

Research article

DOI: 10.22034/IJME.2025.2061167.2049

OPEN ACCESS

## Seismic Survey Studies in Geotechnical Boreholes along the Isfahan–Bafq Railway Route

Hamidreza Ramazi<sup>1,\*</sup>, Sara Ozayri<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Professor, Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Ph.D. Student, Faculty of Mining Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

Article info	Abstract
<p>Received: 21 May 2025 Revised: 13 July 2025 Accepted: 21 September 2025</p> <p><b>Keywords</b></p> <p>Downhole seismic V<sub>p</sub> V<sub>s</sub> Site classification Isfahan–Bafq railway</p> <p><b>*Corresponding author</b> Hamidreza Ramazi <a href="mailto:ramazi@aut.ac.ir">ramazi@aut.ac.ir</a></p>	<p>In this study, downhole seismic testing was conducted in two geotechnical boreholes located along the Isfahan–Bafq railway route to characterize the dynamic and mechanical properties of near-surface layers and to assign site classes according to Iran Standard 2800. Measurements were acquired using a three-component downhole sonde at 1-m depth intervals. First-arrival times of compressional (P) and shear (S) waves were picked and converted to depth-dependent V<sub>p</sub> and V<sub>s</sub> values. Depth-weighted effective velocities were estimated for each borehole and compared against the 2800 classification scheme. Borehole No.1 showed effective velocities V<sub>p, eff</sub> ≈ 1400 m/s and V<sub>s, eff</sub> ≈ 800 m/s, and was classified as Site Group I; Borehole No.2 exhibited V<sub>p, eff</sub> ≈ 1170 m/s and V<sub>s, eff</sub> ≈ 310 m/s and was classified as Site Group III. Using measured V<sub>p</sub>, V<sub>s</sub>, and bulk density, Poisson's ratio and dynamic moduli (G, E, and K) were computed for identified layers. The results provide a site-specific dataset useful for seismic design and demonstrate that downhole seismic testing, combined with dynamic-to-static conversions, yields reliable engineering parameters for railway-related geotechnical design.</p>

How to cite this article

Ramazi, H., Ozayri, S., 2025, Seismic Survey Studies in Geotechnical Boreholes along the Isfahan–Bafq Railway Route. *Journal of Mining Engineering*, 20(2): 104-114. (in Persian with English Abstract) <https://doi.org/10.22034/ijme.2025.2061167.2049>



©2025 The author(s). Published by [Iranian Society of Mining Engineering](#).

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.

## EXTENDED ABSTRACT

### 1. Introduction

This research investigates the subsurface seismic properties using downhole seismic methods in two boreholes along the Isfahan-Bafq railway corridor. Accurate determination of the mechanical and dynamic characteristics of soil and rock layers is vital for ensuring the safety and stability of civil infrastructure, especially in seismic-prone regions. Previous studies have demonstrated the efficacy of downhole seismic testing in elucidating subsurface properties, enabling better site classification and foundation design.

The introduction outlines the paper's scope and objectives while addressing the problem. Accurate knowledge of subsurface dynamic properties is essential in the seismic design of transportation infrastructure. In situ seismic methods offer direct estimates of compressional ( $V_p$ ) and shear ( $V_s$ ) wave velocities, which are fundamental for computing dynamic moduli, classifying sites for seismic design, and reducing uncertainty compared to purely empirical geotechnical correlations. Downhole seismic testing is particularly well-suited for borehole-scale characterization because it records P- and S-wave arrivals with minimal near-surface scattering, enabling depth-resolved velocity profiles. This study employs downhole seismic tests at specified intervals within the boreholes to capture P- and S-wave velocities, which are used to derive key geotechnical parameters. The primary objectives are: (1) to determine depth-dependent  $V_p$  and  $V_s$  at 1-meter intervals, (2) to estimate depth-averaged (effective) velocities for site classification according to Iran's Standard 2800, and (3) to compute dynamic elastic parameters for engineering use. The main results include the classification of boreholes according to Iran's Standard 2800 and detailed calculations of dynamic and static moduli, providing comprehensive.

### 2. Methodology

The methodology involved performing downhole seismic tests at 1-meter intervals in two boreholes, with depths of 17 and 13 meters, respectively. A three-component seismograph was utilized to record seismic waves generated at the surface through controlled impacts. Hammer impacts on a metal plate produced predominantly P-energy (vertical strike) and S-energy (horizontal strike along the timber edge). The source offset was minimized to enhance near-vertical ray paths to the borehole receivers. At each 1-meter depth step, the sensor was fixed against the borehole wall, and multiple shots were recorded. The arrival times of P- and S-waves were extracted from the recorded data to produce time-depth curves, from which seismic velocities were calculated. Effective velocities ( $V_p, \text{eff}$  and  $V_s, \text{eff}$ ) were estimated as depth-weighted averages over the recoverable borehole interval. These velocities were then compared with the standards outlined in Iran's Standard 2800 to classify the boreholes.

Further, dynamic parameters, including Poisson's ratio, Young's modulus, shear modulus, and bulk modulus, were computed from the velocities and densities using established theoretical relationships. The calculated dynamic moduli and Poisson's ratios provided additional confirmation of material differences and their influence on seismic response. Quality control measures included inspection of pick consistency, assessment of sensor coupling, and removal of measurements affected by borehole collapse or poor coupling.

The interpretation of results considered variations in material types, stratification, and seismic behaviour, thereby providing detailed insights essential for seismic risk mitigation and geotechnical design.

