Kharazmi University

Journal of Engineering Geology

Journal home page https://jeg.khu.ac.ir

OPEN ACCESS

Online ISSN 2981-1600

Investigating the intrinsic and engineering characteristics affecting the ultrasonic waves velocity and presenting relevant correlations of Tabriz Neogene argillaceous-marly rocks

Nazila Dadashzadeh[1], Morteza Hashemi[2]✉, Ebrahim Asghari-Kaljahi[3], Akbar Ghazi-Fard[4]

1. Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran. E-mail: naziladadashzadeh95@gmail.com

2. Associate professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran. E-mail: m-hashemi@sci.ui.ac.ir

3. Associate professor, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran. E-mail: e.asghari@tabrizu.ac.ir

4. Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran. E-mail: a.ghazifard@sci.ui.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 16 April 2024
Accepted 20 May 2024

Keywords:
Soft Argillaceous-marly rock, Mechanical behavior, Petrographic properties, Compression wave velocity, Shear strength parameters, Fissure index.

ABSTRACT

The urban development of Tabriz faces numerous geological and engineering challenges due to the presence of Neogene argillaceous-marly rocks. These rocks exhibit low mechanical strength and bearing capacity, as well as high deformability. This study aims to analyze these rocks and establish practical correlations among their petrographic, physical, and mechanical properties, alongside ultrasonic test results. These correlationscan help estimate uniaxial compressive strength (UCS), compression wave velocity (Vp), and elastic modulus (E). The findings indicate that argillaceous-marly samples, classified as very weak to weak rocks or hard soils with significant deformability, exhibit low compression and shear wave velocities. These samples are predominantly found in yellow, olive green, gray to dark gray, and brown colors throughout the city. The study reveals significant linear relationships between physical properties, mineralogical composition, UCS, and E with seismic wave velocity. Notably, there is a strong correlation exists between compression wave velocity and uniaxial compressive strength, shear strength parameters, cement content, and mineralogical composition in these rocks. These relationships suggest that mineralogy, porosity, density, and slake durability index are key factors influencing seismic wave velocity. Additionally, the variations in textural and microstructural diversity of argillaceous-marly-marly samples contribute to unpredictable mechanical behavior, which can pose potential hazards. Furthermore, a qualitative fissure index (I_Q) was developed usingthe P-wave velocity of the samples to classify them into categories of high fissurability.

Introduction

Argillaceous rocks are the most abundant type of sedimentary rock, constituting about one-third of all rocks on Earth. While primarily composed of clay minerals, the term "argillaceous" encompasses a broader range of rocks, including lutite, mudstone, argillite, claystone, siltstone, mudstone, shale, and marl (Kanji, 1998). These rocks are mainly siliceous detrital formations, consisting of silt and clay-sized particles, and contain significant amounts of cement, such as carbonate, silica, and iron oxide. The mineralogy of argillaceous rocks is influenced by the sedimentary basin and the conditions of the sedimentary environment. Soft argillaceous rocks exhibit several undesirable properties, including low strength, fracturing, subsidence, high compressibility, and rapid weathering.

Cite this article: Dadashzadeh, N., Hashemi, M., Asghari-Kaljahi, E., Ghazi-Fard, A. (2025). Investigating the intrinsic and engineering characteristics affecting the ultrasonic waves velocity and presenting relevant correlations of Tabriz Neogene argillaceous-marly rocks. Journal of Engineering Geology, 19 (1), 22-59. https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.1.1019691

© The Author(s).

Publisher: Kharazmi University.

DOI: https//doi.org/10.22034/JEG.2025.19.1.1019691

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

They possess an intermediate strength between hard soil and soft rock, which necessitates the use of specialized equipment for detailed examination in soft rock mechanics and soil mechanics (Calcaterra and Parise, 2010). Specifically, argillite is a fine-grained sedimentary rock composed primarily of clay particles, essentially classifying it as a mudstone. These rocks contain variable amounts of silt-sized particles, and their metamorphism can produce slate, phyllite, and pelitic schist. Marl, on the other hand, is a calcareous argillite that is less perishable than shale and mudstone due to its calcium carbonate content. The diverse mechanical properties of argillaceous rocks—such as uniaxial compressive strength, elastic modulus, Poisson's ratio, and compressibility—are a result of different cementation and diagenesis processes during sedimentation and lithification. These properties are also influenced by the rocks' petrographic characteristics. The mechanical properties of a rock are affected by its mineralogical composition, texture, microstructure, moisture content, porosity, density, and the conditions and history of diagenesis and sedimentary environment (Fereidooni et al., 2015). The strength properties of soft rocks directly relate to their textural parameters, making factors such as constituent minerals, matrix type, cement type, degree of cementation, porosity, grain boundary or type of grain contact, and microcracks are crucial in determining strength. In recent decades, many researchers have explored the relationship between textural and strength properties of rocks. Studies indicate that the percentage of quartz minerals and particle contact are positively correlated with uniaxial compressive strength (UCS). The strength of soft rocks relates closely to microstructural data and can be used for qualitative rock classification. Ultrasonic wave velocity testing is commonly employed to estimate the elastic modulus and fissure quality index of various rocks. This non-destructive testing method can be conducted on rock masses and intact rocks, both in the laboratory and in the field, and is widely used in civil engineering, geotechnical engineering, and mining projects (Knackstedt et al., 2010). The ultrasonic test pressure wave velocity (Vp) is valuable for determining the elastic and mechanical properties of rocks for various engineering applications (Sharma et al., 2011; Nefeslioglu, 2013). In laboratory settings, seismic techniques are frequently utilized to calculate the quality index, physicomechanical properties, and elastic and dynamic moduli of intact rocks, particularly when cylindrical samples are available. The microstructural analysis obtained through these methods shows good correlation with the petrographic characteristics and strength properties of the rock (Mavko et al., 2009). Ultimately, the petrographic and physical properties of rocks such as mineralogical content, density, water content, anisotropy, temperature, and the presence of pores, microcracks, and fissures are intrinsic properties that fundamentally control the engineering behavior of rocks. Consequently, the speed of ultrasonic waves in rocks is determined by these intrinsic properties. Tabriz city has long faced challenges related to rock mechanics and sustainability due to the prevalence of argillaceous-marly rocks and various types of modern and traditional construction (Fig.1). Recently, some researchers have focused on identifying the mechanical and physical properties of Neogene rocks. For the first time, this study, , aims to provide a more comprehensive understanding of how clay minerals affect resistance properties, as well as pressure and shear waves, by considering the geological properties of Neogene rocks in Tabriz. A thorough program of rock mechanics tests was conducted on 17 samples, encompassing physical parameters, mechanical parameters, and ultrasonic testing, along with detailed petrographic studies. Furthermore, univariate regression analysis was employed to investigate the correlation between the engineering properties and ultrasonic testing parameters.

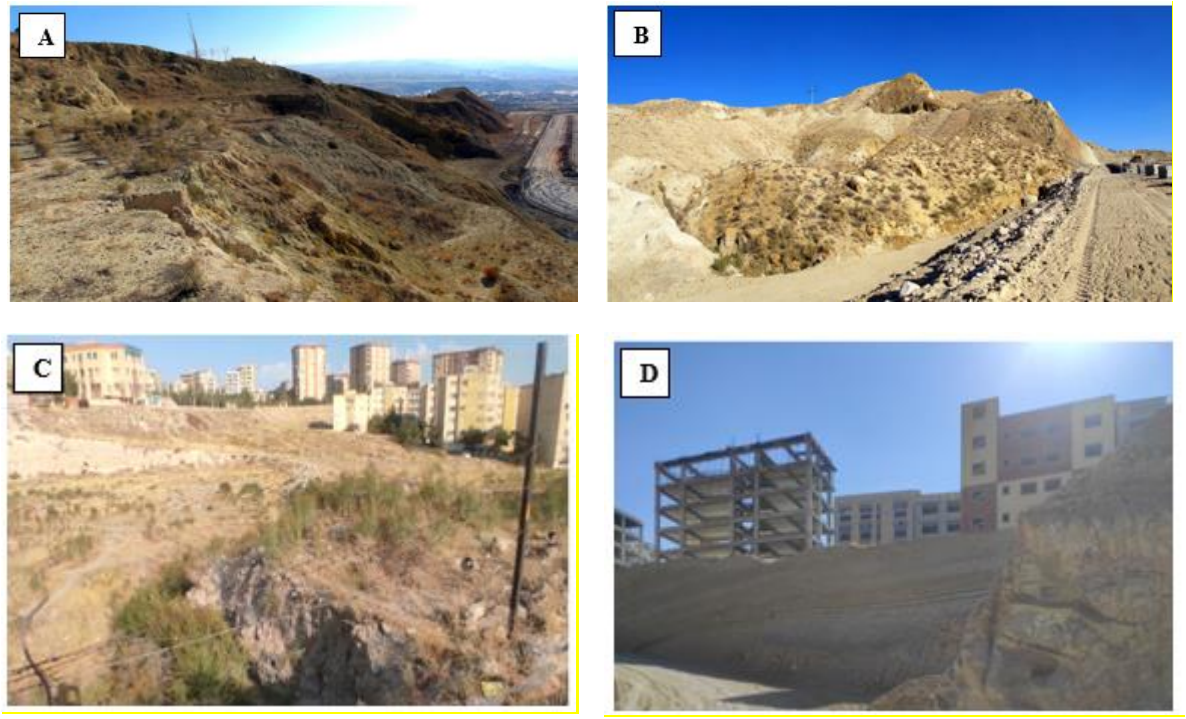


Fig.1. Images of construction on soft argillaceous-marly rocks with unfavorable geotechnical properties: A) Landslide in steep trenches in the calcareous mudstone unit in Mosalla town (view to the southeast). B) Loose mud and gypsum layers on the route of the Velayat Highway project (view to the north). C) Lignite, silt interlayers with mudstone, calcareous mudstone, and argillaceous marl with high weathering potential and very loose in the Marzdaran area (view to the southeast). D) The effects of weathering and cracking on slopes containing clay, silt, and argillaceous marl in the Mirdamad region (view to the east).

Materials and Methods.

An experimental study was conducted involving the collection of three samples from each drilling core across 17 distinct regions. The cores, with diameters of 95 mm, were extracted from depths ranging from 10 to 56 meters, where varying proportions of clay and carbonate minerals were identified. Microscopic studies on thin sections identified the petrographic and textural characteristics of the argillaceous samples (ISRM, 2007). Scanning electron microscopy (SEM) examined the shape, size, and geometric characteristics of voids within the samples. X-ray diffraction (XRD) analysis determined the major and minor minerals and the type and content of clay minerals. The calcium carbonate ($CaCO_3$) content was assessed using the Bernard method. The physical parameters evaluated including dry density (γd), porosity (n), water content (ω), and durability index (Id)—were determined according to ASTM D2216, ASTM D4404, ASTM D2974, and ASTM D6444, respectively. The uniaxial compressive strength (UCS) of rock samples was tested under uniaxial loading with natural water content, using the axial load control method based on ASTM D7012. The standard testing method for shear strength (ASTM D5607) could not be employed due to the low strength of the samples. Using a direct soil cutting device based on ASTM D3080 was also challenging, as it required crushed samples of 2 inches and risked damaging the sample structure. To preserve sample integrity, a cylindrical mold was designed to fit into the square mold of the direct cutting device (Fig.2). As well as, Ultrasonic testing was conducted on several samples according to ASTM D2845.

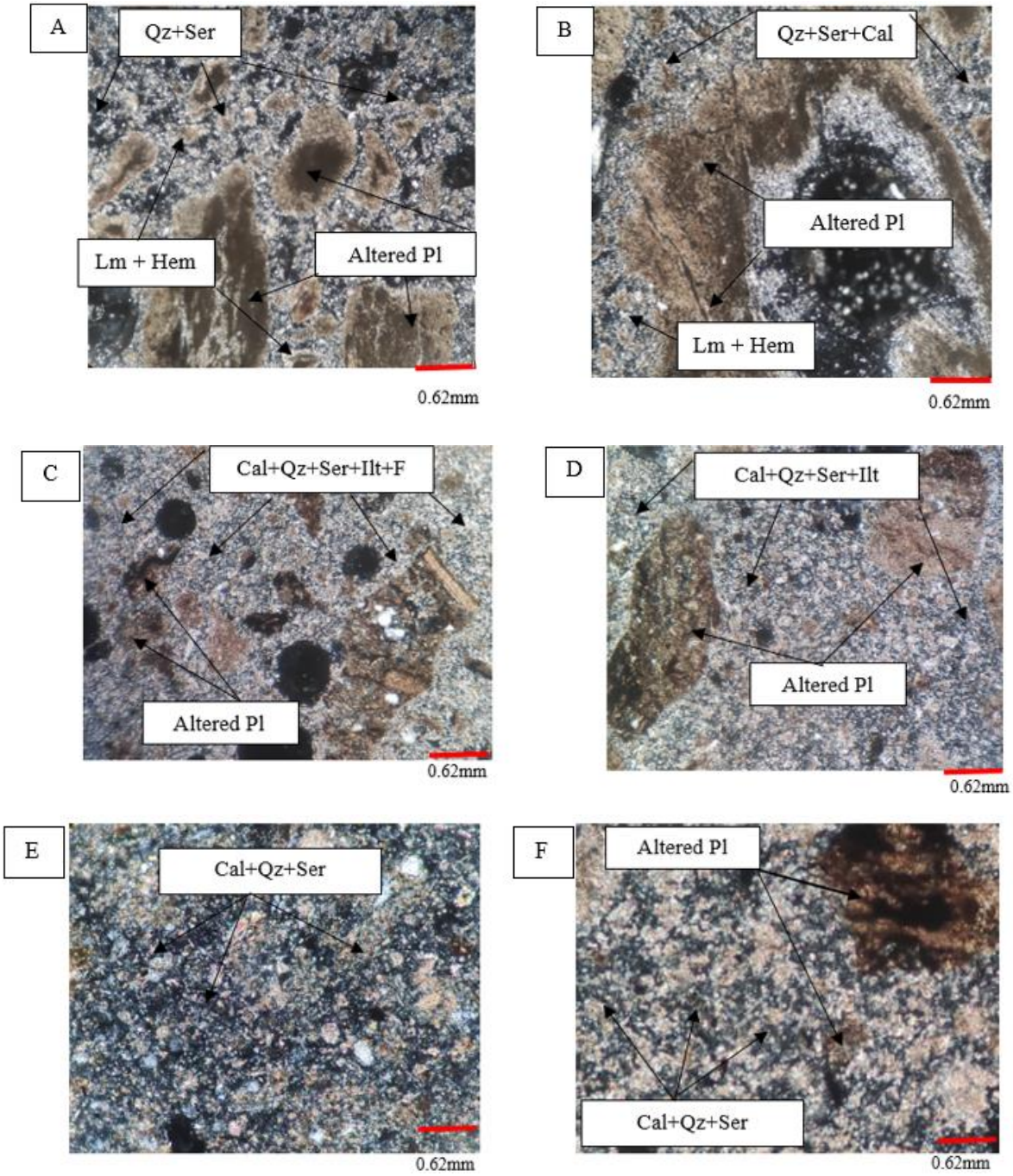
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

Fig.2. Images of the mold made and direct shear test of the samples

Results and Discussion

Microscopic examination of thin sections revealed that the matrix between the grains contained varying amounts of clay sludge, primarily composed of sericite, as well as trace quantities of quartz, calcite, and clay mud. Notably, the samples had a high carbonate content. These findings suggest that the samples are predominantly composed of quartz, feldspar, calcite, clay, and varying concentrations of sulfur dioxide and iron oxide minerals (Fig.3). Based on the results from X-ray diffraction analysis, the primary mineral types present in the samples were identified, including the specific components of the clay minerals. Quartz, carbonate minerals, clay minerals, and other minor minerals. are predominant, which elucidates the characteristic argillaceous cementation observed in these samples. Furthermore, the kaolin content within the specimens ranges from approximately 4.2% to 11.3%, while montmorillonite content ranges from 1.9% to 30.7%. The chemical composition analysis indicated that the calcium carbonate ($CaCO_3$) content ranged from 12.5% to 63%. In terms of mineralogical composition, clay minerals such as illite, smectite, montmorillonite, kaolinite, and mica were predominant, alongside other mineral phases including feldspar, calcite, and quartz. These mineral phases, especially the clay minerals, can be analyzed using SEM images. Yellow and green samples show a discrete structure with weak bonds, also evident in weak gray samples. The abundance of montmorillonite clay minerals, characterized by weak van der Waals bonds, significantly increases porosity, leading to severe subsidence when exposed to water. Gray samples exhibit a discrete aggregate structure, influenced by fibrous illite and, in some cases, kaoliniteThe SM1 sample exhibits a flocculate aggregate structure. Additionally, chlorite minerals in yellow, green, and some gray samples reduce their strength by preventing quartz cementation under incomplete diagenesis (Fig.4).

