Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Spring 2026, Vol. 16(1): 112 - 131

Research Article

Comparison of Petrophysical and Statistical Approaches in Rock Typing: Evaluation of Jenks, Winland, and Flow Zone Indicator Methods in the Kangan Formation, Persian Gulf

Vahid Tavakoli[1]*, Aliakbar Jahanpanah[1]

1- School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

Keywords: *Kangan Formation, Rock typing, Winland method, Flow Zone Indicator, Jenks algorithm.*

1-Introduction

In petrophysical literature, two prevalent strategies for quantifying this heterogeneity and defining rock types have received the most attention. The first strategy, the Winland method, estimates the pore throat radius corresponding to 35% mercury saturation (R35) and classifies rocks based on the size of this throat (Pittman, 1992). This family of correlations uses routine porosity and permeability data to calculate equivalent pore throat size indices, which are then applied to segregate units with differing flow quality (Spearing et al., 2001). The second strategy is the Flow Zone Indicator (FZI). By simultaneously normalizing porosity and permeability and defining "hydraulic units," Flow Zone Indicator leads to the segregation of groups that exhibit relatively homogeneous flow behavior and has long been used in the industry (Amaefule et al., 1993).

Meanwhile, the Jenks Natural Breaks method is a univariate statistical classification algorithm that determines class boundaries by minimizing the within-class variance and maximizing the between-class variance (Jenks and Caspall, 1971). Jenks has been widely used in thematic mapping and Geographic Information Systems for clustering continuous values (Brewer and Pickle, 2002), but its systematic application in petrophysical rock typing has been scarcely reported and it has been less tested as a substitute or complement to conventional methods in carbonate reservoirs.

2-Material and methods

To investigate the capability of the Jenks method in defining rock types, data related to 483 core plug samples from the Kangan Formation were utilized. This data included information obtained from petrographic studies and petrophysical parameters, namely porosity and permeability. In the first step, the raw data were quality-controlled, and incomplete or unrealistic values were removed. Subsequently, a dataset comprising depth, main lithology, porosity, and permeability was extracted.

Initially, the Jenks algorithm was applied directly to the raw permeability values, but it failed to yield a satisfactory classification because most data clustered into a single class, and no meaningful boundaries were established. Next, to improve the method's performance and simultaneously account for the influence of both porosity and permeability, a new combined index was defined, which was derived from the ratio of the logarithm of permeability to porosity ($\log(k)/\varphi$).

To determine rock types based on the Flow Zone Indicator, the porosity and permeability data were used. In this method, the effective porosity was first converted from a percentage to a fraction, and then the Reservoir Quality Index (RQI) was calculated. For determining rock types using the Winland method, the equation proposed by Pittman (1992) was used to calculate the effective pore throat diameter (R35). To complete the analyses for this research, the Jenks algorithm was also applied separately to the calculated

* Corresponding author: vtavakoli@ut.ac.ir
DOI: 10.22055/aag.2026.50802.2538
Received: 2025-10-13
Accepted: 2026-01-11

ISSN: 2717-0764

values of the petrophysical indices. In the first step, the pore throat radius (R35) values calculated from the Winland correlation were considered as the algorithm's input, and the data were divided into several distinct classes. Subsequently, the Flow Zone Indicator was also calculated and similarly classified using the Jenks method.

3-Results and discussions

A review of the overall porosity-permeability correlation revealed a coefficient of determination (R^2) of 0.46. This value indicates that while a general relationship exists between porosity and permeability, the data scatter is extremely high, particularly in the low-porosity ranges. Such behavior can result from lithological and diagenetic factors like dolomitization, dissolution, or cementation, which alter reservoir quality independent of the initial porosity value .

In the Winland method, the R^2 values obtained for the classes were relatively high, with an overall class average of 0.70. In the Flow Zone Indicator method based on standard boundaries, the R^2 values varied between classes, yielding an average of 0.53. In contrast, the Flow Zone Indicator classification based on the Jenks algorithm showed weaker results, with its average R^2 calculated at 0.27. In the Jenks classification applied to the Winland results, the R^2 values in different classes were at a relatively higher level, yielding an average of 0.64.

The Winland method, which operates based on the pore throat radius, was able to create a suitable differentiation between low-quality and high-quality data. In the Flow Zone Indicator method, data were distributed more evenly among the classes. This method utilizes a direct combination of porosity and permeability to calculate the Flow Zone Index, which provides a better capability for explaining heterogeneity. Due to its statistical nature, the Jenks method demonstrated the weakest performance in explaining the porosity-permeability relationship. This method relies solely on the permeability distribution of the data and has no direct dependence on porosity. Consequently, the R^2 values remained low in all classes (between 0.001 and 0.13). Essentially, Jenks was primarily able to rank the data by permeability dispersion without strengthening the porosity-permeability relationship.