### 3. Findings and argument

The analysis revealed three distinct layers in each borehole, with velocities indicating diverse material properties. In borehole 1, velocities ranged from 360 m/s to 1430 m/s ( $V_p$ ) and 190 m/s to 900 m/s ( $V_s$ ), corresponding to soft soils and more rigid layers. In borehole 2, velocities varied from 390 m/s

to 1700 m/s ( $V_p$ ) and 270 m/s to 380 m/s ( $V_s$ ). Based on these velocities, borehole 1 was classified in Group I, typical of soft soils, whereas borehole 2 was in Group III, indicative of more competent materials. The computed dynamic moduli and Poisson's ratios provided additional confirmation of material differences and their influence on seismic response. The results align with standard classifications and provide detailed insights into subsurface behavior, which are essential for seismic risk mitigation and geotechnical design.

The analysis of downhole seismic data revealed three distinct layers in each borehole, characterized by varying material properties. In Borehole 1, seismic velocities ranged from 360 m/s to 1430 m/s for compressional waves ( $V_p$ ) and from 190 m/s to 900 m/s for shear waves ( $V_s$ ), indicating the presence of soft soils and more rigid layers. In contrast, Borehole 2 exhibited velocities varying from 390 m/s to 1700 m/s for  $V_p$  and from 270 m/s to 380 m/s for  $V_s$ . Based on these velocity profiles, Borehole 1 was classified in Group I, typical of soft soils, whereas Borehole 2 fell into Group III, indicative of more competent materials. Field data allowed segmentation of both boreholes into three principal layers: a near-surface soft layer, an intermediate stiffer layer, and a deeper competent layer, where accessible. The effective velocities and site classifications according to Iran's Standard 2800 are summarized in Table 1.

**Table 1. Effective velocities and site classification (Iran Standard 2800)**

Borehole	$V_s$ , eff (m/s)	$V_p$ , eff (m/s)	Recoverable Depth (m)	Iran 2800 Site Group
Borehole 1	800	1400	0-17	Group I
Borehole 2	310	1170	0-13	Group III

The computed dynamic moduli and Poisson's ratios further corroborated material differences and their influence on seismic response. Representative dynamic parameters for selected layers are presented in Table 2.

**Table 2. Representative dynamic parameters for selected layers (values from borehole interpretations)**

Borehole	$V_p$ (m/s)	$V_s$ (m/s)	$\rho$ (g/m <sup>3</sup> )	$\nu$	G(Mpa)	E (MPa)	K (MPa)	Layer Depth (m)
Borehole 1	1430	900	2.05	0.16	1700	3900	1900	2.5-17
Borehole 2	1700	380	2.05	0.47	300	870	5530	8.5-13

The effective velocities place Borehole 1 in a stiff site category (Group I), indicating competent near-surface conditions suitable for conventional foundation approaches. Conversely, Borehole 2's low effective  $V_s$  ( $\approx 310$  m/s) yields a Group III classification, reflecting softer and/or potentially saturated layers that necessitate specific seismic design considerations, such as increased site amplification and the potential for strain-dependent stiffness reduction.

The results align with standard classifications and provide detailed insights into subsurface behavior, which is essential for seismic risk mitigation and effective geotechnical design.

#### 4. Conclusions

The study successfully characterized subsurface layers using downhole seismic testing, revealing significant variability in geotechnical properties across boreholes. The classification according to Iran's Standard 2800 indicates the suitability of each site for different foundation types and seismic design considerations. Specifically, Borehole 1 exhibited effective velocities of approximately  $V_p$ , eff  $\approx 1400$  m/s and  $V_s$ , eff  $\approx 800$  m/s, categorizing it as Group I (stiff), while Borehole 2 showed

effective velocities of  $V_p, \text{eff} \approx 1170$  m/s and  $V_s, \text{eff} \approx 310$  m/s, placing it in Group III (softer/susceptible layers).

The detailed calculation of dynamic elastic moduli and Poisson's ratios enhances the understanding of site-specific seismic response, providing critical inputs for foundation design and seismic response analyses. These parameters were derived and converted to engineering (static) moduli using standard empirical factors, ensuring their applicability in practical engineering.

## 5. References

- [1] Bačić, M., L. Librić, D. J. Kaćunić, and M. S. Kovačević. 2020. "The Usefulness of Seismic Surveys for Geotechnical Engineering in Karst: Some Practical Examples." *Geosciences* 10 (10): 406.
- [2] Committee for the Permanent Revision of the Seismic Design Code (Standard 2800). Tehran. (Persian).
- [3] Das, B. M., and K. Sobhan. 1990. *Principles of Geotechnical Engineering*. [Publisher information not provided].
- [4] Malehmir, A., R. Durrheim, G. Bellefleur, M. Urosevic, C. Juhlin, D. J. White, and G. Campbell. 2012. "Seismic Methods in Mineral Exploration and Mine Planning: A General Overview of Past and Present Case Histories and a Look into the Future." *Geophysics* 77 (5): WC173–WC190.
- [5] Maleki, Sh., H. R. Ramazi, R. Gholami, and F. Sadeghzadeh. 2015. "Application of Seismic Attributes in Structural Study and Fracture Analysis of DQ Oil Field, Iran." *Egyptian Journal of Petroleum* 24:119–130.
- [6] Mares, S. 1984. *Introduction to Applied Geophysics*. Springer.
- [7] Omnes, G. 1990. "Experimental Study of the Coupled Cord Downhole Seismic Source." In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1990*, 148–152. Society of Exploration Geophysicists.
- [8] PASĀRE, M. 2017. "Practical Method for Determining the Dynamic Coefficient." *Fiability & Durability / Fiabilitate si Durabilitate* (1).
- [9] Peng, C., C. H. Cheng, and M. N. Toksöz. 1993. "Borehole Effects on Downhole Seismic Measurements." *Geophysical Prospecting* 41 (7): 883–912.
- [10] Ramazi, H. 2023. *Engineering Seismic*. 3rd ed. Tehran: Amir Kabir University Press.
- [11] Regina, G., E. Ausilio, G. Dente, and P. Zimmaro. 2021. "A Critical Overview of Geophysical Investigation and Laboratory Test Results Used in the Seismic Re-evaluation of the Farneto Del Principe Dam in Italy." Paper presented at the 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization (ISC'6), Budapest, Hungary, and September 7–11.
- [12] Win-Gee, H., B. S. Huang, J. H. Wang, C. Kou-Cheng, K. W. Kuo-Liang, S. Tsao, and C. H. Chen. 2010. "Seismic Observations in the Taipei Metropolitan Area Using the Downhole Network." *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences* 21 (3): 6.
- [13] Yilmaz, O., M. Eser, and M. Berilgen. 2009. "Applications of Engineering Seismology for Site Characterization." *Journal of Earth Science* 20 (3): 546–554.



