



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

Comparative analysis of petrophysical and statistical methods for reflecting the geological characteristics of the Kangan Formation, Central Persian Gulf

Vahid Tavakoli^{1*}, Aliakbar Jahanpanah², Mehdi Nakhostin Mortazavi³

1, 2. School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

3. ACECR, Tehran, Iran

Article info

Article history

Received: 24 September 2025

Accepted: 16 December 2025

Keywords:

Winland, Flow Zone Indicator (FZI), Jenks statistical method, Geological Quality Index (GQI).



Abstract

Heterogeneity of carbonate reservoirs resulting from lithological, textural, and diagenetic variations makes fluid flow behavior complex and unpredictable. This study was carried out to perform a comparative analysis of petrophysical and statistical methods in reflecting the geological attributes of the Kangan Formation in the central Persian Gulf. Core data and thin sections were analyzed to examine the relationships between geological characteristics and petrophysical and statistical approaches. Porosity and permeability, the percentage of lithologic components, and diagenetic parameters including the type and rate of cementation, compaction, and dolomitization have been used. Four approaches were employed for data classification, including (1) the Winland method, (2) the Flow Zone Indicator (FZI), (3) the Jenks statistical method based on porosity and combined porosity-permeability, and (4) a newly defined Geological Quality Index derived from the integration of dolomite content, effective porosity, and the rate of cementation as the main controlling factors of reservoir quality. The results showed that for all methods, reservoir quality increases from the lower to the upper groups and is accompanied by increasing dolomite, decreasing cementation and decreasing anhydrite. In the FZI method and in the Jenks method based on GQI, the separation of rocks in terms of lithologic and petrophysical characteristics was more orderly and more interpretable than with the other methods. Mean porosity and permeability vary from about 8% and 3 mD in the lower groups to more than 22% and 230 mD in the higher groups, which indicates a strong correlation between reservoir quality and diagenetic processes. The Winland method defined the overall boundaries well but was less sensitive to lithological differences. Overall, the results of this study indicate that combining geological data with statistical and petrophysical methods, can provide a more accurate and realistic representation of reservoir heterogeneities in carbonate formations and can be applied in modeling complex reservoirs.

Introduction

Many studies have attempted to subdivide rocks into more homogeneous units with respect to fluid-flow behavior using petrophysical indices. Among the most important of these methods are the Flow Zone Indicator (FZI) (Amaefule et al., 1993) and the Winland (Pittman, 1992). These approaches are generally based on laboratory core data and aim to identify flow units with similar permeability characteristics. However, most of these methods are empirical in nature and do not explicitly account for geological and diagenetic factors

(Gunter et al., 1997). Various statistical methods have been developed for classifying data without relying on prior assumptions. One such method is the Jenks algorithm (Jenks, 1967; Jenks and Caspall, 1971), which operates by minimizing within-class variance and maximizing differences between classes. This method has previously been applied in geostatistics and environmental data modeling (Gui et al., 2025; Majhi et al., 2024), but its use in petrophysical studies—particularly in carbonate rocks—remains very limited. Applying such an algorithm can help identify natural

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.102062>

*Corresponding author: Vahid Tavakoli; E-mail: vtavakoli@ut.ac.ir

How to cite this article: Tavakoli, V., Jahanpanah, A. A., Nakhostin Mortazavi, M., 2025. Comparative analysis of petrophysical and statistical methods for reflecting the geological characteristics of the Kangan Formation, Central Persian Gulf. Kharazmi Journal of Earth Sciences 11(2), 433-460. <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.102062>



BY NC

breaks in the data and provide classifications that are independent of empirical relationships. The present study was carried out to comprehensively investigate the relationships among geological attributes, petrophysical classifications, and the capability of statistical methods in the Kangan Formation of the Central Persian Gulf. In this study, in addition to the classical Winland and FZI methods, the Jenks statistical method was used to detect natural breaks in the data so that lithofacies separation could be performed without prior assumptions. In the next step, and with the aim of integrating geological data into the classification process, a new index called the Geological Quality Index (GQI) was defined. This index was calculated based on three key parameters—percentage dolomite, effective porosity, and the rate of cementation—to quantify the constructive and destructive diagenetic effects on rock quality. Accordingly, the ultimate objective of this research is to evaluate the correspondence between statistical and petrophysical groups and the lithologic characteristics, in order to determine which method has greater ability to reflect true geological boundaries. Rather than merely using lithologic characteristics to describe petrophysical groups, this study takes a novel approach by incorporating those characteristics directly into the process of defining lithofacies. Thus, the present research represents a step toward reconciling geological and petrophysical perspectives in reservoir-rock classification and improving understanding of heterogeneity in carbonate formations.

Materials and Methods

The data used in this study were obtained from a drilled well in the Kangan Formation located in the central part of the Persian Gulf. The dataset consists of core laboratory results (porosity and permeability) and thin-section data, in which diagenetic and lithological parameters were quantitatively determined based on microscopic observations and the use of standard classification charts. In the lithological data, the percentages of limestone, dolomite, and anhydrite were quantitatively measured. In addition, the abundance of

different cement types—including isopachous, blocky, bladed, and anhydrite cements—was estimated on a semi-quantitative scale from zero (absent) to four (very abundant). For petrophysical analysis, three main approaches were applied: the Winland method, the FZI, and the Jenks classification algorithm. To assess the effects of lithology and diagenesis on reservoir quality, a new index called the GQI was defined. This index combines three simple yet effective factors: the percentage of dolomite as a representative of textural and diagenetic variations, effective porosity as an indicator of pore network connectivity, and the cementation rate as an indicator of occluding processes.

Results and Discussion

To distinguish and compare the reservoir behavior of samples, the data were classified using several different approaches. These included (1) the Winland (R35) method, (2) the FZI, (3) the Jenks statistical method, based on porosity and combined porosity–permeability, and (4) the GQI. In each method, the samples were divided into several groups or rock types with distinct petrophysical properties. Overall, four groups were identified in the Winland method (RT1 to RT4), six groups in the FZI method (HFU-1 to HFU-6), and five groups in each of the Jenks models (J1 to J5). The geological characteristics of the rock types differ among methods. In the Winland classification, the transition from RT4 to RT1 corresponds to a continuous increase in reservoir quality; however, the lithological composition and rate of cementation do not necessarily vary uniformly. In the FZI classification, the improvement in quality from HFU-1 to HFU-6 is evident in the increasing porosity and permeability. Lithologically, dolomite content shows a generally increasing trend from HFU-1 to HFU-6, while anhydrite exhibits no consistent behavior and, in some cases it may even increase. The dominant cement type in all classes is blocky, and the prevailing dolomite texture is fine-crystalline. Therefore, the observed improvement in reservoir quality in the FZI method appears to be more related to pore types and facies characteristics than to changes in cement type or

dolomite crystal fabric. In the Jenks classification based on porosity, the most prominent change associated with improved quality is the marked decrease in anhydrite content from J1 to J5, whereas the limestone/dolomite ratio shows no linear trend, with maximum dolomite occurring in the middle classes. The two-dimensional Jenks classification (ϕ -k) provides clearer separation between classes and better reveals the direct influence of pore types. Although anhydrite content in the higher classes is relatively high, reservoir quality remains favorable. This apparent inconsistency indicates that, in this classification, the connectivity and size of pore throats and the organization of the pore network are more decisive than the simple percentage of anhydrite. In the GQI-based classification, class J1—with very high limestone and very low dolomite content—is clearly distinguished from class J5, which exhibits very high dolomite content. The upward trend in reservoir quality from J1 to J5 is clearly evident, corresponding to an increase in dolomite content, a decrease in cementation intensity, and a transition from mud-supported to grain-supported facies.

A comparison of the four main approaches used in this study shows that each highlights a particular aspect of the behavior of the Kangan carbonate rocks, but their ability to discriminate geological and petrophysical features is not the same. In this context, Winland and FZI effectively discriminate hydraulic behavior but provide limited insight into lithology and diagenesis. Jenks-based on porosity reflects both petrophysical and geological variations, while the ϕ -k variant enhances hydraulic resolution. Jenks-GQI offers the most comprehensive representation of reservoir quality by integrating geological, diagenetic, and petrophysical controls.

Conclusions

This study evaluates the effectiveness of different classification methods in explaining the relationship between geological characteristics and the petrophysical behavior of carbonate rocks in the Kangan Formation. Four approaches were assessed using core, laboratory, and petrographic data: (1) the Winland method, (2) the

Flow Zone Indicator (FZI), (3) the Jenks method based on porosity and combined porosity-permeability, and (4) a Jenks-based geological index. The results show that methods (1) and (2) primarily reflect the hydraulic behavior of the pore system and effectively rank rocks by porosity and permeability, but are limited in discriminating lithological, facies, and diagenetic features. In contrast, method (3) better captures lithological and facies variations and provides a clearer differentiation of reservoir quality based on pore-network connectivity, while method (4) demonstrates the strongest consistency between geological, diagenetic, and petrophysical data. These findings indicate that in heterogeneous carbonate reservoirs such as the Kangan Formation, integrating a geological-statistical index with a hydraulic indicator provides a more robust framework for reservoir classification and modeling.

References




- Amaefule, J.O., Altunbay, M.H., Tiab, D., Kersey, D.G., Keelan, D.K., 1993. Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells. In: SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, USA, 3–6 October 1993. Society of Petroleum Engineers, Paper SPE-26436-MS. <https://doi.org/10.2118/26436-MS>
- Gui, R., Song, W., Lv, J., Lu, Y., Liu, H., Feng, T., Linghu, S., 2025. Digital elevation model-driven river channel boundary monitoring using the natural breaks (Jenks) method. *Remote Sensing* 17(6), 1092. <https://doi.org/10.3390/rs17061092>
- Gunter, G.W., Finneran, J.M., Hartmann, D.J., 1997. Early determination of reservoir flow units using an integrated petrophysical method. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, 5-8 October, 1-8. <https://doi.org/10.2118/38679-MS>
- Jenks, G.F., 1967. The data model concept in statistical mapping. *International Yearbook of Cartography* 7, 186-190.
- Jenks, G.F., Caspall, F.C., 1971. Error on choroplethic maps: Definition, measurement, reduction. *Annals of the Association of American Geographers* 61(2), 217–244. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1971.tb00779.x>

Majhi, A., Dhanya, C.T., Pattanayak, S., Chakma S., 2024. Reducing the uncertainty in the tropical precipitation through a multi-criteria decision-making approach. *International Journal of Climatology* 44 (16), 5773–5790. <https://doi.org/10.1002/joc.8665>

Pittman, E.D., 1992. Relationship of porosity and permeability to various parameters derived from mercury injection-

capillary pressure curves for sandstone. *American Association of Petroleum Geologists Bull* 76, 191-198. <https://doi.org/10.1306/BDF87A4-1718-11D7-8645000102C1865D>

CRediT authorship contribution statement

 Vahid Tavakoli	Conceptualization, Methodology, Validation, Formal analysis, Resources, Data curation, Writing – Original Draft, Writing – Review & Editing, Supervision, Project administration
 Aliakbar Jahanpanah	Methodology, Software, Investigation, Data curation, Writing – Review & Editing
 Mehdi Nakhostin Mortazavi	Investigation, Resources, Validation, Writing – Review



مقاله پژوهشی

دسترسی آزاد

مجله علوم زمین خوارزمی

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

تحلیل مقایسه‌ای توانایی روش‌های پتروفیزیکی و آماری در بازتاب شاخص‌های زمین‌شناسی سازند کنگان، بخش مرکزی خلیج فارس

وحید توکلی^{۱*}، علی‌اکبر جهان‌پناه^۲، مهدی نخستین مرتضوی^۳

۱. دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۳. عضو جهاد دانشگاهی، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۰۲ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۹/۲۵	ناهمگنی مخازن کربناته ناشی از تغییرات سنگ‌شناسی، بافتی و دیاژنزی سبب می‌شود که رفتار جریان سیال درون این سنگ‌ها پیچیده و غیرقابل پیش‌بینی باشد. این پژوهش با هدف تحلیل توانایی روش‌های پتروفیزیکی و آماری در بازتاب شاخص‌های زمین‌شناسی سازند کنگان در بخش مرکزی خلیج فارس انجام شده است. در این راستا، داده‌های مغزه و مقاطع نازک مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت تا ارتباط میان ویژگی‌های زمین‌شناسی و نتایج حاصل از روش‌های پتروفیزیکی و آماری بررسی شود. داده‌ها شامل اندازه‌گیری‌های تخلخل و تراوایی، درصد اجزای سنگ‌شناسی و پارامترهای دیاژنزی شامل نوع و نرخ سیمانی‌شدن، فشردگی و دولومیتی شدن بودند. برای طبقه‌بندی داده‌ها از چهار رویکرد استفاده شد که شامل روش‌های (۱) ویلند، (۲) شاخص منطقه جریان، (۳) روش آماری جنکس بر پایه تخلخل و ترکیب تخلخل-تراوایی و (۴) همچنین شاخص جدیدی با عنوان شاخص کیفیت زمین‌شناسی تعریف گردید که از ترکیب درصد دولومیت، تخلخل مفید و نرخ سیمانی‌شدن به عنوان کنترل‌کننده‌های اصلی کیفیت مخزنی، حاصل شد. نتایج نشان داد که در تمامی روش‌ها، روند افزایشی کیفیت مخزنی از گروه‌های پایین به بالا با افزایش دولومیت، کاهش سیمانی‌شدن و کاهش انیدریت همراه است. در روش شاخص منطقه جریان و جنکس بر پایه شاخص کیفیت زمین‌شناسی، جدایش سنگ‌ها از نظر ویژگی‌های سنگ‌شناسی و پتروفیزیکی منظم‌تر و قابل تفسیرتر از سایر روش‌ها بود. میانگین تخلخل و تراوایی از حدود ۸ درصد و ۳ میلی‌داری در گروه‌های پایین تا بیش از ۲۲ درصد و ۲۳۰ میلی‌داری در گروه‌های بالاتر تغییر می‌کند که بیانگر سازگاری قوی میان کیفیت مخزنی و فرآیندهای دیاژنزی است. روش ویلند مرزهای کلی را به خوبی تعیین کرد اما حساسیت کمتری به تفاوت‌های سنگ‌شناسی داشت. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ترکیب داده‌های زمین‌شناسی با روش‌های آماری و پتروفیزیکی و تحلیل جنکس، می‌تواند تصویر دقیق‌تر و واقع‌گرایانه‌تری از ناهمگنی‌های مخزنی در سازندهای کربناته ارائه دهد و در مدل‌سازی مخازن پیچیده به کار رود.
واژه‌های کلیدی: ویلند، شاخص منطقه جریان، روش آماری جنکس، شاخص کیفیت زمین‌شناسی.	