Regarding the ability of these methods to segregate rock types, the comparison of the three approaches showed that methods based on combined petrophysical indices (Winland and Flow Zone Indicator) perform better in isolating rock types and explaining the porosity-permeability relationship. In contrast, Jenks is primarily statistical in nature and is suitable for supplementary analyses rather than as a primary method. These results indicate that selecting the appropriate method in petrophysical data analysis plays a determining role in understanding heterogeneity.

4-Conclusion

The results of this study indicated that methods based on physico-empirical petrophysical indices such as Winland and Flow Zone Indicator are more effective in explaining the porosity-permeability behavior and rock typing. However, using general statistical methods like Jenks can be useful as a supplementary tool alongside these methods, especially when the goal is to examine data distribution or define new combined indices. These findings emphasize the importance of selecting the appropriate methodology and utilizing combined approaches in the analysis of carbonate reservoir heterogeneity.

In this research, the Jenks algorithm was applied for classifying the Kangan Formation petrophysical data based on the pore throat diameter (R35) and the Flow Zone Indicator. The results demonstrated that this method has a limited ability to improve the porosity-permeability correlation, and the coefficient of determination (R^2) values were noticeably lower than those from the conventional Winland and Flow Zone Indicator methods using standard boundaries.

5-References

Amaefule, J.O., Altunbay, M., 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. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Paper SPE-26436. https://doi.org/10.2118/26436-MS

ISSN: 2717-0764
CC BY

Brewer, C.A., Pickle, L., 2002. Evaluation of methods for classifying epidemiological data on choropleth maps in series. Annals of the Association of American Geographers 92(4), 662–681. https://doi.org/10.1111/1467-8306.00310

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

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 Bulletin 76(2), 191–198. https://doi.org/10.1306/BDFF87A4-1718-11D7-8645000102C1865D

Spearing, M.C., Allen, T., McAulay, G., 2001. Review of the Winland R35 method for net pay definition and its application in low permeability sands. Abstracts SCA 2001-63, 2001 International Symposium of the Society of Core Analysts, 17-19 September.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Tavakoli, V., Jahanpanah, A,. 2026. Comparison of Petrophysical and Statistical Approaches in Rock Typing: Evaluation of Jenks, Winland, and Flow Zone Indicator Methods in the Kangan Formation, Persian Gulf. Adv. Appl. Geol. 16 (1), 112-131.
DOI: 10.22055/aag.2026.50802.2538
https://aag.scu.ac.ir/article_20747.html

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

ISSN: 2717-0764

مقاله پژوهشی

مقایسه رویکردهای پتروفیزیکی و آماری در گونه‌بندی سنگی: بررسی روش‌های جنکس، وینلند و شاخص منطقه جریان در سازند کنگان، خلیج فارس

وحید توکلی
دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران
علی‌اکبر جهان‌پناه
دانشکده زمین‌شناسی، دانشکدگان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران
vtavakoli@ut.ac.ir
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۰/۲۱

چکیده

ناهمگنی در مخازن کربناته یکی از چالش‌های اصلی در پیش‌بینی رفتار جریان و ارزیابی کیفیت مخزنی است. سازند کنگان در بخش مرکزی خلیج‌فارس به عنوان یکی از مهم‌ترین سنگ‌های مخزنی، نمونه‌ای بارز از چنین ناهمگنی است. در سال‌های اخیر، الگوریتم جنکس به‌عنوان یک روش آماری مؤثر در علوم مختلف برای شناسایی الگوهای منظم درونی داده‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. در این پژوهش، روش جنکس هم به‌صورت مستقل و هم در ترکیب با شاخص‌های رایج از جمله روش وینلند و شاخص منطقه جریان (FZI) بر روی ۴۸۳ نمونه کربناته به‌کار گرفته شد تا عملکرد آن در تعیین مرزهای بهینه گونه‌های سنگی بررسی شود. ابتدا، خود روش جهت تعیین مرزهای تراوایی و سپس ترکیب تخلخل و تراوایی استفاده شد. سپس برای تعیین مرز تغییرات اصلی (مرز گونه‌های سنگی) در روش‌های وینلند و شاخص منطقه جریان استفاده گردید. در روش وینلند، بالاترین ضریب تعیین بین تخلخل و تراوایی در کلاس خوب (۰.۷۹) مشاهده شد. در روش شاخص منطقه جریان، همبستگی بالایی در کلاس‌های بسیار متراکم (۰.۸۱) و متوسط (۰.۶۸) به‌دست آمد. روش جنکس در حالت تک متغیره عملکرد ضعیفی داشت و ضریب تعیین در کلاس‌ها پایین باقی ماند (حداکثر ۰.۱۳)، اما در حالت شاخص ترکیبی لگاریتم تراوایی بر تخلخل، یک کلاس محدود توانست ضریب تعیین بالاتری (۰.۵۷) ارائه دهد. نتایج نشان داد که روش‌های مبتنی بر شاخص‌های پتروفیزیکی مانند وینلند و شاخص منطقه جریان توانایی بیشتری در توضیح رابطه تخلخل-تراوایی و گونه‌بندی سنگی دارند، در حالی‌که روش جنکس می‌تواند به عنوان ابزاری مکمل برای تحلیل داده‌ها در کنار روش‌های پتروفیزیکی استفاده شود.

