



Presenting relationships for estimating dynamic properties of limestone using an experimental approach

Amir Azadmehr¹, Seyed Mahmood Kazemi², Mohsen Saffarian^{3*}

1. Assistant Professor, Department of Mining Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

2. Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

3. Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

Article info

Article history

Received: 09 May 2021

Accepted: 14 June 2023

Keywords:

modulus of elasticity,
shear wave velocity,
limestone,
artificial neural network,
multivariate regression.



Abstract

Dynamic and static properties of the rocks are very important for designing geotechnical structures and modeling rock foundations. The main purpose of this paper is to present the regional and global relationships between the static and dynamic elasticity modulus with an experimental approach and to estimate the shear wave velocity of limestone by statistical methods and artificial neural network (ANN). For this purpose, petrographic, physical and mechanical experiments were first conducted on 80 limestone cores from the Karun 4 dam site. A database was then created using the literature data and compared with the results of this study. The results of statistical analysis show that the ratio of dynamic to static modulus of elasticity for the studied samples is 2.5. Also, the ratio of dynamic to static Poisson for these rocks was 1.41. The average value of the dynamic modulus obtained from the literature was equal to 19.90 GPa, which is less than the average value of the dynamic modulus of the present study (31.20 GPa). Due to the most accurate fit, the global relationship ($R^2 = 0.98$, RMSE = 7.9, MAPE = 1.67) and the regional relationship ($R^2 = 0.96$, RMSE = 5.24 MAPE = 0.91) were presented with very high accuracy between the dynamic and static modulus of elasticity. The results of artificial neural network and multivariate regression showed that estimation of shear wave velocity (V_s) based on P-wave velocity, water absorption and density is possible with high accuracy. The results showed that the ANN accuracy ($R^2 = 0.98$, RMSE = 0.27) was higher than the multivariate linear regression ($R^2 = 0.86$, RMSE = 0.39). The neural network also acts conservatively in predicting this variable.

Introduction

Dynamic and static properties of the rocks are very important for designing geotechnical structures and modeling rock foundations. Estimating these characteristics in weak and jointed rocks is a major challenge because the coring operation is difficult and sometimes impossible (Ameen et al., 2009; Rastegarnia et

al., 2021). One of the fast and low-cost estimation methods for determining static properties in rock engineering, especially in mining and construction projects, is the use of dynamic methods and index tests. The main purpose of this paper is to present the regional and global relationships between the static and dynamic elasticity modulus with an

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.105711>

*Corresponding author: Mohsen Saffarian; E-mail: saffarian@birjandut.ac.ir

How to cite this article: Azadmehr, A., Kazemi, S.M., Saffarian, M., 2023. Presenting relationships for estimating limestone rock dynamic properties with an experimental approach. Kharazmi Journal of Earth Sciences 9(1), 32- 61. <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.105711>



experimental approach and to estimate the shear wave velocity of limestone by statistical methods and artificial neural network (ANN).

Material and methods

Petrographic, physical and mechanical experiments were performed on 80 limestone cores from the Karun 4 dam site. The water absorption, and density, of the samples were assessed following the ISRM standard. Additionally, uniaxial compressive strength (UCS) tests, as per ASTM standard D2938, were conducted. Using stress-strain curve static elastic modulus (E_s) was determined. Dynamic elastic modulus (E_d) was computed for each sample based on Goodman's method (1989). A database was then created using the literature data and compared with the results of this

study. Utilizing statistical analysis, artificial neural network (ANN) and support vector regression (SVR) with radial base kernel function were employed to establish relationships for predicting UCS, E_s , and shear wave velocity. The accuracy of the predictions was evaluated using R-squared (R^2), root mean square error (RMSE), and mean absolute percentage error (MAPE).

Results and discussion

Based on Dunham's (1962) classification, the studied samples were classified as wackestone to grainstone according to the textures of the samples. Table 1 shows the results of the measured properties of the samples.

Table 1 The results of laboratory studies on the samples

	Density	UCS (Mpa)	E_s (GPa)	Water absorption (%)	E_d (GPa)	V_s (km/s)	V_p (km/s)
Mean	2.47	58.03	12.24	2.86	30.48	2.2813	3.8973
Standard Error	0.02	3.04	0.99	0.23	1.64	0.0775	0.1274
Standard Deviation	0.14	25.43	8.27	1.94	13.74	0.6487	1.0655
Sample Variance	0.02	646.88	68.45	3.78	188.87	0.4208	1.1353
Kurtosis	(0.63)	(0.71)	(0.98)	(0.47)	(0.83)	0.0322	0.1336
Skewness	(0.28)	0.18	0.35	0.60	0.21	0.5355	0.0573
Minimum	2.13	5.48	0.25	0.02	6.49	1.0766	1.2172
Maximum	2.70	109.03	29.89	7.68	60.94	3.8000	6.2400
Count	70	70	70	70	70	70	70

The results of statistical analysis show that the ratio of dynamic to static modulus of elasticity for the studied samples is 2.5. Also, the ratio of dynamic to static Poisson for these rocks was 1.41. The average value of the dynamic modulus obtained from the literature was equal to 19.90 GPa, which is less than the average value of the dynamic modulus of the present study (31.20 GPa). Due to the most accurate fit, the global relationship ($R^2 = 0.98$, RMSE

= 7.9, MAPE = 1.67) and the regional relationship ($R^2 = 0.96$, RMSE = 5.24 MAPE = 0.91) were presented with very high accuracy between the dynamic and static modulus of elasticity.

A comparison was made between the measured and predicted shear wave velocity based on the literature data (Table 2). The accuracy of the mentioned relationships based on different experimental criteria is presented in Table 2.

Table 2 Accuracy of previous equations to estimate shear wave velocity					
	Brocher (2005)	Eskandari et al., (2004)	Pickett (1963)	Fereidooni (2016)	Castagna and Backus (1993)
R ²	0.81	0.74	0.78	0.82	0.82
RMSE	0.38	0.46	0.38	0.33	0.36
MAPE	0.17	0.20	0.09	0.07	0.10

The results of artificial neural network and multivariate regression showed that estimation of shear wave velocity (V_s) based on P-wave velocity, water absorption and density is possible with high accuracy. The results showed that the ANN accuracy ($R^2 = 0.99$,

RMSE = 0.14) was higher than the multivariate linear regression ($R^2 = 0.92$, RMSE = 0.39), (Fig. 2). The neural network also acts conservatively in predicting this variable.

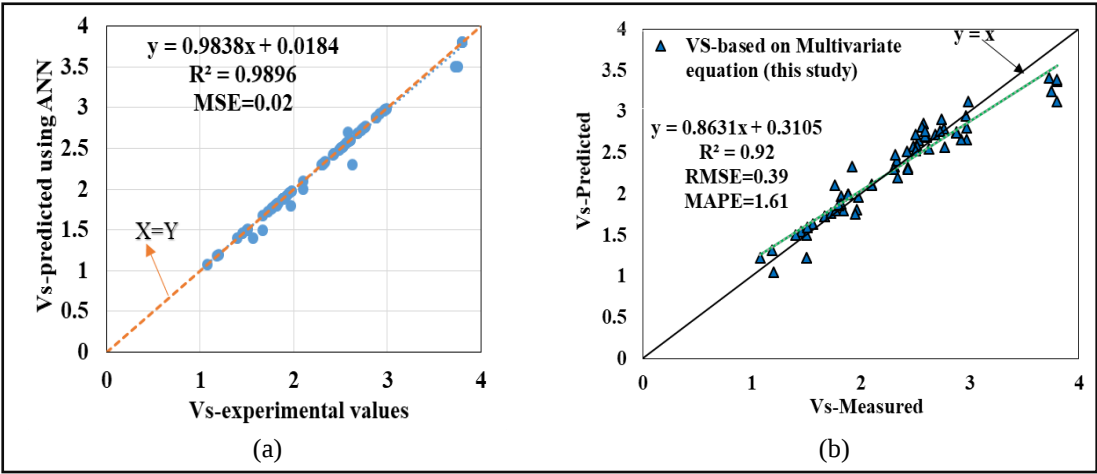


Fig. 2. The relationship between the measured values and estimated by ANN (a), and multivariate regression (b)

Conclusion

The presented models for predicting V_s are suitable for other areas when the values of the predictive indicators are in the same range as

References

Ameen, M.S., Smart, B.G., D., Somerville, J.M.C., Hamilton, S., Naji, N.A., 2009. Predicting rock mechanical properties of carbonates from wireline logs (A case study: Arab-D reservoir, Ghawar field, Saudi Arabia). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 26, 430-444.

in this research. It is suggested that future models be run on more data to improve prediction accuracy.

Brocher, T.M., 2005. Empirical relations between elastic wave speeds and density in the Earth's crust, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95 (6), 2081–2092.

Castagna, J., Backus, M.M., 1993. Offset dependent reflectivity: theory and practice of AVO analysis, *SEG Investigations Geophys. Ser.* 8, 345.

Dunham, R.J., 1962. *Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture*. In,

- W.E. Hamm (Ed.), Classification of Carbonate Rocks, A Symposium. American Association of Petroleum Geologists, 108–121.
- Eskandari, H., Rezaee, M.R., Mohammadnia, M., 2004. Application of multiple regression and artificial neural network techniques to predict shear wave velocity from wireline log data for a carbonate reservoir, South Iran, Canadian Society of Exploration Geophysicists, (CSEG) Rec., 29, 42–48.
- Fereidooni, D., 2016. Determination of the geotechnical characteristics of hornfelsic rocks with a particular emphasis on the correlation between physical and mechanical properties, Rock Mechanics and Rock Engineering, 49(7), 2595–2608.
- Goodman, R.E., 1989. Introduction to rock mechanics, Wiley, New York, Vol. 2.
- Pickett, G.R., 1963. Acoustic character logs and their applications in formation evaluation. Journal of Petroleum Technology. 15, 650–667.
- Rastegarnia, A., Lashkaripour, G.R., Sharifi Teshnizi, E., Ghafoori, M., 2021. Evaluation of engineering characteristics and estimation of static properties of clay-bearing rocks. Environmental Earth Sciences, 80, 1–24. doi.org/10.1007/s12665-021-09914-x

CRediT authorship contribution statement

 Amir Azadmehr	Conceptualization, Methodology, Validation, Investigation, Resources, Data Curation, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing, Supervision, Project administration, Funding acquisition
 Seyed Mahmood Kazemi	Software, Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Data Curation, Project administration, Funding acquisition, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing
 Mohsen Saffarian	Software, Conceptualization, Methodology, Formal analysis, Data Curation, Project administration, Funding acquisition, Writing - Original Draft, Writing - Review & Editing



ارائه روابطی جهت تخمین خصوصیات دینامیکی سنگ آهک با رویکرد تجربی

امیر آزاد مهر^۱، سید محمود کاظمی^۲، محسن صفاریان^{۳*}

۱. استادیار، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

۲. استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله	خصوصیات دینامیکی و استاتیکی سنگ‌ها برای طراحی سازه‌های ژئوتکنیکی و مدل‌سازی پی‌های سنگی اهمیت زیادی دارد. هدف اصلی این مقاله ارائه روابط منطقه‌ای و جهانی بین مدول الاستیسیته استاتیک و دینامیک با رویکرد تجربی و تخمین سرعت موج برشی سنگ آهک به روش‌های آماری و شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد. بدین منظور ابتدا آزمایش‌های پتروگرافی و فیزیکی و مکانیکی بر روی ۷۰ مغزه از سنگ آهک ساختگاه سد کارون ۴ انجام شد. سپس بانک داده‌ای از روابط ارائه شده در پژوهش‌های پیشین از نقاط مختلف جهان تهیه شد و روابط جهانی و منطقه‌ای برای سنگ آهک‌های ایران ارائه شد. نتایج آنالیز آماری نشان داد که نسبت مدول الاستیسیته دینامیک به استاتیک برای سنگ آهک‌های مورد مطالعه ۲/۵ می‌باشد. همچنین نسبت پواسون دینامیک به استاتیک برای این سنگ‌ها ۱/۴۱ می‌باشد. مقدار متوسط مدول دینامیک بدست آمده از روابط پژوهشگران مختلف برابر با ۱۹/۹۰ گیگاپاسکال است که از مقدار متوسط مدول دینامیک پژوهش حاضر (۳۱/۲۰ گیگاپاسکال) کمتر است. با توجه به دقیق‌ترین برازش رابطه جهانی ($R^2=0.96$, $RMSE=5.24$, and $MAPE=0.91$) و منطقه‌ای ($R^2=0.98$, $RMSE=7.9$, and $MAPE=1.67$) با دقت خیلی بالا بین مدول الاستیسیته دینامیک و استاتیک ارائه شد. نتایج شبکه عصبی مصنوعی و رگرسیون چند متغیره نشان داد که تخمین سرعت موج برشی بر اساس سرعت موج P، جذب آب و چگالی با دقت بالایی امکان‌پذیر می‌باشد. نتایج نشان داد که دقت شبکه عصبی ($R^2=0.98$, $RMSE=0.27$) بیشتر از روش رگرسیون چند متغیره خطی ($R^2=0.86$, $RMSE=0.39$) می‌باشد. همچنین شبکه عصبی در پیش‌بینی این متغیر محافظه کارانه عمل می‌کند.
واژه‌های کلیدی	
مدول الاستیسیته دینامیک و استاتیک، سرعت موج برشی، سنگ آهک، شبکه عصبی مصنوعی، رگرسیون چند متغیره.	