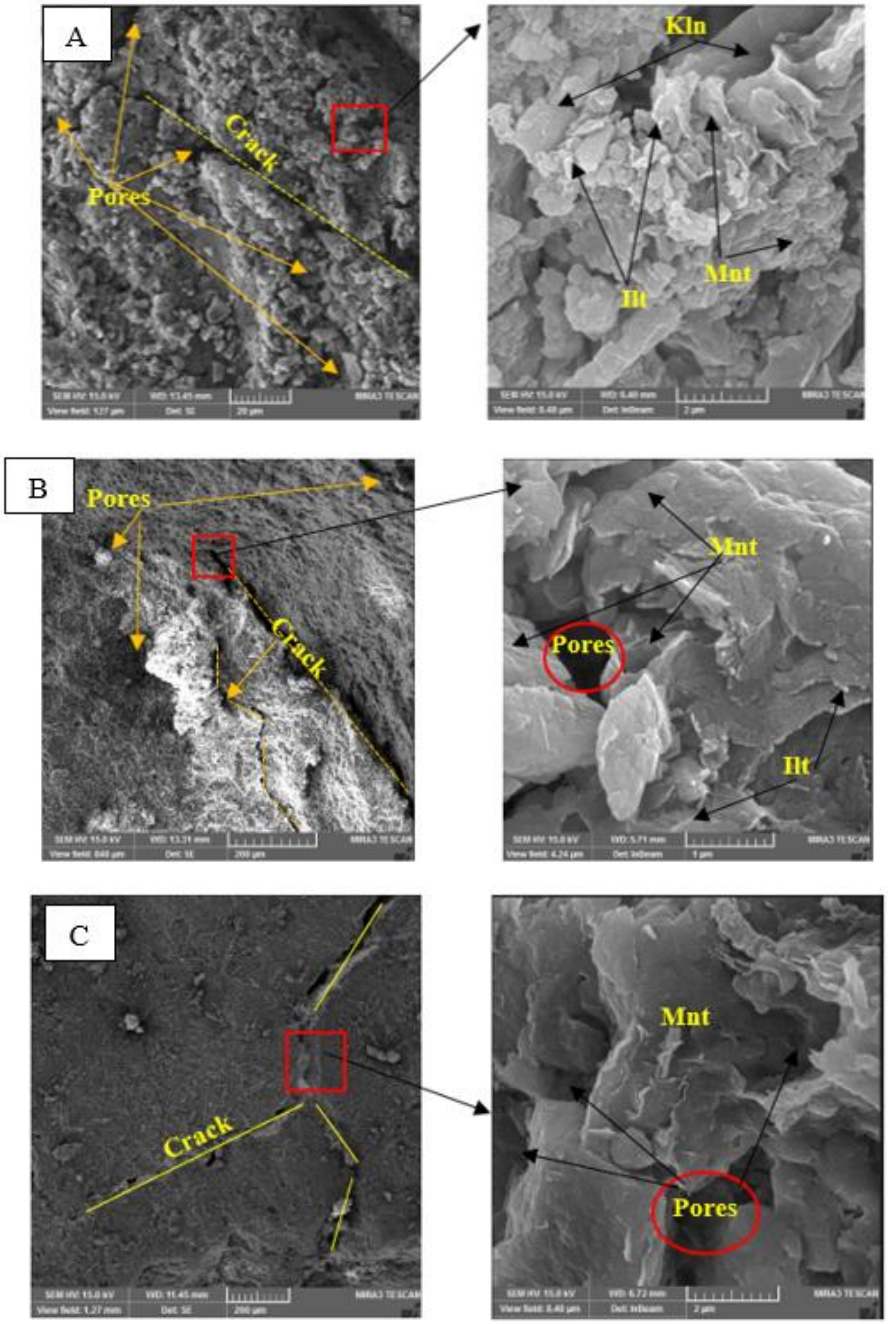
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]



*Cal:Calcite; Qz:Quartz; Ser: Sericite;Pl: Plagioclases;Ilt: Ilite; F:Fossile; Hem: Hematite; Lm: Limonite

Fig.3. Microscopic images of thin sections of some Tabriz argillaceous -marly samples: A) Yellow sample (SY2). B) Green sample (SC). C) Gray sample (SA1). D) Gray sample (SA3). E) Dark gray sample (SM1). D) Dark gray sample (SM3).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

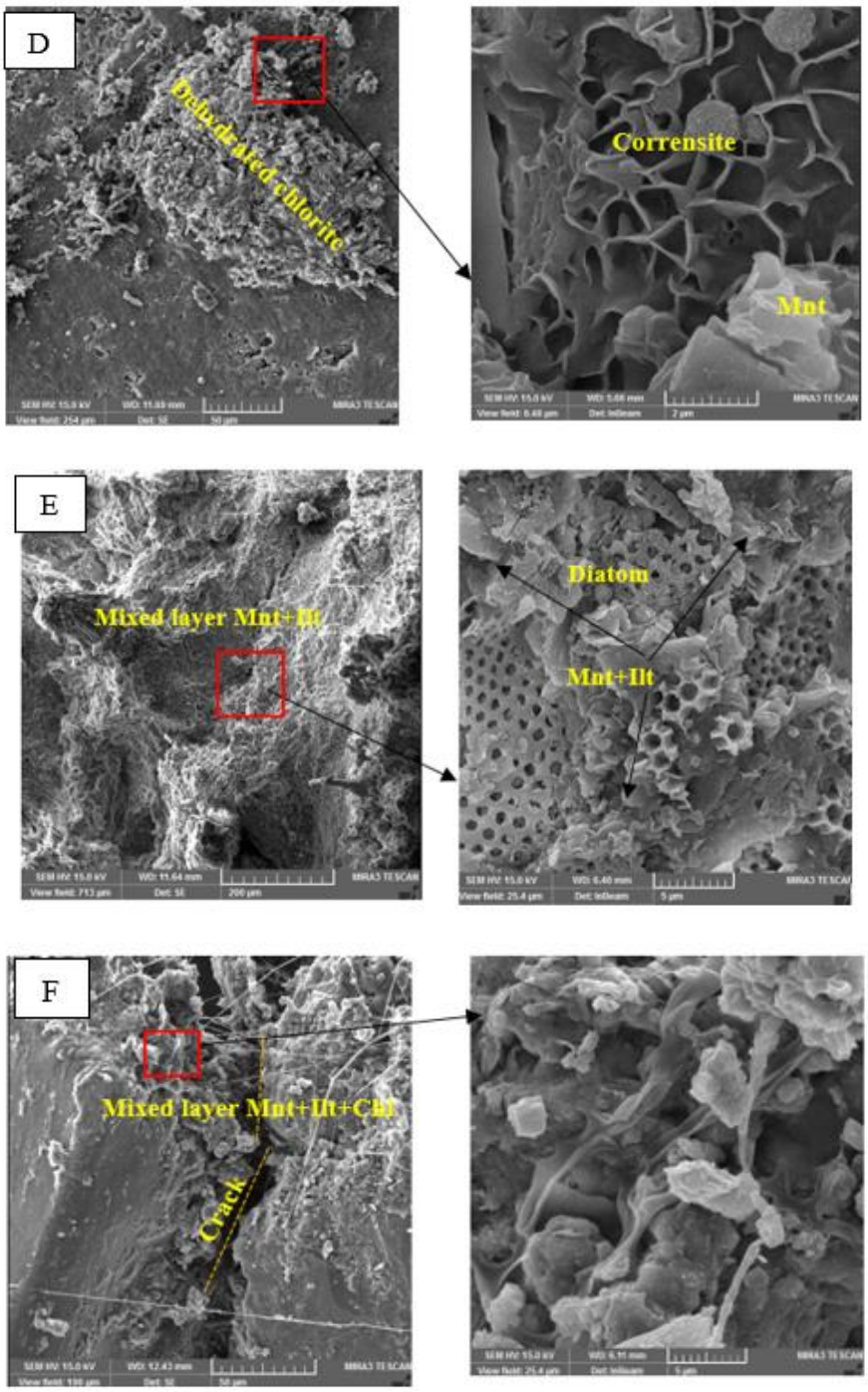
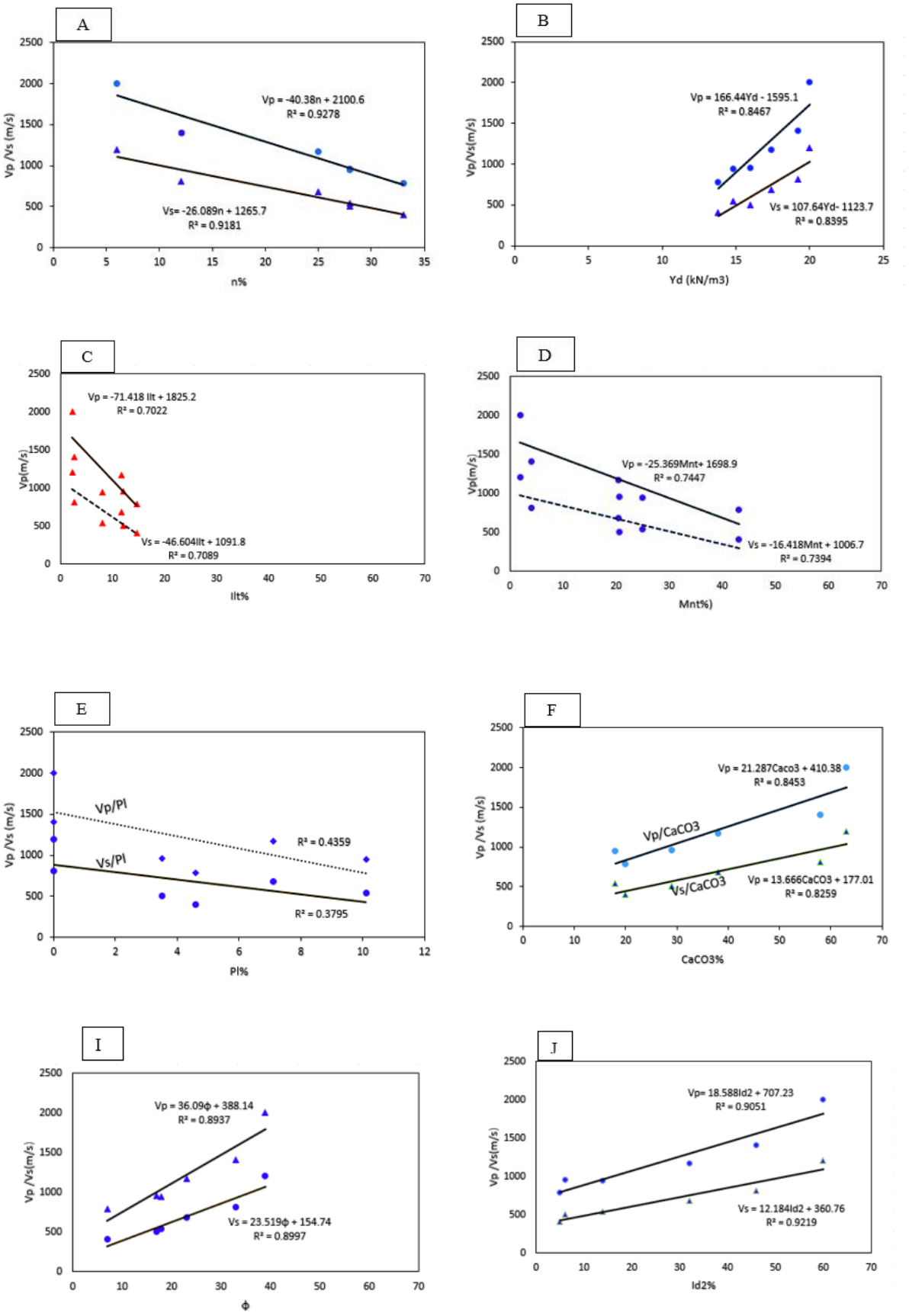


Fig.4. SEM images of some Tabriz argillaceous-marly samples: SEM images of some Tabriz argillite-marl samples: A) Dark gray sample (SM1). B) Dark gray sample (SM3). C) Yellow sample (SY2). D) Sample (SC): The regular interlayered chlorite/smectite (Corrensite) structure dominates the clay assemblage. The sample has a "honeycomb" morphology, which is characteristic of the smectite containing flat, blade-like plates similar to chlorite. E) Gray sample (SA1). F) Gray sample (SA3).

Analysis of the physical and mechanical properties of the samples is indicated that the uniaxial compressive strength (σ c) of the soft rocks ranged from approximately 0.05 to 1.3 MPa. The density (γ_d) of the samples varied between 11.0 and 20.0 kN/m³, while the maximum density (γ_m) ranged from 12.0 to 23.7 kN/m³. A comparison of these density

values reveals significant differences attributed to variations in porosity, which ranged from 6.3% to 48%. According to the classification (Anon, 1979), all the samples studied fall into the very weak category (Vs<2500m/s) in terms of shear wave velocity. The mechanical and physical properties of soft argillaceous rocks are greatly affected by the distribution of clay minerals as cements and structural particles. Research indicates that a higher clay content in the matrix is associated with a lower P-wave velocity (Yang and Hu, 2020). The distribution of clay particles significantly affects the elastic properties of argillaceous formations. Consequently, clay minerals in these rocks—unlike calcite and carbonate cements—exhibit lower strength. A high percentage of clay minerals can significantly influence diagenesis and reduce cementation in argillitic sediments that have not undergone complete diagenesis or consolidation (Sams and Andrea, 2001). Similar calculations indicate that microstructural features have significant effects on P-wave velocity. The elastic wave velocity decreases with an increase in microcracks and pores in the rock (Saxena et al., 2024). Microscopic analysis shows that dark gray samples (SM1 and SM3), with soft rock particle bonding and high calcite cement content, exhibit fewer microcracks and pores, resulting in higher seismic wave velocity and uniaxial strength. Shear strength parameters in these samples trend higher compared to yellow and green samples. Petrographic and mineralogical studies demonstrate that gray samples have higher dry density and greater ultrasonic wave velocity, attributed to a higher presence of calcium carbonate and lower amounts of montmorillonite. A strong, direct, linear relationship was found between seismic wave velocity, porosity, and dry density, with a correlation coefficient of $R^2 = 0.92$. These linear equations indicate a strong influence of porosity on wave velocity due to their high correlation coefficients. Relationships between mineralogy and seismic waves showed an R^2 value of approximately 0.70, suggesting an inverse relationship between clay mineral percentages, specifically montmorillonite and illite, and seismic wave velocity. Kaolinite, on the other hand, has a minimal impact, with a correlation coefficient of $R^2 = 0.19$. Increased calcium carbonate enhances particle bonding, thereby improving strength, physical properties, and the velocities of P and S waves. In these samples, mineralogical composition, porosity, and dry density significantly influence compression wave velocity.. Linear correlation analysis of engineering properties and seismic wave velocities identifies the parameters that have the greatest impact on seismic waves. Compressive strength, internal friction angle, cohesion, and elastic modulus exhibit strong correlations with seismic waves. Additionally, the slake durability index, which is critical to the strength of argillaceous and clay-rich rocks, correlates highly with seismic wave velocity. Porosity, dry density, and mineralogical composition (montmorillonite, illite, and calcium carbonate) are the most influential parameters on seismic wave velocity. Given the relationships between seismic wave velocity and strength parameters, these correlations are logical. Consequently, seismic wave velocity can be predicted based on these parameters, which enhances our understanding of the engineering and geological characteristics affecting the strength and stability of soft rock engineering structures. This improves predictive capabilities in geotechnical applications (Fig. 5).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

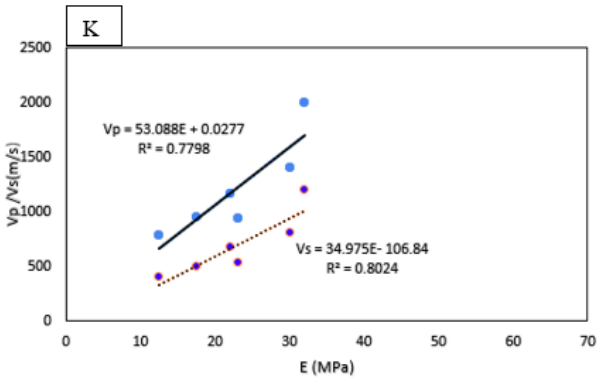


Fig.5. Correlation diagram between engineering parameters and seismic wave velocity of Tabriz argillite-marly samples: A) Correlation diagram of porosity percentage and seismic wave velocity. B) Correlation diagram of dry density and ultrasonic wave velocity. C) Correlation diagram of illite percentage and ultrasonic wave velocity. D) Correlation diagram of montmorillonite percentage and ultrasonic wave velocity. E) Correlation diagram of plagioclase percentage and ultrasonic wave velocity. F) Correlation diagram of calcium carbonate and ultrasonic wave velocity. G) Correlation diagram of UCS and ultrasonic wave velocity. H) Correlation diagram of adhesion and ultrasonic wave velocity. I) Correlation diagram of internal friction angle and seismic wave velocity. J) Correlation diagram of second cycle durability index and ultrasonic wave velocity. K) Correlation diagram of elastic modulus and ultrasonic wave velocity.

Conclusions

The analysis of experimental results revealed that several mineralogical, physical, and mechanical parameters of Neogene Tabriz argillaceous samples affect their mechanical properties, particularly seismic wave velocity in ultrasonic testing. The findings suggest that clay minerals (montmorillonite and illite) and calcium carbonate are significantly related to wave velocity and strength properties. Correlations between engineering properties and S and P wave velocities show that mineralogical indices, porosity, durability indices, and dry densities greatly influence mechanical properties, which significantly affect seismic wave velocities. Specifically, compression wave velocity increases with a higher percentage of calcium carbonate and a lower percentage of montmorillonite, illite, and feldspar. Additionally, denser samples exhibit higher wave velocity, highlighting the impact of density on wave propagation. However, these relationships are specific to Neogene rocks of Tabriz and cannot be generalized to all argillaceous rocks.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

نشریه زمین شناسی مهندسی
Journal home page https://jeg.khu.ac.ir
دانشگاه خوارزمی
دسترسی آزاد
شاپا الکترونیکی ۲۹۸۱-۱۶۰۰

بررسی ویژگی‌های سنگ‌شناسی و مهندسی موثر بر سرعت امواج فراصوت در سنگ‌های آرژیلیتی– مارنی تبریز و ارائه روابط همبستگی

نازیلا داداش‌زاده[۱]، مرتضی هاشمی[۲]✉، ابراهیم اصغری کلجاهی[۳]، اکبر قاضی‌فرد[۴]

۱. دانشجوی دکتری زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، ایران، naziladadashzadeh95@gmail.com
۲. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، ایران، m- hashemi@ sci.ui.ac.ir
۳. دانشیار، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، e.asghari@tabrizu.ac.ir
۴. استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، ایران، a.ghazifard@sci.ui.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۰۲/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۲/۳۰

کلیدواژه‌ها:
سنگ‌های آرژیلیتی– مارنی، رفتار مکانیکی، ویژگی‌های سنگ-شناسی، سرعت موج فشاری، شاخص ترک‌خوردگی.

چکیده

توسعه شهری تبریز با چالش‌های زمین‌شناسی و مهندسی زیادی همراه می‌باشد؛ چرا که ساخت و سازهای جدید در این شهر، با سنگ‌های آرژیلیتی– مارنی نئوژن مرتبط هست که دارای مقاومت مکانیکی و ظرفیت باربری پایین و همچنین تغییرشکل‌پذیری بالا می‌باشند. هدف از این مطالعه، تجزیه و تحلیل این سنگ‌ها، برای تعیین بهترین و کاربردی‌ترین همبستگی‌های ویژگی‌های سنگ شناسی، فیزیکی، مکانیکی با نتایج آزمایش فراصوت است که ممکن است برای تخمین مقاومت فشاری تک محوری (UCS)، سرعت موج فشاری Vp و مدول الاستیک E مفید باشد. این مطالعه نشان داد که سنگ‌های آرژیلیتی– مارنی، در زمره سنگ‌های بسیار ضعیف تا ضعیف و یا خاک سخت با تغییر شکل‌پذیری بسیار بالا، سرعت موج فشاری و برشی بسیار کم هستند که در رنگ‌های زرد، سبز زیتونی، خاکستری تا خاکستری تیره و قهوه‌ای در بیشتر قسمت‌های شهر رخنمون دارند. در این مطالعه، ویژگی‌های فیزیکی، کانی‌شناسی، UCS، E با سرعت امواج لرزه‌ای دارای روابط خطی معنی‌داری هستند و همبستگی قوی بین سرعت موج فشاری با مقاومت فشاری تک محوری، پارامترهای مقاومت برشی، محتویات سیمان و ترکیب کانی‌شناسی در این سنگ‌ها، وجود دارد. این روابط نشان داد که کانی‌شناسی، تخلخل، دانسیته و شاخص دوام وارفتگی، از جمله پارامترهای بسیار موثر در سرعت امواج لرزه‌ای هستند و تغییرات، تنوع بافتی و ریزساختاری نمونه‌های آرژیلیتی– مارنی باعث رفتار مکانیکی متنوع این سنگ‌ها شده است که تا حدودی غیرقابل پیش‌بینی و پیشگیری از خطرات احتمالی است. علاوه بر این نتایج، شاخص ترک‌خوردگی کیفی (I_Q) بر اساس سرعت موج P نمونه‌ها تعیین شد و نمونه‌ها در رده‌های بسیار شکاف‌دار طبقه بندی شدند.

مقدمه

سنگ‌های آرژیلیتی (Argillaceous rock) از فراوان‌ترین سنگ‌های رسوبی بوده و حدود یک سوم از تمام سنگ‌های سطح زمین را تشکیل می‌دهند. اگرچه سنگ آرژیلیتی، عمدتا از کانی‌های رسی تشکیل شده است اما معنای وسیع-تری دارد و معادل اصطلاحاتی مانند لوتیت (Lutite) یا گلسنگ است و سنگ‌هایی مانند آرژیلیت، سنگ رسی، سیلتستون (Siltstone) گل سنگ، شیل، شیل رسی، یا مارن را در برمی‌گیرد (Kanji, 1998). آنها عمدتاً سنگ‌های سیلیسی آواری هستند که شامل ذراتی در اندازه سیلت و رس هستند و حاوی مقادیر قابل‌توجهی از سیمان (کربناته، سیلیس، اکسید آهن و غیره) می‌باشند. کانی‌شناسی سنگ-های آرژیلیتی بر اساس حوضه رسوبی و شرایط محیط

استناد: داداش‌زاده، ن.، هاشمی، م.، اصغری کلجاهی، ا.، قاضی‌فرد، ا. (۱۴۰۴). بررسی ویژگی‌های سنگ‌شناسی و مهندسی موثر بر سرعت امواج فراصوت در سنگ‌های آرژیلیتی- مارنی تبریز و ارائه روابط همبستگی. مجله زمین شناسی مهندسی، ۱۹ (۱)، ۲۲-۵۹. https://doi.org/10.22034/JEG.2025.19.1.1019691

ناشر: دانشگاه خوارزمی.
© نویسندگان.