واژه‌های کلیدی: *سازند کنگان، گونه‌بندی سنگی، روش وینلند، شاخص منطقه جریان، الگوریتم جنکس*

۱-مقدمه

ناهمگنی ذاتی مخازن کربناته مهم‌ترین مانع در برون‌یابی و پیش‌بینی رفتار مخزن از مقیاس مغزه تا مقیاس میدان است. این ناهمگنی علاوه بر تفاوت‌های قابل‌توجه در ویژگی‌های حفره‌ای و گلوگاه‌های منفذی، در رابطه آماری میان تخلخل و تراوایی نیز با پراکندگی بالا و نبود یک روند مشخص نمایان می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که کیفیت جریان بیش از آنکه تنها تابع مقدار تخلخل باشد، به هندسه و پیوستگی شبکه منافذ و اندازه‌ی گلوگاه‌ها وابسته است. از همین‌رو ارتباط تخلخل-تراوایی در سنگ‌های کربناته معمولاً پیچیده و غیرقابل پیش‌بینی است (Lucia, 1995, 2007; Ahr, 2008; Moore and Wade, 2013).

در علم پتروفیزیک، دو راهبرد پرکاربرد برای کمی‌سازی این ناهمگنی و تعریف گونه‌های سنگی بیش از بقیه مورد توجه است. راهبرد نخست، روش وینلند، برآورد شعاع گلوگاه منفذی متناظر با ۳۵٪ اشباع جیوه (R35) و دسته‌بندی سنگ‌ها بر پایه‌ی اندازه گلوگاه است (Pittman, 1992). این خانواده از روابط، با اتکا به تخلخل و تراوایی، شاخص‌های معادلِ اندازه‌ی گلوگاه را محاسبه کرده و برای جدایش واحدهایی با کیفیت جریانی متفاوت، به‌کار می‌روند (Spearing et al., 2001). راهبرد دوم، شاخص منطقه جریان (FZI) است که با نرمال‌سازی هم‌زمان تخلخل و تراوایی و تعریف واحدهای هیدرولیکی، به جدایش گروه‌هایی می‌انجامد که رفتار جریانی نسبتاً همگن دارند و از دیرباز در صنعت به‌صورت میدانی به‌کار

گرفته شده است (Amaefule et al., 1993). با وجود موفقیت این رویکردها، چند نیاز پژوهشی همچنان پابرجاست: نخست آنکه مرزهای گروه‌ها در روش وینلند می‌تواند میدان‌به‌میدان تغییر کند و در برخی مجموعه داده‌ها حساسیت زیادی به انتخاب ضرایب نشان می‌دهد. دوم، در شاخص منطقه جریان، همگن‌سازی آماری لزوماً به جدایش بهینه همه‌ی الگوهای منفذی نمی‌انجامد. سوم، هر یک از این روش‌ها عمدتاً به ترکیب‌های خاصی از تخلخل، تراوایی و شاخص‌های ناشی از آزمایش فشار موئینه تکیه دارند و کمتر از ابزارهای طبقه‌بندی آماری عمومی برای داده‌های یک‌بعدی بهره گرفته شده است (Pittman, 1992; Spearing et al., 2001).

در این میان، روش جنکس (Jenks Natural Breaks) یک الگوریتم طبقه‌بندی آماری تک‌متغیره است که مرز کلاس‌ها را با کمینه‌کردن واریانس درون‌کلاس و بیشینه‌کردن واریانس بین‌کلاسی تعیین می‌کند (Jenks and Caspall, 1971). جنکس به‌طور گسترده در ترسیم نقشه‌های موضوعی و سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی برای خوشه‌بندی مقادیر پیوسته به کار رفته است (Brewer and Pickle, 2002)، اما کاربرد نظام‌مند آن در گونه‌بندی سنگی پتروفیزیکی گزارش اندکی دارد و کمتر به‌عنوان جایگزین یا مکمل روش‌های متداول در مخازن کربناته آزموده شده است.