مقدمه

(Davarpanah et al., 2020; Martinez-Martinez)

(et al., 2012; Onalo et al., 2018). یکی از روش‌های

برآورد سریع و کم هزینه تعیین خواص الاستیک در

مهندسی سنگ، به ویژه در پروژه‌های معدنی و

عمرانی استفاده از روش‌های دینامیکی و آزمون‌های

برآورد دقیق خصوصیات ژئومکانیکی سنگ‌ها

تقریباً برای هر نوع طراحی و تجزیه و تحلیل در

پروژه‌های ژئومکانیکی بسیار مهم است. خصوصیات

مقاومتی و تغییر شکل‌پذیری سنگ‌ها توسط بسیاری

از پژوهشگران مورد مطالعه قرار گرفته است

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.105711>

*نویسنده مسئول: محسن صفاریان saffarian@birjandut.ac.ir

استناد به این مقاله: آزاد مهر، ا.، کاظمی، م.، صفاریان، م. (۱۴۰۲) ارائه روابطی جهت تخمین خصوصیات دینامیکی سنگ آهک با رویکرد تجربی،

ایران. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۹، شماره ۱، صفحه ۳۲ تا ۶۱.

<http://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.105711>



شاخص است. مدول الاستیک به عنوان یکی از مهم‌ترین پارامترهای مکانیکی، بیانگر صلبیت مواد است به طوری که جزء اصلی‌ترین پارامترهای تحلیل و طراحی قلمداد می‌شود و تعیین آن تقریباً در تمامی پروژه‌های ژئومکانیکی غیرقابل اجتناب است. مطالعات نشان می‌دهد که در اغلب موارد مقادیر مدول الاستیک استاتیک کمتر از مقادیر مدول یانگ دینامیک است. بخشی از اختلاف بین خواص مکانیکی استاتیک سنگ و خواص دینامیک بدین دلیل است که سرعت امواج فشاری در سنگ‌ها اشباع از سیال مایع نسبت به سنگ‌ها اشباع از هوا بیشتر است. علاوه بر سیال موجود در خلل و فرج سنگ، درجه سیمانی شدن ترک‌های موجود در سنگ نیز دیگر عوامل اختلاف بین مدول یانگ استاتیک و دینامیک هستند (Ghafoori et al., 2018). برای به دست آوردن مدول الاستیسیته دو روش مستقیم و غیرمستقیم وجود دارد. در روش‌های مستقیم یا مخرب که روش استاتیکی نیز نامیده می‌شوند، نمونه سنگ تحت بارگذاری آزمون مقاومت فشاری تک محوری یا سه محوری قرار گرفته و با استفاده از شیب خط منحنی تنش محوری- کرنش محوری مقدار مدول الاستیک تعیین می‌شود. در روش غیرمستقیم یا غیر مخرب که به روش‌های دینامیکی نیز معروف هستند، امواج فشاری و برشی به محیط میزبان (نمونه سنگ یا توده سنگ برجا) ارسال و با استفاده از سرعت امواج برگشتی ثبت شده به وسیله ژئوفون‌ها و به کارگیری روابط مربوطه مقادیر مدول‌های تغییرشکل را محاسبه می‌کنند به طوری که در این حالت مدول‌های

الاستیک سنگ مدول‌های الاستیک دینامیکی نامیده می‌شود (Martinez-Martinez et al., 2012). حسینی و همکاران (Hosseini et al., 2015) مدلی جهت تخمین سرعت موج برشی بر اساس داده‌های چاه پیمایی ارائه کردند. همچنین پژوهشگران مختلف بر اساس داده‌های چاه‌پیمایی و با استفاده از مدل‌های رگرسیونی، سرعت موج برشی را با دقت بسیار بالایی تخمین زدند (Ameen et al., 2009; Brocher, 2005; Eskandari et al., 2004; Pickett, 1963; Castagna and Backus, 1993). روابط ارائه شده بین مدول الاستیسیته استاتیک و دینامیک حاصل از مطالعات موردی ژئومکانیک نفتی و فیزیک سنگی برجا و حاصل از مطالعات آزمایشگاهی بر روی مغزه به تفکیک هر مطالعه در جدول ۱ ارائه شده است. زیرا اثر مقیاس تأثیر زیادی بر نتایج دارد. بررسی‌های پژوهشگران خارجی نیز نشان داده است که مدول الاستیسیته بر اساس خصوصیات فیزیکی و دینامیکی حاصل از آزمایش مغزه با دقت بالایی قابل پیش‌بینی است (Brotons et al., 2016; Brotons et al., 2014; Belikov et al., 1970; Eissa and Kazi 1988; Van Heerden, 1987; Mockoviakova and Pandula 2003; Nur and Wang, 1999; McCann and Entwisle, 1992; Fei et al., 2016; Brotons et al., 2016). همکاران (Brotons et al., 2016) بیان کردند که رابطه این دو متغیر برای سنگ‌های مختلف از نوع خطی و لگاریتمی است. داورپناه و همکاران (Davarpanah et al., 2020) رابطه مدول استاتیک و دینامیک مربوط به پژوهشگران مختلف را بررسی کردند و بیان کردند که همبستگی خطی و غیر خطی

ساختمان مورد مطالعه

سد کارون ۴ یکی از پروژه‌های طرح جامع رودخانه کارون است که در سال ۱۳۹۰ آگیری آن آغاز شد. واحدهای سنگی که سد بر روی آنها بنا شده شامل سازندهای پابده و آسماری است که از جنس آهک، آهک متخلخل، آهک مارنی، مارن آهکی و مارن تشکیل شده‌اند. در محل سد کارون ۴، سازند آسماری بر مبنای خصوصیات فیزیکی و سنگ‌شناسی به دو بخش بالایی و پایینی تقسیم می‌گردد. با توجه به تفاوت خصوصیات سنگ‌شناسی، بخش پایینی به سه زیر بخش به نام‌های AS_1 ، AS_2 و AS_3 تقسیم شده است. زیربخش AS_1 سنگ پی ساختمان سد را تشکیل می‌دهد. لذا به منظور شناسایی بهتر، ویژگی‌های سنگ‌شناسی آن بررسی شده و بر این اساس زیربخش AS_1 به ۱۰ زیر واحد تقسیم شده است (شکل ۱). با توجه به اینکه سازند آسماری بخش اعظم ساختمان را تشکیل می‌دهد شناسایی خصوصیات ژئومکانیکی آن حائز اهمیت می‌باشد.

بین این دو پارامتر وابسته به نوع سنگ است. آن‌ها بیان کردند که رابطه برای سنگ‌های رسوبی از نوع خلی می‌باشد. هر چند روابط متعددی بین خواص استاتیک و دینامیک به روش رگرسیون ساده و چند متغیره ارائه شده است، اما کاربرد شبکه عصبی مصنوعی در پیش‌بینی خواص دینامیک کمتر بررسی شده است.

هدف اصلی این مقاله مقایسه خصوصیات استاتیکی و دینامیکی و تخمین سرعت موج برشی سنگ‌های آهکی با استفاده از آزمون‌های ساده و غیر مخرب سرعت موج طولی، جذب آب و چگالی با استفاده از مدل‌های رگرسیونی و شبکه عصبی مصنوعی می‌باشد. برای انجام این کار مطالعات پتروگرافی، آزمون‌های دینامیکی، فیزیکی و مکانیکی بر روی نمونه‌های سنگ آهک تهیه شده از سازند آسماری در ساختمان سد کارون ۴ انجام شده است.

مواد و روش‌ها

جدول ۱- روابط میان مدول‌های تغییر شکل دینامیکی و استاتیکی ارائه شده مربوط به پژوهش‌های پیشین

Table 1. Relationships between dynamic and static deformation modules presented in the literature

رابطه	نوع سنگ	نوع داده استفاده شده جهت توسعه روابط	مرجع
$E_s = 0.091E_d^{1.552}$	رسوبی سنگ‌های	داده‌های آزمایش مغزه	Davarpana et al., (2020)
$E_s = 0.541E_d + 12.852$	سنگ آهک	داده‌های چاه‌پیمایی	Ameen et al., (2009)
$V_s = 0.7858 - 1.2344V_p + 0.7949V_p^2 - 0.1238V_p^3 + 0.0064V_p^4$	سنگ‌های مختلف	داده‌های چاه‌پیمایی	Brocher (2005)
$V_s = -0.1236V_p^2 + 1.612V_p - 2.3057$	سنگ‌های کربناته	داده‌های چاه‌پیمایی	Eskandari et al., (2004)
$V_s = V_p / 1.9$	سنگ‌های کربناته	داده‌های چاه‌پیمایی	Pickett (1963)
$V_s = -0.055V_p^2 + 1.017V_p - 1.031$	سنگ‌های کربناته	داده‌های چاه‌پیمایی	Castagna and Backus (1993)
$E_s = 0.932 E_d - 3.421$	سنگ‌های مختلف	داده‌های آزمایش مغزه	Brotons et al., (2016)
$E_s = 0.564E_d - 3.4941$	ماسه سنگ	داده‌های آزمایش مغزه	Fei et al., (2016)
$E_s = 0.867E_d - 2.085$	کالک‌ارنایت	داده‌های آزمایش مغزه	Brotons et al. (2014)
$E_s = 1.137 E_d - 9.685$	گرانیت	داده‌های آزمایش مغزه	Belikov et al. (1970)
$E_s = aE_d^b$	ماسه سنگ و گرانیت	داده‌های آزمایش مغزه	Van Heerden (1987)
$E_s = 0.0811E_d^{1.491}$	سنگ‌های آهکی	داده‌های آزمایش مغزه	Daraei and Zare (2019)
$E_s = 0.74 E_d - 0.82$	سنگ‌های رسوبی	داده‌های آزمایش مغزه	Eissa and Kazi (1988)
$E_s = 0.64 E_d + 6.4$	گرانیت	داده‌های آزمایش مغزه	McCann et al., (1992)
$E_s = 1.15E_d - 15.2$	سنگ سخت ($E_s > 1.5 \text{ GPa}$)	داده‌های آزمایش مغزه	Nur and Wang (1999)
$E_s = 0.771 E_d + 5.85$	سنگ‌های مختلف	داده‌های آزمایش مغزه	Mockovciakov et al., (2003)
$V_s = 0.58V_p + 217.44$	سنگ هورنفلس	داده‌های آزمایش مغزه	Fereidooni (2016)
$E_s = 0.018E_d^2 + 0.422E_d$	ماسه سنگ، شیل، دولومیت، آهک	داده‌های آزمایش مغزه	Lacy (1997)
$E_s = (E_d - 18.5) / (0.845)$	سنگ آهک (سد سیمره)	داده‌های آزمایش مغزه	Vahedi (2002)
$E_s = (E_d - 32.73) / (0.969)$	(سد رودبار) آهک دولومیتی	داده‌های آزمایش مغزه	Zarei and Davodi Jajarma (2010)
$E_s = 0.581 E_d - 4.71$	آهک و آهک مارنی (سد بازفت)	داده‌های آزمایش مغزه	Salehi et al., (2011)
$E_s = 0.014 E_d^{1.96}$	مناطق نفتی جنوب	داده‌های آزمایش مغزه	Najibi et al., (2011)