OPEN ACCESS

DOI: 10.22034/ijme.2025.2061130.2048

مقاله پژوهشی

## مطالعات لرزه‌نگاری در گمانه‌های ژئوتکنیکی مسیر راه آهن اصفهان - بافق

حمیدرضا رمزی<sup>۱\*</sup>، سارا عذیری<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> استاد، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۲/۲۹ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۴/۲۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۳۰	در این مقاله به مطالعات لرزه‌نگاری درون‌گمانه‌ای (Downhole Seismic Test) در دو گمانه ژئوتکنیکی واقع در مسیر راه آهن اصفهان- بافق پرداخته شده است. ارزیابی دقیق ویژگی‌های مکانیکی و دینامیکی لایه‌های زیرسطحی در پروژه‌های عمرانی و ژئوتکنیکی اهمیت بالایی دارد، اما روش‌های مرسوم (غیر ژئوفیزیکی) اغلب هزینه‌بر و زمان‌بر هستند. هدف اصلی این مطالعه، تعیین سرعت امواج فشاری (Vp) و برشی (Vs) در لایه‌های زیرسطحی، برآورد سرعت موثر و ارزیابی محل گمانه‌ها بر اساس استاندارد ۲۸۰۰ ایران بوده است. برای این منظور، آزمایش‌های لرزه‌نگاری درون‌گمانه‌ای با فاصله یک متر به یک متر درون گمانه‌ها انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که سرعت مؤثر امواج P و S در گمانه اول به ترتیب ۱۴۰۰ و ۸۰۰ متر بر ثانیه و در گمانه دوم ۱۱۷۰ و ۳۱۰ متر بر ثانیه برآورد شده است. بر اساس نتایج حاصل، گمانه شماره ۱ در گروه I و گمانه شماره ۲ در گروه III استاندارد ۲۸۰۰ ایران قرار می‌گیرد. افزون بر برآورد سرعت‌ها، دیگر ویژگی‌های ژئوتکنیکی از جمله ضریب پواسون، مدول‌های یانگ، برشی و بالک نیز محاسبه و در مقاله ارائه شده است. این محاسبات داده‌های دقیق‌تری فراتر از مطالعات معمول در اختیار کاربر قرار می‌دهد.
<b>واژه‌های کلیدی</b> لرزه‌نگاری لرزه‌نگاری درون‌چاهی سطح به گمانه مطالعات ساخت‌گاهی ایران	
<b>*نویسنده مسئول</b> حمیدرضا رمزی <a href="mailto:ramazi@aut.ac.ir">ramazi@aut.ac.ir</a>	

استناد به این مقاله:

رمزی، حمیدرضا؛ عذیری، سارا؛ ۱۴۰۴. مطالعات لرزه‌نگاری در گمانه‌های ژئوتکنیکی مسیر راه آهن اصفهان - بافق. نشریه مهندسی معدن. ۲۰(۲):

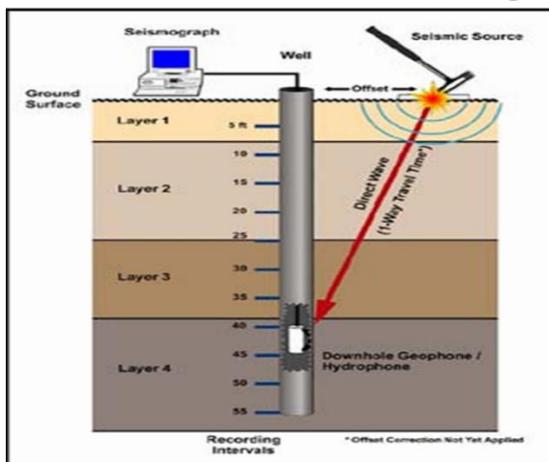
<https://doi.org/10.22034/ijme.2025.2061130.2048> .۱۰۴-۱۰۴

## ۱- مقدمه

دینامیکی آن‌ها را محاسبه کرد [۷]. از این رو، استفاده از روش‌های لرزه‌نگاری مهندسی با به‌کارگیری امواج فشاری و برشی در مطالعات ساختگاهی، به ویژه در مکانیک سنگ و خاک، به طرز چشم‌گیری گسترش یافته است [۸]. روش‌های لرزه‌ای به سه گروه اصلی تقسیم می‌شوند: لرزه‌نگاری شکست مرزی، لرزه‌نگاری بازتابی و مطالعات ویژه لرزه‌نگاری، از جمله لرزه‌نگاری درون‌گمانه‌ای [۱].

## ۲- لرزه‌نگاری درون‌گمانه‌ای

روش‌های لرزه‌نگاری درون‌گمانه‌ای زیر مجموعه‌های مختلفی دارند که یکی از پرکاربردترین آن‌ها روش از سطح به گمانه است. در این روش معمولاً، از یک سوند سه‌مولفه‌ای استفاده می‌شود که دو ژئوفون S با محور نوسان افقی، در دو جهت عمود بر هم و یک ژئوفون P با محور قائم در داخل سوند جاسازی شده است. این سوند دارای یک زبانه است که هنگام قرارگیری در گمانه، به منظور اتصال کامل سوند به دیواره گمانه، می‌توان آن را آزاد کرد [۱] (شکل ۱).