مقدمه

و تراوایی در چنین سنگ‌هایی دشوار است و تفسیر داده‌های پتروفیزیکی به تنهایی نمی‌تواند بیانگر ماهیت واقعی ناهمگنی مخزن باشد (Ahr, 2011; Hollis et al., 2010; Lucia, 2007). بر همین اساس، در مطالعات متعددی تلاش شده است تا با استفاده از شاخص‌های پتروفیزیکی، سنگ‌ها بر اساس رفتار جریان سیال به واحدهای همگن‌تر تقسیم شوند. از مهم‌ترین این روش‌ها می‌توان به

مخازن کربناته به دلیل تنوع بسیار زیاد در بافت، ترکیب سنگ‌شناسی و فرآیندهای دیاژنزی مانند دولومیتی شدن، سیمانی‌شدن، انحلال و فشردگی بسیار ناهمگن هستند (Flügel, 2010; Lucia, 1995; Mazzullo, 2004; Moore, 2001). به دلیل این پیچیدگی‌ها، پیش‌بینی رفتار هیدرودینامیکی و توزیع تخلخل

DOI <https://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.102062>

*نویسنده مسئول: وحید توکلی vtavakoli@ut.ac.ir

استناد به این مقاله: توکلی، و.، جهان‌پناه، ع. ا.، نخستین مرتضوی، م. (۱۴۰۴). تحلیل مقایسه‌ای توانایی روش‌های پتروفیزیکی و آماری در بازتاب شاخص‌های زمین‌شناسی سازند کنگان، بخش مرکزی خلیج فارس. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۱۱، شماره ۲، صفحه ۴۳۳ تا ۴۶۰. <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.2.102062>



بازتاب‌دهنده کامل نقش فرآیندهای زمین‌شناسی در کنترل کیفیت سنگ باشد (Lucia, 2007; Moore, 2001; Ebrahimi et al., 2017; Kulabandy et al., 2023; Arvani et al., 2025).

روش‌های آماری مختلفی برای طبقه‌بندی داده‌ها بدون وابستگی به فرض‌های اولیه توسعه یافته‌اند. یکی از این روش‌ها، الگوریتم جنکس (Jenks, 1967; Jenks and Caspall, 1971) است که با هدف کمینه‌سازی واریانس درون‌گروهی و بیشینه‌سازی تفاوت بین گروه‌ها عمل می‌کند. این روش پیش‌تر در زمین‌آمار و مدل‌سازی داده‌های محیطی کاربرد داشته است (Gui et al., 2025; Majhi et al., 2024). اما استفاده از آن در مطالعات پتروفیزیکی، به‌ویژه در سنگ‌های کربناته، هنوز بسیار محدود است. استفاده از چنین الگوریتمی می‌تواند به شناسایی مرزهای طبیعی در داده‌ها کمک کند و طبقه‌بندی‌های مستقل از روابط تجربی ارائه دهد. با این حال، در بسیاری از موارد، این روش‌ها بدون ترکیب با داده‌های زمین‌شناسی به کار رفته‌اند و در نتیجه، توانایی آن‌ها در بازتاب تغییرات سنگ‌شناسی واقعی به‌صورت کامل ارزیابی نشده است.

با توجه به این موارد، پژوهش حاضر با هدف بررسی جامع ارتباط میان ویژگی‌های زمین‌شناسی، طبقه‌بندی‌های پتروفیزیکی و توان روش‌های آماری، از مغزه‌ها و مقاطع میکروسکوپی سازند کنگان در بخش مرکزی خلیج فارس استفاده شده است. در این مطالعه علاوه بر روش‌های کلاسیک وینلند و شاخص منطقه جریان، از روش آماری جنکس برای شناسایی مرزهای طبیعی داده‌ها استفاده شد تا جدایش گونه‌های سنگی بدون فرض اولیه انجام گیرد. در این مطالعه، عدم فرض اولیه به معنای عدم اعمال هرگونه آستانه از پیش تعیین شده برای تخلخل، تراوایی، نوع سنگ، رخساره یا فرآیندهای دیاژنزی است. در گام بعد، با هدف ترکیب داده‌های زمین‌شناسی در فرآیند طبقه‌بندی، شاخصی جدید با عنوان شاخص کیفیت زمین‌شناسی (Geological quality index: GQI) تعریف شد. این شاخص بر اساس سه پارامتر کلیدی شامل درصد دولومیت، تخلخل مفید و نرخ سیمانی‌شدن محاسبه گردید تا اثر فرآیندهای سازنده و مخرب بر

شاخص منطقه جریان (Amaefule et al., 1993) و شاخص وینلند (Pittman, 1992) اشاره کرد. این روش‌ها عموماً مبتنی بر داده‌های آزمایشگاهی مغزه بوده و هدف آن‌ها شناسایی واحدهای جریانی با ویژگی‌های تراوایی مشابه است. با این حال، اغلب این روش‌ها ماهیتی تجربی دارند و تأثیر عوامل زمین‌شناسی و دیاژنزی را به‌صورت مستقیم در نظر نمی‌گیرند (Gunter et al., 1997). در نتیجه، اگرچه می‌توانند تفاوت‌های کلی در کیفیت مخزنی را نشان دهند، اما ارتباط آن‌ها با رخساره‌ها، نوع سیمان و درجه دولومیتی شدن اغلب مبهم باقی می‌ماند.

در بیشتر مطالعات، ابتدا گونه‌های سنگی بر اساس شاخص‌های پتروفیزیکی مانند شاخص منطقه جریان (Flow zone indicator: FZI) یا وینلند (Winland-R35) تعیین شده و سپس ویژگی‌های سنگ‌شناسی و رخساره‌های آن‌ها گزارش شده است (Ahr, 2011; Lucia, 1995). در چنین رویکردی، رابطه دو سویه میان فرآیندهای زمین‌شناسی و مرزهای طبقه‌بندی شده بررسی نشده و در نتیجه، مرزهای پتروفیزیکی الزاماً با تغییرات واقعی سنگ‌شناسی هم‌خوان نیستند. به بیان دیگر، در اغلب مطالعات، خصوصیات زمین‌شناسی پس از تعیین گروه‌های پتروفیزیکی توصیف می‌شوند و نه به‌عنوان عاملی که می‌تواند به تعیین بهتر این گروه‌ها کمک کند. این در حالی است که فرآیندهایی مانند دولومیتی شدن، سیمانی‌شدن یا انیدریتی شدن نقش اصلی را در شکل‌گیری ناهمگنی مخزنی دارند و طبقه‌بندی بدون لحاظ این عوامل، تنها بخشی از واقعیت سنگ را بازتاب می‌دهد (Flügel, 2010; Mazzullo, 2004). ناهمگنی مخازن کربناته تنها به ویژگی‌های پتروفیزیکی محدود نمی‌شود، بلکه ارتباطی تنگاتنگ با ترکیب سنگ، نوع بافت و شدت فرآیندهای دیاژنزی دارد. دولومیتی شدن معمولاً موجب افزایش تخلخل و پایداری شبکه منافذ می‌شود، در حالی که سیمانی‌شدن و انیدریتی شدن اغلب باعث انسداد و کاهش تراوایی می‌گردند. بنابراین، درک صحیح از کیفیت مخزنی نیازمند بررسی هم‌زمان رفتار پتروفیزیکی و ویژگی‌های سنگ‌شناسی است. رویکردی که تنها به داده‌های آزمایشگاهی متکی باشد، نمی‌تواند

و کنگان در ایران شناخته می‌شوند (Insalaco et al., 2006). این نهشته‌ها هم‌ارز رخساره‌ای و زمانی با واحدهای سازند خوف (Khuff Formation) در عربستان و حاشیه جنوبی خلیج فارس هستند و از نظر زمین‌ساختی و رسوبی محیط‌های مشابهی داشته‌اند (Alsharhan and Kendall, 2003).

سازند کنگان بر روی سازند دالان قرار گرفته و مرز آن به صورت ناپیوستگی فرسایشی است که نشان‌دهنده یک وقفه (هیاتوس) در رسوب‌گذاری در مرز پرمین-تریاس است (Rahimpour-Bonab et al., 2009)؛ این سازند از نظر سنگ‌شناسی شامل تناوبی از دولومیت‌های ریز تا درشت‌بلور، آهک‌های دانه‌دار و لایه‌های نازک تا متوسط انیدریتی است. ضخامت آن در بخش مرکزی خلیج فارس بین ۳۰۰ تا ۳۵۰ متر متغیر است (Motiei, 1993). مرز بالایی سازند کنگان نیز با ظهور لایه‌های انیدریتی و شیلی سازند دشتک مشخص می‌شود (Esrafil-Dizaji and Rahimpour-Bonab, 2013). شکل ۱ موقعیت میدان و ستون چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه در بخش مرکزی خلیج فارس را نشان می‌دهد.

از نظر سنی، سازند کنگان به تریاس زیرین (اولنکین تا آنیسین) تعلق دارد و در سراسر حوضه خلیج فارس از نظر رخساره‌ای پیوستگی جانبی بالایی دارد. نهشته‌های این سازند در یک پلتفرم کربناته کم‌عمق تا محیط‌های تبخیری نهشته شده‌اند که شامل پهنه‌های بین‌کنشندی، لاگون، شول و بخش‌های دریای باز کم‌عمق می‌باشد (Insalaco et al., 2006; Kakemem et al., 2021; Peyravi et al., 2010). شواهد رسوب‌شناسی و سنگ‌شناسی نشان می‌دهد که بخش‌های پایینی سازند بیشتر شامل سنگ‌های دانه پستیپان (گرینستون تا پکستون) با تخلخل اولیه بین‌دانه‌ای هستند، در حالی که بخش‌های بالایی ترکیبی از دولومیت‌های ریزبلور و لایه‌های تبخیری را در برمی‌گیرد. فرآیندهای دیانرژی گوناگونی در طول تاریخ رسوبی این سازند رخ داده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها دولومیتی شدن، سیمانی شدن و انیدریتی شدن است. دولومیتی شدن گسترده موجب توسعه تخلخل‌های بین‌بلوری و بهبود کیفیت مخزنی در بخش‌های میانی و

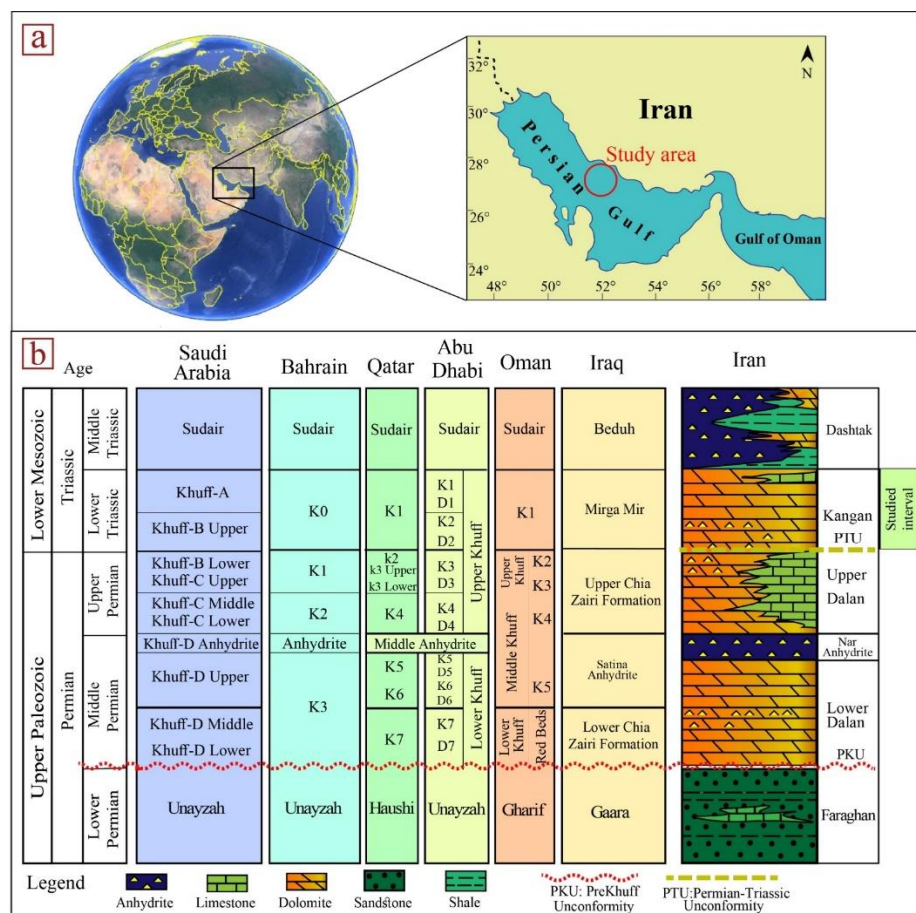
کیفیت سنگ به صورت کمی بیان شود. بر همین اساس، هدف نهایی از این پژوهش، ارزیابی تطابق میان گروه‌های آماری و پتروفیزیکی با ویژگی‌های سنگ‌شناسی است تا مشخص شود، کدام روش توانایی بیشتری در بازتاب مرزهای واقعی زمین‌شناسی دارد. در واقع، این مطالعه با نگاهی جدید، به جای آنکه ویژگی‌های سنگ‌شناسی را صرفاً در توصیف گروه‌های پتروفیزیکی به کار گیرد، تلاش می‌کند خود این ویژگی‌ها را در فرآیند تعیین گونه‌های سنگی دخالت دهد. به این ترتیب، پژوهش حاضر گامی در جهت نزدیک‌تر کردن دو دیدگاه زمین‌شناسی و پتروفیزیکی در طبقه‌بندی سنگ‌های مخزن و بهبود شناخت از ناهمگنی‌های سازندهای کربناته به شمار می‌رود.

زمین‌شناسی و چینه‌شناسی منطقه

ناحیه خلیج فارس بخشی از حوضه رسوبی زاگرس-خلیج فارس است که خود در حاشیه شمال شرقی پلتفرم عربی واقع شده است. این حوضه از اواخر پالئوزوئیک تا عهد حاضر به‌طور پیوسته فعال بوده و یکی از مهم‌ترین مناطق تجمع و ذخیره هیدروکربنی در خاورمیانه به شمار می‌رود (Alavi, 2004; Alsharhan and Kendall, 2003; Motiei, 1993). تکامل زمین‌ساختی آن تحت تأثیر حرکات زمین‌ساختی مرتبط با بازشدگی اقیانوس نئوتتیس و سپس همگرایی صفحه عربی و ایران قرار داشته است. در طی پالئوزوئیک پسین تا تریاس، منطقه خلیج فارس در حاشیه پایدار و کم‌عمق پلتفرم عربی واقع بوده که شرایط رسوب‌گذاری آرام و عمدتاً کربناته بر آن حاکم بوده است (Konert et al., 2001; Sharland et al., 2001). در این دوره، زون فرورفته خلیج فارس بخشی از رمپ پهن و کم شیب جنوبی ایران امروزی بوده که رسوبات تبخیری و کربناته متوالی در آن نهشته شده‌اند. در تریاس زیرین، با بازشدگی مجدد شاخه‌های نئوتتیس و تداوم شرایط گرم و نیمه‌خشک، رسوبات کربناته فراوانی در سراسر پلتفرم عربی نهشته شدند. در این زمان، تغییرات نسبی سطح دریا موجب پیدایش چرخه‌های متعدد رسوب‌گذاری و تشکیل تناوب سنگ‌های تبخیری و کربناته شد که امروزه به صورت سازندهای دالان

است (Enayati-Bidgoli et al., 2014; Jamalian and Tavakoli, 2025; Moradpour et al., 2008). نتیجه این فرآیندها، ایجاد ناهمگنی شدید در ویژگی‌های مخزنی است، به گونه‌ای که تخلخل و تراوایی در مقیاس چاهی و مغزه‌ای تفاوت زیادی دارند. این ناهمگنی و گوناگونی رخساره‌ای زمینه‌ای مناسب برای ارزیابی و مقایسه روش‌های پتروفیزیکی و آماری در تفکیک گونه‌های سنگی فراهم کرده است.

