

Investigation of the Correlation between SPT Number, Shear Wave Velocity, and Small-Strain Shear Modulus in Northern Iran

Mohammad Hadi Hatefi, Mahyar Arabani * , Meghdad Payan , Payam Zanganeh Ranjbar, Hassan Ahmadi

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran

ABSTRACT: The shear wave velocity (V_s) and the small-strain shear modulus (G_{max}) are crucial parameters to assess the dynamic properties of soil and the seismic characteristics of a site. In field trials, it may be challenging and costly to quantify these factors, limiting their feasibility. Thus, it is essential to determine indirectly V_s and G_{max} using empirical equations linked to the SPT number. The present research focused on the seismic zone in the northern regions of Iran, where construction is rapidly increasing. The field tests were conducted by drilling eleven boreholes and analysing the correlation between SPT number, shear wave velocity, and small-strain shear modulus in clayey, sandy, and silty soil. The results were validated using data from three boreholes in a different area of northern Iran. G_{max} is a parameter that reflects the dynamic characteristic of soils, specifically the hardness of geomaterials under shear deformation. Variations in the specific weight of soil layers affecting the small-strain shear modulus were analysed by correlating the SPT number to the small-strain shear modulus. The research findings demonstrated a strong correlation between the SPT number, shear wave velocity, and small-strain shear modulus. Previous studies and data validation verified the models proposed in this research. Clayey soils are more sensitive to changes in the specific weight of each layer than sandy and silty soils. Since this sensitivity exhibits a non-linear relationship, it is crucial to consider the specific weight of each layer of soil when determining correlations for clayey soils.

Review History:

Received: Mar. 05, 2024
Revised: Apr. 14, 2025
Accepted: Jul. 19, 2025
Available Online: Jul. 24, 2025

Keywords:

Seismic Waves
Standard Penetration Test
Downhole Test
Small-Strain Shear Modulus
North of Iran

1- Introduction

Seismic wave velocity and small-strain shear modulus are critical parameters in civil engineering, particularly for seismic analysis of structures [1,2]. Due to the high cost and complexity of geophysical tests, researchers have sought correlations between these parameters and simpler field tests, such as the Standard Penetration Test (SPT). The SPT, a widely used geotechnical test, helps estimate soil properties. Moreover, numerous empirical relationships (often in power-law forms, such as $V_s = XNY$) have been proposed to link SPT values (N) to shear wave velocity (V_s). These correlations vary significantly across soil types (clay, sand, silt), with coefficients X and Y reflecting regional soil characteristics. For instance, in clays, X ranges from 27 to 132 and Y from 0.23 to 0.73, while sands show even broader variations [3-5]. The small-strain shear modulus (G_{max}) is vital for geotechnical design under static and dynamic loads. While traditionally measured via geophysical or laboratory tests (e.g., resonant column), in recent studies, G_{max} was correlated with SPT- N values for a cost-effective estimation. These correlations differ by soil type and region, emphasising the need for site-specific calibration. For example, lateritic

and saprolitic soils display distinct behaviors, requiring separate formulas. Studies also highlight the influence of factors like hammer energy, fines content, and depth on SPT-based predictions, with corrected N -values often improving accuracy [6, 7]. The present study focuses on northern Iran's Caspian Sea region, where rapid construction demands reliable local correlations. By conducting SPT and downhole seismic tests across 11 boreholes, the authors derived new region-specific relationships between SPT- N , V_s , and G_{max} , accounting for layer-specific density variations. In the research, modelling precision was enhanced by isolating density effects on G_{max} for clay, sand, and silt layers. These findings provide tailored correlations for seismic microzonation and geotechnical projects in the area, addressing gaps in previous generalised models.

2- Methodology

In this study, correlations were developed between SPT blow counts (N), shear wave velocity (V_s), and small-strain shear modulus (G_{max}) using regression analysis, where G_{max} was calculated through the fundamental relationship $G_{max} = \rho V_s^2$ with ρ representing soil density. Field and

*Corresponding author's email: Arabani@guilan.ac.ir

laboratory data were processed to minimize scatter and categorised into clay, silt, and sand groups. In the research, a power-law relationship was employed between SPT-N and V_s , establishing site-specific correlations for the soils of northern Iran while examining the effects of density on G_{max} . Model accuracy was quantified using the root mean square error metric $RMSE = \sqrt{(1/n \sum (y_i - \hat{y}_i)^2)}$, where y_i and $\hat{y}_i$ represent measured and predicted values, respectively. The investigation focused on Rasht city in Gilan Province, where eleven boreholes were drilled to depths of 30 m in sedimentary soils with high groundwater tables. Standard penetration tests were conducted at 2-meter intervals following ASTM procedures, using a standard hammer drop system. Downhole seismic testing measured wave velocities for V_s determination, which was subsequently used in the $G_{max} = \rho V_s^2$ equation. Comprehensive field testing included both SPT and downhole seismic measurements, conducted following strict quality control protocols. PVC-cased boreholes enabled precise wave velocity measurements at 1-meter increments, with the resulting VS values fed into the G_{max} calculation. To validate the proposed relationships, data from three additional boreholes located in Mazandaran Province, in the northern region of Iran, were utilized.

3- Discussion and results

The data for clayey, silty, and sandy soils were selected to determine the correlation between V_s and G_{max} with SPT-N values. Most data for all three soil types fell within ± 1 STD. For clay (V_s : 150–523 m/s), STD was 94 m/s; for sand (V_s : 220–411 m/s), STD was 72 m/s; and for silt (V_s : 135–565 m/s), STD was 126 m/s. Over 95% of the data points for each soil type lie within ± 1 STD, with only six clayey data points (two CH, four CL) near the -1 STD boundary. Table 1 presents the correlation equations between V_s and SPT-N for northern Iran, including R^2 and RMSE values. For clay, the equation $V_s = 19.31N^{0.75}$ ($R^2 = 0.82$, RMSE = 40.62) shows strong agreement. Sandy soils follow $V_s = 33.30N^{0.67}$ ($R^2 = 0.95$, RMSE = 41.15), while silty soils fit $V_s = 16.86N^{0.78}$ ($R^2 = 0.83$, RMSE = 50.57). All data points within ± 0.2 of the equality line confirm the models' accuracy.

Figure 1 compares the derived correlations with prior studies. For clay (SPT-N: 13–34), the proposed equation aligns closely with that of Dickmann and Dégé et al., showing a deviation of $\leq 12\%$. Sandy soils (SPT-N: 18–41) exhibit $\leq 10\%$ deviation from Seed et al., while silty soils (SPT-N:

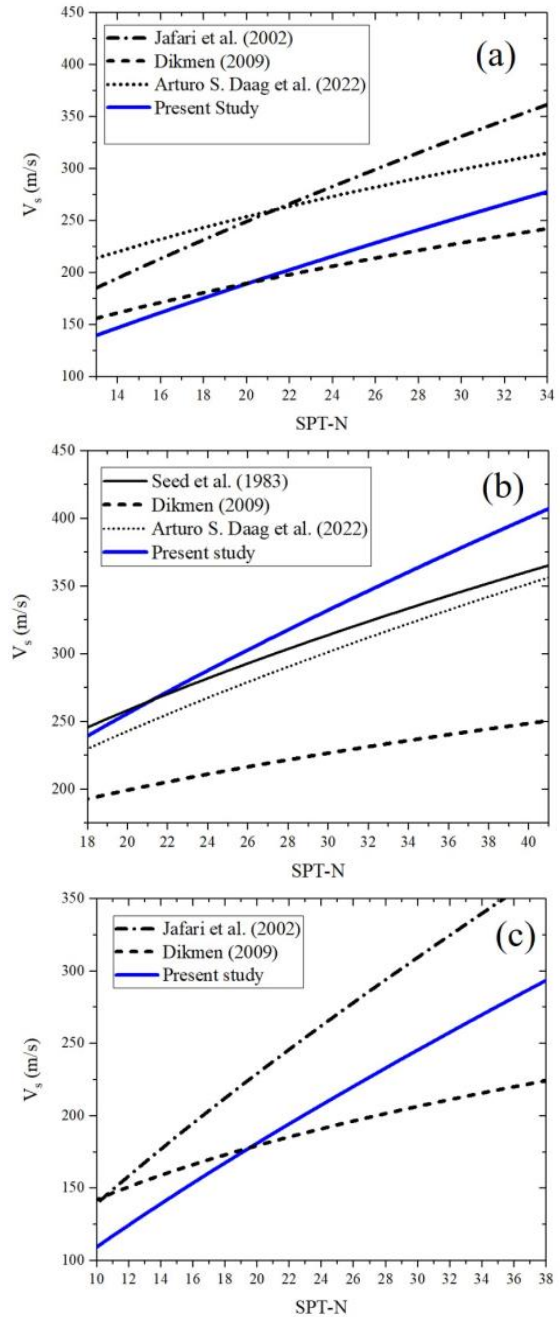


Fig. 1. The comparison of derived SPT-N vs. VS correlations with previous studies for: (a) clay, (b) sand, and (c) silt

Table 1. The correlation between shear wave velocity and SPT (N-value) in Northern Iran

Type of soil	Formula	R^2	RMSE
Clay	$V_s = 19.31N^{0.75}$	0.82	62.40
Sand	$V_s = 33.30N^{0.67}$	0.95	15.41
Silt	$V_s = 16.86N^{0.78}$	0.83	57.50

10–38) demonstrate lower V_s predictions for SPT-N < 18 but converge with existing studies at higher SPT-N values. These discrepancies arise from sampling methods and geological conditions, underscoring the need for soil-specific correlations.

Table 2 lists G_{max} -SPT-N correlations. The results demonstrated that unit weight (ρ) significantly influenced G_{max} . For clay, a nonlinear relationship, $\rho = 1.59N^{0.26}$, was

Table 2. The correlations between small-strain shear modulus ($G_{\max}$) and SPT N-values for clayey, sandy, and silty Soils in Northern Iran

Type of soil	Formula	R^2	RMSE
Clay	$G_{\max} = 0.59N^{1.76}$	0.91	46.24
Sand	$G_{\max} = 1.97N^{1.37}$	0.96	57.14
Silt	$G_{\max} = 0.40N^{1.74}$	0.90	15.50

observed, indicating the need for layer-specific ρ values. In contrast, sand exhibited nearly linear behavior ($\rho \approx 1.79$), while silt followed the trend $\rho = 1.43N^{0.18}$.

Figure 2 illustrates normalized $G_{\max}/\rho$ (linear trend) and $G_{\max}$ vs. SPT-N (nonlinear trend). Clay displays steeper slopes, highlighting the influence of ρ , whereas sand and silt show minimal variation. This confirms that ρ must be explicitly considered for clay, although it can be averaged for sand/silt. The study highlights the significance of soil-specific models in dynamic parameter estimation, as validated by three boreholes in Mazandaran, where predictions fell within $\pm 15\%$ of the measured values.

4- Conclusions

This study established novel empirical correlations between SPT-N values and shear wave velocity (V_s) as well as the small-strain shear modulus ($G_{\max}$) for clayey, sandy, and silty soils in northern Iran, based on extensive field testing across eleven locations in Rasht, along with validation with three independent boreholes in Mazandaran. The results demonstrate distinct ranges for each soil type: clayey soils ($V_s = 150\text{--}523$ m/s, $G_{\max} = 30\text{--}287$ MPa), sandy soils ($V_s = 135\text{--}565$ m/s, $G_{\max} = 24\text{--}232$ MPa), and silty soils ($V_s = 220\text{--}411$ m/s, $G_{\max} = 90\text{--}354$ MPa). A consistent positive trend was observed, with V_s and $G_{\max}$ increasing alongside higher SPT-N values for all soil types. Notably, clayey soils revealed greater sensitivity to density variations compared to sandy and silty soils. These correlations offer a practical, cost-effective alternative to geophysical testing, enabling reliable seismic site characterization using widely available SPT-N data, which is particularly valuable for preliminary assessments in similar geotechnical contexts.

References

- [1] H. Haghsheeno, M. Arabani, Seismic Bearing Capacity of Shallow Foundations Placed on an Anisotropic and Nonhomogeneous Inclined Ground, *Indian Geotechnical Journal*, 51(6) (2021) 1319-1337.
- [2] M. Veiskarami, R. Jamshidi Chenari, M.A. Ahmadi, M.H. Hatefi, A Study on the Seismic Passive Earth Pressure on Rigid Retaining Walls Considering Seismic Acceleration Field, *Journal of Earthquake Engineering*, 27(8) (2023) 2013-2033.
- [3] M.K. Jafari, A. Shafiei, A. Razmkhah, Dynamic

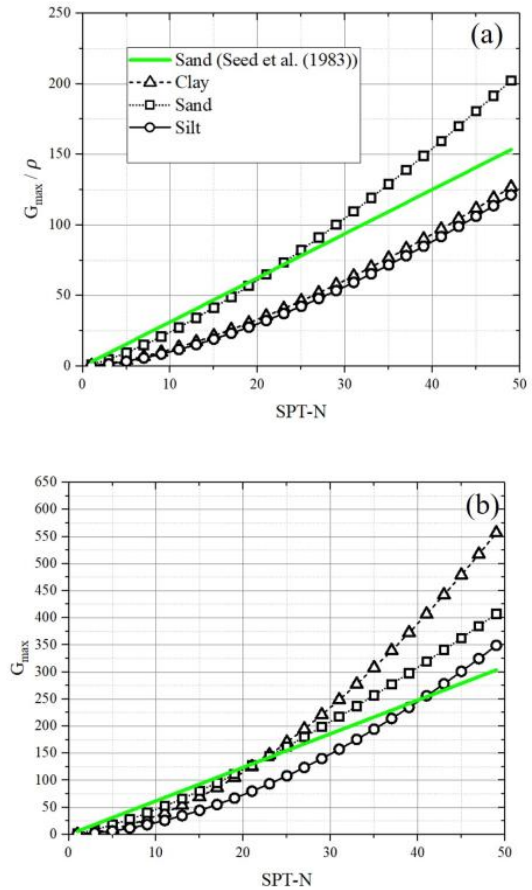


Fig. 2. Investigating the effect of unit weight variations on small-strain shear modulus ($G_{\max}$) for three soil types (clay, sand, silt): (a) Normalized $G_{\max}$ vs. unit weight to SPT-N ratio and (b) $G_{\max}$ vs. SPT-N Variations

properties of fine-grained soils in the south of Tehran, (2002).

