدل، متغیرهای حد پلاستیک، درصد ماسه، دانسیته طبیعی خاک، درصد رطوبت، چگالی (در سطح معناداری ۹۰ درصد)، عمق و سیمان‌شدگی (شامل مواد آلی) اثر معناداری بر مدول الاستیسیته داشته و می‌توانند به عنوان متغیرهای پیش‌بین معتبر در مدل‌سازی این پارامتر مکانیکی استفاده شوند.

تحلیل ضرایب رگرسیون نشان می‌دهد که افزایش مقادیر دانسیته طبیعی خاک، عمق، چگالی و محتوای مواد آلی با افزایش معنادار مقدار مدول الاستیسیته همراه است. در مقابل، افزایش حد پلاستیک، درصد ماسه و درصد رطوبت تأثیر منفی و معناداری بر مقدار مدول الاستیسیته دارد. همچنین، مقادیر آماره‌ی تورم واریانس (VIF) برای همه متغیرهای مستقل کمتر از ۵ گزارش شده است که این امر نشان‌دهنده عدم وجود هم‌خطی چندگانه قابل توجه بین متغیرها و استقلال نسبی آن‌ها در مدل می‌باشد.

جدول ۷. ضرایب مدل رگرسیون چند متغیره برای خاک درشت دانه

Table 7. Multivariate regression model coefficients for coarse-grained soil

متغیر	ضریب	ضریب استاندارد شده بتا	آماره t	مقدار p	آماره هم خطی VIF (عامل تورم واریانس)
عرض از مبدا	-۱۶۷۲/۴۷	-	-۱/۹۹	۰/۰۵	-
حد پلاستیک	-۱۴/۷۱	-۰/۱۴	-۲/۷۹	۰/۰۰۶	۱/۰۴
درصد رطوبت	-۱۱/۸۰	-۰/۲۰	-۳/۴۷	۰/۰۰۱	۱/۲۴
دانسیته طبیعی	۶۰۳/۹۱	-۰/۳۴	۵/۰۱	۰	۱/۳۲
چگالی	۵۶۵/۵۸	۰/۱۰	۱/۷۲	۰/۰۹	۱/۷۹
عمق	۵/۶۲	۰/۵۳	۷/۳۵	۰	۱/۴۰
مواد آلی	۱۹۹/۲۱	۰/۱۹	۳/۲۴	۰/۰۰۲	۲/۰۷
درصد ماسه	-۴/۷۹	-۰/۲۷	-۴/۸۴	۰	۱/۳۰

شدت این تأثیر در دامنه‌ای از کم تا متوسط قرار دارد، اما روند منفی آن‌ها بر رفتار تغییرشکل‌پذیری خاک درشت‌دانه مشهود است. در مقابل، متغیرهایی نظیر دانسیته طبیعی، چگالی و عمق دارای اثر مثبت بر مدول الاستیسیته هستند که در میان آن‌ها، عمق بیشترین سهم تأثیر را به خود اختصاص داده است. همچنین، تأثیر مثبت مواد آلی بر مدول الاستیسیته نیز قابل مشاهده است، اگرچه این تأثیر از نظر شدت در سطح نسبتاً پایینی قرار دارد.

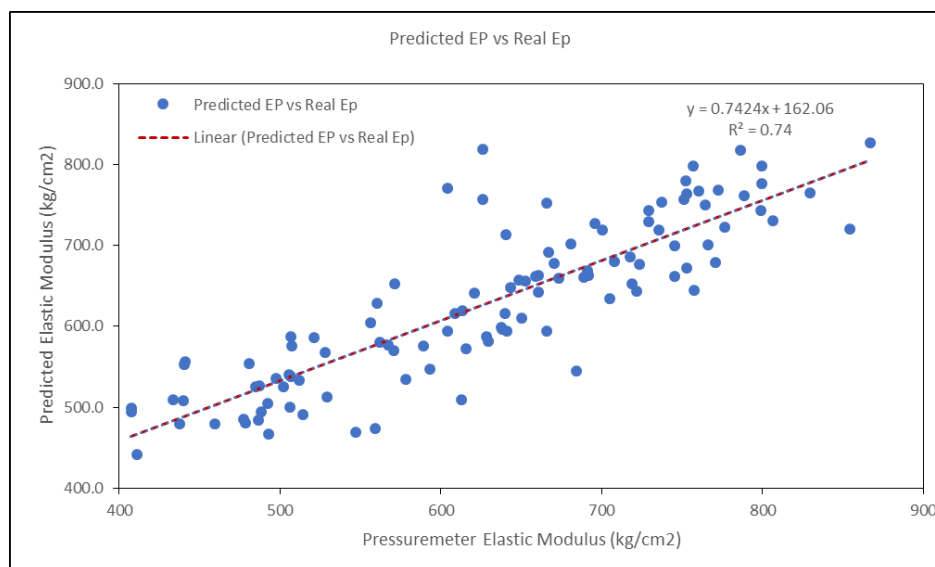
بر اساس این تحلیل می‌توان نتیجه گرفت که عمق و دانسیته طبیعی به‌عنوان مؤثرترین پارامترهای مثبت و درصد ماسه و رطوبت به‌عنوان مهم‌ترین عوامل کاهنده، نقش کلیدی در پیش‌بینی مدول الاستیسیته خاک‌های درشت‌دانه ایفا می‌کنند.

مدل نهایی رگرسیون چندگانه خطی برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته خاک درشت دانه (E_p) به صورت زیر (معادله ۲) است:

$$E_p = -1672.468 - 14.709 PL - 4.793 SC - 11.802 \omega + 603.907 \gamma_t + 565.577 G_s + 5.624 D + 199.210 OM \quad (2)$$

در ادامه، نمودار پراکندگی داده‌های واقعی و مقادیر پیش‌بینی‌شده مدول الاستیسیته به همراه منحنی برازش مدل رگرسیون چندگانه برای گروه خاک‌های درشت‌دانه در شکل ۱۰ ارائه شده است. تحلیل ضرایب استاندارد شده بتا در این مدل نشان می‌دهد که برخی از متغیرهای مستقل تأثیر مثبت و برخی دیگر تأثیر منفی بر متغیر وابسته (مدول الاستیسیته) دارند.