بالایی سازند شده است، در حالی که سیمانی شدن از نوع بلوکی و تیغه‌ای و حضور لایه‌های انیدریتی موجب انسداد نسبی منافذ در برخی نواحی شده‌اند (Mehrabi et al., 2025; Moradpour et al., 2008; Rahimpour-Bonab et al., 2010; Tavakoli and Jamalian, 2019; Tavakoli, 2021). همچنین، ساختارهایی نظیر استیلولیت‌ها و رگچه‌های انحلالی در برخی نمونه‌ها مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده فشردگی و انحلال فشاری در مراحل پس از رسوبگذاری



شکل ۱- (a) موقعیت منطقه مورد مطالعه در بخش مرکزی خلیج فارس و (b) ستون چینه‌شناسی و سازند مورد مطالعه (Tavakoli and Jamalian, 2019)

Fig. 1. a) Location of the study area in the central part of the Persian Gulf, and b) stratigraphic column and the studied formation (Tavakoli and Jamalian, 2019)

$$\text{LogR35} = 0.732 + 0.588 \text{Log}(k) - 0.864 \log(\varphi) \quad (1)$$

در این رابطه، R35 بر حسب میکرومتر، k تراوایی بر حسب میلی‌داری و φ تخلخل مغزه بر حسب درصد است. در گام سوم، به‌منظور طبقه‌بندی نمونه‌ها، مقادیر محاسبه‌شده R35 با حدود استاندارد ارائه‌شده در منابع اصلی روش وینلند (Winland, 1972) مقایسه شدند. بر این اساس، نمونه‌ها به چهار گروه پتروفیزیکی RT1 تا RT4 تقسیم گردیدند. گروه RT1 شامل سنگ‌هایی با $R35 > 10$ میکرون بوده که بیانگر وجود گلوگاه‌های درشت، اتصال‌پذیری بالا و کیفیت مخزنی بسیار مطلوب است. گروه RT2 و RT3 به ترتیب معرف سنگ‌هایی با کیفیت مخزنی متوسط تا ضعیف هستند که کاهش تدریجی شعاع گلوگاه‌ها و افت قابلیت جریان در آن‌ها مشاهده می‌شود. در نهایت، نمونه‌هایی با $R35 < 0.5$ میکرون در گروه RT4 قرار گرفتند که نشان‌دهنده سنگ‌های بسیار فشرده، با گلوگاه‌های ریز و نفوذپذیری بسیار محدود است. در گام پایانی، نتایج حاصل از این طبقه‌بندی با داده‌های سنگ‌شناسی و دیاژنزی تطبیق داده شد تا میزان توانایی روش وینلند در بازتاب ویژگی‌های زمین‌شناسی و فرآیندهای کنترل‌کننده کیفیت مخزنی مورد ارزیابی قرار گیرد.

به‌منظور شناسایی و طبقه‌بندی واحدهای جریان‌های هیدرولیکی و بررسی رفتار جریان سیال در سنگ مخزن، از روش شاخص منطقه جریان (Flow Zone Indicator; FZI) استفاده شد. این روش مبتنی بر ارتباط تجربی میان تخلخل مؤثر و تراوایی بوده و نخستین بار توسط آمیغوله و همکاران (Amaefule et al., 1993) برای تفکیک واحدهای جریان‌های هیدرولیکی معرفی شده است. در گام نخست، داده‌های تراوایی و تخلخل اندازه‌گیری شده از مغزه‌ها به‌عنوان داده‌های ورودی مورد استفاده قرار گرفتند. در گام دوم، برای هر نمونه مغزه، مقدار شاخص منطقه جریان با استفاده از رابطه ۲ محاسبه گردید:

$$\text{FZI} = \frac{0.0314 \sqrt{k/\varphi}}{\varphi_e / (1 - \varphi_e)} \quad (2)$$

داده‌های مورد استفاده در این پژوهش از یک چاه حفاری شده در سازند کنگان در بخش مرکزی خلیج فارس برداشت شده است. مجموعه داده‌ها متشکل از نتایج آزمایشگاهی مغزه‌ها (تخلخل و تراوایی) و داده‌های حاصل از مقاطع نازک است که در آن، پارامترهای دیاژنزی و سنگ‌شناسی بر پایه مشاهدات میکروسکوپی و با بهره‌گیری از نمودارهای استاندارد به‌صورت کمی تعیین شده‌اند. در داده‌های سنگ‌شناسی، درصد آهک، دولومیت و انیدریت به‌صورت کمی تعیین شد. همچنین فراوانی انواع سیمان شامل سیمان هم ضخامت (isopachous)، بلوکی (blocky)، تیغه‌ای (bladed) و سیمان انیدریتی (anhydrite cement) در مقیاس نیمه کمی از صفر (عدم حضور) تا چهار (بسیار فراوان) برآورد گردید. شدت فشردگی (compaction rate) و شاخص‌های مرتبط با انحلال فشاری مانند استیلولیت (stylolite) و رگچه‌های انحلالی (solution seam) نیز در همین مقیاس ثبت شد. دولومیت‌ها از نظر بافت (planar dolomite and non-planar dolomite) و اندازه بلور (sucrosic dolomite) و اندازه بلور (and dolomiticrite) مورد ارزیابی قرار گرفتند و بر این اساس، نرخ کلی دولومیتی شدن (dolomitization rate) تعیین شد. علاوه بر این، انواع تخلخل شامل بین‌دانه‌ای، بین‌بلوری، قالبی، حفره‌ای، فسترتال و شکستگی به‌صورت درصدی برآورد شدند. تمامی داده‌ها با استفاده از تطبیق منحنی گاما بر اساس عمق مغزه‌ها هم‌تراز شدند تا یکنواختی عمقی میان داده‌های پتروفیزیکی و سنگ‌شناسی برقرار شود.

در این پژوهش، برای ارزیابی کیفیت مخزنی و طبقه‌بندی سنگ‌ها از دیدگاه پتروفیزیکی، از روش وینلند استفاده شد. این شاخص نمایانگر شعاع مؤثر گلوگاه‌های حاکم بر جریان سیال در محیط متخلخل بوده و ارتباط مستقیمی با قابلیت عبور سیال در سنگ دارد. در گام نخست، داده‌های تخلخل و تراوایی اندازه‌گیری شده بر روی نمونه‌های مغزه، به‌عنوان ورودی محاسبات مورد استفاده قرار گرفتند. در گام دوم، مقدار شاخص R35 برای هر نمونه مغزه با استفاده از رابطه تجربی ارائه‌شده توسط پیتمن (Pitman, 1992) محاسبه شد (رابطه ۱):

(PC1)، که بیشترین واریانس مشترک میان این دو متغیر را توضیح می‌دهد، به‌عنوان متغیر ورودی برای طبقه‌بندی آماری انتخاب شد. در گام دوم، الگوریتم جنکس به‌صورت مستقل بر روی هر یک از مجموعه داده‌ها اجرا گردید. این الگوریتم با بررسی توزیع داده‌ها و تغییرات ناگهانی در مقادیر، مرزهای طبقه‌بندی را در نقاطی تعیین می‌کند که بیشترین اختلاف آماری میان گروه‌های مجاور وجود دارد، بدون آن‌که فرضی درباره نوع توزیع داده‌ها اعمال شود. در گام سوم، تعیین تعداد بهینه کلاس‌ها بر اساس یک معیار ریاضی انجام شد. برای این منظور، شاخص برازش واریانس (Goodness of Variance Fit; GVF) برای سناریوهای مختلف تعداد کلاس محاسبه گردید. این شاخص از رابطه ۳ به دست می‌آید:

$$GVF = (SDAM - SDCM) / SDAM \quad (3)$$

که در آن SDAM بیانگر مجموع واریانس داده‌ها نسبت به میانگین کل (Sum of Squared Deviations from the Array Mean) و SDCM مجموع واریانس درون گروهی نسبت به میانگین هر کلاس (Sum of Squared Deviations from the Class Means) است. مقدار GVF بین صفر و یک تغییر می‌کند و مقادیر بالاتر نشان‌دهنده کارایی بیشتر طبقه‌بندی در بازتاب ساختار طبیعی داده‌ها است. در این پژوهش، مقدار GVF برای تعداد کلاس‌های مختلف (سه تا هشت گروه) محاسبه شد و نتایج نشان داد که افزایش تعداد کلاس‌ها تا پنج گروه منجر به افزایش قابل توجه مقدار GVF می‌شود، در حالی که افزایش بیشتر تعداد کلاس‌ها تنها بهبود ناچیزی در مقدار GVF ایجاد کرده و در برخی موارد باعث کاهش پایداری آماری کلاس‌ها می‌گردد. بر این اساس، تعداد پنج کلاس به‌عنوان تعداد بهینه گروه‌ها انتخاب شد؛ به‌گونه‌ای که ضمن حفظ بیشترین تفکیک‌پذیری آماری، از ایجاد کلاس‌های کم نمونه یا هم‌پوشان جلوگیری شود. در گام پایانی، بر مبنای این تقسیم‌بندی، نمونه‌ها در پنج کلاس آماری J1 تا J5 قرار گرفتند که از مقادیر پایین تا بالای هر متغیر را پوشش می‌دهد. سپس ویژگی‌های پتروفیزیکی و زمین‌شناسی هر کلاس به‌صورت جداگانه

که در آن k تراوایی بر حسب میلی‌داری و Φ_e تخلخل مؤثر بر حسب کسر اعشاری است. این محاسبه به‌صورت جداگانه برای تمامی نمونه‌ها انجام شد و به هر نمونه یک مقدار یکتای FZI اختصاص یافت. شاخص منطقه جریان در واقع نمایانگر اندازه مؤثر گلوگاه‌ها و میزان پیوستگی شبکه منافذ بوده و از این رو، شاخص مناسبی برای ارزیابی رفتار جریان سیال در محیط متخلخل محسوب می‌شود. در گام سوم، به‌منظور طبقه‌بندی نمونه‌ها، مقادیر محاسبه‌شده FZI با مرزهای عددی استاندارد ارائه‌شده در مطالعه مرجع آمیفوله (Amaefule et al., 1993) مقایسه شدند. بر این اساس، نمونه‌ها به شش واحد جریانی هیدرولیکی (HFU-1) تا (HFU-6) تقسیم گردیدند. در این چارچوب، مقادیر FZI کمتر از ۰/۱ معرف سنگ‌های بسیار فشرده با گلوگاه‌های ریز و قابلیت جریان بسیار محدود است، در حالی که مقادیر FZI بزرگ‌تر از ۴ نشان‌دهنده سنگ‌های بسیار تراوا با شبکه منافذ کاملاً بهم‌پیوسته و کیفیت مخزنی بالا است. سایر واحدهای جریانی (HFU-2 تا HFU-5) بیانگر طیفی پیوسته از کیفیت‌های میانی مخزنی هستند. در گام پایانی، نتایج طبقه‌بندی واحدهای جریانی هیدرولیکی با ویژگی‌های سنگ‌شناسی و دیاژنزی نمونه‌ها، از جمله نوع بافت، میزان دولومیتی شدن، شدت سیمانی شدن و حضور کانی‌های تبخیری، تطبیق داده شد تا میزان انطباق روش FZI با شاخص‌های زمین‌شناسی و کنترل‌کننده‌های اصلی کیفیت مخزنی مورد ارزیابی قرار گیرد.

به‌منظور طبقه‌بندی آماری داده‌ها و شناسایی الگوهای طبیعی تغییرات مخزنی، از روش شکست طبیعی جنکس (Jenks Natural Breaks) استفاده شد. این روش آماری با هدف کمینه‌سازی واریانس درون گروهی و بیشینه‌سازی واریانس بین گروهی، نقاط شکست طبیعی را در توزیع داده‌ها شناسایی می‌کند و بدین ترتیب، داده‌ها را به گروه‌هایی با بیشترین همگنی درونی و بیشترین تمایز بین گروهی تقسیم می‌نماید. در گام نخست، مجموعه داده‌های مورد استفاده شامل (۱) تخلخل مغزه، (۲) ترکیب تخلخل و تراوایی و (۳) شاخص‌های منتخب زمین‌شناسی آماده‌سازی شدند. در مورد ترکیب تخلخل و تراوایی، ابتدا تحلیل مؤلفه‌های اصلی انجام گرفت و مؤلفه اصلی اول

کوواریانس استخراج می‌شوند. این ضرایب نشان‌دهنده سهم نسبی هر یک از پارامترهای تخلخل و تراوایی در شکل‌گیری مؤلفه ترکیبی هستند. در گام سوم، مقادیر به‌دست‌آمده از PC1 برای تمامی نمونه‌ها به‌عنوان یک شاخص ترکیبی مستقل از مقیاس، که تغییرات هم‌زمان تخلخل و تراوایی را منعکس می‌کند، مورد استفاده قرار گرفت. این شاخص قادر است روند کلی کیفیت مخزنی را دقیق‌تر از هر یک از پارامترها به‌تنهایی نمایش دهد، زیرا اثر متقابل میان حجم فضای خالی و قابلیت عبور سیال را به‌صورت یکپارچه در نظر می‌گیرد. در گام پایانی، مقادیر PC1 به‌عنوان داده ورودی به الگوریتم شکست طبیعی جنکس وارد شدند و نمونه‌ها بر اساس توزیع طبیعی این شاخص ترکیبی به پنج کلاس آماری (J1 تا J5) تقسیم گردیدند. مرزهای این کلاس‌ها به‌صورت خودکار توسط الگوریتم جنکس و بر پایه کمیته‌سازی واریانس درون‌گروهی و بیشینه‌سازی واریانس بین گروهی تعیین شد، به‌گونه‌ای که هر کلاس معرف سطح مشخصی از کیفیت مخزنی از ضعیف تا بسیار مطلوب باشد.

در ادامه، برای ارزیابی اثرات سنگ‌شناسی و دیاژنز بر کیفیت مخزن، شاخصی جدید با عنوان شاخص کیفیت زمین‌شناسی تعریف شد. این شاخص ترکیبی از سه عامل ساده اما مؤثر است: درصد دولومیت به‌عنوان نماینده تغییرات بافتی و دیاژنزی، تخلخل مفید به‌عنوان شاخص ارتباط شبکه منافذ و نرخ سیمانی‌شدن به‌عنوان شاخص فرآیندهای انسدادی. محاسبه این شاخص به‌صورت رابطه ۵ تعریف گردید:

$$GQI = 0.4 \times \text{Dolomite (\%)} + 0.3 \times \text{Connected porosity (\%)} - 0.3 \times \text{Cementation rat} \quad (5)$$

این شاخص بر اساس درصد دولومیت، تخلخل مفید و نرخ سیمانی‌شدن محاسبه گردید تا بتواند به‌صورت عددی نقش فرآیندهای سنگ‌شناسی و دیاژنزی را در بهبود یا تضعیف ویژگی‌های مخزنی نشان دهد. در این شاخص، وجود دولومیت با ضریب مثبت ۰/۴ در نظر گرفته شد، زیرا فرآیند دولومیتی شدن یکی از مهم‌ترین عوامل ایجاد و پایداری تخلخل مؤثر در سنگ‌های کربناته است. جایگزینی کلسیت با دولومیت

تحلیل شد تا میزان توانایی روش جنکس در بازتاب ناهمگنی‌های مخزنی و شاخص‌های زمین‌شناسی ارزیابی گردد.

