Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Summer 2026, Vol. 16(2): 214 - 233

Research Article

Effect of textural characteristics on the mechanical and physical properties of some sedimentary rocks

Pouria Heydarian [1]*, Mohamad Reza Assef [2], Jafar Khademi Hanidi[3]

1- Geological Hazards Department, Natural Disaster Research Institute, Tehran, Iran
2- Department of Applied Geology, Faculty of Earth Sciences, Kharazmi University, Tehran, Iran
3- Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Abstract
In rock engineering projects, the determination of mechanical properties is essential for assessing rock mass behavior. Rock texture has a pronounced influence on the mechanical behavior of rocks, including their cuttability, drillability, and machinability. In rock engineering applications, the selection and optimal performance of drilling equipment depend on the quality and quantity of available textural and mechanical data. Previous studies have shown that rock mass strength is governed by the properties of the intact rock and the discontinuities within it, while the strength characteristics of intact rock are themselves controlled by mineralogical composition and rock texture. Accordingly, evaluating the interaction among textural, petrophysical, and mechanical parameters remains a key consideration in assessing the short- and long-term behavior of rock structures. In this study, the relationships among physical properties, textural characteristics, and uniaxial compressive and tensile strengths were investigated for 18 sedimentary rock samples collected from various locations across the country. Physical properties, uniaxial compressive strength, and Brazilian tensile strength were determined through laboratory testing, while textural characteristics were quantified via thin-section analysis. Linear and multivariate regression analyses were then employed to establish relationships between the physical and mechanical properties and the textural characteristics of the samples. The results reveal that rock texture exerts distinct effects on the mechanical and physical properties of rocks, with textural parameters influencing each physical and strength property differently and ultimately governing the overall mechanical behavior of the rock samples.
Keywords: *Sedimentary rock, Uniaxial compressive strength, Brazilian tensile strength, Texture coefficient, Multivariate regression.*

1-Introduction

Aggregates are widely used in various structures within critical infrastructure systems, including highways, tunnels, critical buildings, and dams. The mechanical and physical properties of aggregates have a great impact on the service life, reliability, and resilience of critical infrastructure. Much research has been conducted on the textural properties, their relationship, and their effect on the mechanical and physical properties of rocks. Olsson (1974), after conducting studies in this field, has suggested that there is a linear relationship between the yield stress and the root mean square of the grain size for marble (Öztürk et al., 2004). Bell (1978) points out that the strength properties may be correlated with the density of the grains of the rocks (Öztürk et al., 2004). Přikryl (2001) investigated the effect of grain size on strength and showed that there is an inverse logarithmic relationship between grain size and rock strength, as previously suggested by Eberhardt (Přikryl, 2001). Howarth and Rowlands (1987) developed the theory of textural coefficient (TC), with the help of which the changes in the mechanical properties of rocks can be determined from the textural properties of the rock. They also reported that the stronger the contact between the grains

* Corresponding author: phpheidaryan@gmail.com
DOI: 10.22055/aag.2026.51368.2552
Received: 2025-12-28
Accepted: 2026-09-10

ISSN: 2717-0764

and the higher the density of the grains, the higher the uniaxial compressive strength of the rock. Ulusay et al. (1994) reported that textural features are more important than mineralogical composition, especially for indicating the mechanical behavior of rocks (Öztürk et al., 2014). Gupta and Sharma (2012) demonstrated a direct relationship between various textural parameters, such as the aspect ratio (AR), grain size, and preferred orientation (SPO), and the velocity of S and P seismic waves. They also showed that the damping characteristics of P and S waves have an inverse relationship with the aspect ratio (AR) and the preferred orientation of grains (SPO). However, other researchers have found conflicting results, including Alber & Kahraman (2009); Bell (1978) and Fahy et al. (1979). This discrepancy may be due to the differing origins of the rocks studied.

2- Material and methods

In this study, physical and mechanical tests were first conducted to determine the porosity, dry density, uniaxial compressive strength, Schmidt hammer rebound value, and Brazilian tensile strength of the samples. Subsequently, to determine and quantify the textural characteristics of the rocks, thin section studies were carried out under a polarizing microscope, and the rock texture was quantified with the help of relevant software. The relationship between the textural features of the rocks and their mechanical and physical properties was then determined using statistical methods. To ensure the practical and operational applicability of the results in the country's ongoing projects, 18 rock samples were selected and collected from active railway and tunnel construction sites in the provinces of Tehran, Qom, and Khuzestan. Tables 1 and 2 show the results related to physical and mechanical properties. Howarth and Rowlands (1987) defined a textural coefficient and proposed a relationship for its quantification, concluding that the textural coefficient can be used to predict the rock's cuttability rate. The Textural Coefficient (TC) is a dimensionless quantitative value that measures the texture of a rock. First developed by Howarth and Rowlands (1987), it is used to predict the cuttability and strength properties of rock.

$$TC=AW\left[\left(\frac{N_0}{N_0+N_1}\times\frac{1}{FF_0}\right)+\left(\frac{N_0}{N_0+N_1}\times AR_1\times AF_1\right)\right]$$

Table1. Mechanical properties of samples

σt (MPa)	(R) Schmit	σc (MPa)	Sample Code	σt (MPa)	(R) Schmit	σc (MPa)	Sample Code
1.25	46	17.6	BH1	1.6	40	27.60	GH-UP
1.84	41	25.20	BH3	1.75	20	10.40	GO-3
3.4	26	23.00	BH4	2.53	55	12.14	GO-2
4.36	37	33.00	BH5	1.62	38	17.18	MH-1
5.28	38	29.00	BH6	1.5	45	28.00	CA
3.6	40	31.00	BH7	2.13	28	32.25	LA-1
5.70	50	45.00	BH8	5.77	<20	62.56	LA-2
3.20	34	18.00	BH9	8.24	36	61.00	LA3
6.40	51	48.00	BH10	5.6	53	42.00	LA4

Table 1. Physical properties of the samples

(m/s)V_P	n (%)	(gr/cm^3) γ_d	Sample.N	(m/s)V_P	(%) n	(gr/cm^3) γ_d	Sample.N
1570	21	2.32	BH1	1500	15	2.42	GH-UP
1430	25	2.24	BH2	1660	21	2.38	GO-3
1330	7	2.37	BH4	1690	12	2.27	GO-2
1445	10	2.26	BH5	1580	13	2.25	MH-1
1140	8	2.39	BH6	1660	10	2.36	CA
1600	20	2.37	BH7	1460	12	2.29	LA-1
1530	13	2.45	BH8	1240	6	2.43	LA-2
1405	16	2.42	BH9	1380	6	2.36	LA3
1160	5	2.41	BH10	1220	9	2.46	LA4

ISSN: 2717-0764

3-Results and discussions

The relationship between the Textural Coefficient (TC) and the Brazilian Tensile Strength (BTS) of rocks has been investigated by various researchers, including Merriam et al. (Merriam et al., 1970), Öztürk et al. (2004), and Hemmati et al. (2020).

The results obtained in this study show good agreement with the findings of previous researchers, such as Öztürk et al. (2004). As can be seen in Figure 1, there is a direct relationship between the Brazilian Tensile Strength and the rock's textural coefficient. However, the coefficient of determination is low (R2=0.23). The coefficient of determination obtained from the study by Öztürk et al. (2004). Merriam et al. (1970) attribute the weak relationship between these two parameters to the presence of cracks on the surface of the rock-forming minerals.

A linear regression analysis was performed to investigate the relationship between the Schmidt hammer rebound number and the textural coefficient of the rocks (Figure 1). The analysis revealed a direct and linear relationship between these two parameters, although the coefficient of determination (R2) for this relationship was low (R2=0.14). The results are consistent with the findings of Öztürk et al. (2004).

The relationship between the Textural Coefficient (TC) and the porosity percentage of rock samples was investigated in this thesis, with the results shown in Figure 2. Based on this figure, it is evident that there is no strong correlation between the textural coefficient and porosity, as indicated by a low coefficient of determination (R2=0.18). This relationship suggests that these two parameters are nearly independent of each other, and porosity is not a strong indicative parameter for describing the textural coefficient of rocks.

The relationship between the density of rocks and the textural coefficient of the samples examined in this study is shown in Figure 2. The dry density of the rock has a good correlation (R2=0.63) with the textural coefficient. This shows that as the density of the rocks increases, their textural coefficient values also increase. In other words, an increase in the percentage of grains compared to the matrix and pore spaces within the rock's composition leads to an increase in the rock's weight. On the other hand, as the percentage of solid particles (mineral grains) in the rocks increases, the rock's textural coefficient will also increase. Therefore, there is a direct relationship between them.

Based on the results obtained in this study, the relationship between the textural coefficient and wave velocity is an inverse relationship with a moderate coefficient of determination (R2=0.47), as can be seen in Figure 5. Research conducted by Gupta and Sharma (2012) indicates an inverse relationship between these two parameters, which is consistent with the results of this study. However, these findings contradict the results of Atici and Comakli (2019). The reason for this contradiction could be the type of rocks studied, as they investigated igneous rocks.

Based on these results, a multivariate regression analysis reveals that the textural coefficient has a weak correlation with the mechanical properties of the rock. This is because the textural coefficient represents the geometric properties of the rock texture, and other textural properties such as mineralogical composition, intercrystalline bonding, etc., are not taken into account. Among the physical properties, the results of the multivariate regression analysis show that dry density and P-wave velocity have a stronger correlation and higher importance than the porosity percentage.

ISSN: 2717-0764
CC BY

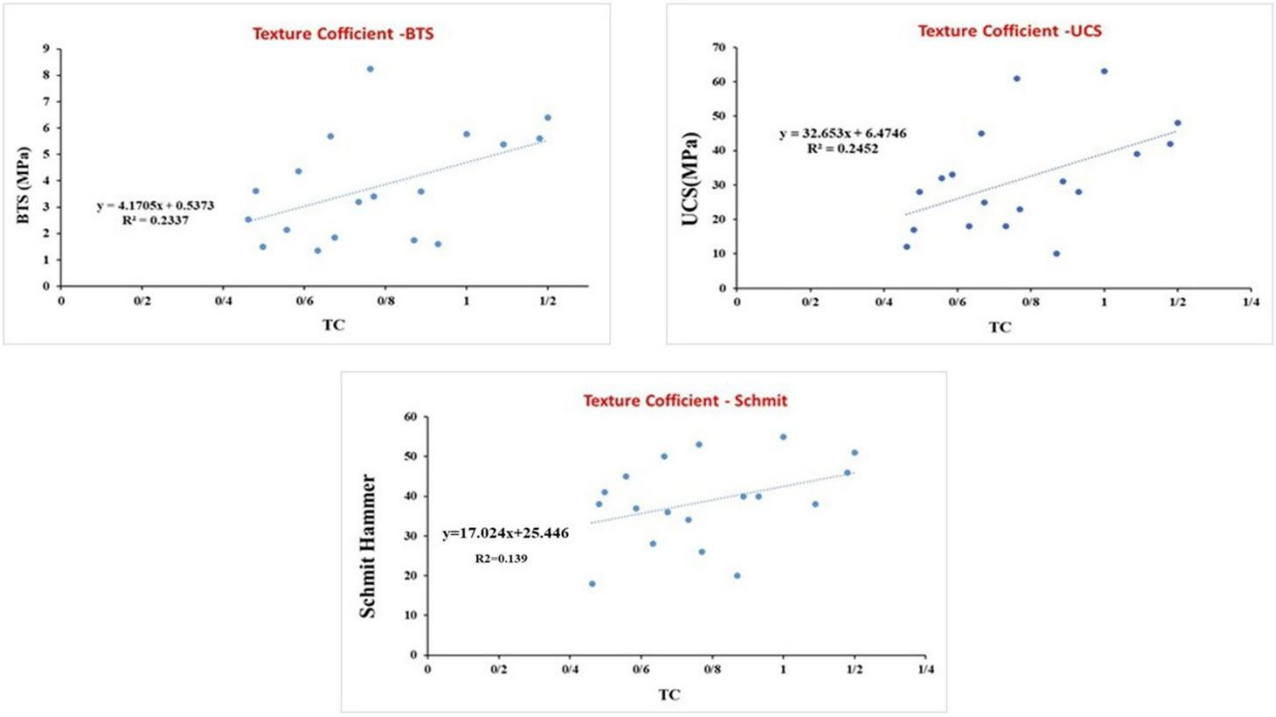


Fig 1. Relationship between texture cofficient and mechanical properties of rock samples