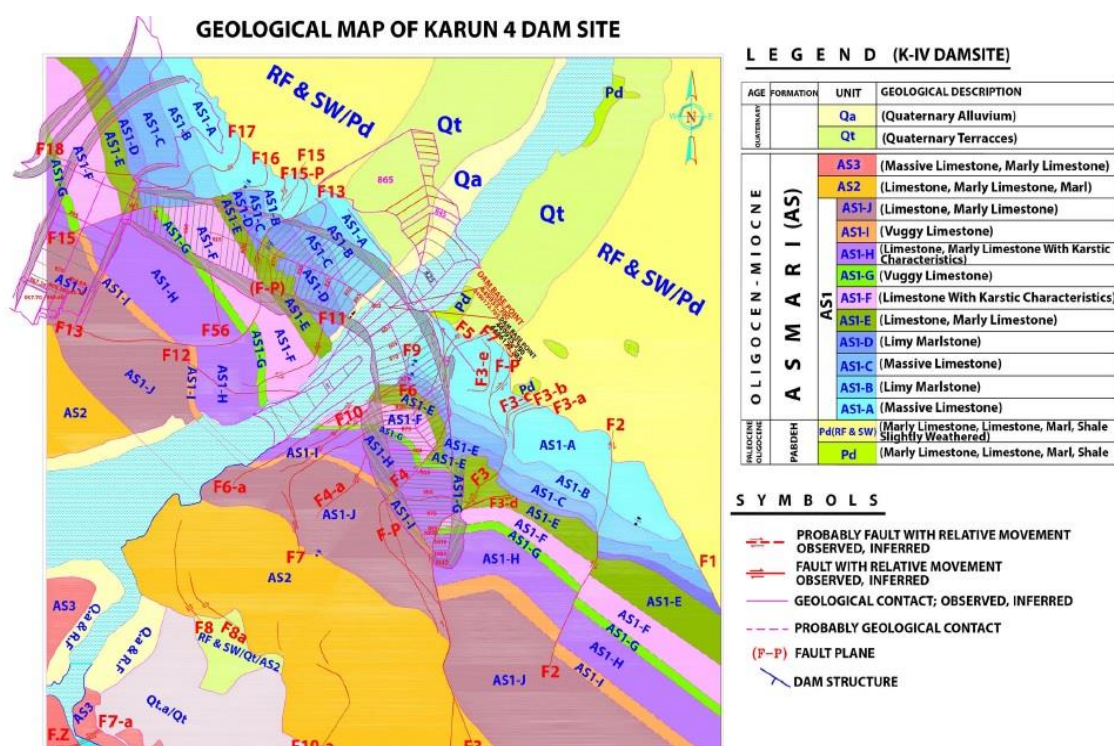


Fig. 1. Geological map of the Karun 4 dam site

شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی ساختگاه سد کارون ۴

آزمایش‌های التراسونیک جهت اندازه‌گیری سرعت امواج تراکمی (V_p) و برشی (V_s) مطابق استاندارد ASTM انجام شد. سرعت امواج بستگی به مقاومت فشاری و کششی سنگ یا به طور کلی کیفیت سنگ دارد (Lerman et al., 2021). سرعت امواج فشاری با توجه به زمان گذر از فرستنده به گیرنده در طول نمونه محاسبه می‌گردند. سرعت عبور موج در سنگ همچنین به اندازه دانه‌ها نیز بستگی دارد و با ریز شدن بافت سنگ کاهش می‌یابد. افزایش چگالی عمدتاً باعث افزایش سرعت می‌شود و با افزایش تخلخل سرعت انتشار کاهش می‌یابد (Javanmard and Noruzi, 2020; Behnamnia and Barati, 2019). قبل از انجام آزمایش ابتدا و انتهای نمونه‌ها با استفاده از گریس صیقلی شد. فرکانس مورد استفاده در این آزمایش‌ها ۰/۵ مگا هرتز می‌باشد.

بلوک‌های سنگی از ساختگاه سد کارون ۴ تهیه شد و نمونه‌ها به آزمایشگاه منتقل و برای مطالعات آزمایشگاهی آماده گردیدند. برای جلوگیری از تأثیر هرگونه آنیزوتروپی بر روی نتایج آزمون‌ها، بلوک‌های انتخابی جمع‌آوری شده فاقد هرگونه درزه، ترک و آثار هوازدگی می‌باشند. نمونه‌های استوانه‌ای با استفاده از دستگاه مغزه‌گیر تهیه و برای برش و ساب دو سر نمونه‌ها از دستگاه برش اره‌ای و ماشین ساب استفاده گردید. در تهیه و آماده‌سازی نمونه‌های مورد نیاز این پژوهش از استانداردهای پیشنهادی انجمن بین‌المللی مکانیک سنگ (ISRM) استفاده شده است. قطر نمونه‌های استوانه‌ای تهیه شده ۵۴ میلیمتر و نسبت طول به قطر آن‌ها حدود ۲ می‌باشد. آزمایش‌های فیزیکی، مکانیکی و دینامیکی بر روی ۷۰ نمونه تهیه شده از سنگ آهک‌های سازند آسماری انجام شد.

مربعات خطا (RMSE) و درصد میانگین مطلق خطا (MAPE) ارزیابی شده‌اند.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (y - y')^2} \quad (2)$$

$$MAPE = \frac{\sum_{i=1}^n \left| \frac{y - y'}{y} \right|}{n} * 100 \quad (3)$$

در این روابط، y مقدار UCS یا E_s واقعی است، y' مقدار متغیر پیش‌بینی شده با استفاده از روابط است و n تعداد کل داده است. هر چه قدر میزان RMSE و MAPE کمتر و ضریب همبستگی بیشتر باشد رابطه ارائه شده دارای دقت بالاتری می‌باشد.

نتایج و بحث

مطالعه مقاطع نازک نمونه‌ها

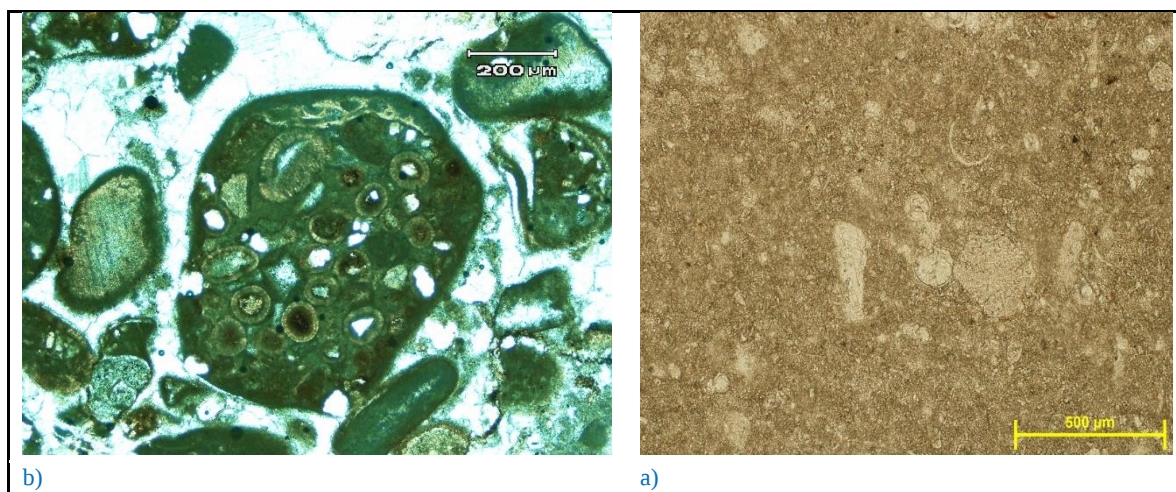
نتایج مقاطع نازک دو مورد از نمونه‌ها در شکل ۲ ارائه شده است. سازند آسماری با سن الیگو-میوسن مهم‌ترین سازند در جنوب غرب ایران می‌باشد. این سازند در ساختگاه کارون ۴ بررسی شد. بر اساس نتایج حاصل از مطالعات پتروگرافی نمونه-های سنگ آهک غالباً از کانی کلسیت تشکیل شده‌اند. سنگ آهک آسماری شامل میکروفسیل-های Foraminifera، Echinoid و Placypoda می‌باشد. فراوانی این میکروفسیل‌ها نشان می‌دهد که این سازند در محیط مردابی نهشته شده است. بر اساس طبقه‌بندی دانهام (Dunham, 1962) و بر مبنای مطالعه ۷۰ مقطع نازک، نمونه‌ها از وکستون تا گرینستون طبقه‌بندی می‌شوند.

آزمایش مقاومت تراکم تک‌محوری بر اساس استاندارد مربوطه و با نرخ بارگذاری ۰/۷ (MPa/s) بر روی نمونه‌ها انجام شد. به منظور اندازه‌گیری کرنش محوری و جانبی، نمونه‌ها با linear (variable differential transformer (LVDTs) پوشانده شدند و سپس بار محوری اعمال شد. منحنی تنش-کرنش جهت تعیین مقاومت فشاری تک محوری (UCS) و مدول الاستیسیته (E_s) ترسیم شد. E_s با استفاده از شیب منحنی تنش کرنش و با توجه به مفهوم مدول متقاطع تعیین شد. مدول الاستیسیته دینامیکی و نسبت پواسون دینامیکی با استفاده از رابطه ۱ محاسبه شدند (Goodman, 1989).

$$E_d = \frac{\rho V_s^2 (3V_p^2 - 4V_s^2)}{V_p^2 - V_s^2} \quad (1)$$

در این رابطه E_d مدول الاستیسیته دینامیک بر حسب گیگاپاسکال، V_p و V_s سرعت موج برشی و تراکمی بر حسب km/s و ρ چگالی نمونه بر حسب g/cm^3 می‌باشد. چگالی (ρ) و جذب آب (Wa) نمونه‌ها بر اساس استاندارد ISRM انجام شد. چگالی نمونه‌ها از نسبت جرم به حجم نمونه‌ها تعیین شد. نتایج آزمایش‌های فیزیکی، مقاومت فشاری تک محوری و سرعت موج تراکمی و برشی در جدول ۲ آمده است.

روابط ارائه شده در پژوهش حاضر براساس معیارهای ضریب تعیین (R^2)، جذر میانگین



شکل ۲- تصاویری از مقاطع نازک. الف) وکستون (wackestone) حاوی Foraminifera، اکینوئید Echinoid و Placypoda. ب) پکستون حاوی پلوئید و اوئید.

Fig. 2. Images of thin sections. a) wackestone containing Foraminifera, Echinoid and Placypoda. b) Packstone containing Ploid and Ooid.

نتایج آزمایش‌های مکانیک سنگ

نتایج مطالعات آزمایشگاهی بر روی مغزه‌های سنگ آهک‌های مورد مطالعه در جدول ۲ ارائه شده است. در پژوهش حاضر مدول یانگ دینامیکی سنگ‌های مورد مطالعه $4/92$ برابر بزرگ‌تر از مدول یانگ استاتیکی و نسبت پواسون دینامیکی $1/47$ برابر بزرگ‌تر از نسبت پواسون استاتیک می‌باشند. پلونا و کوک (Plona and Cook, 1995) بیان کردند که مدول دینامیکی معمولاً 2 تا 10 برابر بزرگ‌تر از مدول استاتیک می‌باشند. چون ویژگی سنگ‌ها وابسته به دامنه و فرکانس می‌باشد، مقادیر اندازه‌گیری شده در دامنه بالاتر در آزمایشگاه به طور قابل ملاحظه‌ای از اندازه‌گیری‌های لاگ با دامنه پایین متفاوت می‌باشند. سایر دلایل ذکر شده

مانند ترک‌ها و حفرات، اثر زمان، بزرگی تنش، اثر دما، سیال منفذی و تفاوت در فرکانس استفاده شده از عواملی هستند که باعث اختلاف بین خواص استاتیک و دینامیک می‌شوند (Fjar et al., 2008; Lama and Vutukuri, 1978).

در سنگ‌های کربناته تخمین V_s با استفاده از V_p به طور معنی‌داری بر اساس اطلاعات لاگ و نتایج آزمایشگاهی قابل انجام می‌باشد. پیکت (Pickett, 1963) نشان داد که نسبت V_p / V_s به عنوان مشخص کننده سنگ‌شناسی می‌تواند به کار گرفته شود. آن‌ها (Pickett, 1963) نشان دادند که این نسبت برای سنگ آهک $1/9$ و برای دولومیت $1/8$ می‌باشد. در پژوهش حاضر این نسبت برای سنگ آهک $1/71$ می‌باشد.

جدول ۲- نتایج مطالعات آزمایشگاهی بر روی مغزه‌ها Table 2. The results of laboratory studies on samples

مشخصات آماری	چگالی (g/cm ³)	UCS (MPa)	Es (GPa)	جذب آب (%)	Ed (GPa)	Vs (km/s)	Vp (km/s)
میانگین	2.47	58.03	12.24	2.86	30.48	2.28	3.90
حداقل	2.13	5.48	0.25	0.02	6.49	1.08	1.29
حداکثر	2.70	109.03	29.89	7.68	60.94	3.80	6.24
خطای استاندارد	0.02	3.04	0.99	0.23	1.64	0.08	0.13
انحراف استاندارد	0.14	25.43	8.27	1.94	13.74	0.65	1.07
واریانس	0.02	646.88	68.45	3.78	188.87	0.04	1.14
کشیدگی	-0.63	-0.71	-0.98	-0.47	-0.83	0.03	0.13
چولگی	-0.28	0.18	0.35	0.60	0.21	0.54	0.06
تعداد نمونه‌ها	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00	70.00

آنالیز آماری

رابطه پارامترها با خصوصیات دینامیکی

شکل ۳ رابطه مدول الاستیسیته استاتیک و

دینامیک مربوط به نمونه‌های مورد مطالعه را نشان

می‌دهد. در این شکل مشاهده می‌شود که بر اساس

دقیق‌ترین برازش رابطه از نوع توانی می‌باشد. با

توجه به رابطه (۴)، با دقت بالایی می‌توان مدول

استاتیکی را بر اساس مدول دینامیکی تخمین زد.

$$Es = 0.0234Ed^{1.7803} \quad (4)$$

اکثر مطالعاتی که تاکنون بر روی رابطه مدول

استاتیک و دینامیک انجام شده است (روابط موجود

در جدول ۱) نیز برتری رابطه توانی و خطی را

گزارش کرده‌اند.