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

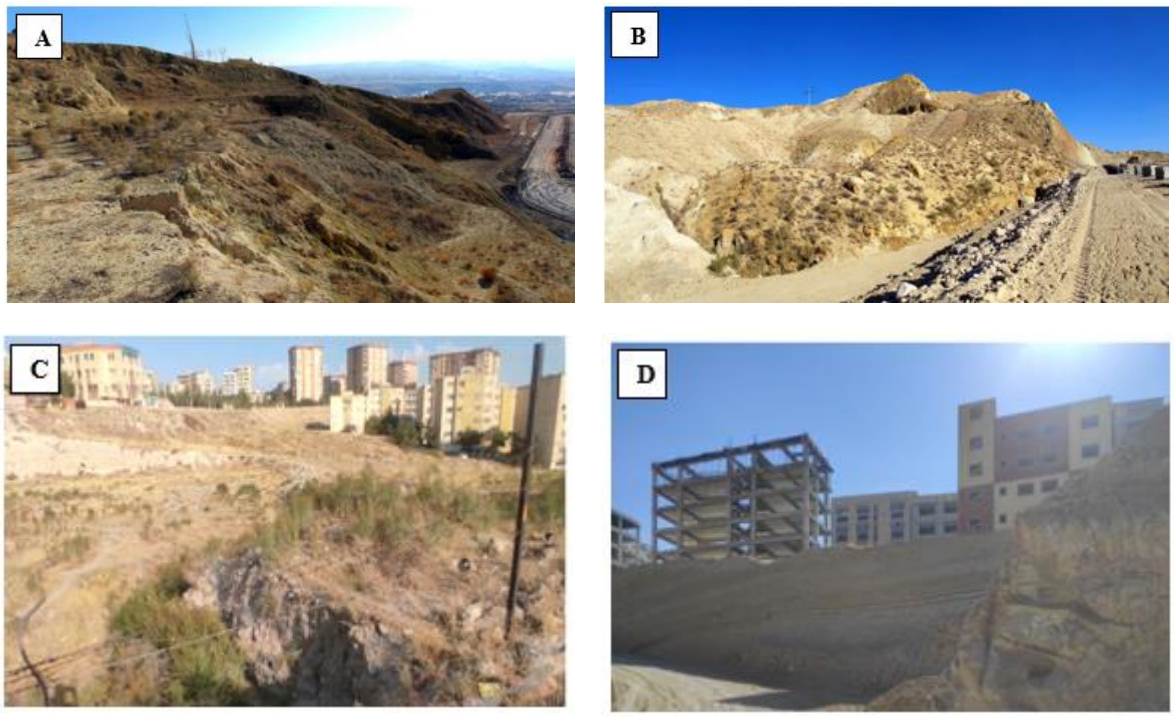
رسوبی کنترل می‌شود. سنگ‌های نرم آرژیلیتی علاوه بر رفتارهای نامطلوبی مانند مقاومت کم، گسیختگی، نشست، تراکم‌پذیری بالا، هوازدگی سریع و ...، دارای مقاومت متوسطی بین خاک سخت و سنگ نرم هستند؛ از این‌رو برای بررسی دقیق نیاز به تجهیزات مکانیک سنگ بسیار نرم و تجهیزات مکانیک خاک دارند (Calcaterra and Parise, 2010). در واقع آرژیلیت، یک سنگ رسوبی ریزدانه است که عمدتاً از ذرات رس تشکیل شده است. سنگ‌های آرژیلیتی اساساً گِلسنگ هستند. آنها حاوی مقادیر متغیری از ذرات، در اندازه‌های سیلت هستند و دگرگونی آرژیلیت‌ها باعث ایجاد اسلیت (Slate)، فیلیت (Phyllite) و شیست پلیتی (Pelitic Schist) می‌شود. اما مارن در واقع یک سنگ آرژیلیتی آهکی است که بدلیل وجود کربنات‌کلسیم در ترکیب خود، دارای زوال‌پذیری کمتری نسبت به شیل و گلسنگ است. با توجه به فرآیندهای مختلف سیمان‌شدگی و دیاژنز در طول رسوب‌گذاری و تاریخچه سنگ‌شدگی سنگ‌های آرژیلیتی، از نظر ویژگی‌های مکانیکی مانند مقاومت فشاری تک محوری، مدول الاستیک، نسبت پواسون و تراکم‌پذیری متنوع بوده و به ویژگی‌های سنگ‌شناسی نیز بستگی دارد. چراکه ویژگی‌های مکانیکی یک سنگ تحت تأثیر ترکیب کانی‌شناسی، بافت، ریزساختار، محتوای رطوبت، تخلخل، دانسیته، شرایط و تاریخچه دیاژنز و محیط رسوبی می‌باشد (Fereidooni et al., 2015). ویژگی‌های مقاومتی سنگ‌های نرم در ارتباط مستقیم با پارامترهای بافتی آنها است. بنابراین ویژگی‌های بافتی به‌ویژه کانی‌های تشکیل‌دهنده، نوع ماتریکس، نوع سیمان و درجه سیمان‌شدگی، تخلخل، مرز دانه یا نوع تماس دانه‌ها و ریزترک‌ها عوامل مهم و موثر در ویژگی‌های مقاومتی بشمار می‌آیند. در دهه‌های اخیر محققان بسیاری بر روی ارتباط مابین ویژگی‌های بافتی و مقاومتی سنگ‌ها تمرکز نموده‌اند. درصد کانی‌های کوارتز و تماس ذرات باهم دارای همبستگی مثبت با مقاومت فشاری تک محوری (UCS) می‌باشند. مقاومت سنگ نرم با داده‌های ریزساختاری در ارتباط بوده و می‌تواند برای طبقه‌بندی کیفی سنگ‌ها مورد استفاده قرار گیرد. آزمایش سرعت امواج فراصوت، امروزه بطور معمول برای تخمین مدول الاستیک و شاخص کیفیت ترک‌خوردگی (Fissure index) سنگ‌های مختلف استفاده می‌شود. این آزمایش که می‌تواند برای توده سنگ و سنگ دست نخورده هم در آزمایشگاه و هم در صحرا انجام شود و یک روش آزمایشی غیرمخرب رایج است که در پروژه‌های عمرانی، ژئوتکنیکی و معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد (Knackstedt et al., 2010). سرعت موج فشاری آزمایش فراصوت (Vp) یک سنگ برای تعیین ویژگی‌های الاستیک و خواص مکانیکی سنگ برای کاربردهای مهندسی مختلف مفید است (Sharma et al., 2011; Nefeslioglu, 2013). در آزمایشگاه، روش‌های لرزه‌ای اغلب برای محاسبه شاخص کیفیت، خواص فیزیکی-مکانیکی و مدول‌های الاستیک و دینامیکی سنگ‌های دست نخورده استفاده می‌شود، به خصوص زمانی‌که نمونه‌های استوانه‌ای موجود باشد؛ آنالیز ریزساختاری بدست‌آمده از این روش و مقایسه با ویژگی‌های پتروگرافی سنگ، همبستگی خوبی با خواص مقاومتی آنها نشان می‌دهد (Mavko et al., 2009). ویژگی‌های پتروگرافی و فیزیکی سنگ‌ها مانند محتوای کانی‌شناسی، دانسیته، محتوای آب، ناهمسانگردی، درجه حرارت و وجود منافذ، ریز ترک‌ها و شکاف‌ها (تخلخل) در واقع ویژگی ذاتی هستند که رفتار مهندسی سنگ را بطور اساسی کنترل می‌کند. بر این اساس مشخص شده است که سرعت امواج فراصوت سنگ‌ها به ویژگی‌های ذاتی بستگی دارد. رودریچ و همکاران (Ruedrich et al., 2001)، روش‌هایی را برای درک هر چه بهتر تأثیرپذیری رفتار مکانیکی سنگ‌ها از ویژگی‌های ریزساختاری ارائه نمودند. آنها بیان کردند که ریزترک‌ها و تغییرات مرز بین ذرات و کانی‌های رسی، مقاومت سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهد و ممکن است

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

به عنوان صفحات ضعیفی عمل کنند که جهت ترک و شکست را کنترل می‌کند. ونگ و همکاران (Wang et al., 2009)، رابطه مشخصی بین درصد کانی کوارتز و مقاومت برشی در سنگ‌های نرم را مورد بررسی قرار دادند و مقدار و توزیع کربنات کلسیم تاثیر معنی‌دار بر مقاومت و مدول الاستیک سنگ‌های نرم دارد، همچنین مقاومت سنگ با سیمان سیلیسی افزایش می‌یابد، برعکس با افزایش کانی‌های رسی مقاومت کاهش می‌یابد. پاپالاردو (Pappalardo, 2015)، رابطه مابین ترکیب کانی‌شناسی با مقاومت فشاری تک محوری و مقاومت برشی در سنگ‌های نرم تعیین نمودند. تأثیر منفی درصد کانی مونت‌موریونیت بر روی دو پارامتر مهندسی سرعت موج فشاری و مقاومت برشی، نیز از نتایج این تحقیق بود. سینگ و همکاران (Singh et al., 2017) ، دریافتند که تماس ذرات در سنگ‌های کربناته و محتوای کانی رسی همبستگی خوبی با مقاومت نهایی و سرعت امواج فراصوت دارد. یانگ و هو (Yang and Hu, 2020)، پیشنهاد کردند که سرعت امواج فراصوت تحت تاثیر عوامل متعددی شامل ترکیب کانی‌شناسی، بافت، تراکم، تخلخل، آب منفذی، هوازدگی و ریزترک‌ها قرار دارد. سرعت موج فشاری همبستگی مثبت قوی با دانسیته خشک، شاخص دوام وارفتگی و افزایش درصد کوارتز در سنگ‌های بسیار نرم دارد. هان و همکاران (Han et al., 2020)، به بررسی روابط سرعت موج فشاری و ویژگی‌های مکانیکی پرداختند. پارامترهای مختلف فیزیکی سنگ‌های رسوبی همبستگی قوی با سرعت موج فشاری و برشی، مدول الاستیک دارد. وانگ و همکاران (Wang et al., 2023)، همبستگی سرعت امواج فراصوت و عوامل ذاتی مانند سنگ‌شناسی، ساختار منافذ و عوامل خارجی مانند فشار و دما را بررسی کردند و در نهایت، روابط پیشنهادی برای محاسبات مقاومتی ارائه کردند. استدمولر و همکاران (Stadmuller et al., 2023)، به بررسی روابط بین ویژگی‌های پتروگرافی و سرعت امواج فراصوت در سنگ‌های کربناته پرداختند و دریافتند که تحلیل ریزساختاری در این سنگ‌ها می‌تواند تخمینی صحیحی از سرعت امواج فراصوت و شاخص‌های مقاومتی در دسترس محققان قرار دهد. جمشیدی و سوسا (Jamshidi and Sousa, 2024)، از سرعت امواج فراصوت، به عنوان یک آزمایش غیرمخرب، کم‌هزینه، سریع و ارزان برای ارزیابی غیرمستقیم ویژگی‌های مقاومتی سنگ‌های نرم استفاده کرده و معادلاتی را برای پیش‌بینی مقاومت کششی و مقاومت فشاری تک‌محوری بدست آوردند. صبری و همکاران (Sabri et al., 2025)، برای ارزیابی منطقه‌ای گسترده مقاومت توده سنگ بر اساس روش‌های غیرمستقیم تخمین مقاومت فشاری تک محوری، روش سرعت امواج فراصوت را بدلیل همبستگی خوب با ویژگی‌های فیزیکی و کیفیتی پیشنهاد کردند. شهر تبریز با توجه به فراوانی سنگ‌های آرژیلیتی- مارنی عهد حاضر و انواع ساخت و سازهای مدرن و سنتی همواره با مباحث مکانیک سنگی و پایداری روبرو بوده است (شکل ۱). در همین راستا اخیراً برخی از محققین سعی در شناسایی ویژگی های مکانیکی و فیزیکی سنگ‌های نئوژن کردند. صدرکریمی و همکاران (Sadrekarimi et al., 2006)، محمدی و ذکری (Mohamadi and Zekri, 2006)، سلیمانی قره‌گل (Soleymani Qaragol, 2007)، تأثیر ویژگی‌های فیزیکی را بر پارامترهای مکانیکی در منطقه‌ای از شرق تبریز، بررسی کردند. نتایج نشان داد که پارامترهایی مانند محتوای آب، تخلخل، شاخص روانی و ترکیب کانی‌شناسی مقاومت فشاری تک محوری را کنترل می‌کنند. علاوه بر این، مدول تغییر شکل و مقادیر مقاومت فشاری افزایش معنی‌داری را با افزایش عمق نشان داد. فائقی (Faeghi, 2013) و جلالی میلانی و همکاران (Jalali-Milani et al., 2017)، دریافتند که درجه تحکیم در مارن

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

خاکستری بیشتر از مارن‌های سبز و زرد است، که عمدتاً بدلیل محتوای کربنات کلسیم بالا در مارن‌های خاکستری است.



شکل ۱. تصاویری از ساخت و ساز بر روی سنگ‌های نرم آرژیلیتی- مارنی با ویژگی‌های نامطلوب ژئوتکنیکی: A) لایه‌های گل و گچی سست میزبان مسیر پروژه اتوبان ولایت (دید به سمت شمال)، B) لغزش و ریزش در ترانشه‌های پرشیب در واحد گلسنگ آهکی در شهرک مصلی بـه لغـزش و فروریختگی (دید به جنوب شرق). C) آثار واضح هوازدگی، شکفتگی در دامنه‌های حاوی مصالح رس، سیلت و مارن آرژیلیتی در منطقه میرداماد (دید به سمت شرق). D) میان‌لایه‌های لیگنیت، سیلتی به همراه گلسنگ، گلسنگ آهکی و مارن آرژیلیتی با پتانسیل بالای هوازدگی و بسیار سست در منطقه مرزداران (دید به سمت جنوب شرق).

Fig.1. Images of construction on soft argillaceous-marly rocks with unfavorable geotechnical properties: A) Landslide in steep trenches in the calcareous mudstone unit in Mosalla town (view to the southeast). B) Loose mud and gypsyum layers on the route of the Velayat Highway project (view to the north). C) The effects of weathering and slaking on slopes containing clay, silt, and argillaceous marl in the Mirdamad region (view to the east). D) Lignite, silt interlayers with mudstone, calcareous mudstone, and argillaceous marl with high weathering potential and very loose in the Marzdaran area (view to the southeast).

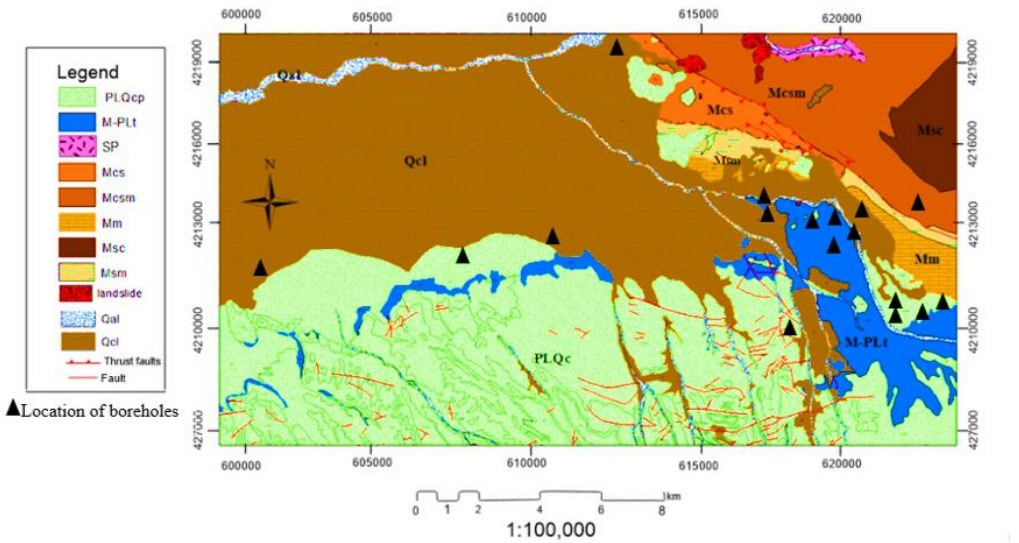
با توجه به مطالعه محدود و منطقه‌ای سنگ‌های نئوژن تبریز از نظر ویژگی‌های فیزیکی، مکانیکی و پتروگرافی، عدم شناخت دقیق و ارتباط این ویژگی‌ها با یکدیگر، نبود نمونه-های دست‌نخورده و استفاده از نمونه‌های بازسازی شده در بیشتر مطالعات انجام شده، در این پژوهش برای نخستین بار با توجه به ویژگی‌های زمین‌شناسی سنگ‌های نئوژن شهر تبریز و با هدف درک کامل‌تر و دقیق‌تر تأثیر میزان کانی‌های رسی بر روی ویژگی‌های مقاومتی و امواج فشاری و برشی، برنامه جامعی از آزمون‌های مکانیک سنگی شامل پارامترهای فیزیکی، پارامتر مکانیکی و آزمون فراصوت و مطالعات دقیق پتروگرافی بر روی ۱۷ نمونه دست‌نخورده از ۱۷ نقطه مختلف شهر تبریز انجام پذیرفت. همچنین با توجه به چالش‌های تهیه نمونه سالم و دست‌نخورده از سنگ‌های نرم آرژیلیتی- مارنی، تمرکز این تحقیق بر روی روش امواج فراصوت، با

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

هدف توسعه این روش برای پیش‌بینی شاخص‌های مقاومتی سنگ‌های نرم، بجای آزمایش‌های مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت برشی، کششی و بار نقطه‌ای انجام گرفته است و در نهایت با استفاده از آنالیز رگرسیون تک متغیره و چند متغیره همبستگی و ارتباط مابین ویژگی‌های مهندسی ذکر شده با پارامترهای آزمایش فراصوت بررسی گردیده است.