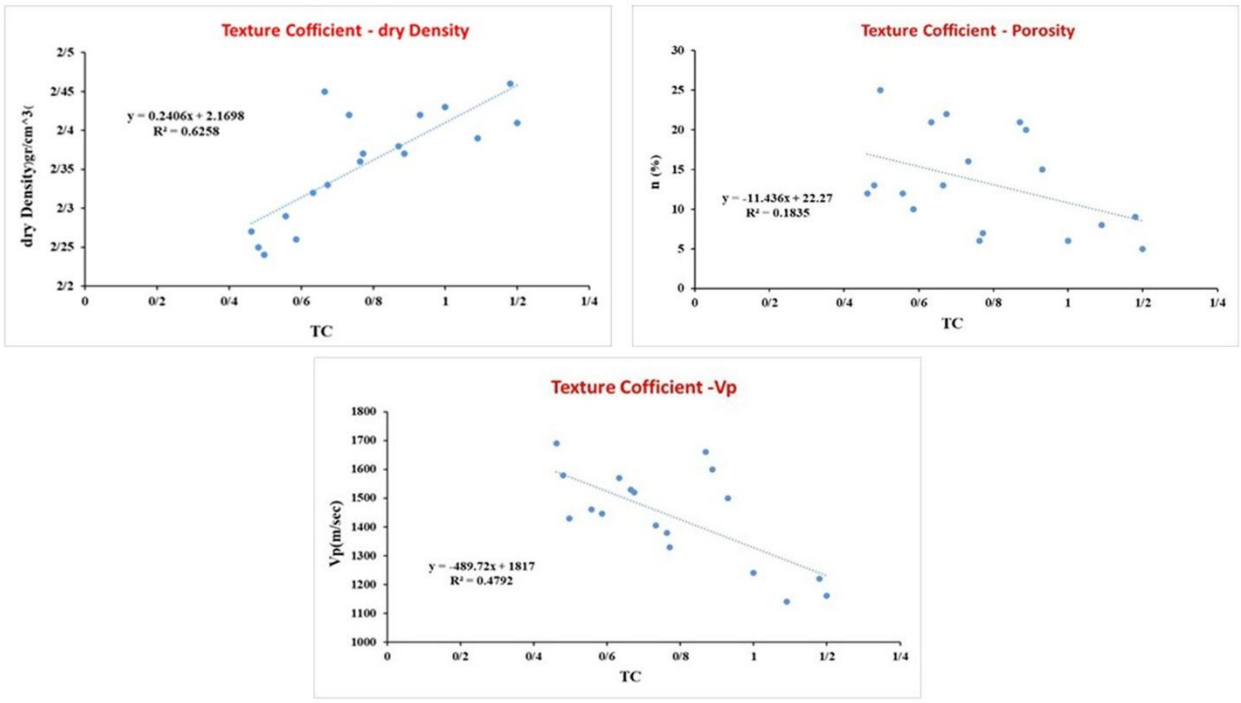


Fig 2. Relationship between texture coefficient and physical properties of rock samples

4-Conclusion

- The textural coefficient has a low coefficient of determination (R^2=0.23) with mechanical properties. In other words, its influence on mechanical properties is negligible because the textural coefficient represents only the geometric characteristics of the rock texture. Other textural parameters, such as the number and volume of pores, and structural features (like microcracks and grain orientation), are not considered in the textural coefficient relationship.

ISSN: 2717-0764
CC BY

- Among the physical properties influencing rock texture, the specific gravity of solid particles (Gs) has the most significant effect. This is because an increase in the specific gravity of the grains indicates a higher number of aggregates within the rock. Consequently, it has a substantial impact on the geometric properties of the rock's texture.
- The results of the multivariate regression analysis show that the textural and physical properties have a relatively good correlation with each other. Their relationship is statistically significant, and they can be used to predict each other's values.
- An increase in the textural coefficient leads to a decrease in the P-wave velocity of the rock. The reason is that the irregularity of the rock's fractal dimension has a greater impact than other textural properties, such as grain size and the aspect ratio of the grains. This is because the irregularity of the fractal dimension lengthens the path of the waves as they travel through the rock.

5-References

Alber, M., Kahraman, S., 2009. Predicting the uniaxial compressive strength and elastic modulus of a fault breccia from texture coefficient. Rock Mechanics and Rock Engineering 42(1), 117–127. https://doi.org/10.1007/s00603-008-0167-x.

Atici, U., Comakli, R., 2019. Evaluation of the physico-mechanical properties of plutonic rocks based on texture coefficient. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 119(1), 63–69. https://doi.org/10.17159/2411-9717/2019/v119n1a8.

Bell, F.G., 1978. The physical and mechanical properties of the fell sandstones, Northumberland, England.Engineering Geology 12, 1–29.https://doi.org/https://doi.org/10.1016/00137952(78)90002-9

Fahy, M.P., Guccione, M.J., 1979. Estimating strength of sandstone using petrographic thin-section data. Bulletin of the International Association of Engineering Geology 16(4), 467–485. https://doi.org/https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/1979

Gupta, V., Sharma, R., 2012. Relationship between textural, petrophysical and mechanical properties of quartzites: A case study from northwestern Himalaya. Engineering Geology 135–136, 1–9. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.02.006.

Hemmati, A., Ghafoori, M., Moomivand, H., Lashkaripour, G.R., 2020. The effect of mineralogy and textural characteristics on the strength of crystalline igneous rocks using image-based textural quantification. Engineering Geology 266, 105467. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105467.

Howarth, D.F., Rowlands, J.C., 1987. Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties. Rock Mechanics and Rock Engineering 20(1), 57–85. https://doi.org/10.1007/BF01019511.

Merriam, R., Rieke, H.H., Kim, Y.C., 1970. Tensile strength related to mineralogy and texture of some granitic rocks. Engineering Geology 47(4), 155–160. https://doi.org/10.1016/0013-7952(70)90010-4.

Olsson, W.A., 1974. Grain size dependence of yield stress in marble. Journal of Geophysical Research 79, 4859-4861. https://doi.org/10.1029/jb079i032p04859.

Öztürk, C.A., Nasuf, E., Bilgin, N., 2004. The assessment of rock cutability and physical and mechanical rock properties from a texture coefficient. Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy 104(7),397-402. https://www.researchgate.net/publication/268147870.

ISSN: 2717-0764

Ozturk, C.A., Nasuf, E., Kahraman, S., 2014. Estimation of rock strength from quantitative assessment of rock texture. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 114(6), 471-480. https://www.researchgate.net/publication/287291817.

Přikryl, R., 2001. Some microstructural aspects of strength variation in rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 38(5), 671–682. https://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00031-4.

Ulusay, R., Tureli, K., Ider, M.H., 1994. Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariate statistical techniques. Engineering Geology 38, 135-157. https://doi.org/10.1016/0013-7952(94)90029-9.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Heydarian. P., Assef. M., 2026. Khademi Hanidi. J,. Effect of textural characteristics on the mechanical and physical properties of some sedimentary rocks. Adv. Appl. Geol. 16 (2), 214-233.
DOI: 10.22055/aag.2026.51368.2552
https://aag.scu.ac.ir/article_20921.html

©2026 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

ISSN: 2717-0764

مقاله پژوهشی

تاثیر ویژگی‌های بافتی بر خواص مکانیکی و فیزیکی تعدادی از سنگ‌های رسوبی

پوریا حیدریان
گروه مخاطرات زمین‌شناختی، پژوهشکده سوانح طبیعی، تهران، ایران
محمد رضا آصف
گروه زمین‌شناسی کاربردی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
جعفر خادمی حمیدی
گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

phpheidaryan@gmail.com
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۰/۰۷ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۶/۱۹

چکیده
در تمام پروژه‌هایی که بر روی مصالح سنگی اجرا می‌شود، اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی در تعیین رفتار توده سنگ ضروری است. ویژگی‌های بافتی سنگ‌ها به‌طور مشخص بر رفتار مکانیکی سنگ‌ها، برش‌پذیری، حفرپذیری و قابلیت حفر با ماشین اثر می‌گذارند. در مسائل مهندسی سنگ، انتخاب تجهیزات حفاری و عملکرد بهینه آن‌ها به کیفیت و کمیت داده‌های بافتی و مکانیکی سنگ‌ها وابسته است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که مقاومت توده سنگ تابع ویژگی‌های سنگ بکر و ناپیوستگی‌های موجود در آن است و ویژگی‌های مقاومتی سنگ بکر نیز تابع ترکیب کانی‌شناسی و بافت سنگ می‌باشد. بررسی برهم‌کنش بین پارامترهای بافتی، پتروفیزیکی و مکانیکی سنگ همچنان از موضوعات مهم در ارزیابی رفتار کوتاه‌مدت و بلندمدت سازه‌های سنگی محسوب می‌شود. در این تحقیق رابطه بین ویژگی‌های فیزیکی، بافتی و مقاومت تراکمی، کششی ۱۸ نمونه سنگی از سنگ‌های رسوبی که از نقاط مختلف کشور برداشت شده‌اند، با انجام آزمایش‌های تعیین ویژگی‌های فیزیکی، مقاومت تراکمی تک محوری و آزمون مقاومت کششی برزیلی بر روی نمونه سنگ‌های جمع آوری شده، در آزمایشگاه تعیین شده است سپس با آنالیز مقاطع نازک نمونه سنگ‌ها ویژگی بافتی آنها مشخص گردید و با استفاده از روش‌های آماری از جمله رگرسیون خطی و چند متغیره رابطه بین ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی با ویژگی‌های بافتی نمونه سنگ‌ها تعیین شده است. نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق بیانگر رفتارهای متفاوتی از بافت سنگ در برابر ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی سنگ‌ها است بطوریکه ویژگی‌های بافتی در نمونه سنگ‌ها بر روی هرکدام از ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی آنها تاثیر متفاوتی خواهند داشت و کنترل کننده رفتار سنگ‌ها می‌باشند.

واژه‌های کلیدی: *سنگ رسوبی، مقاومت تراکمی تک محوری، مقاومت کششی برزیلی،ضریب بافتی ، رگرسیون چند متغیر*

۱-مقدمه
مصالح سنگی به طور گسترده در بسیاری از سازه‌ها در سیستم‌های زیرساختی حیاتی مانند بزرگراه‌ها، تونل‌ها، ساختمان‌های حیاتی، سدها و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مصالح سنگی تأثیر زیادی بر عمر مفید، قابلیت اطمینان و تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی دارد. تحقیقات نشان داده است که ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مصالح سنگی ارتباط نزدیکی با ویژگی‌های بافتی آنها دارد. ترکیب مودال، شکل کانی و توزیع اندازه دانه و مقدار ماتریس ریزدانه بر مقاومت سنگدانه در برابر خرد شدن و سایش تأثیر دارند. پراکندگی فضایی کانی‌ها نیز تأثیر مهمی بر خواص مکانیکی سنگ‌ها دارد. همبستگی بین خواص مکانیکی و پتروگرافی کمی سنگ‌ها به طور همزمان به خواص پتروگرافی مختلفی وابسته است. بنابراین، بیشتر مطالعات عمدتاً بر روی گروه‌هایی از سنگ‌ها یا ویژگی‌های زمین‌شناسی متمرکز شده‌اند. خصوصیات بافتی اثرگذار بر مقاومت سنگ عبارت‌اند از: ۱- اندازه دانه ۲- شکل دانه ۳- درجه قفل‌شدگی ۴- تخلخل ۵- جهت‌یابی دانه‌ها و ۶- ماهیت مرزهای دانه (Howarth and Rowlands, 1987). بافت سنگ به‌صورت درجه بلورین شدگی، اندازه دانه، گرد شدگی و یا فابریک یا رابطه هندسی

مواد تشکیل‌دهنده سنگ تعریف می‌گردد (Howarth and Rowlands, 1987).