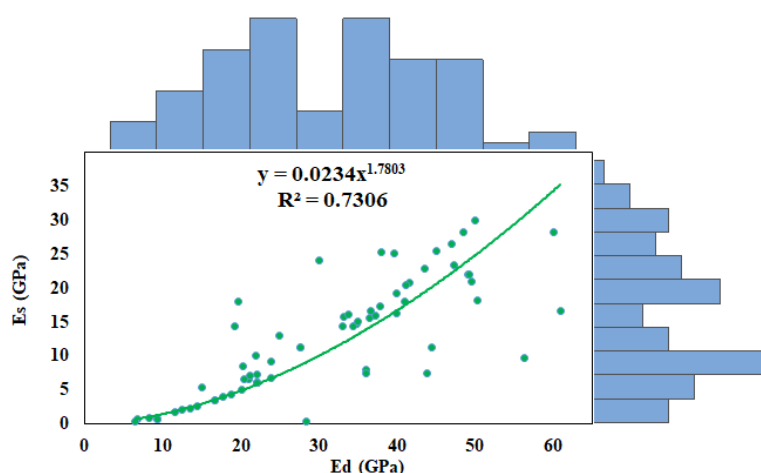


Fig. 3. Static and dynamic modulus relationships

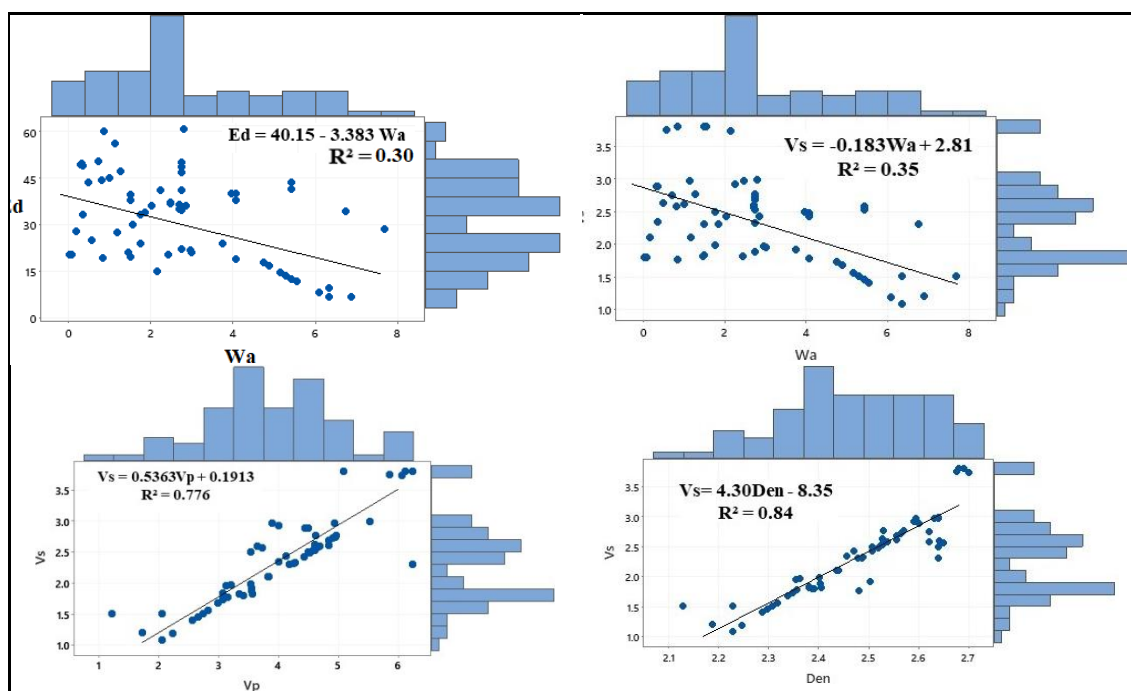
شکل ۳- روابط مدول استاتیک و دینامیک

نیز بر روی سنگ‌های رسوبی انجام شده است. مشاهده می‌شود که هر دو پژوهش سازگاری و روند مناسبی جهت تخمین سنگ آهک‌های ساختگاه سد کارون ۴ دارند. پراکندگی داده‌های هر دو پژوهش به خط قطری نزدیک می‌باشد (شکل ۵). این شکل نشان می‌دهد که پژوهش لسی (Lacy, 1997) (بر روی سنگ‌های رسوبی) و امین و همکاران (Ameen et al., 2009) (بر روی سنگ آهک) نیز دارای انطباق قابل قبولی می‌باشند. ارزیابی روابط فی و همکاران (Fei et al., 2016) و پیرا و همکاران (Pereira et al., 2021) بیشترین فاصله را از خط قطری دارند و دارای دقت کمتری جهت تخمین خصوصیات سنگ آهک‌های مورد مطالعه دارند (شکل ۵). بررسی بروتونوس و همکاران (Brotons et al., 2016) بر روی سنگ‌های رسوبی، دگرگونی و آذرین سازگاری کم و پراکندگی زیادی با داده‌های پژوهش حاضر دارند.

رابطه پارامترهای مؤثر بر سرعت موج برشی به همراه هیستوگرام آن‌ها به تفکیک در شکل ۴ ارائه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین و کمترین تأثیر بر سرعت موج برشی به ترتیب مربوط به چگالی و جذب آب می‌باشد. رابطه مدول الاستیسیته دینامیکی با جذب آب در شکل ۴ ارائه شده است. با توجه به این شکل، جذب آب تأثیر متوسطی بر مدول دینامیکی سنگ آهک‌های مورد مطالعه دارد.

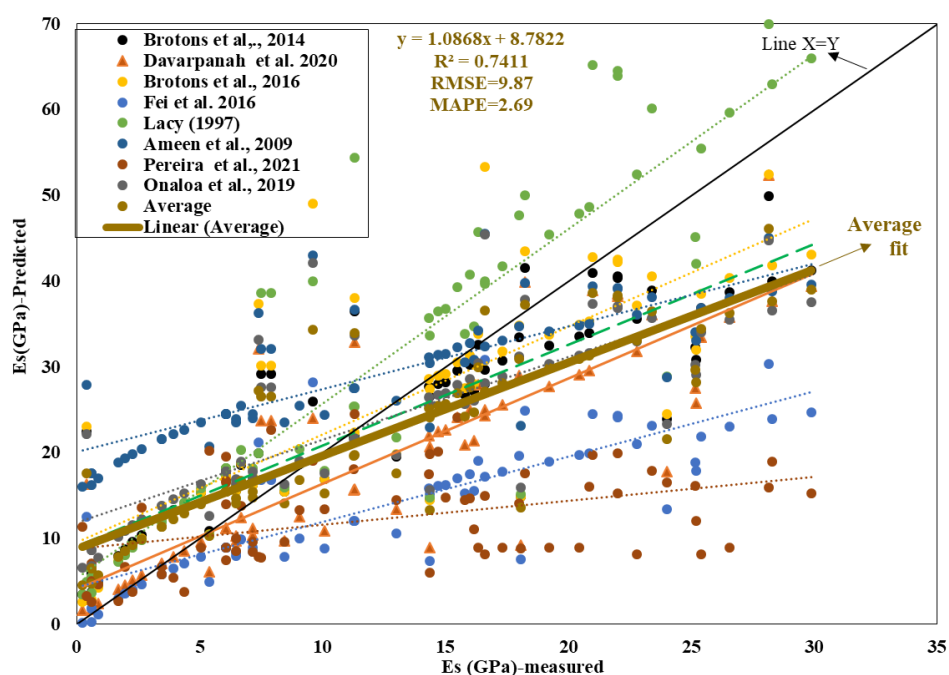
ارزیابی روابط پژوهش‌های پیشین به منظور ارائه روابط جهانی

روابط مختلفی توسط پژوهشگران پیشین جهت تخمین مدول الاستیسیته استاتیک و سرعت موج برشی ارائه شده است (جدول ۱). به منظور ارزیابی این روابط و قابلیت کاربرد روابط یاد شده برای تخمین مدول الاستیسیته استاتیک و سرعت موج برشی سنگ آهک سازند آسماری، مقادیر مدول استاتیک و سرعت موج برشی با استفاده از این روابط برای هر کدام از نمونه‌ها محاسبه و میانگین حاصل از روابط مطالعات پیشین برای هر نمونه تعیین شد. برازش مقادیر متوسط با مدول الاستیسیته اندازه‌گیری شده با توجه به دقیق‌ترین برازش ($R^2=0.74$)، $(RMSE=9.87, MAPE=2.69)$ به شکل رابطه خطی می‌باشد (شکل ۵). پژوهش داورپناه و همکاران (Davaranpanah et al., 2020) بر روی سنگ‌های رسوبی (نتایج مجموعه متعددی از مطالعات) و پژوهش بروتونوس و همکاران (Brotons et al., 2014)



شکل ۴ - روابط خصوصیات فیزیکی با خصوصیات دینامیکی

Fig. 4. Relationships between physical and dynamic properties



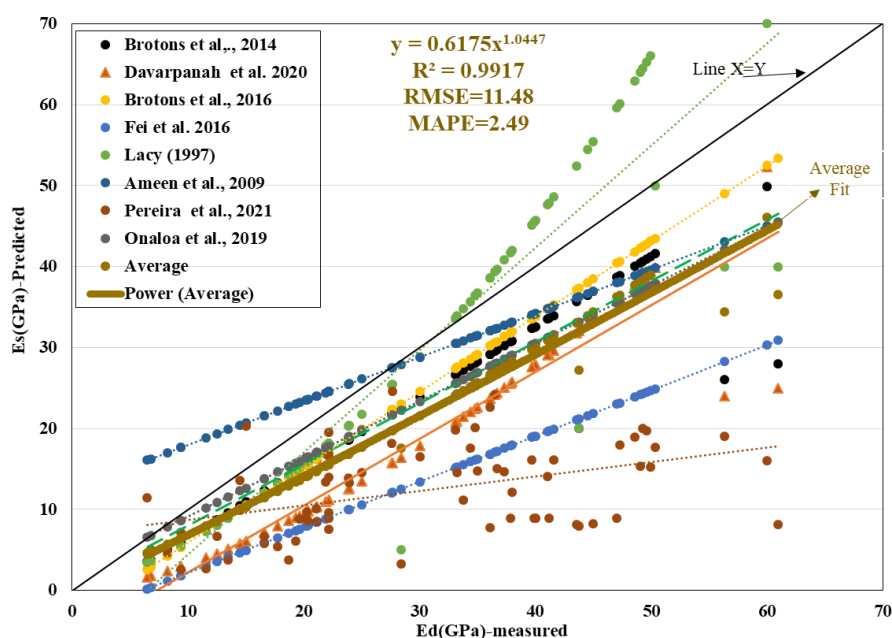
شکل ۵- مقایسه مدول الاستیسیته استاتیک حاصل از مطالعات دیگر بر اساس نتایج آزمایشگاهی با مدول الاستیسیته استاتیک اندازه‌گیری شده در این مطالعه

Fig. 5. Comparison of the static elastic modulus obtained from the literature based on laboratory results with the static elastic modulus measured in this study.