به‌طور مشخص، متغیرهایی نظیر حد پلاستیک، درصد ماسه و درصد رطوبت تأثیر منفی بر مدول الاستیسیته دارند. گرچه



شکل ۱۰. پراکندگی داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده مدول الاستیسیته برای خاک درشت دانه

Fig. 10. Scatterplot of actual and predicted elastic modulus data for coarse-grained soil

عقب استفاده شده است. بر اساس این روش، به منظور رسیدن به مدل نهایی، ۱۳ مرحله طی شده که در جدول ۸ نتایج تحلیل رگرسیون این مراحل شرح داده شده است. در جدول ۹ نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) مدل نهایی آورده شده است.

تعیین مدل خطی پیش‌بینی مدول الاستیسیته خاک ریزدانه

به منظور تعیین مدل خطی چند متغیره برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته خاک ریز دانه، از روش گام‌به‌گام رو به

جدول ۸. مراحل و نتایج تحلیل رگرسیون چندگانه به روش گام‌به‌گام رو به عقب برای خاک ریزدانه

Table 8. Steps and results of multiple regression analysis using the backward stepwise method for fine-grained soil

مرحله	ضریب تعیین	ضریب تعیین تعدیل شده	تغییر ضریب تعیین	متغیرهای مورد استفاده
۱	۰/۷۷	۰/۶۴	۰/۷۷	SC, FC, LL, PL, ω , γ_t , γ_d , Gs, Gy, CaCO ₃ , OM, σ , D, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ , C _c , C _u
۲	۰/۷۷	۰/۶۵	۰	SC, FC, PL, ω , γ_t , γ_d , Gs, Gy, CaCO ₃ , OM, σ , D, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ , C _c , C _u
۳	۰/۷۷	۰/۶۶	-۰/۰۰۱	SC, FC, PL, ω , γ_t , γ_d , Gs, CaCO ₃ , OM, σ , D, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ , C _c , C _u
۴	۰/۷۷	۰/۶۷	۰	SC, FC, PL, ω , γ_t , γ_d , Gs, CaCO ₃ , OM, D, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ , C _c , C _u
۵	۰/۷۷	۰/۶۸	-۰/۰۰۱	FC, PL, ω , γ_t , γ_d , Gs, CaCO ₃ , OM, D, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ , C _c , C _u
۶	۰/۷۷	۰/۶۹	-۰/۰۰۲	FC, PL, ω , γ_t , γ_d , Gs, CaCO ₃ , OM, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ , C _c , C _u
۷	۰/۷۶	۰/۶۹	-۰/۰۰۵	FC, PL, ω , γ_t , γ_d , Gs, OM, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ , C _c , C _u
۸	۰/۷۶	۰/۶۹	-۰/۰۰۸	FC, PL, ω , γ_t , Gs, OM, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ , C _c , C _u
۹	۰/۷۵	۰/۶۹	-۰/۰۰۷	FC, PL, ω , γ_t , Gs, OM, D ₁₀ , D ₃₀ , D ₆₀ , C _u
۱۰	۰/۷۵	۰/۶۹	-۰/۰۰۱	FC, PL, ω , γ_t , Gs, OM, D ₃₀ , D ₆₀ , C _u
۱۱	۰/۷۵	۰/۷۰	-۰/۰۰۱	FC, PL, ω , γ_t , Gs, OM, D ₆₀ , C _u
۱۲	۰/۷۳	۰/۶۸	-۰/۰۰۲	FC, PL, ω , γ_t , Gs, D ₆₀ , C _u
۱۳	۰/۷۲	۰/۶۸	-۰/۰۰۱	PL, ω , γ_t , Gs, D ₆₀ , C _u

جدول ۹. نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) مدل نهایی خاک ریزدانه

Table 9. Analysis of variance (ANOVA) results of the final model for fine-grained soil

منبع تغییرات	درجه آزادی	مجموع مربعات	میانگین مربعات	آماره F	مقدار p
رگرسیون	۶	۱۴۹۳۲۶	۲۴۸۸۷	۱۸/۶۵	۰
باقیمانده	۴۴	۵۸۶۸۸	۱۳۳۳	-	-
کل	۵۰	۲۰۸۰۱۴	-	-	-

معنی‌دار مدول الاستیسیته می‌شود. در مقابل، افزایش قطر مربوط به عبوری ۶۰ درصد و رطوبت خاک، تأثیر منفی و معنی‌داری بر این مدول دارد. این یافته‌ها نشان می‌دهد که در خاک‌های ریزدانه، ساختار دانه‌بندی منسجم‌تر، تراکم بالاتر و ویژگی‌های فیزیکی پایدارتر با افزایش مقاومت تغییرشکل‌پذیری خاک همراه هستند، در حالی که بالا بودن درصد رطوبت و وجود ذرات درشت‌تر (D_{60}) می‌تواند منجر به تضعیف پاسخ مکانیکی خاک در برابر بارگذاری شود.

ضرایب رگرسیون چندگانه مدل نهایی که به روش گام‌به‌گام رو به عقب برای نمونه‌های خاک ریزدانه به‌دست آمده، در جدول ۱۰ ارائه شده است. نتایج این مدل نشان می‌دهد که متغیرهای حد پلاستیک، قطر معادل عبوری ۶۰ درصد، ضریب یکنواختی، دانسیته طبیعی، چگالی و میزان رطوبت دارای تأثیرات آماری معنادار بر مدول الاستیسیته هستند و می‌توانند به‌عنوان متغیرهای پیش‌بین در مدل‌های پیش‌بینی این پارامتر مورد استفاده قرار گیرند.