۲-پیشینه تحقیق

در زمینه خصوصیات بافتی، رابطه و تأثیر آن‌ها بر خصوصیات مکانیکی و فیزیکی سنگ‌ها تحقیقات زیادی انجام شده است. Olsson (۱۹۷۴) بعد از انجام مطالعاتی در این زمینه پیشنهاد داده است که یک رابطه خطی بین تنش تسلیم و مربع ریشه میانگین اندازه دانه‌ها برای سنگ مرمر وجود دارد (Özlürk et al., 2004). Bell (1978) اشاره می‌کند که ویژگی‌های مقاومتی ممکن است با تراکم آرایش دانه‌های (Packing density) سنگ‌ها تطابق داشته باشد (Özlürk et al., 2004). Přikryl (2001) اثر اندازه دانه بر روی مقاومت را بررسی کرد و نشان داد که یک رابطه لگاریتمی معکوس بین اندازه دانه و مقاومت سنگ وجود دارد همان‌گونه که قبلاً Eberhardt و همکاران (۱۹۹۹) آن را پیشنهاد داده بود (Přikryl, 2001). Howarth و Rowlands (1987) تئوری ضریب بافتی (TC) را توسعه دادند که با کمک آن می‌توان تغییرات ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها را با ویژگی‌های بافتی سنگ تعیین کرد. همچنین آن‌ها گزارش کردند که هرچقدر تماس بین دانه‌ها قوی‌تر باشد و تراکم آرایش دانه‌ها بیشتر باشد مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ هم بیشتر خواهد بود. Ulusay و همکاران (۱۹۹۴) گزارش کرده‌اندکه ویژگی‌های بافتی در ظاهر بسیار مهم‌تر از ترکیب کانی‌شناسی می‌باشند خصوصاً برای نشان دادن رفتار مکانیکی سنگ‌ها (Ozturk et al., 2014). Tuğrul و Zarif (۱۹۹۹) همچنین تأثیر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها را بر روی ویژگی‌های مهندسی آن‌ها بررسی کرده و گزارش کردند که نوع تماس، شکل دانه و اندازه دانه‌ها به‌طور مشخصی بر روی ویژگی‌های مهندسی سنگ‌های گرانیتی اثرگذار است. تحقیقات گسترده‌ای که توسط Räisänen (۲۰۰۴) انجام شد نشان داد مقاومت سنگ هنگامی‌که ابعاد دانه‌ها بیشتر می‌شود، کاهش می‌یابد. Liu و همکاران (۲۰۰۵) مشاهده کردند که اندازه بزرگ‌تر دانه (مساحت) مقاومت گرانیت را کاهش می‌دهد درحالی‌که مرزهای بزرگ‌تر دانه‌ها (محیط) مقاومت سنگ را بهبود می‌بخشد. همچنین مشخص گردید که ویژگی‌های فیزیکی- مکانیکی سنگ تحت تأثیر ویژگی‌های کانی‌شناسی سنگ است Heydarian و همکاران (۲۰۲۴). در حالیکه روابط معناداری بین این دو پارامتر در مقیاس میکرو و ماکرو در چندین تحقیق مختلف گزارش شده است (Karrari et al., 2022; Goktan and Gunes, 2005 ؛ Mendes et al., 1966 ؛ Merriam et al., 1970).

محققین مختلفی ازجمله Olsson (۱۹۷۴) و Bell (۱۹۷۸) نشان دادند که در میان تمام ویژگی‌های بافتی، اندازه دانه به‌عنوان ویژگی‌های ذاتی و غالب سنگ که بازتاب‌دهنده مقاومت نهایی است شناخته می‌شود. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در مدرسه بین‌المللی ذخیره مواد و انرژی (International School for Materials for Energy and Sustainability (ISMES)) نشان می‌دهد که بین TC و مقاومت تراکمی تک‌محوری (UCS) رابطه مستقیم وجود دارد همانند نتایجی که Howarth و Rowlands (۱۹۸۷) ارائه کردند (Azzoni et al., 1996). Gupta و Sharma (۲۰۱۲) نشان دادند که بین پارامترهای بافتی مختلف همانند نسبت ابعاد (AR)، اندازه دانه و جهت‌یابی ترجیحی (SPO) با سرعت امواج لرزه‌ای S و P رابطه مستقیم وجود دارد. همچنین آن‌ها نشان دادند که ویژگی‌های میرایی امواج P و S رابطه معکوس با نسبت ابعاد (AR) و جهت‌یابی ترجیحی دانه‌ها (SPO) دارند. همچنین عده‌ای دیگر از محققان هستند که نتایج تحقیقات آن‌ها با موارد بالا متناقض است از جمله Alber و Kahraman (۲۰۰۹)، Bell (۱۹۷۸) و Fahy و Guccione (۱۹۷۹) که علت آن‌ها ممکن است متفاوت بودن منشأ سنگ‌ها باشد. Sun و همکاران (2017) رابطه خطی بین مقاومت تراکمی تک‌محوری و ضریب بافتی را اثبات کردند، اما عده دیگری ازجمله Alber و Kahraman (۲۰۰۹) نیز عکس این حالت را نشان دادند؛ که ازنظر Sun و همکاران (۲۰۱۷) علت این موضوع احتمالاً می‌تواند به این دلیل باشد که ویژگی‌های بافتی پیچیده سنگ‌ها را نمی‌توان فقط با یک ضریب بافتی نشان داد به‌عنوان‌مثال برش‌های گسلی که از قطعات سنگی در یک ماتریکس ریزدانه تشکیل‌شده‌اند ممکن است ویژگی‌های کانی‌شناسی مختلفی نسبت به انواع دیگر سنگ‌ها ازجمله ماسه‌سنگ، سنگ‌آهک، گرانیت و غیره نشان دهند که همین امر موجب برقراری روابط متفاوت بین UCS و اندازه دانه می‌گردد. هدف از این مطالعه کمی کردن روابط بین ویژگی‌های بافتی و ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی تعدادی از سنگ‌های رسوبی است. مطالعه حاضر در درجه اول بر ارتباط مقاومت کششی غیرمستقیم انواع مختلف سنگ‌های رسوبی با متغیرهای کمی پتروگرافی آن‌ها متمرکز

است. بااین‌حال، مقاومت فشاری تک‌محوری و ویژگی‌های فیزیکی نیز در تحلیل‌ها گنجانده شده است، زیرا ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی که در هنگام ارائه مشخصات توده سنگ‌ها بر آن تأکید می‌شود بهمراه مقاومت تراکمی تک‌محوری ماده سنگ یکی از مهم‌ترین پارامترهای مورد نیاز برای تحلیل‌های مهندسی در پروژه‌های عمرانی و معدنی است.

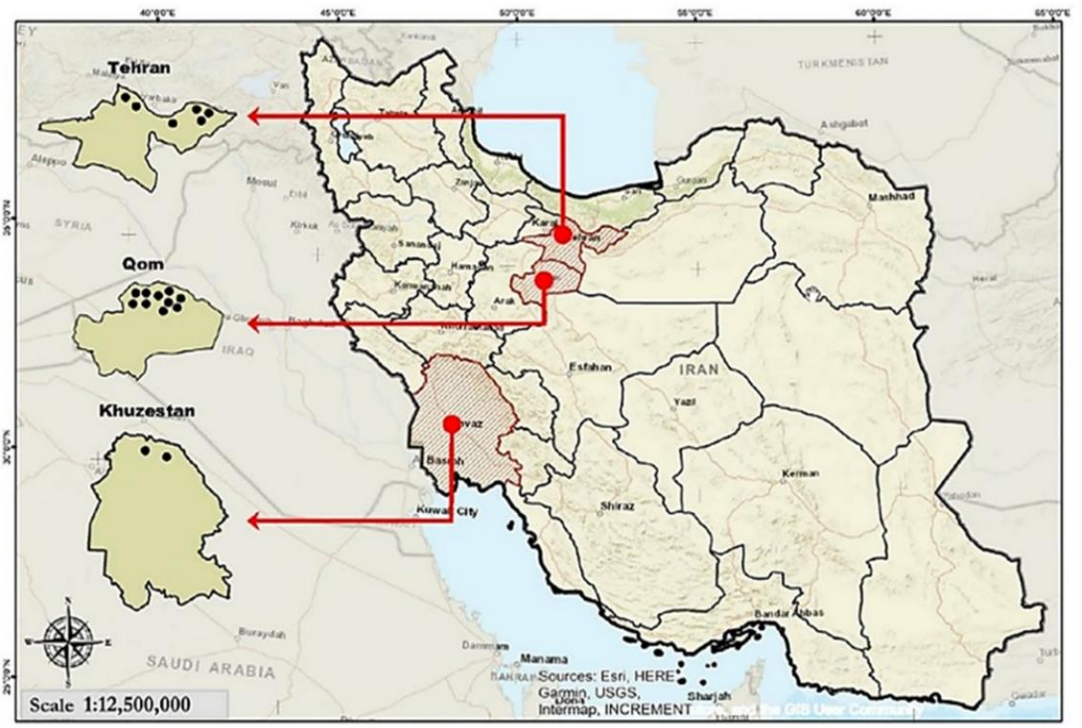
۳-مواد و روش‌ها

در این تحقیق ابتدا با انجام آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی، تخلخل، چگالی خشک، سرعت موج تراکمی، مقاومت تراکمی تک‌محوری،عدد چکش اشمیت و مقاومت کششی برزیلی نمونه‌ها تعیین گردید سپس به‌منظور تعیین خصوصیات بافتی سنگ و کمی سازی آن مطالعات مقطع نازک تحت میکروسکوپ پلاریزان انجام شده و با کمک نرم افزارهای مربوطه بافت سنگ کمی سازی شده است. رابطه بین ویژگی‌های بافتی سنگ و خصوصیات مکانیکی و فیزیکی سنگ‌ها با کمک روش‌های آماری تعیین می‌شود. برای اینکه نتایج این تحقیق بتواند بصورت کاربردی و عملیاتی در پروژه‌های اجرایی کشور مورد استفاده قرار گیرد، تعداد ۱۸ نمونه سنگ از طرح‌های فعال راه آهن و تونل احداثی در استان‌های تهران، قم و خوزستان انتخاب و جمع‌آوری شدند که در شکل ۱ موقعیت این مناطق نشان داده شده است و در جدول ۱ نام نمونه‌ها، سازند مربوطه، محل نمونه‌گیری و علائم اختصاری آن‌ها آورده شده است.

جدول ۱- نام نمونه سنگ‌ها، سازند و نشانه آن‌ها

Table 1. Rock *s*amples, Formation and *s*ample *code*

Sample Code	Location	Formation name	Lithology
GH-UP	Qom	Upper Red	Sandstone
GO-2 ، GO-3	Khozestan	Gourpi	Claystone
LA-4 - LA-1	Tehran	Laloon	Sandstone
MH-1	Tehran	Hezardareh	Sandstone
BH1 - BH10	Qom	Upper Red (2)	Sandstone



شکل ۱- محل جمع‌آوری نمونه‌های مورد بررسی

Fig 1. Geographical locations of the samples

۳-۱-ویژگی‌های فیزیکی

ویژگی‌های فیزیکی نمونه سنگ‌ها از جمله تخلخل، چگالی خشک و سرعت موج تراکمی (V_P) با استفاده از آزمایش‌های مربوطه و مطابق با استانداردهای ASTM تعیین گردیده است که نتایج آن در جدول ۲ نشان داده شده است.