میانگین از نوع توانی می‌باشد. با توجه به این رابطه (۵) با دقت خیلی بالایی می‌توان مدول استاتیکی را بر اساس مدول دینامیکی تخمین زد.

$$E_s = 0.6175 E_d^{1.0447} \quad (5)$$

شکل ۶ رابطه مدول الاستیسیته استاتیک حاصل از متوسط داده‌های حاصل از روابط پژوهشگران خارجی با مدول الاستیسیته دینامیک اندازه‌گیری شده در این مطالعه را نشان می‌دهد. بر اساس دقیق‌ترین برآزش نوع رابطه براساس داده‌های

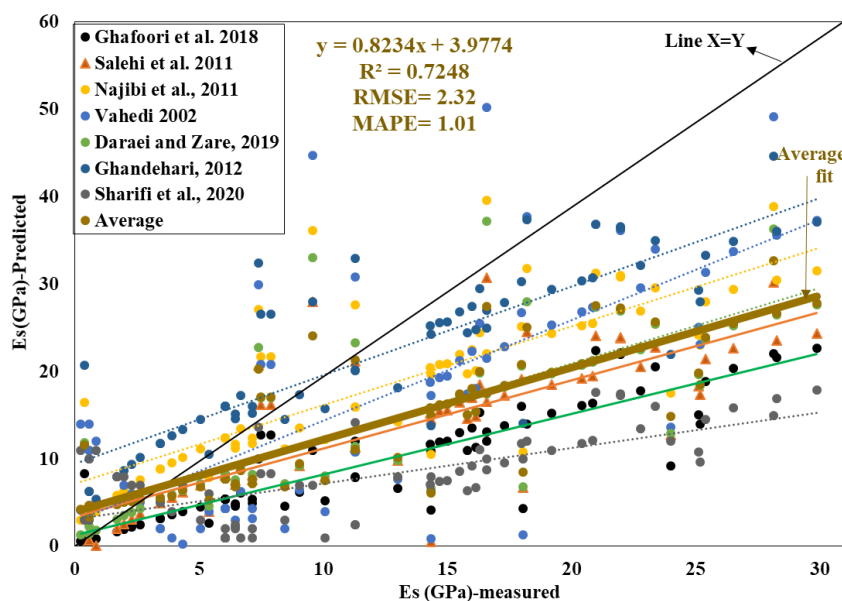


شکل ۶- مقایسه مدول الاستیسیته استاتیک حاصل از روابط پژوهش‌های پیشین بر اساس نتایج آزمایشگاهی با مدول الاستیسیته دینامیک اندازه‌گیری شده در این مطالعه.

Fig. 6. Comparison of the static elastic modulus obtained from the literature based on laboratory results with the dynamic elastic modulus measured in this study.

همکاران (Sharifi et al., 2020) بر روی سنگ آهک سازند ایلام و سروک انجام شده است. در این پژوهش، مقادیر مدول الاستاتیک با استفاده از این روابط برای هر کدام از نمونه‌ها محاسبه و میانگین حاصل از روابط مطالعات پیشین برای هر نمونه تعیین شد. ارزیابی روابط نشان می‌دهد که روابط قندهاری (Ghandehari, 2012) و نجیبی و همکاران (Najibi et al., 2011) دارای سازگاری بیشتری با داده‌های آزمایشگاهی پژوهش حاضر می‌باشد (شکل ۷). نتایج مطالعه واحدی (Vahedi, 2002) و شریفی و همکاران (Sharifi et al., 2020) پراکندگی بیشتری با داده‌های آزمایشگاهی دارند.

ارزیابی برخی از روابط ارائه شده برای سنگ‌های آهکی ایران در شکل ۷ ارائه شده است. مطالعه واحدی (Vahedi, 2002) بر روی سنگ آهک ساختگاه سد سیمره، مطالعه غفوری و همکاران (Ghafoori et al., 2018) بر روی سنگ آهک‌های سازند آسماری و جهرم، بررسی صالحی و همکاران (Salehi et al., 2011) بر روی آهک و آهک مارنی ساختگاه سد بازفت، مطالعه نجیبی و همکاران (Najibi et al., 2011) بر روی آهک سازند سروک در میدان نفتی کوپال، پژوهش دارایی و زارع (Daraei and Zare, 2019) بر روی سنگ آهک سازند آسماری در محل تونل قلاجه در استان ایلام، مطالعه قندهاری (Ghandehari, 2012) بر روی سنگ آهک سازند سروک، بررسی شریفی و



شکل ۷- مقایسه مدول الاستیسیته استاتیک حاصل از روابط ارائه شده توسط برخی پژوهش‌ها (پژوهشگران ایرانی) بر اساس نتایج آزمایشگاهی با مدول الاستیسیته استاتیک اندازه‌گیری شده در این مطالعه

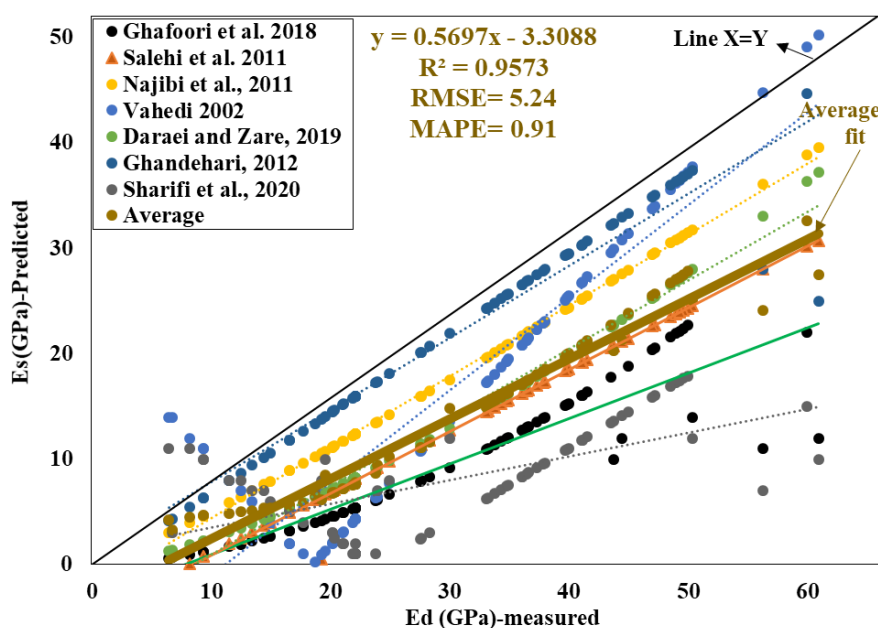
Fig. 7. Comparison of the static elastic modulus obtained from the literature (Iranian researchers) based on laboratory results with the measured static elastic modulus in this study

ارزیابی برخی از روابط ارائه شده برای سنگ‌های آهکی ایران جهت استخراج رابطه‌ای کلی برای سنگ‌های آهکی ایران در شکل ۸ ارائه شده است. معادله برازش متوسط حاصل از این بررسی‌ها بر مبنای بیشترین دقت ($R^2=0.96$, $RMSE=5.24$),

(and $MAPE=0.91$) به شکل رابطه ۶ می‌باشد. این رابطه برآیندی از مطالعات پژوهشگران ایرانی برای سنگ‌های آهکی ایران است که با اطمینان بالایی قابل کاربرد می‌باشد.

$$E_s=0.57E_d-3.31$$

(۶)

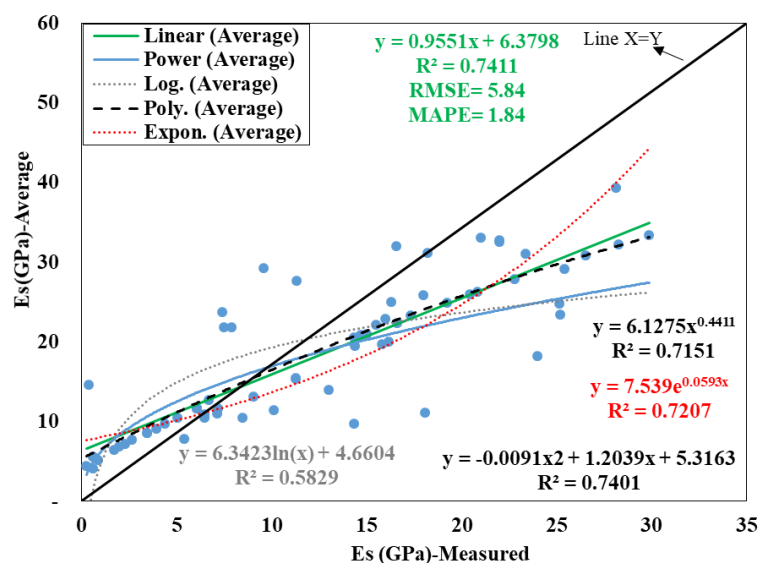


شکل ۸- مقایسه مدول الاستیسیته استاتیک حاصل از روابط روابط ارائه شده در برخی پژوهش‌ها (پژوهشگران ایرانی) بر اساس نتایج آزمایشگاهی این مطالعه با مدول الاستیسیته دینامیک اندازه‌گیری شده در این مطالعه

Fig. 8. Comparison of the static elastic modulus obtained from the literature (Iranian researchers) based on the laboratory results of this study with the measured dynamic elastic modulus in this study

شکل ۹ انواع روابط متوسط داده‌های مدول الاستیسیته استاتیک حاصل از روابط ارائه شده توسط پژوهشگران ایرانی و خارجی بر اساس نتایج آزمایشگاهی این مطالعه با داده‌های مدول الاستیسیته استاتیک اندازه‌گیری شده در این پژوهش را نشان می‌دهد. از میان این روابط

دقیق‌ترین رابطه مربوط به تابع خطی و چند جمله‌ای درجه دو می‌باشد که به لحاظ سادگی و قابلیت کاربرد رابطه خطی را می‌توان به عنوان بهترین رابطه معرفی کرد. میزان خطا بر اساس دو معیار $RMSE$ و $MAPE$ نیز برای این رابطه محاسبه شده است که نشانگر میزان خطای کم معادله خطی می‌باشد (شکل ۹).



شکل ۹- روابط مدول الاستیسیته استاتیک متوسط حاصل از روابط ارائه شده توسط پژوهشگران ایرانی و خارجی بر اساس نتایج آزمایشگاهی این مطالعه با مدول الاستیسیته استاتیک اندازه‌گیری شده در این مطالعه

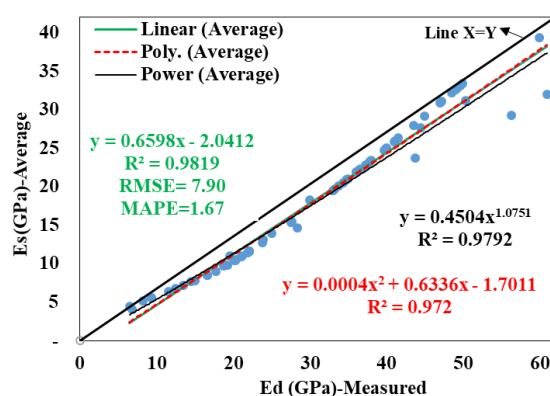
Fig. 9. Relationships between the average static elastic modulus obtained from the literature (Iranian and foreign researchers) based on the laboratory results of this study with the measured static elastic modulus in this study.

را می‌توان به‌عنوان دقیق‌ترین رابطه ($R^2=0.98$) معرفی کرد (شکل ۱۰). این رابطه از این جهت ارزشمند می‌باشد که بر اساس نتایج متعدد تحقیقات پژوهشگران جهانی تعیین شده است.

$$Es = 0.66 * Ed - 2.04$$

(۷)

انواع رابطه داده‌های مدول الاستیسیته استاتیک متوسط حاصل از روابط پژوهشگران ایرانی و خارجی بر اساس نتایج آزمایشگاهی این پژوهش با داده‌های مدول الاستیسیته دینامیک اندازه‌گیری شده در شکل ۱۰ ارائه شده است. در اینجا نیز بر اساس معیارهای ضریب تعیین و خطا، رابطه خطی



شکل ۱۰- رابطه مدول الاستیسیته استاتیک حاصل از روابط ارائه شده توسط پژوهشگران ایرانی و خارجی بر اساس نتایج آزمایشگاهی این مطالعه با مدول الاستیسیته دینامیک اندازه‌گیری شده

Fig. 10. The relationship between the static elastic modulus resulting from the literature (Iranian and foreign researchers) based on the laboratory results of this study with the measured dynamic elastic modulus

رگرسیون چند متغیره

تخمین سرعت موج برشی سنگ‌های آهکی بر اساس چگالی، جذب آب و سرعت موج تراکمی در منطقه مورد مطالعه و با توجه به جدول ۵ (جدول ضرایب و آزمون T) مطابق رابطه ۸ می‌باشد. مشخصات متغیرهای استفاده شده در این روابط در جدول ۲ آمده است.

$$V_s = -6.37 + 3.174 \text{ Den} + 0.021 \text{ Wa} + 0.1913 \text{ Vp} \quad (۸)$$

جدول ۳ نشان می‌دهد که مقادیر ضریب تعیین مدل‌ها بالا و خطای برآورد کم می‌باشد. تفاوت مهم ضریب تعیین و ضریب تعیین تعدیل شده این است که ضریب تعیین فرض می‌کند که هر متغیر مستقل مشاهده شده در مدل، تغییرات موجود در متغیر وابسته را تبیین می‌کند. بنابراین درصد نشان داده شده توسط ضریب تعیین با فرض تأثیر همه متغیرهای مستقل بر متغیر وابسته می‌باشد. در صورتی که درصد نشان داده شده توسط ضریب تعیین تعدیل شده فقط حاصل از تأثیر واقعی متغیرهای مستقل مدل بر وابسته است و نه همه متغیرهای مستقل. تفاوت دیگر این است که مناسب بودن متغیرها برای مدل توسط ضریب تعیین حتی با وجود مقدار بالا قابل تشخیص نیست

در صورتی که می‌توان به مقدار برآورد شده ضریب تعیین تعدیل شده اعتماد کرد. بنابراین مقدار تعدیل شده ضریب تعیین، میزان R^2 را با توجه به متغیرهای مستقل اضافه شده به خط رگرسیون و با توجه به عرض از مبدأهای جدید، تعدیل و اصلاح می‌کند. هرچه تفاوت بین R^2 و R^2 تعدیل شده کمتر باشد نشان می‌دهد که متغیرهای مستقل که به مدل اضافه شده‌اند به درستی انتخاب شده‌اند (Mikaeil et al., 2021).