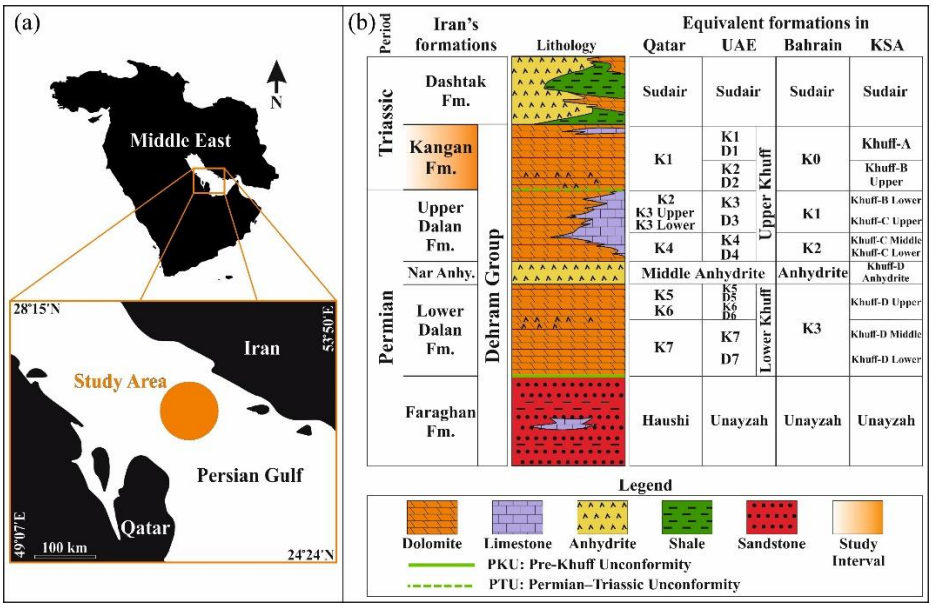
در سال‌های اخیر استفاده از روش‌های آماری و تحلیل داده‌ها بر اساس یادگیری ماشین برای طبقه‌بندی واحدهای جریانی و گونه‌های سنگی توسعه یافته‌اند (Oliveira et al., 2020; Krivoshchekov et al., 2023; Eftekhari et al., 2024; Homaie et al., 2024). بنابراین هدف این مقاله، ارزیابی توانایی روش‌های آماری مانند روش جنکس در تعیین گونه‌های سنگی مخزن بر پایه داده‌های واقعی سازند کنگان و مقایسه آن با دو روش پتروفیزیکی پرکاربرد پیشین یعنی روش وینلند و شاخص منطقه جریان است. در این چارچوب، ابتدا داده‌ها پردازش و در قالب شاخص‌های مناسب سازمان‌دهی شدند. سپس جنکس به‌صورت مستقیم بر متغیرهای اصلی و نیز شاخص‌های ترکیبی ساده اعمال شد و نتایج به لحاظ توصیفی و آماری (از جمله همبستگی تخلخل-تراوایی در هر کلاس) با دستاوردهای وینلند و شاخص منطقه جریان سنجیده شد. افزون بر این، روش جنکس در دو سطح به‌کار گرفته شد: نخست به‌عنوان یک الگوریتم مستقل برای گونه‌بندی داده‌ها، و سپس به‌عنوان ابزاری مکمل برای بازتعریف مرزهای بهینه در چارچوب‌های پتروفیزیکی متداول. بدین‌ترتیب، این تحقیق می‌کوشد نشان دهد که آیا یک روش طبقه‌بندی آماری مستقل از فرض‌های پتروفیزیکی متداول، می‌تواند به‌عنوان مکمل ابزارهای رایج در گونه‌بندی سنگی به کار آید یا خیر.

۲-زمین‌شناسی ناحیه و چینه‌شناسی سازند کنگان

حوضه خلیج‌فارس بخشی از حاشیه پلاتفرمی صفحه عربستان در امتداد نئوتتیس است که از اواخر پالئوزوئیک تا مزوزوئیک عمدتاً به‌صورت یک حاشیه منفعل عمل کرده و در این مدت رسوبات ستبری از کربنات و تبخیری در آن نهشته شده است. در مقیاس ساختاری، قوس قطر-جنوب فارس به‌عنوان یک بالاآمدگی منطقه‌ای مهم، هندسه بستر و الگوی توزیع رخساره‌ها را به‌ویژه در تریاس کنترل کرده است. این قوس در اثر تکاپوی زمین‌ساختی مرتبط با رانش صفحه عربستان به زیر زاگرس شکل گرفت و در تداوم تکامل خود سبب کنترل ضخامت و رخساره‌های واحدهای پرمین-تریاس شد (Sharland et al., 2001; Daneshvar et al., 2023). از منظر زمین‌تاریخی، حد مرزی پرمین-تریاس و پیامدهای پس از آن از جمله بحران زیستی جهانی، تأثیر مهمی بر ویژگی‌های مخزنی واحدهای دالان و کنگان در مرکز خلیج‌فارس گذاشته است (شکل ۱) و در میدان‌های گازی بزرگ مانند پارس جنوبی آثار آن به‌خوبی ثبت شده است (Konyuhov and Maleki, 2006; Tavakoli, 2015, 2016; Haghighat et al., 2020).