۳-۲- مقاومت تراکمی تک محوری

بر اساس استانداردهای این آزمون (ASTM D2938-95)، مقاومت تراکمی تک‌محوری بر روی مغزه‌هایی با قطر ۵۴ میلی‌متر و نسبت طول به قطر ۲/۵ انجام می‌گیرد. مقاومت تراکمی تک‌محوری (UCS) نمونه‌ها از طریق تقسیم حداکثر بار اعمالی بر نمونه به سطح مقطع اولیه نمونه محاسبه می‌شود (رابطه ۱).

رابطه ۱

$$\sigma_c = {}^{F}/_{A}$$

A: نیروی اعمالی در لحظه شکست نمونه F در اینجا سطح مقطع نمونه.

۳-۳-مقاومت کششی غیرمستقیم برزیلین (BTS)

از میان روش‌های مختلفی که برای تعیین مقاومت کششی پیشنهاد شده است، روش برزیلی از همه روش‌های موجود ساده‌تر بوده و به‌عنوان روشی مطمئن برای تعیین مقاومت کششی سنگ رایج است. این آزمایش توسط ISRM، ASTM D3967 استاندارد شده است. آزمایش مقاومت کششی برزیلی بر روی مغزه‌های نمونه سنگ به قطر ۵۴ میلی‌متر و نسبت طول به قطر یک انجام می‌گیرد. بارکششی اعمالی بر نمونه به‌صورت پیوسته در یک نرخ ثابت ۲۰۰ (N/s) اعمال می‌شود و این اعمال تنش تا لحظه‌ای که ۵ میلی‌متر جابه‌جایی در نمونه ایجاد شود و شکستگی در نمونه رخ دهد ادامه می‌یابد. حداکثر بار (kN) در لحظه شکست ثبت شده (P) و مقاومت کششی برزیلی (BTS) نمونه از طریق تقسیم حداکثر بار اعمالی بر نمونه به سطح مقطع اولیه نمونه محاسبه می‌شود (رابطه ۲).

رابطه ۲

$$\delta_t = \frac{2P}{\pi dt}$$

که در آن t ضخامت نمونه برحسب میلی‌متر و d قطر نمونه برحسب میلی‌متر است.

۳-۴-چکش اشمیت

چکش اشمیت دربرگیرنده وزنه‌ای با جرم معین است که با سقوط آزاد از فاصله‌ای مشخص، بر روی سطح سنگ ضربه وارد می‌کند. در حالیکه از چکش اشمیت برای انجام آزمایش در محدوده بزرگی از مقاومت تراکمی تک‌محوری استفاده می‌شود، ISRM و ASTM به‌طور مشخص توصیه کرده‌اند که از این آزمون برای محدوده ۱ تا ۱۰۰ مگا پاسکال استفاده شود. با توجه به استقامت سنگ، مقدار برگشت ضربه روی دستگاه قرائت و ثبت می‌شود. عدد بازگشت چکش (R) به‌عنوان شاخصی از سختی سطح سنگ در نظر گرفته می‌شود هرچه استقامت سنگ بیشتر باشد، میزان برگشت ضربه نیز بیشتر می‌شود. در جدول ۳ نتایج خصوصیات مقاومتی نمونه‌ها مشاهده می‌شود.

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی نمونه‌ها

Table 2. Physical properties of samples

V_P (m/s)	Porosity (%)	γ_d (gr/cm^3)	Sample Code	V_P (m/s)	Porosity (%)	γ_d (gr/cm^3)	Sample Code
1570	21	2.32	BH1	1500	15	2.42	GH-UP
1430	25	2.24	BH2	1660	21	3.38	GO-3
1330	7	2.37	BH4	1690	12	2.27	GO-2
1445	10	2.26	BH5	1580	13	2.25	MH-1
1140	8	2.29	BH6	1660	10	2.36	CA
1600	20	2.37	BH7	1460	12	2.29	LA-1
1530	13	2.45	BH8	1240	6	2.43	LA-2
1405	16	2.42	BH9	1380	6	2.36	LA3
1160	5	2.41	BH10	1220	9	2.46	LA4

جدول ۳- خصوصیات مکانیکی نمونه‌ها
Table 3. Mechanical properties of samples

σt (MPa)	(R) Schmit	σc (MPa)	Sample Code	σt (MPa)	(R) Schmit	σc (MPa)	Sample Code
1.25	46	17.6	BH1	1.6	40	27.60	GH-UP
1.84	41	25.20	BH3	1.75	20	10.40	GO-3
3.4	26	23.00	BH4	2.53	55	12.14	GO-2
4.36	37	33.00	BH5	1.62	38	17.18	MH-1
5.28	38	29.00	BH6	1.5	45	28.00	CA
3.6	40	31.00	BH7	2.13	28	32.25	LA-1
5.70	50	45.00	BH8	5.77	<20	62.56	LA-2
3.20	34	18.00	BH9	8.24	36	61.00	LA3
6.40	51	48.00	BH10	5.6	53	42.00	LA4

۳-۵-کمی سازی بافت سنگ

Williamsو همکاران (۱۹۸۲) بافت را به‌صورت درجه‌ای از بلور شدگی تعریف کرده است. بافت سنگ اطلاعاتی درباره ترکیب دانه‌های کانی و ماتریکس سنگ ارائه می‌دهد. عکس‌العمل بین دانه‌ها، ماتریکس و بافت به‌طور خیلی وسیعی بر روی ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی و مهندسی سنگ اثر می‌گزارد. Howarth و Rowlands (۱۹۸۷) با تعریف ضریب بافتی و ارائه رابطه برای کمی سازی آن نتیجه گرفتند که از ضریب بافتی می‌توان برای پیش‌بینی نرخ برش پذیری سنگ استفاده کرد. برای کمی سازی بافت سنگ باید ابتدا از نمونه‌های دستی یا مغزه‌های موجود مقاطع نازک تهیه کرد سپس با پردازش تصاویر مقاطع نازک، پارامترهای مورد نظر استخراج می‌شوند. با پیشرفت فناوری استفاده از فناوری‌های نوین در زمینهٔ پردازش تصاویر به‌شدت رواج یافته است و ابزارهای مختلفی در این زمینه ارائه‌شده است. یکی از این ابزارهای رایج و پرکاربرد نرم‌افزار Image J است که در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفته است (Aligholi et al., 2015). در عمل، آنالیز مستقیم مقاطع نازک تحت آنالیز کننده تصاویر غیرممکن است بنابراین برای پردازش تصاویر ضروری است اقدامات اولیه به‌منظور افزایش وضوح مرزهای بین کانی‌های موجود در بافت سنگ و زمینه سنگ انجام شود. اقدامات اولیه جهت پردازش تصاویر مقاطع نازک به شرح ذیل است.

الف) چندین تصویر مختلف از یک مقطع نازک برای تمام سنگ‌ها توسط میکروسکوپ پلاریزان گرفته می‌شود.

ب) از تصاویر پرینت رنگی گرفته می‌شود. برای سنگ‌های خیلی ریزدانه (مانند سیلتستون) تصاویر در ابعاد کاغذ A4 پرینت گرفته می‌شوند.

ج) مرز دانه‌ها توسط قلم باضخامت ۰/۴ میلی‌متر بر روی کاغذ مشخص می‌شوند.

د) این مرزها به‌صورت مستقیم با آنالیز کننده تصاویر آنالیز شده و پارامترهای هندسی ذرات سنگ تعیین می‌شوند. با توجه به اینکه از هر مقطع سنگ چندین عکس گرفته می‌شود باید از میانگین مقادیر مربوط به هر پارامتر استفاده شود.

داده‌هایی که برای آنالیز ثبت می‌شوند عبارت‌اند از درصد سطح دانه‌ها و ماتریکس، طول، پهنا، محیط دانه، جهت‌یابی (زاویه) و مساحت هر دانه در پنجره مشاهده‌ای. در پایان یک تعداد ضریب بافتی که مدل‌های عکس‌العملی بین ساختار سنگ و مته حفاری می‌باشند برای هر سنگی محاسبه می‌شود.

۳-۶-ضریب بافتی

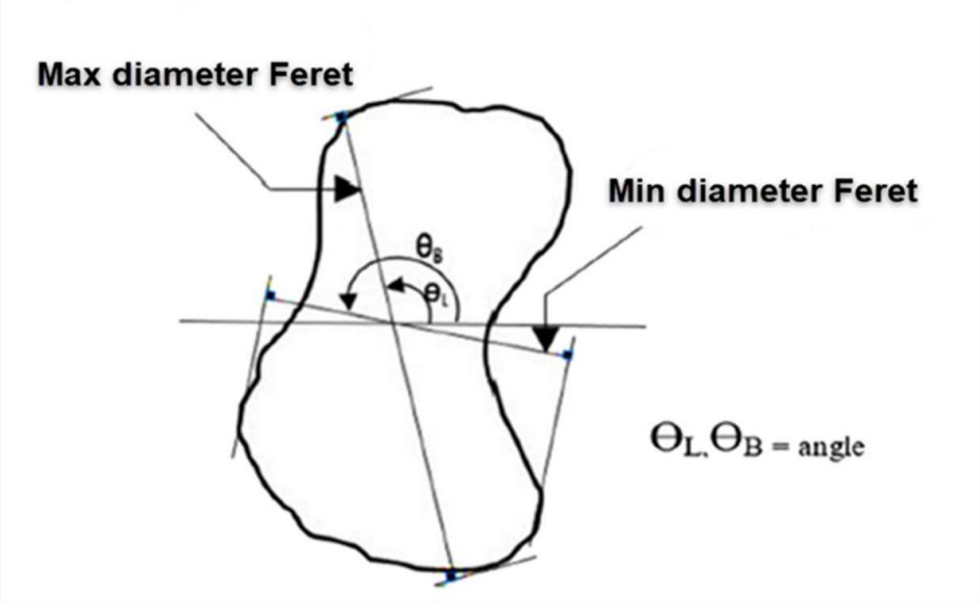
ضریب بافتی (TC) یک مقدار کمی بدون بعد است که اندازه‌ای از بافت سنگ است که اولین بار توسط Howarth و Rowlands (۱۹۸۷) توسعه‌یافته است و برای پیش‌بینی حفر پذیری و ویژگی‌های مقاومتی سنگ بکار می‌رود. ضریب بافتی در واقع ویژگی‌های هندسی دانه‌های سنگ و بافت آن را کمی می‌کند و از طریق رابطه ۳ محاسبه می‌شود. ضریب بافتی (TC) تخمین قوی و معقولی از عملکرد برش سنگ توسط ابزار استاندارد اسکنه‌ای خصوصاً در عمق برش کم‌تر ارائه می‌کند.

$$TC=AW\left[\left(\frac{N_0}{N_0+N_1}\times\frac{1}{FF_0}\right)+\left(\frac{N_0}{N_0+N_1}\times AR_1\times AF_1\right)\right]$$

رابطه ۳

در این رابطه A_W = وزن (آرایش) دانه‌ها Packing $=N_0$ تعداد دانه‌هایی که نسبت ابعاد (AR) کمتر از سطح تعیین‌شده از قبل است. N_1= تعداد دانه‌هایی که نسبت ابعاد (AR) بیشتر از سطح تعیین‌شده از قبل است. FF_0 = میانگین محاسباتی مؤلفه شکل AR_1= میانگین محاسباتی نسبت ابعاد مشخص. AF_1= مؤلفه زاویه (Howarth and Rowlands, 1987).