زمین‌شناسی منطقه

شهر تبریز، شامل تشکیلات عهد حاضر، متشکل از سازندهای قرمز فوقانی و باغمیشه در بیشتر مناطق بخصوص بخش‌های شرقی و شمالی می‌باشد. این منطقه دارای مورفولوژی نامنظم مربوط به تاریخ زمین‌شناسی آن است. ژئومورفولوژی فعلی تبریز، حاصل فعالیت گسل‌ها، چین‌خوردگی حاصل از نیروهای تکتونیکی و فرسایش می‌باشد. گسل شمال تبریز در شمال و گسل‌های متعدد کوچکی نیز در قسمت‌های جنوبی شهر واقع شده است (Reiben, 1935). منطقه تبریز دارای توپوگرافی تپه ماهوری و با پستی و بلندی‌های زیادی همراه است که حاصل عملکرد فعالیت گسلی می‌باشد و حضور شکستگی‌ها در رسوبات جوان حاکی از فعالیت شدید تکتونیکی می‌باشد. با توجه به تنوع رسوبات دشت تبریز، سنگ‌ها و رسوبات محدوده خود شهر تبریز دارای گستردگی زمانی چندانی نبوده و واحدهای تشکیل‌دهنده آن عمدتا مربوط به سنوزوئیک و کواترنری می‌باشند. رسوبات قرمز رنگ میوسن (سازند قرمز فوقانی)، در اطراف تبریز شامل ضخامت بسیار زیادی از ماسه سنگ، مارن و کنگلومرا می‌باشد. این مجموعه حاکی از یک محیط رسوبی آشفته است. اغلب مناطق به وسیله رسوبات آبرفتی جوان پوشیده شده است ولی حفاری‌های انجام‌شده نشان داده که در زیر رسوبات آبرفتی مذکور، طبقات مارنی ماهی‌دار و لایه‌های مارنی خاکستری رنگ متعلق به سازند باغمیشه وجود دارند که در مناطق مختلفی از شهر اعم از منطقه شرق و به‌طور کلی شمال شرق تبریز رخنمون دارد (McKenzie, 1972). سنگ‌شناسی سازندهای منطقه در جدول ۱ آورده شده است. شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه و نقاط نمونه برداری را نشان می‌دهد.



Q^{al}: River channel deposits
Q^{cl}: Tabriz plain deposits mainly clay and marl
PLQ^{c}: Conglomerate, poorly consolidated
$M\text{-}PI^{t}$: Ash-tuff (Fish Beds) tuffaceous sandstone, marl, conglomerate with diatomite and pumice layers
M^{sc}: Red conglomerate with alternation of sandstone and red marl
M^{m}: Gypsiferous marl, mudstone, sandstone, fresh-water limestone, (Lignite Beds)

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

M^{sm}: Thick to medium bedded sandstone with marl beds
M^{cs}: Conglomerate, sandstone, interbedded with siltstone and marl
M^{br}: Breccia, tuff-breccia, violet and purple red beds of conglomerate, sandstone, mudstone and marl
SP: Spilitic basalt, dolerite, gabbro

شکل ۲. نقشه زمین‌شناسی شهر تبریز، ۱:۱۰۰۰۰۰ (National Geological and Mineral Exploration Organization, 1993).

Fig.2 The geological map of the study area, scale: 1:100000 (National Geological and Mineral Exploration Organization, 1993)

جدول ۱. مشخصات کلی سازندهای مهم منطقه مورد مطالعه.

Table 1. General characteristics of important formations of study region.

سازند	سن زمین‌شناسی	سنگ‌شناسی
قرمز فوقانی (URF)	میوسن	شامل ماسه سنگ، مارن، سیلتستون و کنگلومرا با لایه‌های متناوب نمک و گچ
باغمیشه (Baghmisheh)	میوسن - پلیوسن	لایه های مارن- شیل خاکستری تا سبز تیره و فسیل دیاتومیت
لایه ماهی‌دار (Fish bed)	پلیوسن	مارن، خاکستر آتشفشانی و دیاتومیت و فسیل ماهی
آبرفتهای کواترنری (Quaternary alluviums)	کواترنر	خاک، سنگ‌های هوازده سنگ‌های کانال رودخانه، مارن، تراس جوان و سنگ‌های دشت تبریز.

مواد و روش‌ها

۱۷ نمونه مختلف، از بخش‌های مختلف شهر تبریز مورد مطالعه قرار گرفته است. دلیل انتخاب این گونه نمونه‌ها؛ تنوع ویژگی‌های ژئوتکنیکی و گستردگی این سنگ‌های آرژیلیتی- مارنی در منطقه و همچنین تاثیر به سزای آنها در پروژه‌های مهندسی و توسعه شهری، می‌باشد. برای تهیه نمونه‌های موردنیاز پژوهش حاضر نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ شهر تبریز مورد بررسی قرارگرفته و در طول چندین بازدید صحرایی ۱۷ نمونه (مغزه‌های استوانه‌ای شکل) مربوط به ۱۷ منطقه مختلف از عمق ۷ تا ۵۶ متر، از طریق مغزه‌گیری دورانی پروژه‌های محتلف شهر، تهیه گردید (جدول ۲). جمع‌آوری و آماده‌سازی نمونه‌های معرف به دلیل وجود تنوع رسوبات، از نظر محتوی و میزان کانی‌های رسی، عمق، محتوی رطوبت طبیعی و میزان ترک‌خوردگی و هوازدگی، می‌تواند مهم‌ترین و چالش‌برانگیزترین بخش تحقیق بشمار آید؛ چراکه نمونه‌ها با از دست دادن رطوبت در مدت زمان بسیار کوتاه، دچار انقباض، ترک خوردگی و تغییر ترکیب شیمیایی می‌شوند. برای اطمینان از عدم تغییرات ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی عنوان بخشی از هدف تحقیق، تمام مغزه‌های تهیه شده بلافاصله با یک لایه نازک پارافین آغشته، در پوشش پلاستیکی قرار داده و به روش مطمئنی نگهداری شدند. با توجه به حساسیت نمونه‌های اخذ شده و اهمیت نگهداری آنها جهت دست‌یابی به نتایج علمی و منطقی، انتخاب بهترین روش نگهداری یکی از اهداف مهم این تحقیق بشمار می‌آید؛ بطور کلی پذیرفته شده است که سنگ‌ها بهتر است در محیط های تمیز و دور از گرد و غبار که در آن شرایط نور کم و دمای پایدار، رطوبت نسبی ثابت حاکم است، نگهداری شوند. شرایط ایده‌آل به عنوان رطوبت نسبی ۵۰ درصد در دمای ۱۵ تا ۲۰ درجه سانتیگراد توصیف شده است (Worthington, 1994). مغزه‌های تهیه شده از سنگ‌های رسوبی نرم دریایی و دریاچه‌ای باید از نوسانات دمایی و رطوبت دور بماند (شکل ۳).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

جدول ۲. موقعیت جغرافیایی و ویژگی‌های ظاهری نمونه‌ها

Table 2. Geographical location and physical characteristics of the samples

نام نمونه	محل نمونه‌برداری	مختصات UTM	عمق نمونه‌برداری (متر)	عمق آب زیرزمینی (متر)	مشخصات ظاهری نمونه
SM1	میدان آذربایجان	4218938 611612	۴۸	۱۱	به رنگ خاکستری نسبتا روشن، بدون ترک و کاملا سخت
SM2	کوی بارنج	4214142 620691	۴۰	برخورد نگردید	به رنگ خاکستری تا قهوه‌ای، سفت و بدون ترک
SM3	پالایشگاه	4213560 608345	۵۶	۱۵	به رنگ خاکستری تیره، سفت، بدون ترک
SM4	کوی استاندارد	421294 62063	۲۴	۱۴	به رنگ خاکستری تیره، سفت
SM5	خیابان نظامی	4213991 618673	۴۰	۱۳	به رنگ خاکستری تیره، سفت با ترک‌های بسیار ریز
SM6	کوی ویلاشهر	4210265 628446	۱۲	برخورد نگردید	به رنگ خاکستری، سست و ترک‌دار
			۱۸	برخورد نگردید	به رنگ خاکستری، سفت و دارای ترک‌های ریز
SM7	مرزداران (خیابان معراج)	4212335 622852	۲۵	برخورد نگردید	به رنگ خاکستری، تقریبا سفت و دارای ترک‌های ریز
SM8	کوی لاله	4213280 608244	۳۵	۷	به رنگ قهوای تا خاکستری، سفت و بدون ترک
SM9	اتوبان ولایت	14212448 620881	۳۲	برخورد نگردید	به رنگ خاکستری و نسبتا سست و ترک‌دار
SA1	خیابان گلکار (گلستان)	4214019 617619	۳۰	۱۰	به رنگ خاکستری و کاملا سفت و تقریبا بدون ترک
SA2	ولیعصر ۲	4212695 621035	۱۲	برخورد نگردید	به رنگ خاکستری، نسبتا سفت و ترک‌دار
			۱۵		به رنگ خاکستری، سفت و دارای ترک‌های ریز
SA3	کوی فرشته (پشت لاله پارک)	4214759 621357	۱۵	۱۰	به رنگ خاکستری، نسبتا سفت و دارای ترک‌های ریز
SA4	مرزداران (خیابان مصلی)	4211100 622232	۲۵	برخورد نگردید	به رنگ خاکستری (قهوه‌ای)، تقریبا سست و دارای ترک‌های ریز
SA5	کوی نصر (میدان مادر)	4212693 621442	۱۸	برخوزد نگردید	به رنگ خاکستری (فهوه‌ای)، نسبتا سفت و دارای ترک‌های ریز
SC	کوی منظریه	N: 4211857 611600	۱۰	۷	به رنگ سبز زیتونی، نسبتا سفت و ترک‌دار
			۱۷		به رنگ سبز زیتونی، سفت و دارای ترک‌های ریز
SY1	کوی نصر (میدان شهید حیدری)	4212695 622650	۱۰	برخورد نگردید	به رنگ زرد تا زیتونی، سست و دارای ترک‌های ریز
SY2	خیابان گلکار (کوچه حسن)	4213992 615216	۱۵	۱۰	به رنگ زرد، نسبتا سست و دارای ترک
			۲۸		به رنگ زرد، سفت و دارای ترک‌های ریز

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

نمونه SM6

نمونه SM7

نمونه SA3

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

نمونه SC

نمونه SY1

شکل ۳. تصاویری از محل و نمونه‌های حفاری شده از مناطق مختلف شهر تبریز

Fig. 3. Images of the site and excavated samples from different areas of Tabriz city

مطالعات آزمایشگاهی

بررسی پتروگرافی و کانی‌شناسی

برای شناسایی ویژگی‌های پتروگرافی، ویژگی‌های بافتی نمونه‌های آرژیلیتی- مارنی، مطالعات میکروسکوپی بر روی مقاطع نازک انجام شد (ISRM, 2007). علاوه بر این، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) برای بررسی شکل، اندازه و ویژگی‌های هندسی فضاهای خالی نمونه‌ها مورد بررسی قرار گرفت. بررسی پراش اشعه ایکس بر روی نمونه‌ها جهت تعیین کانی‌های اصلی و فرعی و همچنین آنالیز نوع و محتوای کانی‌های رسی انجام شد. محتوای کربنات کلسیم ($CaCO_3$) با استفاده از روش برنارد تعیین شد. تحقیقات اخیر نشان می‌دهد که روش حجمی برنارد، مؤثرترین روش برای تعیین محتوای کربنات در آزمایشگاه‌های مهندسی عمران است (Lamas et al., 2002).

آزمایش‌های فیزیکی

پارامترهای فیزیکی نمونه‌های مورد ارزیابی در این تحقیق، دانسیته خشک (γ_d)، تخلخل (n)، محتوای آب (ω) و شاخص دوام (I_d) به ترتیب بر اساس استاندارد جهانی (ASTM D4404, 2018; ASTM D2216, 2019; ASTM D2974, 2022; ASTM D6444, 2016) انجام گرفت. حجم کل (V) نمونه‌های استوانه‌ای با اندازه‌گیری دقیق ابعاد آنها طبق رویه‌های مشخص شده در (ASTM D2216) تعیین شد. از آنجایی‌که نمونه‌ها بسیار حساس به آب هستند، دانسیته و تخلخل با غوطه ور کردن آنها در نفت سفید به مدت یک ساعت، تعیین شد.

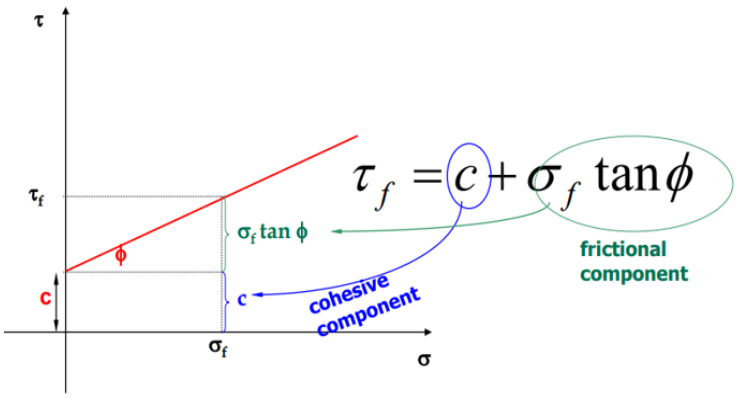
آزمایش‌های مکانیکی

مقاومت فشاری تک محوری (UCS) نمونه‌های سنگ را تحت بارگذاری تک محوری در شرایطی با محتوای آب طبیعی با روش کنترل بار محوری وارده بر اساس (ASTM D7012, 2011) انجام شد. نمونه‌های مورد استفاده با قطر ۷۵-۹۵ میلی‌متر، حداکثر طول ۲۴۰-۱۸۰ میلی‌متر و نسبت طول به قطر L/D (۲/۵-۱/۵) تهیه شدند. برای تعیین مقاومت برشی استفاده از روش آزمایش براساس استاندارد (ASTM D5607, 2016)، بدلیل مقاومت پایین نمونه‌ها و عدم تحمل بار وارده، قابل استفاده نبود. همچنین استفاده از دستگاه برش مستقیم خاک بر اساس استاندارد (ASTM D3080, 2011)، بدلیل نیاز به نمونه خرد شده با ابعاد ۲ اینچی و تخریب ساختار نمونه نیز با مشکل و چالش‌هایی همراه بود. لذا با توجه به ظرفیت مناسب دستگاه برش مستقیم بیشتر نمونه‌ها، جهت ممانعت از بهم‌ریختگی و دست‌خوردگی ساختار نمونه‌ها، اقدام به ساخت قالب استوانه‌ای که داخل قالب مربعی این دستگاه تعبیه می‌شود،

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

گردید. سپس نمونه‌ها به ضخامت (۳/۵-۳ سانتی‌متر)، با دقت آماده‌سازی شده و تحت تست مربوطه قرار گرفتند (شکل ۴). مقاومت برشی (τ) و پارامترهای چسبندگی (c) و زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) بر اساس نمودار شکل ۵، محاسبه می‌گردد.

شکل ۴. تصاویری از قالب ساخته شده و آزمایش برش مستقیم نمونه‌ها
Fig. 4. Images of the mold made and direct shear test of the samples



شکل ۵. نمودار بدست آمده از آزمایش مقاومت برشی مستقیم و مقادیر c و ϕ (Smith and Sachan, 2015).
Fig. 5. Graph obtained from direct shear strength test and values of c and φ (Smith and Sachan, 2015)

آزمایش فراصوت

این آزمایش بر روی چند نمونه بر اساس استاندارد (ASTM D2845, 2021)، در آزمایشگاه شرکت مهندسین مشاور گمانه کاو (تهران)، انجام گرفت. دستگاه اندازه‌گیری سرعت طول موج در محل مذکور، با تولید یک پالس جریان کوتاه کار کرده و در نتیجه پالس جریان ورودی، مواد درون مبدل منبع دچار تغییر شکل الاستیک می‌گردد. این تغییر شکل الاستیک سپس به مغزه سنگ منتقل می‌شود و در آنجا به صورت امواج الاستیک منتشر می‌شود. در طرف دیگر سنگ، یک مبدل گیرنده امواج الاستیک را ثبت می‌کند و انرژی مربوطه را به سیگنال جریان تبدیل می‌کند. سپس این سیگنال جریان توسط یک اسیلوسکوپ اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۶).

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

شکل ۶. تصاویری از آماده‌سازی نمونه‌ها و انجام آزمایش فراصوت در آزمایشگاه شرکت مهندسین مشاور گمانه کاو.
Fig. 6. Images of sample preparation and ultrasonic testing in the central laboratory of Gamaneh Kav Consulting Engineers Company

نتایج مطالعات آزمایشگاهی

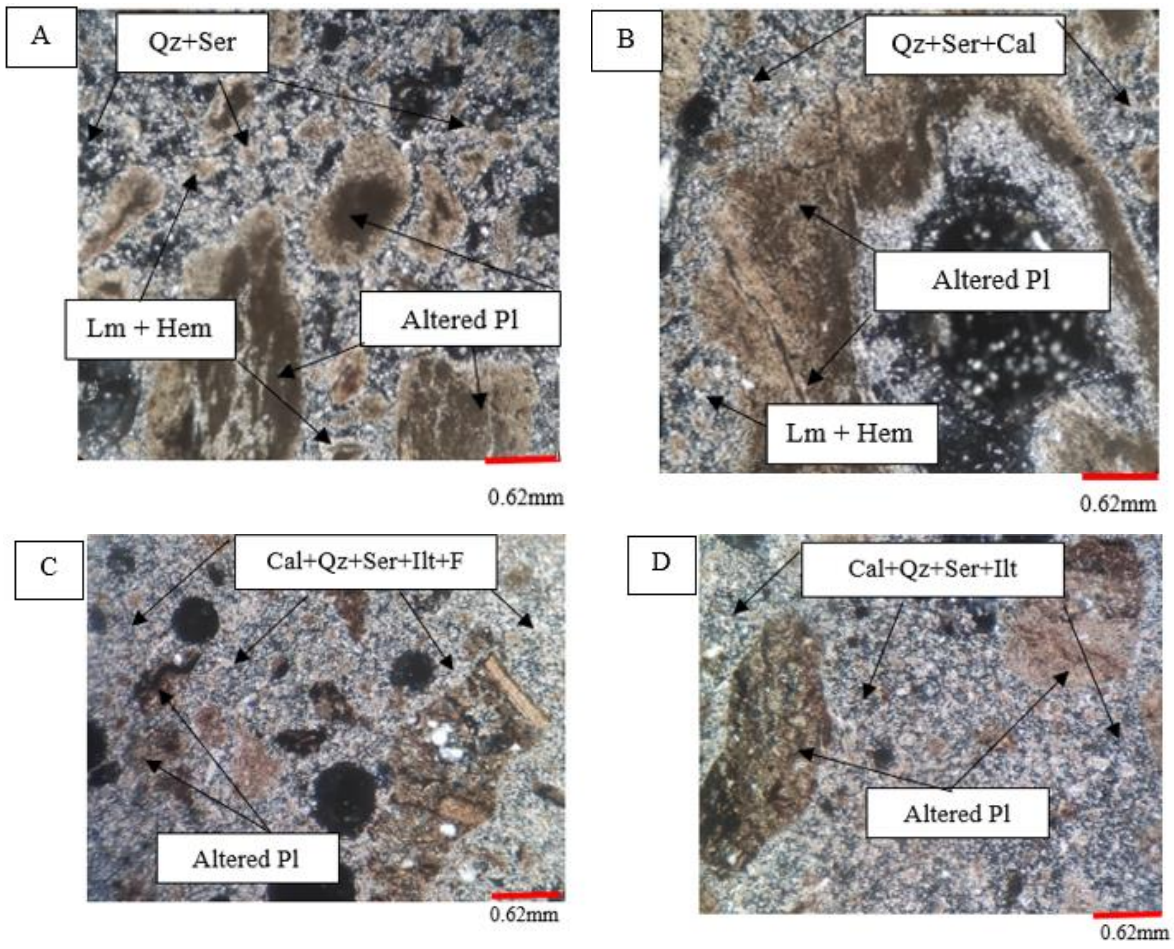
شامل مطالعات سنگ‌شناسی، بررسی‌های میکروسکپی و کانی‌شناسی با XRD است.