- [4] Ü. Dikmen, Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils, *Journal of Geophysics and Engineering*, 6(1) (2009) 61-72.
- [5] A.S. Daag, O.P.C. Halasan, A.A.T. Magnaye, R.N. Grutas, R.U. Solidum Jr, Empirical correlation between standard penetration resistance (SPT-N) and Shear Wave Velocity (V_s) for soils in Metro Manila, Philippines, *Applied Sciences*, 12(16) (2022) 8067.
- [6] H.B. Seed, I.M. Idriss, I. Arango, Evaluation of liquefaction potential using field performance data, *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(3) (1983) 458-482.
- [7] H.B. Seed, I.M. Idriss, I. Arango, Evaluation of liquefaction potential using field performance data, *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(3) (1983) 458-482.



بررسی همبستگی بین عدد اس پی تی، سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک برای شمال ایران

محمد هادی هاتفی، مهیار عربانی*^{1b}، مقدار پایان^{2b}، پیام زنگانه رنجبر، حسن احمدی

گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

بازنگری: ۱۴۰۴/۰۱/۲۵

پذیرش: ۱۴۰۴/۰۴/۲۸

ارائه آنلاین: ۱۴۰۴/۰۵/۰۲

کلمات کلیدی:

امواج لرزه‌ای

آزمایش نفوذ استاندارد

آزمایش درون چاهی

مدول برشی کرنش کوچک

شمال ایران

خلاصه: سرعت موج برشی V_s و مدول برشی کرنش کوچک G_{max} ، از مهم ترین پارامترها برای تعیین خصوصیات لرزه ای یک ساختمان هستند. اگرچه چندین آزمایش میدانی برای اندازه گیری این دو پارامتر وجود دارند، اما انجام آن‌ها به علت پیچیدگی و هزینه بالا، همیشه بسادگی امکان پذیر نیست. از این رو، اندازه گیری V_s و G_{max} به طور غیرمستقیم و از طریق معادلات تجربی مرتبط با عدد SPT حائز اهمیت است. با توجه به قرار گیری مناطق شمالی ایران در منطقه لرزه خیز و توسعه سریع ساخت و ساز در آن، در این پژوهش برای اولین بار با انجام آزمایش‌های صحرایی (نفوذ استاندارد و درون چاهی) و با حفر ۱۱ گمانه، روابط همبستگی بین عدد SPT با سرعت موج برشی و با مدول برشی کرنش کوچک برای سه نوع خاک رسی، ماسه‌ای و سیلتی برای این منطقه ارائه گردیدند. نتایج با استفاده از داده‌های ۳ گمانه در بخش دیگری از ناحیه شمالی ایران صحت سنجی شدند. براساس روابط همبستگی بین عدد SPT و مدول برشی کرنش کوچک، میزان تاثیرپذیری مدول برشی کرنش کوچک، با تغییر وزن مخصوص لایه‌های خاک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این پژوهش نشان دادند که همبستگی خوبی بین عدد SPT با سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک وجود دارد. همچنین مشاهده شد حساسیت خاک‌های رسی نسبت به تغییرات وزن مخصوص هر لایه بیش از دو نوع خاک ماسه ای و سیلتی بوده و در تعیین روابط همبستگی برای خاک‌های رسی باید به وزن مخصوص خاک هر لایه توجه ویژه شود.

۱- مقدمه

بین عدد SPT و سرعت موج برشی^۴ بخصوص برای مناطق زلزله خیز ارائه کردند. اکثر روابط ارائه شده توسط محققین، دارای یک تابع توانی^۵ $V_s = XN^Y$ بوده و ضرایب X و Y بر شکل تابع تجربی حاکم است. در بیشتر این روابط از عدد SPT اصلاح نشده استفاده شده است اما در برخی روابط مقدار اصلاح شده عدد SPT نیز بکار گرفته شده است [۴-۶]. روابط مربوط به خاک‌های رسی که توسط سایر محققین ارائه شده در جدول یک درج شده است. در این روابط ضریب رابطه همبستگی (X) از ۲۷ تا ۱۳۲ و توان آن (Y) از ۰/۲۳ تا ۰/۷۳ متغیر است. برای خاک‌های ماسه‌ای روابط بیشتری توسط محققین ارائه شده است که بجز روابط ارائه شده توسط فومل و تنسلی [۷] و کایابالی [۸] که شکل متفاوتی نسبت به سایر روابط دارند، این روابط دارای قانون توان پایه می باشند. در خاک‌های ماسه‌ای ضریب رابطه همبستگی SPT از ۳۱/۷ تا ۱۶۲ و توان از ۰/۱۷ تا ۰/۵۵ متغیر است. روابط مشابهی برای سیلت‌ها ارائه شده که دامنه تغییرات ضریب رابطه

تعیین سرعت امواج لرزه‌ای^۱ و مدول برشی کرنش کوچک^۲ در مهندسی عمران، به دلیل کاربرد آن‌ها در تحلیل لرزه‌ای سازه‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند [۱-۳]. با توجه به هزینه نسبتاً بالا و تجهیزات دقیق مورد نیاز برای انجام آزمایش‌های ژئوفیزیک، محققان همواره در تلاش بوده‌اند که رابطه‌ای بین سرعت امواج لرزه‌ای و مدول برشی کرنش کوچک با آزمایش‌های میدانی ساده مانند آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)^۳ برقرار کنند تا به کمک آن بتوانند مقادیر مورد نظر را بدون انجام آزمایش‌های ژئوفیزیکی تعیین نمایند. آزمایش SPT یکی از قدیمی‌ترین و متداولترین آزمایش‌های صحرایی ژئوتکنیک است که از نتایج آن برای بدست آوردن پارامترهای مختلف خاک استفاده می‌شود. محققین روابط مختلفی برای همبستگی

1. Seismic waves velocity
2. Small strain shear modulus (G_{max})
3. Standard penetration test

4. Shear wave velocity
5. Power function

* نویسنده عهده‌دار مکاتبات: Arabani@guilan.ac.ir



همبستگی عدد SPT از ۲۲ تا ۱۰۵/۶۴ و توان از ۰/۳۱۹ تا ۰/۷۷ متغیر است. همچنین بعضی از روابط برای همه خاک‌ها ارائه شده است که در آن‌ها ضریب عدد SPT از ۷۱/۲ تا ۱۰۴/۷۹ و توان از ۰/۲۶ تا ۰/۴۴ متغیر است. چترایی و همکاران [۹] با بررسی ۲۲ گمانه خط ۲ مترو اصفهان واقع در کشور ایران برای خاک‌های رسی و ماسه‌ای روابط همبستگی بین عدد SPT و V_s ارائه کردند و پیشنهاد کردند که همبستگی‌های ارائه شده برای میکروزون‌بندی لرزه‌ای منطقه استفاده شوند. عباس و همکاران [۱۰] با بررسی روابط همبستگی بین عدد SPT و V_s به اهمیت کالیبراسیون ویژه ساختگاه، تأثیر زمین‌شناسی، رفتار وابسته به عمق، کنترل کیفیت داده‌ها و ادغام داده‌های V_s با سایر روش‌های ژئوفیزیکی تأکید کردند. در مطالعه لیشی و شادمنان [۱۱] با استفاده از اطلاعات ۷ گمانه یک روش کاربردی مبتنی بر وارون سازی لرزه‌ای و امپدانس صوتی برای تخمین سرعت موج برشی در یک مخزن نفتی ماسه سنگی ارائه شد.

تنوع زیاد این روابط نمایانگر ویژگی‌های متمایزی است که خاک‌های مناطق مختلف دارند. در واقع محققین تلاش نموده اند تا با توجه به منطقه مورد مطالعه روابط مورد نیاز را تعیین و اصلاح کنند. در جدول ۱ روابط همبستگی بین عدد SPT و سرعت موج برشی ارائه شده در مطالعات پیشین درج شده است.

مدول برشی نقش اساسی در تحلیل و طراحی سازه‌های ژئوتکنیکی تحت بارگذاری استاتیکی و دینامیکی دارد. همچنین در کرنش‌های بسیار کوچک از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، جایی که الاستیسیته خالص بر رفتار خاک حاکم است [۱۲]. تعیین دقیق مدول برشی با کرنش کوچک خاک (G_{max})، اهمیت ویژه‌ای در تحقیقات گذشته داشته است. مدول برشی کرنش کوچک توسط آزمایش‌های ژئوفیزیکی درجا، مانند درون چاهی^۱ و آزمایش‌های آزمایشگاهی مانند ستون تشدید^۲ و آزمایش المان خمشی^۳ در مطالعات پیشین مورد بررسی قرار گرفته است [۱۳، ۱۴]. به علت گسترش آزمایش SPT در سراسر جهان طی دهه‌های اخیر و سرعت بالا و مقرون به صرفه بودن این آزمایش در محل، ایجاد همبستگی بین عدد نفوذ استاندارد و مدول برشی کرنش کوچک توسط محققین مختلف برای مناطق مختلف مورد توجه قرار گرفته است [۱۵-۱۹].

انبازگان و همکاران [۱۵] مطالعه‌ای را در مورد اهمیت اندازه‌گیری انرژی

چکش^۴ (E_H) بر داده‌های حاصل از آزمایش SPT در برآورد مدول برشی کرنش کوچک ارائه کردند. آن‌ها همبستگی جدیدی بین مقادیر $SPT - N$ و G_{max} برای انواع خاک‌ها ارائه دادند. یاء و همکاران [۲۰] با استفاده از معادلات قبلی، روابط بین مقادیر تصحیح شده N و مدول برشی کرنش کوچک در خاک‌های سیلتی چین را بررسی و رابطه همبستگی جدیدی با استفاده از مقادیر اندازه‌گیری شده برای خاک‌های سیلتی کشور چین بیان کردند. آن‌ها نشان دادند که، در رابطه همبستگی بین عدد SPT و مدول برشی کرنش کوچک، در نظر گرفتن یا نگرفتن ریزدانه تأثیری در روابط همبستگی ندارد و عدد SPT اصلاح شده نسبت به عدد SPT اصلاح نشده جوابی با دقت کمتر برای همبستگی با مدول برشی کرنش کوچک ارائه می‌دهد. در مطالعه انبازگان و همکاران [۱۴] آزمایش SPT در شش گمانه با اعماق مختلف انجام شد و انرژی چکش در تمامی آزمایش‌ها اندازه‌گیری شد. تأثیر انرژی چکش بر همبستگی بین عدد SPT و ویژگی‌های خاک مانند وزن مخصوص، مدول برشی کرنش کوچک و ظرفیت باربری خاک مورد بحث قرار گرفت. آن‌ها مشخص کردند که عمق برگشت در SPT به انرژی ارسالی از چکش بستگی دارد. روچا و همکاران [۲۱] همبستگی‌های کلاسیک برای تخمین G_{max} از داده‌های SPT در خاک‌های لاتریت و ساپرولیتی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها مشاهده کردند که خاک‌های لاتریتی، متفاوت از خاک‌های ساپرولیتی رفتار می‌کنند و دو فرمول مجزا برای آن‌ها تعریف کردند. حسن و همکاران [۲۲] با استفاده و ارزیابی تکنیک‌های درون‌یابی وزن‌دهی فاصله معکوس (IDW) و ساخت مدل‌های ژئوتکنیکی خاک (GSM) طبق ۱۱۲ داده SPT-N بیان کردند مقادیر عدد SPT بالاتر به حضور گراول، شیل، آهک و سنگ ماسه‌ای مرتبط است، در حالی که مقادیر پایین‌تر با حضور لایه‌های آبرفتی مرتبط است. لیطفی و همکاران [۲۳] با هدف ارائه همبستگی بین CPT، MPT و SPT برای خاک‌های رسی با یکپارچگی‌های مختلف از پلاستیسیته کم تا زیاد تحقیق خود را بر روی دو سایت در شمال مرکزی الجزایر انجام دادند و ۹ معادله تجربی با دقت بالا برای این هدف پیشنهاد کردند. آصف و همکاران [۲۴] تأثیر توان تخلخل و میزان خاک رس را بر سرعت موج برشی در سنگ‌های شیلی^۵ بررسی کردند و یک معادله برای پیش بینی سرعت موج برشی به‌عنوان تابعی از هر دو مولفه تخلخل و محتوای رس ارائه دادند.

در جدول ۲ فرمول‌های همبستگی بین مدول برشی کرنش کوچک و عدد SPT در مطالعات گذشته ارائه شده است.

4. Hammer energy
5. Shale rocks

1. Downhole seismic testing
2. Resonant column test
3. Bender element test

جدول ۱. روابط ارائه شده برای همبستگی بین عدد SPT و سرعت موج برشی. (ادامه دارد)

Table 1. Presented relationships for the correlation between SPT number and shear wave velocity.(Continued)

مرجع	فرمول برای سرعت موج برشی (m/s)	نوع خاک
Sil & Haloi (2017)	$V_S = 478/75 N^{379/10}$	تمامی خاکها
Kirar et al. (2016)	$V_S = 5/95 N^{345/10}$	تمامی خاکها
Chatterjee & Choudhury (2013)	$V_S = 63/78 N_1^{37/10}$	تمامی خاکها
Maheshwari et al. (2010)	$V_S = 75/90 N_{\rho}^{304/10}$	تمامی خاکها
Sitharam & Anbazhagan (2008)	$V_S = 75/78 N_{\rho}^{40/10}$	تمامی خاکها
Hasancebi & Ulusay (2007)	$V_S = 79/107 N_{\rho}^{26/10}$	تمامی خاکها
Iyisan (1996)	$V_S = 2/71 N_{\rho}^{44/10}$	تمامی خاکها
Daag et al. (2022)	$V_S = 70/26 N^{422/10}$	رس
Sil & Haloi (2017)	$V_S = 70/99 N^{335/10}$	رس
Kirar et al. (2016)	$V_S = 4/94 N^{379/10}$	رس
Chatterjee & Choudhury (2013)	$V_S = 0.3/78 N_1^{38/10}$	رس
Uma Maheswari et al. (2010)	$V_S = 3/89 N^{358/10}$	رس
Dikmen (2009)	$V_S = 44 N^{48/10}$	رس
Hasancebi & Ulusay (2007)	$V_S = 6/107 N_{\rho}^{237/10}$	رس
Hasancebi & Ulusay (2007)	$V_S = 89/97 N^{269/10}$	رس
Jafari et al. (2002)	$V_S = 27 N^{73/10}$	رس
Pitilakis et al. (1999)	$V_S = 132 N_{\rho}^{271/10}$	رس
Athanasopoulos (1995)	$V_S = 55/76 N^{445/10}$	رس
Lee (1990)	$V_S = 43/114 N^{31/10}$	رس
Yokota et al. (1981)	$V_S = 114 N^{31/10}$	رس
Imai (1977)	$V_S = 2/80 N^{292/10}$	رس
Daag et al. (2022)	$V_S = 70/45 N^{553/10}$	ماسه
Ataee et al. (2019)	$V_S = 69/18 N_{\rho}^{506/10}$	ماسه
Sil & Haloi (2017)	$V_S = 712/79 N^{369/10}$	ماسه
Kirar et al. (2016)	$V_S = 3/100 N^{338/10}$	ماسه
Chatterjee & Choudhury (2013)	$V_S = 44/56 N_1^{51/10}$	ماسه
Maheswari et al. (2010)	$V_S = 53/100 N^{265/10}$	ماسه
Maheswari et al. (2010)	$V_S = 29/96 N_{\rho}^{266/10}$	ماسه
Dikmen (2009)	$V_S = 73 N^{33/10}$	ماسه
Hasancebi & Ulusay (2007)	$V_S = 131 N_{\rho}^{205/10}$	ماسه

جدول ۱. روابط ارائه شده برای همبستگی بین عدد SPT و سرعت موج برشی.