Vertical Seismic Profile (VSP) Schematic

شکل ۱- نمونه‌ای از یک پروفیل لرزه‌ای قائم (درون‌گمانه‌ای) [۱]

Fig 1 - An example of a vertical seismic profile (borehole) [1]

در برداشت‌های درون‌گمانه‌ای، سوند به آخرین عمق مورد نظر فرستاده می‌شود و سپس برداشت‌ها از انتهای گمانه به سمت بالا انجام می‌گیرد [۹]. فاصله برداشت‌ها بسته به نیاز می‌تواند از یک متر تا پنج متر متغیر باشد. پس از تثبیت سوند در عمق مورد اندازه‌گیری، با استفاده از ضربات پتک، امواجی در سطح زمین تولید و در محل سوند در داخل گمانه نگاشته می‌شوند (شکل ۲). به فاصله محل چشمه تا دهانه گمانه دورافت (Offset) گفته می‌شود [۸]. به منظور ایجاد موج P، ضربه با استفاده از پتک به صورت عمودی روی یک صفحه فلزی زده می‌شود.

لرزه‌نگاری مهندسی به عنوان یکی از بخش‌های کلیدی در بررسی‌های عمرانی و معدنی، به خصوص در ارزیابی‌های ساختگاهی، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. با این روش‌ها می‌توان داده‌های مفیدی به صورت برجا کسب نمود، به همین دلیل کاربرد آن‌ها در حال افزایش است. یکی از زیرمجموعه‌های لرزه‌نگاری مهندسی، لرزه‌نگاری درون‌گمانه‌ای است که در این مطالعه به کار گرفته شده است [۱].

امواج لرزه‌ای به دسته‌های مختلفی تقسیم می‌شوند که یکی از مهم‌ترین آن‌ها، امواج پیگیری است. این امواج به دو گروه فشاری (P) و برشی (S) تقسیم می‌شوند. سرعت گسترش امواج فشاری بیشتر از امواج برشی است و تحت تأثیر ویژگی‌های مختلف خاک‌ها و سنگ‌ها قرار دارد [۲]. سرعت گسترش امواج در خاک‌ها و سنگ‌ها به ویژگی‌های آن‌ها از جمله تراکم، جرم مخصوص، کانی‌های تشکیل دهنده، هوازدگی، تخلخل، دگرسانی، سیال داخل آن‌ها، و به طور کلی به مدول‌های دینامیکی مانند مدول یانگ، مدول برشی و مدول بالک بستگی دارد [۳]. رابطه بین سرعت گسترش این امواج و ویژگی‌های کشسانی و چگالی به صورت فرمول‌هایی بیان می‌شود. اهمیت لرزه‌نگاری مهندسی در مطالعات ساختگاهی و مکانیک سنگ و خاک به همین دلیل است که با اندازه‌گیری سرعت‌های  $V_p$  (سرعت امواج فشاری) و  $V_s$  (سرعت امواج برشی) می‌توان مدول‌های دینامیکی را محاسبه کرد [۴].

ارتباط سرعت گسترش امواج فشاری  $V_p$  و سرعت گسترش امواج برشی  $V_s$  با ضریب‌های کشسانی و چگالی بصورت زیر است.

$$V_p = \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (1)$$

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2)$$

که در آن

E: ضریب مدول یانگ

$\rho$ : چگالی

G: مدول برشی

امواج برشی در محیط‌هایی که مدول برشی آن‌ها صفر است (مانند هوا و مایعات) انتشار نمی‌یابند [۵]. همچنین می‌توان نشان داد که نسبت  $(V_p/V_s)$  تنها به نسبت پواسون بستگی دارد [۶]. بدین ترتیب، با اندازه‌گیری  $(V_p)$  و  $(V_s)$  در سنگ‌ها و خاک‌ها و با در دست داشتن چگالی آن‌ها، می‌توان مدول‌های

از این زمان و فاصله چشمه تا گیرنده (با در نظر گرفتن میزان آفست) می‌توان سرعت امواج و همچنین تعداد و ضخامت لایه‌ها را برآورد نمود.

از داده‌های حاصل می‌توان منحنی تغییرات زمان نسبت به عمق (منحنی زمان-ژرفا) را تهیه نمود. با توجه به این منحنی، می‌توان لایه‌های مختلف زمین را در طول گمانه تفکیک و سرعت گسترش امواج را در هر لایه محاسبه کرد [۷]. افزون بر سرعت گسترش امواج در هر لایه، سرعت موثر بر اساس روش اسکوپتس برآورد شده است [۱۰].

برای محاسبه ویژگی‌های دینامیکی لایه‌های زمین، لازم است که سرعت گسترش امواج فشاری و سرعت گسترش امواج برشی برآورد شود [۱]. در نهایت، سرعت‌های به‌دست‌آمده با استاندارد ۲۸۰۰ ایران (آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زمین‌لرزه) مقایسه و مطابقت داده می‌شوند تا مشخص گردد هر لایه در کدام گروه از این استاندارد قرار می‌گیرد [۱۱].