به‌منظور ترکیب هم‌زمان دو پارامتر اصلی کنترل‌کننده کیفیت مخزنی، یعنی تخلخل و تراوایی، از رویکرد آماری تحلیل مؤلفه‌های اصلی (Principal Component Analysis; PCA) استفاده شد. هدف از به‌کارگیری PCA، کاهش بُعد داده‌ها و استخراج یک شاخص ترکیبی مستقل از مقیاس اندازه‌گیری بود که بتواند تغییرات هم‌زمان این دو خاصیت پتروفیزیکی را به‌صورت یک متغیر واحد و معنی‌دار نمایش دهد. در گام نخست، داده‌های تخلخل و تراوایی به‌منظور حذف اثر اختلاف مقیاس و جلوگیری از غلبه یکی از متغیرها بر دیگری، پیش‌پردازش شدند. از آنجا که تخلخل معمولاً در دامنه محدودی تغییر می‌کند، در حالی که تراوایی دارای توزیع کشیده و چند مرتبه بزرگی است، ابتدا مقادیر تراوایی لگاریتم مبنای ۱۰ تبدیل شد تا توزیع آن متعادل‌تر و نزدیک‌تر به حالت نرمال گردد. سپس هر دو متغیر تخلخل و لگاریتم تراوایی به‌صورت نرمال‌سازی استاندارد (Z-score normalization) تبدیل شدند، به‌گونه‌ای که میانگین آن‌ها صفر و انحراف معیار برابر یک باشد. در گام دوم، ماتریس کوواریانس داده‌های نرمال شده محاسبه شد و تحلیل مؤلفه‌های اصلی بر روی این ماتریس انجام گرفت. در این فرآیند، مقادیر ویژه (eigenvalues) و بردارهای ویژه (eigenvectors) استخراج شدند و سهم هر مؤلفه اصلی در توضیح واریانس کل داده‌ها مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که نخستین مؤلفه اصلی (PC1) بیشترین سهم از واریانس مشترک میان تخلخل و تراوایی را در برمی‌گیرد و بنابراین به‌عنوان شاخص ترکیبی نماینده رفتار پتروفیزیکی سنگ انتخاب شد. مؤلفه اصلی اول به‌صورت یک ترکیب خطی از دو متغیر استاندارد شده تخلخل و لگاریتم تراوایی تعریف می‌شود (رابطه ۴):

$$PC1 = Z(\varphi) \cdot a + Z(\text{Log}_{10}k) \cdot b \quad (4)$$

که در آن a و b ضرایب وزن‌دهی مربوط به هر متغیر هستند و به‌صورت خودکار از بردار ویژه متناظر با بزرگ‌ترین مقدار ویژه ماتریس

با ایجاد و پایداری تخلخل بین‌بلوری و بهبود پیوستگی شبکه منافذ در سازندهای کربناته همراه است، بیشترین وزن نسبی را دریافت کرد. این انتخاب مبتنی بر شواهد پتروگرافی، ارتباط مشاهده‌شده میان درصد دولومیت و افزایش تراوایی، و همچنین نتایج حاصل از مقایسه این پارامتر با شاخص‌های پتروفیزیکی مستقل در مجموعه داده مورد مطالعه است. در مقابل، تخلخل مفید به‌عنوان شاخصی از پیوستگی هیدرولیکی شبکه منافذ، با وزنی کمتر اما همچنان مثبت وارد شاخص شد. دلیل این امر آن است که اگرچه تخلخل مفید نقش مستقیمی در جریان سیال دارد، اما مقدار آن خود تحت تأثیر فرآیندهای دیاژنزی پیشین از جمله دولومیتی شدن و سیمانی شدن قرار می‌گیرد و به‌نوعی نتیجه تجمعی این فرآیندها محسوب می‌شود. از این رو، وزن تخلخل مفید به‌گونه‌ای انتخاب شد که نقش آن به‌عنوان عامل تقویتی کیفیت مخزنی حفظ شود، بدون آن‌که اثر دولومیتی شدن را تضعیف کند.

از سوی دیگر، نرخ سیمانی شدن به‌عنوان نماینده اصلی فرآیندهای دیاژنزی انسدادی، با ضریب منفی و هم‌رتبه با وزن تخلخل مفید در شاخص لحاظ شد. این انتخاب بر این اساس انجام گرفت که افزایش سیمانی شدن، اگرچه اثر منفی قابل توجهی بر کیفیت مخزنی دارد، اما در بسیاری از نمونه‌ها هم‌زمان با فرآیندهای سازنده نیز رخ می‌دهد و نقش آن باید به‌صورت کاهنده اما متعادل در شاخص بازتاب یابد. وزن منفی اختصاص داده‌شده به این پارامتر به‌گونه‌ای تنظیم شد که افزایش شدید سیمانی شدن بتواند کاهش معنی‌داری در مقدار شاخص ایجاد کند، بدون آن‌که شاخص به‌طور کامل تحت سلطه این عامل قرار گیرد. در مرحله بعد، ترکیب‌های مختلف ضرایب وزنی مورد بررسی قرار گرفت و رفتار شاخص حاصل از آن‌ها از نظر هم‌خوانی با روندهای شناخته‌شده پتروفیزیکی و زمین‌شناسی ارزیابی شد. در این ارزیابی، ضرایب انتخاب‌شده نهایی بیشترین سازگاری را با تغییرات تخلخل، تراوایی، واحدهای جریان هیدرولیکی و الگوهای رخساره‌ای نشان دادند و در عین حال از ایجاد رفتارهای غیرواقعی یا ناپایدار در شاخص جلوگیری کردند. به این ترتیب، ضرایب نهایی به‌عنوان یک راه‌حل بهینه تجربی و زمین‌شناسی انتخاب شدند که توازن مناسبی میان عوامل سازنده و

موجب افزایش فاصله شبکه بلوری و ایجاد تخلخل‌های بین‌بلوری پایدار می‌شود که نقش تعیین‌کننده‌ای در تراوایی سنگ دارد. از سوی دیگر، تخلخل مفید که نشان‌دهنده پیوستگی شبکه منافذ و ارتباط هیدرولیکی آن‌ها است، با ضریب مثبت $0/3$ وارد معادله گردید، زیرا هرچه بخش بزرگ‌تری از تخلخل به‌صورت متصل وجود داشته باشد، جریان سیال در سنگ آسان‌تر و کیفیت مخزنی بالاتر خواهد بود. تخلخل مفید بر اساس مشاهدات پتروگرافی مقاطع نازک و با شناسایی و اندازه‌گیری نسبی انواع تخلخل‌های مؤثر شامل تخلخل‌های بین‌دانه‌ای، بین‌بلوری و شکستگی تعیین گردید. مقدار نهایی تخلخل مفید از جمع نسبی این انواع تخلخل‌ها محاسبه شد تا بیانگر سهم واقعی فضاهای متصل در شبکه منافذ سنگ باشد. در مقابل، نرخ سیمانی شدن که بیانگر شدت فرآیندهای دیاژنزی انسدادی است، با ضریب منفی $0/3$ در معادله لحاظ شد. افزایش سیمانی شدن باعث پر شدن منافذ، کاهش تخلخل مؤثر و افت تراوایی می‌شود، بنابراین اثر آن بر کیفیت سنگ منفی است. ضرایب انتخاب شده به‌گونه‌ای تنظیم شدند که میان اهمیت نسبی فرآیندهای سازنده (دولومیتی شدن و تخلخل مفید) و فرآیندهای مخرب (سیمانی شدن) توازن برقرار شود. به این ترتیب، افزایش مقدار شاخص کیفیت زمین‌شناسی نشان‌دهنده افزایش کیفیت زمین‌شناسی سنگ مخزن است، در حالی که مقادیر پایین‌تر این شاخص بیانگر اثر غالب فرآیندهای انسدادی و فشردگی بر کاهش توان مخزنی سنگ می‌باشد.

به‌منظور تعیین ضرایب وزنی شاخص کیفیت زمین‌شناسی، علاوه بر ملاحظات زمین‌شناسی و دیاژنزی، یک رویکرد کنترل‌شده و مقایسه‌ای به‌کار گرفته شد. در مرحله طراحی شاخص، هدف اصلی ایجاد یک معیار ساده، قابل تفسیر و در عین حال حساس به تغییرات واقعی کیفیت مخزنی بود، به‌گونه‌ای که بتواند اثر نسبی فرآیندهای سازنده و مخرب را به‌صورت متعادل بازتاب دهد و از غلبه غیرواقعی یک پارامتر بر سایر مؤلفه‌ها جلوگیری کند. در این راستا، ابتدا نقش هر یک از پارامترهای ورودی از دیدگاه زمین‌شناسی مخزن ارزیابی شد. دولومیتی شدن به‌عنوان یک فرآیند دیاژنزی سازنده، که به‌طور گسترده

انجام شد، به طوری که افزایش تخلخل مفید و افزایش سیمانی شدن، در صورت رخداد هم‌زمان، بتوانند اثر یکدیگر را به صورت نسبی خنثی کنند و شاخص نهایی رفتار غیرواقعی یا ناپایدار نشان ندهد. در گام سوم، ضرایب وزنی به گونه‌ای نرمال‌سازی شدند که مجموع قدر مطلق ضرایب برابر یک باشد. این نرمال‌سازی باعث می‌شود شاخص تعریف‌شده مستقل از مقیاس ضرایب بوده و مقایسه‌پذیری آن میان نمونه‌ها حفظ گردد. در این چارچوب، اختصاص ضرایب $0/4$ ، $0/3$ و منفی $0/3$ نشان‌دهنده اهمیت نسبی بیشتر پارامتر دولومیت در مقایسه با دو پارامتر دیگر و در عین حال حفظ تعادل کلی شاخص است. پس از محاسبه مقادیر شاخص کیفیت زمین‌شناسی برای تمام نمونه‌ها، این شاخص نیز با روش جنکس در پنج کلاس (J1 تا J5) تقسیم شد تا مرزهای کیفیت سنگ از دید زمین‌شناسی استخراج شود. نتایج حاصل از این روش‌ها در مراحل بعدی با رخساره‌ها و ویژگی‌های پتروگرافی مقایسه گردید تا میزان هم‌خوانی و توانایی هر روش در بازتاب تفاوت‌های زمین‌شناسی بررسی شود.

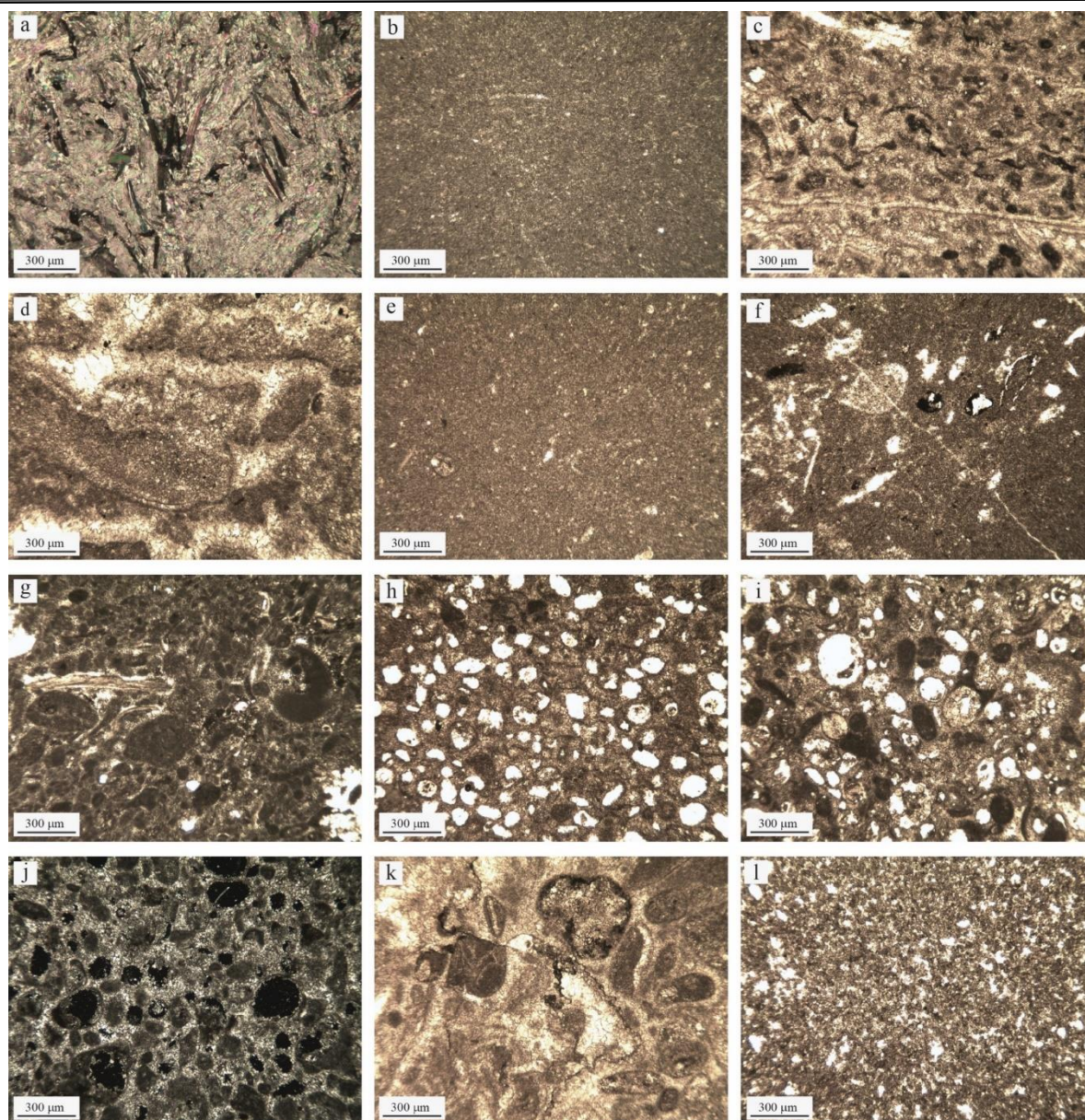
نتایج

خصوصیات زمین‌شناسی

داده‌های مقاطع میکروسکوپی سازند کنگان منجر به شناسایی دوازده رخساره (MF1 تا MF12) شد (شکل ۲) که از نظر ترکیب سنگ‌شناسی، نوع فابریک و فرآیندهای دیاژنزی تفاوت قابل توجهی دارند (جدول ۱).

مخرب کیفیت مخزنی برقرار می‌کند. بر این اساس، ضرایب وزنی شاخص کیفیت زمین‌شناسی نه به صورت دلخواه، بلکه بر پایه اهمیت نسبی فرآیندهای زمین‌شناسی، آزمون رفتاری شاخص و میزان انطباق آن با شاخص‌های مستقل کیفیت مخزنی تعیین شده‌اند. این رویکرد باعث شده است که شاخص تعریف‌شده بتواند به صورت واقع‌گرایانه تغییرات کیفیت زمین‌شناسی سنگ مخزن را بازتاب دهد و قابلیت مقایسه با نتایج روش‌های پتروفیزیکی و آماری را داشته باشد.