ترکیب کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی نمونه‌ها

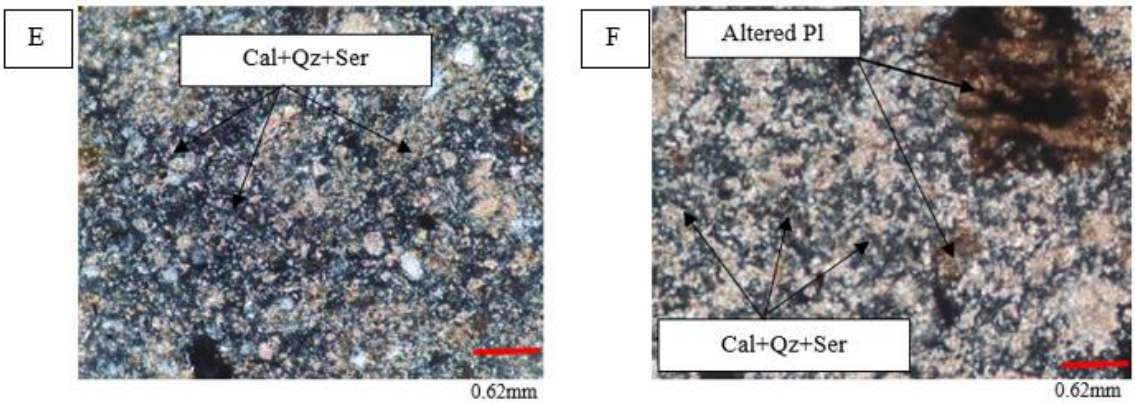
مقاطع نازک، جهت تعیین درصد کانی‌ها و اجزای تشکیل-دهنده نمونه‌ها مورد شناسایی قرار گرفتند که نتایج بدست-آمده از مطالعات میکروسکوپی نوری برای نمونه‌ها بر اساس رنگ آنها ارائه شده است (شکل ۷). سنگ‌های مختلف ممکن است از کانی‌های سخت یا ضعیف تشکیل شده باشند. رفتار مهندسی سنگ‌ها مربوط به محتوای کانی و ساختار داخلی آنها است. نوع بافت بر ویژگی‌های مهندسی تأثیر چشمگیری دارد. نمونه‌ها از کوارتز، فلدسپات، سریسیت، اکسیدهای آهن و سایر مواد دانه‌ریز ماتریکس مانند خمیره رسی و سیلیسی که در نمونه‌های زرد و سبز رنگ بصورت لجن رسی نمایان هستند و ماتریکس نمونه‌های خاکستری متشکل از دانه‌های ریز کوارتز و کلسیت است، تشکیل شده است. گروه نمونه-های خاکستری تیره، دارای بافت همگن، سیمان کلسیتی و کانی‌های رسی می‌باشد. ذرات کوارتز بصورت ریز در ماتریکس بصورت پراکنده بچشم می‌خورد. نمونه‌های خاکستری، نیز دارای بافت تقریبا همگن بوده و پلاژیوکلاز که بطور کامل به کانی‌های رسی، اکسیدهای آهن و سریسیت تبدیل شده‌اند. محتوای سیمان در این نمونه‌ها، بصورت گل رسی با مقدار قابل توجهی کلسیت پراکنده قابل تشخیص است. دگرسانی فلدسپارها در نمونه‌های زرد و سبز، بیشتر از سایر نمونه‌ها بوده و ماتریکس بصورت خمیره رسی در فضای مابین اجزاء و بر روی ذرات ناپایدار تشکیل‌دهنده در این نمونه‌ها، با درصد بالای کانی سریسیت و اکسیدهای آهن که مقاومت کمتری نسبت به سایر ذرات در مقابل هوازدگی دارد، بچشم می‌خورد. همچنین نتایج آنالیز XRD نشان می-دهد که کانی کوارتز به‌عنوان کانی اصلی در همه نمونه‌های مورد بررسی بوده و کانی‌های ایلیت به‌عنوان کانی فرعی مشترک وجود دارند. آزمون پراش اشعه ایکس (XRD) برای نمونه‌های مورد آزمون در محدوده زاویه پراش (2θ) ۲۰ الی ۸۰ درجه با دقت ۰/۰۲ درجه به ازای ۰/۵ ثانیه انجام شد. برای تابش اشعه ایکس از آند مسی استفاده شد و طول موج اشعه ایکس برخوردی ۱/۵۴۰۶ انگستروم بود. شکل فوق طیف‌های XRD مربوط به ۴ نمونه بعنوان نماینده از نمونه‌ها

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

نشان می‌دهد که فاز دی‌اکسید سیلیسیم یا سیلیس (SiO_2) با نام معدنی کوارتز (Quartz) و سیستم کریستالی هگزاگونال، کلسیم کربنات ($CaCO_3$) با نام معدنی کلسیت (Calcite) و سیستم کریستالی رمبوهدرال، و کلسیم آلومینیوم سیلیکات ($Al_3Ca_{0.5}Si_3O_{11}$) با نام عمومی میکای کلسیمی (Calcium mica) و سیستم کریستالی مونوکلینیک تشکیل یافته است. فاز کلسیم کربنات، کلسیم سولفات هیدرات ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) با نام معدنی ژیپس یا سنگ گچ (Gypsum) و سیستم کریستالی مونوکلینیک، دی‌اکسید سیلیسیم، و سدیم آلومینیوم سیلیکات هیدروکسید هیدرات ($Na_8Al_6Si_6O_{24}(OH)_2\ (H_2O)_2$) با نام معدنی سودالیت (Sodalite) و سیستم کریستالی مکعبی تشکیل شده است. نهایتاً فاز کلسیم کربنات دارای سیستم کریستالی رمبوهدرال است. به نظر می‌رسد که در نمونه‌هایی که دارای مقاومت کمتر و ویژگی‌های ضعیف فیزیکی و مکانیکی هستند، اتم‌های منیزیم بصورت ناخالصی وارد شبکه کریستالی کلسیت شده و باعث تغییر فاصله بین صفحات کریستالی (d-spacing)و در نتیجه ایجاد شیفت در پیک‌های کلیست) شده است (شکل ۸). همچنین با تجزیه تحلیل نتایج XRD، انواع و محتوای کانی‌های رسی نمونه‌ها تعیین گردید محتوای کائولینیت در نمونه‌ها از حدود ۴٫۲٪ تا ۱۱٫۳٪ متغیر است، در حالی‌که محتوای مونتموریونیت از ۱٫۹٪ تا ۳۰٫۷٪ متغیر است. براساس داده‌های کلسیمتری نیز محتوای کربنات کلسیم نمونه‌ها مابین ۱۳/۵ و ۶۳ درصد قرار دارد (جداول ۳ و ۴).



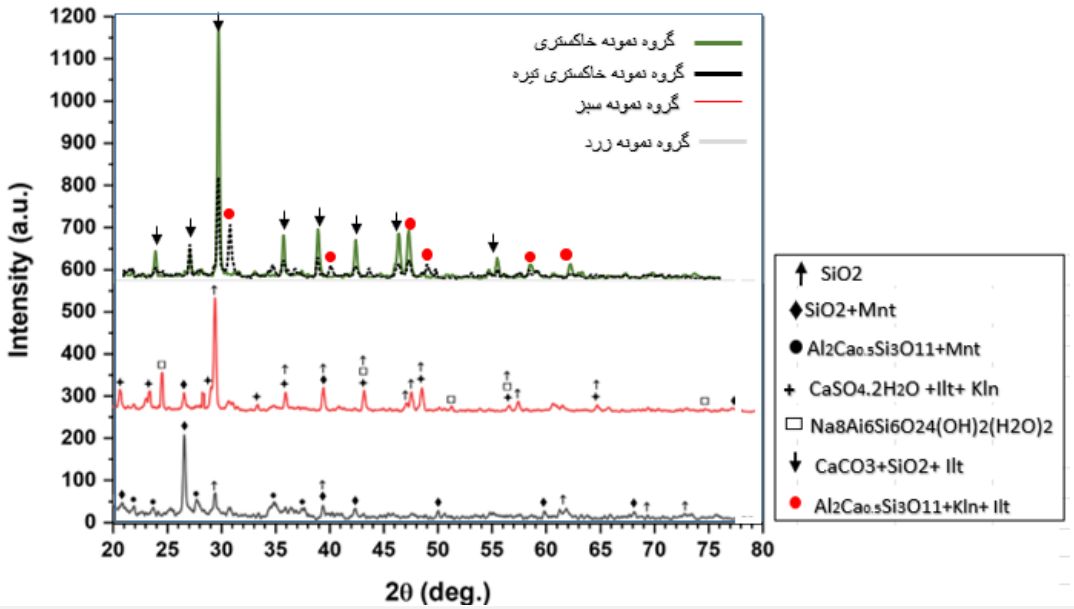
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]



*Cal:Calcite; Qz:Quartz; Ser: Sericite;Pl: Plagioclases;Ilt: Ilite; F:Fossile; Hem: Hematite; Lm: Limonite

شکل ۷. تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک برخی از نمونه‌های آرژیلیتی- مارنی تبریز: A) نمونه زرد رنگ (SY2). B) نمونه سبز رنگ (SC). C) نمونه خاکستری (SA1). D) نمونه خاکستری (SA3). E) نمونه خاکستری تیره (SM1). D) نمونه خاکستری تیره (SM3).

Fig. 7. Microscopic images of thin sections of some Tabriz argillaceous -marly samples: A) Yellow sample (SY2). B) Green sample (SC). C) Gray sample (SA1). D) Gray sample (SA3). E) Dark gray sample (SM1). D) Dark gray sample (SM3).



شکل ۸. نتایج آزمون XRD مربوط به نمونه‌های آرژیلیتی- مارنی تبریز

Fig. 8. XRD test results for Tabriz argillaceous -marly samples

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

جدول ۳. کانیهای اصلی و فرعی بر اساس تجزیه و تحلیل XRD

Table 3. Major and minor minerals based on XRD analysis

نمونه	کانی‌های فرعی	کانی‌های اصلی
SM1, SM2, SM3, SM4, SM5 SM6, SM7, SM8, SM9	ایلیت، مونت‌موریونیت و کلریت Illite, Montmorillonite, Chloride	کوارتز، کربنات کلسیم (منیزیومی) و کائولینیت Magnesium Carbonate Calcium, Quartz, Kaolinite.
SA1, SA2, SA3, SA4, SA5	ژیپس، ایلیت و کلرید Gypsum, Illite, Chloride	کوارتز، اسمکتیت (مونت‌موریونیت)، کائولینیت، میکای منیزیومی و اکسید آهن Quartz, Smectite, Kaolinite, Magnesium and iron mica, Montmorillonite.
SC	ژیپس، موسکوویت، ایلیت $CaCO_3$ $CaCO_3$, Gypsum, Illite, Muscovite	سودالیت، کوارتز، مونت‌موریونیت و کائولینیت Sodalite, Quartz, Montmorillonite, Kaolinite
SY1, SY2	ژیپس، موسکوویت و ایلیت Gypsum, Illite, Muscovite	اسمکتیت، کوارتز و کائولینیت Smectite, Quartz, Kaolinite.

جدول ۴. انواع و مقدار کانی‌های مهم و ترکیب و محتوای کانی‌های رسی نمونه‌ها.

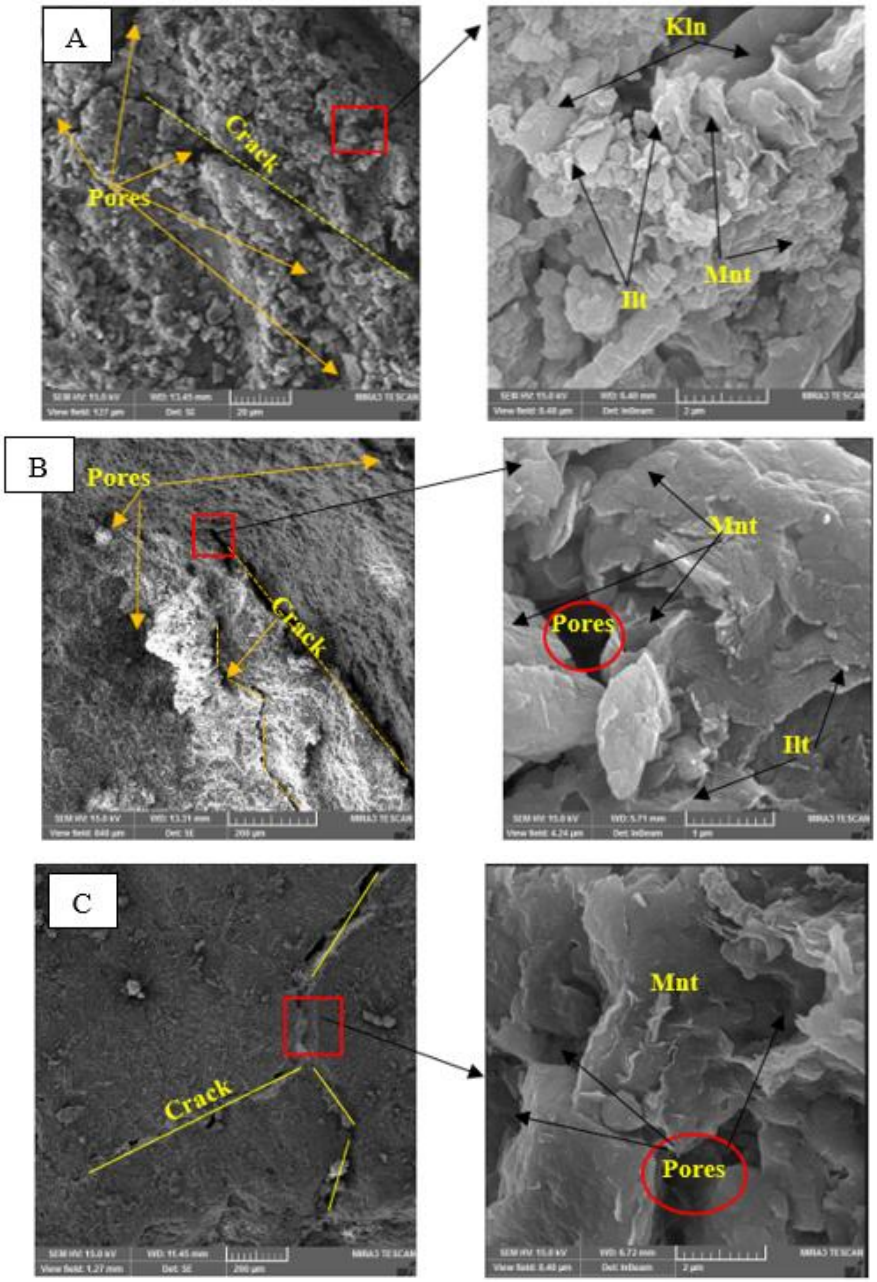
Table 4. Types and amounts of important minerals and composition and content of clay minerals in the samples

	نوع و مقدار کانی‌ها (٪) Types and contents of minerals (%)			محتوای نسبی ترکیب کانی رسی (٪) Relative content of clay mineral composition (%)			
نمونه Sample	ایلیت Illite	مونت‌موریونیت Montmorillonite	کائولینیت Kaolinite	پلاژیوکلاز Plagioclase	کانی رسی Clay mineral	کوارتز Quartz	کربنات کلسیم $CaCO_3$
SA1	11.7	20.4	7.9	7.1	40.0	14.9	38
SA2	7.8	20.4	2.2	6.7	30.4	22.9	40
SA3	8.1	24.9	5.0	10.1	47.0	24.9	18
SA4	10.7	20.2	8.3	6.7	39.2	24.1	30
SA5	11.7	24.9	2.3	4.6	38.9	18.5	38
SM1	2.3	1.9	7.9	0.0	10.1	26.9	63
SM2	4.3	8.3	6.4	4.0	19.0	18.5	58.5
SM3	2.6	4.1	5.0	0.0	11.7	30.3	58
SM4	3.9	6.7	8.1	0.0	18.7	24.9	56
SM5	6.8	18.7	7.0	0.0	32.5	20.5	53
SM6	10.1	9.4	8.1	0.0	26.6	25.4	54
SM7	2.8	24.3	3.4	0.0	36.5	14.0	40.5
SM8	2.6	3.2	5.6	4.0	11.2	29.8	55
SM9	7.0	9.4	6.1	0.0	22.5	39.5	38
SC	12.1	30.7	5.2	3.5	48.0	19.5	29
SY1	14.7	43.1	2.1	4.6	59.9	22.0	13.5
SY2	13.3	28.1	6.4	10.1	47.8	22.1	20

بر اساس تجزیه و تحلیل SEM سیمان‌شدگی بسیار ضعیف و وفور ریزترک‌ها در نمونه‌ها قابل مشاهده است، این حالت هم در مقیاس ماکرو و هم در مقیاس میکروسکوپی SEM دیده می‌شود و بافت‌های مشخص با منشأ آواری همراه ذرات مسطح (Anhedral) با لبه‌های شکسته، گاهی اوقات به‌طور آشفته مرتب شده‌اند و گاهی اوقات موازی هستند. کانی‌های رسی مختلف از جمله کائولینیت، اسمکتیت (مونتموریونیت)، ایلیت و سایر کانی‌های اصلی مانند کلسیت نیز قابل مشاهده هستند. علاوه بر این، فسیل‌های دیاتومه از نوع بیدالفیا (Biddulphia) مشاهده می‌شود. فازهای معدنی بخصوص ساختار کانی‌های رسی با استفاده از تصاویر SEM، قابل بررسی است. ساختار تقریبا گسسته با پیوندهای ضعیف در

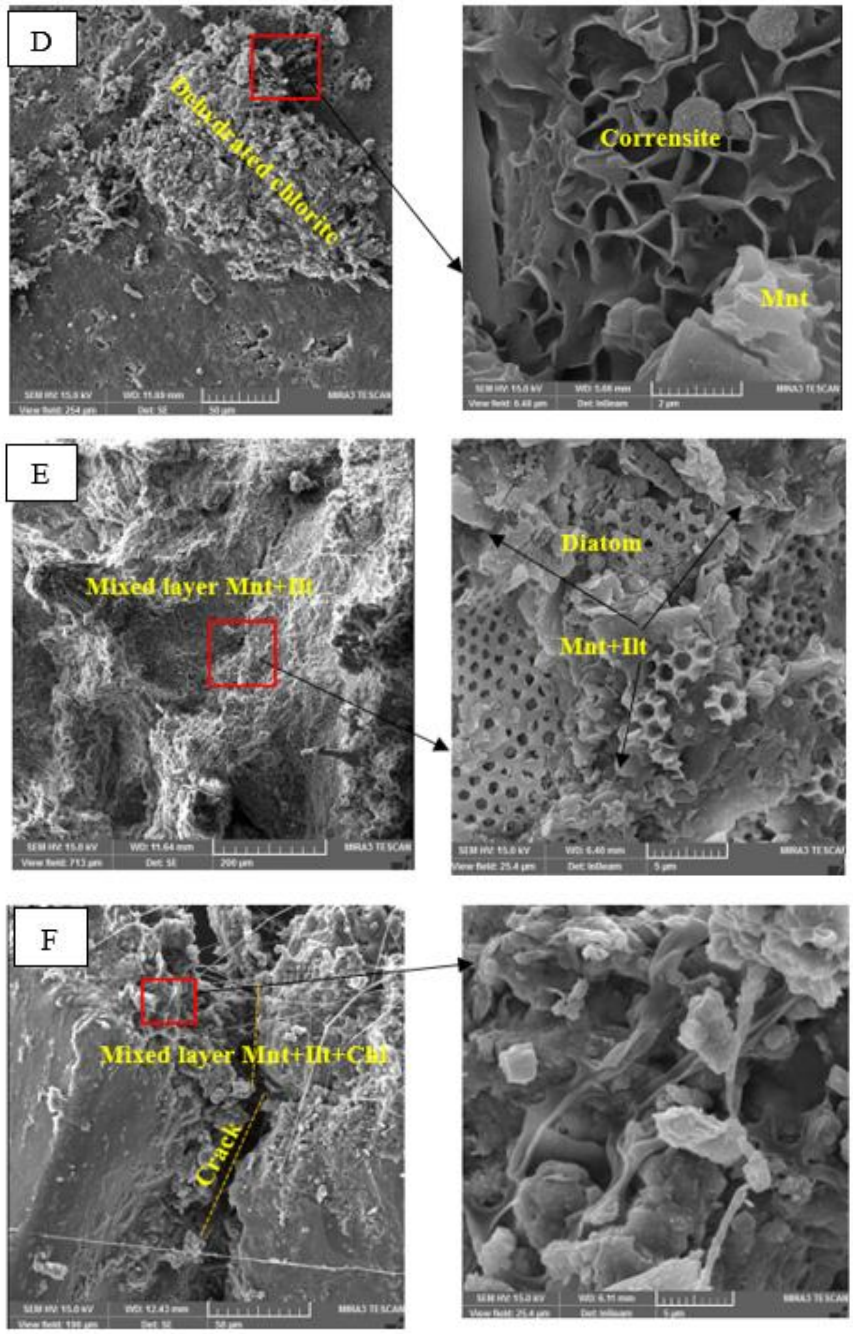
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

نمونه‌های زرد و سبز و تا حدودی در نمونه‌های خاکستری ضعیف مشهود هست. بطوری‌که وفور کانی‌های رسی مونت-موریونیت با پیوندهای ضعیف وان دروالسی، در این نمونه‌ها، باعث افزایش چشمگیر تخلخل شده و در حضور آب دچار وارفتگی شدید می‌شوند. در نمونه‌های خاکستری، ساختار کانی‌های رسی بدلیل وجود ایلیت فیبری و در برخی موارد کائولینیت ساختار تجمعی گسسته و در نمونه SM1، ساختار تجمعی (فلوکله)، وجود دارد. همچنین وجود کانی کلریت در نمونه‌های زرد، سبز و برخی نمونه‌های خاکستری نیز در کاهش مقاومت این نمونه‌ها موثر است. چراکه در شرایط دیاژنز ناقص با ممانعت از سیمان کوارتزی باعث کاهش مقاومت می‌گردد (Zhang et al., 2018)، (شکل ۹).