Table 1. Presented relationships for the correlation between SPT number and shear wave velocity.

Hasancebi & Ulusay (2007)	$V_S = 82/9 \cdot N^{319/10}$	ماسه
Pitilakis et al. (1999)	$V_S = 145 N_{60}^{178/10}$	ماسه
Kayabali (1996)	$V_S = 75/3 + 175 N$	ماسه
Raptakis et al. (1995)	$V_S = 7/10 \cdot N^{24/10}$	ماسه
Pitilakis et al. (1992)	$V_S = 162 N^{17/10}$	ماسه
Lee (1990)	$V_S = 4/57 N^{49/10}$	ماسه
Okamoto et al. (1989)	$V_S = 125 N^{30/10}$	ماسه
Fumal & Tinsley (1985)	$V_S = 51 + 152 N^{27/10}$	ماسه
Sykora & Stokoe (1983)	$V_S = 5/10 \cdot N^{29/10}$	ماسه
Seed et al. (1983)	$V_S = 4/56 N^{50/10}$	ماسه
Imai (1977)	$V_S = 6/80 \cdot N^{331/10}$	ماسه
Ohta et al. (1972)	$V_S = 22/87 N^{36/10}$	ماسه
Shibata (1970)	$V_S = 7/31 N^{54/10}$	ماسه
Dikmen (2009)	$V_S = 60 \cdot N^{36/10}$	سیلت
Jafari et al. (2002)	$V_S = 22 N^{77/10}$	سیلت
Lee (1990)	$V_S = 64/105 N^{319/10}$	سیلت

طی سالیان اخیر مورد توجه زیادی برای ساخت و ساز، مخصوصاً ساخت سازه‌های مرتفع قرار گرفته است، انتخاب گردید و برای اولین بار روابط همبستگی بین عدد SPT با سرعت موج برشی و همچنین با مدول برشی کرنش کوچک با استفاده از انجام آزمایش‌های SPT و درون چاهی برای این منطقه ارائه شد. با مشخص کردن محل‌های حفاری و آماده کردن محل، حفاری در ۱۱ مکان صورت گرفت. آزمایش SPT از عمق یک متری به فواصل هر (۲ m) حین حفاری در هر گمانه انجام شد. سپس بعد از ثابت گذاری چاله حفاری شده، ژئوفون به داخل لوله PVC ارسال شد. با تولید امواج طبق آزمایش درون چاهی و دریافت اطلاعات توسط گیرنده برای هر (۲m) فاصله، سرعت موج برشی و سرعت موج فشاری لایه‌های خاک تعیین شد. سپس داده‌ها مورد پالایش قرار گرفت و با توجه به نوع خاک دسته بندی شد. پس از آن همبستگی بین عدد SPT با سرعت موج برشی و با مدول برشی کرنش کوچک بررسی و روابط جدیدی برای ناحیه شمالی

پژوهش حاضر به درک روابط بین وزن مخصوص لایه‌های خاک و مدول برشی کرنش کوچک در خاک‌های رسی، ماسه‌ای و سیلتی می‌پردازد و همچنین مقدار حساسیت مدول برشی کرنش کوچک خاک‌های ماسه‌ای، سیلتی و رسی را به نسبت تغییرات وزن مخصوص بررسی می‌کند. به‌علاوه، این مطالعه با استفاده از روابط جدید همبستگی بین عدد SPT و مدول برشی، برای اولین بار تأثیر وزن مخصوص هر لایه خاک را به‌طور جداگانه بررسی کرده و بدین ترتیب دقت مدلسازی را افزایش داده است. همچنین در این پژوهش برای نخستین بار در این منطقه، روابط همبستگی بومی بین عدد SPT، سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک ارائه شده است. این یافته‌ها با ارائه روابط همبستگی دقیق‌تر مبتنی بر وزن مخصوص لایه‌ها، دقت برآورد مدول برشی کرنش کوچک در پروژه‌های ژئوتکنیکی محلی را افزایش می‌دهد. با توجه به موارد فوق، در این پژوهش منطقه شمالی ایران که در حاشیه دریا خزر قرار دارد و به علت کم آبی در مناطق مرکزی ایران

جدول ۲. روابط ارائه شده برای همبستگی بین عدد SPT و مدول برشی کرنش کوچک توسط محققین مختلف

Table 2. Relationships proposed for the correlation between SPT number and small-strain shear modulus by various researchers.

مرجع	فرمول $G_{max}(MPa)$	نوع خاک
Rocha et al. (2023)	$G_{max} = 3/\Delta N^{66/10}$	تمامی خاک‌ها
Rocha et al. (2023)	$G_{max} = 7/19 + 6/64 N$	تمامی خاک‌ها
Anbazzhagan et al. (2022)	$G_{max} = 83/13 N_{\phi}^{65/10}$	تمامی خاک‌ها
Anbazzhagan et al. (2021)	$G_{max} = 40/16 N_{\gamma\Delta}^{65/10}$	تمامی خاک‌ها
Barros & Pinto (1997) (Lateritic soils)	$G_{max} = 2/55 N^{66/10}$	تمامی خاک‌ها
Barros & Pinto (1997) (Lateritic soils)	$G_{max} = 3/20 + 56 N$	تمامی خاک‌ها
Barros & Pinto (1997) (Saprolitic soils)	$G_{max} = 8/43 N^{426/10}$	تمامی خاک‌ها
Barros & Pinto (1997) (Saprolitic soils)	$G_{max} = 3/20 + 94 N$	تمامی خاک‌ها
Imai & Tonouchi (1982)	$G_{max} = 12/14 N^{68/10}$	تمامی خاک‌ها
Ohsaki & Iwasaki (1973)	$G_{max} = 77/11 N^{8/10}$	تمامی خاک‌ها
Imai & Tonouchi (1982)	$G_{max} = 26/17 N^{60/10}$	رس
Kramer (1996)	$G_{max} = 56/15 N_{\phi}^{68/10}$	ماسه
Seed et al. (1983)	$G_{max} = 20/6 N$	ماسه
Imai & Tonouchi (1982)	$G_{max} = 26/12 N^{61/10}$	ماسه
Ohsaki & Iwasaki (1973)	$G_{max} = 374/6 N^{94/10}$	ماسه
Ya et al. (2021)	$G_{max} = 0.5/12 N^{53/10}$	سیلت
Ya et al. (2021) (Without fines content correction)	$G_{max} = 66/12 N_{\gamma}^{35/10}$	سیلت
Ya et al. (2021) (With fines content correction)	$G_{max} = 68/4 N_{\phi}^{68/10}$	سیلت
Anbazzhagan & Sitharam (2010)	$G_{max} = 28/24 N^{55/10}$	سیلت

اولیه بدست آمده از آزمایش‌ها مورد پالایش قرار گرفتند و پراکنده‌گی داده‌ها توسط انحراف معیار استاندارد^۲ (STD) مشخص گردید [۲۵]. داده‌ها به منظور قابل مقایسه بودن با مطالعات قبلی در سه دسته خاک‌های رسی، سیلتی و ماسه‌ای دسته بندی شدند. اکثر روابط ارائه شده توسط محققین قبلی برای همبستگی سرعت موج برشی و عدد SPT و مدول برشی کرنش کوچک به همان صورت که در جدول ۱ و ۲ نشان داده شد دارای یک تابع توانی $V_s = XN^Y$ است، که در آن X و Y ضرایبی هستند که توسط یک تابع تجربی کنترل می‌شوند. برای این مطالعه هم معادله تابع توانی

ایران ارائه گردید. با توجه به تغییر وزن مخصوص هر لایه در عمق‌های مختلف و تاثیر آن در کنار سرعت موج برشی بر مدول برشی کرنش کوچک، تاثیر پذیری مدول برشی کرنش کوچک خاک‌های مختلف نسبت به تغییر وزن مخصوص هر لایه خاک مورد بررسی قرار گرفت.

۲- روش پژوهش

برای برقراری روابط همبستگی بین عدد SPT و سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک از روش رگرسیون^۱ استفاده گردید. داده‌های

2. Standard deviation (STD)

1. Regression

۱۱ نقطه برای حفاری انتخاب گردید. با انجام آزمایش‌های SPT و درون چاهی و بررسی‌های میدانی، خصوصیات خاک ناحیه مورد مطالعه بررسی گردید. ناحیه مورد مطالعه، نحوه انجام آزمایش‌ها در محل و اطلاعات بدست آمده در ادامه این بخش ارائه شده است.

۳-۱- ناحیه مورد مطالعه

ناحیه مورد مطالعه شهرستان رشت واقع در مرکز استان گیلان در شمال ایران است. استان گیلان سرزمینی سرسبز و حاصلخیز واقع در جنوب دریای خزر و شمال رشته کوه البرز است. سطح آب زیرزمینی در بیشتر ناحیه مورد مطالعه به دلیل نزدیکی با دریای خزر و میزان بارندگی بالا در این گستره، به سطح زمین نزدیک است. این منطقه بر روی دشت وسیعی از خاک‌های رسوبی شامل رس، سیلت، ماسه و شن با آب زیرزمینی کم عمق واقع شده است.

۳-۲- محل گمانه‌ها

۱۱ محل برای انجام عملیات حفاری و انجام آزمایش‌های صحرایی در نظر گرفته شد. بعد از آماده سازی محل و تراز نمودن سطح کار، حفاری گمانه‌ها تا عمق ۳۰ متر با دستگاه حفاری دورانی^۲ انجام گرفت. در هر ۲ متر حفاری آزمایش SPT انجام و نتایج ثبت گردید. اولین آزمایش SPT در عمق یک متری انجام شد و پس از آن در هر ۲ به ۲ متر آزمایش تکرار گردید. برای انجام آزمایش درون چاهی، بعد از اتمام عملیات حفاری، لوله توخالی از جنس PVC^۳ به قطر بیرونی ۶۳(mm) تا عمق حفاری شده، در چاه قرارداده شد.

۳-۳- آزمایش نفوذ استاندارد (SPT)

این آزمون بر اساس استاندارد ASTM D1586 [۲۷] انجام شد. در این آزمایش، طبق استاندارد، وزنه ای به وزن ۶۳/۵(kg) از ارتفاع ۷۶(cm) به داخل هر گمانه رها شد و تعداد ضربه‌های شمارش شده از نفوذ نمونه گیر به عمق ۱۵ (cm) به خاک در سه قطعه ثبت شد. در نهایت، تعداد کل دو مرحله آخر به عنوان عدد نفوذ استاندارد (N) در نظر گرفته شد.

۳-۴- آزمایش درون چاهی

آزمایش‌های درون چاهی بر اساس ASTM D7400 [۲۸] انجام

استفاده شد. همبستگی بین عدد SPT و سرعت موج برشی برای سه نوع خاک رسی، ماسه‌ای و سیلتی ناحیه شمالی ایران بر اساس اطلاعات دقیق آزمایش‌های صحرایی و آزمایشگاهی بررسی شد و روابط ارائه گردید. برای بدست آوردن ارتباط مدول برشی کرنش کوچک G_{max} ، با سرعت موج برشی از رابطه ۱ استفاده شد.

$$G_{max} = \rho V_s^2 \quad (۱)$$

جایی که ρ وزن مخصوص نمونه دست نخورده و V_s سرعت موج برشی است که با استفاده از نتایج آزمایش درون چاهی در محل اندازه‌گیری می‌شود.

سه رابطه توانی برای همبستگی عدد SPT و مدول برشی کرنش کوچک برای سه نوع خاک رسی، ماسه‌ای و سیلتی ارائه شد. میزان دقت روابط ارائه شده توسط R^2 و خطای جذر میانگین مربعات^۱ مورد بررسی قرار گرفت. همچنین RMSE از رابطه ۲ محاسبه شد [۲۶].

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (۲)$$

در این رابطه n تعداد نمونه‌ها و y_i میزان واقعی هر نمونه و $\hat{y}_i$ میزان میانگین انحراف است.

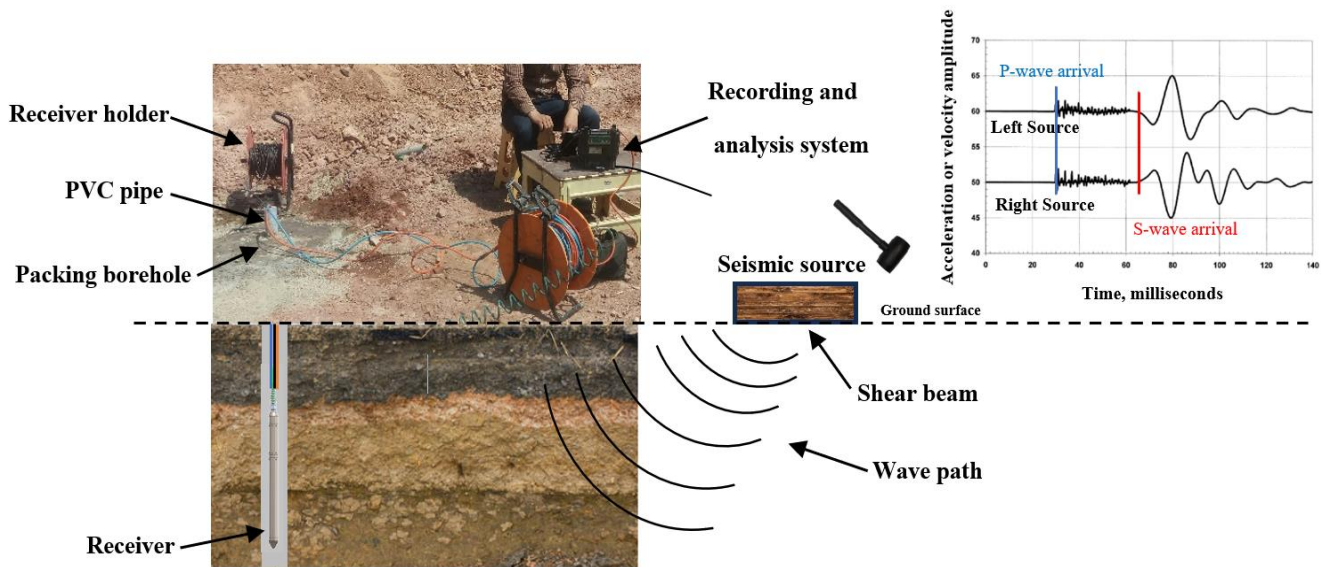
برای بررسی میزان تاثیر تغییرات وزن مخصوص لایه‌های خاک بر مدول برشی کرنش کوچک با جایگزینی روابط بدست آمده از همبستگی بین عدد SPT و سرعت موج برشی و مقایسه با نتایج حاصل از رابطه ۱، تاثیر تغییر وزن مخصوص لایه‌های خاک بر مدول برشی کرنش کوچک، بررسی شد.