به منظور تعیین ضرایب وزنی، علاوه بر ملاحظات زمین‌شناسی، از یک منطق آماری مبتنی بر مقیاس‌سازی و متعادل‌سازی اثر پارامترها استفاده شد. از آنجا که سه پارامتر ورودی شاخص شامل درصد دولومیت، تخلخل مفید و نرخ سیمانی‌شدن دارای دامنه تغییرات و نقش‌های فیزیکی متفاوتی هستند، استفاده از ضرایب وزنی به منظور جلوگیری از غلبه عددی یک پارامتر بر سایر مؤلفه‌ها ضروری بوده است. در گام نخست، هر یک از پارامترهای ورودی از نظر دامنه تغییرات، پراکندگی آماری و جهت اثر بر کیفیت مخزنی بررسی شدند. نتایج این بررسی نشان داد که تغییرات درصد دولومیت، نسبت به دو پارامتر دیگر، بیشترین توان توضیح‌دهندگی تغییرات کیفیت مخزنی را در مجموعه داده مورد مطالعه دارد. از این رو، وزن بیشتری به این پارامتر اختصاص داده شد تا حساسیت شاخص نسبت به تغییرات بافتی و دیاژنزی سازنده به درستی حفظ شود. در گام دوم، تخلخل مفید و نرخ سیمانی‌شدن به عنوان دو پارامتر با اثر متقابل اما جهت اثر متفاوت، به گونه‌ای وزن‌دهی شدند که سهم آن‌ها از شاخص به صورت متقارن اما با علامت مخالف در نظر گرفته شود. این انتخاب بر اساس اصل تعادل آماری



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی ریزرخساره‌های شناسایی شده سازند کنگان در چاه مورد مطالعه. (a) انیدریت، (b) مادستون، (c) باندستون استروماتولیتی، (d) باندستون ترومبولیتی، (e) مادستون فسیل‌دار، (f) پلوئید/اینتراکلاست بایوکلاست واکستون، (g) آنکوئید/پلوئید پکستون، (h) بایوکلاست آئید پکستون، (i) پلوئید آئید/بایوکلاست گرینستون، (j) بایوکلاست/اینتراکلاست آئید گرینستون، (k) اینتراکلاست بایوکلاست/آئید پکستون، (l) کربنات بلورین. (a: XPL، h تا l): PPL

Fig. 2. Microscopic images of the microfacies in the Kangan Formation in the studied well. a) anhydrite, b) mudstone, c) stromatolite boundstone, d) thrombolite boundstone, e) fossiliferous mudstone, f) peloid/intraclast bioclast wackestone, g) oncoid/peloid packstone, h) ooid bioclast packstone, i) peloid ooid/bioclast grainstone, j) bioclast/intraclast ooid grainstone, k) intraclast bioclast/ooid packstone, l) crystalline carbonate. a): XPL, h) to l): PPL

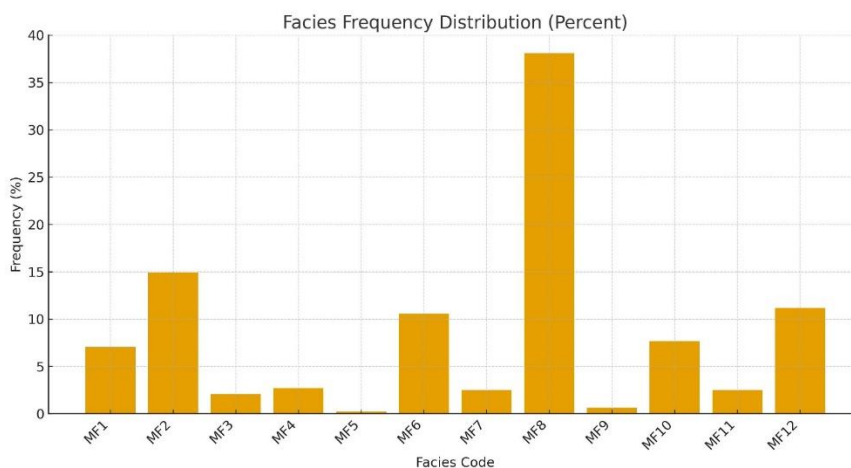
جدول ۱- خصوصیات رخساره‌های مشاهده شده در سازند کنگان در منطقه مورد مطالعه

Table 1. Facies characteristics observed in the Kangan Formation within the study area

Facies code	Facies group name	Environment	Dominant Pore type	Dominant diagenetic process	Porosity (%)	Permeability (mD)	Reservoir quality
MF1	Anhydrite	Supratidal, Sabkha	Almost no effective porosity	Anhydrite cementation and compaction	1.3	14	Very weak
MF2	Mudstone often with evaporites	Closed to semi-open lagoon with partial evaporation	Interparticle and moldic	Moderate dolomitization and isopachous	5.8	4	Weak
MF3	Stromatolite boundstone	Intertidal zones with microbial activity	Intercrystalline and moldic	Dolomitization and moderate compaction	3.8	10	Weak to moderate
MF4	Thrombolite boundstone	Low energy lagoon to semi-open	Negligible porosity or limited mold	High cementation and severe compaction	2.5	0.1	Weak
MF5	Fossiliferous mudstone	Fully enclosed evaporator, above the platform	No effective porosity	Anhydritization	1.1	0	Very weak
MF6	Peloid/intraclast bioclast wackestone	Transition zone between lagoon and shoal	Intercrystalline and moldic	High dolomitization and local dissolution	4.6	4.7	Moderate
MF7	Oncoid/peloid packstone	Shallow section of medium energy platform	Interparticle	Dolomitization and moderate cementation	6.4	22	Good
MF8	Ooid bioclast packstone	Shoal	Interparticle and vuggy	Dissolution and limited cementation	7.4	21	Good
MF9	Peloid ooid/bioclast grainstone	Energetic shoal but with obstructive diagenesis	Blocked interparticle	Cementation and High compaction	0.7	0	Weak
MF10	Bioclast/intraclast ooid grainstone	Open energetic shoal	Interparticle and vuggy	Low cementation and effective dissolution	14	42	Very good
MF11	Intraclast bioclast/ooid packstone	Seaward shoal	Intercrystalline and vuggy	Extensive dolomitization and open diagenesis	9.9	15	Good
MF12	Crystalline carbonate	The upper part of the platform, under the influence of magnesium-bearing fluids	Intercrystalline	Extensive dolomitization and low compaction	12	100	Very good

سیمانی شدن زیاد و تخلخل محدود هستند، در حالی که رخساره‌های MF6 تا MF12 تدریجاً به سمت دولومیتی‌تر، دانه‌دارتر و متخلخل‌تر شدن پیش می‌روند. این روند بازتابی از تغییر شرایط رسوب‌گذاری و دیانژن از محیط‌های بسته و تبخیری به محیط‌های بازتر و جریان‌دارتر است.

شکل ۳ توزیع فراوانی رخساره‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهد. این رخساره‌ها در مجموع بیانگر یک پلاتفرم کربناته کم‌عمق هستند که در آن شرایط رسوب‌گذاری از محیط‌های فوق تبخیری و لاگونی کم انرژی به محیط‌های دانه پشتیبان پرانرژی تغییر می‌کند. در مجموع، رخساره‌های MF1 تا MF5 عمدتاً تبخیری و گل پشتیبان با



شکل ۳- توزیع فراوانی انواع رخساره‌های مورد مطالعه. این رخساره‌ها بیانگر یک پلاتفرم کربناته کم‌عمق هستند که MF8 بیشترین فراوانی را دارد
 Fig. 3. Frequency distribution of the studied facies. The facies assemblage indicates deposition within a shallow carbonate platform, where facies MF8 is the most abundant

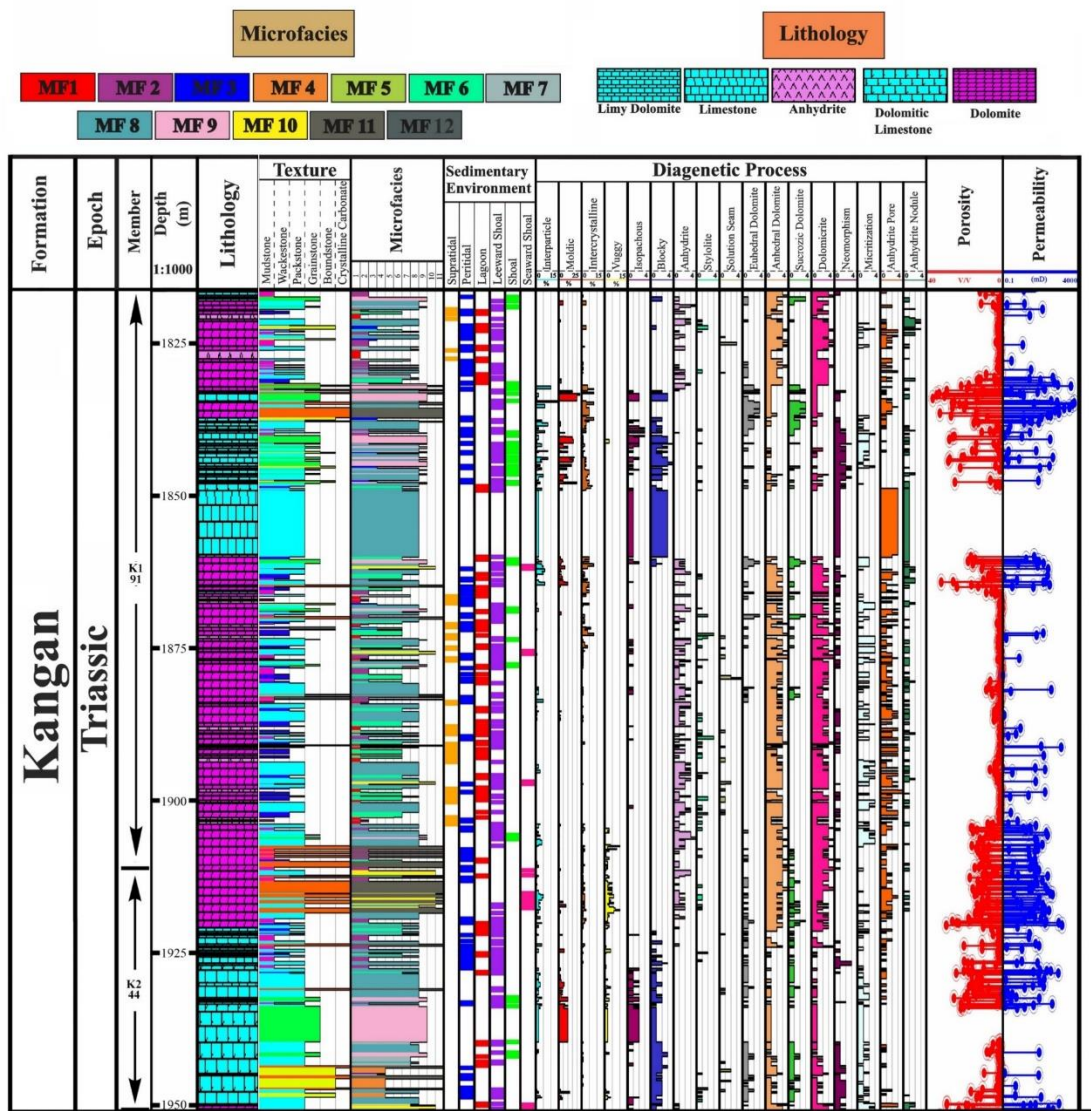
کیفیت مخزنی

درصد متغیر است. تراوایی نیز از کمتر از ۰/۱ میلی‌داری تا بیش از ۲۰۰ میلی‌داری متغیر است که نشان‌دهنده ناهمگنی بسیار بالا در ویژگی‌های جریان سیال است. با وجود افزایش عمومی تراوایی با افزایش تخلخل، پراکندگی شدید داده‌ها نشان می‌دهد که رابطه بین این دو پارامتر صرفاً خطی نبوده و تحت تأثیر عوامل ثانویه قرار دارد. تحلیل برازشی داده‌ها نشان داد که ضریب تعیین (R^2) بین تخلخل و تراوایی برابر با ۰/۱۰ است، به عبارت دیگر تنها حدود ۱۰ درصد از تغییرات تراوایی را می‌توان با تغییرات تخلخل توضیح داد. این نتیجه بیانگر آن است که کیفیت مخزنی در سازند کنگان بیش از آنکه تابع مستقیم تخلخل اولیه باشد، وابسته به تغییرات بافتی، نوع تخلخل و فرآیندهای دیاژنزی بعدی است.

کیفیت مخزنی سنگ‌های سازند کنگان در چاه مورد مطالعه، بر اساس داده‌های مغزه و بررسی ارتباط میان ویژگی‌های پتروفیزیکی و زمین‌شناسی ارزیابی شده است. در این بررسی، تخلخل و تراوایی به عنوان دو شاخص اصلی کیفیت مخزن در نظر گرفته شده و تغییرات آن‌ها در ارتباط با سنگ‌شناسی، نوع تخلخل، سیمان‌شدگی و فرآیندهای دیاژنزی تحلیل شده است. هدف از این ارزیابی، شناخت عوامل کنترل‌کننده ناهمگنی مخزنی و فراهم کردن مبنایی برای طبقه‌بندی سنگ‌ها در مراحل بعدی مطالعه است. به منظور ایجاد تطابق میان تغییرات رخساره‌ای، ویژگی‌های دیاژنزی و رفتار پتروفیزیکی، این پارامترها به صورت یک ستون در شکل ۴ ارائه شده‌اند.

نتایج اندازه‌گیری‌های مغزه نشان می‌دهد که مقادیر تخلخل سازند کنگان دامنه‌ای گسترده دارد و از کمتر از یک درصد تا بیش از ۲۵

Integrated Sedimentological and Reservoir Log of the Studied Well



شکل ۴- ستون تغییرات عمقی سنگ‌شناسی، بافت، ریزرخساره‌ها، محیط رسوبی، انواع تخلخل‌ها، فرایندهای دیاژنزی و پارامترهای پتروفیزیکی (تخلخل و تراوایی) در سازند کنگان. این شکل ارتباط میان ویژگی‌های زمین‌شناسی و رفتار پتروفیزیکی سنگ‌ها را نشان می‌دهد

Fig. 4. Vertical variation column of lithological, textural, microfacies, sedimentary environment, pore types, diagenetic processes, and petrophysical parameters (porosity and permeability) in the Kangan Formation. This figure illustrates the relationship between geological characteristics and the petrophysical behavior of the rocks

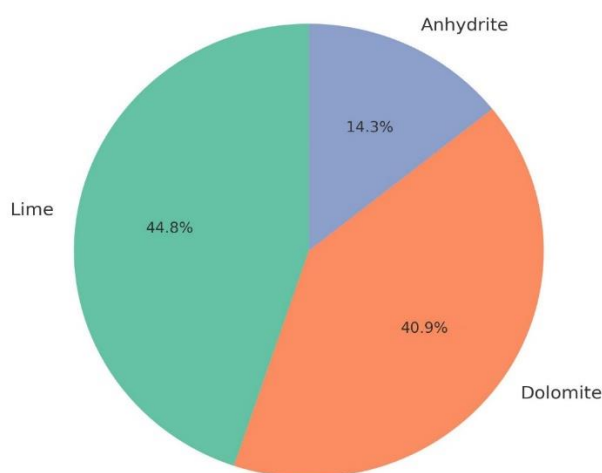
می‌دهد که دولومیت‌ها و آهک‌های دولومیتی عموماً دارای تخلخل و تراوایی بالاتری نسبت به آهک‌های خالص هستند. این تفاوت را می‌توان ناشی از توسعه تخلخل‌های بین‌بلوری حاصل از فرآیند دولومیتی شدن دانست که در بسیاری از نمونه‌ها با حفظ ساختار اولیه سنگ همراه بوده

بررسی سنگ‌شناسی نشان می‌دهد که سنگ‌های سازند کنگان عمدتاً از آهک، دولومیت و آهک‌های دولومیتی تشکیل شده‌اند، در حالی که واحدهای انیدریتی سهم کمتری دارند (شکل ۵). مقایسه میانگین‌های تخلخل و تراوایی در سنگ‌شناسی‌های مختلف نشان

گسترده سیمان انیدریتی در بین بلورها و فضاهای تخلخل، نقش سدکننده در جریان سیال ایفا می‌کنند (شکل ۴).