[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]



*Mnt: Montmorillonite; Kln: Kaolinte

شکل ۹. تصاویر SEM برخی نمونه‌های آرژیلیتی-مارنی تبریز: A) نمونه خاکستری تیره (SM1). B) نمونه خاکستری تیره (SM3). C) نمونه زرد (SY2). D) نمونه (SC) : ساختارمنظم کلریت/ اسمکتیت (Corrensite) بین لایه‌ای، بر مجموعه رسی غالب است. نمونه دارای مورفولوژی "لانه زنبوری" است که مشخصه اسمکتیت حاوی پلاکت‌های صاف و تیغه‌ای شبیه به کلریت است. E) نمونه خاکستری (SA1). F) نمونه خاکستری (SA3).

Fig. 9. SEM images of some Tabriz argillaceous-marly samples: SEM images of some Tabriz argillite-marl samples: A) Dark gray sample (SM1). B) Dark gray sample (SM3). C) Yellow sample (SY2). D) Sample (SC): The regular interlayered chlorite/smectite (Corrensite) structure dominates the clay assemblage. The sample has a

"honeycomb" morphology, which is characteristic of the smectite containing flat, blade-like plates similar to chlorite. E) Gray sample (SA1). F) Gray sample (SA3).

ویژگی‌های مهندسی سنگ‌های آرژیلیتی- مارنی

ویژگی‌های مهندسی (فیزیکی و مکانیکی) سنگ‌های دست-نخورده مختلف به ترکیب کانی‌شناسی و ریزساختاری آنها بستگی دارد. محتوای کانی‌شناسی، مرز بین ذرات و نوع تماس آنها، شکاف‌ها و ریزشکستگی‌ها تأثیر اساسی بر رفتار مهندسی دارند. ویژگی‌های فیزیکی سنگ نیز به شدت تحت تاثیر بافت، درصد و نوع کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ‌ها می-باشد (Shalabi et al., 2007). نتایج مربوط به ویژگی‌های مهندسی نمونه‌های مطالعه شده نظیر مقاومت فشاری تک محوری، مقاومت برشی، چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، دانسیته خشک، شاخص دوام و تخلخل در جداول ۵ و ۶ و نتایج آزمایش فراصوت برخی از نمونه‌ها در جدول ۷ نشان داده شده است. مقاومت نمونه SM1 ۱/۳ مگاپاسکال و مدول الاستیک آن ۳۲ مگاپاسکال است. مقاومت نمونه SY1 ۰/۱۴ مگاپاسکال و مدول الاستیک ۹ مگاپاسکال است. تنوع نتایج و مقادیر کم مقاومت می‌تواند در نتیجه تفاوت در ترکیب کانی‌شناسی و ریزساختار نمونه‌ها باشد. ویژگی‌های فیزیکی؛ مانند آماده‌سازی نمونه، اندازه، محتوای کانی‌شناسی و مقدار رطوبت می‌تواند به‌طور قابل توجهی مقاومت فشاری تک محوری سنگ نرم را کاهش دهند. همچنین مکانیسم‌هایی مانند انتشار ترک نیز مقاومت هر سنگ نرم معینی را کاهش می‌دهد. این شرایط برای سنگ‌های حاوی کانی‌های رسی کمتر، به‌هنگام افزایش رطوبت، با کاهش ۱٪ مقاومت همراه است. اما در سنگ‌های سرشار از کانی‌های رسی، این کاهش مقاومت به بیش از ۵۰٪ می‌رسد. ملاحظه می‌گردد که میزان مدول الاستیک در نمونه‌های زرد رنگ و سبز رنگ از ۹ تا ۱۷/۵ مگاپاسکال متغیر است. ولی این مقدار برای نمونه‌های خاکستری رنگ بیشتر بوده و تغییرات آن از ۹/۵ تا ۳۰ مگاپاسکال می‌باشد. مقایسه مدول الاستیک مماسی و وتری حاکی از آن است که مقادیر مدول مماسی، ۳۰-۱۵ درصد بیشتر از مدول وتری می‌باشد.

آزمایش‌های برش مستقیم تحت بار عمودی اعمالی ۰/۱، ۰/۱۵ و ۰/۲ مگاپاسکال انجام شده است؛ با توجه به مطالعات قبلی فشار پیش تحکیمی نمونه‌ها بین ۰/۱۸ تا ۰/۴ مگاپاسکال می‌باشد. لذا بدلیل عدم اعمال فشار سربار بیش از فشار پیش تحکیمی، در بیشتر موارد تغییرات چشمگیری در مقادیر پارامترهای مقاومت برشی، مشاهده نمی‌شود (Priyamali and Priyankara, 2023). در مورد نمونه‌های خاکستری ضعیف، مقدار چسبندگی نمونه‌ها بین ۰/۱۹- ۰/۱۱ مگاپاسکال بوده و مقدار زاویه اصطکاک داخلی بین ۱۷ تا ۲۳ درجه قرار دارد. این مقادیر در نمونه‌های خاکستری مقاوم نیز مقدار زاویه اصطکاک داخلی بین ۲۴ تا ۳۹ و مقدار چسبندگی بین ۰/۱۳ تا ۰/۵۴ مگاپاسکال بدست آمده است. در مورد نمونه‌های سبز رنگ نیز مقدار زاویه اصطکاک داخلی بین ۱۶ تا ۱۷ و مقدار چسبندگی بین ۰/۱۱ تا ۰/۱۲ مگاپاسکال و برای نمونه‌های زرد رنگ، زاویه اصطکاک داخلی حدود ۱۳-۷ و مقدار چسبندگی نیز حدود ۰/۰۶ مگاپاسکال می‌باشد. مقادیر پایین مقاومت برشی در اثر وجود ناپیوستگی‌ها و ترکیب کانی‌شناسی، بدلیل اهمیت بالای آنها در مقاومت برشی و تغییر شکل‌پذیری، قابل توجیه هست. همچنین جنس و ضخامت میان‌لایه‌های ضعیف نمونه‌ها رفتار برشی را تحت تاثیر قرار می‌دهد.

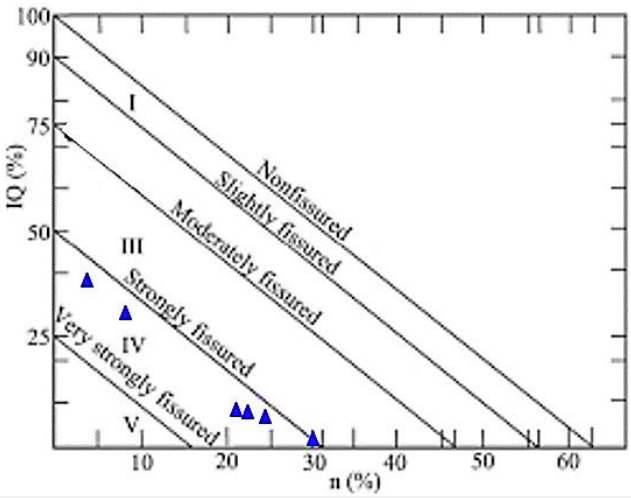
تاثیر کانی‌شناسی بر تخلخل بصورت مستقیم و بر سرعت موج P بطور غیرمستقیم می‌باشد (Kim et al., 2012). مطالعات نشان می‌دهد که وقتی ذرات تشکیل‌دهنده سنگ کوچکتر و در محدوده ۱۵۰-۱۰۶ میکرومتر باشد، تغییر در سرعت موج P زیاد است. دلیل این امر این است که وقتی اندازه ذرات کوچک است، تماس بین ذرات فشرده است و فشار تراکم تأثیر کمی بر فضای منافذ دارد. به طور مشابه، زمانی‌که اندازه ذرات بزرگ است، ذرات تماس کمتری باهم دارند و فشار تراکم تأثیر کمی بر منافذ دارد و منجر به نوسانات قابل توجهی در اندازه‌گیری سرعت موج P می‌شود (Chen and Zer, 2001). با توجه به رده‌بندی

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

(Anonymous, 1979)، تمام نمونه‌های مورد مطالعه از نظر موج برشی در رده خیلی سست (Vs<2500m/s)، قرار دارند. در این آزمایش، در انتقال نمونه‌ها به آزمایشگاه، احتمالاً آسیب‌هایی به نمونه‌ها وارد شده است. وجود درزه‌های ریز باعث افزایش تخلخل سنگ و کاهش سرعت امواج فراصوت می‌شود. بنابراین، محاسبه شاخص ترک‌خوردگی یا همان ترک‌خوردگی می‌تواند اطلاعات مهم ریزساختار و ناپیوستگی‌های موجود در نمونه‌ها را آشکار کند (معادله ۱):

$$I_Q\% = \frac{V_p}{V_{p*}} \quad (۱)$$

در این معادله Vp، سرعت موج طولی بدست آمده از آزمایش و Vp*، سرعت موج طولی نظری (Fourmaintraux,1976)، می‌باشد. براساس شکل ۱۰، تمام نمونه‌ها از نظر شاخص ترک‌خوردگی در رده ترک‌خوردگی بسیار زیاد قرار دارند.



شکل ۱۰. موقعیت نمونه‌ها در رده‌بندی شاخص ترک‌خوردگی (Fourmaintraux,1976)

Fig. 10. Position of samples in the fissureg index classification (Fourmaintraux, 1976)

جدول ۵. نتایج آزمایش‌های فیزیکی نمونه‌های آرژیلیتی- مارنی

Table 5. Results of physical tests of argillaceous-marly samples

نمونه	شاخص دوام وارفتگی I_d%					دانسیته خشک	دانسیته طبیعی	رطوبت طبیعی	n%
Sample	5	4	3	2	1	$\gamma_d(kN/m^3)$	$\gamma_m(kN/m^3)$	ω%	تخلخل
SA1	-	0	8.5	33	58	14.5- 15.5	17.6- 18.5	20.5-20.8	19.0-19.5
SA2	-	0	5.5	21	54	13.0-14.0	15.0- 15.8	15.0-15.5	21.0-35.0
SA3	-	-	0	14	27	13.0-13.5	14.6- 15.0	20.0-20.5	28.0-36.0
SA4	-	-	0	3.1	53	13.5-13.8	15.0-15.5	24.0-28.0	19.5-23.5
SA5	-	-	0	12	34	14.3-14.5	15.2-15.5	18.0-19.0	18.0-19.1
SM1	12	25	40	60	75	19.0-19.5	22.0-22.5	20.0-22.0	6.5-6.8
SM2	-	0	19	34	52	15.0-15.5	18.0-18.5	24.0-25.0	11.5-14
SM3	-	0	12	46	63	18.0-18.2	21.5-22.0	20.0-21.0	10.4-12.1
SM4	0	6	23	52	73	17.0-17.2	19.0-19.2	18.0-19.0	13.0-14.0
SM5	-	0	20	28	58	16.0-17.2	19.2-20. 5	20.0-23.0	32.0-33.0
SM6	-	-	0	14	27	15.0-15.5	16.5-17.4	16.0-17.0	30.3-33.7

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

19.0-19.5	21.0-22.0	18.0-18.5	15.0-15.5	53	3	0	-	-	SM7
9.5-14.0	28.0-30.0	18.0-18.2	14.2-15.2	58	30	12	0	-	SM8
25.0-28.0	17.0-19.0	16.0-16.5	13.2-14.0	38	15	0	-	-	SM9
20.5-28.0	30.0-33.0	17.5-18.0	13.5-14.0	23	6	0	-	-	SC
33.0-48.0	20.0-21.0	14.5-14.8	12.0-12.5	28	0	-	-	-	SY1
25.0-38.0	25.0-28.0	12.0-16.0	11.0-13.0	24	5	0	-	-	SY2

جدول ۶. نتایج آزمایش‌های مکانیکی نمونه‌های آرژیلیتی- مارنی

Table 6. Results of mechuical tests of argillaceous-marly samples

مدول مماسی (MPa)	مدول وتری (MPa)	مقاومت فشاری نهایی (Mpa)	چسبندگی C (MPa)	زاویه اصطکاک داخلی (ϕ)	مقاومت برشی (MPa)	نمونه	رنگ
19.0-20.0	15.6-17.7	0.34-0.41	0.17	23	0.14-0.30	SA1	خاکستری
16.5-17.8	15.0-15.6	0.38-0.43	0.13	23	0.16-0.30	SA2	
22.0-23.0	15.9-16.9	0.23-0.35	0.19	18	0.07-0.30	SA3	
9.5-10.5	5.4-6.5	0.20-0.24	0.17	20	0.10-0.20	SA4	
11.0-11.8	5.4-6.9	0.33-0.37	0.11	17	0.08-0.2	SA5	
31.5-31.6	18.0-24.5	1.1-1.3	0.53	39	0.73-1.5	SM1	خاکستری تیره
27.0-30.0	19.2-21.0	0.80-0.85	0.40	33	0.45-0.80	SM2	
26.0-30.0	18.0-20.0	0.60-0.71	0.27	33	0.28-0.70	SM3	
28.6-30.0	16.0-23.0	0.67-0.69	0.17	33	0.35-0.50	SM4	
22.0-23.0	14.9-15.0	0.58-0.68	0.20	30	0.35-0.50	SM5	
27.0-28.0	20.0-21.0	0.46-0.50	0.17	33	0.24-0.40	SM6	
9.5-10.6	6.0-6.5	0.46-0.48	0.13	24	0.20-0.30	SM7	
18.2-23.4	12.5-15.0	0.48-0.55	0.16	26	0.22-0.45	SM8	
28.0-29.0	19.0-20.0	0.58-0.68	0.33	32	0.35-0.68	SM9	
16.5-17.5	12.0-12.5	0.38-0.42	0.11	17	0.09-0.20	SC	سبز
9.0-9.5	3.5-4.0	0.14-0.17	0.06	13	0.03-0.08	SY1	زرد
11.5-13.5	6.0-7.9	0.20-0.23	0.06	7	0.03-0.08	SY2	

جدول ۷. نتایج آزمایش فراصوت برخی از نمونه‌های آرژیلیتی- مارنی مورد مطالعه

Table 7. Ultrasonic test results of some of the studied argillaceous-marly samples

I_Q%	نسبت پواسون (ν)	E (MPa)	Vs (m/s)	زمان عبوری Vs ($s * 10^{-3}$)	Vp (m/s)	زمان عبوری Vp ($s * 10^{-3}$)	طول نمونه (cm)	قطر نمونه (m)	رطوبت نمونه	عمق نمونه (m)	نمونه
0.38	0.50	22.8	686.3	0.128	1171.4	0.128	15	0.094	طبیعی	28	SA1
0.38	0.48	22.3	542.9	0.329	947.4	0.189	18	0.094	طبیعی	15	SA3
0.30	0.37	21.8	501.8	0.468	959.2	0.245	23.5	0.094	طبیعی	17	SC
0.30	0.36	12.69	405.3	0.567	784.6	0.293	23	0.095	طبیعی	10	SY1
0.40	0.56	47.0	1200.0	0.137	2001.7	0.0824	16.5	0.094	طبیعی	45	SM1
0.50	0.50	39.5	814.3	0.208	1408.9	0.121	17	0.094	طبیعی	48	SM3