### ۳-۱- برآورد مدول‌های دینامیکی

با داشتن سرعت امواج فشاری و برشی و چگالی لایه‌ها، می‌توان پارامترهای دینامیکی مانند نسبت پواسون، مدول یانگ، مدول بالک و مدول برشی را محاسبه کرده و مشخصات مکانیکی هر لایه را به دقت ارزیابی کرد. این اطلاعات به مهندسان و زمین‌شناسان کمک می‌کند تا رفتار خاک و سنگ‌ها را تحت بارگذاری‌های مختلف پیش‌بینی کنند [۱].

$$\nu = \frac{1/2 - (Vs/Vp)^2}{1 - (Vs/Vp)^2} \quad (4)$$

$$G = \rho Vs^2 \quad (5)$$

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (6)$$

$$K = \frac{E}{3(1 - 2\nu)} \quad (7)$$

### ۳-۲- تبدیل ضرایب دینامیکی به ضرایب استاتیکی

ضرایب دینامیکی شامل مدول یانگ (E)، مدول برشی (G) و مدول بالک (K) می‌باشند. در مطالعات ژئوتکنیکی، تبدیل ضرایب دینامیکی به ضرایب استاتیکی یکی از مراحل کلیدی در ارزیابی رفتار خاک و سنگ تحت بارگذاری‌های مختلف است. این تبدیل به‌ویژه در طراحی سازه‌های مقاوم در برابر زلزله اهمیت دارد [۱۲].

برای تبدیل این ضرایب به ضرایب استاتیکی، می‌توان از روابط زیر استفاده کرد:

شود. برای ایجاد موج S، پتک به‌صورت افقی بر لبه‌ای از الوار که به همین منظور تهیه شده، ضربه زده می‌شود. این کار منجر به ایجاد تنش برشی در فصل مشترک الوار و زمین می‌شود و در نتیجه، امواج برشی ایجاد و شروع به گسترش می‌کنند [۱].



شکل ۲- دستگاه لرزه نگار سه کاناله و متعلقات آن برای اندازه

گیری درون گمانه‌ای [۱]

Fig 2 - The three-channel seismograph and its accessories for borehole measurements [1]

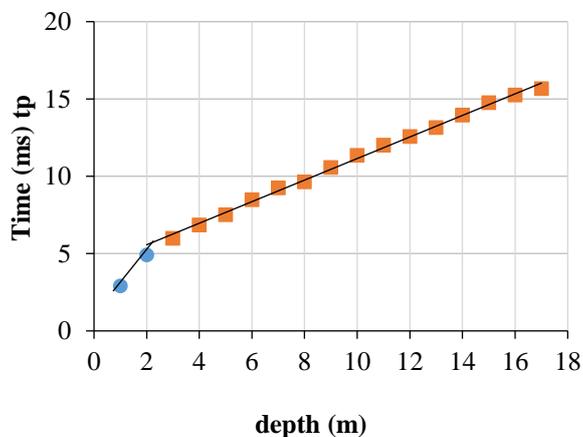
روش لرزه‌نگاری درون گمانه‌ای یک ابزار کارآمد و کم‌هزینه برای ارزیابی ویژگی‌های دینامیکی لایه‌های زیرسطحی در محل گمانه‌ها است. این روش با ارائه داده‌های دقیق از سرعت امواج فشاری و برشی در عمق‌های مختلف، امکان ارزیابی سریع، اقتصادی و قابل اعتماد ویژگی‌های مکانیکی خاک و سنگ را فراهم می‌سازد. این تحقیق به‌ویژه در شرایط خاص زمین‌شناسی این محل گمانه‌های مورد مطالعه می‌تواند در ارزیابی و مقاوم‌سازی سازه‌ها از جمله پل‌های مسیر راه و راه‌آهن به‌ویژه در برابر زلزله کمک کند.

در این مطالعه، از سرعت موثر برای اولین بار در این‌گونه مطالعات استفاده شده است. استفاده از این روش به نتایج دقیق‌تر و قابل اتکاتر منجر می‌شود. بررسی مبانی سرعت موثر در روش‌های لرزه‌نگاری خارج از حوصله این مقاله است. برای مطالعه بیشتر در این زمینه می‌توان به کتاب مقدمه‌ای بر روش‌های ژئوفیزیک کاربردی مراجعه نمود [۱۰].

### ۳- روش کار

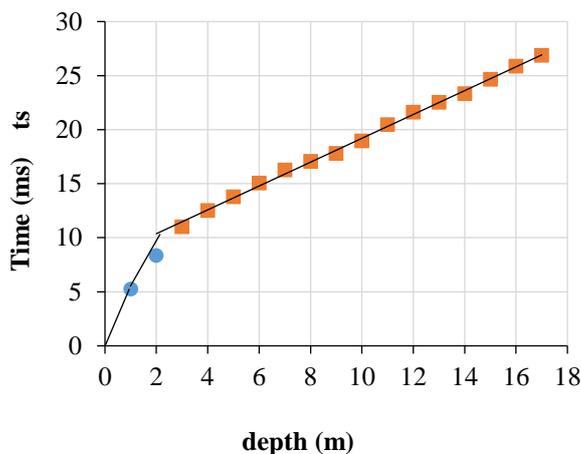
در روش لرزه‌نگاری از سطح به گمانه، امواجی در سطح زمین ایجاد و به گیرنده‌های تعبیه‌شده در سوند می‌رسند. سوند مورد استفاده، سوندی سه‌مولفه‌ای است که توانایی ثبت امواج P و S را دارد. این امواج پس از رسیدن به سوند، نگاشته و ذخیره می‌شوند. با توجه به لرزه‌نگاشت‌های حاصل می‌توان زمان نخستین امواج رسیده به گیرنده‌ها را مشخص کرد و با استفاده

بر اساس مطالعات انجام شده، ویژگی‌های دینامیکی لایه‌های معادل از سطح تا عمق برداشت در جدول ۱ برای هر یک از لایه‌های تفکیک شده ارائه شده است.



شکل ۳- نمودار زمان-عمق برای برداشت گمانه شماره ۱، امواج فشاری.

Fig 3 - Time-depth Diagram for borehole No.1, compressional waves.



شکل ۴- نمودار زمان-عمق برای برداشت گمانه شماره ۱، امواج برشی.