است. در مقابل، سنگ‌های آهکی با سیمان کلسیتی و تراکم بالا، اغلب دارای تخلخل مؤثر اندک و تراوایی بسیار پایین هستند. واحدهای انیدریتی نیز تقریباً فاقد کیفیت مخزنی قابل توجه‌اند و به دلیل حضور

Overall Lithology Composition – Kangan Formation

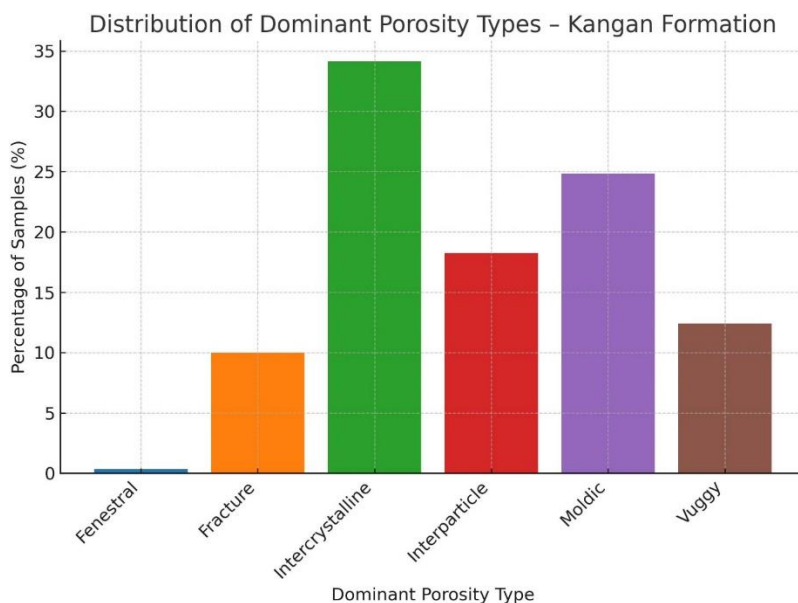


شکل ۵- توزیع فراوانی ترکیب سنگ‌شناسی سازند کنگان. این سازند عمدتاً از آهک و دولومیت تشکیل شده است.

Fig. 5. Frequency distribution of lithological composition in the Kangan Formation, which is predominantly composed of limestone and dolomite.

تخلخل‌های بین‌بلوری یا شکستگی‌های ریز به یکدیگر متصل شده باشند. در مقابل، در نمونه‌هایی که تخلخل قالبی به صورت منفرد و بدون ارتباط مؤثر با شبکه تخلخل بین‌بلوری تشکیل شده، تراوایی پایین باقی مانده است. بنابراین، نوع و میزان ارتباط تخلخل‌ها نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت مخزنی دارد و صرف وجود تخلخل بالا الزاماً به معنای تراوایی زیاد نیست.

مطالعه نوع تخلخل‌ها در مقاطع نازک نشان داد که بیشترین فراوانی متعلق به تخلخل‌های بین‌بلوری و قالبی می‌باشد (شکل ۶) و تخلخل‌های بین‌بلوری و بین‌دانه‌ای بیشترین سهم را در تخلخل مؤثر دارند. در بخش‌هایی از سازند که تخلخل‌های قالبی یا حفره‌ای توسعه یافته‌اند، معمولاً تراوایی بالاتری مشاهده می‌شود (شکل ۴). این افزایش تراوایی به‌ویژه زمانی قابل توجه است که منافذ قالبی به‌وسیله



شکل ۶- توزیع فراوانی انواع تخلخل‌ها در سازند کنگان. تخلخل‌های بین‌بلوری بیشترین فراوانی و تخلخل‌های فنسترال کمترین فراوانی را دارند
 Fig. 6. Frequency distribution of porosity types in the Kangan Formation. Intercrystalline porosity is the most common, whereas fenestral porosity occurs less frequently

تعیین گونه‌های سنگی

به‌منظور تفکیک و مقایسه رفتار مخزنی نمونه‌ها، داده‌ها با استفاده از چند رویکرد مختلف طبقه‌بندی شدند. این روش‌ها شامل (۱) روش وینلند، (۲) شاخص منطقه جریان، (۳) روش آماری جنکس بر پایه تخلخل و ترکیب تخلخل-تراوایی و (۴) شاخص زمین‌شناسی است. در هر روش، نمونه‌ها در چند گروه یا گونه سنگ با ویژگی‌های پتروفیزیکی متمایز تفکیک شدند. در مجموع، چهار گروه در روش وینلند (RT1 تا RT4)، شش گروه در روش شاخص منطقه جریان (HFU-1 تا HFU-6)، و پنج گروه در هر یک از مدل‌های جنکس (J1 تا J5) شناسایی گردیدند. میانگین ترکیب سنگ‌شناسی (آهک، دولومیت و انیدریت)، رخساره‌های فراوان‌تر، نوع سیمان و نوع دولومیت در هر گونه سنگی در جدول ۲ ارائه شده است. این طبقه‌بندی‌ها مبنای تحلیل‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی بعدی در پژوهش حاضر قرار گرفتند.

فرآیندهای دیاژنزی متعددی در بهبود یا کاهش کیفیت مخزنی سازند کنگان نقش داشته‌اند. از میان این فرآیندها، دولومیتی شدن و سیمان شدگی بیشترین تأثیر را دارند. افزایش نرخ دولومیتی شدن معمولاً با افزایش تراوایی همراه است، زیرا جانشینی دولومیت به‌ویژه در بافت‌های دانه پشتیبان موجب گسترش تخلخل‌های بین‌بلوری و کاهش حجم سیمان اولیه می‌شود. در مقابل، سیمان‌شدگی شدید به‌ویژه از نوع بلوکی و انیدریتی، سبب انسداد بخشی از تخلخل‌های مؤثر و کاهش قابل‌توجه تراوایی می‌شود. سیمان‌های هم‌ضخامت نیز در مرز دانه‌ها توسعه یافته و در بسیاری از نمونه‌ها موجب کاهش تخلخل بین‌دانه‌ای شده‌اند. در مجموع، بررسی‌ها نشان می‌دهد که توالی زمانی فرآیندهای دیاژنزی (دولومیتی شدن، انحلال و سیمان‌شدگی) در کنترل کیفیت مخزنی نقش اساسی دارد.

جدول ۲- خصوصیات زمین‌شناسی همه گونه‌های سنگی در انواع روش‌ها و کلاس‌های مورد مطالعه

Table 2. Geological characteristics of all identified rock types across the studied methods and classification schemes

Method	Class	Avg. Lime (%)	Avg. Dolomite (%)	Avg. Anhydrite (%)	Top 3 Facies	Dominant Cement	Dominant Dolomite
Winland	RT1 ($\geq 10 \mu\text{m}$)	51.67	66.24	35.56	MF8, MF1, MF12	Blocky	Sucrosic dolomite
Winland	RT2 (2.5–10 μm)	62.67	69.86	13.39	MF8, MF12, MF2	Blocky	Dolomicrite
Winland	RT3 (0.5–2.5 μm)	48.03	68.61	13.29	MF8, MF2, MF12	Blocky	Dolomicrite
Winland	RT4 (<0.5 μm)	68.01	52.91	21.32	MF8, MF2, MF6	Blocky	Dolomicrite
FZI	HFU-1 (Ultra-tight)	65.93	51.43	15.05	MF8, MF2, MF4	Blocky	Dolomicrite
FZI	HFU-2 (Tight)	61.87	52.54	16.79	MF8, MF2, MF10	Blocky	Dolomicrite
FZI	HFU-3 (Low)	67.2	58.21	19.08	MF8, MF6, MF2	Blocky	Dolomicrite
FZI	HFU-4 (Medium)	67.9	62.83	16.27	MF8, MF12, MF2	Blocky	Dolomicrite
FZI	HFU-5 (High)	56.2	67.33	17.12	MF8, MF12, MF2	Blocky	Dolomicrite
FZI	HFU-6 (Very high)	49.31	64.2	30.01	MF8, MF12, MF1	Blocky	Dolomicrite
Jenks-porosity	J1	65.3	54.74	28.97	MF8, MF2, MF6	Blocky	Dolomicrite
Jenks-porosity	J2	59.94	65.86	18.09	MF8, MF2, MF6	Blocky	Dolomicrite
Jenks-porosity	J3	49.16	72.01	8.92	MF8, MF12, MF2	Isopachous	Dolomicrite
Jenks-porosity	J4	70.34	48	6.36	MF8, MF2, MF10	Blocky	Dolomicrite
Jenks-porosity	J5	76.71	56.4	5.27	MF10, MF8, MF12	Blocky	Sucrosic dolomite
Jenks-(porosity-permeability)	J1	64.83	67.19	7.29	MF8, MF10, MF12	Blocky	Sucrosic dolomite
Jenks-(porosity-permeability)	J2	63.43	62.05	7.76	MF8, MF12, MF10	Blocky	Dolomicrite
Jenks-(porosity-permeability)	J3	61.39	64.67	12.13	MF8, MF12, MF2	Blocky	Dolomicrite
Jenks-(porosity-permeability)	J4	56	60.56	24.77	MF8, MF2, MF6	Blocky	Dolomicrite
Jenks-(porosity-permeability)	J5	66.7	55.1	26.63	MF8, MF2, MF6	Blocky	Dolomicrite
Jenks-GQI	J1	87.2	10.88	4.31	MF8, MF10, MF4	Blocky	Dolomicrite
Jenks-GQI	J2	64.87	34.1	7.41	MF8, MF4, MF7	Blocky	Dolomicrite
Jenks-GQI	J3	20	59.02	36.83	MF8, MF6, MF10	Blocky	Sucrosic dolomite
Jenks-GQI	J4	9.83	74.95	24.08	MF8, MF6, MF11	Isopachous	Dolomicrite
Jenks-GQI	J5	8	87.93	10.91	MF8, MF12, MF11	Blocky	Dolomicrite

خصوصیات زمین‌شناسی گونه‌های سنگی

خصوصیات زمین‌شناسی گونه‌های سنگی در روش‌های مختلف در جدول ۲ آمده است. در روش وینلند، تغییر از RT4 به RT1 با افزایش پیوسته کیفیت مخزنی (جدول ۳) همراه است؛ با این حال ترکیب سنگ‌شناسی و سیمانی‌شدن الزاماً یکنواخت تغییر نمی‌کند. در همه کلاس‌ها سیمان بلوکی غالب است و MF8 به فراوانی مشاهده می‌گردد؛ با این تفاوت که در کلاس‌های با گلوگاه بزرگ‌تر (RT1-RT2) انیدریت بالاتر و کربنات بلوری (MF12/MF1) بیشتری مشاهده می‌گردد. RT1 با دولومیت دانه شکری مشخص شده و با وجود انیدریت نسبتاً بالا در همین گونه سنگی، ساختار منفذی مناسب (جدول ۲) سبب کیفیت مخزنی بالا شده است. در مقابل، RT4 با سهم بیشتر رخساره‌های MF8، MF2 و MF6 و کاهش گلوگاه‌ها، کیفیت پایین‌تری دارد.

در طبقه‌بندی شاخص منطقه جریان، افزایش کیفیت از HFU-1 به HFU-6 در جدول ۳ به خوبی دیده می‌شود (افزایش تخلخل-تراوایی). از نظر سنگ‌شناسی، دولومیت به‌طور کلی از HFU-1 به HFU-6 روند افزایشی ملایمی دارد، درحالی‌که انیدریت رفتاری یکنواخت ندارد و در HFU-6 حتی به مقدار بالاتری می‌رسد. سیمان غالب در تمام کلاس‌ها بلوکی و دولومیت غالب ریزبلور است. بنابراین، بهبود کیفیت در شاخص کیفیت مخزن بیش از آن‌که به تغییر گونه سیمان یا بافت بلوری دولومیت وابسته باشد، به نوع منافذ و رخساره‌ها مربوط است.

در روش شاخص جنکس بر مبنای تخلخل، کاهش انیدریت از J1 به J5 بارزترین تغییر در جهت بهبود کیفیت است (جدول ۲)، در حالی‌که سهم آهک/دولومیت رفتاری یکنواخت و خطی ندارد (بیشینه دولومیت در J3 مشاهده می‌شود). J3 با سیمان هم ضخامت از دیگر

کلاس‌ها متمایز است، درحالی‌که سایر کلاس‌ها عمدتاً سیمان بلوکی دارند. J5 با دولومیت دانه شکری و رخساره‌های پرتکرار MF8، MF10 و MF12 کیفیت مخزنی بالاتری را نشان می‌دهد. این ترکیب بیانگر آن است که کاهش سیمانی‌شدن مؤثر (نه الزاماً حذف کامل آن) و حضور رخساره‌هایی با کیفیت مخزنی مناسب، نقش اصلی در ارتقای کیفیت دارند و الزاماً با بیشینه شدن دولومیت هم‌زمان نیستند.

تفکیک جنکس دوبعدی (تخلخل-تراوایی) کلاس‌ها را مجزاتر نموده (جدول ۳) و اثر مستقیم انواع منافذ را بهتر نشان می‌دهد. هرچند در ترکیب سنگ‌شناسی جدول ۲، انیدریت در J4-J5 نسبتاً بالا است، اما کیفیت مخزنی همچنان مناسب است. این ناهماهنگی ظاهری به این معناست که در این روش طبقه‌بندی، پیوستگی و اندازه گلوگاه‌ها و سازماندهی شبکه منافذ، تعیین‌کننده‌تر از صرف درصد انیدریت است. در این میان، حضور دولومیت دانه شکری در J1 (کلاس کم کیفیت) نشان می‌دهد که بافت بلوری درشت به‌تنهایی سبب ایجاد کیفیت مخزنی بالا نیست و زمینه رخساره‌ای و سیمانی‌شدن باید هم‌زمان مطلوب باشد.

در روش جنکس- شاخص کیفیت زمین‌شناسی، کلاس J1 با آهک بسیار بالا و دولومیت بسیار پایین در برابر J5 با دولومیت بسیار بالا به خوبی تفکیک شده است. روند افزایشی کیفیت از J1 به J5 در جدول ۲ روشن است. سیمان هم ضخامت در J4 و دولومیت دانه شکری در J3 شاخص‌های دیاژنزی مهمی هستند که نشان می‌دهند تفاوت‌های کیفیت نه‌فقط تابع ترکیب، بلکه تابع توالی رخساره‌های دیاژنزی و نوع سیمان نیز هست. غالب بودن MF8 در سه رخساره بیشتر همه کلاس‌ها نشان می‌دهد چارچوب رخساره‌ای مشترک وجود دارد؛ اما ترکیب سیمان + بافت بلوری + سهم رخساره‌های افزوده (مثل MF12/MF11) است که جابه‌جایی واقعی بین کلاس‌ها را سبب می‌گردد.