بر اساس این مدل، افزایش در مقادیر دانسیته طبیعی، حد پلاستیک، ضریب یکنواختی و چگالی منجر به افزایش

جدول ۱۰. ضرایب مدل رگرسیون چندمتغیره برای خاک ریزدانه

Table 10. Multivariate regression model coefficients for fine-grained soil

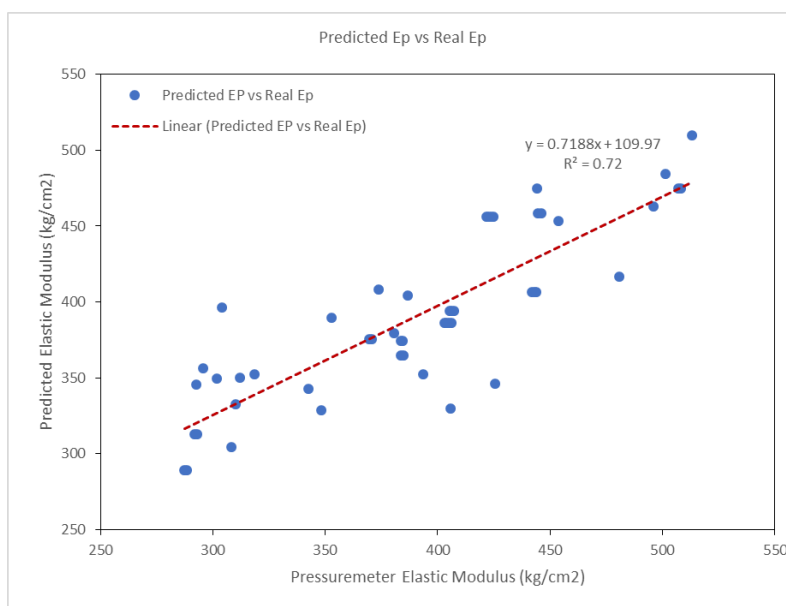
متغیر	ضریب	ضریب استاندارد شده بتا	آماره t	مقدار p	آماره هم خطی VIF (عامل تورم واریانس)
عرض از مبدا	-۸۷۱۰/۵۸	-	-۷/۶۰	۰	-
حد پلاستیک	۹/۷۲	۰/۲۶	۲/۳۸	۰/۰۲	۱/۹۱
قطر مربوط به عبوری ۶۰ درصد	-۶۸۱/۷۷	-۰/۳۲	-۲/۹۷	۰/۰۰۵	۱/۷۸
ضریب یکنواختی	۱/۸۷	۰/۷۹	۵/۷۴	۰	۲/۹۶
رطوبت	-۴/۶۹	-۰/۲۸	-۲/۰۷	۰/۰۴	۲/۹۶
دانسیته طبیعی	۶۵۱/۴۳	۰/۶۵	۵/۵۴	۰	۲/۱۴
چگالی	۲۹۰۹/۰۱	۰/۶۹	۶/۸۳	۰	۱/۵۸

$$E_p = -8710.584 + 9.718 PL - 681.773 D_{60} + 1.866 Cu - 4.687w + 651.430 \gamma_t + 2909.014 G_s \quad (3)$$

مدل نهایی رگرسیون چندگانه خطی برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته در خاک ریزدانه (E_p) به صورت زیر (معادله ۳) است:

در مقابل، افزایش مقدار قطر عبوری ۶۰ درصد و درصد رطوبت اثرات منفی بر مدول الاستیسیته دارند، به طوری که قطر عبوری ۶۰ درصد بزرگترین سهم منفی را در کاهش مقدار این پارامتر دارد. این نتایج نشان می‌دهد که در خاک‌های ریزدانه، ویژگی‌های دانه‌بندی منسجم‌تر و چگالی بالاتر موجب بهبود رفتار مکانیکی و افزایش مقاومت تغییرشکل‌پذیری می‌شود، در حالی که وجود رطوبت زیاد و ذرات درشت‌تر نقش تضعیف‌کننده دارند.

نمودار پراکندگی داده‌های واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده مدول الاستیسیته، به همراه منحنی برازش مدل رگرسیون در گروه خاک‌های ریزدانه، در شکل ۱۱ ترسیم شده است. تحلیل ضرایب استاندارد شده بتا در این مدل بیانگر آن است که متغیرهای مختلف تأثیرات متفاوتی بر متغیر وابسته (Ep) دارند. به طور خاص، افزایش ضریب یکنواختی، چگالی ویژه ذرات، دانسیته طبیعی و حد پلاستیک اثرات مثبت معناداری بر مدول الاستیسیته دارند، که در میان آن‌ها، ضریب یکنواختی بیشترین تأثیر مثبت را ایفا می‌کند.



شکل ۱۱. پراکندگی داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده مدول الاستیسیته برای خاک ریزدانه

Fig. 11. Scatterplot of actual and predicted elastic modulus data for fine-grained soil

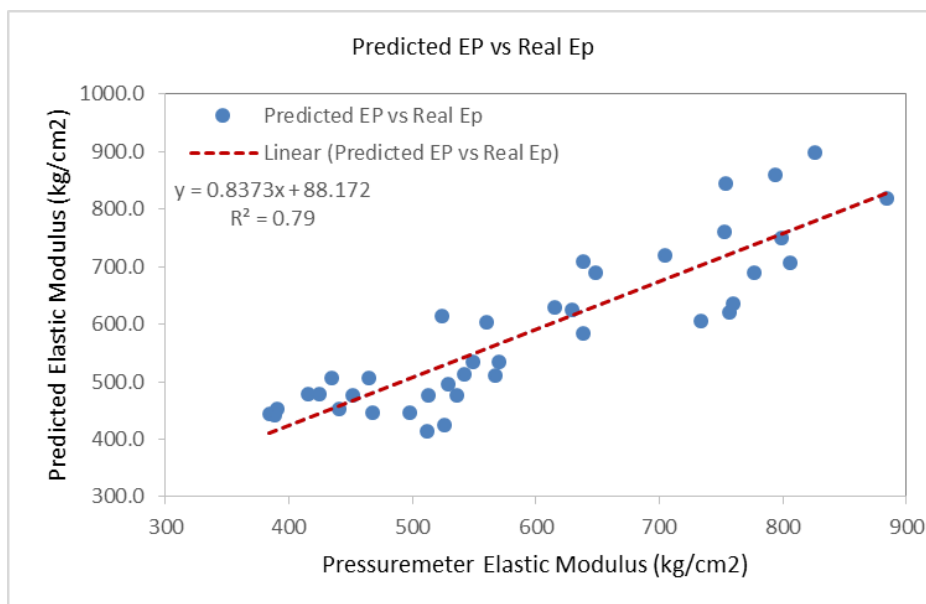
برای تحلیل دقت مدل‌ها، معیارهای آماری شامل ضریب همبستگی (r)، ضریب تعیین (R^2)، ریشه میانگین مربعات خطا (RMSE)، میانگین قدر مطلق خطا (MAE) و میانگین درصد خطای مطلق (MAPE) محاسبه گردید. همچنین، به منظور ارزیابی دقت مدل‌ها بدون تأثیر مقیاس داده‌ها، RMSE نرمال‌شده بر اساس بازه (NRMSE-range) و میانگین (NRMSE-mean) نیز محاسبه شده است (شکل ۱۲ تا شکل ۱۴ و جدول ۱۱). نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که مدل کلی ارائه‌شده برای خاک جامع (ترکیبی از خاک‌های