۳- مطالعات صحرایی

شهرستان رشت به عنوان مرکز استان گیلان، محل اتصال خطوط ارتباطی مختلف بوده و هر روزه در حال گسترش است. درحال حاضر درک مناسبی از خصوصیت‌های ژئوتکنیکی این منطقه با توجه به رشد سریع عمران و آبادانی در آن یک ضرورت است. با توجه به محدوده این شهرستان،

1. The root-mean-squared error (RMSE)

2. Rotary
3. PVC



شکل ۱. نحوه انجام آزمایش درون چاهی و ابزارهای آن

Fig. 1. Procedure and equipment for downhole testing.

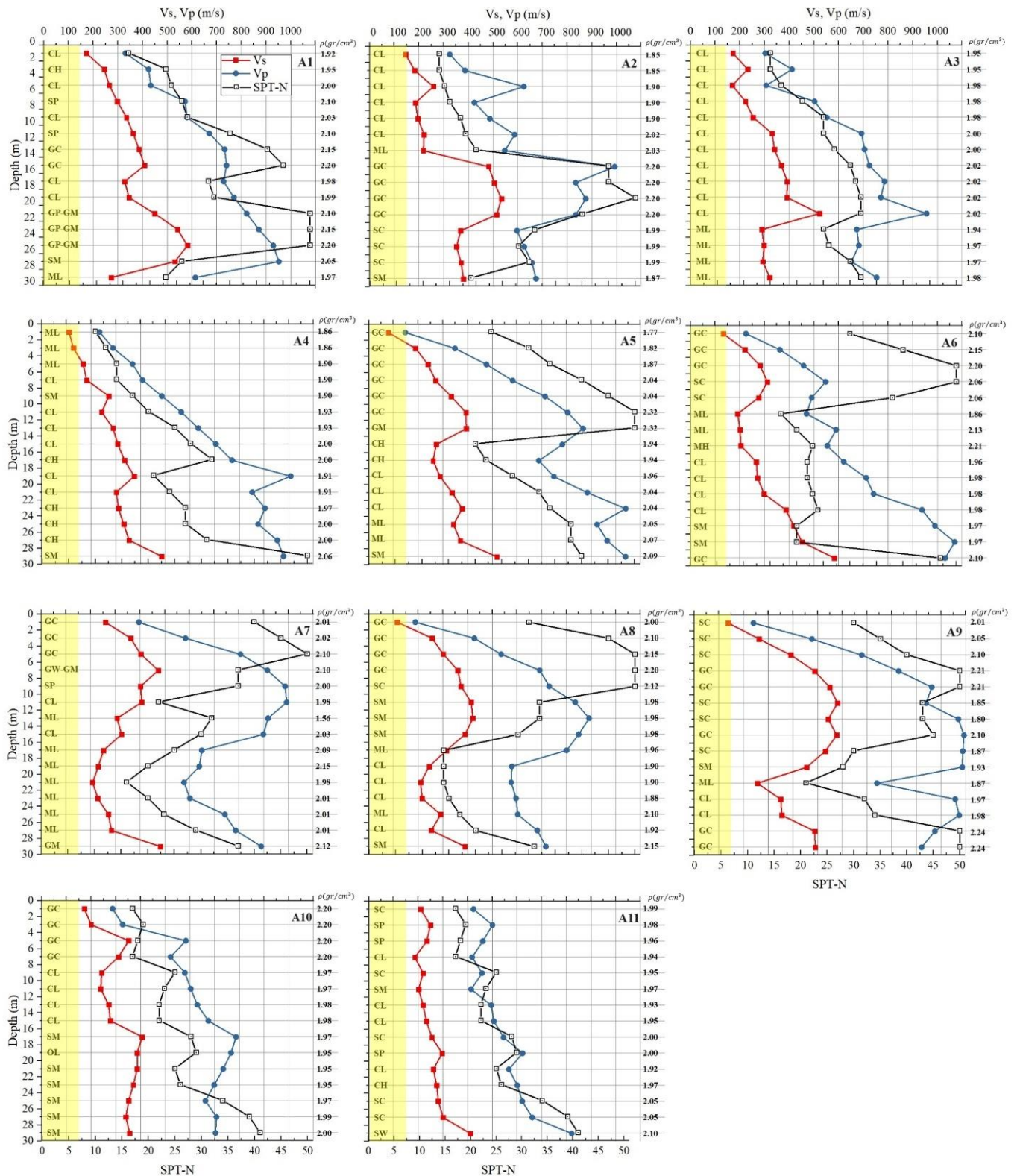
۳-۵- اطلاعات بدست آمده

در شکل ۲ اطلاعات مربوط به هر ۱۱ گمانه از A۱ تا A۱۱ که شامل عمق، سرعت امواج برشی و لرزه‌ای، عدد اس پی تی، وزن مخصوص و نوع خاک است نشان داده شد. همانگونه که از این شکل مشاهده می‌شود لایه‌های خاکی دارای تنوع نسبتاً زیادی هستند و از رسوبات مختلف ریز دانه‌ی رسی و سیلتی تا رسوبات درشت دانه‌ی شنی و ماسه‌ای تشکیل یافته‌اند. سطح آب زیرزمینی در تمامی گمانه‌ها نزدیک به سطح زمین است. گمانه‌های A۱ تا A۳ نشان می‌دهند که لایه‌های سطحی از خاک‌های رسی (CL) با چگالی حدود (1.9g/cm^3) تا (2.0g/cm^3) مکعب تشکیل شده‌اند. در گمانه‌های A۱ و A۲ با افزایش عمق، این لایه‌ها به خاک‌های ماسه‌ای (SC) (SP) و مخلوطی از ماسه و شن (GC) تغییر می‌کنند. در گمانه A۲، افزایش قابل توجه سرعت موج برش (Vs) و عدد SPT در عمق حدود ۱۶ متری نشان‌دهنده وجود لایه‌ای مقاوم‌تر مانند سنگ است. گمانه A۳ در عمق ۲۴ متری از خاک لای (ML) تشکیل شده است. در این عمق کاهش سرعت موج برشی و عدد SPT نیز مشاهده شد.

گمانه‌های A۴ تا A۶ نیز تنوع زیادی در لایه‌بندی خاک نشان می‌دهند. در گمانه A۴، لایه‌های سطحی از خاک‌های لای (ML) تشکیل شده‌اند

شدند. برای انجام این آزمایش، پس از حفر هر گمانه، لوله PVC در راستای گمانه حفاری شده قرار داده شد. قبل از شروع هر آزمایش محل و اطراف آن به صورت دقیق بررسی شد تا هیچ گونه ارتعاشی که بر ثبت داده‌ها تاثیر بگذارد، مانند عبور و مرور وسایل نقلیه و یا هرگونه چشمه تولید ارتعاش، وجود نداشته باشد. یک الوار چوبی بر روی سطح زمین و در نزدیکی دهانه هر گمانه قرار گرفت و ثابت شد. قبل از شروع آزمایش اتصال‌های دستگاه کاملاً کنترل گردیدند. همچنین قبل از ارسال ژئوفون گیرنده به داخل گمانه، در سطح زمین میزان حساسیت به ضربه‌های مکانیکی ایجاد شده بر الوار چوبی، کنترل گردید. برای تعیین سرعت امواج لرزه‌ای، ژئوفون به داخل گمانه برای ثبت اطلاعات از عمق (m) ۱ و در فواصل (m) ۲ فرستاده شد. سپس توسط ضربات مکانیکی بر الوار چوبی در سطح زمین، امواج برشی و فشاری (امواج P و امواج S) تولید شد. امواج دریافتی از ژئوفون توسط کابل به پردازشگر منتقل و ثبت گردید. شکل ۱ نحوه انجام مطالعات ژئوفیزیک در این مطالعه را نشان می‌دهد. ثابت گذاری گمانه توسط لوله PVC و نحوه ایجاد موج و سیستم‌های دریافت و آنالیز و همچنین دریافت کننده، در این شکل نشان داده شده است.

1. Analysis system



شکل ۲. اطلاعات سرعت موج برشی و فشاری، نوع خاک، عدد SPT و وزن مخصوص ۱۱ گمانه حفاری شده

Fig. 2. Data on shear wave velocity, compression wave velocity, soil classification, SPT numbers, and unit weight from 11 drilling boreholes.

(m/s) ۹۴ است. برای خاک‌های ماسه‌ای که سرعت موج برشی در محدوده (m/s) ۲۲۰ تا (m/s) ۴۱۱ بود مقدار انحراف استاندارد (m/s) ۷۲ است. همچنین برای خاک‌های سیلتی که سرعت موج برشی در محدوده (m/s) ۱۳۵ تا (m/s) ۵۶۵ بود مقدار انحراف استاندارد (m/s) ۱۲۶ بدست آمد.

همانگونه که در این شکل ملاحظه می شود بیش از ۹۵٪ داده‌های هر سه نوع خاک مورد استفاده برای همبستگی در محدوده داخلی ± 1 انحراف استاندارد قرار دارند. فقط در خاک‌های رسی ۶ داده در نزدیکی خط STD ۱- قرار داشتند که دو عدد از آن‌ها مربوط به خاک CH و ۴ عدد، مربوط به خاک CL هستند. داده‌هایی که در هر سه گروه خاک خارج از داخل دامنه مثبت و منفی مقدار STD بود، حذف گردید. طبق شکل ۴ با حذف داده‌های در خارج از محدوده بین STD ± 1 ، فرمول‌های همبستگی بین سرعت موج برشی با عدد SPT برای هر سه گروه محاسبه شد. همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می‌گردد، تمامی داده‌های اندازه‌گیری شده با داده‌های پیش بینی شده در محدوده بین ± 0.2 خط برابری قراردارند. این شکل شامل سه نمودار است که نسبت بین سرعت موج برشی (V_s) اندازه‌گیری شده و پیش‌بینی شده با استفاده از مقادیر SPT-N، برای سه نوع خاک مختلف، شامل رس، ماسه و سیلت را بررسی می‌کند. در نمودار اول (شکل ۳. الف) که به خاک رس مربوط می‌شود، داده‌ها با مثلث‌های تیره نشان داده شده‌اند. این نمودار همبستگی خوبی را با معادله $V_s = 19/31N^{0.75}$ نشان می‌دهد و R^2 آن برابر با ۰.۸۲ است، که نشان‌دهنده رابطه نسبتاً قوی بین V_s واقعی و پیش‌بینی شده است. خطوط آبی که به شکل خطچین وجود دارند، انحراف‌های ۲۰٪ $\pm$ از خط تطابق (خط قرمز) را نشان می‌دهند. نمودار دوم (شکل ۳. ب) برای خاک ماسه است که با داده‌های مربع و لوزی نمایان شده و نشان‌دهنده همبستگی بسیار قوی است. معادله $V_s = 33/30N^{0.67}$ با $R^2 = 0.95$ نشان می‌دهد که نقاط داده‌ها به‌طور عمده در نزدیکی خط تطابق قرار دارند و این معادله از دقت بالایی در برآورد سرعت موج برشی برخوردار هست. در نهایت، نمودار سوم (شکل ۳. پ) مربوط به خاک سیلت با داده‌های دایره‌ای نشان داده شده است که همبستگی مناسبی را نشان می‌دهد. معادله $V_s = 16/86N^{0.78}$ و $R^2 = 0.83$ نشان می‌دهد که پیش‌بینی‌ها برای خاک سیلت نیز نسبتاً دقیق هستند. همچنین در جدول ۳ فرمول‌های بدست آمده برای رابطه همبستگی سرعت موج برشی و عدد SPT برای ناحیه شمالی ایران به همراه مقادیر R^2 و RMSE ارائه شده است.

که با افزایش عمق به خاک‌های رسی (CL) و ماسه‌ای (SM) تبدیل می‌شوند. گمانه‌های A5 و A6 نیز لایه‌هایی از خاک‌های رسی (CL)، ماسه‌ای (SC) و مخلوطی از ماسه و شن (GC) را نشان می‌دهند. در گمانه A6، افزایش ناگهانی SPT-N در عمق حدود ۲۶ متری ناشی از وجود لایه‌ای سخت‌تر است.

در گمانه‌های A7، A8 و A10، مشاهده می‌شود که لایه‌های سطحی شامل مخلوطی از ماسه و شن (SC) (GC) هستند. گمانه‌های A8 و A9 نیز لایه‌هایی از خاک‌های ماسه‌ای (SC) و لای (ML) را نشان می‌دهند. در گمانه A10، یک لایه خاک آلی (OL) در عمق حدود ۱۸ متری وجود دارد. در نهایت، گمانه A11 نیز لایه‌هایی از خاک‌های ماسه‌ای (SP) و رسی (CL) را نشان می‌دهد. این تنوع در لایه‌بندی خاک منطقه نیاز به بررسی دقیق و جامع از خواص خاک و شرایط زمین‌شناسی برای طراحی و اجرای پروژه‌های عمرانی را نشان می‌دهد.