Fig 4 - Time-depth Diagram for borehole No.1, shear waves.

### ۳-۴- برداشت‌های انجام شده در گمانه شماره ۲

در هنگام برداشت، ۱۳ متر از این گمانه قابل برداشت بوده و بقیه به علت ریزش گمانه مسدود شده است. نمودارهای زمان-ژرفای حاصل از آن در شکل ۵ و ۶ برای امواج فشاری و برشی ارائه شده است

مدول یانگ استاتیکی ( $E_s$ ) از مدول یانگ دینامیکی ( $E_d$ ) به دست می‌آید. رابطه‌ای که معمولاً استفاده می‌شود به صورت زیر است:

$$E_s = \frac{1}{\nu + 1} E_d \quad (۸)$$

که در آن  $\nu$  نسبت پواسون است. این تبدیل به دلیل تفاوت در نحوه بارگذاری و پاسخ مواد به تنش‌های دینامیکی و استاتیکی انجام می‌شود [۱۳].

مدول برشی استاتیکی ( $G_s$ ) نیز به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$G_s = \frac{E_s}{(\nu + 1)2} \quad (۹)$$

برای تبدیل مدول بالک دینامیکی ( $K_d$ ) به مدول بالک استاتیکی ( $K_s$ )، می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$K_s = \frac{1}{(\nu + 1)} \quad (۱۰)$$

در راستای مطالعات ژئوتکنیکی مسیر راه‌آهن اصفهان - بافق، دو گمانه اکتشافی حفر شده‌اند و سنگ‌ها و خاک‌های پیرامون هر یک از این گمانه‌ها از دیدگاه زمین‌شناسی مهندسی، ژئوتکنیک و مکانیک سنگ و خاک مورد مطالعه قرار گرفته‌اند. در این گمانه‌ها، برداشت‌های لرزه‌نگاری درون گمانه‌ای به عنوان یکی از روش‌های مطالعات برجا مورد استفاده قرار گرفته است. مهم‌ترین یافته‌ها به شرح زیر است:

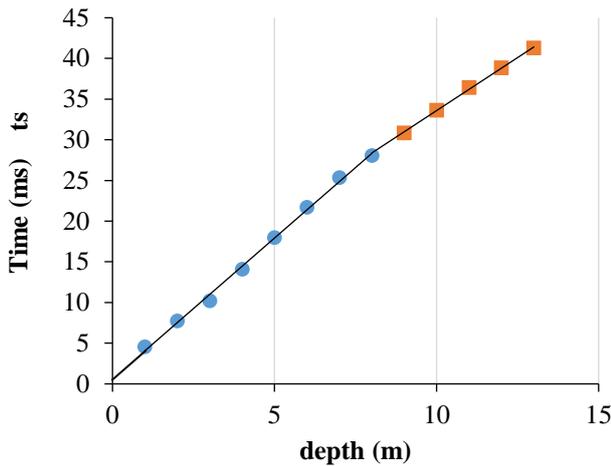
### ۳-۳- برداشت‌های انجام شده در گمانه شماره ۱

با وجود اینکه این گمانه تا ژرفای ۳۰ متری حفر شده اما عمق قابل برداشت در این گمانه به ۱۷ متر محدود بوده است. به دلیل ریزش، بقیه گمانه قابل برداشت نبوده است. نمودارهای زمان-ژرفا برای امواج فشاری و برشی در شکل ۳ و ۴ نشان داده شده است.

داده‌های حاصل در گمانه یکم مورد تفسیر قرار گرفته است. بر این اساس در این گمانه، سه لایه قابل تفکیک است. ضخامت لایه یکم حدود ۱ متر بوده و سرعت امواج فشاری ( $V_p$ ) و برشی ( $V_s$ ) در آن به ترتیب برابر با ۳۶۰ متر بر ثانیه و ۱۹۰ متر بر ثانیه برآورد شده است. ضخامت لایه دوم حدود ۱،۵ متر است و سرعت‌های ( $V_p$ ) و ( $V_s$ ) در آن به ترتیب ۵۰۰ متر بر ثانیه و ۳۲۰ متر بر ثانیه محاسبه شده است. لایه سوم تا عمق بیش از ۱۷ متر ادامه دارد و سرعت‌های ( $V_p$ ) و ( $V_s$ ) در آن به ترتیب برابر با ۱۴۳۰ متر بر ثانیه و ۹۰۰ متر بر ثانیه تعیین شده است. البته با داده‌های حاصل می‌توان سرعت امواج در هر متر از گمانه را نیز محاسبه نمود.

جدول ۱- پارامترهای دینامیکی محاسبه شده برای هریک از لایه‌ها در چاه شماره ۱  
Table 1 - Dynamic parameters calculated for each layer in borehole number 1.

Depth (m)	Thick.(m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\nu$	G (Mpa)	E (Mpa)	K (Mpa)
0-1	1	360	190	1.89	0.31	6.8E+01	1.8E+02	1.5E+02
1-2.5	1.5	500	320	1.91	0.15	2.0E+02	4.5E+02	2.2E+02
2.5-17	14.5	1430	900	2.05	0.16	1.7E+03	3.9E+03	1.9E+03

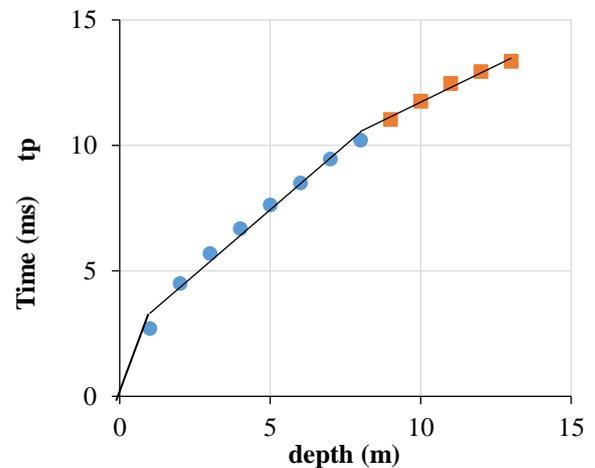


شکل ۶- نمودار زمان-عمق برای برداشت گمانه شماره ۲، امواج فشاری.