سازند کنگان در ایران در قاعده تریاس زیرین قرار دارد و از نظر چینه‌شناسی در بالای سازند دالان و زیر سازند دشتک واقع شده است (شکل ۱). این سازند بخش بالایی گروه دهرم محسوب می‌شود و هم‌ارز واحدهای بالایی خُوف در عربستان است (Szabo and Kheradpir, 1978; Sharland et al., 2001; Insalaco et al., 2006). ستبرای این سازند در میدان‌های بخش مرکزی خلیج‌فارس معمولاً ده‌ها تا بیش از صد متر است و در چارچوب چینه‌نگاری صفحه عربستان با سکانس‌های KS-1 و KS-2 همبستگی دارد (Peyravi et al., 2010). از نظر سنگ‌شناسی، کنگان عمدتاً از دولومیت، سنگ‌آهک دولومیتی، میان‌لایه‌های تبخیری شامل انیدریت و ژیپس و رخنمون‌های پراکنده شیل تشکیل شده است. رخساره‌های این سازند معرف یک رمپ کم‌شیب و با اقلیمی

خشک هستند که کمربندهای جزرومدی-سابخایی، لاگون، پشته‌های اُئولیتی و پیش‌شول را در بر می‌گیرند (Esrafili-Dizaji and Rahimpour-Bonab, 2009; Peyravi et al., 2010; Abdolmaleki et al., 2016). در بسیاری از میدان‌های گازی خلیج‌فارس، کنگان به دو زیرواحد مخزنی K1 و K2 تقسیم می‌شود (شکل ۱) که متناظر با دو سکانس مرتبه سوم بوده و تغییرات چرخه‌ای سطح دریا و اقلیم خشک را بازتاب می‌دهند (Falahatkhah et al., 2021). فرایندهای دیاژنتیکی متعددی از جمله دولومیتی‌شدن گسترده، سیمانی‌شدن تبخیری و انحلال انتخابی در کیفیت مخزنی کنگان نقش اساسی داشته‌اند. این فرایندها هم در سطح رخساره‌ای و هم در ارتباط با نوسانات تراز دریا باعث ایجاد ناهمگنی قابل توجهی در توزیع تخلخل و تراوایی شده‌اند و در مجموع از عوامل اصلی کنترل‌کننده کیفیت مخزن در بخش مرکزی خلیج‌فارس به شمار می‌روند (Jafarian et al., 2017; Mohammadi et al., 2024).



شکل ۱- (a) موقعیت جغرافیایی میدان مورد مطالعه در بخش مرکزی خلیج‌فارس و (b) ستون چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه همراه با واحدها و سنگ‌شناسی آن‌ها (Kaveh-Ahangar et al., 2023).

Fig 1. (a) Geographical location of the studied field in the central Persian Gulf and (b) the stratigraphic column of the studied area with its units and lithology (Kaveh-Ahangar et al., 2023).

۳-مواد و روش‌ها

برای بررسی توانایی روش جنکس در تعیین گونه‌های سنگی، داده‌های مربوط به ۴۸۳ نمونه از سازند کنگان مورد استفاده قرار گرفت. این داده‌ها شامل اطلاعات حاصل از مطالعات پتروگرافی و پارامترهای پتروفیزیکی شامل تخلخل و تراوایی بودند. در مرحله آماده‌سازی داده‌ها، مقادیر تراوایی کمتر از ۰/۰۰۱ میلی‌دارسی از مجموعه داده‌ها حذف گردیدند. این مقدار بر اساس حد تشخیص دستگاه اندازه‌گیری تراوایی در آزمایشگاه و بررسی رفتار داده‌ها در نمودارهای تخلخل ـتراوایی تعیین شد. نمونه‌هایی با تراوایی پایین‌تر از این مقدار معمولاً بیانگر سنگ‌هایی با گلوگاه‌های بسته و بدون قابلیت جریان مؤثر هستند و حضور آن‌ها باعث افزایش خطا در تحلیل‌های آماری و انحراف از روند کلی داده‌ها می‌شود. حذف این مقادیر، تنها کمتر از دو درصد از کل داده‌ها را شامل شد و تأثیر معنی‌داری بر توزیع آماری مجموعه نداشت. از نظر زمین‌شناسی، نمونه‌های دارای این مقادیر عمدتاً مربوط به رخساره‌های انیدریتی یا مادستون‌های با سیمان انیدریتی فراوان بودند که عملاً فاقد نقش مخزنی هستند. حذف این داده‌ها تأثیر قابل‌توجهی بر تفسیر زمین‌شناسی و مقایسه گروه‌های سنگی نداشته است، زیرا این رخساره‌ها به‌طور مستقل به‌عنوان بخش‌های غیرمخزنی در نظر گرفته می‌شوند و حذف آنان صرفاً به بهبود کیفیت آماری داده‌ها منجر گردیده است. بنابراین، این حد به‌عنوان آستانه عملی برای تفکیک داده‌های معتبر از نویز آزمایشگاهی انتخاب گردید. به‌منظور جلوگیری از ورود مقادیر تراوایی حاصل از