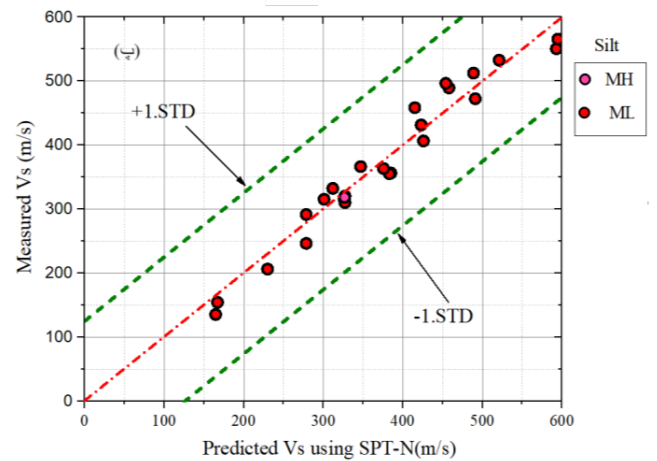
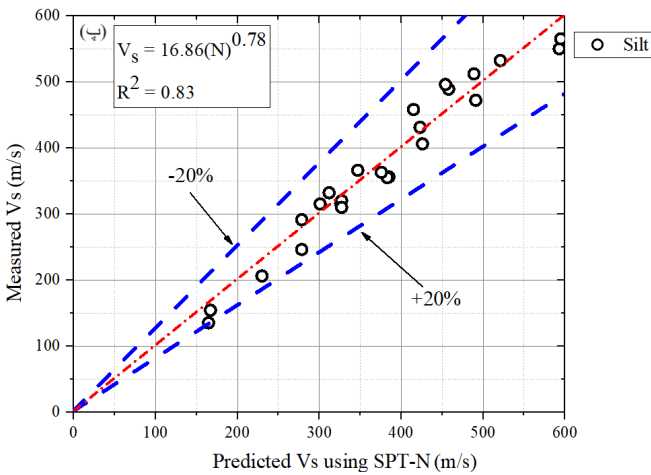
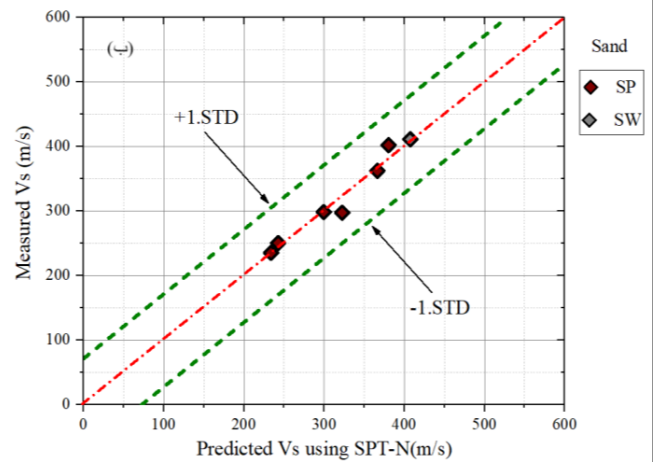
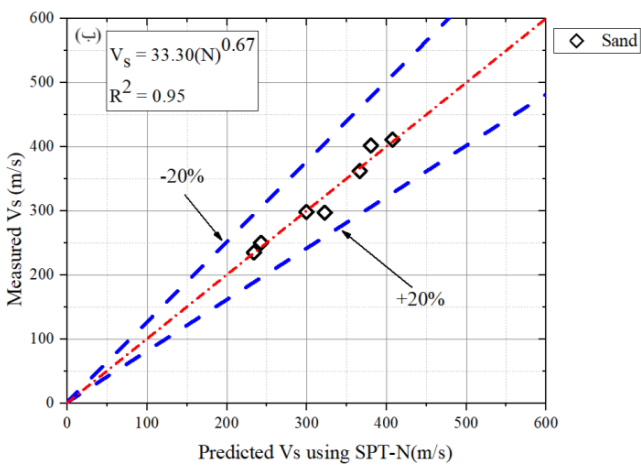
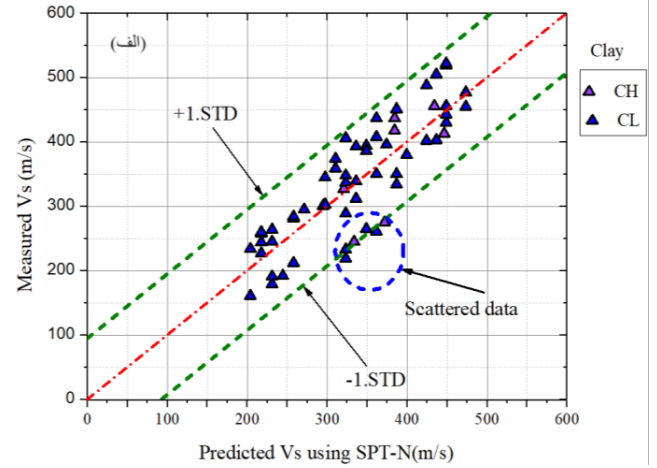
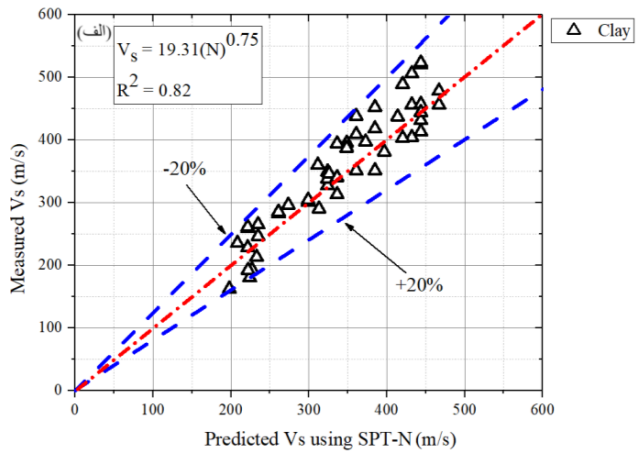
۴- نتایج و بحث

داده‌های مربوط به خاک‌های رسی، سیلتی و ماسه‌ای از میان داده‌ها، برای تعیین رابطه همبستگی بین سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک با عدد SPT به تفکیک انتخاب گردیدند. برای پالایش داده‌ها از انحراف معیار استاندارد^۱ (STD) استفاده گردید. STD به معنای مقدار متوسط تنوع در مجموعه داده‌ها است، همچنین این معیار، میزان انتشار هر داده در یک مجموعه داده را کمی می‌کند. STD بیان می‌کند به طور متوسط هر داده چقدر از میانگین فاصله دارد. انحراف استاندارد بالا به این معنی است که مقادیر داده‌ها به میزان قابل توجهی از میانگین فاصله دارند، در حالی که انحراف استاندارد پایین نشان می‌دهد که مقادیر داده‌ها نزدیک به میانگین خوشه بندی شده‌اند [۲۵]. STD از رابطه ۳ محاسبه شد، در این رابطه n تعداد داده‌ها و $\bar{x} - x_i$ میزان انحراف هر داده نسبت به میانگین است [۶].

$$\text{انحراف معیار استاندارد} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n-1}} \quad (3)$$

طبق شکل ۳ اکثر داده‌ها برای هر نوع سه خاک در داخل خطوط ± 1 انحراف استاندارد (STD) است. برای خاک رسی که سرعت موج برشی در محدوده (m/s) ۱۵۰ تا (m/s) ۵۲۳ بود مقدار انحراف استاندارد)

1. Standard deviation (STD)



شکل ۴. سرعت موج برشی اندازه گیری شده در مقابل سرعت موج برشی پیش بینی شده بر اساس همبستگی با اس پی تی، (الف) رس، (ب) ماسه، (پ) سیلت

Fig. 4. Comparison between measured shear wave velocities and SPT-based predicted values: (a) Clay, (b) Sand, (c) Silt.

شکل ۳. بررسی پراکندگی داده‌های خاک رسی، ماسه‌ای، سیلتی بر اساس STD، (الف) رس، (ب) ماسه، (پ) سیلت

Fig. 3. Dispersion analysis of cohesive, granular, and silty soils according to STD: (a) Clay, (b) Sand, (c) Silt.

جدول ۳. جدول روابط همبستگی بین سرعت امواج برشی و عدد SPT برای ناحیه شمالی ایران

Table 3. Table of correlation relationships between shear wave velocity and SPT number for the northern region of Iran.

نوع خاک	فرمول ها	R ²	RMSE
رس	$V_S = 31/19 N^{0.5/0}$	۰/۸۲	۶۲/۴۰
ماسه	$V_S = 30/33 N^{0.67/0}$	۰/۹۵	۱۵/۴۱
سیلت	$V_S = 86/16 N^{0.78/0}$	۰/۸۳	۵۷/۵۰

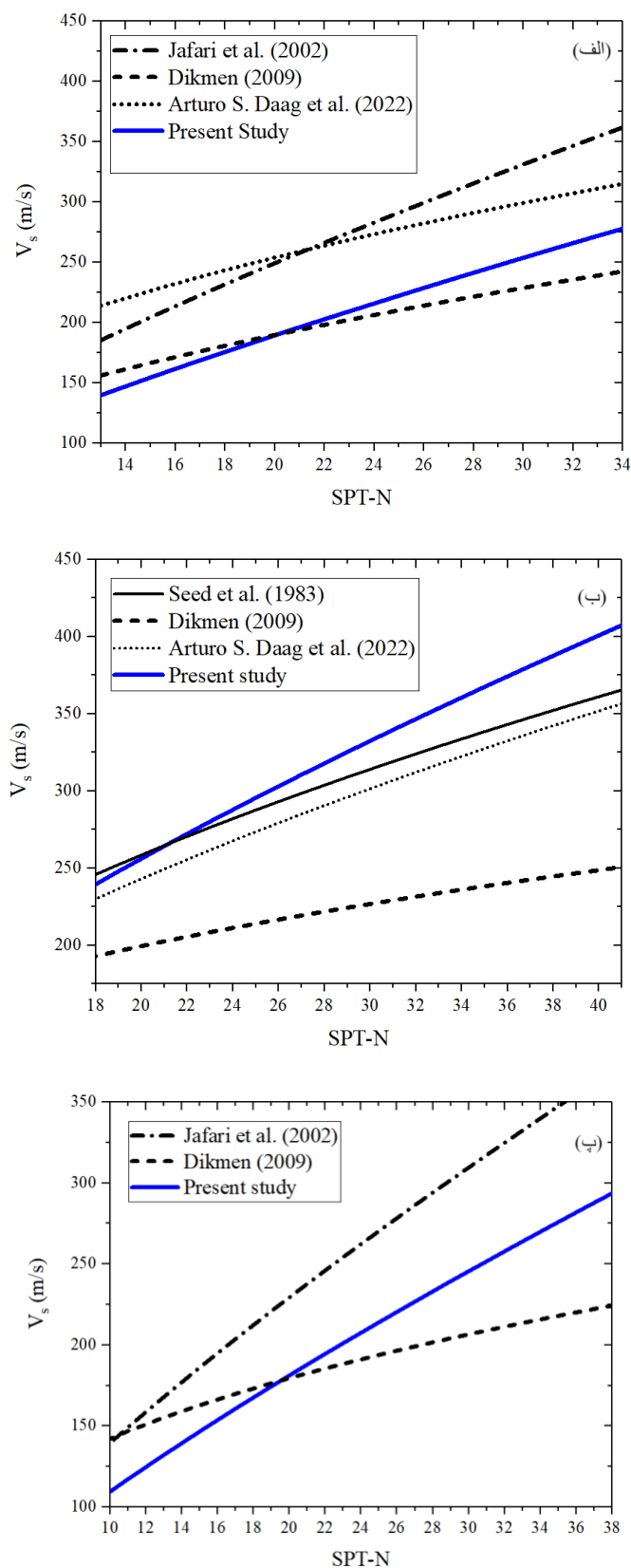
جزئی ناشی از روش‌های مختلف نمونه‌برداری، معیارهای تجربی و شرایط زمین‌شناسی هر مطالعه هستند. همچنین، تجزیه و تحلیل این نمودارها نشان می‌دهد که در نظر گرفتن تمایزهای بین انواع مختلف خاک می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر دقت پیش‌بینی‌ها داشته باشد. دسته‌بندی خاک‌ها به سه گروه رسی، سیلتی و ماسه‌ای در افزایش دقت همبستگی‌ها مؤثر است.

همبستگی بین مدول برشی کرنش کوچک با عدد SPT با استفاده از رابطه ۱ و با جایگذاری سرعت موج برشی حاصل از آزمایش درون چاهی و وزن مخصوص هر لایه مورد بررسی قرار گرفت. در شکل ۶ خط روند نمایی^۱ به همراه میزان دقت و روابط مربوط به همبستگی بین مدول برشی کرنش کوچک و عدد SPT برای سه گروه خاک رسی، سیلتی و ماسه‌ای ارائه شده است. در شکل ۶، الف که مربوط به خاک رس است، داده‌ها با مثلث‌های توخالی مشخص شده‌اند. معادله $G_{max} = 0/59 N^{1/76}$ با $R^2 = 0/91$ نشان‌دهنده همبستگی مناسب و دقت خوب این مدل برای پیش‌بینی مدول برشی در خاک‌های رسی است. مدول برشی کرنش کوچک برای خاک های رسی این مطالعه بین محدوده ۳۰ تا ۲۸۷ MPa است.

شکل ۶ ب به خاک ماسه‌ای اختصاص دارد. معادله $G_{max} = 1/97 N^{1/37}$ با $R^2 = 0/96$ نشان‌دهنده همبستگی مناسب این مدل برای پیش‌بینی مدول برشی کرنش کوچک در خاک‌های ماسه‌ای است. تا SPT-N برابر با ۲۲ مقادیر بالاتری برای مدول برشی برای ماسه نسبت به خاک رسی بدست می‌آید اما با افزایش SPT-N به بیش از ۲۲، مقادیر مقادیر مدول برشی خاک رسی بیشتر است. مدول برشی کرنش کوچک برای خاک های ماسه ای این مطالعه بین محدوده ۹۰ تا ۳۵۴ MPa است.