از دیگر معیارهای ارزیابی مدل‌های رگرسیونی، مستقل بودن خطاها از یکدیگر است. خطاها تفاوت بین مقادیر واقعی و مقادیر پیش‌بینی شده توسط معادله رگرسیون هستند. در صورتی که خطاها با یکدیگر همبستگی داشته باشند، امکان استفاده از رگرسیون وجود ندارد. به منظور بررسی استقلال خطاها از یکدیگر از آزمونی به نام آزمون دوربین-واتسون (Durbin-Watson) استفاده می‌شود. مقدار این آماره به‌عنوان یک قانون باید بین ۱/۵ تا ۲/۵ باشد. در اینجا مقدار Durbin-Watson نشان می‌دهد که استقلال خطاها از یکدیگر وجود دارد و امکان استفاده از مدل پیشنهادی وجود دارد (جدول ۳).

جدول ۳- دقت مدل تخمین سرعت موج برشی			
R-sq	R-sq (adj)	R-sq (pred)	Durbin-Watson Statistic
86.30%	85.68%	83.40%	2.21

ارزیابی مدل‌ها می‌باشد. در صورت عدم برقراری این پیش فرض، نمی‌توان از رگرسیون استفاده کرد. بدین منظور باید مقادیر استاندارد خطاها محاسبه شود و نمودار توزیع داده‌ها و نمودار نرمال آن‌ها رسم شود (Wani et al., 2022). با توجه به شکل،

وضعیت نرمال بودن باقیمانده‌های مربوط به مدل توسط شکل ۱۱ ارزیابی می‌شود. نرمال بودن توزیع باقیمانده‌ها یا خطاها (اختلاف بین مقادیر سرعت موج برشی اندازه‌گیری شده و سرعت موج برشی پیش‌بینی شده) یکی دیگر از معیارهای

خطاها تقریباً دارای توزیع نرمال می‌باشند و مدل ارائه شده جهت تخمین سرعت موج برشی قابل استفاده می‌باشد (شکل ۱۱).

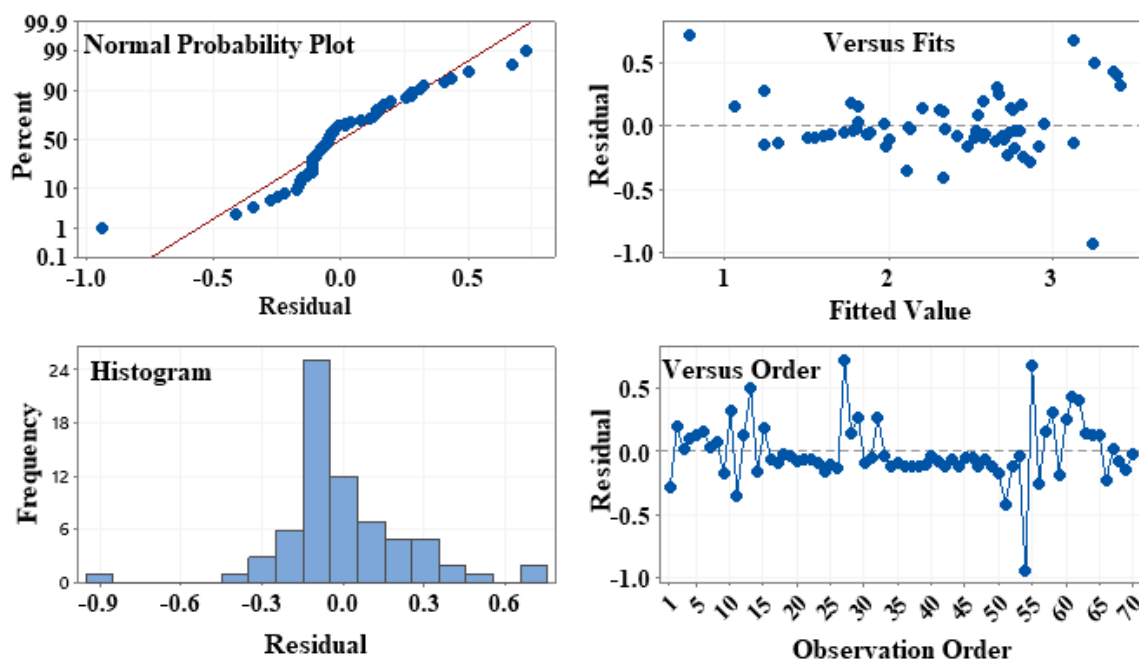


Fig. 11. Normality of the residuals related to the model

شکل ۱۱- وضعیت نرمال بودن باقیمانده‌های مربوط به مدل سطح معنی‌داری ($\text{Sig.} < 0.05$) حاصل از آنالیز واریانس (ANOVA) نشان می‌دهد که مدل برازش شده مناسب می‌باشد (جدول ۴). به بیان دیگر جدول تحلیل واریانس نشان می‌دهد که در برآورد

Table 4. The results of analysis of variance of the model

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	25.05	8.35	138.57	0.00
Den	1	2.47	2.47	41.02	0.00
Wa	1	0.07	0.07	1.14	0.29
Vp	1	0.59	0.59	9.74	0.003
Error	66	3.98	0.06		
Lack-of-Fit	57	3.86	0.07	5.10	0.006
Pure Error	9	0.12	0.013		
Total	69	29.03			

که تخمین Vs بر اساس چگالی و سرعت موج تراکمی دقیق‌تر از جذب آب می‌باشد (جدول ۳). عامل تورم واریانس (VIF: variance inflation)

مقدار سطح معنی‌داری در آزمون T موجه بودن هر یک از پارامترهای برآورد شده در معادله مدل رگرسیون را نشان می‌دهد. جدول ۵ نشان می‌دهد

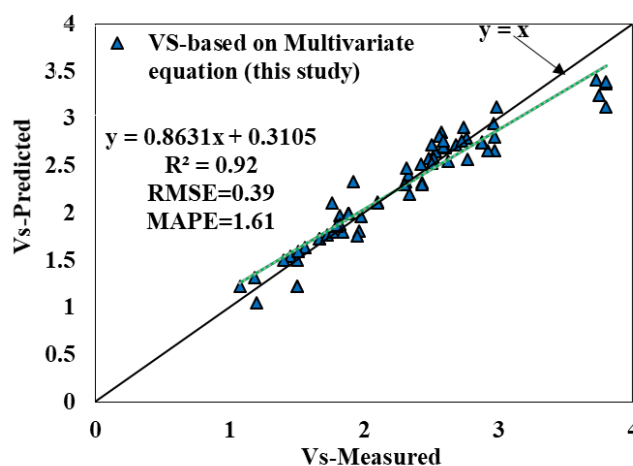
factor) هر چقدر افزایش یابد باعث می شود واریانس ضرایب رگرسیون افزایش یافته و رگرسیون را برای پیش بینی نامناسب می سازد. اگر VIF کمتر از ۱۰ باشد مشکلی برای استفاده از رگرسیون وجود ندارد. چون VIF متغیرهای

مستقل مدل کمتر از ۱۰ می باشد این مدل مناسب می باشد. ارزیابی رابطه چند متغیره ارائه شده در پژوهش حاضر نشان می دهد که دقت مدل بسیار بالا (ضریب تعیین بالا و خطا کم) می باشد (شکل ۱۲).

Table 5. Shear wave velocity estimation model coefficients

جدول ۵ - ضرایب مدل تخمین سرعت موج برشی

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-6.37	1.06	-6.02	0.000	-
Den	3.174	0.496	6.41	0.000	5.38
Wa	0.0210	0.0197	1.07	0.289	1.67
Vp	0.1913	0.0613	3.12	0.003	4.89



شکل ۱۲- ارزیابی رابطه چند متغیره ارائه شده در پژوهش حاضر

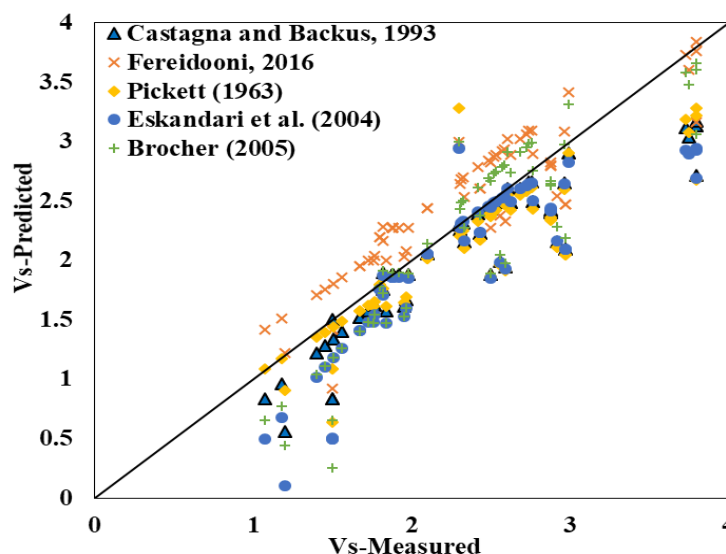
Fig. 12. Evaluation of the multivariate equation presented in the present research

در مرحله بعدی این مطالعه، مقایسه ای بین سرعت موج برشی اندازه گیری شده و پیش بینی شده بر اساس روابط تجربی، پیشنهاد شده توسط پژوهشگران مختلف انجام شد (جدول ۶). معادلات پژوهشگران مذکور در جدول ۱ ارائه شده است.

دقت روابط ذکر شده بر اساس معیارهای مختلف تجربی در جدول ۶ ارائه شده است. شکل ۱۳ پراکنش داده ها نسبت به خط قطری را نشان می دهد.

جدول ۶ - دقت روابط ارائه شده توسط پژوهشگران پیشین جهت تخمین سرعت موج برشی بر اساس معیارهای مختلف
 Table 6. Accuracy of relationships provided by previous researchers to estimate shear wave velocity based on different criteria

	Brocher (2005)	Eskandari et al., (2004)	Pickett (1963)	Fereidooni (2016)	Castagna and Backus (1993)
R ²	0.81	0.74	0.78	0.82	0.82
RMSE	0.38	0.46	0.38	0.33	0.36
MAPE	0.17	0.20	0.09	0.07	0.10



شکل ۱۳- مقایسه Vs اندازه‌گیری شده با Vs پیش‌بینی شده از روابط ارائه شده توسط پژوهشگران پیشین بر اساس سرعت موج تراکمی اندازه‌گیری شده

Fig. 13. Comparison of the measured Vs with the predicted Vs from the equations of previous researchers based on the measured compressional wave velocity

شبکه عصبی مصنوعی

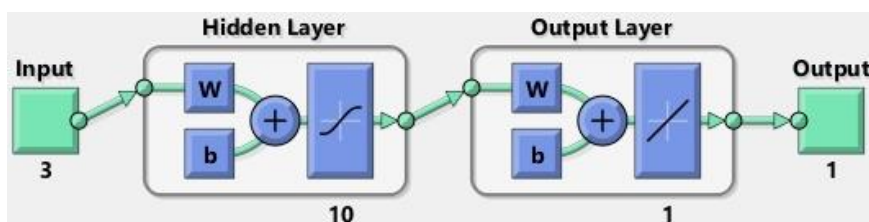
ورودی به شبکه به سه مجموعه شامل داده‌های آموزش، آزمایش و صحت سنجی تقسیم می‌شوند. درصد داده‌های آموزش، آزمایش و صحت سنجی در پژوهش حاضر به ترتیب ۷۰، ۱۵ و ۱۵ درصد انتخاب شد. از مجموعه آموزشی برای آموزش الگوریتم و بدست آوردن مقادیر دقیق وزن‌ها برای نتایج مطلوب استفاده می‌شود (Joseph and Swalih, 2023). از مجموعه اعتبارسنجی برای اطمینان از عدم وابستگی زیاد شبکه به مجموعه داده‌های آموزش استفاده می‌شود که از فرایند بیش برازش (overfitting) توسط شبکه عصبی

شبکه عصبی مصنوعی به‌طور گسترده توسط محقق مختلف در مهندسی ژئوتکنیک استفاده شده است (Saghi et al., 2019; Shamsashtiany and Ameri, 2018; Rastegarnia et al., 2018).