شکستگی به تحلیل‌های پتروفیزیکی، داده‌های تراوایی از نظر وجود نقاط با رفتار غیرمتناسب نسبت به تخلخل بررسی شدند. نمونه‌هایی که تراوایی بسیار بالاتر از حد انتظار در مقایسه با مقدار تخلخل داشتند، شناسایی و از مجموعه داده‌ها حذف شدند. این پالایش موجب شد رابطه تخلخل–تراوایی و طبقه‌بندی‌های مبتنی بر شاخص‌های وینلند، شاخص منطقه جریان و جنکس تنها بیانگر رفتار منافذ باشند و اثر تخلخل شکستگی موجب انحراف نتایج نگردد. در گام نخست، داده‌های تخلخل و تراوایی به‌صورت نمودار پراکنش بررسی شدند. نمونه‌هایی که فاصله آن‌ها از روند اصلی بیش از دو برابر انحراف معیار میانگین بود، به‌عنوان داده پرت در نظر گرفته شدند. این مقادیر معمولاً ناشی از خطای آزمایشگاهی یا شکستگی‌های موضعی در مغزه بودند. پس از حذف این نقاط، توزیع داده‌ها هموار و پیوسته شد و تعداد نهایی نمونه‌ها برای تحلیل به ۴۸۳ عدد رسید. از آنجا که توزیع تراوایی در داده‌های مغزه معمولاً ناهمسان و چولگی مثبت دارد، مقدار تراوایی به مقیاس لگاریتمی ($\log k$) تبدیل شد تا پراکندگی کاهش یافته و رابطه بین تخلخل و تراوایی به شکل خطی‌تری ظاهر شود. این تبدیل تنها بر تراوایی اعمال شد و سایر پارامترها در مقیاس اصلی خود باقی ماندند. برای مقایسه متغیرها و جلوگیری از تأثیر اختلاف واحدها، داده‌ها قبل از اجرای الگوریتم‌ها نرمال‌سازی شدند. در این مرحله از روش نرمال‌سازی حداقل و حداکثر استفاده شد تا همه مقادیر بین صفر و یک قرار گیرند. این کار باعث شد تخلخل و تراوایی وزن یکسانی در الگوریتم‌های آماری داشته باشند و نتیجه طبقه‌بندی صرفاً تابع تفاوت‌های واقعی میان داده‌ها باشد. سپس مجموعه داده شامل عمق، سنگ‌شناسی اصلی، تخلخل و تراوایی استخراج گردید. نمونه‌های مورد بررسی، عمدتاً شامل سنگ‌های کربناته با ترکیب غالب دولومیت و آهک‌های دولومیتی هستند. بخش اعظم نمونه‌ها دانه‌پشتیبان (grain-supported) از نوع پکستون و گرینستون بوده و در برخی نواحی، فابریک‌های ریزبلور تا میکروسپار نیز مشاهده می‌شود. حضور سیمان‌های ثانویه، انحلال موضعی و دولومیتی‌شدن از فرایندهای دیاژنزی شاخص در این نمونه‌ها به شمار می‌رود.

کیفیت کلاس‌های تعیین شده با استفاده از روش کیفیت برازش مناسب (GVF) تعیین گردید. این روش بر اساس یک الگوریتم آماری برای کمینه‌سازی واریانس درون‌کلاس و بیشینه‌سازی واریانس بین‌کلاسی عمل می‌کند. معادله کلی آن به‌صورت زیر بیان می‌شود (معادله ۱):

$$GVF = \frac{SDAM - SDCM}{SDAM} \quad \text{(معادله ۱)}$$

که در آن:

GVF: کیفیت برازش مناسب (Goodness of variance fit)

SDAM: مجموع مربعات انحراف کل داده‌ها از میانگین

SDCM: مجموع مربعات انحراف داده‌ها از میانگین کلاس مربوطه

در این پژوهش، الگوریتم جنکس برای شناسایی مرزهای طبیعی داده‌ها به‌کار گرفته شده است. از آنجا که این الگوریتم یک روش توصیفی و بدون ناظر است، فرآیند آن مبتنی بر آموزش یا پیش‌بینی داده‌های جدید نیست و بنابراین از اعتبارسنجی دوطرفه استفاده نشده است. با این حال، به‌منظور اطمینان از پایداری نتایج، تحلیل حساسیت با تعداد کلاس‌های مختلف (۳ تا ۶) و محاسبه شاخص کیفیت برازش مناسب انجام شده است تا از همگرایی و ثبات طبقه‌بندی اطمینان حاصل گردد. در ابتدا الگوریتم جنکس به‌طور مستقیم بر مقادیر خام تراوایی اعمال شد، اما نتیجه دسته‌بندی مطلوبی به‌دست نیامد زیرا بیشتر داده‌ها در یک کلاس قرار گرفتند و مرزبندی معناداری ایجاد نشد. به همین دلیل، داده‌ها به‌صورت لگاریتمی ($\log10(k)$) تبدیل شدند تا اثر توزیع بسیار ناهمگون کاهش یافته و دسته‌بندی دقیق‌تری حاصل شود. روش جنکس بر مبنای حداقل‌سازی واریانس درون‌کلاسی و حداکثرسازی واریانس بین‌کلاسی عمل می‌کند و بدین ترتیب داده‌ها را به گروه‌هایی تقسیم می‌کند که در هر گروه بیشترین همگنی داخلی و بیشترین تفاوت با سایر گروه‌ها وجود داشته باشد. در این پژوهش، الگوریتم جنکس با در نظر گرفتن پنج کلاس بر روی داده‌های لگاریتمی تراوایی اجرا گردید. مرزهای به‌دست‌آمده برای تراوایی در واحد میلی‌دارسی به‌ترتیب برابر با ۰/۰۰۱ تا ۰/۰۰۹، ۰/۰۰۹ تا ۰/۱۲۱، ۰/۱۲۱ تا ۲/۴۴، ۲/۴۴ تا ۳۶/۹۶ و ۳۶/۹۶ تا ۱۹۴۰/۵۱ بودند. برای نمایش بهتر نتایج، داده‌ها در قالب نمودار تخلخل- تراوایی و هیستوگرام تراوایی همراه با مرزهای جنکس ترسیم شدند. این نمودارها نشان دادند که روش پس از اعمال بر داده‌های لگاریتمی توانایی مناسبی در جداسازی گونه‌های سنگی با کیفیت‌های متفاوت دارد. سپس، برای بهبود عملکرد روش و لحاظ‌کردن هم‌زمان تأثیر تخلخل و