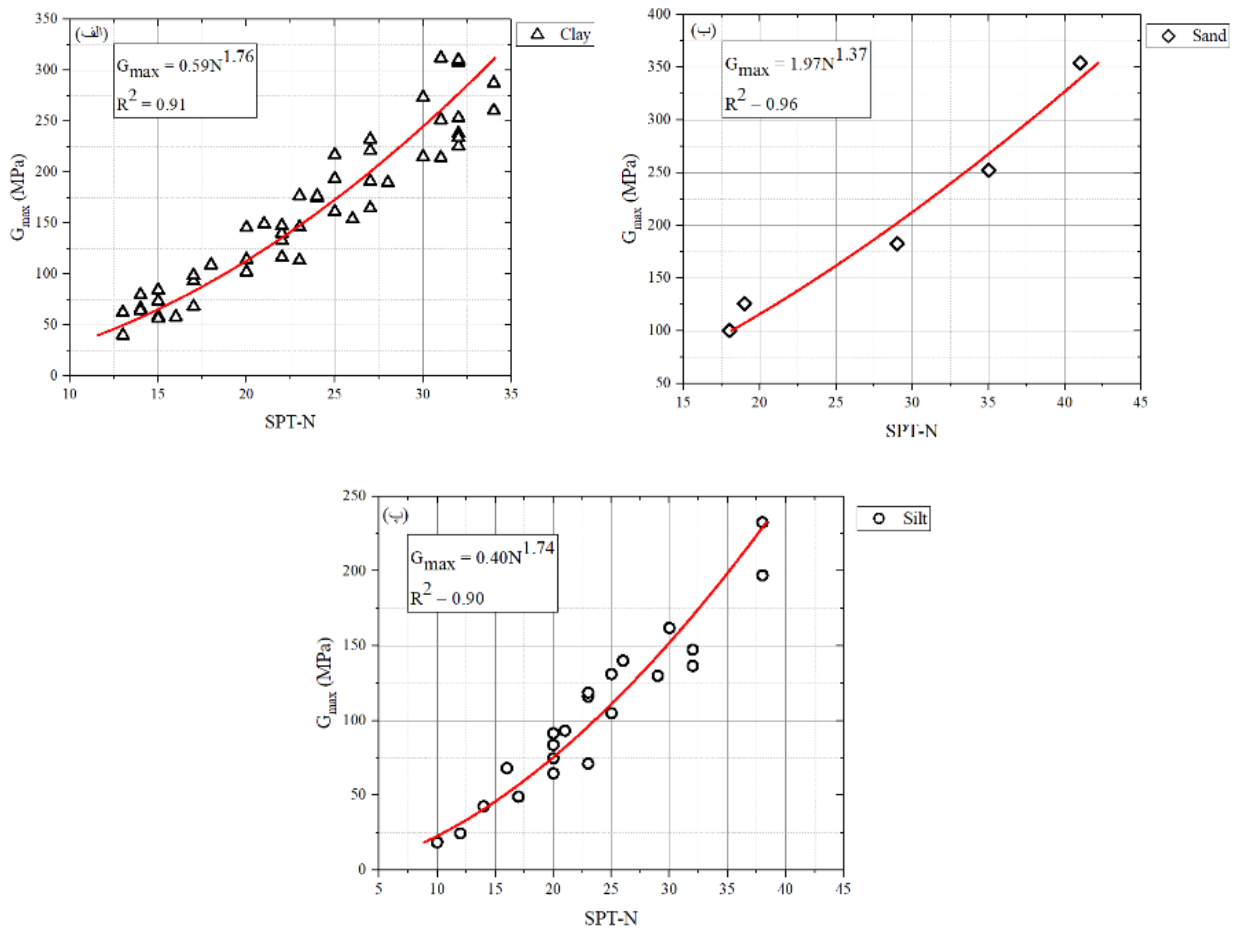
در شکل ۶ پ که مربوط به خاک سیلت است معادله $G_{max} = 0/40 N^{1/74}$

در شکل ۵ روابط ارائه شده با مطالعات قبلی مقایسه شده است. در شکل ۵، الف برای خاک‌های رسی بازه ۱۳ تا ۳۴ عدد SPT طبق داده‌های بدست آمده، در نظر گرفته شد. در شکل ۵، ب برای خاک‌های ماسه‌ای بازه ۱۸ تا ۴۱ و در شکل ۵، ث برای خاک‌های سیلتی بازه ۱۰ تا ۳۸ با توجه به داده‌های آزمایش صحرائی برای عدد SPT لحاظ شد. رابطه ارائه شده برای خاک‌های رسی با مطالعه جعفری و همکاران [۲۹]، دیکمن [۳۰] و دگ و همکاران [۳۱] مقایسه گردید. این مقایسه نشان داد که میزان تغییر سرعت موج برشی با عدد SPT شبیه به مطالعه دیکمن و همچنین دگ و همکاران است. همچنین شکل ۵، الف نشان می‌دهد که رابطه بین Vs و SPT-N در تمامی موارد خطی است. نمودار مطالعه حاضر (خط آبی) در مقادیر SPT کمتر از ۲۰، حداکثر ۱۰ درصد و در مقادیر SPT بیشتر از ۲۰، حداکثر ۱۲ درصد اختلاف را در مقایسه با نتایج کار دیکمن نشان می‌دهد. برای خاک‌های ماسه‌ای همبستگی ارائه شده در این مطالعه با سه مطالعه سید و همکاران [۱۳]، دیکمن [۲۴] و دگ و همکاران [۲۴] مقایسه گردید و روند تغییرات به مطالعه سید و همکاران [۱۸] نزدیک است. در شکل ۵-ب، خط مطالعه جدید (خط آبی) در مقادیر SPT-N کمتر از ۲۲، حداکثر ۳ درصد و در مقادیر SPT-N بیشتر از ۲۲، حداکثر ۱۰ درصد اختلاف نسبت به نتایج کار سید و همکاران نشان می‌دهد. مطالعات جعفری و همکاران [۲۹] و دیکمن [۲۴] برای مقایسه با رابطه ارائه شده برای سیلت‌ها استفاده گردید. در در شکل ۵، پ، خط مطالعه جدید (خط آبی) نشان‌دهنده پیش‌بینی‌های پایین‌تری برای Vs در SPT-N کم تر از ۱۸ در مقایسه با دیگر مطالعات است. خط مطالعه جدید (خط آبی) برای SPT-N بالای ۲۲، بین خطوط مطالعات جعفری و همکاران [۲۳] و دیکمن [۳۰] قرار دارد و در محدوده SPT-N ۱۹ با کار دیکمن مطابقت بالایی دارد. این اختلاف‌های



شکل ۵. مقایسه نتایج بدست آمده برای همبستگی SPT-N و V_s با مطالعات گذشته: (الف) رس، (ب) ماسه و (پ) سیلت

Fig. 5. Comparison of obtained correlations between SPT-N and V_s with previous studies: (a) Clay, (b) Sand, (c) Silt.



شکل ۶. خط روند نمایی همبستگی بین مدول برشی کرنش کوچک G_{max} با عدد اس پی تی: (الف) رس، (ب) ماسه و (پ) سیلت

Fig. 6. Exponential trendline correlation between small-strain shear modulus (G_{max}) and SPT-N value: (a) Clay, (b) Sand, (c) Silt.

دارد، اما مقادیر مدول برشی آن در تمام محدوده‌های SPT-N پایین‌تر است. به طور کلی همه معادلات ارائه شده از دقت بالایی برخوردارند ($R^2 \geq 0.90$) که نشان‌دهنده قابلیت اطمینان این مدل‌ها در پیش‌بینی رفتار مکانیکی خاک‌ها می‌باشد.

روابط بدست آمده برای همبستگی عدد SPT و مدول برشی کرنش کوچک از اطلاعات بدست آمده از آزمایش SPT و آزمایش درون چاهی برای خاک شمالی ایران در جدول ۴، به همراه میزان R^2 و RMSE مربوط به هر رابطه نشان داده شده است.

در مطالعات قبلی در محاسبات رابطه همبستگی بین عدد SPT و مدول برشی کرنش کوچک با توجه به اثر وزن مخصوص در روابط، تاثیر تغییرات وزن مخصوص هر لایه خاک به صورت مجزا بررسی نشده است. در این

با ضریب تعیین $R^2 = 0.90$ نشان داده شده است. این معادله نشان می‌دهد که رابطه بین G_{max} و SPT-N برای خاک سیلت نزدیک به خاک رس است اما در یک SPT-N مشابه، مقادیر G_{max} برای خاک رس و خاک ماسه از خاک سیلتی بیشتر است. مدول برشی کرنش کوچک برای خاک های سیلتی این مطالعه بین محدوده ۲۴ تا ۲۳۲ MPa است.

این نتایج نشان می‌دهند که نوع خاک تأثیر مستقیمی بر رابطه بین مدول برشی بیشینه (G_{ax}) و عدد SPT-N دارد. در تراکم‌های پایین (SPT-N)، خاک ماسه‌ای به دلیل ساختار دانه‌ای خود سختی بیشتری نسبت به خاک رس نشان می‌دهد، اما با افزایش تراکم (SPT-N)، خاک رس به دلیل ساختار ریزدانه و چسبندگی ذرات، سختی بالاتری از خود نشان می‌دهد. خاک سیلتی که دارای ماهیت بینابینی است، رفتار مشابهی با خاک رس

جدول ۴. روابط همبستگی مدول برشی کرنش کوچک G_{max} با عدد SPT برای سه خاک رسی، ماسه و سیلتی ناحیه شمالی ایران

Table 4. Correlation relationships between small-strain shear modulus (G_{max}) and SPT number for three soil types (clay, sand, and silt) in northern Iran.

نوع خاک	فرمول ها	R^2	RMSE
رس	$G_{max} = 59/0 \cdot N^{0.6/1}$	۰/۹۱	۴۶/۲۴
ماسه	$G_{max} = 97/1 \cdot N^{0.7/1}$	۰/۹۶	۵۷/۱۴
سیلت	$G_{max} = 40/0 \cdot N^{0.4/1}$	۰/۹۰	۱۵/۵۰

جدول ۵. مقایسه رابطه ارائه شده از جایگزینی روابط همبستگی موج برشی و عدد SPT در رابطه ($G_{max} = \rho V_s^2$) برای خاک‌های ماسه‌ای با کار سید و همکاران [۱۳]

Table 5. Comparison of the proposed relationship (derived by substituting shear wave velocity-SPT correlations into ($G_{max} = \rho V_s^2$)) for sandy soils with the work of Seed et al. [13].

	A	B	C
نوع خاک	G_{max} by $V_s(N)$		
ماسه [۱۳] (سید و همکاران)	$G_{max} = 13/3 \rho N^{0.6/1}$	$G_{max} = 20/6 N^{0.6/1}$	$\rho = 98/1$
ماسه	$G_{max} = 1/1 \rho N^{0.7/1}$	$G_{max} = 97/1 N^{0.7/1}$	$\rho = 79/1 N^{0.7/1} \approx 79/1$

بطور همزمان روابط همبستگی بین سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک با یک سری از داده‌های آزمایش SPT و درون چاهی بررسی شده است.

مقایسه نتایج حاصل از این پژوهش با مطالعه سید و همکاران [۱۸] برای خاک‌های ماسه‌ای نشان داد که تغییرات مدول برشی کرنش کوچک تحت تاثیر تغییرات وزن مخصوص به صورت خطی است و برای محاسبه مدول برشی کرنش کوچک خاک‌های ماسه‌ای می‌توان به جای تاثیر وزن مخصوص هر لایه، یک عدد میانگین قرار داد. برای بررسی تاثیر تغییرات وزن مخصوص بر G_{max} برای خاک‌های رسی، ماسه‌ای و سیلتی روابط طبق جدول ۶ ارائه شده است.

در شکل ۷ تغییرات مدول برشی کرنش کوچک نرمال شده با وزن مخصوص (G_{max} / ρ) و همچنین تغییرات مدول برشی کرنش کوچک به تغییرات عدد SPT نشان داده شده است. در شکل ۷ الف به علت نرمالیز

پژوهش با جایگزینی روابط بدست آمده از همبستگی سرعت موج برشی با عدد SPT در رابطه $G_{max} = \rho V_s^2$ ، تاثیر تغییرات وزن مخصوص خاک بر مدول برشی کرنش کوچک، بررسی شد.

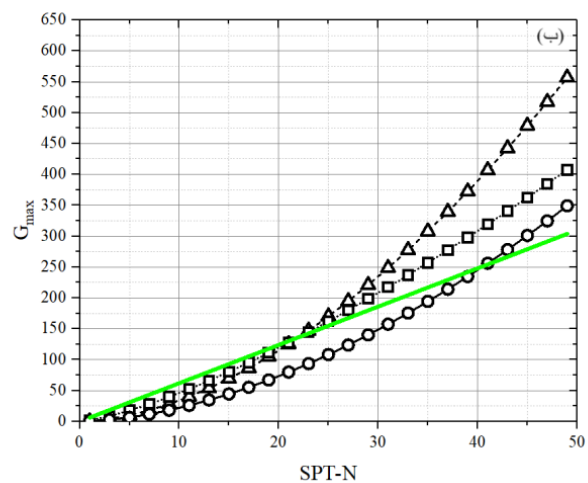
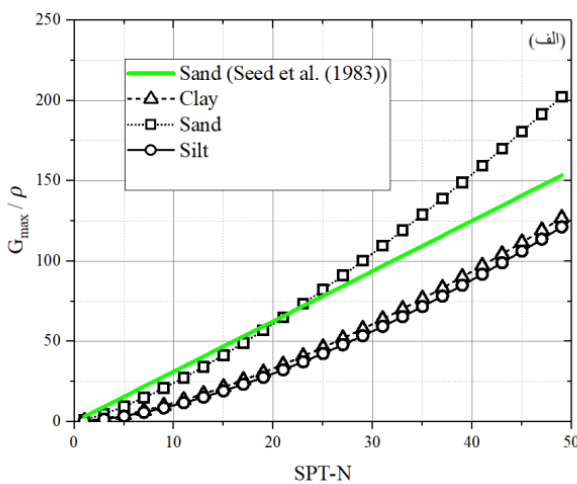
در جدول ۵ رابطه همبستگی G_{max} برای خاک‌های ماسه‌ای توسط ارتباط مستقیم G_{max} با عدد SPT و همچنین با جایگذاری رابطه همبستگی بین سرعت موج برشی با عدد SPT براساس رابطه ۱ ارائه شده است. ستون A روابط همبستگی مدول برشی کرنش کوچک حاصل از جایگذاری رابطه همبستگی V_s با عدد SPT حاصل از این پژوهش در رابطه ۱ است. در ستون B رابطه مستقیم حاصل از همبستگی بین عدد SPT و G_{max} قرار دارد. در ستون C وزن مخصوص (ρ) حاصل از برابری دو ستون A و B درج شده است.

همچنین در جدول ۵ نتایج این پژوهش با کار سید و همکاران [۱۳] مقایسه گردیده است. در مطالعه این محققین هم، برای خاک‌های ماسه‌ای،

جدول ۶. بررسی تاثیر تغییرات وزن مخصوص بر G_{max} برای خاک‌های رسی، ماسه ای و سیلتی

Table 6. Investigating the effect of unit weight variations on G_{max} for clayey, sandy, and silty soils.