Fig 6 - Time-Depth Diagram for borehole No. 2, shear waves.

با توجه به مقادیر به دست آمده، مشخص می‌شود که جنس و نوع خاک و سنگ تأثیر قابل توجهی بر روی ضرایب دینامیکی و استاتیکی دارند. به طور کلی، در لایه‌های سخت‌تر، مقادیر مدول یانگ (E) و مدول برشی (G) بالاتر است که این موضوع منجر به افزایش مقادیر استاتیکی می‌شود. این نتایج می‌تواند به مهندسان و طراحان کمک کند تا رفتار سازه‌ها را در برابر بارهای مختلف بهتر پیش‌بینی کرده و طراحی‌های بهینه‌تری انجام دهند. در جدول ۳ مقادیر به دست آمده بر اساس جنس نوع خاک و سنگ مقایسه شده است.

بر اساس برداشت‌های انجام شده در این چاه تا عمق حدود ۱۳ متری، سه لایه قابل تفکیک است. ضخامت لایه اول حدود ۱ متر است و سرعت امواج فشاری (Vp) و برشی (Vs) در آن به ترتیب برابر ۳۹۰ و ۲۷۰ متر بر ثانیه برآورد شده است. ضخامت لایه دوم ۷/۵ متر است و Vp و Vs در آن به ترتیب ۹۵۰ و ۲۸۰ متر بر ثانیه تعیین شده است. لایه سوم با ضخامت حدود ۴٫۵ متر از ژرفای حدود ۸٫۵ تا ۱۳ متری ادامه دارد و Vp و Vs در آن به ترتیب ۱۷۰۰ و ۳۸۰ متر بر ثانیه تعیین شده است. بر اساس مطالعات انجام شده، ویژگی‌های دینامیکی لایه‌ها محاسبه و برای هر یک از لایه‌های تفکیک شده در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۵- نمودار زمان-عمق برای برداشت گمانه شماره ۲، امواج فشاری.

Fig 5 - Time-Depth Diagram for borehole No. 2, compressional waves.

جدول ۲- پارامترهای دینامیکی محاسبه شده برای هریک از لایه‌ها در چاه شماره ۲

Table 2 - Dynamic parameters calculated for each layer in borehole number 2

Depth(m)	Thick. (m)	Vp (m/s)	Vs (m/s)	$\rho$ (gr/cm <sup>3</sup> )	$\nu$	G (Mpa)	E (Mpa)	K (Mpa)
0-1	1	390	270	1.85	0.04	1.3E+02	2.8E+02	1.02E+02
1-8.5	7.5	950	280	1.95	0.45	1.5E+02	4.4E+02	1.56E+03
8.5-13	4.5	1700	380	2.05	0.47	3.0E+02	8.7E+02	5.53E+03

جدول ۳- مقایسه مقادیر به دست آمده بر اساس جنس نوع خاک و سنگ  
Table 3- Comparison of obtained values based on soil and rock type

Gs (MPa)	Es (MPa)	R (ضریب تبدیل)	G (MPa)	E (MPa)	Layers	Borehole	نوع خاک/سنگ
13.6	36	0.2	68	180	1	1	خاک نرم
40	90	0.2	200	450	2		خاک متوسط
340	780	0.2	1700	3900	3		سنگ سخت
26	56	0.2	130	280	1	2	خاک نرم
30	88	0.2	150	440	2		خاک متوسط
60	174	0.2	300	870	3		سنگ سخت

#### ۴- نتایج و بحث

عدم چسبیدن سوند به دیواره چاه باعث ایجاد خطا می شود. فاصله دورافت باید حتی المقدور کم باشد تا نتایج بهتری به دست آید.

شیب لایه ها ممکن است در برآورد دقیق سرعت ها تاثیر نامطلوب داشته باشد، البته این تاثیر در سرعت موثر کم تر است. به طور کلی در نحوه تولید امواج برشی باید دقت کافی به عمل آورده و استانداردهای لازم رعایت شود.

#### ۶- نتیجه گیری

در این مطالعه، سه لایه مجزا در هر دو گمانه شناسایی شده که ویژگی های مکانیکی متفاوتی بر اساس سرعت های امواج فشاری (Vp) و برشی (Vs) از خود نشان می دهند. نسبت های پواسون محاسبه شده برای لایه ها در گمانه اول به ترتیب حدود ۰,۳۱، ۰,۱۵ و ۰,۱۶ است که نشان دهنده ویژگی های مشابه با خاک های نرم و سفت تر است. برای گمانه دوم، نسبت های پواسون به ترتیب ۰,۰۴، ۰,۴۵ و ۰,۴۷ محاسبه شده که حاکی از وجود مواد سفت تر در لایه اول و خاک های اشباع شده در لایه های دوم و سوم است. این نتایج به درک بهتر رفتار الاستیک مواد و وضعیت لایه های زیرزمینی کمک می کند.