صحت سنجی مدل‌های خطی پیش‌بینی مدول الاستیسیته

به منظور ارزیابی دقت مدل‌های پیشنهادی در پیش‌بینی مدول الاستیسیته، مجموعه‌ای مستقل شامل ۳۹ داده آزمایش پرسیومتری که قبلاً در فرآیند مدل‌سازی مورد استفاده قرار نگرفته بودند، استفاده شده است. این مجموعه شامل ۱۲ نمونه خاک ریزدانه و ۱۷ نمونه خاک درشت‌دانه می‌باشد.

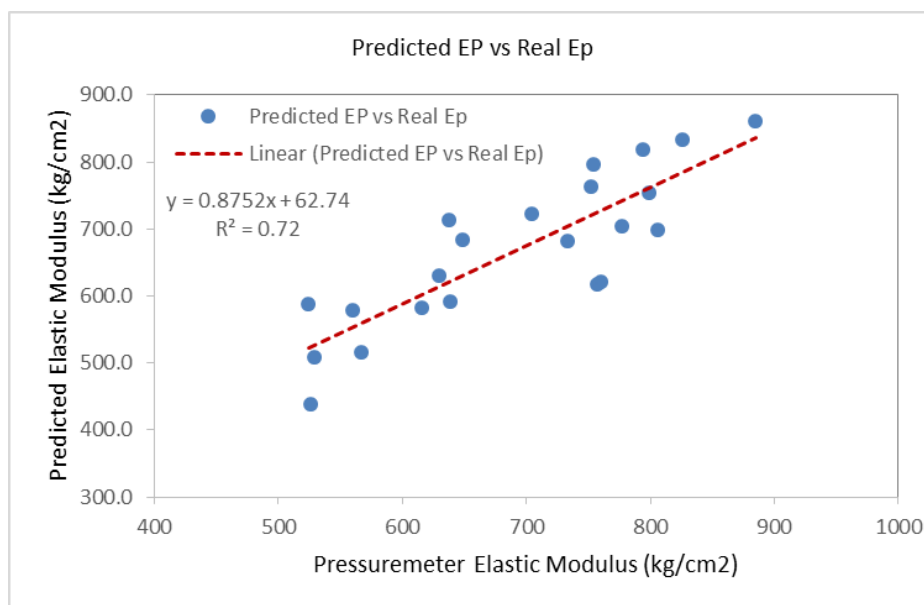
همچنین مقادیر پایین RMSE نرمال‌شده (در محدوده ۰/۱۱ تا ۰/۲۸) بیانگر پایداری و قابلیت اطمینان مدل‌ها در مواجهه با تغییرات مقیاسی داده‌ها است. این موضوع نشان می‌دهد که روابط پیشنهادی، قابلیت پیش‌بینی قابل قبولی برای مدول الاستیسیته بر پایه پارامترهای پایه‌ای خاک را دارند.

ریزدانه و درشت‌دانه) بهترین عملکرد را داشته است، به‌طوری‌که مقادیر $R^2=0.79$ ، $RMSE=66/44$ و $MAPE=9/86\%$ برای آن ثبت شد. مدل مربوط به خاک ریزدانه کمترین میزان RMSE و MAE را به ترتیب برابر با ۵۱/۶۲ و ۴۶/۶۶ نشان داد، در حالی‌که مدل خاک درشت‌دانه مقادیر خطای بیشتری داشت. با این حال، در تمامی مدل‌ها مقدار MAPE کمتر از یا در حدود ۱۰ درصد بود که نشان‌دهنده دقت قابل قبول مدل است.



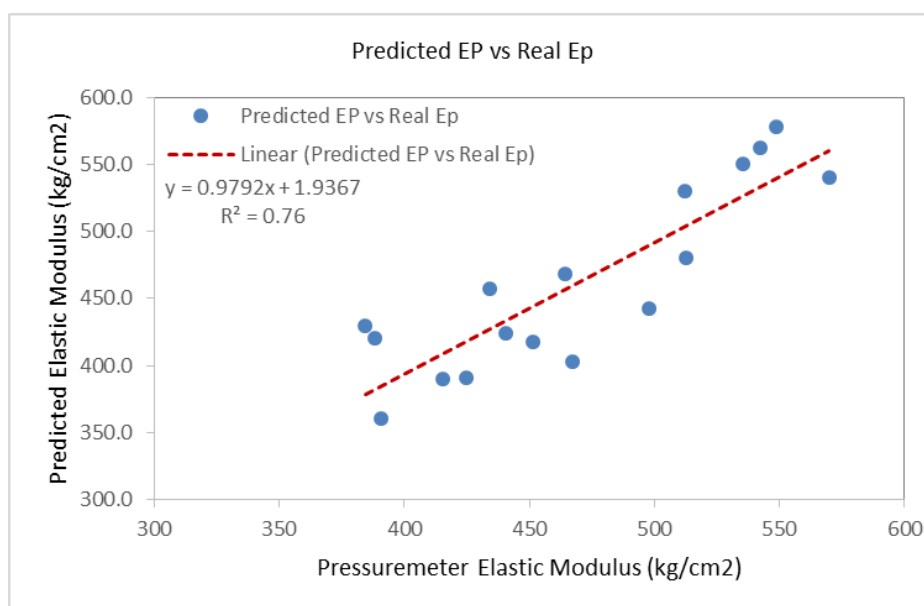
شکل ۱۲. پراکندگی داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده مدول الاستیسیته برای خاک جامع (ریزدانه و درشت دانه)