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

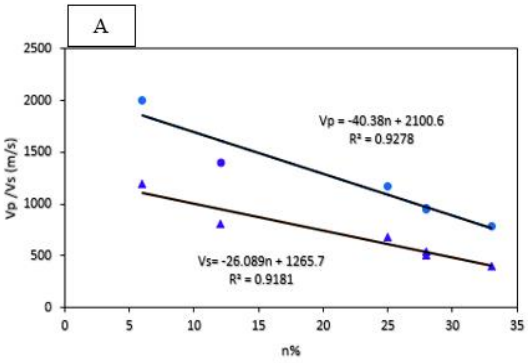
بحث

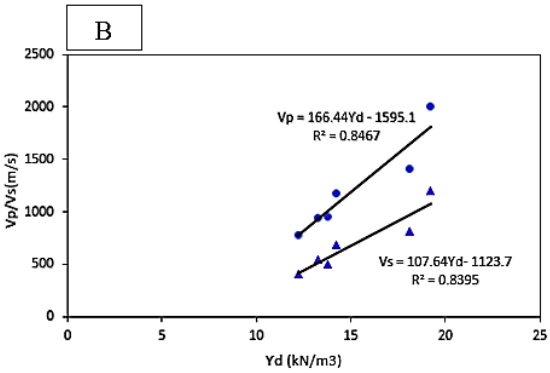
ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سنگ‌های آرژیلیتی- مارنی، بطور قابل‌توجهی با توزیع کانی‌های رسی، چه بصورت سیمان و چه بصورت ذرات ساختاری کنترل می‌شود. متون علمی نشان می‌دهد که هر چه محتوای خاک رس ماتریکس بیشتر باشد، سرعت موج P کمتر است. هر چند کانی‌های رسی باعث کاهش تخلخل و افزایش جزئی در سرعت موج می‌شود؛ اما اکثرا در مواردی این موضوع، صحت دارد که سنگ متشکل از ذرات درشت و بدون شکاف یا ریزترک باشد تا کانی رس سیمانی بتواند به طور قابل توجهی سرعت موج را در سنگ افزایش دهد (Yang and Hu, 2020). شکل‌پذیری سنگ‌های آرژیلیتی- مارنی تحت تأثیر عوامل بسیاری مانند ترکیب کانی‌شناسی، تخلخل، آب منفذی، محتوای کانی رسی، توزیع کانی رسی، دما، فشار، تراکم، سیمان‌شدگی و برخی مراحل دیاژنز است (Han et al., 2020). توزیع ذرات رسی تأثیر قابل توجهی بر ویژگی‌های کشسانی در سنگ‌های آرژیلیتی- مارنی دارد، بطوری‌که کانی‌های رسی سیمانی و موجود در خمیره سنگ‌های آرژیلیتی- مارنی بجای سیمان کلسیتی و کربناته، به دلیل عدم مقاومت کافی یا مقاومت بسیار کم نسبت به کانی‌هایی مثل کوارتز، قابلیت تراکم‌پذیری و پتانسیل نشست بالا تحت بارگذاری و همچنین تغییرات فیزیکی و شیمیایی سریع مانند ترک‌خوردگی و تشکیل منافذ، تحت عوامل محیطی، باعث کاهش سرعت امواج الاستیک شده و در واقع هرگز بعنوان کاهنده تخلخل یا مسدود کننده منافذ (Clogging)، در نمونه‌های آرژیلیتی- مارنی با محتوای رسی بالا، عمل نمی‌کنند (Thomas and Stieber, 1975; Minear, 1982; Han et al., 1986; Chu, 1987; Sams and Andrea, 2001; Ali et al., 2016; Zhao et al., 2020). در واقع وجود درصد بالایی از کانی‌های رسی می‌تواند عامل اصلی کنترل‌کننده دیاژنز باشد و سیمان‌شدگی را در رسوبات آرژیلیتی- مارنی با دیاژنز یا تحکیم ناقص کاهش دهد (Sams and Andrea, 2001). محاسبه و بررسی‌های مشابه نیز نشان می‌دهد که ویژگی‌های ریز ساختاری اثرات مشابه کانی‌شناسی بر سرعت موج P دارند و سرعت موج الاستیک با افزایش ریزترک‌ها و منافذ موجود در سنگ تا حد زیادی کاهش می‌یابد. وجود کانی‌های رسی در خمیره و سیمان سنگ‌های آرژیلیتی- مارنی با توجه به واکنش‌های شیمیایی و تمایل به جذب آب زیاد در آنها باعث افزایش تخلخل کل و موثر در سنگ‌های آرژیلیتی- مارنی می‌شود و تا حدود ۴۰٪ سرعت موج P کاهش می‌یابد این کاهش در نمونه‌های آزمایشگاهی بدلیل احتمال تنش‌های وارده و از دست دادن رطوبت و در نهایت افزایش ترک‌خوردگی بیشتر بچشم می‌خورد (Sams and Andrea, 2001). بر اساس مکانیک سنگ، انواع مختلف توزیع کانی‌های رسی بر خواص کشسانی سنگ‌های آرژیلیتی-مارنی بصورت ذرات تشکیل‌دهنده و جایگزینی بجای سیمان کربناته باعث کاهش سرعت امواج لرزه‌ای می‌شود. این کاهش در نمونه‌های مورد مطالعه نیز کاملا مشهود است. همچنین با مطالعه تصاویر میکروسکوپی نیز، می‌توان دریافت که نمونه‌های خاکستری تیره (SM1 و SM3)، بدلیل پیوند ذرات تشکیل‌دهنده سنگ نرم، بدلیل وجود درصد بالای سیمان کلسیتی و ریزترک‌ها و منافذ کمتر در سطح نمونه، سرعت امواج لرزه‌ای و مقاومت تک محوری بالاتری دارند. پارامترهای مقاومت برشی نیز دارای روند افزایشی در این نمونه‌ها نسبت به نمونه‌های زرد و سبز هستند. همچنین بررسی‌های سنگ‌شناسی و کانی‌شناسی نشان می‌دهد که نمونه‌های خاکستری بدلیل وجود کانی‌های کربنات کلسیم بیشتر و مونت‌موریونیت کمتر در بافت و خمیره خود، دارای دانسیته خشک بالاتر و سرعت امواج فراصوت نسبتا بیشتری دارند. بر اساس شکل ۱۱، در نمونه‌های مورد مطالعه رابطه خطی مستقیم بسیار خوبی بین سرعت امواج لرزه‌ای و تخلخل و دانسیته خشک با ضرایب همبستگی (R^2=0.92) بدست آمد. معادلات خطی با ضرایب همبستگی بالا حاکی از تأثیرگذاری بالای تخلخل بر سرعت موج می‌باشد. روابط خطی بین کانی‌شناسی و امواج لرزه‌ای ارتباط نسبتا خوبی با ضریب همبستگی تقریبا (R^2=0.70)،

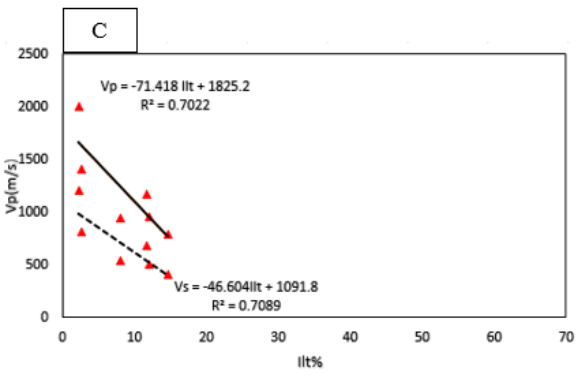
حاکی از ارتباط معکوس درصد کانی رسی مونت‌موریونیت و ایلیت با امواج لرزه‌ای بوده ولی وجود کائولینیت با ضریب همبستگی (R^2=0.19)، تاثیر چندانی در پارامترهای مقاومتی، فیزیکی و در سرعت امواج ندارد. افزایش درصد کربنات کلسیم نیز باعث افزایش پیوند بین ذرات باعث افزایش مقاومت و ویژگی‌های فیزیکی و سرعت امواج P و S می‌شود. همچنین همبستگی متوسط سرعت امواج لرزه‌ای نمونه‌ها با پلاژیوکلاز حاکی از آن است که در نمونه‌هایی که حاوی پلاژیوکلاز بیشتری هستند؛ بدلیل پتانسیل بالای هوازدگی و دگرسانی این کانی و تبدیل آن به کانی‌های رسی و سریسیتی شدن می‌تواند در کنار سایر پارامترهای موثر، باعث کاهش مقاومت و سرعت امواج لرزه‌ای شود، (Liu et al., 2018; Supandi et al., 2019; Sun et al., 2019; Tan et al., 2019; Liu et al., 2021, 2018; Ma et al., 2020; Zhao et al., 2020; Tan et al., 2021; Sun et al., 2021). وجود سطوح ضعف و ریزترک موجود در نمونه‌های مورد آزمایش نیز از عوامل کاهنده پارامترهای مقاومتی و سرعت امواج لرزه‌ای است. همچنین وجود سیمان کلسیتی بدلیل پر کردن فضای خالی دیگر ذرات تشکیل‌دهنده سبب بهبود خواص مقاومتی می‌گردد. از نتایج مربوط به ویژگی‌های مهندسی نمونه‌های مورد مطالعه شده می‌توان چنین استنباط نمود که نمونه‌ها از نظر مقاومت فشاری و برشی که ضعف پارامترهای مکانیکی بشمار می‌آید، از شرایط خوبی برخوردار نیستند. مقادیر محاسبه‌شده سرعت موج فشاری مابین ۲۰۰۰-۷۸۵ متر بر ثانیه، تغییر می‌کند. سرعت امواج در سنگ‌ها متناسب با کانی‌های تشکیل‌دهنده آن است در نمونه‌های مطالعه شده ترکیب کانی‌شناسی، تخلخل و دانسیته خشک، از عوامل مهم و تأثیرگذار در تغییرات سرعت موج فشاری می‌باشد. تحلیل همبستگی خطی به صورت مجزا مابین ویژگی‌های مهندسی و سرعت امواج لرزه‌ای نمونه‌های مورد مطالعه نشان داده شده است تا پارامترهایی که بیشترین تأثیر را برروی امواج لرزه‌ای دارند، تفکیک و مشخص گردند. مقاومت فشاری، زاویه اصطکاک داخلی، چسبندگی، مدول الاستیک از جمله پارامترهای مکانیکی هستند که همبستگی خوبی با امواج لرزه‌ای از خود نشان داده‌اند. همچنین با توجه به اهمیت شاخص دوام وارفتگی که بعنوان پارامتر فیزیکی موثر، در مقاومت سنگ‌های آرژیلیتی- مارنی و سنگ‌های حاوی کانی‌های رسی زیاد بشمار می‌آید؛ دارای ضریب همبستگی بالایی با سرعت امواج لرزه‌ای نمونه‌ها می‌باشد. بر اساس نمودارهای شکل ۱۱، پارامترهای تخلخل، دانسیته خشک، ترکیب کانی‌شناسی (مونت‌موریونیت، ایلیت و کربنات کلسیم)، موثرترین پارامترها بر سرعت امواج لرزه‌ای می‌باشند و با توجه به ارتباط سرعت امواج لرزه‌ای و پارامترهای مقاومتی، این همبستگی‌ها منطقی بنظر می‌رسد. بر این اساس با استفاده از روابط تجربی بدست آمده می‌توان سرعت امواج لرزه‌ای را، با معلوم بودن هر یک از پارامترهای مذکور پیش‌بینی کرد. این پیش‌بینی و همبستگی، باعث شناخت بهتر ویژگی‌های زمین‌شناسی مهندسی موثر بر مکانیسم‌های تضعیف مقاومت و پایداری سازه‌های مهندسی سنگ نرم، شده و به قابلیت‌های پیش بینی دقیق‌تر در کاربردهای ژئوتکنیکی کمک می‌کند (جدول ۸). شایان ذکر است که با توجه به عوامل موثر بر سرعت امواج در آزمایش فراصوت از جمله مقدار آب، درجه حرارت و ...، هرچند تمام اهتمام برای جلوگیری از دست‌خوردگی و آسیب نمونه‌ها در این تحقیق صورت گرفته است ولی با توجه به نوع نمونه‌ها با محتویات رسی بالا و حساسیت شدید به تغییرات دمایی و رطوبتی بروز خطا در نتایج دور از انتظار نبوده و بر این اساس برخی از روابط بدست آمده در سنگ‌های بکر و سالم بیشتر قابل استفاده هستند، بطوری‌که صحت‌سنجی روابط و داده‌های حاصل بر اساس مطالعات مشابه (Santi, 2006; Choi et al., 2019; Lee and Lee, 2020; Roufael et al., 2021; Majhi et al., 2021; Wonchang et al., 2022) نیز بیانگر این موضوع هستند که هر چند که روابط همبستگی قوی بین پارامترهای مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیک با سرعت امواج فراصوت وجود دارد اما این مطلب در شرایطی که از عدم

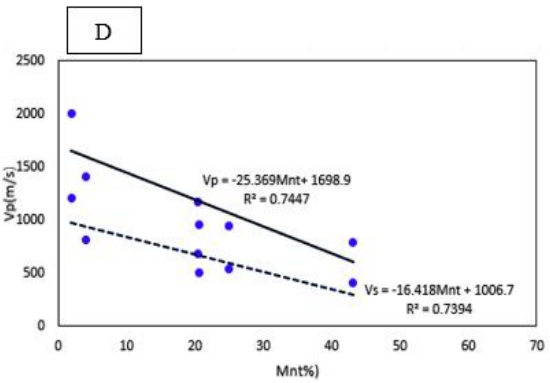
[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

دست‌خوردگی نمونه‌ها اطمینان داشته باشیم، منطقی می‌باشد و بیشتر روابط استاندارد مربوط به سنگ‌های بکر و سالم است (Goodman, 1989). همچنین ایجاد روابط بین ترکیب کانی‌های موثر در رفتار تغییرشکل‌پذیری و ویژگی‌های فیزیکی نمونه‌های سنگ نرم با سرعت امواج فراصوت درصد اطمینان بیشتری دارد. برای بهره‌گیری بیشتر از روابط در کنار روابط ارائه شده، می‌تواند روابط همبستگی جداگانه‌ای نیز براساس ترکیبی از چند پارامتر مورد مطالعه ارائه شده است که می‌تواند مطالب مذکور را تایید کند و معادلات ترکیبی نشان‌دهنده این است که سرعت امواج فراصوت دارای همبستگی قوی‌تری با پارامترهای فیزیکی، کانی‌شناسی و بطور کلی ویژگی‌های ذاتی در مقایسه با مقاومت فشاری تک محوری و مدول الاستیک می‌باشد. همچنین استفاده از معادلات ترکیبی می‌تواند برای پیش‌بینی ویژگی‌های مقاومتی و رفتاری سنگ‌های نرم با مطالعات دقیق‌تر در آینده مفید باشد (جدول ۱۰).



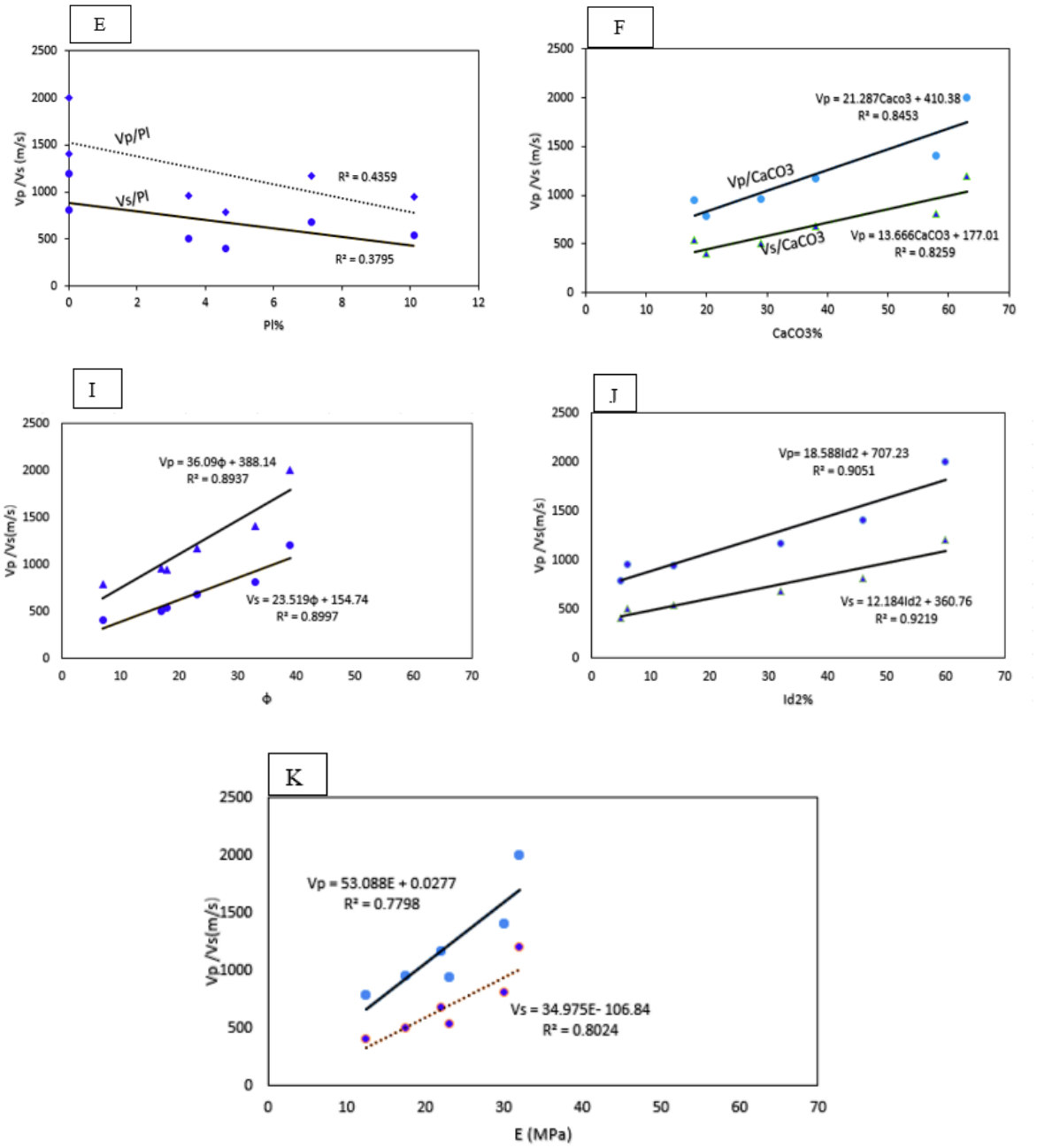






[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]



شکل ۱۱. نمودار همبستگی بین پارامترهای مهندسی و سرعت امواج لرزه‌ای سنگ‌های آرژیلیتی- مارنی تبریز: A) نمودار همبستگی درصد تخلخل و سرعت امواج لرزه‌ای. B) نمودار همبستگی دانسیته خشک و سرعت امواج فراصوت. C) نمودار همبستگی درصد ایلیت و سرعت امواج فراصوت. D) نمودار همبستگی درصد مونت‌موریونیت و سرعت امواج فراصوت. E) نمودار همبستگی درصد پلاژیوکلاز و سرعت امواج فراصوت. F) نمودار همبستگی کربنات کلسیم و سرعت امواج فراصوت. G) نمودار همبستگی UCS و سرعت امواج فراصوت. H) نمودار همبستگی چسبندگی و سرعت امواج فراصوت. I) نمودار همبستگی زاویه اصطکاک داخلی و سرعت امواج لرزه‌ای. J) نمودار همبستگی شاخص دوام چرخه دوم و سرعت امواج فراصوت. K) نمودار همبستگی مدول الاستیک و سرعت امواج فراصوت.

Fig. 11 Correlation diagram between engineering parameters and seismic wave velocity of Tabriz argillite-marly rocks: A) Correlation diagram of porosity percentage and seismic wave velocity. B) Correlation diagram of dry density and ultrasonic wave velocity. C) Correlation diagram of illite percentage and ultrasonic wave velocity. D) Correlation diagram of montmorillonite percentage and ultrasonic wave velocity. E) Correlation diagram of

plagioclase percentage and ultrasonic wave velocity. F) Correlation diagram of calcium carbonate and ultrasonic wave velocity. G) Correlation diagram of UCS and ultrasonic wave velocity. H) Correlation diagram of adhesion and ultrasonic wave velocity. I) Correlation diagram of internal friction angle and seismic wave velocity. J) Correlation diagram of second cycle durability index and ultrasonic wave velocity. K) Correlation diagram of elastic modulus and ultrasonic wave velocity.