جدول ۳- خصوصیات مخزنی (تخلخل و تراوایی) و تعداد نمونه‌های همه گونه‌های سنگی در روش‌ها و کلاس‌های مختلف

Table 3. Reservoir properties (porosity and permeability) and sample numbers of all rock types across different methods and classification schemes

Method	Class	Avg.Porosity (%)	Permeability (mD)	Number of samples
Winland	RT1	20.6	145.3	12
Winland	RT2	17.8	58.4	34
Winland	RT3	13.1	15.9	66
Winland	RT4	8.2	3.1	56
FZI	HFU-1	7.9	2.8	41
FZI	HFU-2	10.4	6.9	39
FZI	HFU-3	13.7	19.5	36
FZI	HFU-4	16.9	45.1	29
FZI	HFU-5	20.1	122.7	15
FZI	HFU-6	22.3	231.6	8
Jenks-porosity	J1	8.6	2.9	33
Jenks-porosity	J2	11.4	7.8	36
Jenks-porosity	J3	14.8	17.6	34
Jenks-porosity	J4	17.6	48.3	31
Jenks-porosity	J5	21.3	136.2	34
Jenks-(porosity-permeability)	J1	8.1	2.6	29
Jenks-(porosity-permeability)	J2	11.5	8.3	36
Jenks-(porosity-permeability)	J3	14.2	19.2	38
Jenks-(porosity-permeability)	J4	17.8	51.4	37
Jenks-(porosity-permeability)	J5	21.6	142.7	28
Jenks-GQI	J1	8.4	3	30
Jenks-GQI	J2	11.2	8.7	35
Jenks-GQI	J3	14.9	21.5	38
Jenks-GQI	J4	17.5	47.8	36
Jenks-GQI	J5	21	130.9	31

تمامی روش‌ها توانسته‌اند تا حدی روند کلی بهبود ویژگی‌های مخزنی از سنگ‌های مادستونی و انیدریتی به سمت دولوستون‌ها و گرینستون‌ها را بازتاب دهند، اما دقت و وضوح این جدایش در روش‌های مختلف، متفاوت است و توان تفکیک زمین‌شناسی و پتروفیزیکی آن‌ها یکسان نیست. در روش وینلند، تفکیک میان گروه‌ها بیشتر بر پایه پارامتر

بحث

نتایج حاصل از طبقه‌بندی داده‌ها با روش‌های مختلف نشان می‌دهد که بین ویژگی‌های زمین‌شناسی سنگ‌ها و پارامترهای پتروفیزیکی رابطه‌ای منظم و قابل تفسیر وجود دارد. مقایسه مربوط به گونه‌های سنگی (جدول‌های ۲ و ۳) در روش‌های مختلف نشان می‌دهد که

مستقیماً بر پایه نسبت بین تخلخل مؤثر و تراوایی بنا شده و از ویژگی‌های هندسی سیستم منافذ مشتق می‌شود. نتایج جدول ۳ نشان می‌دهد که از HFU-1 تا HFU-6، روندی یکنواخت از افزایش تخلخل و تراوایی مشاهده می‌شود که با منطق تغییرات عدد شاخص منطقه جریان کاملاً سازگار است. با این حال، بررسی داده‌های زمین‌شناسی در جدول ۲ نشان می‌دهد که این روش در بازتاب دقیق تفاوت‌های سنگ‌شناسی و دیاژنزی بین گروه‌ها چندان موفق نبوده است. در همه کلاس‌ها، درصد دولومیت تغییرات اندکی دارد و نوع سیمان تقریباً بدون تغییر (بلوکی) باقی می‌ماند. نوع دولومیت نیز در همه گروه‌ها از نوع دولومیکرایت گزارش شده است. چنین یکنواختی در ویژگی‌های سنگ‌شناسی بیانگر آن است که روش شاخص منطقه جریان اگرچه به خوبی تفاوت‌های هیدرولیکی و پیوستگی منافذ را تشخیص می‌دهد، اما در تمایز منشأ زمین‌شناسی این تفاوت‌ها دقت کافی ندارد. به بیان دیگر، گروه‌های حاصل از این روش بیشتر نمایانگر رفتار جریان سیال در سنگ هستند تا تفاوت در بافت، ترکیب یا رخساره‌ی رسوبی. از نظر رخساره‌ای نیز همه گروه‌ها به‌طور مکرر شامل MF8 به همراه MF2، MF6 یا MF12 هستند که نشان می‌دهد مرزهای هیدرولیکی لزوماً با مرزهای رسوبی یا دیاژنزی هم‌خوانی ندارند. به‌ویژه در گروه HFU-6 که بالاترین کیفیت مخزنی را دارد، هنوز مقدار قابل توجهی انیدریت دیده می‌شود، در حالی که انتظار می‌رفت در سنگ‌های با بهترین کیفیت، سیمانی‌شدن حداقل باشد.

روش جنکس بر اساس داده‌های تخلخل مغزه (شکل ۷-۷c)، در مقایسه با وینلند و شاخص منطقه جریان، توانایی بالاتری در انعکاس تفاوت‌های زمین‌شناسی میان گروه‌های سنگی نشان می‌دهد. از آنجا که این روش یک روش آماری بدون فرض قبلی است و مرزها را بر اساس پیشینه‌سازی ناهمگنی بین کلاسی تعیین می‌کند، می‌تواند اثر تغییرات تدریجی در بافت و دیاژنز را بهتر آشکار سازد. روند افزایشی تخلخل و تراوایی از J1 به J5 (جدول ۳) با کاهش یکنواخت انیدریت و افزایش تدریجی دولومیت همراه است، که این تغییرات کاملاً هم‌سو با روند بهبود کیفیت مخزنی و کاهش سیمانی‌شدن مشاهده می‌شود. از

تراوایی است و اگرچه روند افزایش کیفیت از RT4 به RT1 به‌خوبی دیده می‌شود اما هم‌پوشانی رخساره‌ها در برخی گروه‌های میانی نسبتاً زیاد است. نتایج حاصل از روش وینلند نشان می‌دهد که این روش اگرچه در تفکیک سنگ‌ها بر اساس کیفیت هیدرولیکی (تخلخل-تراوایی) عملکرد قابل قبولی دارد (شکل ۷-۷a)، اما در تمایز ویژگی‌های زمین‌شناسی و رخساره‌ای چندان کارآمد نیست. مقایسه میانگین درصد‌های سنگ‌شناسی در چهار گروه RT1 تا RT4 (جدول ۲) نشان می‌دهد که تغییرات آهک، دولومیت و انیدریت روند مشخصی را با تغییر کیفیت مخزنی دنبال نمی‌کنند. برای مثال، در حالی که انتظار می‌رود در کلاس‌های با کیفیت بالاتر مقدار دولومیت به‌طور یکنواخت افزایش و سهم انیدریت کاهش یابد، داده‌ها نشان می‌دهد که در RT1 همچنان مقادیر قابل توجهی انیدریت وجود دارد و در RT2 نسبت آهک افزایش یافته است. این نوسان در ترکیب کانی‌شناسی بیانگر آن است که روش وینلند، که اساساً بر اندازه‌ی گلوگاه (R35) استوار است، بیشتر پاسخ هیدرولیکی سیستم منافذ را منعکس می‌کند تا منشأ یا نوع سنگ‌شناسی را. از دید رخساره‌ای نیز گروه‌های حاصل از وینلند عمدتاً دارای رخساره‌های تکراری هستند و تفاوت روشنی در نوع سیمان یا نوع دولومیت میان آن‌ها مشاهده نمی‌شود. در تمامی کلاس‌ها سیمان غالب از نوع بلوکی و نوع دولومیت از نوع دولومیکرایت است که بیانگر عدم تمایز قابل توجه دیاژنزی میان گروه‌ها است. به عبارت دیگر، این روش در بازتاب فرآیندهای دیاژنزی مانند نوع سیمان، شدت انحلال یا دولومیتی‌شدن چندان حساس نیست. در مقابل، روند تغییرات تخلخل و تراوایی (جدول ۳) کاملاً منطبق با افزایش شاخص R35 است؛ به‌گونه‌ای که از RT4 به RT1 افزایش یکنواخت و قابل پیش‌بینی دیده می‌شود. این هم‌خوانی نشان می‌دهد که روش وینلند در تشخیص تفاوت‌های هیدرولیکی نمونه‌ها توان بالایی دارد، اما در ارتباط دادن این تفاوت‌ها به عوامل زمین‌شناسی نظیر ترکیب سنگ‌شناسی، رخساره یا دیاژنز محدودیت جدی دارد.

روش شاخص منطقه جریان نسبت به وینلند توان تفکیک بالاتری در جداسازی نمونه‌ها از نظر کیفیت مخزنی دارد (شکل ۷-۷b)، زیرا

دارند، اما همچنان در زمره کیفیت‌های بالاتر قرار می‌گیرند و تراوایی چشمگیری نشان می‌دهند. این موضوع بیانگر آن است که در این روش، پیوستگی و اندازه گلوگاه‌ها و اتصال منافذ نقش غالب‌تری نسبت به ترکیب کانی‌شناسی دارد. هرچند مشاهده می‌شود که برخی واحدها علی‌رغم حضور نسبی انیدریت، از نظر پاسخ هیدرولیکی در رده‌های بالاتر قرار می‌گیرند. با این حال، این تفسیر با در نظر گرفتن محدودیت‌های روش‌های پتروگرافی و ماهیت دوبعدی اندازه‌گیری‌ها انجام شده است و هدف این طبقه‌بندی، انطباق کامل با مرزهای زمین‌شناسی نبوده، بلکه شناسایی واحدهایی با رفتار هیدرولیکی مشابه بر اساس معماری سیستم منافذ و گلوگاه‌ها است. از منظر رخساره‌ای، تکرار رخساره MF8 در تمامی کلاس‌ها نشان می‌دهد که جنکس بر پایه تخلخل و تراوایی بیش از آن که بر نوع سنگ تمرکز داشته باشد، به ساختار و سازماندهی شبکه حفرات حساس است. در عین حال، حضور رخساره‌های همراه متفاوت به‌تناسب از کلاس‌های پایین به بالا بیانگر آن است که این روش توانسته است، تفاوت‌های بافتی ظریف و میزان سیمانی‌شدن را تا حدی منعکس کند. در مجموع، روش جنکس بر پایه تخلخل-تراوایی نسبت به وینلند و شاخص منطقه جریان نه‌تنها تفکیک پتروفیزیکی دقیق‌تری فراهم می‌کند، بلکه بخشی از شاخص‌های زمین‌شناسی مرتبط با کیفیت مخزنی را نیز نشان می‌دهد. هرچند به دلیل تأکید قوی‌تر بر رفتار هیدرولیکی، برخی کلاس‌ها ممکن است از نظر ترکیب سنگ‌شناسی هم‌پوشانی داشته باشند، اما در تحلیل مخازن کربناته ناهمگن که در آن چیدمان منافذ و پیوستگی گلوگاه‌ها بر ترکیب کانی‌شناسی ارجحیت دارد، این مزیت محسوب می‌شود. بنابراین، می‌توان نتیجه گرفت که جنکس بر پایه تخلخل و تراوایی توافقی مناسب بین طبقه‌بندی هیدرولیکی و بازتاب فرآیندهای دیاژنزی-بافتی ایجاد می‌کند و می‌تواند به‌عنوان شاخص قابل اتکا در مدل‌سازی کیفیت مخزنی مورد استفاده قرار گیرد.

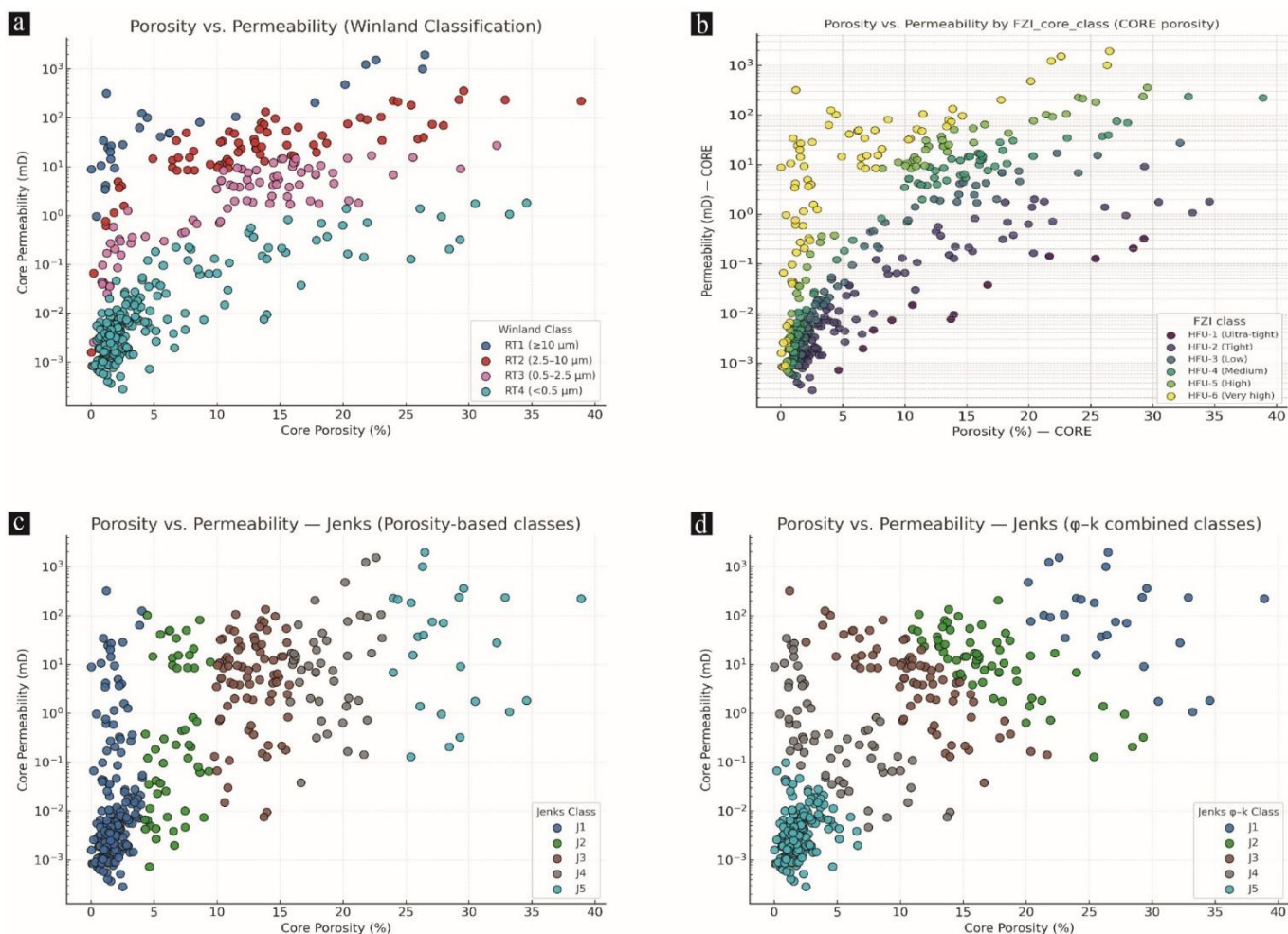
روش جنکس بر پایه شاخص زمین‌شناسی در مقایسه با سایر روش‌های آماری و پتروفیزیکی، بیشترین هم‌خوانی را با ویژگی‌های زمین‌شناسی و روندهای دیاژنزی نشان داده است. این شاخص که از

نظر ویژگی‌های سنگ‌شناسی، روش جنکس توانسته است تا حدی گروه‌هایی با ترکیب کانی‌شناسی و رخساره‌های متمایز ایجاد کند. در گروه‌های پایین‌تر، سهم انیدریت بالاتر و رخساره‌های غالب مادستونی و وکستونی با سیمان بلوکی هستند. این ویژگی‌ها بیانگر شرایط دیاژنزی بسته و افزایش فشردگی است. در مقابل، در گروه‌های بالاتر مقدار انیدریت به‌طور محسوس کاهش یافته، رخساره‌ها به سمت گرینستون‌ها و دولوستون‌ها تغییر یافته و نوع دولومیت از ریزبلور به دانه شکری تبدیل شده است. این الگو نشان می‌دهد که روش جنکس علاوه بر جداسازی هیدرولیکی، تا حد قابل توجهی فرآیندهای دیاژنزی و تغییرات بافتی را نیز منعکس کرده است. از دید سیمانی‌شدن نیز، درحالی‌که در بیشتر کلاس‌ها سیمان بلوکی غالب است، حضور سیمان هم‌ضخامت در گروه J3 نشانه ظریفی از تأثیر دیاژنزی در مرزهای آماری است. یعنی روش جنکس توانسته تفاوت‌های کوچک در نوع سیمان را به‌صورت تغییرات کلاس ثبت کند. در مجموع، به نظر می‌رسد که مرزبندی حاصل از جنکس-تخلخل نه‌تنها با تغییرات فیزیکی (تخلخل و تراوایی) بلکه با تفاوت‌های سنگ‌شناسی و رخساره‌ای نیز تا حدی همخوان است.