Fig. 12. Scatterplot of actual and predicted elastic modulus data for all soil types (fine-grained and coarse-grained)



شکل ۱۳. پراکندگی داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده مدول الاستیسیته برای خاک درشت دانه

Fig. 13. Scatterplot of actual and predicted elastic modulus data and multiple regression model fit plot for coarse-grained soil



شکل ۱۴. پراکندگی داده‌های واقعی و پیش‌بینی شده مدول الاستیسیته برای خاک ریزدانه

Fig. 14. Scatterplot of actual and predicted elastic modulus data for fine-grained soil

جدول ۱۱. شاخص‌های آماری برای صحت‌سنجی مدل‌های پیش‌بینی مدول الاستیسیته خاک

Table 11. Statistical indicators for validation of soil elastic modulus prediction models

NRMSE (MEAN)	NRMSE (RANGE)	%MAPE	MAE	RMSE	R ²	r	پارامتر آماری
							نوع خاک
۰/۱۱	۰/۱۳	۹/۸۶	۵۷/۴۹	۶۶/۴۴	۰/۷۹	۰/۸۹	خاک جامع (ریزدانه و درشت دانه)
۰/۱۱	۰/۲۱	۹/۵۵	۶۵/۸۵	۷۵/۹۳	۰/۷۲	۰/۸۵	خاک درشت دانه
۰/۱۱	۰/۲۸	۱۰/۲۵	۴۶/۶۶	۵۱/۶۲	۰/۷۶	۰/۸۷	خاک ریزدانه

بحث

نوآوری پژوهش حاضر در مقایسه با مطالعات پیشین، در چند محور اساسی قابل تشخیص است. نخست آن‌که در این تحقیق، حجم داده‌های مورد استفاده به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و از ۱۰۶ داده به بیش از ۱۶۰ نمونه با تطابق عمقی دقیق میان داده‌های پرسوومتری و آزمایشگاهی ارتقا یافته است. دوم، برخلاف بسیاری از پژوهش‌های پیشین که صرفاً به شاخص‌های دانه‌بندی و رطوبت اکتفا کرده‌اند، در این تحقیق اثر متغیر سیمان‌شدگی طبیعی خاک نیز به‌صورت عدد وارد مدل شده است. این متغیر پیش‌تر عموماً به‌صورت کیفی یا در قالب توصیف ژئوتکنیکی لحاظ می‌شده و اثر کمیت آن بر مدول الاستیسیته تاکنون به‌ندرت بررسی شده است. سوم، این تحقیق با تفکیک تحلیل‌ها برای خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه به‌صورت مجزا، امکان استخراج تفاوت‌های رفتاری وابسته به بافت خاک را فراهم آورده و از برهم‌نهی اثرات متناقض جلوگیری کرده است. این ویژگی‌ها موجب شده است مدل‌های پیشنهادی از دقت پیش‌بینی بالاتری نسبت به مطالعات پیشین برخوردار باشند و همچنین برای شرایط ژئوتکنیکی متنوع‌تری قابل استفاده است.

تحلیل پارامترهای موثر در مدل خطی چند

متغیره

در این بخش، اثرگذاری مکانیکی و آماری متغیرهای مستقل در مدل‌های رگرسیون خطی چندمتغیره به منظور پیش‌بینی مدول الاستیسیته خاک مورد بررسی قرار می‌گیرد. تحلیل‌ها به صورت مجزا در سه دسته مدل جامع (شامل کل داده‌های مربوط به خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه)، مدل خاک‌های ریزدانه و مدل خاک‌های درشت‌دانه انجام شده است. در ادامه، نقش هر یک از متغیرهای مؤثر از منظر مکانیک خاک تبیین می‌گردد.

قطر عبوری ۶۰ درصد (D_{60})

در مدل جامع، که در آن داده‌های مربوط به کلیه نمونه‌های خاک اعم از ریزدانه و درشت‌دانه تجمیع شده‌اند، افزایش مقدار D_{60} با افزایش مدول الاستیسیته همراه بوده است و این رابطه از منظر آماری معنادار ارزیابی می‌شود. این همبستگی مثبت را می‌توان ناشی از سهم بالای خاک‌های درشت‌دانه در مجموعه داده دانست؛ چرا که در این نوع خاک‌ها، اندازه بزرگ‌تر ذرات به‌طور معمول با ساختار متراکم‌تر، تماس‌های مؤثرتر بین ذرات، و مقاومت بالاتر در برابر تغییرشکل‌های الاستیک همراه است. به‌عبارتی، افزایش مقدار D_{60} بازتابی از حضور ذرات درشت‌تر است که موجب

ارتقای رفتار مکانیکی خاک از دیدگاه مدول الاستیسیته می‌شود.

در مقابل، در مدل اختصاصی خاک‌های ریزدانه، افزایش D_{60} با کاهش مدول الاستیسیته همراه بوده است. این رابطه معکوس به ویژگی‌های خاص خاک‌های ریزدانه مربوط می‌شود؛ به‌ویژه آنکه حضور ذرات نسبتاً درشت در زمینه‌ای از ذرات بسیار ریز (مانند رس و سیلت) می‌تواند سبب ایجاد ناپیوستگی در ساختار خاک و جلوگیری از دستیابی به آرایش بهینه بین ذرات شود. چنین ناهمبندی‌هایی موجب کاهش انسجام درونی، تضعیف پیوندهای ماتریکسی و افت مکش ماتریک خاک شده و در نتیجه، مدول الاستیسیته را کاهش می‌دهند. در این نوع خاک‌ها، توزیع یکنواخت و اندازه کوچک ذرات نقش کلیدی در ایجاد ساختار پایدار و چسبنده دارند؛ بنابراین، ورود ذرات درشت با افزایش D_{60} باعث کاهش قابلیت قفل‌شدگی، افزایش تمرکز موضعی تنش و افت مقاومت الاستیک خاک می‌شود.