مساحت و محیط هر دانه به‌صورت مستقیم اندازه‌گیری می‌شود. طول و پهنا به‌صورت حداکثر و حداقل قطر Feret تعریف می‌شوند. قطر Feret نشان‌دهنده فاصله عمودی بین دو مماس خارجی، موازی به یک شی است. طولانی‌ترین قطر از یک شی از طریق انتخاب بزرگ‌ترین قطر Feret قابل‌اندازه‌گیری شده به دست می‌آید. قطر حداقل Feret به‌صورت کوتاه‌ترین قطر که قابل‌اندازه‌گیری باشد تعریف می‌شود (شکل ۲).



شکل ۲- ابعاد و زاویه دانه (Howarth and Rowlands, 1987).
Fig 2. Diameters and the parameter angle (*Howarth and Rowlands, 1987).*

در اینجا دو پارامتر هندسی ثانویه در آنالیز شکل دانه عبارت‌اند از نسبت ابعاد و فاکتور شکل (فاکتور دایروی شکل). نسبت ابعاد همان طویل شدگی است که به‌صورت نسبت بین طول به پهنا تعریف می‌شود؛ بنابراین هرگونه افزایش در طویل شدگی منجر به افزایش نسبت ابعاد می‌شود. فاکتور شکل یک مقداری از انحراف دانه‌ها از کرویت است. این انحراف ممکن است به دو صورت رخ دهد: طویل شدگی شکل یا افزایش ناهمواری در محیط دانه‌ها. فاکتور گرد شدگی (فاکتور شکل) دانه‌ها به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$FF=4\pi \frac{Area}{Primeter^2}$$ رابطه ۴

فاکتور شکل دارای مقداری بین صفر تا یک است بطوریکه برای یک‌شکل دایروی، فاکتور گرد شدگی (فاکتور شکل) ۱ است و هرگاه شکل از حالت کروی انحراف پیدا کند، فاکتور گرد شدگی کاهش می‌یابد. میانگین محاسباتی فاکتور شکل برای تمام‌دانه‌ها به زیر ۲ افت پیدا می‌کند اما میانگین محاسباتی نسبت ابعاد (AR) برای تمام ذرات بالای ۲ در نظر گرفته می‌شود؛ بنابراین میانگین محاسباتی فاکتور شکل برای همه دانه‌ها که در زیر این مقدار می‌باشند محاسبه می‌گردد (رابطه ۵). همچنین میانگین محاسباتی نسبت ابعاد برای همه دانه‌ها که در بالای این مقدار می‌باشند نیز محاسبه می‌شود (رابطه ۶).

$$AR_1=\frac{Length}{Wide}$$ رابطه ۵

$$AF_1=\frac{1}{5}\sum_{i=1}^{9}\frac{x_i}{\left(\frac{N(N-1)}{2}\right)}$$ رابطه ۶

N = تعداد کل دانه‌های طویل شده x_i= تعداد اختلاف زاویه‌ای در تمام کلاس‌ها i = مؤلفه وزن و عدد کلاس

به‌طورکلی ضریب بافتی بالاتر نشان‌دهنده آن است که ناهمواری مرز دانه‌ها بیشتر شده، طویل شدگی افزایش‌یافته و تراکم آرایش دانه‌ها بالاتر رفته است. Gupta و Sharma (۲۰۱۲) زاویه (θ) به‌صورت زاویه بین حداکثر قطر Feret (طول) و جهت افقی تعریف می‌شود. حداکثر مقدار زاویه ۱۸۰ درجه است. جهت‌یابی زاویه‌ای دانه‌ها از طریق توسعه فاکتور زاویه کمی می‌شود. این فاکتور فقط برای دانه‌های طویل شده که نسبت ابعاد آن‌ها بزرگ‌تر از ۲ است قابل‌محاسبه است. عبارت نهایی در معادله ضریب بافتی (رابطه ۷)، AW است که نشان‌دهنده یک سطح وزن داده‌شده است. بر اساس تراکم

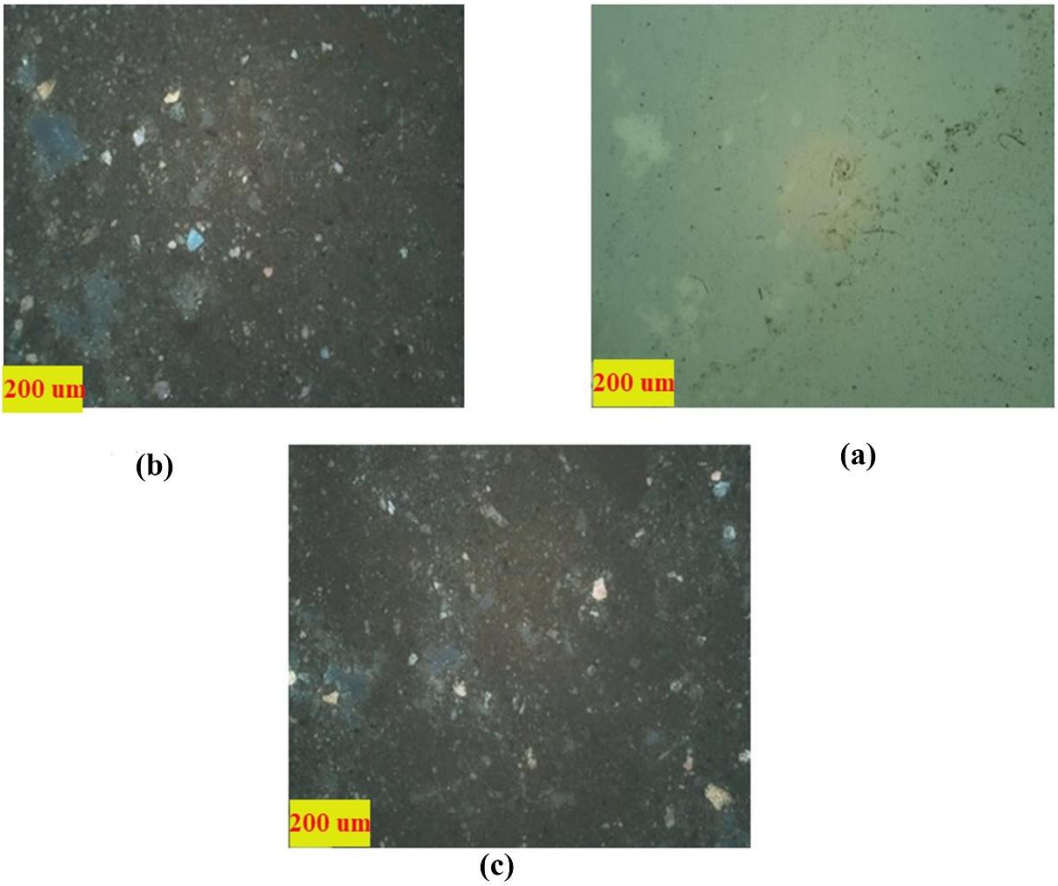
آرایش دانه‌ها در هر پنجره‌ای که مشاهده می‌شود ضریب بافتی مطابق با درصد ناحیه‌ای که دانه‌ها در سطح مرجع قرار دارند مقیاس بندی می‌شود. این مؤلفه (AW) زمانی که فقط سنگ رسوبی (خصوصاً ماسه‌سنگ) داشته باشیم ظاهر می‌شود اما در سنگ‌های آذرین و دگرگونی مقدار آن یک در نظر گرفته می‌شود و باعث کاهش در مقدار ضریب بافتی نمی‌شود. اصطلاح مساحت وزن داده‌شده (AW) به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$AW = \frac{\text{مرجع مساحت مرزهای در موجود دانه‌های کل مساحت}}{\text{(ماتریکس مساحت با همراه) مرجع سطح مرزهای به‌وسیله محصورشده کل مساحت}}$$

رابطه ۷

به‌منظور آنالیز مقاطع نازک، ابتدا توسط دوربین دیجیتال نصب‌شده بر روی میکروسکوپ تصاویر تهیه می‌شوند. به‌منظور جلوگیری از خطا در تشخیص کانی‌ها، از هر بخش موردمطالعه از مقطع، سه تصویر تهیه می‌شود (شکل ۳). این تصاویر شامل الف) تصویر در حالت نور قطبیده موازی (PPL) ب) تصویر در حالت نور قطبیده متقاطع (XPL) ج) تصویر در حالت نور قطبیده متقاطع پس از ۴۵ درجه چرخش.

پس از پردازش تصاویر و استخراج پارامترهای هندسی بافت سنگ، مقادیر میانگین آنها در جدول ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳- تصاویر مقطع نازک نمونه سنگ (GO2). (a) در حالت PPL ، (b) در حالت XPL و (c) در حالت XPL پس از ۴۵ درجه چرخش.

Fig 3. Petrographic images of the studied rock sample (Go2). (a) PPL, (b) XPL, and (c) XPL after rotation 45°

جدول ۴- میانگین مقادیر ضرایب بافتی نمونه‌های آنالیز شده

Table 4. Average values of texture coefficients of analyzed samples

TC	AW	FF_0	AF1	AR1	N_1	N0	Size (mm)	SampleCode
0.93	0.650	0.729	0.779	2.813	20	188	0.56	GH-UP
0.87	0.551	0.74	0.86	2.8	19	57	0.27	GO-3
1.1	0.744	0.743	0.967	2.797	19	167	0.63	LA-2

TC	AW	FF_0	AF1	AR1	N_1	N0	Size (mm)	SampleCode
0.481	0.272	0.612	0.979	2.486	10	32	0.49	MH-1
0.557	0.379	0.743	0.889	2.676	24	173	0.51	LA-1
0.633	0.427	0.742	0.916	2.689	22	181	0.29	BH1
0.462	0.307	0.748	1.013	2.73	14	113	0.36	GO-2
0.674	0.451	0.740	0.982	2.651	10	77	0.43	BH3
0.763	0.613	0.84	0.54	3.3	21	205	0.55	LA-3
1.18	0.723	0.97	1.36	2.56	45	135	0.59	LA-4
0.497	0.334	0.75	0.78	2.86	26	127	0.53	BH2
0.771	0.401	0.55	1.02	2.81	7	89	0.48	BH4
0.586	0.376	0.75	0.71	3.12	18	53	0.52	BH5
1.09	0.69	0.78	0.81	3.1	45	145	0.61	BH6
0.887	0.556	0.64	0.99	2.65	4	95	0.31	BH7
0.665	0.376	0.58	0.61	3.15	12	43	0.42	BH8
0.733	0.466	0.64	0.56	2.85	22	61	0.36	BH9
1.2	0.863	0.71	0.8	2.68	30	185	0.63	BH10