جدول ۹. همبستگی‌ها و ضرایب رگرسیون (تک متغیره) پارامترهای فیزیکی، کانی‌شناسی و مکانیکی مرتبط با سرعت امواج لرزه‌ای سنگ های آرژیلیتی- مارنی تبریز

Table 9. Correlations and regression coefficients (univariate) of physical, mineralogical and mechanical parameters with seismic wave velocity of Tabriz argillite-marly rocks

شاخص	Vp	R^2	Vs	R^2
n %	Vp= - 40.38n+2100.6	0.93	Vs= - 26.089 n+1265.7	0.92
$\gamma_d(kN/m^3)$	Vp= $166.44\gamma_d - 1595.1$	0.85	Vs= $107.64\ \gamma_d - 1123.7$	0.84
Mnt %	Vp= - 25.37 Mnt+1825.2	0.75	Vs= -17.42 Mnt+1825.2	0.70
Ilt %	Vp= - 71.42 Ilt+1091.8	0.70	Vs= -71.42 Ilt+1825.2	0.70
$CaCO_3$ %	Vp= 21.28 $CaCO_3$+410.58	0.85	Vs= 13.66 $CaCO_3$+177.01	0.83
Id_2 %	Vp =18.58 Id2+707.23	0.90	Vs= 12.18 Id2+360.76	0.92
ϕ (deg.)	Vp =36.09 ϕ+388.14	0.89	Vs= 23.519 ϕ+154.74	0.89
c (MPa)	Vp =2583.1c+318.6	0.95	Vs= 168.42+318.6	0.95
E (MPa)	Vp =53.08 E+0.027	0.78	Vs= 34.97 E-106.84	0.80
UCS (MPa)	Vp =1282.7 UCS+602.93	0.95	Vs= 820.52 UCS+302.02	0.93

جدول ۱۰. همبستگی‌ها و ضرایب رگرسیون (چند متغیره) پارامترهای فیزیکی، کانی‌شناسی و مکانیکی با سرعت امواج لرزه‌ای سنگ‌های آرژیلیتی- مارنی تبریز

Table 10. Correlations and regression coefficients (multivariate) of physical, mineralogical and mechanical parameters with seismic wave velocity of Tabriz argillite-marl rocks

شاخص	**Vs**	**R^2**	**Vp**	**R^2**
n% / $\gamma_d(kN/m^3)$	Vs= - 63.96 n- 125.80 γ_d + 3933.70	0.94	Vp= - 96.24 n – 185.55 γ_d + 6035.5	**0.94**
Ilt % / Mnt %	Vs= - 19.94 Ilt – 10.24 Mnt + 1059.38	0.92	Vp= -27.75Ilt – 16.8Mnt +1772.0	**0.92**
ϕ· /c (Mpa)	Vs= 8.36 ϕ+1154.69 c+244.86	0.97	Vp= 12.84 ϕ+1770.95 c+ 526.36	**0.97**
E/ UCS (Mpa)	Vs= 6.89 E + 405.57UCS+ 340.03	0.32	Vp= 10.36E + 644.5UCS+660.68	**0.35**
Id%/$CaCO_3$%	Vs= -0.84Id2 + 12.78$CaCO_3$ +246.79	0.72	Vp= - 4.31 Id2+ 23.02 $CaCO_3$+487.04	**0.74**

نتیجه‌گیری

با توجه به تحلیل نتایج آزمایش‌ها، چند پارامتر سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، فیزیکی و مکانیکی برای نمونه‌های آرژیلیتی- مارنی نئوژن تبریز بررسی شده و تأثیر آنها بر روی ویژگی‌های مکانیکی به‌ویژه سرعت امواج لرزه‌ای در آزمایش فراصوت مورد مطالعه قرار گرفته است. براساس نتایج بررسی مقاطع نازک، نمونه‌ها از کوارتز، فلدسپات، سریسیت، اکسیدهای آهن و سایر مواد دانه‌ریز خمیره تشکیل شده‌اند. همچنین نتایج آنالیز XRD نشان می‌دهد که کانی کوارتز به‌عنوان کانی اصلی در همه نمونه‌های مورد بررسی بوده و کانی‌های ایلیت به‌عنوان کانی فرعی مشترک وجود دارند. مقدار کائولینیت نمونه‌ها بین ۴/۲ تا ۱۱/۳ درصد متغیر است، در حالی‌که مقدار مونتموریونیت از ۱/۹ تا ۳۰/۷ درصد متغیر است. بر اساس داده‌های کلسیمتری نیز مقدار کربنات کلسیم نمونه‌ها بین ۱۳/۵ تا ۶۳ درصد می‌باشد کانی‌های رسی مختلف از جمله کائولینیت، اسمکتیت (مونتموریونیت)، ایلیت و سایر کانی‌های اصلی مانند کلسیت نیز قابل مشاهده هستند. تصاویر SEM، نشان‌دهنده ساختار تقریبا گسسته با

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

پیوندهای ضعیف در نمونه‌های زرد و سبز و تا حدودی در نمونه‌های خاکستری ضعیف هست. در نمونه‌های خاکستری، ساختار کانی‌های رسی به دلیل وجود ایلیت فیبری و در برخی موارد کائولینیت ساختار تجمعی گسسته و در نمونه SM1، ساختار تجمعی (فلوکله)، قابل مشاهده می‌باشد. مقاومت نمونه‌ها مابین ۰/۱۴ تا ۱/۳ مگاپاسکال و مدول الاستیک آنها بین ۹ تا ۳۲ مگاپاسکال است. با توجه به رده-بندی آنون (Anon, 1979)، تمام نمونه‌های مورد مطالعه از نظر موج برشی و فشاری در رده خیلی سست قرار دارند. با توجه به نتایج مطالعات، کانی‌های رسی (مونت‌موریونیت و ایلیت)، کربنات کلسیم دارای ارتباط معناداری با سرعت امواج و ویژگی‌های مقاومتی دارد. بررسی همبستگی ویژگی-های مهندسی با سرعت امواج S وP نشان می‌دهد که شاخص‌های کانی‌شناسی و تخلخل، شاخص دوام و دانسیته خشک بر روی ویژگی‌های مقاومتی بیشترین تاثیر را دارد که این تاثیر بر سرعت امواج لرزه‌ای نیز چشمگیر است. سرعت موج فشاری با افزایش مقدار کربنات کلسیم و کاهش مقدار کانی مونت‌موریونیت، ایلیت و فلدسپار افزایش می‌یابد. با توجه به تاثیر دانسیته بر سرعت امواج، نمونه‌های چگال‌تر دارای سرعت موج بیشتری هستند. لازم به ذکر است که این روابط برای سنگ‌های آرژیلیتی- مارنی نئوژن تبریز کاربرد داشته و قابل تعمیم به سایر سنگ‌ها نمی‌باشد.

قدردانی

از گروه گمانه زنی آقای طاهری بخاطر تهیه و ارائه نمونه و از آزمایشگاه شرکت گمانه کاو به خاطر انجام آزمایشات فراصوت سپاسگزاری می‌شود.

References

Ali, A., Zubair Hussain, M., Rehman, K., & Toqeer, M. (2016). Effect of shale distribution on hydrocarbon sands integrated with anisotropic rock physics for AVA modelling: a case study. Acta Geophysica, 64(4), 1139–1163.

Anonymous (1979). Classification of rocks and soils for engineering geological mapping. part 1: Rock and soil materials. Bull Engineering Geological Environ, 19, 355–371.

ASTM D2854 (2021). Standard Test Method for Primary Calibration of Acoustic Emission Sensors

ASTM D2216 (2019). Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass.

ASTM D2974 (2022). Standard Test Methods for Determining the Water (Moisture) Content, Ash Content, and Organic Material of Peat and Other Organic Soils.

ASTM D4404 (2018). Standard Test Method for Determination of Pore Volume and Pore Volume Distribution of Soil and Rock by Mercury Intrusion Porosimetry.

ASTM D5607 (2016). Standard Test Method for Performing Laboratory Direct Shear Strength Tests of Rock Specimens Under Constant Normal Force - eLearning Course

ASTM D6444 (2016). Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Other Similar Weak Rocks.

ASTM D7012 (2011). Standard Test Method for Compressive Strength and Elastic Moduli of Intact Rock Core Specimens Under Varying States of Stress and Temperatures.

ASTM D73080 (2011). Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions.

Calcaterra, D., & Parise, M. (2010). Weathering as a predisposing factor to slope movements: an introduction (Vol. 23, No. 1, pp. 1-4). London: The Geological Society of London.

Calcaterra, D., & Parise, M. (2010). Weathering as a predisposing factor to slope movements: an introduction (Vol. 23, No. 1, pp. 1-4). London: The Geological Society of London.

Chen, H., & ZerYe, H. (2001). A preliminary study on the relationship between engineering properties and uniaxial compressive strength of weak sandstones. West. Pac. Earth Sci. 1(3), 297–338.

Choi, S.J., Kim, D.B., Lee, K.S., Kim, Y.U. (2019). The study on the physical and strength properties

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]

[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]

[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

of Lightweight aggregate concrete by replacement ratio of artificial lightweight aggregate. J. Korea Inst. Build. Constr, 313–322.

Chu, Z. (1987). Acoustic velocity logging interpretation of shaly sandstone-Also on the effect of clay on acoustic time difference. Well Logging Technology, 2, 46–55 (in Chinese), doi.org/10.12989/gae.

Faeghi, P. (2013). Creep phenomenon and consolidation behavior of Tabriz marl soil. master's thesis, Tabriz University, 88-paper.

Fereidooni, D., Khanlari, G. R., & Heidari, M. (2015). Assessment of a modified rock mass classification system for rock slope stability analysis in the Q-system, Earth Science Research Journal, 19(2), 147–152.

Fourmaintraux, D. (1976), Characterization of rocks; laboratory tests: Chapter IV in La Mechanique des roches applique auxouvr ges du genie civil by Marc Panet et al., Ecole Nationale des Ponts et Chaussees.

Goodman- Richard, E. (1989). Introduction to rock mechanics, 2nd Ed., 179-200.

Han, D., Nur, A., & Morgan, D. (1986). Effects of porosity and clay content on velocities in sandstones. Geophysics, 51(11), 2093– 2107.

Han, T., Liu, S., Xu, D., & Fu, L. (2020). Pressure-dependent crossproperty relationships between elastic and electrical properties of partially saturated porous sandstones. Geophysics, 85(3), MR107– MR115.

Hang, S.Q., & Hu, B. (2020). Creep & permeability evolution behavior of red sandstone containing a single fissure under a confining pressure of 30 MPa. Scientific Reports, 10(1), 1900

Jalali-Milani, S., Asghari-Kaljahi, E., Barzegari, G., & Hajialilue-Bonab, B. (2017). Consolidation deformation of Baghmisheh marls of Tabriz, Iran, Geomechanics and Engineering, 12(4), 561-577

Jamshidi, A., Sousa, L. (2024). Strength Characteristics, Ultrasonic Wave Velocity, and the Correlation between Them in Clay Bricks under Dry and Saturated Conditions. Material, 17, 1353. doi.org/10.3390/ma17061353

Kanji, M.A., Galván, V.L. (1998). Correlation of properties of soft rocks. In: Proceedings of the 2nd International Symposium on Hard Soils and Soft Rocks, Naples. Rotterdam: A.A. Balkema; pp. 239e44.

Kim, H., Cho, J. W., Song, I., & Min, K. B. (2012). Anisotropy of elastic moduli, P-wave velocities, and thermal conductivities of Asan Gneiss, Boryeong Shale, and Yeoncheon Schist in Korea, Engineering Geology, 147– 148, 68-77.

Knackstedt, M., Arns, C., & Pinczewski, W.V. (2010). Velocity porosity relationships: predictive velocity model for cemented sands composed of multiple mineral phases. Geophysical Prospecting, 53(3), 349–372.

Lamas, L., Irigaray, C., & Chaconne, J. (2002). Geotechnical characterization of carbonate marls for the construction of impermeable dam cores. Engineering Geology, 66, 94-283.

Lee, T.G., Lee, J.H. (2020). Proposal of prediction model of settling time and compressive strength of concrete by nondestructive ultrasonic pulse velocity at early age. J. Constr. Build. Mater. [CrossRef]

Liu, X.S., Song, S.L., Tan, Y.L., Fan, D.Y., Ning, J.G., Li, X.B., & Yin, Y.C. (2021). Similar simulation study on the deformation and failure of surrounding rock of a large section chamber group under dynamic loading. International Journal Mining Science Technology 31(3), 495–505. doi.org/ 10.1016/j.ijmst.

Liu, Z.B., Shao, J.F., Xie, S.Y., Conil, N., Zha, W.H. (2018). Effects of relative humidity and mineral compositions on creep deformation and failure of a claystone under compression. International Journal Rock Mechanic Mining 103:68–76. doi.org/10.1016/j.ijrmms.

Ma, Q., Tan, Y.L., Liu, X.S., Gu, Q.H., & Li, X.B. (2020). Effect of coal thicknesses on energy evolution characteristics of roof rock-coal foor rock sandwich composite structure and its damage constitutive model. Compos Part B Engineering. doi.org/ 10.1016/j.

Majhi, R.K., Padhy, A., Nayak, A.N. (2021). Performance of structural lightweight aggregate concrete produced by utilizing high volume of fly ash cenosphere and sintered fly ash aggregate with silica fume. Clean. Eng. Technol.

Mavko, G., Mukerji, T. & Dvorkin, J. (2009). The Rock Physics Handbook: Tools for Seismic

Analysis of Porous Media. Cambridge University Press.

McKenzie, D. (1972). Active tectonics of the Mediterranean region. Geophysical Journal International, 30(2), 109-185.

Minear, J.M. (1982). Clay models and acoustic velocities. SPE-11031- MS. SPE Annual Technical Conference and Exhibition.

Mohamadi, J. & Zekri, A. (2006). Geotechnical features of Tabriz Marl. The Geological Society of London.

National Geological Organization. Mineral Exploration and Exploration of the Country (1993). Geological Map of Tabriz at a Scale of 1:100,000.

Nefeslioglu, H. A. (2013). Evaluation of geo-mechanical properties of very weak and weak rock materials by using non-destructive techniques: Ultrasonic pulse velocity measurements and reflectance spectroscopy, Engineering Geology, 160, 8-20.

Pappalardo, G. (2015). Correlation Between P-Wave Velocity and Physical–Mechanical Properties of Intensely Jointed Dolostones, Peloritani Mounts, NE Sicily", Rock Mechanics and Rock Engineering, 48(4), 1711–1721.

Priyamali, M.W.S. and Priyankara, N.H. (2023). The Influence of Preconsolidation Pressure on Undrained Shear Strength Characteristics of Peaty Clay in Sri Lanka. doi.org/10.4038/engineer.v56i4.7618

Reiben, H. (1935). Contribution à la géologie de l'Azerbeidjan Persan. Bulletin de la Société Neuchâteloise des Sciences Naturelles, 59, 19–144

Roufael, G., Beaucour, A.L., Eslami, J., Hoxha, D., Noumowé, A. (2021). Influence of Lightweight aggregates on the physical and mechanical residual properties of concrete subjected to high temperatures. J. Constr. Build. Mater. [CrossRef]

Ruedrich, J., Weiss, T., & Siegesmund, S. (2001). Deterioration characteristics of marbles from the Marmopalais Postdam (Germany): a compilation", Zeitschrift der Deutschen Geologischen Gesellschaft, 152, 637–663.

Sabri, S., Verma, A. K., Singh, T. N. (2025). Direct and indirect methods for uniaxial compressive strength estimation in various geo-environments: A review. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.01.050

Sadrekarimi, J., Zekri, A. & Majidpour, H. (2006). Geotechnical features of Tabriz Marl, IAEG, No. 335.

Sams, M.S., & Andrea, M. (2001). The effect of clay distribution on the elastic properties of sandstones. Geophysical Prospecting, 49(1), 128–150.

Santi, P. (2006). Field methods for characterizing weak rocks for engineering. Environment Engineering Geoscience 12:1–11.

Saxena, A., Sabillon- Orellana, C., & Prozzi, J. (2024). Prediction of compressive strength in sustainable concrete using regression analysis, https://link.springer.com/journal/10163.

Shalabi, F. I., Cording, E. J. & Al-Hattamleh, O. H. (2007). Estimation of rock engineering properties using hardness tests, Engineering Geology, 90, 138–147.

Sharma, P. K., Khandelwal, M. & Singh, T. N. (2011). A correlation between Schmidt hammer rebound numbers with impact strength index, slake durability index and P-wave velocity, International Journal of Earth Sciences, 100, 189–195.

Smith, S., Ajanta, A. (2015). Use of agar biopolymer to improve the shear strength behavior of sabarmati sand. doi.org/10.1080/19386362.2016.1152674

Soleymani Qaragol, M. (2007), Investigating the resistance and deformability of Tabriz marls based on field and laboratory tests, master's thesis, Tabriz University, paper 149 (in Persian).

Stadmuller , M., Jadwiga, I., Jarzyna, A. (2023). Estimation of Petrophysical Parameters of Carbonates Based on Well Logs and Laboratory Measurements, a Review. Energies,16, 4215. doi.org/10.3390/en16104215

Sun, C.L., Li, G.C., Gomah, M.E., Xu, J.H. & Rong, H.Y. (2021). Experimental investigation on the nanoindentation viscoelastic constitutive model of quartz and kaolinite in mudstone. International Journal Coal Science Technology 8(5):925–937. doi.org/10.1007/s40789-020-00393-2

Sun, L.H., Ji, H.G., Yang, B.S. (2019). Physical and mechanical characteristic of rocks with weakly

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]

cemented strata in Western representative mining area. Journal China Coal Soc. 44(3), 865–873. doi.org/10.13225/j.cnki.jccs.

Supandi, S., Zakaria, Z., Sukiyah, E. & Sudradjat, A. (2019). The Influence of Kaolinite - Illite toward mechanical properties of claystone. From the journal Open Geosciences. doi.org/10.1515/geo-2019-0035

Tan, Y.L., Fan, D.Y., Liu, X.S., Song, S.L., Li, X.F. & Wang, H.L. (2019). Numerical investigation of failure evolution for the surrounding rock of a super-large section chamber group in a deep coal mine. Energy Science Engineering 7(6):3124–3146. doi.org/10.1002/ese3.484

Tan, Y.L., Yu, F.H., Ma, C.F., Zhang, G.S. & Zhao, W. (2021). Research on collaboration control method of bolt/cable-surrounding rock deformation in coal roadway with weakly cemented soft rock. Coal Science Technology 49(1), 198–207.doi.org/10.13199/j. cnki.cst.

Thomas, E.C. & Stieber, S.J. (1975).The distribution of shale in sandstones and its effect on porosity. PWLA-1975-T, SPWLA 16th Annual Logging Symposium, New Orleans.

U.R. ISRM, J. Hudson (2007). The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2006-1974, Kozan, Ankara.

Wang, P., Ma, C., Cai, M. (2023). Relationship between ultrasonic oroperties with loading stresses and challenges in deep mining. Journal of central south university. 30(11), 3737-3762. doi: 10-1007/S11771-023-5473-7

Wang, Q., Ji, S., Sun, S. & Marcotte, D. (2009). Correlations between compressional and shear wave velocities and corresponding Poisson's ratios for some common rocks and sulfide ores. Tectonophysics, 469(1-4), 61–72

Wonchang, K., Keesin, J., Choi, H. and Lee, T. (2022). Correlation Analysis of Ultrasonic Pulse Velocity and Mechanical Properties of Normal Aggregate and Lightweight Aggregate Concretes in 30–60 MPa Range. Materials. doi.org/10.3390/ma15082952

Worthington, P.F. (1994). Effective integration of core and log data. Mar. Pet. Geol., 11, 457–466.

Yang, S.Q. & Hu, B. (2020) Creep and permeability evolution behavior of red sandstone containing a single fissure under a confining pressure of 30 MPa. Scientific Reports, 10(1), 1900.

Zhang, X.D., Li, J., Hu, X.F. & Hu, Y.L., Q., Z. (2018). Study of frozen Eolian soil loading model and experiment considering damage characteristic. Journal Disaster Prevent Mitigation Engineering 38(1), 7–13. doi.org/ 10.13409/j.cnki.jdpme.2018.01.002

Zhao, L., Wang, Y., Liu, X., Zhang, J., Liu, Y., Qin, X. & Geng, J. (2020). Depositional impact on the elastic characteristics of the organic clay reservoir and its seismic application: a case study of the Longmaxi-Wufeng clay in the Fuling gas field, Sichuan Basin Depositional elastic effects. Geophysics, 85(2), B23–B33

[Downloaded from ndea10.khu.ac.ir on 2026-08-29]
[DOR: 20.1001.1.22286837.1404.19.1.2.5]
[DOI: 10.22034/JEG.2025.19.1.1019691]