	A	B	C
نوع خاک	G_{max} by $V_s(N)$		
رس	$G_{max} = 37/\rho N^{0.5}$	$G_{max} = 59/\rho N^{0.6}$	$\rho = 59/\rho N^{0.6}$
ماسه	$G_{max} = 1/\rho N^{0.3}$	$G_{max} = 97/\rho N^{0.3}$	$\rho = 97/\rho N^{0.3} \approx 99/\rho$
سیلت	$G_{max} = 28/\rho N^{0.5}$	$G_{max} = 40/\rho N^{0.4}$	$\rho = 43/\rho N^{0.4}$



شکل ۷. بررسی تاثیر تغییرات وزن مخصوص بر مدول برشی کرنش کوچک برای سه مدل خاک رسی، ماسه‌ای و سیلتی: (الف) تغییرات نرمال شده G_{max} با وزن مخصوص به عدد اس پی تی، (ب) تغییرات G_{max} به عدد SPT

Fig. 7. Investigation of unit weight variation effects on small-strain shear modulus (G_{max}) for three soil models: (a) Normalized $G_{max} / SPT-N$ vs. unit weight, (b) G_{max} vs. SPT-N relationships

می‌سازد. در واقع در ایجاد روابط همبستگی بین عدد SPT و مدول برشی کرنش کوچک خاک‌های رسی باید به پارامترهای دیگر این نوع خاک مانند درصد رطوبت، بافت و ساختار خاک که در مطالعات پیشین هم اشاره شده است، توجه شود [۳۲، ۳۳]. بدین لحاظ در این مطالعه با در نظر گرفتن وزن مخصوص هر لایه که تاثیر پذیر از میزان رطوبت و تراکم هر لایه است رابطه جامع تری برای خاک‌های رسی ارائه شد. همچنین طبق نتایج این پژوهش برای خاک‌های سیلتی و ماسه‌ای تغییرات مدول برشی کرنش کوچک با در نظر گرفتن تغییرات وزن مخصوص برخلاف خاک‌های رسی یک رابطه نسبتاً

شدن مدول برشی کرنش کوچک با وزن مخصوص، تغییرات غیرخطی مشاهده نمی‌گردد. شکل ۷. ب تاثیرپذیری غیر خطی مدول برشی کرنش با در نظر گرفتن وزن مخصوص نسبت به عدد SPT را نشان می‌دهد. طبق شکل ۷. ب منحنی خاک‌های رسی با افزایش عدد SPT تغییرات بیشتری (شیب تندتر) نسبت به خاک‌های ماسه‌ای دارند. این موضوع تاثیر بیشتر وزن مخصوص هر لایه، در رابطه همبستگی بین مدول برشی کرنش کوچک و عدد SPT برای خاک‌های رسی را نشان می‌دهد و ضرورت در نظر گرفتن وزن مخصوص هر لایه در محاسبات را برای خاک‌های رسی آشکار

خطی است و تغییرات ناگهانی ندارد.

۵- صحت سنجی

(CL)، ماسه (SP,SM) و سیلتی (ML) که نشان‌دهنده تغییرات خصوصیات خاک‌ها در عمق‌های مختلف است تشکیل شده است. V_p این گمانه در محدوده بین $860(m/s)$ تا 1161 قرار دارد. در واقع، افزایش چگالی و سرعت امواج در این گمانه‌ها به دلیل وجود لایه‌های ماسه‌ای و شنی است. در گمانه M3، وجود خاک‌هایی از نوع خاک رس (CL)، مخلوطی از ماسه و شن (GC و SC) و سیلتی (ML) به تنوع بیشتر در خاک‌ها اشاره دارد. با در نظر گرفتن روابط همبستگی ارائه شده در این پژوهش، برای سه گمانه جدید روابط همبستگی سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک با عدد SPT محاسبه گردید و در شکل ۸ میزان دقت روابط ارائه شده با میزان واقعی اندازه‌گیری شده در محل مقایسه شده است. محدوده سرعت موج برشی این سه گمانه برای خاک‌های رسی، ماسه‌ای و سیلتی به ترتیب بین $140(m/s)$ تا 211 ، $225(m/s)$ تا 323 و $160(m/s)$ تا 212 است. مدول برشی کرنش کوچک این سه گمانه نیز به ترتیب برای خاک‌های رسی، ماسه‌ای و سیلتی، $31(MPa)$ تا 74 ، $85(MPa)$ تا 172 و

برای بررسی صحت و دقت روابط ارائه شده برای V_s و G_{max} از اطلاعات ۳ گمانه خارج از استان گیلان و در دیگر استان شمالی ایران (مازندران) استفاده شد. در جدول ۷ داده‌های مربوط به این سه گمانه ارائه شده است. در گمانه M1، ترکیب‌های متنوعی از نوع خاک‌ها مشاهده می‌شود که شامل خاک‌های رسی (CL)، سیلتی (ML) و ماسه (SP,SM) است. V_p در این گمانه بین $720(m/s)$ تا 1403 متغیر است، که نشان‌دهنده وضعیت مکانیکی مختلف خاک در اعماق مختلف است. همچنین، ρ خاک‌ها بین $(1/63 \text{ gr/cm}^3)$ تا $(1/74)$ است. مقادیر مختلف SPT خاک‌ها برای این گمانه از ۱۴ تا ۳۳ است. در گمانه M2، همان‌طور که مشاهده می‌شود، دامنه وسیعی از سرعت موج‌های برشی و چگالی خاک‌ها وجود دارد. این گمانه از خاک‌هایی نظیر خاک‌های رسی

جدول ۷. داده‌های سه گمانه در نظر گرفته شده برای صحت سنجی در استان مازندران (ادامه دارد)

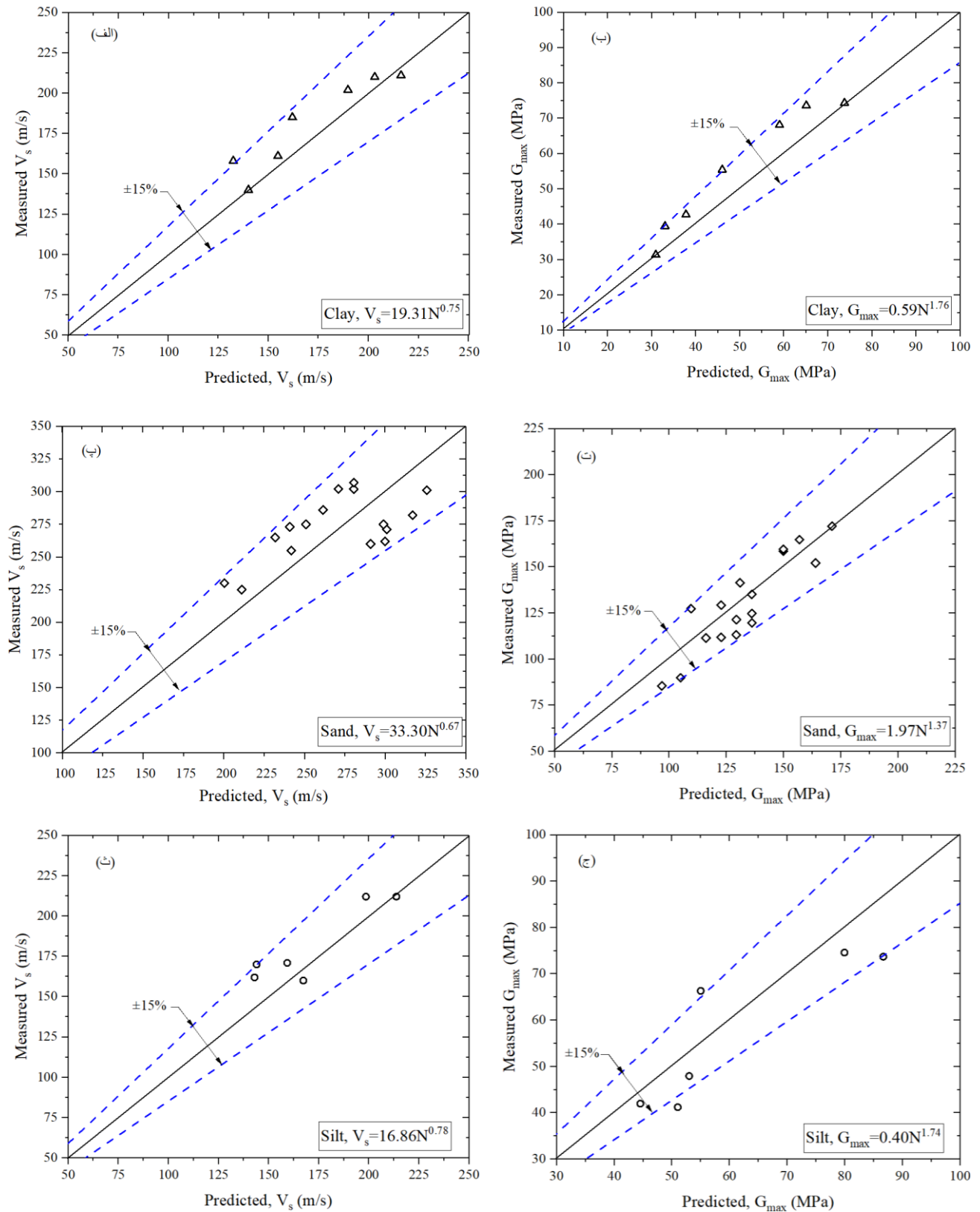
Table 7. Data from three boreholes considered for validation in Mazandaran province.. (Continued)

	عمق (m)	$V_s (m/s)$	$V_p (m/s)$	$\rho (gr/cm^3)$	SPT	نوع خاک (USCS)
M1	۱	۱۴۰	۷۲۰	۱/۶	۱۴	CL
	۳	۱۶۲	۱۳۵۹	۱/۶	۱۵	ML
	۵	۱۷۰	۱۳۳	۱/۶۱	۱۶	ML
	۷	۱۹۵	۱۲۲۳	۱/۶۸	۲۰	SM
	۹	۲۲۵	۱۲۴۶	۱/۶۹	۲۰	SP
	۱۱	۲۳۰	۱۳۲۴	۱/۷	۲۲	SP
	۱۳	۲۵۵	۱۳۷۳	۱/۷۲	۲۴	SP
	۱۵	۲۶۵	۱۲۹۳	۱/۷۳	۲۵	SP
	۱۷	۳۰۲	۱۴۰۳	۱/۷۴	۲۸	SP
	۱۹	۲۷۵	۱۲۸۳	۱/۶۵	۲۶	SP
	۲۱	۲۶۲	۱۳۵۴	۱/۶۵	۲۵	SP
	۲۳	۲۸۲	۱۳۲۱	۱/۷	۲۶	SP
	۲۵	۳۰۱	۱۲۹۲	۱/۶۸	۳۰	SP
	۲۷	۳۲۳	۱۲۹۹	۱/۶۵	۳۱	SP
	۲۹	۳۳۳	۱۳۰۹	۱/۶۳	۳۳	SM

جدول ۷. داده‌های سه گمانه در نظر گرفته شده برای صحت سنجی در استان مازندران

Table 7. Data from three boreholes considered for validation in Mazandaran province..

	عمق (m)	V_s (m/s)	V_p (m/s)	ρ (gr/cm ³)	SPT	نوع خاک (USCS)
M2	۱	۱۵۸	۸۶۰	۱/۵۸	۱۳	CL
	۳	۱۸۵	۹۰۰	۱/۶۲	۱۷	CL
	۵	۱۶۱	۹۶۴	۱/۶۵	۱۶	CL
	۷	۱۶۰	۱۰۰۱	۱/۶۱	۱۹	ML
	۹	۱۷۱	۱۰۱۰	۱/۶۴	۲۰	ML
	۱۱	۲۶۰	۹۸۹	۱/۶۵	۲۳	SP
	۱۳	۲۷۱	۱۰۳۲	۱/۶۳	۲۶	SP
	۱۵	۲۷۳	۱۰۳۸	۱/۷۱	۲۲	SP
	۱۷	۲۷۵	۱۰۶۸	۱/۷۱	۲۴	SP
	۱۹	۲۸۶	۱۰۱۳	۱/۷۳	۲۵	SP
	۲۱	۳۰۲	۱۱۴۸	۱/۷۵	۲۸	SP
	۲۳	۳۰۷	۹۷۸	۱/۷۵	۲۹	SP
	۲۵	۳۱۳	۱۰۵۰	۱/۷۶	۳۱	SM
	۲۷	۳۲۳	۱۱۵۷	۱/۶۶	۳۲	SM
	۲۹	۳۳۶	۱۱۶۴	۱/۶۷	۳۳	SM
M3	۱	۱۹۵	۴۵۳	۱/۷۱	۲۰	SC
	۳	۲۱۸	۵۰۰	۱/۷۲	۲۲	SC
	۵	۲۵۳	۵۴۵	۱/۷۴	۲۵	GC
	۷	۲۸۵	۶۲۷	۱/۷۶	۲۶	GC
	۹	۳۰۹	۶۹۲	۱/۷۲	۳۰	GC
	۱۱	۲۰۲	۷۴۱	۱/۶۷	۲۱	CL
	۱۳	۲۱۲	۷۷۹	۱/۶۶	۲۱	ML
	۱۵	۲۱۰	۸۰۹	۱/۶۷	۲۳	CL
	۱۷	۲۱۱	۸۳۷	۱/۶۷	۲۵	CL
	۱۹	۳۰۱	۸۵۵	۱/۷۳	۳۰	GC
	۲۱	۳۸۸	۸۶۷	۱/۷۴	۳۱	GC
	۲۳	۲۱۲	۸۷۷	۱/۶۴	۲۲	ML
	۲۵	۲۶۵	۸۹۳	۱/۶۶	۲۵	SC
	۲۷	۲۸۷	۹۱۳	۱/۷	۲۶	SC
	۲۹	۳۱۰	۹۲۶	۱/۷۲	۲۷	SC



شکل ۸. میزان دقت پیش بینی سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک توسط فرمول‌های پیشنهادی برای ۳ گمانه جدید: (الف) (ب) برای خاک‌های رسی، (پ) (ت) برای خاک‌های ماسه‌ای و (ث) (ج) برای خاک‌های سیلتی

Fig. 8. Prediction accuracy of shear wave velocity (VS) and small-strain shear modulus (Gmax) using proposed formulas for 3 new boreholes: (a)(b) Clayey soils, (c)(d) Sandy soils, (e)(f) Silty soils.

(MPa) ۴۱ تا ۷۴ است.