مطالعات پیشین نیز چنین یافته‌هایی را تأیید کرده‌اند؛ به‌عنوان مثال، در منابعی مانند داس و سبجان (Das and Sobhan, 1990) و داس و سیواکوگان (Sivakugan, 2017) ذکر شده است که افزایش سهم ذرات درشت (نظیر D_{60}) در خاک‌های درشت‌دانه می‌تواند موجب بهبود تراکم و افزایش مدول الاستیسیته گردد، اما در خاک‌های ریزدانه، همین عامل به گسیختگی ساختار پیوسته و در نهایت افت مدول منجر می‌شود.

قطر عبوری ۳۰ درصد (D_{30})

در مدل جامع رگرسیون خطی چندمتغیره، افزایش مقدار D_{30} با کاهش مدول الاستیسیته همراه است و میزان این تأثیر در حد متوسط برآورد شده است. D_{30} نمایانگر سهم ذرات با اندازه میانی در ترکیب دانه‌بندی خاک است. حضور قابل‌توجه این ذرات ممکن است مانع دستیابی به آرایش

بهینه در ساختار خاک شود، زیرا ذرات با اندازه متوسط می‌توانند فضای بین ذرات ریز و درشت را به‌گونه‌ای پر کنند که ایجاد یک ساختار متراکم و پایدار را مختل کند. این وضعیت منجر به کاهش قفل‌شدگی بین دانه‌ها و افزایش تغییرشکل‌پذیری خاک می‌شود که در نهایت کاهش مدول الاستیسیته را به دنبال دارد. این رفتار با نتایج گزارش‌شده در منابعی همچون داس و سبجان (Das and Sobhan, 1990) و داس و سیواکوگان (Das and Sivakugan, 2017) هم‌راستا است.

حد پلاستیک (PL)

در مدل جامع، افزایش مقدار PL با کاهش مدول الاستیسیته همراه بوده است، هرچند این تأثیر نسبتاً ضعیف ارزیابی شده است. در این مدل، که ترکیبی از خاک‌های ریزدانه و درشت‌دانه را دربرمی‌گیرد، اثرگذاری PL تحت تأثیر رفتار غالب خاک‌های درشت‌دانه کاهش یافته است. در خاک‌های درشت‌دانه نیز افزایش حد پلاستیک با کاهش مدول همراه بوده است. حد پلاستیک در این خاک‌ها نمایانگر میزان اجزای ریزدانه‌ای همچون رس و سیلت در ماتریس دانه‌ای است؛ افزایش آن معمولاً به معنی تخلخل بیشتر و کاهش انسجام درونی است که باعث کاهش سختی می‌شود. اما در مدل خاک‌های ریزدانه، افزایش PL تأثیر مثبتی بر مدول الاستیسیته دارد. در این گروه از خاک‌ها، حد پلاستیک زیاد، نشانه‌ای از توانایی ذرات ریز در تحمل تغییرشکل‌های الاستیک است. چنین خاک‌هایی از تراکم‌پذیری بهتر، تخلخل کمتر و مقاومت بالاتری در برابر تنش برخوردارند که همگی موجب افزایش مدول الاستیسیته می‌شود.

دانسیته طبیعی

در مدل جامع، افزایش دانسیته طبیعی خاک به طور متوسط باعث افزایش مدول الاستیسیته شده است. این پارامتر بیانگر

و انسجام خاک شوند، ولی در مقادیر بالا، ممکن است باعث افت چگالی و مقاومت شوند.

سیمان‌شدگی ناشی از وجود گچ

در مدل جامع، وجود گچ تأثیر منفی بر مدول الاستیسیته دارد. گچ که ترکیبی محلول در آب است، در حضور رطوبت مستعد انحلال بوده و این ویژگی موجب تضعیف ساختار خاک می‌شود. بنابراین، اثر پایدار و مطلوبی در تقویت رفتار الاستیک از خود نشان نمی‌دهد.

درصد رطوبت

رطوبت یکی از تأثیرگذارترین عوامل بر کاهش مدول الاستیسیته است. در مدل جامع، افزایش رطوبت موجب افت قابل توجه سختی خاک شده است. در خاک‌های درشت‌دانه، کاهش تماس مؤثر بین ذرات و افزایش رفتار پلاستیک از جمله عوامل این کاهش است. در خاک‌های ریزدانه، کاهش نیروهای ماتریک (Matric Forces)، افزایش فشار منفذی و کاهش انسجام ساختاری از دلایل اصلی کاهش مدول در اثر رطوبت بالا هستند. یافته‌های این پژوهش با مطالعات پیشین در منابعی مانند (Craig, 2004)، (Das and Sobhan, 1990) و (Das and Sivakugan, 2017) مطابقت دارد که نقش کاهش نیروی مؤثر و افزایش فشار منفذی در افت مدول الاستیسیته را تأیید کرده‌اند.

درصد ماسه

درصد ماسه در مدل خاک‌های درشت‌دانه، افزایش درصد ماسه موجب کاهش مدول الاستیسیته شده است. ذرات ماسه به دلیل اندازه نسبتاً کوچک خود، در میان ذرات درشت‌تر جای گرفته و از ایجاد تماس مؤثر بین آن‌ها جلوگیری می‌کنند. این ساختار با تخلخل بیشتر و کاهش قفل‌شدگی، رفتار مکانیکی ضعیف‌تری دارد.

تراکم نسبی خاک در شرایط طبیعی است و مستقیماً با تعداد تماس بین ذرات و کاهش فضای خالی در ارتباط است. در خاک‌های درشت‌دانه، این تأثیر قوی‌تر و محسوس‌تر است؛ زیرا افزایش دانسیته نشان‌دهنده فشردگی بیشتر، کاهش تخلخل و ارتقاء ساختار مقاوم در برابر بارگذاری می‌باشد. در خاک‌های ریزدانه نیز افزایش دانسیته با تقویت شبکه ذرات و افزایش فشار مؤثر، منجر به بهبود مدول الاستیسیته می‌گردد.

عمق

در مدل جامع، افزایش عمق خاک تأثیر مثبت و نسبتاً زیادی بر افزایش مدول الاستیسیته دارد. با افزایش عمق، معمولاً تنش مؤثر افزایش یافته و خاک فشردتر می‌شود که این امر سختی خاک را افزایش می‌دهد. در مدل خاک‌های درشت‌دانه نیز اثر افزایش عمق بسیار محسوس است، که علت آن عمدتاً افزایش فشار محصورکننده و تراکم‌پذیری بهتر در اعماق بیشتر است.