تراوایی، شاخص ترکیبی جدیدی تعریف شد که از نسبت لگاریتم تراوایی به تخلخل به دست آمد (معادله ۲). از آن‌جا که دامنه تغییرات تراوایی در مقایسه با تخلخل بسیار گسترده‌تر است و رفتار آن معمولاً به‌صورت نمایی توصیف می‌شود، از لگاریتم تراوایی استفاده گردید تا داده‌ها به توزیع نزدیک به نرمال تبدیل شوند. سپس مقدار لگاریتم تراوایی بر تخلخل تقسیم شد تا شاخصی به‌دست آید که بیانگر نسبت کارایی جریان سیال به فضای تخلخل موجود در سنگ است.

$$\textbf{Combined Index} = \textbf{Log}\,(\mathbf{k})/\,\boldsymbol{\varphi} \qquad \text{(معادله۲)}$$

که در آن k تراوایی بر حسب میلی‌دارسی و φ تخلخل بر حسب درصد است. به این ترتیب، هر دو پارامتر اصلی کنترل‌کننده کیفیت مخزنی در یک متغیر ترکیبی ادغام شدند. پس از محاسبه شاخص ترکیبی برای تمام داده‌ها، الگوریتم جنکس بر روی این متغیر اعمال گردید. هدف از این کار جداسازی داده‌ها به گونه‌های سنگی بر اساس بیشترین همگنی درونی و بیشترین تفاوت بیرونی بود، به نحوی که نقش مشترک تخلخل و تراوایی در کنترل کیفیت مخزن نیز در نظر گرفته شود. این شاخص توانست بخشی از داده‌ها را در کلاس‌هایی با همبستگی بالاتر بین تخلخل و تراوایی جای دهد و بدین‌ترتیب نسبت به حالت تک‌متغیره عملکرد بهتری ارائه کند.

برای تعیین گونه‌های سنگی بر اساس شاخص منطقه جریان، داده‌های تخلخل و تراوایی مورد استفاده قرار گرفت. در این روش ابتدا تخلخل مؤثر از درصد به کسری تبدیل شد و سپس شاخص کیفیت مخزن (RQI) مطابق رابطه ۳ محاسبه شد.

$$\boldsymbol{RQI = 0.0314\sqrt{\frac{k}{\emptyset}}} \qquad \text{(معادله۳)}$$

در ادامه، تخلخل نرمال‌شده یا PMR محاسبه گردید (معادله ۴).

$$\emptyset_{\boldsymbol{z}} = \frac{\emptyset}{\mathbf{1}-\emptyset} \qquad \text{(معادله۴)}$$

در پایان، شاخص منطقه جریان از نسبت RQI به PMR به دست آمد.

بر اساس مقادیر شاخص منطقه جریان، داده‌ها به پنج کلاس اصلی تقسیم شدند. مقادیر کمتر از ۰/۱ معرف سنگ‌های بسیار متراکم (Mega-tight)، محدوده ۰/۱ تا ۱ نشان‌دهنده سنگ‌های متراکم (Tight)، بازه ۱ تا ۵ بیانگر کیفیت متوسط (Intermediate)، محدوده ۵ تا ۱۰ نشان‌دهنده کیفیت خوب (Good) و مقادیر بالاتر از ۱۰ بیانگر سنگ‌های با کیفیت عالی (Excellent) هستند.