۴-نتایج و بحث

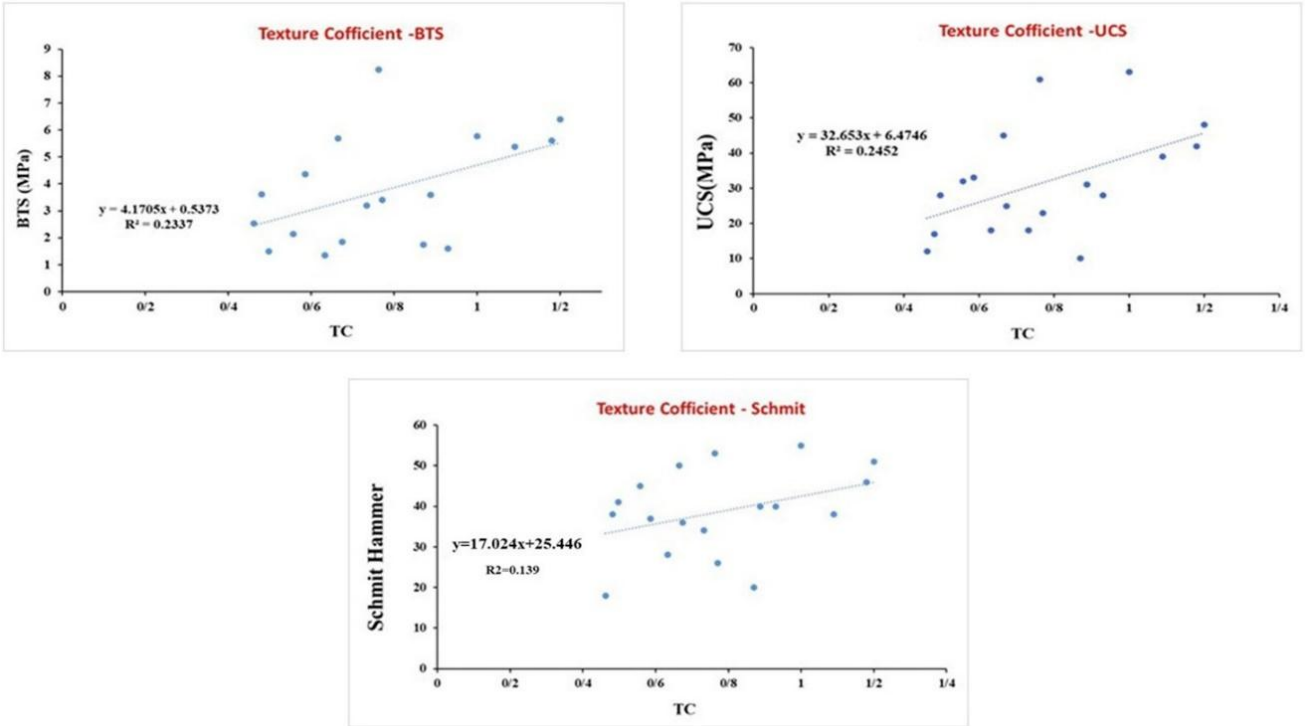
۴-۱- رابطه ضریب بافتی (TC) و ویژگی‌های مکانیکی سنگ

رابطه بین ضریب بافتی و مقاومت تراکمی تک محوری بر روی نمونه سنگ‌های مورد آزمایش در این تحقیق در شکل ۴ نشان داده‌شده است. نتایج آزمایش‌های انجام‌شده در مدرسه بین‌المللی ذخیره مواد و انرژی (ISMES) نشان می‌دهد که بین TC و مقاومت تراکمی تک‌محوری (UCS) رابطه مستقیم وجود دارد همانند نتایجی که Azzoni و همکاران (۱۹۹۶) و Howarth و Rowlands (۱۹۸۷) نشان دادند که در صورت اضافه شدن ویژگی‌های پتروگرافی دیگر به TC نتایج بهتر و معقول‌تری در مورد ارتباط بین این دو پارامتر به دست می‌آید چراکه در رابطه ضریب بافتی فقط نظم هندسی دانه‌ها در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود رابطه بین مقاومت تراکمی تک‌محوری و ضریب بافتی سنگ به‌صورت خطی و مستقیم است به این صورت که با افزایش ضریب بافتی مقدار مقاومت تراکمی تک‌محوری سنگ‌ها نیز افزایش می‌یابد این رابطه با نتایج به‌دست‌آمده توسط محققین مختلف ازجمله Howarth و Rowlands (۱۹۸۷) و نتایج به‌دست‌آمده توسط موسسه (ISMES)، Gupta و Sharma (۲۰۱۲) ، Azzoni و همکاران (۱۹۹۶) و Öztürk و همکاران (۲۰۰۴) همخوانی دارد اما با نتایج به‌دست‌آمده توسط Fahy و Guccione (۱۹۷۹)، Bell (۱۹۷۸)، Alber و Kahraman (۲۰۰۹)، Tumacو همکاران (۲۰۱۸) و Hemmati و همکاران (۲۰۲۰) متناقض است که علت آن‌هم ممکن است متفاوت بودن منشأ سنگ‌ها باشد یا می‌توان گفت که در خیلی از موارد مقاومت تراکمی و کششی و سایر ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها ارتباط نزدیکی با ویژگی‌های کانی‌شناسی و سنگ‌شناسی نمونه‌ها دارد اما مقادیر ویژگی‌های فیزیکی و بافتی حتی برای نوع یکسانی از مصالح به دلیل وجود عدم قطعیت‌های موجود در مواد (مصالح سنگ‌ها) متغیر است. تعدادی از دلایل ممکن برای این عدم قطعیت‌ها می‌تواند ناشی از آنیزوتروپی، دگرگونی و منشأ سنگ‌ها باشد (Öztürk et al., 2004). در برخی نمونه‌ها مشاهده می‌شود علیرغم پایین بودن مقاومت فشاری تک‌محوری سنگ مقدار ضریب بافتی نسبتاً بالا است این می‌تواند ناشی از بزرگ‌تر بودن ابعاد ذرات کانی‌ها نسبت به مساحت ماتریکس آن‌ها یا ضعیف بودن پیوند بین دانه‌ها باشد. ضریب تطابق به‌دست‌آمده بین این دو پارامتر مقدار نسبتاً ضعیفی است (R2 = ۰/۲۴).

رابطه بین ضریب بافتی سنگ با مقاومت کششی برزیلی توسط محققین مختلف ازجمله Merriam و همکاران (۱۹۷۰)، Öztürk و همکاران (۲۰۰۴) و Hemmati و همکاران (۲۰۲۰) بررسی شده است. نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق با نتایج محققین قبلی ازجمله Öztürk و همکاران (۲۰۰۴) همخوانی خوبی دارد. همان‌گونه که در شکل ۴ مشاهده می‌شود بین مقاومت کششی برزیلی و ضریب بافتی سنگ‌ها رابطه مستقیم وجود دارد اما ضریب تطابق آن پایین است (R2 = ۰/۲۳) (ضریب تطابق به‌دست‌آمده از تحقیق Öztürk و همکاران (۲۰۰۴) (R2 = ۰/۴۱)). Merriam و همکاران (۱۹۷۰) علت ضعیف بودن رابطه بین این دو پارامتر را، وجود ترک‌های موجود

در سطح کانی‌های سازنده سنگ‌ها می‌داند. همچنین ضعیف بودن تطابق بین ضریب بافتی و مقاومت کششی سنگ‌ها در این تحقیق علاوه بر وجود ریزترک‌ها در سطح کانی‌ها ممکن است به علت این واقعیت باشد که در ضریب بافتی سنگ پارامترهای پتروگرافی شاخص همانند تخلخل و ترکیب کانی‌شناسی در نظر گرفته نشده است همان‌گونه که Azzoni و همکاران (۱۹۹۶) اشاره‌کرده‌اند که TC نمی‌تواند توصیف‌کننده ویژگی‌های مکانیکی سنگ باشد و توصیه کردند که پارامترهای شاخص ترکیب کانی‌شناسی به مؤلفه‌های TC اضافه شود.

به‌منظور بررسی رابطه بین عدد چکش اشمیت با ضریب بافتی سنگ‌ها با کمک تحلیل رگرسیون خطی مشخص گردید که بین این دو پارامتر رابطه مستقیم و خطی وجود دارد اما ضریب تطابق به‌دست‌آمده از رابطه بین این دو پارامتر پایین است (R2 = ۰/۱۴) نتایج به‌دست‌آمده با نتایج Öztürk و همکاران (۲۰۰۴) همخوانی دارد. نکته مهم در خصوص ضریب تطابق به‌دست‌آمده از رابطه بین چکش اشمیت و مقاومت تراکمی تک‌محوری با ضریب بافتی سنگ‌ها در آن است که با توجه به اینکه بین چکش اشمیت و مقاومت تراکمی تک‌محوری سنگ‌ها رابطه مستقیم و قوی وجود دارد (شکل ۴) اما بین این دو پارامتر و ضریب بافتی سنگ‌ها ضرایب تطابق متفاوتی به‌دست‌آمده است بطوریکه ضریب تطابق در رابطه بین چکش اشمیت و ضریب بافتی کمتر از مقدار مربوط به مقاومت تراکمی است که علت این موضوع می‌تواند به دلایل زیر باشد: نکته اول اینکه در آزمون چکش اشمیت چون ضربه به‌صورت نقطه‌ای بر سطح سنگ وارد می‌شود لذا مقادیری که در آن آزمون به دست می‌آیند بیانگر مقاومت یک یا نهایتاً چند کانی خاص می‌باشند ولی ضریب بافتی سنگ از کمی سازی اکثر کانی‌های موجود در سنگ با هر درصد تشکیل‌دهنده‌ای است لذا اختلاف موجود در مقادیر ضریب تطابق به این دلیل است بنابراین رابطه بین چکش اشمیت و ضریب بافتی سنگ چندان قوی نیست. نکته بعدی اینکه ضریب بافتی بیانگر ویژگی‌های هندسی دانه‌های تشکیل‌دهنده سنگ است و پارامترهای مقاومتی بافت سنگ ازجمله تخلخل، درصد سیمان شدگی و ... در آن لحاظ نشده است بنابراین نمی‌تواند بیانگر مقاومت سنگ باشد به همین دلیل رابطه بین این پارامتر و پارامترهای مقاومتی سنگ ازجمله عدد چکش اشمیت پایین است.



شکل ۴- رابطه بین ضریب بافتی و ویژگی‌های مکانیکی نمونه سنگ‌ها

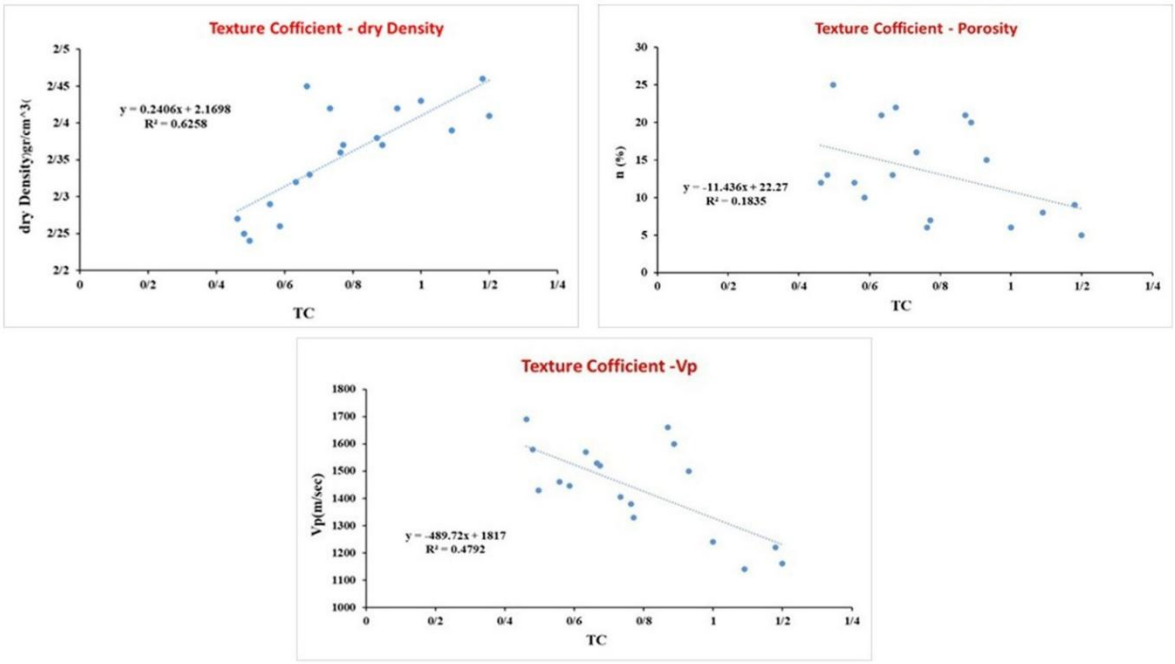
Fig 4. Relationship between texture coefficient and mechanical properties of rock samples