در این پژوهش ده نورون در لایه پنهان در شبکه عصبی مصنوعی در نظر گرفته شد که برای ساختن مدل پس‌انتشار جهت تخمین سرعت موج برشی استفاده شد. شبکه در نظر گرفته شده شامل یک لایه پنهان (با ۱۰ نورون) با ۳ ورودی و یک خروجی (شکل ۱۴) می‌باشد. کل داده‌ها به عنوان

تأیید شود (Kookalani and Cheng, 2021; Maleki and Emami, 2019). دقت متغیرهای تخمین زده شده با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی بهینه با محاسبه شاخص‌های R^2 و MSE ارزیابی شد.

جلوگیری می‌کند. مجموعه آزمایش در طول آموزش شبکه استفاده نشده و برای آزمایش شبکه در پیش‌بینی داده‌های جدید محفوظ می‌ماند (Ansari and Hashemi 2017; Hassanzadeh et al., 2021). عملکرد مدل آموزش دیده باید با استفاده از یک گروه مستقل از داده‌های آزمایشی



شکل ۱۴- ساختار شبکه عصبی استفاده شده در این پژوهش

Fig. 14. The structure of the neural network used in this research

همین طور صعودی بالا برود آموزش شبکه متوقف می‌شود. در تکرار ۱۷ تا ۲۲ در شش بار متوالی عدم بهبود مشاهده می‌شود. (شکل ۱۵).

شکل ۱۵ نمودار وضعیت آموزش شبکه را نشان می‌دهد. در این نمودار مقدار خطاها مشاهده می‌شود. اگر در ۶ بار پیایی (در قسمت خطای صحت سنجی (Val fail) بهبود وجود نداشته باشد و

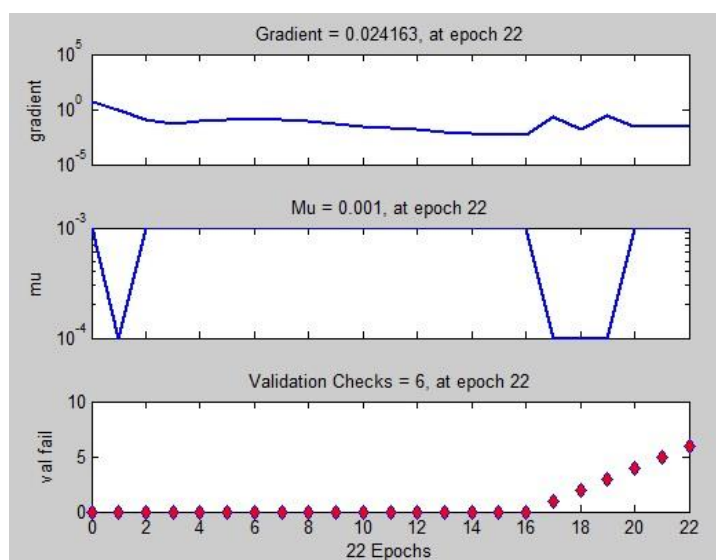


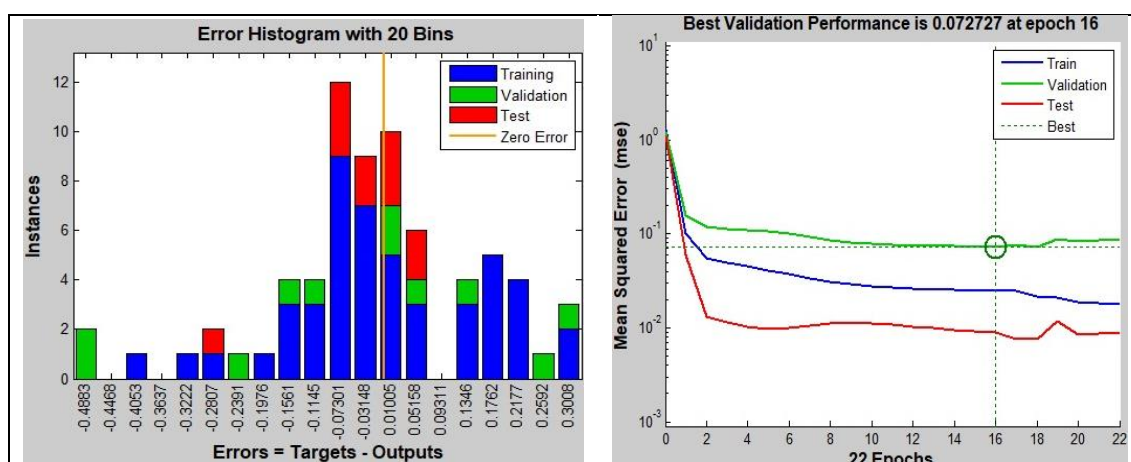
Fig. 15. Status of network training

شکل ۱۵- وضعیت آموزش شبکه

دست آمد (شکل ۱۶). همچنین این شکل هیستوگرام خطاها را نیز نشان می‌دهد. در این نمودار میزان تعلق هر دسته از داده‌ها به ازای خطاهای مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. هر

در شکل ۱۶ روند تغییرات خطای مجذور میانگین (MSE) با استفاده از الگوریتم LM در مدل بهینه با ۵ نورون در لایه پنهان ارائه شده است. کمترین مقدار MSE در دوره‌های شانزدهم به

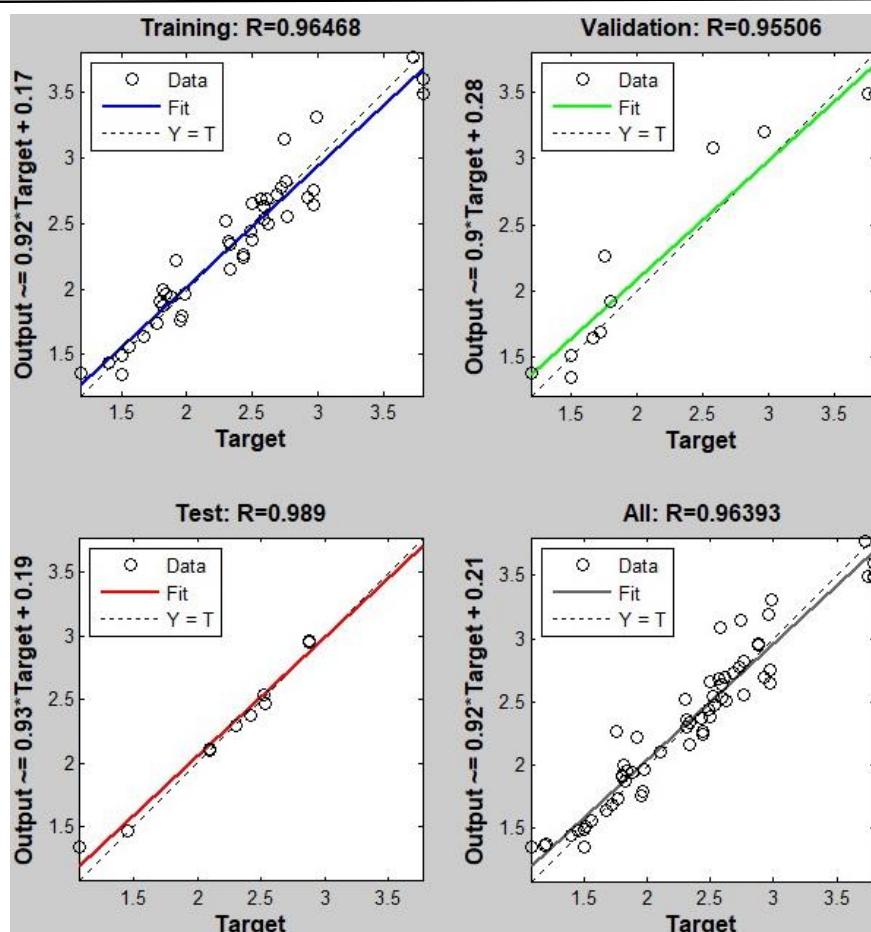
چه تمرکز دسته داده‌ها به صفر نزدیک‌تر باشد عملکرد مدل بهتر می‌باشد.



شکل ۱۶- کمترین خطای MSE (سمت راست) و هیستوگرام خطاها (سمت چپ) در مدل بهینه (در لایه مخفی ۵)
Fig. 16. The lowest MSE error (right side) and histogram of errors (left side) in the optimal model (in hidden layer 5).

با ضریب همبستگی ۰/۹۹ برای برآورد این دو متغیر دقت بالاتری نسبت به رگرسیون چند متغیره با ضریب همبستگی ۰/۹۳ نشان می‌دهد. دقت بالای روش ANN نسبت به روش رگرسیون چند متغیره برای پیش‌بینی خواص ژئومکانیکی نیز توسط پژوهشگران دیگر تأیید شده است (Rastegarnia et al., 2021; Wang and Peng, 2019).

نتایج حاصل از همبستگی بین متغیر وابسته و ورودی‌ها برای موارد آموزش، آزمایش و کل داده-های مدل ANN بهینه با استفاده از قانون آموزش لونبرگ مارکوارت (LM) در شکل‌های ۱۷ نشان داده شده است. همان‌طور که در شکل ۱۷ نشان داده شده است، دقت شبکه عصبی در پیش‌بینی نسبت پواسون بالا می‌باشد. همچنین شبکه عصبی

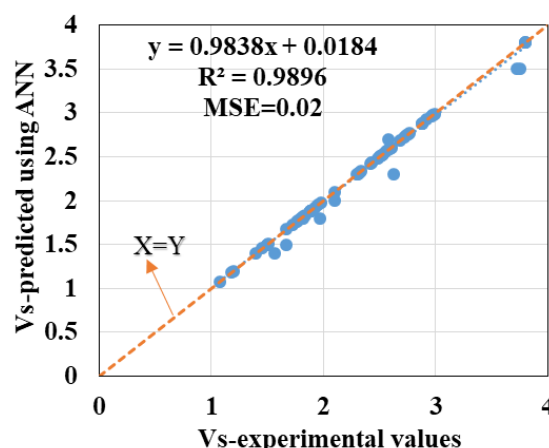


شکل ۱۷- تخمین سرعت موج برشی سنگ آهک با استفاده از شبکه عصبی

Fig. 17. Estimation of limestone shear wave velocity using neural network

روش شبکه عصبی در تخمین سرعت موج برشی سنگ‌های مورد مطالعه محافظه‌کارانه عمل می‌کند (شکل ۱۸).

شکل ۱۶ مقایسه مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه با تخمین زده شده توسط ANN را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود همبستگی پیش‌بینی شده و اندازه‌گیری شده بسیار بالا می‌باشد و مقادیر پیش‌بینی شده توسط روش ANN کمتر از مقادیر اندازه‌گیری شده می‌باشد. در نتیجه



شکل ۱۸- رابطه مقادیر اندازه‌گیری شده در آزمایشگاه و تخمین زده شده توسط ANN

Fig. 18. The relationship between the values measured in the laboratory and estimated by ANN

نتیجه‌گیری

در حالت کلی پارامترهای الاستیک به دست آمده از روش‌های استاتیکی و دینامیکی اغلب با هم متفاوت و در عمده حالات مقادیر مدول‌های دینامیکی بیشتر از استاتیکی هستند. مقادیر این اختلاف تحت تأثیر ناپیوستگی‌ها، درجه سیمان شدگی، تخلخل، و فشار آب منفذی متغیر است. از روش‌های غیرمستقیم می‌توان ویژگی‌های مکانیکی سنگ‌ها را با صرف زمان و هزینه کمتری تعیین کرد. در این پژوهش آزمایش‌های پتروگرافی، مقاومت فشاری تک محوری، سرعت موج تراکمی و برشی، دانسیته و جذب آب بر روی نمونه‌های سنگ آهک ساختگاه سد کارون ۴ انجام شد. سپس برای هر نمونه با استفاده از روابط پژوهشگران مختلف در نقاط مختلف دنیا مقادیر مدول الاستیسیته استاتیک و دینامیک محاسبه شد و روابط مختلف با داده‌های اندازه‌گیری شده پژوهش حاضر بر اساس ضریب تعیین، MAPE و RMSE ارزیابی شد. در نهایت بر اساس مقادیر متوسط، چندین رابطه منطقه‌ای (پژوهشگران ایرانی) و جهانی جهت

تخمین مدول استاتیک بر اساس مدول دینامیکی ارائه شد. همچنین با استفاده از رگرسیون چند متغیره و شبکه عصبی مصنوعی رابطه‌ای چند متغیره جهت تخمین سرعت موج برشی (V_s) بر اساس سرعت موج تراکمی، جذب آب و چگالی ارائه شد.