طبق شکل ۸، تمامی پیش بینی‌های انجام شده برای سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک بر اساس عدد SPT در نزدیکی بازه مثبت منفی ۱۵٪ خط برابری قرار دارند که دقت بالای روابط پیشنهادی در این مطالعه را برای ناحیه شمالی ایران به خوبی نشان می‌دهد. این مطالعه به‌وضوح نشان می‌دهد که روابط تجربی ارائه شده توانایی مناسبی در پیش‌بینی پارامترهای دینامیکی خاک‌های مختلف دارند. با این حال، تفاوت‌های مشاهده‌شده در دقت پیش‌بینی‌ها و حساسیت پارامترها به تغییرات عدد SPT، لزوم در نظر گرفتن نوع خاک در مدل‌سازی‌های دینامیکی را برجسته می‌سازد. خاک‌های رسی به دلیل ساختار ذرات ریز و آب‌دوست خود، معمولاً مدول برشی کمتری دارند و در مقابل تغییرات رطوبت حساس هستند. در نمودارهای مربوط به خاک رس، انطباق زیاد بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌های مدل، نشان‌دهنده دقت بالای این مدل در پیش‌بینی رفتار این نوع خاک است. خاک‌های ماسه‌ای، با دانه‌های بزرگ‌تر و نفوذپذیری بیشتر، معمولاً مدول برشی بالاتری دارند که نشان‌دهنده رفتار مکانیکی متفاوتی در مقایسه با خاک‌های رسی هست. در نمودار مربوط به خاک ماسه‌ای نیز پیش‌بینی‌های مدل نشان‌دهنده دقت بالای این مدل در تعیین پارامترهای دینامیکی خاک است. خاک‌های سیلتی بین ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها قرار دارند و به همین دلیل ممکن است رفتار آن‌ها پیچیده‌تر باشد. اگرچه نقاطی در نمودار سیلت در نزدیکی بازه مثبت منفی ۱۵٪ خط برابری هستند، اما به‌طور کلی، ارتباط بین داده‌های اندازه‌گیری‌شده و پیش‌بینی‌ها نشان‌دهنده قابلیت مدل‌های استفاده‌شده در ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی این نوع خاک‌ها است.

۶- نتیجه گیری

این مطالعه با انجام آزمایش‌های صحرایی، در ۱۱ محل شهرستان رشت، برای اولین بار برای ناحیه شمالی ایران، روابط همبستگی بین عدد SPT با سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک برای سه گروه خاک رسی، ماسه‌ای و سیلتی ارائه کرد. روابط پیشنهادی با اطلاعات مربوط به ۳ گمانه، واقع در استان مازندران، که در خارج از محدوده اولیه مورد مطالعه قرار داشتند، بررسی و دقت بالای این روابط مشخص گردید. از این روابط می‌توان برای یافتن سرعت موج برشی (V_s) و مدول برشی کرنش کوچک (G_{max}) در ناحیه شمالی ایران استفاده کرد. مهم‌ترین نتایج این تحقیق به تفکیک سه گروه خاک رسی، ماسه‌ای و سیلتی به شرح زیر است:

- خاک‌های رسی: خاک‌های رسی این نواحی از هردو نوع CL و CH

بودند و بیشتر در لایه‌های سطحی مشاهده شدند اما در اعماق بیشتر از ۲۰ (m) هم به صورت لnzهایی با عمق‌های مختلف گزارش گردیدند. در این تحقیق، روابط همبستگی بین عدد SPT و سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک برای خاک‌های رسی در ناحیه شمالی ایران به ترتیب در محدوده ۱۵۰ تا ۵۲۳ (m/s) و ۳۰ تا ۲۸۷ (MPa) ارائه شده است. روابط ارائه شده برای خاک‌های رسی نشان دادند که با افزایش عدد SPT، سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک افزایش می‌یابد. خاک‌های رسی حساسیت بالایی به تغییرات وزن مخصوص دارند، بنابراین در تعیین روابط همبستگی این نوع خاک‌ها باید وزن مخصوص هر لایه در نظر گرفته شود.

- خاک‌های ماسه‌ای: روابط همبستگی بین عدد SPT و سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک برای خاک‌های ماسه‌ای در ناحیه شمالی ایران به ترتیب در محدوده ۱۳۵ تا ۵۶۵ (m/s) و ۲۴ تا ۲۳۲ (MPa) ارائه شده است. خاک‌های ماسه‌ای حساسیت کمتری به تغییرات وزن مخصوص دارند، بنابراین می‌توان از میانگین وزن مخصوص لایه‌ها در روابط همبستگی استفاده کرد.
- خاک‌های سیلتی: خاک‌های سیلتی روابطی پیچیده‌تر و بینابین خاک‌های رسی و ماسه‌ای دارند. در این خاک‌ها نیز با افزایش عدد SPT، سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک افزایش می‌یابند. روابط همبستگی بین عدد SPT و سرعت موج برشی و مدول برشی کرنش کوچک برای خاک‌های سیلتی در ناحیه شمالی ایران به ترتیب در محدوده ۲۲۰ تا ۴۱۱ (MPa) و ۹۰ تا ۳۵۴ (MPa) ارائه شده است. خاک‌های سیلتی نیز مانند خاک‌های ماسه‌ای این نواحی حساسیت کمتری به تغییرات وزن مخصوص دارند و می‌توان از میانگین وزن مخصوص لایه‌ها در روابط همبستگی استفاده کرد.

از آنجاییکه مقادیر $SPT - N$ پس از انجام مطالعات ژئوتکنیک به راحتی در دسترس هستند. در نتیجه برای بررسی خصوصیات دینامیکی و لرزه‌ای خاک، به جای انجام مطالعات ژئوفیزیک برای تعیین سرعت موج برشی V_s و مدول برشی کرنش کوچک G_{max} خاک، می‌توان از روابط بدست آمده در این پژوهش باصرف وقت و هزینه کمتر، بهره جست. در خاتمه پیشنهاد می‌شود، در مطالعات آتی با حفر گمانه‌های جدید در سایر نواحی ایران، مخصوصاً در نواحی متشکل از رسوبات آبرفتی، این روابط برای مناطق بیشتری توسعه داده شود.

<https://doi.org/10.4097/kjae.2015.68.3.220>.

۷- فهرست علائم

علائم انگلیسی

V_s	سرعت موج برشی، (m/s)
V_p	سرعت موج فشاری، (m/s)
G_{max}	مدول برشی کرنش کوچک، (MPa)
STD	انحراف معیار استاندارد
ρ	وزن مخصوص، (gr/cm^3)

منابع

- [7] J.I. Joyner, W. B., Fumal, T. E., & Ziony, Predictive mapping of earthquake ground motion., FUTURE DIRECTIONS IN EVALUATING EARTHQUAKE HAZARDS OF SOUTHERN CALIFORNIA, 202 (1985).
- [8] K. Kayabali, Soil liquefaction evaluation using shear wave velocity, Eng Geol 44 (1996) 121–127. [https://doi.org/10.1016/S0013-7952\(96\)00063-4](https://doi.org/10.1016/S0013-7952(96)00063-4).
- [9] H. Chatrayi, F. Hajizadeh, B. Taghavi, Shear wave velocity (V_s) and SPT resistance (N) correlation for the Isfahan Metro, Iran, Acta Geophysica 72 (2023) 1749–1764. <https://doi.org/10.1007/s11600-023-01180-8>.
- [10] H.A. Abbas, D. Al-Jeznawi, M.A.Q. Al-Janabi, L.F.A. Bernardo, M.A.S.C. Jacinto, Exploring Shear Wave Velocity—NSPT Correlations for Geotechnical Site Characterization: A Review, CivilEng 5 (2024) 119–135. <https://doi.org/10.3390/civileng5010006>.
- [11] A. Leisi, S. Manaman, Shear wave velocity estimation using seismic attributes in one of the sandstone reservoirs of southern Iran, Journal of the Earth and Space Physics 49 (2023) 389–405. <https://doi.org/10.22059/jesphys.2023.348494.1007456>.
- [12] M. Payan, A. Khoshghalb, K. Senetakis, N. Khalili, Effect of particle shape and validity of G_{max} models for sand: A critical review and a new expression, Comput Geotech 72 (2016) 28–41. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2015.11.003>.
- [13] S.-H.H. He, M. Goudarzy, Z. Ding, Y. Sun, T. Xu, Q.-F.F. Zhang, Small-strain shear modulus (G_{max}) and microscopic pore structure of calcareous sand with different grain size distributions, Granul Matter 24 (2022) 112. <https://doi.org/10.1007/s10035-022-01270-2>.
- [14] P. Anbazhagan, K. Ayush, M.E. Yadhunandan, K. Siriwanth, K. Suryanarayana, G. Sahodar, Effective Use of SPT: Hammer Energy Measurement and Integrated Subsurface Investigation, Indian Geotechnical Journal 52 (2022) 1079–1096. <https://doi.org/10.1007/s40098-022-00609-z>.
- [1] M.K. Akin, S.L. Kramer, T. Topal, Empirical correlations of shear wave velocity (V_s) and penetration resistance (SPT-N) for different soils in an earthquake-prone area (Erbaa-Turkey), Eng Geol 119 (2011) 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2011.01.007>.
- [2] H. Haghsheeno, M. Arabani, Seismic Bearing Capacity of Shallow Foundations Placed on an Anisotropic and Nonhomogeneous Inclined Ground, Indian Geotechnical Journal 51 (2021) 1319–1337. <https://doi.org/10.1007/s40098-021-00534-7>.
- [3] M. Veiskarami, R. Jamshidi Chenari, M.A. Ahmadi, M.H. Hatefi, A Study on the Seismic Passive Earth Pressure on Rigid Retaining Walls Considering Seismic Acceleration Field, Journal of Earthquake Engineering 27 (2023) 2013–2033. <https://doi.org/10.1080/13632469.2022.2091686>.
- [4] B. Kirar, B.K. Maheshwari, P. Muley, Correlation Between Shear Wave Velocity (V_s) and SPT Resistance (N) for Roorkee Region, International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering 2 (2016) 9. <https://doi.org/10.1007/s40891-016-0047-5>.
- [5] A. Sil, J. Haloi, Empirical Correlations with Standard Penetration Test (SPT)-N for Estimating Shear Wave Velocity Applicable to Any Region, International Journal of Geosynthetics and Ground Engineering 3 (2017) 22. <https://doi.org/10.1007/s40891-017-0099-1>.
- [6] D.K. Lee, J. In, S. Lee, Standard deviation and standard error of the mean, Korean J Anesthesiol 68 (2015) 220.

- Engineering 43 (2025) 138. <https://doi.org/10.1007/s10706-025-03099-x>.
- [24] M.R. Asef, A. Misaghi, M. Sarmadivaleh, The simultaneous effect of porosity and clay on shear wave velocity in shale rocks, *Journal of Petroleum Geomechanics* 6 (2023) 40–47. <https://doi.org/10.22107/jpg.2023.402053.1198>.
- [25] S.-W.W. Moon, Y.C.H. Ng, T. Ku, Global semi-empirical relationships for correlating soil unit weight with shear wave velocity by void-ratio function, *Canadian Geotechnical Journal* 55 (2018) 1193–1199. <https://doi.org/10.1139/cgj-2017-0226>.
- [26] T.O. Hodson, Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not, *Geosci Model Dev* 15 (2022) 5481–5487. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>.
- [27] D. ASTM, Standard test method for standard penetration test (SPT) and split-barrel sampling of soils. ASTM D1586, ASTM Standard Test Method (n.d.) 1586, 1–9.
- [28] Test Methods for Downhole Seismic Testing, ASTM D7400, (2019). https://doi.org/10.1520/D7400_D7400M-19.
- [29] A. Jafari, M. K., Shafiei, A., & Razmkhah, Dynamic properties of fine grained soils in south of Tehran, (2002).
- [30] Ü. Dikmen, Statistical correlations of shear wave velocity and penetration resistance for soils, *Journal of Geophysics and Engineering* 6 (2009) 61–72. <https://doi.org/10.1088/1742-2132/6/1/007>.
- [31] A.S. Daag, O.P.C. Halasan, A.A.T. Magnaye, R.N. Grutas, R.U. Solidum, Empirical Correlation between Standard Penetration Resistance (SPT-N) and Shear Wave Velocity (Vs) for Soils in Metro Manila, Philippines, *Applied Sciences* 12 (2022) 8067. <https://doi.org/10.3390/app12168067>.
- [32] C.R. Escudero, A. Ramirez Gaytan, A. Zamora Camacho, A. Preciado, K.L. Flores, A. Gomez Hernandez, Geotechnical zonation and soil–structure interaction at Puerto Vallarta, México, *Natural Hazards* 110 (2022) 247–267. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-04945-w>.
- [15] P. Anbazhagan, A. Kumar, S.G. Ingale, S.K. Jha, K.R. Lenin, Shear modulus from SPT N-values with different energy values, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 150 (2021) 106925. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106925>.
- [16] P. Anbazhagan, T.G. Sitharam, Relationship between Low Strain Shear Modulus and Standard Penetration Test N Values, *Geotechnical Testing Journal* 33 (2010) 150–164. <https://doi.org/10.1520/GTJ102278>.
- [17] C.D.S. BARROS, J. C., & Pinto, Estimation of maximum shear modulus of Brazilian tropical soils from standard penetration test, *N International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering* (1999) (pp. 29–30).
- [18] H.B. Seed, I.M. Idriss, I. Arango, Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data, *Journal of Geotechnical Engineering* 109 (1983) 458–482. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1983\)109:3\(458\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1983)109:3(458)).
- [19] Y. Ohta, N. Goto, H. Kagami, K. Shiono, Shear wave velocity measurement during a standard penetration test, *Earthq Eng Struct Dyn* 6 (1978) 43–50. <https://doi.org/10.1002/eqe.4290060106>.
- [20] C. Ya, C., Songyu, L., & Guojun, Characterization on the correlation between SPT-N and small strain shear modulus G max of Jiangsu silts of China., *Earth Sciences Research Journal* (2021) 25(2), 225–235.
- [21] H.L. Rocha, B. P., Silva, B. C. D., & Giacheti, Maximum shear modulus estimative from SPT for some Brazilian tropical soils, *Soils and Rocks* (2023) 46, e2023005222.
- [22] W. Hassan, M. Qasim, B. Alshameri, A. Shahzad, M.H. Khalid, S.U. Qamar, Geospatial intelligence in geotechnical engineering: a comprehensive investigation into SPT-N, soil types, and undrained shear strength for enhanced site characterization, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 83 (2024) 380. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03884-7>.
- [23] M. Letif, R. Bahar, N. Mezouar, Correlations Among CPT, MPT, and SPT in Clayey Soils: A Case Study from Central Northern Algeria, *Geotechnical and Geological*

- [33] J.J. Crispin, C.E.L. Gilder, P.J. Vardanega, Review of SPT-undrained shear strength correlation for UK soil deposits, in: *Geotechnical Engineering Challenges to Meet Current and Emerging Needs of Society*, CRC Press, London, 2024: pp. 1535–1538. <https://doi.org/10.1201/9781003431749-283>.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

M. H. Hatefi, M. Arabani, M. Payan, P. Zanganeh Ranjbar, H. Ahmadi, *Investigation of the Correlation between SPT Number, Shear Wave Velocity, and Small-Strain Shear Modulus in Northern Iran*, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 57(6) (2025) 973-998.

DOI: [10.22060/ceej.2025.23031.8094](https://doi.org/10.22060/ceej.2025.23031.8094)