۴-۲- رابطه ضریب بافتی با ویژگی‌های فیزیکی سنگ

تخلخل یک فاکتور مهم در مقاومت سنگ‌ها است چون حفرات پیوستگی بین مصالح را کاهش می‌دهند یک تغییر کوچک در حجم حفرات اثرات مکانیکی قابل‌توجهی می‌تواند داشته باشد (ISRM, 1981). رابطه بین ضریب بافتی با درصد تخلخل نمونه سنگ‌ها در این تحقیق مورد بررسی قرارگرفته است که نتایج آن در شکل ۵ نشان داده‌شده است. بر اساس این شکل مشخص می‌شود که بین ضریب بافتی و تخلخل رابطه‌ای با ضریب تطابق قوی وجود ندارد (R2 =۰/۱۸). این رابطه نشان می‌دهد که این دو پارامتر تقریباً مستقل از یکدیگر هستند و تخلخل یک پارامتر شاخص برای توصیف ضریب بافتی سنگ‌ها نیست. نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق با نتایج به‌دست‌آمده از Rostami و همکاران (۲۰۲۰) همخوانی خوبی دارد اما با نتایج Öztürk و همکاران (۲۰۰۴) تناقض دارد. از نظر Öztürk و همکاران (۲۰۰۴) افزایش تخلخل بیانگر افزایش طویل شدگی دانه‌ها است که همین خود سبب افزایش ضریب بافتی سنگ می‌شود چون افزایش ضریب بافتی در اثر افزایش طویل شدگی، افزایش ناهمواری مرز دانه‌ها و زاویه‌دار بودن دانه رخ می‌دهد (Ersoy and Waller, 1995). بر اساس نتایج Öztürk و همکاران (۲۰۰۴) مقادیر FF و AR1 که بیانگر طویل شدگی و زاویه‌دار بودن دانه‌ها می‌باشند، در نمونه‌های مورد بررسی در این تحقیق دارای مقادیر بالایی نمی‌باشند بنابراین دانه‌های کانی‌های موجود در این سنگ‌ها دارای طویل شدگی و زاویه‌داری پایینی هستند بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر ضریب بافتی آن‌ها پایین است.

چگالی سنگ‌ها یکی از مهم‌ترین پارامترهای فیزیکی ماده سنگ محسوب می‌شود. امروزه ارتباط این پارامتر با بسیاری از پارامترهای مهندسی سنگ تعیین‌شده است. رابطه بین چگالی سنگ با ضریب بافتی نمونه‌های موردبررسی در این تحقیق در شکل ۵ نشان داده‌شده است. با توجه به اینکه ضرایب بافتی و ویژگی‌های مکانیکی نمونه‌ها در شرایط کاملاً خشک تعیین شده است لذا از مقادیر چگالی خشک سنگ‌ها در تحلیل‌ها استفاده می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود چگالی خشک دارای تطابق خوبی (R2 = ۰/۶۳) با ضریب بافتی سنگ است بطوریکه با افزایش چگالی سنگ‌ها مقادیر ضریب بافتی آن‌ها افزایش می‌یابد به‌بیان‌دیگر افزایش درصد دانه‌ها نسبت به ماتریکس و فضاهای خالی که در ترکیب سنگ‌ها قرار دارند، موجب افزایش وزن سنگ‌ها می‌شود از طرفی دیگر با افزایش درصد ذرات جامد (دانه‌های کانی) در سنگ‌ها مقدار ضریب بافتی سنگ افزایش خواهد یافت بنابراین رابطه مستقیم بین آن‌ها وجود دارد. نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق با نتایج Ersoy و Waller (۱۹۹۵) همخوانی خوبی دارد (R2 = ۰/۷۳) اما با نتایج Öztürk و همکاران (۲۰۰۴) تناقض دارد بطوریکه آن‌ها یک رابطه معکوس بین این دو پارامتر را نشان دادند علت این تفاوت در نتایج می‌تواند به دلیل منشأ سنگ‌های مورد آزمایش باشد چراکه در این تحقیق و تحقیقات Ersoy و Waller (۱۹۹۵) از نمونه‌های سنگ رسوبی استفاده شده است اما در تحقیقات Öztürk و همکاران (۲۰۰۴) از سنگ‌های رسوبی و سنگ‌های آذرین به‌طور هم‌زمان استفاده شده است.

یکی دیگر از پارامترهای فیزیکی شاخص سرعت موج تراکمی (Vp) است که محققین زیادی در سراسر دنیا رابطه آن با ویژگی‌های مختلف سنگ‌ها را موردبررسی قرار داده‌اند و روابط تجربی مابین آن‌ها را ارائه کرده‌اند (Bostan zar et al., 2010). بر اساس نتایج به‌دست‌آمده در این تحقیق رابطه ضریب بافتی با سرعت موج، یک رابطه معکوس با ضریب تطابق متوسط است (R2= ۰/۴۷) که در شکل ۵ می‌توان آن را مشاهده کرد. تحقیقات انجام شده توسط Gupta و Sharma (۲۰۱۲) بیانگر وجود یک رابطه معکوس بین این دو پارامتر است که با نتیجه به‌دست‌آمده در این تحقیق همخوانی دارد اما با نتایج Atici و Comakli (۲۰۱۹) تناقض دارد علت تناقض موجود می‌تواند به دلیل نوع سنگ‌های موردبررسی باشد چراکه آن‌ها سنگ‌های آذرین را مورد بررسی قرار دادند. کاهش در سرعت موج تراکمی با افزایش ضریب بافتی نشان می‌دهد که انحراف ایجادشده توسط بعد فراکتال (فرکتال یک شکل جزئی با الگوی هندسی ثابت است که نشان دهنده الگوی کلی یک پدیده است. هندسه فرکتال ابزاری برای اندازه گیری اشکال نامنظم است. بر اساس روش مربع شمار، که یکی از ابزارهای هندسه فرکتال است، بین بعد فرکتال و بی نظمی اشکال ارتباط مستقیمی وجود دارد؛ بطوریکه اجسام با بینظمی بیشتر دارای بعد فرکتال بزرگ‌تری هستند (Gupta and Sharma, 2012) بارزتر از افزایش تجمعی سرعت به‌وسیله اندازه دانه، نسبت ابعاد دانه‌ها و ... است (Gupta and Sharma, 2012).



شکل ۵- رابطه بین ضریب بافتی و خصوصیات فیزیکی نمونه سنگ‌ها

Fig 5. Relationship between texture coefficient and physical properties of rock samples

۵-تحلیل رگرسیون

یکی از روش‌های آماری مناسب برای تحلیل داده‌ها در این تحقیق تحلیل رگرسیون می‌تواند باشد. معادلات رگرسیون همراه با نتایج مطالعات آماری در روش آنالیز رگرسیون مورد استفاده در این تحقیق روش حداقل مربع هست. برای صحت سنجی نتایج مدل رگرسیون، آزمون‌های صحت سنجی t و F انجام شده است. در این آزمون‌ها اگر مقادیرF و t مشاهده‌ای بزرگ‌تر از مقادیر بحرانی آنها باشند در این حالت فرضیه خنثی (null) رد می‌شود این بدان معنا است که ضریب تطابق و ثابت‌های معادله به‌دست‌آمده بین پارامترهای کانی‌شناسی و مکانیکی سنگ‌ها به‌صورت شاخص می‌باشند.

۵-۱- رگرسیون چند متغیره ارتباط بین ویژگی‌های بافتی و ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی سنگ‌ها

یکی از روش‌های مرسوم در تحلیل چند متغیره، تکنیک رگرسیون چند متغیره (چندگانه) است. بر اساس تحلیل رگرسیونی، یک رابطه خطی بین متغیر پاسخ (متغیر وابسته) با یک یا چند متغیر توصیفی (متغیر مستقل) برقرار می‌شود. در رگرسیون خطی چندگانه، پارامترهای یک مدل خطی به کمک یک تابع هدف و مقدارهای متغیرها، برآورد می‌شوند که به‌طورکلی می‌تواند به‌صورت زیر بیان شود:

$$Y= \beta_0+ \beta_1X_1+\beta_2X_2+\ldots+\beta_nX_n+\varepsilon$$ رابطه ۸

در این رابطه Y متغیر وابسته و X1 X2 ..... Xn بیانگر متغیرهای مستقل و β نشانگر ضرایب رگرسیون هستند و ε میزان خطا را نشان می‌دهد. به‌منظور تعیین ارتباط بین خصوصیات بافتی با خصوصیات مقاومتی و فیزیکی موردنظر سنگ‌ها تحلیل رگرسیون چند متغیره انجام شد که نتایج آن در جدول ۶ نشان داده شده است. بر اساس این نتایج مشخص می‌شود که ضریب بافتی با ویژگی‌های مکانیکی سنگ ارتباط ضعیفی دارد بدلیل آنکه ضریب بافتی بیانگر خصوصیات هندسی بافت سنگ است و سایر خصوصیات بافتی سنگ از جمله ترکیب کانی شناسی، پیوند بین بلوری و غیره در آن لحاظ نشده است. در بین ویژگی‌های فیزیکی نتایج تحلیل رگرسیون چند متغیره نشان می‌دهد چگالی خشک و سرعت موج تراکمی دارای ارتباط قوی‌تر و درجه اهمیت بالاتری نسبت به درصد تخلخل است همچنین بر اساس ضریب تطابق بدست آمده و شاخص اهمیت F می‌توان گفت که ارتباط بین ویژگی‌های بافتی و فیزیکی نسبت به ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها از نظر آماری معنادارتر هستند و می‌توان در پیش بینی مقادیر آنها استفاده کرد.

جدول ۵- معادلات رگرسیون و پارامترهای تحلیل آماری مربوطه

Table 5. Regression equations and related statistical analysis parameters

Equation	R^2	df	F- value (observed)	F-value (critical)	t- value (observed)	t-value (critical)
Q=32.653(TC)+6.4746	0.24	17	4447	2.27	8.54	2.10
BTS=4.1705(TC)+0.5373	0.23	17	74.43	2.27	6.26	2.10
SCHMIT=17.042(TC)+25.446	0.14	17	2031	2.28	15.05	2.10
N =-11.436(TC)+22.27	0.18	17	712	2.27	8.56	2.10
GS=0.2416(TC)+2.1698	0.62	17	0.1	0.44	27.43	2.10
VP=-489.72(TC)+1817	0.47	17	59195	2.31	36.82	2.10

جدول ۶- نتایج تحلیل رگرسیون چند متغیره

Table 6. Multiple regression models

Equation	R^2	Significance of F
TC= (0/0092) UCS+(0/0199) BTS-(0/006) SCHMIT	0.27	0.194
TC= (1/98) GS+(0/002) N-(0/00066) VP	0.76	0.00009

۶-جنبه های کاربردی

سنگ‌های رسوبی بخش عمده‌ای از لیتولوژی پوسته ایران را تشکیل می‌دهند و در بسیاری از پروژه‌های زیرساختی حیاتی نظیر تونل‌سازی، سدسازی، احداث بزرگراه‌ها و ساختمان‌های مهم به‌عنوان منابع قرضه یا ساختگاه طرح مورد استفاده قرار می‌گیرند؛ بنابراین شناسایی دقیق ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی این سنگ‌ها و پارامترهای بافتی مؤثر بر آن‌ها، نقشی کلیدی در طراحی، انتخاب تجهیزات حفاری و برش، و ارزیابی پایداری کوتاه‌مدت و بلندمدت این سازه‌ها ایفا می‌کند. تعیین دقیق این پارامترها و شناخت عوامل بافتی اثرگذار بر آن‌ها بر عهده زمین‌شناسان مهندس است که با درک عمیق از بافت سنگ می‌توانند ارزیابی مناسبی از رفتار مکانیکی توده سنگ ارائه دهند. نتایج این پژوهش نشان داد که ضریب بافتی (TC) به‌تنهایی همبستگی ضعیفی با ویژگی‌های مقاومتی سنگ (مقاومت تراکمی تک‌محوری، مقاومت کششی برزیلی و عدد چکش اشمیت) دارد؛ ازاین‌رو استفاده صرف از این پارامتر برای پیش‌بینی مستقیم رفتار مقاومتی سنگ در عمل با احتیاط توصیه می‌شود و لازم است در کنار آن، پارامترهای پتروگرافی تکمیلی نظیر ترکیب کانی‌شناسی و تخلخل نیز در نظر گرفته شوند. در مقابل، ارتباط قوی‌تری میان ضریب بافتی و ویژگی‌های فیزیکی سنگ از جمله چگالی خشک و سرعت موج تراکمی مشاهده شد، و تحلیل رگرسیون چند متغیره نیز نشان داد که ترکیب پارامترهای وزن مخصوص دانه‌ها، تخلخل و سرعت موج قادر است بخش قابل‌توجهی از تغییرات ضریب بافتی را توجیه کند. این یافته از منظر کاربردی حائز اهمیت است، چراکه نشان می‌دهد بافت سنگ که از طریق مطالعات پتروگرافی مقاطع نازک تعیین می‌شود، با پارامترهای فیزیکی قابل‌اندازه‌گیری سریع و ساده نظیر چگالی و سرعت موج تراکمی ارتباط معناداری دارد. بر این اساس، در پروژه‌های مهندسی که انجام آزمون‌های مقاومتی (نظیر مقاومت تراکمی تک‌محوری و کششی برزیلی) بر تعداد زیادی نمونه به دلیل هزینه و زمان‌بر بودن امکان‌پذیر نیست، می‌توان با تکیه بر داده‌های بافتی سنگ، برآورد اولیه‌ای از رفتار مهندسی سنگ ارائه داد و از این طریق به شناخت بهتر رفتار حفرپذیری، برش‌پذیری و کارایی تجهیزات حفاری در مراحل اولیه مطالعات ژئوتکنیکی و اکتشافی کمک کرد.