نتایج پژوهش نشان داد که سنگ آهک‌ها در طبقه‌بندی دانه‌ها (بر اساس بافت) در محدوده وکستون تا گرینستون قرار می‌گیرند. آنالیز آماری نشان داد که رابطه بین مدول یانگ دینامیک و مدول یانگ استاتیک توانی با همبستگی بالا ($R = 0.85$) می‌باشد. مقایسه بین ویژگی‌های استاتیک و دینامیک سنگ آهک‌های مورد مطالعه نشان داد که مدول یانگ دینامیک $4/92$ برابر بزرگ‌تر از مدول یانگ استاتیک و نسبت پواسون دینامیک $1/47$ برابر بزرگ‌تر از نسبت پواسون استاتیک می‌باشد. همچنین نسبت سرعت موج تراکمی به برشی $1/71$ می‌باشد.

دقیق‌ترین رابطه مدول الاستیسیته دینامیک و استاتیک برای سنگ‌های آهکی ایران، بر مبنای

تشکر و قدردانی

نویسندگان از کارکنان شرکت مهندسی مشاور قدس نیرو جهت ارائه اطلاعات لازم در تحقق این تحقیق تشکر و قدردانی می کنند.

متوسط داده های مدول استاتیک حاصل از روابط پژوهشگران ایرانی (متوسط داده های منطقه ای) با داده های اندازه گیری شده به صورت رابطه خطی $(Es=0.57Ed-3.31)$ با دقت خیلی بالا $(R^2=0.96)$ می باشد که با $(RMSE=5.24, \text{ and } MAPE=0.91)$ اطمینان بالایی قابل کاربرد می باشد. رابطه جهانی بر مبنای متوسط داده های حاصل از روابط همه پژوهشگران جهان (متوسط داده های جهانی) به صورت رابطه خطی $(Es=0.66Ed-2.04)$ با دقت خیلی بالا $(R^2=0.98, RMSE=7.90, \text{ and } MAPE=1.67)$ می باشد.

بررسی تمام فرضیات مدل به روش رگرسیون خطی چندگانه (مانند وضعیت هم خطی متغیرهای مستقل، استقلال خطاها و آنالیز واریانس) نشان داد که تخمین سرعت موج برشی سنگ آهک بر اساس پارامترهای جذب آب، چگالی و سرعت موج تراکمی با دقت بالا و قابل قبول در ساختگاه امکان پذیر است. بهترین پارامترها جهت تخمین V_s سرعت موج تراکمی می باشد. بر اساس معیارهای ضریب تعیین و MSE دقت شبکه عصبی مصنوعی با قانون آموزش لوببرگ مارکوارت جهت تخمین خواص دینامیک بیشتر از رگرسیون چند متغیره می باشد. همچنین روش شبکه عصبی در تخمین سرعت موج برشی محافظه کارانه عمل می کند.

References

- Ameen, M.S., Smart, B.G., D., Somerville, J.M.C., Hammilton, S., Naji, N.A., 2009. Predicting rock mechanical properties of carbonates from wireline logs (A case study: Arab-D reservoir, Ghawar field, Saudi Arabia), *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 26, 430-444.
- Ansari, Y., Hashemi, A., 2017. Neural Network Approach in Assessment of Fiber Concrete Impact Strength, *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 1(3), 88-97. doi: 10.15412.12010301.
- Behnamnia, A., Barati, M., 2019. Seismic Behavior of Steel-Concrete Composite Columns Under Cyclic Lateral Loading, *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 3(4), 183-192.
- Belikov, B.P., Alexandrov, K.S., Rysova, T.W., 1970. *Uprugie svoistva porodoobrasujscich mineralov I gomich porod*, Izdat. Nauka, Moskva.
- Brocher, T.M., 2005. Empirical relations between elastic wave speeds and density in the Earth's crust, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95 (6), 2081-2092.
- Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., Grediaga, A., 2014. Relationship between static and dynamic elastic modulus of calcarenite heated at different temperatures: the San Julián's stone, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 73(3), 791-799.
- Brotons, V., Tomás, R., Ivorra, S., Grediaga, A., Martinez-Martinez, J., Benavente, D., Gomez-Heras, M., 2016. Improved correlation between the static and dynamic elastic modulus of different types of rocks, *Material and Structures*, 49(8), 3021-3037. <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0702-7>
- Castagna, J., Backus, M.M., 1993. Offset dependent reflectivity: theory and practice of AVO analysis, *Society of Exploration Geophysicists*, 8, 345.
- Daraei, A., Zare, S.H., 2019. Presentation of a model between the dynamic and static modulus of limestone in the Asmari Formation based on laboratory and field tests, *Journal of Engineering Geology*, 12(4), Winter (in Persian).
- Davarpanah, S.M., Ván, P., Vászárhelyi, B., 2020. Investigation of the relationship between dynamic and static deformation moduli of rocks, *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*, 6(1), 1-14.
- Dunham, R.J., 1962. Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture. In, W.E. Hamm (Ed.), *Classification of Carbonate Rocks, A Symposium*. American Association of Petroleum Geologists, 108-121.
- Eissa, A., Kazi, A., 1988. Relation between static and dynamic Young's moduli of rocks, *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 25 (6), 479-482.
- Eskandari, H., Rezaee, M.R., Mohammadnia, M., 2004. Application of multiple regression and artificial neural network techniques to predict shear wave velocity from wireline log data for a carbonate reservoir, South Iran, *Canadian Society of Exploration Geophysicists*, 29, 42-48.
- Fei, W., Huiyuan, B., Jun, Y., Yonghao, Z., 2016. Correlation of Dynamic and Static Elastic Parameters of Rock, *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 21, Bund. 04, 1551-1560.
- Fereidooni, D., 2016. Determination of the geotechnical characteristics of hornfelsic rocks with a particular emphasis on the correlation between physical and mechanical properties, *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 49(7), 2595-2608.
- Fjar, E., Holt, R.M., Raaen, A.M., Risnes, R., Horsrud, P., 2008. *Petroleum related rock mechanics*, Netherlands.
- Ghafoori, M., Rastegarnia, A., Lashkaripour, G.R., 2018. Estimation of static parameters based on dynamical and physical properties in limestone

- rocks, *Journal of African Earth Sciences*, 137, 22-31.
- Ghandehari, S., 2012. Hydrocarbon Reservoir Geomechanical Analysis Using Well Data to Evaluate and Design Hydraulic Fracture Initiation and Propagation, Case Study: One of Iran Continental Shelf Oil Company's Wells, Master's thesis in Engineering Geology, Ferdowsi University of Mashhad (in Persian).
- Goodman, R.E., 1989. Introduction to rock mechanics, Wiley, New York, Vol. 2.
- Hassanzadeh, R., Beiranvand, B., Komasi, M., Hassanzadeh, A., 2021. Investigation of data mining method in optimal operation of Eyvashan earth dam reservoir based on PSO algorithm, *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 8(2), doi: 10.22034.2021.302238.1063.
- Hosseini, Z., Kodkhodaei, A., Qarachelo, S., 2015. Optimization of particle community in order to estimate shear wave velocity from borehole data, *Kharazmi Journal of Earth Sciences*, 2(2), (in Persian).
- Javanmard, M., Noruzi, M. 2020. Effect of soil behavior model on drilling response of anchor-reinforced excavation, *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 4(1), 43-53.
- Joseph, J., Swalih, C.K., A., 2023. Implementation of Machine Learning in Structural Reliability Analysis. *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 7(3): 1-9, doi: 10.22034/JCEMA.2023.396301.1108
- Kookalani, S., Cheng, B. 2021. Structural analysis of GFRP elastic gridshell structures by particle swarm optimization and least square support vector machine algorithms, *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 11(2), doi:10.22034.2021.304981. 1064
- Lacy, L.L., 1997, October. Dynamic rock mechanics testing for optimized fracture designs. In SPE annual technical conference and exhibition. OnePetro.
- Lama, R. D., Vutukuri, V. S. 1978. Handbook on mechanical properties of rocks-testing techniques and results-volume 3(2), <http://worldcat.org/isbn/0878490221>
- Lerman, N., Aronofsky, L., Aghili, B., 2021. Investigating the microstructure and mechanical properties of metakaolin-based polypropylene fiber-reinforced geopolymer concrete using different monomer ratios, *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, doi: 10.22034.2021.302140.1062.
- Maleki, M.A., Emami, M. 2019. Application of SVM for investigation of factors affecting compressive strength and consistency of geopolymer concretes. *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 3(2), 101-107, doi: 10.22034/JCEMA.2019.92507
- Martinez-Martinez, J., Benavente, D., Garcia-del-Cura, M.A., 2012. Comparison of the static and dynamic elastic modulus in carbonate rocks. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(2), 263-268. <https://doi.org/10.1007/s10064-011-0399-y>
- McCann, D.M., Entwisle D. C. 1992. Determination of Young's modulus of the rock mass from geophysical well logs, *Geological Applications of Wireline Logs II*, Eds: Hurst, A., Griffiths, C. M. & Worthington, P. F., Geological Society Special Publication No. 65, 317-325.
- Mikaeil, R., Esmailzade, A., Shaffie Haghsheenas, S., 2021. Investigation of the Relationship Between Schimazek's F-Abrasiveness Factor and Current Consumption in Rock Cutting Process. *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 5(2): 47-55. Doi: 10.22034.2021.256604.1044.
- Mockoviakova, A., Pandula, B., 2003. Study of the relation between the static and dynamic moduli of rocks, *Metalurgija* 42, 37-39.
- Najibi A., Asif M.R., Ajal Luian R., Safian G.A., 2011. Estimating the mechanical properties of limestone using petrophysical data, *Journal of Engineering Geology*, Vol. 5, No. 1 (in Persian).
- Nur A., Wang Z., 1999. Seismic and Acoustic Velocities in Reservoir Rocks: Recent Developments, Vol.10, Society of Exploration Geophysicists.
- Onalo, D., Oloruntobi, O., Adedigba, S., Khan, F., James, L., Butt, S., 2018. Static Young's

- modulus model prediction for formation evaluation, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 171 () 394-402.
- Pereira, M.L., da Silva, P.F., Fernandes, I., Chastre, C., 2021. Characterization and correlation of engineering properties of basalts, *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 1-22.
- Pickett, G.R., 1963. Acoustic character logs and their applications in formation evaluation. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 15, 650-667.
- Plona, T.J., Cook, J.M., 1995. Effects of stress cycles on static and dynamic Young's moduli in Castlegate sandstone. *Rock Mechanics. Daamen & Schults. Balkema. Rotterdam*.
- Rastegarnia, A., Lashkaripour, G.R., Sharifi Teshnizi, E., Ghafoori, M., 2021. Evaluation of engineering characteristics and estimation of static properties of clay-bearing rocks. *Environmental Earth Sciences*, 80, 1-24. doi.org/10.1007/s12665-021-09914-x
- Rastegarnia, A., Teshnizi, E.S., Hosseini, S., Shamsi, H., Etemadifar, M., 2018. Estimation of punch strength index and static properties of sedimentary rocks using neural networks in south west of Iran. *Measurement*, 128, 464-478.
- Saghi, H., Behdani, M., Saghi, R., Ghaffari, A.R., Hirdaris, S., 2019. Application of Gene Expression Programming Model to Present a New Model for Bond Strength of Fiber Reinforced Polymer and Concrete, *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 3(1), 15-29
- Salehi M., Ajalluian R., Hashemi, M., 2011. Comparison of dynamic and static modulus of elasticity of Bazoft Dam construction rocks, 4th National Geological Conference, Payam Noor University of Mashhad (in Persian)
- Shamsashtiany, R., Ameri, M., 2018. Road Accidents Prediction with Multilayer Perceptron MLP modelling Case Study: Roads of Qazvin, Zanjan and Hamadan. *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 2(4), 181-192.
- Sharifi, J., Nooraiepour, M., Mondol, N.H., De., 2020. Application of the Analysis of Variance for Converting Dynamic to Static Young's Modulus. In 82nd EAGE Annual Conference & Exhibition (Vol. 2020, No. 1, pp. 1-5). European Association of Geoscientists & Engineers.
- Vahedi, A.A., 2002. Relationship between static and dynamic elastic parameters of limestone in the Seimareh dam site, the first conference of Iranian rock mechanics, Tehran.
- Van Heerden, W.L., 1987. General relations between Static and dynamic moduli of rocks, *Int. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 24 (6).
- Wang, P., Peng, S., 2019. On a new method of estimating shear wave velocity from conventional well logs. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 180, 105-123.
- Wani, U.A., Hamid, I., Wani, S.G., Farooq, S., 2022. Statistical Analysis of b-value Parameter under Unconfined Uniaxial Compression Testing, *Journal of Civil Engineering and Materials Application*, 6(3): 131-148, 10.22034/JCEMA.2022.354028.1093
- Zarei, V., Davodi Jajarma, A., 2010. Relationship between static and dynamic parameters of dolomitic limestone to calcareous dolomite in the construction of Lorestan Rudbar Dam, 3rd Iran Mining Engineering Conference, Yazd. (in Persian).