سرعت مؤثر امواج P و S از سطح تا عمق گمانه یکم، به ترتیب حدود ۱۴۰۰ و ۸۰۰ متر بر ثانیه برآورد شده است. بر اساس این سرعت ها، محل گمانه یکم در گروه شماره I استاندارد ۲۸۰۰ ایران (آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زمین لرزه) شماره قرار می گیرد. همچنین سرعت مؤثر امواج P و S از سطح تا عمق در گمانه دوم به ترتیب برابر ۱۱۷۰ و ۳۱۰ متر بر ثانیه برآورد شده است. بر اساس نتایج حاصل، محل گمانه یکم در گروه شماره I استاندارد ۲۸۰۰ ایران (آیین نامه طراحی ساختمان ها در برابر زمین لرزه) و گمانه دوم در گروه شماره III این استاندارد قرار می گیرد.

بر اساس مطالعات انجام شده در محل گمانه شماره یک، سه لایه شناسایی شده است. ضخامت لایه اول تقریباً ۱ متر تخمین زده شده و سرعت امواج فشاری (Vp) و برشی (Vs) به ترتیب ۳۶۰ و ۱۹۰ متر بر ثانیه است. ضخامت لایه دوم حدود ۱,۵ متر بوده و نتایج اندازه گیری نشان دهنده سرعت های (Vp) و (Vs) معادل ۵۰۰ و ۳۲۰ متر بر ثانیه است. همچنین، لایه سوم تا عمق بیش از ۱۷ متر ادامه دارد و سرعت های (Vp) و (Vs) در این لایه به ترتیب ۱۴۳۰ و ۹۰۰ متر بر ثانیه برآورد می شود.

همچنین در گمانه شماره ۲ نیز سه لایه شناسایی شده است. ضخامت لایه اول حدود ۱ متر است و سرعت امواج فشاری (Vp) و برشی (Vs) در این لایه به ترتیب ۳۹۰ و ۲۷۰ متر بر ثانیه برآورد شده است. ضخامت لایه دوم ۷,۵ متر می باشد و سرعت های Vp و Vs در این لایه به ترتیب ۹۵۰ و ۲۸۰ متر بر ثانیه تخمین زده شده اند. همچنین، لایه سوم با ضخامت حدود ۴,۵ متر از ژرفای حدود ۸,۵ تا ۱۳ متر ادامه دارد و سرعت های Vp و Vs در آن به ترتیب ۱۷۰۰ و ۳۸۰ متر بر ثانیه برآورد شده است.

#### ۵- محدودیت ها و راهکارهای پیشنهادی

در این مطالعه، استفاده از روش لرزه نگاری درون گمانه ای به منظور تعیین ضرایب دینامیکی با محدودیت های ذاتی مواجهه است که می تواند بر نتایج به دست آمده تأثیر گذار باشد. از جمله این محدودیت ها می توان به موارد زیر اشاره کرد:

در پاره ای از موارد ممکن است به علت ضربات چکش، گمانه ریزش کند و افزون بر از دست دادن گمانه، سوند هم داخل چاه گیر کند.

## ۷- تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشد.

## ۸- قدردانی

از داوران محترم برای نظرهای دقیق و بازخوردهای سازنده‌ای که به بهبود و ارتقاء کیفی این مقاله کمک شایانی کردند، صمیمانه تشکر میکنیم. همچنین از سردبیر محترم به خاطر حمایت‌ها و راهنمایی‌های مفیدی که در طول فرایند بازبینی انجام دادند، سپاسگزاریم.

## ۹- منابع

- seismic surveys for geotechnical engineering in karst: some practical examples, *Geosciences*, 10(10), pp. 406.
- [6] Peng, C., Cheng, C. H., and Toksöz, M. N.; 1993; Borehole Effects On Downhole Seismic Measurements, *Geophysical Prospecting*, 41(7), pp. 883-912.
- [7] Yilmaz, O., Eser, M., and Berilgen, M.; 2009; Applications of engineering seismology for site characterization, *Journal of Earth Science*, 20(3), pp. 546-554.
- [8] Omnes, G.; 1990; Experimental study of the coupled cord downhole seismic source, In *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1990*, pp. 148-152. Society of Exploration Geophysicists.
- [9] Regina, G., Ausilio, E., Dente, G., Zimmaro, P.; 2021; A critical overview of geophysical investigation and laboratory test results used in the seismic re-evaluation of the Farneto del Principe dam in Italy, 6th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterization, ISC'6, Budapest (Hungary), September 7-11, pp.
- [10] Mares, S. (1984). *Introduction to applied geophysics*. Springer Science & Business Media.
- [۱۱] کمیته دائمی بازنگری آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله؛ ۱۳۷۸؛ «آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله استاندارد ۲۸۰۰».
- [12] PASĂRE, M. (2017). *Practical Method for Determining the Dynamic Coefficient. Fiability & Durability/Fiabilitate si Durabilitate*, (1)
- [13] Das, B. M., & Sobhan, K. (1990). *Principles of geotechnical engineering*.
- [1] Ramazi, H.; 2023; *Engineering Seismic*, Amir Kabir University Press, Tehran, 3rd ed., Paper Page.
- [2] Maleki, Sh., Ramazi, H.R., Gholami, R., and Sadeghzadeh, F.; 2015; Application of seismic attributes in structural study and fracture analysis of DQ oil field, Iran, *Egyptian Journal of Petroleum*, 24, pp. 119-130.
- [3] Win-Gee, H., Huang, B. S., Wang, J. H., Kou-Cheng, C., Kuo-Liang, W., Tsao, S., and Chen, C. H.; 2010; Seismic Observations in The Taipei Metropolitan Area Using The Downhole Network, *TAO: Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences*, 21(3), pp. 6.
- [4] Malehmir, A., Durrheim, R., Bellefleur, G., Urosevic, M., Juhlin, C., White, D. J., and Campbell, G.; 2012; Seismic methods in mineral exploration and mine planning: A general overview of past and present case histories and a look into the future, *Geophysics*, 77(5), pp. WC173-WC190.
- [5] Bačić, M., Librić, L., Kačunić, D. J., and Kovačević, M. S.; 2020; The usefulness of