۷-نتیجه‌گیری

مصالح سنگی به طور گسترده در بسیاری از سازه‌ها در سیستم‌های زیرساختی حیاتی مانند بزرگراه‌ها، تونل‌ها، ساختمان‌های حیاتی، سدها و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. ویژگی‌های مکانیکی و فیزیکی مصالح سنگی تأثیر زیادی بر عمر مفید، قابلیت اطمینان و تاب‌آوری زیرساخت‌های حیاتی دارد. برای بررسی ارتباط بین ویژگی‌های مختلف سنگ با توجه به نتایج آزمایش‌های فیزیکی و مکانیکی و تجزیه و تحلیل ارتباط بین آنها برای تعدادی نمونه دارای تنوع از نظر نوع سنگ، سازند و موقعیت جغرافیایی نمونه مهم‌ترین نتایج و تحلیل‌های بدست آمده نشان می‌دهند که:

-ضریب بافتی دارای ضریب تطابق پایین (R^2= ۰/۲۳) با ویژگی‌های مکانیکی است. بعبارت دیگر تأثیر آن بر روی ویژگی‌های مکانیکی ناچیز است زیرا ضریب بافتی بیانگر ویژگی‌های هندسی بافت سنگ است و سایر پارامترهای بافتی ازجمله تعداد و حجم حفرات، و ویژگی‌های ساختاری (مانند ریزترک‌ها و جهت یافتگی دانه‌ها) در رابطه ضریب بافتی لحاظ نشده است.

- در بین ویژگی‌های فیزیکی مؤثر بر بافت سنگ، وزن مخصوص ذرات جامد (G_S) بیشترین تأثیر را دارد زیرا افزایش وزن مخصوص دانه‌ها بیانگر زیاد بودن تعداد سنگ‌دانه‌های موجود در سنگ است. به همین دلیل تأثیر زیادی بر روی ویژگی‌های هندسی بافت سنگ خواهد داشت.

-نتایج تحلیل رگرسیون چند متغیره نشان می‌دهد که ویژگی‌های بافتی و فیزیکی نسبت به خصوصیات مکانیکی ارتباط نسبتاً خوبی با یکدیگر دارند و رابطه آنها از دیدگاه آماری معنادار می‌باشد و می‌توان از آنها برای مدل‌های پیش بینی مقادیر یکدیگر استفاده کرد.

-افزایش ضریب بافتی باعث کاهش سرعت موج تراکمی سنگ می‌شود که دلیل آن تاثیر بیشتر بی نظمی بعد فراکتال بافت سنگ نسبت به سایر ویژگی‌های بافتی سنگ از جمله اندازه ذرات و نسبت ابعاد دانه‌ها است چراکه بی نظمی بعد فرکتال باعث طولانی شدن مسیر عبور امواج از داخل سنگ می‌شود.

تقدیر و تشکر

در پایان لازم است از کارکنان محترم آزمایشگاه‌های دانشگاه تربیت مدرس بابت همکاری‌های لازم جهت انجام آزمایش‌های این تحقیق کمال تشکر و تقدیر را داشته باشیم.

مراجع

Alber, M., Kahraman, S., 2009. Predicting the uniaxial compressive strength and elastic modulus of a fault breccia from texture coefficient. Rock Mechanics and Rock Engineering 42(1), 117–127. https://doi.org/10.1007/s00603-008-0167-x.

Aligholi, S., Lashkaripour, G.R., Ghafoori, M., Razmara, M., 2015. Thin section analysis of rock and its application in rock engineering (Case study: Mashhad Mountain Stone Granitoid). Advanced Applied Geology 5 (2), 1-14. https://doi.org/10.22055/aag.2016.12385.

Atici, U., Comakli, R., 2019. Evaluation of the physico-mechanical properties of plutonic rocks based on texture coefficient. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 119(1), 63–69. https://doi.org/10.17159/2411-9717/2019/v119n1a8.

Azzoni, A., Bailo, F., Rondena, E., Zaninetti, A., 1996. Assessment of texture coefficient for different rock types and correlation with uniaxial compressive strength and rock weathering. Rock Mechanics and Rock Engineering 29(1), 39–46. https://doi.org/10.1007/BF01019938.

Bell, F.G., 1978. The physical and mechanical properties of the fell sandstones, Northumberland, England. EngineeringGeology12,1–29. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0013-7952(78)90002-9.

Eberhardt, E., Stimpson, B., Stead, D., 1999. Effects of grain size on the initiation and propagation thresholds of stress-induced brittle fractures. Rock Mechanics and Rock Engineering 32(2), 81–99. https://doi.org/10.1007/s006030050026.

Ersoy, A., and Waller, M.D., 1995. Textural Characterisation of Rocks. Engineering Geology 39(3–4), 123–136. https://doi.org/10.1016/0013-7952(95)00005-Z.

Fahy, M.P., Guccione, M.J., 1979. Estimating strength of sandstone using petrographic thin-section data. Bulletin of the International Association of Engineering Geology 16(4), 467485. https://doi:10.2113/gseegeosci.xvi.4.46.

Goktan, R.M., Gunes, N., 2005. A semi-empirical approach to cutting force prediction for point-attack picks. Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy 105(4), 257–263. https://api.semanticscholar.org/CorpusID:37583225.

Gupta, V., Sharma, R., 2012. Relationship between textural, petrophysical and mechanical properties of quartzites: A case study from northwestern Himalaya. Engineering Geology, 135-136, 1-9. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2012.02.006.

Hemmati, A., Ghafoori, M., Moomivand, H., Lashkaripour, G.R., 2020. The effect of mineralogy and textural characteristics on the strength of crystalline igneous rocks using image-based textural quantification. Engineering Geology 266, 105467. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2019.105467.

Heydarian, P., Asef, M.R., Hamidi, J.K., Talkhablo, M., 2024. The relationship between mechanical properties and mineralogical composition of some sedimentary rocks. Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology 57(4). https://doi.org/10.1144/qjegh2024-069.

Howarth, D.F., Rowlands, J.C., 1987. Quantitative assessment of rock texture and correlation with drillability and strength properties. Rock Mechanics and Rock Engineering 20(1), 57–85. https://doi.org/10.1007/BF01019511.

Karrari, S., Haidari, M., Khademi, H.J., Tashnizi, S.E., 2022. The assessment of rock brittleness effect on drillability. Adv. Appl. Geol. Winter, 671-689. https://doi.org/ 10.22055/AAG.2020.31787.2063.

Liu, H., Kou, S., Lindqvist, P.A., Lindqvist, J.E., Åkesson, U., 2005. Microscope rock texture characterization and simulation of rock aggregate properties. Assessment, December, 1–97. http://swepub.kb.se/bib/swepub:oai:ltu01:1632870?tab2=absandamp;language=en.

Bostanzar, H., Shahriar, K., Torabi, S.R., Mohammadi, H.R., 2010. Estimation of uniaxial compressive strength and modulus of elasticity of magnetite of Gol Gohar mine, using dynamic parameters. 137–158. https://www.sid.ir/paper/808730/fa.

Mendes, F.M., AiresBarros, L., Rodrigues, F.P., 1966. The use of modal analysis in the mechanical characterization of rock masses. In: Proc. 1st Inc. Cong. Rock Mech., Lisbon, vol. 1, 217–223. https://onepetro.org/isrmcongress/proceedings-abstract/CONGRESS66/CONGRESS66/ISRM-1CONGRESS-1966-039/165997.

Merriam. R., Rieke, H.H., Kim, Y.C., 1970. TENSILE STRENGTH RELATED TO MINERALOGY AND TEXTURE OF SOME GRANITIC ROCKS. Engineering Geology 47(4), 155–160. https://doi.org/10.1016/0379-6779(92)90376-T.

Olsson, W.A., 1974. Grain size dependence of yield stress in marble. Journal of Geophysical Research, 79, 4859–4861. https://doi.org/10.1029/jb079i032p04859.

Özlürk, C.A., Nasuf, E., Bilgin, N., 2004. The assessment of rock cutability and physical and mechanical rock properties from a texture coefficient. Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, 104(7), 397–402. https://www.researchgate.net/publication/268147870.

Ozturk, C.A., Nasuf, E., Kahraman, S., 2014. Estimation of rock strength from quantitative assessment of rock texture. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy 114(6), 471–480. https://www.researchgate.net/publication/287291817.

Přikryl, R., 2001. Some microstructural aspects of strength variation in rocks. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 38(5), 671–682. https://doi.org/10.1016/S1365-1609(01)00031-4.

Räisänen, M., 2004. Relationships between texture and mechanical properties of hybrid rocks from the Jaala-Iitti complex, southeastern Finland. Engineering Geology 74(3–4), 197–211. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2004.03.009.

Sun, W., Wang, L., Wang, Y., 2017. Mechanical properties of rock materials related to mineralogical characteristics and grain size through experimental investigation: a comprehensive review. Frontiers of Structural and Civil Engineering 11(3), 322–328. https://doi.org/10.1007/s11709-017-0387-9.

Tuğrul, A., and Zarif, I.H., 1999. Correlation of mineralogical and textural characteristics with engineering properties of selected granitic rocks from Turkey. Engineering Geology 51(4), 303–317. https://doi.org/10.1016/S0013-7952(98)00071-4.

Tumac, D., Copur, H., Balci, C., Er, S., Avunduk, E., 2018. Investigation into the Effects of Textural Properties on Cuttability Performance of a Chisel Tool. Rock Mechanics and Rock Engineering 51(4), 1227–1248. https://doi.org/10.1007/s00603-017-1376-y.

Ulusay, R., Tureli, K., Ider, M.H., 1994. Prediction of engineering properties of a selected litharenite sandstone from its petrographic characteristics using correlation and multivariate statistical techniques. Engineering Geology 38,135-157. https://doi.org/10.1016/0013-7952(94)90029-9.

Williams, H., Turner, F.J., Gilbert, C.M., 1982. Petrography: An introduction to the study of rocks in thin sections. Second Edition, W.H. Freeman and Company, San Francisco, California, 626p. https://archive.org/search.php?query=externalidentifier%3A%22urn%3Aoclc%3Arecord%3A1245639459%22.