چگالی

در مدل جامع، چگالی ذرات جامد خاک تأثیر مثبتی بر مدول الاستیسیته دارد، هرچند میزان این تأثیر نسبتاً محدود ارزیابی شده است. در خاک‌های درشت‌دانه، به دلیل عدم تماس کامل بین ذرات حتی با افزایش چگالی، این اثر محدودتر باقی می‌ماند. اما در خاک‌های ریزدانه، افزایش چگالی با افزایش تماس ذرات، کاهش تخلخل و بهبود انتقال تنش موجب تقویت مدول الاستیسیته می‌گردد.

سیمان‌شدگی ناشی از وجود مواد آلی

در مدل جامع و مدل خاک‌های درشت‌دانه، وجود مواد آلی تأثیر مثبتی بر افزایش مدول الاستیسیته داشته است، هرچند این تأثیر به‌طور کلی محدود ارزیابی شده است. در مقادیر بهینه، مواد آلی می‌توانند موجب افزایش چسبندگی

ضریب یکنواختی

ضریب یکنواختی افزایش ضریب یکنواختی در مدل خاک‌های ریزدانه منجر به افزایش قابل توجه مدول الاستیسیته می‌شود. این ضریب نشان‌دهنده توزیع مناسب اندازه ذرات است که موجب پرشدن فضای خالی بین ذرات درشت توسط ذرات ریز شده و در نهایت، منجر به تراکم‌پذیری بیشتر، کاهش تخلخل و افزایش سختی می‌گردد. این عامل نقش مهمی در توزیع یکنواخت تنش و بهبود عملکرد مکانیکی خاک ایفا می‌کند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، مدل‌هایی برای پیش‌بینی مدول الاستیسیته پرسویمتری (Ep) بر اساس پارامترهای پایه‌ای خاک توسعه داده شده است. داده‌های مورد استفاده شامل نتایج آزمون‌های پرسویمتری و آزمایش‌های آزمایشگاهی از ۱۸۰ گمانه با مجموع ۵۷۸۳ متر حفاری در پروژه خط ۳ متروی مشهد بود.

یکی از نوآوری‌های اصلی این مطالعه، لحاظ نمودن پارامتر سیمان‌شدگی (مواد آلی و گچ) به صورت کمی در مدل رگرسیونی می‌باشد، در حالی که در مطالعات پیشین، این اثر فقط به طور کیفی یا به صورت توصیفی بررسی شده است. افزون بر آن، با تفکیک داده‌ها به گروه‌های خاک ریزدانه و درشت‌دانه، امکان تحلیل دقیق‌تر رفتار مکانیکی و بررسی اثرگذاری متغیرها فراهم شد.

برای بررسی رابطه بین متغیرهای مستقل و مدول الاستیسیته از ضریب همبستگی پیرسون استفاده گردید. بر این اساس، متغیرهای دانسیته خشک، درصد شن، ریزدانه، حد روانی، چگالی و رطوبت بیشترین ارتباط را با مدول الاستیسیته نشان دادند.

در مدل جامع خطی چندمتغیره، درصد رطوبت بیشترین تأثیر منفی را بر مدول الاستیسیته داشته است، در حالی که عمق و D₆₀ بیشترین تأثیر مثبت را نشان می‌دهند. در مدل مربوط به خاک درشت دانه، عمق و دانسیته طبیعی تأثیر مثبت قابل توجهی بر مدول الاستیسیته دارند و در مقابل، درصد ماسه و رطوبت بیشترین تأثیر منفی را دارند. مدل خاک ریزدانه، نشان داد که ضریب یکنواختی بیشترین تأثیر مثبت و D₆₀ بیشترین تأثیر منفی را بر مدول الاستیسیته دارد.

در ارتباط با اثر سیمان‌های طبیعی در خاک، نتایج مدل جامع و مدل خاک‌های درشت‌دانه نشان می‌دهد که مواد آلی به طور محدود سبب افزایش مدول الاستیسیته می‌شوند. همچنین، وجود گچ در ترکیب خاک اثر کاهنده‌ای دارد، اما این اثر نسبت به سایر عوامل، چندان قابل توجه نیست.

نتایج نشان داد که مدل‌های چندمتغیره، دقت بیشتری نسبت به مدل‌های ساده در پیش‌بینی مدول الاستیسیته دارند و می‌توان از این مدل‌ها برای تخمین اولیه یا کنترل نتایج آزمایش‌های پرسویمتری بهره برد.

ضریب تعیین (R^2) حاصل از داده‌های آموزش برای مدل جامع برابر با ۰/۸۷، برای خاک درشت‌دانه ۰/۷۴ و برای خاک ریزدانه ۰/۷۲ به دست آمد.

ارزیابی مدل‌ها با استفاده از داده‌های آزمون نشان داد که روابط پیشنهادی توانسته‌اند عملکرد مناسبی در پیش‌بینی مدول الاستیسیته ارائه دهند. مقادیر ضریب همبستگی (r) برای گروه خاک‌های جامع برابر با ۰/۸۹، برای خاک درشت-دانه ۰/۸۵ و برای خاک ریزدانه ۰/۸۷ بوده است.

ضریب تعیین (R^2) برای داده‌های آزمون، در مدل جامع، خاک درشت دانه و ریزدانه به ترتیب برابر با ۰/۷۹، ۰/۷۲ و ۰/۷۶ می‌باشد.

برای ارزیابی دقت مدل‌ها، شاخص‌های MAE، RMSE و MAPE برای داده‌های آزمون محاسبه گردید. در گروه

مقادیر MAPE در تمامی مدل‌ها کمتر یا در حدود ۱۰ درصد بود که نشان‌دهنده دقت قابل قبول آنها است. مقادیر پایین RMSE نرمال‌شده (بین ۰/۱۱ تا ۰/۲۸) بیانگر پایداری و اعتمادپذیری مدل‌ها در مواجهه با تغییر مقیاس داده‌ها است. بنابراین، مدل‌های ارائه‌شده می‌توانند به‌عنوان ابزار پشتیبان در مراحل اولیه طراحی ژئوتکنیکی پروژه‌های مشابه و یا در مواقعی که انجام آزمون پرسیمتری ممکن نیست، مورد استفاده قرار گیرند.