روش جنکس بر پایه ترکیب تخلخل و تراوایی نسبت به نسخه مبتنی بر تخلخل تنها، عملکرد قوی‌تری در جداسازی کیفیت مخزنی و شناسایی تفاوت‌های رسوبی-دیاژنزی نشان می‌دهد (شکل ۷-d). ادغام دو شاخص کلیدی شبکه منافذ (تخلخل-تراوایی) موجب شده است که مرزبندی کلاس‌ها بر اساس رفتار هیدرولیکی سنگ‌ها واضح‌تر و منسجم‌تر شکل گیرد و روند افزایشی کیفیت از J1 به J5 در جدول ۳ پیوستگی بیشتری داشته باشد. با وجود این، مجموعه داده‌ها نشان می‌دهد که قدرت تفکیک زمین‌شناسی این روش نسبت به جنکس-تخلخل پیچیده‌تر و تا حدی «چندوجهی» است. در حالی‌که انتظار می‌رود با افزایش کیفیت مخزنی سهم دولومیت پیوسته افزایش یابد و مقدار انیدریت کاهش پیدا کند، داده‌های جدول ۲ نشان می‌دهد که این روند در کلاس‌های میانی و بالاتر همیشه خطی نیست. برای مثال، کلاس‌های J4 و J5 در این روش نسبت‌های قابل توجهی از انیدریت

بین‌بلوری و دولومیت دانه شکری است. حضور سیمان هم ضخامت در کلاس J4 و غلبه دولومیت دانه شکری در J3 از نشانه‌های آشکار فعالیت مجدد سیالات دیاژنزی و شرایط باز در زمان تبلور مجدد هستند. از دیدگاه پتروفیزیکی، این تغییرات به صورت افزایش پیوسته در تخلخل و تراوایی از J1 به J5 (جدول ۳) منعکس شده است؛ به‌ویژه گروه‌های J4 و J5 که بالاترین درصد دولومیت و کمترین مقدار انیدریت را دارند، بیشترین میانگین تراوایی را نیز نشان می‌دهند. در نتیجه، برخلاف روش‌های وینلند و شاخص منطقه جریان که عمدتاً پاسخ هیدرولیکی سیستم منافذ را بازتاب می‌دهند، روش جنکس-زمین‌شناسی قادر است، پیوند میان رفتار هیدرولیکی و ویژگی‌های سنگ‌شناسی-دیاژنزی را هم‌زمان بازنمایی کند و تصویر واقع‌بینانه‌تری از کیفیت مخزنی و تحول دیاژنزی سازند ارائه دهد.

ترکیب پارامترهای زمین‌شناسی و پتروفیزیکی مشتق می‌شود، به‌طور طبیعی قادر است تغییرات هم‌زمان در ترکیب سنگ‌شناسی، بافت، رخساره و کیفیت مخزنی را در یک فضای آماری واحد آشکار سازد. داده‌های جدول ۲ نشان می‌دهد که در این روش، از گروه J1 به J5، روندی منظم و معنی‌دار از کاهش آهک و افزایش دولومیت دیده می‌شود که با بهبود کیفیت مخزنی (جدول ۳) کاملاً هم‌راستا است. در گروه‌های پایین‌تر، سنگ‌ها غالباً آهکی تا دولومیتی با درصد کم دولومیت و سیمان بلوکی هستند و رخساره‌های غالب شامل MF8، MF4 و MF7 می‌باشند. این مجموعه بیانگر غلبه سیمان انیدریتی است. با افزایش شاخص به سمت J3 و بالاتر، سهم دولومیت به‌طور قابل توجهی افزایش یافته و رخساره‌ها به سمت MF10، MF11 و MF12 تغییر یافته‌اند که نمایانگر دولومیتی شدن گسترده‌تر، افزایش تخلخل



شکل ۷- نمودارهای تخلخل-تراوایی بر اساس روش‌های مورد مطالعه. (a) روش وینلند، (b) روش شاخص منطقه جریان، (c) روش جنکس بر پایه تخلخل، (d) روش جنکس بر پایه ترکیب تخلخل و تراوایی

Fig. 7. Porosity-permeability cross-plots based on the studied methods. a) Winland method; b) FZI method; c) Jenks method based on porosity; d) Jenks method based on combined porosity and permeability

نتیجه‌گیری

زمین‌شناسی با استفاده از داده‌های مغزه، آزمایشگاهی و پتروگرافی مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج نشان داد که روش‌های وینلند و شاخص منطقه جریان عمدتاً بر رفتار هیدرولیکی سیستم منافذ مبتنی بوده و توانایی بالایی در درجه‌بندی سنگ‌ها از نظر تخلخل و تراوایی دارند، اما در تفکیک ویژگی‌های سنگ‌شناسی، رخساره‌ای و دیاژنزی محدودیت نشان می‌دهند و آن‌ها الزاماً با مرزهای زمین‌شناسی منطبق نیست.

این پژوهش با هدف ارزیابی توان روش‌های مختلف طبقه‌بندی در تبیین ارتباط میان ویژگی‌های زمین‌شناسی و رفتار پتروفیزیکی سنگ‌های کربناته سازند کنگان انجام شد. بدین منظور، چهار روش اصلی شامل (۱) وینلند، (۲) شاخص منطقه جریان، (۳) جنکس بر پایه تخلخل و جنکس بر پایه تخلخل-تراوایی و (۴) جنکس بر پایه شاخص

این روش در شناسایی کنترل‌های هم‌زمان زمین‌شناسی و هیدرولیکی بر کیفیت مخزنی است. بر این اساس، در مخازن ناهمگن کربناته‌ای نظیر سازند کنگان، به‌کارگیری یک شاخص ترکیبی زمین‌شناسی-آماری در کنار یک شاخص هیدرولیکی می‌تواند مبنای مناسب‌تری برای مدل‌سازی مخزن و پیش‌بینی رفتار تولیدی در مراحل توسعه و بهره‌برداری میدان فراهم کند.

تشکر و قدردانی

این اثر تحت حمایت مادی بنیاد ملی علم ایران (INSF) برگرفته شده از طرح شماره ۴۰۴۰۲۴۵۴ انجام شده است.

References

- Ahr, W.M., 2011. *Geology of carbonate reservoirs: The identification, description and characterization of hydrocarbon reservoirs in carbonate rocks*. John Wiley & Sons, New York.
- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American Journal of Science* 304, 1-20. <http://doi.org/10.2475/ajs.304.1.1>
- Alsharhan, A.S., Kendall, C.G.St.C., 2003. Holocene coastal carbonates and evaporites of the southern Arabian Gulf and their ancient analogues. *Earth Science Review* 61, 191-243. [http://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00110-1](http://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00110-1)
- Amaefule, J.O., Altunbay, M.H., Tiab, D., Kersey, D.G., Keelan, D.K., 1993. Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Houston, USA, 3-6 October 1993*. Society of Petroleum Engineers, Paper SPE-26436-MS. <https://doi.org/10.2118/26436-MS>
- Arvani, H., Amirsardari, M., Daneshian, J., 2025. Investigation and analysis of reservoir zonation in the Fahliyan Formation using pressure, petrophysical, and core data from an oil field in southwestern Iran. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 11 (1), 47-71. <http://doi.org/10.22034/KJES.2025.11.1.107851>
- Ebrahimi, N., Tavakoli, V., Rahimpour-Bonab, H., 2017. Assessment of reservoir barriers and their effects on reservoir compartmentalization of the Kangan and Dalan formations, central Persian Gulf. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 3 (2), 123-138. <https://doi.org/10.29252/gnf.3.2.123>
- Enayati-Bidgoli, A.H., Rahimpour-Bonab, H., Mehrabi, H., 2014. Flow unit characterisation in the permian-triassic carbonate reservoir succession at South Pars gasfield, offshore Iran. *Journal of Petroelum Geology* 37, 205-230. <https://doi.org/10.1111/jpg.12580>
- Esrafil-Dizaji, B., Rahimpour-Bonab, H., 2013. A review of Permo-Triassic reservoir rocks in the Zagros area, SW Iran: influence of the Qatar-Fars arch, *Journal of Petroleum Geology* 36(3), 257-279. <https://doi.org/10.1111/jpg.12555>
- Flügel, E., 2010. *Microfacies of carbonate rocks, Analysis, interpretation and application*. Springer-Verlag, Berlin, 976 p.
- Gui, R., Song, W., Lv, J., Lu, Y., Liu, H., Feng, T., Linghu, S., 2025. Digital elevation model-driven river channel boundary monitoring using the natural breaks (Jenks) method. *Remote Sensing* 17(6), 1092. <https://doi.org/10.3390/rs17061092>
- Gunter, G.W., Finneran, J.M., Hartmann, D.J., 1997. Early determination of reservoir flow units using an integrated petrophysical method. In: *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, San Antonio, USA, 5-8 October 1997*. Society of Petroleum Engineers, Paper SPE-38679-MS. <https://doi.org/10.2118/38679-MS>
- Hollis, C., Vahrenkamp, V., Tull, S., Mookerjee, A., Taberner, C., Huang, Y., 2010. Pore system characterisation in heterogeneous carbonates: An alternative approach to widely-used rock-typing methodologies. *Marine and Petroleum Geology* 27, 772-793. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2009.12.002>

- Insalaco, E., Virgone, A., Courme, B., Gaillot, J., Kamali, M., Moallemi, A., Lotfpour, M., Monibi, S., 2006. Upper Dalan Member and Kangan Formation between the Zagros Mountains and offshore Fars, Iran: Depositional system, biostratigraphy, and stratigraphic architecture. *GeoArabia* 11, 74-176. <https://doi.org/10.2113/geoarabia110275>
- Jamalian, A., Tavakoli, V., 2025. Integrating routine and novel methods for a comprehensive analysis of heterogeneity in Persian Gulf's Permian-Triassic carbonate reservoirs. *Marine and Petroleum Geology* 173, 107277. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2024.107277>
- Jenks, G.F., 1967. The data model concept in statistical mapping. *International Yearbook of Cartography* 7, 186-190.
- Jenks, G.F., Caspall, F.C., 1971. Error on choroplethic maps: Definition, measurement, reduction. *Annals of the Association of American Geographers* 61(2), 217-244. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8306.1971.tb00779.x>
- Kakemem, U., Jafarian, A., Husinec, A., Adabi, M.H., Mahmoudi, A., 2021. Facies, sequence framework, and reservoir quality along a triassic carbonate ramp: Kangan Formation, South Pars Field, Persian Gulf superbasin. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 198, 108166. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.108166>
- Konert, G., Afifi, A. M., Al-Hajri, S., Droste, H. J., 2001. Paleozoic stratigraphy and hydrocarbon habitat of the Arabian Plate. *GeoArabia* 6(3), 407-442. <https://doi.org/10.2113/geoarabia0603407>
- Kulabandy, G., Mosaddegh, H., Honarmand, J., Moradpour, M., 2023. Relationship between sedimentary sequences and diagenetic processes with reservoir zones of the Asmari Formation in an oil field, southwest Iran. *Kharazmi Journal of Earth Sciences* 9 (1), 308-337. <https://doi.org/10.22034/KJES.2023.9.1.106202>
- Lucia, F.J., 1995. Rock-fabric petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 79, 1275-1300. <https://doi.org/10.1306/7834D4A4-1721-11D7-8645000102C1865D>
- Lucia, F.J., 2007. Carbonate reservoir characterization: An integrated approach. 2nd Edition, Springer-Verlag, Heidelberg.
- Majhi, A., Dhanya, C.T., Pattanayak, S., Chakma S., 2024. Reducing the uncertainty in the tropical precipitation through a multi-criteria decision-making approach. *International Journal of Climatology* 44 (16), 5773-5790. <https://doi.org/10.1002/joc.8665>
- Mazzullo, S.J., 2004. Overview of porosity evolution in carbonate reservoirs. *Kansas Geological Society Bulletin* 79(1-2), 1-19.
- Mehrabi, H., Ghoreyshi, S.S., Hezarkhani, Y., Rostami, K., 2025. Diagenetic classification: A new concept in the characterization of heterogeneous carbonate reservoirs: Permian-Triassic successions in the Persian Gulf. *Minerals* 15(7), 690. <https://doi.org/10.3390/min15070690>
- Moore, C.H., 2001. Carbonate reservoirs: Porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework. Elsevier, Amsterdam.
- Moradpour, M., Zamani, Z., Moallemi, S.A., 2008. Controls on reservoir quality in the Lower Triassic Kangan Formation, southern Persian Gulf. *Journal of Petroleum Geology* 31(4), 367-385. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2008.00427.x>
- Motiei, H., 1993. Stratigraphy of Zagros. Geological Survey of Iran Publication, Tehran, 536 p.
- Peyravi, M., Kamali, M.R., Kalani, M., 2010. Depositional environments and sequence stratigraphy of the Early Triassic Kangan Formation in the northern part of the Persian Gulf: Implications for reservoir characteristics. *Journal of Petroleum Geology* 33(4), 371-386. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2010.00485.x>
- Pittman, E.D., 1992. Relationship of porosity and permeability to various parameters derived from mercury injection-capillary pressure curves for sandstone. *American Association of Petroleum Geologists Bull* 76, 191-198. <https://doi.org/10.1306/BDF87A4-1718-11D7-8645000102C1865D>
- Rahimpour-Bonab, H., Asadi-Eskandar, A., Sonei, R., 2009. Effects of the Permian-Triassic boundary on reservoir characteristics of the South Pars gas field, Persian Gulf. *Geological Journal* 44(3), 341-364. <https://doi.org/10.1002/gj.1148>
- Rahimpour-Bonab, H., Esrafil-Dizaji, B., Tavakoli, V., 2010. Dolomitization and anhydrite precipitation in Permian-Triassic carbonates at the south Pars gas field, offshore Iran: Controls on reservoir quality. *Journal of Petroleum Geology* 33(1), 43-66. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2010.00463.x>
- Sharland, P.R., Archer, R., Casey, D.M., Davies, R.B., Hall, S.H., Heward, A.P., Horbury, A.D., Simmons, M.D., 2001. Arabian Plate Sequence Stratigraphy. *GeoArabia Special Publication 2*. Gulf Petrolink Bahrain. 371 p.
- Tavakoli, V., 2021. Permeability's response to dolomitization, clues from Permian-Triassic reservoirs of the central Persian Gulf. *Marine and Petroleum Geology* 123, 104723. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104723>
- Tavakoli, V., Jamalian, A., 2019. Porosity evolution in dolomitized Permian-Triassic strata of the Persian Gulf, insights into the porosity origin of dolomite reservoirs. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 181, 106191. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106191>
- Winland, H.D., 1972. Oil accumulation in response to pore size changes, Weyburn Field, Saskatchewan. Amoco Production Research Report 72-G-25.