قدردانی

نویسندگان از گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد به دلیل فراهم نمودن امکانات لازم برای انجام پژوهش و شرکت قطار شهری مشهد برای در اختیار گذاشتن اطلاعات لازم، کمال تشکر و قدردانی را دارند.

References

- Abbasi, M., Namadchi, A. H., Abbasi, M. & Abbasi, M. (2024). Evaluation of machine learning algorithms in tunnel boring machine applications: a case study in Mashhad metro line 3. *International Journal of Geo-Engineering*, 15, 1-24.
- Bozbey, I. & Togrol, E. (2010). Correlation of standard penetration test and pressuremeter data: a case study from Istanbul, Turkey. *Bulletin of engineering geology and the environment*, 69, 505-515.
- Cheshomi, A. & Ghodrati, M. (2015). Estimating Menard pressuremeter modulus and limit pressure from SPT in silty sand and silty clay soils. A case study in Mashhad, Iran. *Journal of Geomechanics and Geoengineering*, 194-202, 1748-6025.
- Craig, R. F. (2004). *Craig's soil mechanics*. CRC press, 458 p.
- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2017). *Fundamentals of geotechnical engineering*. Cengage Learning.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (1990). *Principles of geotechnical engineering*, 683 p.

خاک جامع مقادیر $RMSE=66/44$, $MAE=57/49$, $MAPE=9/86$ به دست آمد. این مقادیر برای خاک درشت‌دانه برابر $RMSE=75/93$, $MAE=65/85$, $MAPE=9/55$ و برای خاک ریزدانه به ترتیب $RMSE=51/62$, $MAE=46/66$, $MAPE=10/25$ بوده است.

همچنین، برای بررسی دقت مدل‌ها فارغ از مقیاس داده‌ها، شاخص $RMSE$ نرمال‌شده بر اساس بازه $(-NRMSE)$ و میانگین $(NRMSE-mean)$ نیز محاسبه گردید. نتایج نشان داد مدل جامع، عملکرد دقیق‌تری داشته و با داشتن مقادیر $r=0/89$, $R^2=0/79$, $RMSE=66/44$ و $MAPE=9/86$ بهترین مدل در میان سه گروه است.

مدل خاک ریزدانه کمترین میزان خطای $RMSE$ و MAE را داشته و به ترتیب برابر با $51/62$ و $46/66$ بوده، اما مدل

خاک درشت‌دانه بیشترین خطا را نشان داد. با این حال،

Firuzi, M., Asghari-Kaljahi, E. & Akgun, H. (2019). Correlations of SPT, CPT and pressuremeter test data in alluvial soils. Case study: Tabriz Metro Line 2, Iran. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 78, 5067-5086.

Ghazi, A. (2015). Preparation of dynamic model of Mashhad city sediment and assessment of seismic site effects using 1D and 2D approaches. Ph. D. thesis, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, 234 p. (In Persian)

Ghazi, A., Hafezi Moghadas, N., Sadeghi, H., Ghafoori, M. & Lashkaripour, G. (2015). The effect of geomorphology on engineering geology properties of alluvial deposits in Mashhad city. *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES*, Vol. 24, No. 94, 17-28. (In Persian)

Hafezi Moghaddas, N., Taheri, J. & Roshan-Ravan, J. (2011). Microzoning of Mashhad City. *Northeastern Geological and Mineral Exploration Organization*. (In Persian)

Karimi, A., Khademi, H., Jalali & A., 2008. Identification of loess soils and their separation from other soils in the south of Mashhad. *Journal of Water and Soil Science (Journal of Science and*

- Technology of Agriculture and Natural Resources), No. 44, pp. 185-200. (In Persian)
- Lee, S.-H., Kwak, T.-Y., & Park, K.-H. (2021). Estimation of pressuremeter modulus and limit pressure in weathered granite based on the SPT-N value and chemical weathering index: a case study in South Korea. *Applied Sciences*, 11(8), 3411.
- Marzouk, I., Brinkgreve, R., Lengkeek, A., & Tschuchnigg, F. (2024). APD: An automated parameter determination system based on in-situ tests. *Computers and Geotechnics*, 176, 106799.
- Nasseh, S., Hafezi Moghaddas, N., Ghafoori, M., Asghari, O., & Bolouri Bazaz, J. (2016). Spatial variability analysis of subsurface soil in Mashhad city, NE Iran. *International Journal of Mining and Geo-Engineering*, 50(2), 219–229.
- Nasseh, S. (2017). Development of a 3-D geological engineering model for sedimentary deposits of Mashhad city. Ph. D. thesis, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad, 167 p. (In Persian)
- Nawaz, M. N., Khan, M. H. A., Hassan, W., Jaffar, S. T. A., & Jafri, T. H. (2024). Utilizing undisturbed soil sampling approach to predict elastic modulus of cohesive soils: a Gaussian process regression model. *Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design*, 7(4), 4255-4270.
- Owusu-Ansah, D., Tinoco, J., Correia, A. A., & Oliveira, P. J. V. (2022). Prediction of elastic modulus for fibre-reinforced soil-cement mixtures: a machine learning approach. *Applied Sciences*, 12(17), 8540.
- Ozkaynak, M. I., & Yilmaz, Y. (2024). Prediction of resilient modulus with pre-post experimental data of undisturbed subgrade soils using machine learning algorithms. *Transportation Geotechnics*, 49, 101396.
- Rashed, A. (2010). Nonlinear modeling of soil deformation moduli based on pressuremeter test results. M. Sc. thesis, Faculty of Engineering, Ferdowsi University of Mashhad, 130 p. (In Persian)
- Tabatabaei, A., Kamali, M., & Anaraki, S. A. (2022). Elastic Modulus Determination Based on Pressuremeter Tests and Standard Penetration Tests. *International Conference on Geotechnical Engineering-IRAQ*.
- Yagiz, S., Akyol, E. & Sen, G. (2008). Relationship between the standard penetration test and the pressuremeter test on sandy silty clays: A case study from Denizli. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 67, 405-410.