برای تعیین گونه‌های سنگی به روش وینلند، از معادله پیشنهادی پیتمن (Pittman, 1992) برای محاسبه قطر مؤثر گلوگاه منفذی (R35) استفاده شد. این معادله بر اساس ترکیب داده‌های تخلخل و تراوایی تعریف می‌شود (معادله ۵):

$$\textbf{LogR35} = 0.732 + 0.588\,\text{Log(k)} - 0.864\log(\emptyset) \qquad \text{(معادله۵)}$$

که در آن k تراوایی بر حسب میلی‌دارسی، φ تخلخل بر حسب درصد و R35 شعاع گلوگاه منفذی (میکرون) در نقطه اشباع ۳۵ درصد جیوه است. در این مطالعه از داده‌های آزمایشگاهی استفاده نشد و رابطه وینلند برای محاسبات موردنظر قرار گرفت. این رویکرد، باوجود نبود داده‌های تزریق جیوه، امکان مقایسه مؤثر میان روش‌های مختلف طبقه‌بندی سنگ مخزن را فراهم می‌سازد. پس از محاسبه R35 برای داده‌های سازند کنگان، نمونه‌ها بر اساس مقادیر به‌دست‌آمده در پنج کلاس اصلی تقسیم شدند. این دسته‌بندی شامل سنگ‌های بسیار متراکم (Very tight) با R35 کمتر از ۰/۵ میکرون، سنگ‌های متراکم (Tight) در بازه ۰/۵ تا ۲ میکرون، سنگ‌های با کیفیت متوسط (Intermediate) در بازه ۲ تا ۱۰ میکرون، سنگ‌های با کیفیت خوب (Good) در محدوده ۱۰ تا ۵۰ میکرون و سنگ‌های با کیفیت عالی (Excellent) با R35 بیش از ۵۰ میکرون است. در روش‌های وینلند و شاخص منطقه جریان، مرزهای عددی کلاس‌ها از منابع اصلی اقتباس شده‌اند. این حدود عددی بر اساس داده‌های آزمایشگاهی گسترده از سنگ‌های کربناته و آواری به‌دست آمده‌اند و در مطالعات متعددی بر روی مخازن گازی منطقه خلیج فارس مورد استفاده قرار گرفته و نتایج قابل اتکایی ارائه کرده‌اند. با توجه به شباهت‌های سنگ‌شناسی و پتروفیزیکی میان سازند کنگان و مخازن بررسی‌شده در مطالعات مرجع (از نظر نوع فضاهای تخلخل، اندازه گلوگاه‌ها و دامنه تراوایی)، استفاده از این مرزهای استاندارد در این پژوهش از نظر آماری و زمین‌شناسی معتبر ارزیابی می‌شود و نیازی به بازکالیبراسیون محلی احساس نگردید.

جهت تکمیل تحلیل‌های این پژوهش، الگوریتم جنکس به‌طور جداگانه بر روی مقادیر به‌دست‌آمده از شاخص‌های پتروفیزیکی اعمال شد. در گام نخست، مقادیر شعاع گلوگاه

(R35) محاسبه‌شده از رابطه وینلند به‌عنوان ورودی الگوریتم در نظر گرفته شد و داده‌ها به چند کلاس مجزا تقسیم گردیدند. در ادامه، شاخص منطقه جریان نیز محاسبه و به‌طور مشابه با روش جنکس دسته‌بندی شد. برای ارزیابی نتایج، توزیع تجمعی داده‌ها در هر دو شاخص رسم شد و مرزهای تعیین‌شده توسط الگوریتم در نمودارها مشخص گردید. همچنین، به‌منظور مقایسه قابلیت هر روش در جداسازی گونه‌های سنگی، ضریب تعیین بین تخلخل و تراوایی در کلاس‌های مختلف محاسبه شد. در نهایت، نتایج به‌دست‌آمده از جنکس بر روی روش وینلند و شاخص منطقه جریان با یکدیگر و همچنین با دسته‌بندی‌های استاندارد این دو روش مقایسه گردید.

برای اجرای الگوریتم جنکس از نرم‌افزار پایتون (نسخه ۳/۱۱) و کتابخانه‌ی mapclassify استفاده شد. این الگوریتم با هدف تقسیم داده‌ها به گروه‌هایی با حداقل واریانس درون‌گروهی و حداکثر واریانس بین‌گروهی به‌کار گرفته شد. به‌منظور ارزیابی کارایی الگوریتم جنکس، طبقه‌بندی داده‌ها با روش خوشه‌بندی K-means نیز در همان محیط برنامه‌نویسی و با همان تعداد کلاس انجام شد. در نهایت، نتایج دو روش از نظر توزیع داده‌ها، مرزهای گروه‌بندی و میانگین پارامترهای پتروفیزیکی (تخلخل و تراوایی) مورد مقایسه قرار گرفت تا کارایی و قابلیت تمایز هر روش مشخص شود. برای اطمینان از پایداری نتایج، الگوریتم در هر حالت تعداد ۱۰۰ تکرار (iteration) انجام داد و مقادیر مرزهای کلاس‌ها در هر مرحله بازمحاسبه شد. فرایند محاسبه تا زمانی ادامه یافت که تغییر در مجموع مربعات خطای درون‌کلاسی بین دو تکرار متوالی کمتر از ۰/۰۰۱ شود. در این حالت، الگوریتم به همگرایی رسیده و مرزهای طبقه‌بندی تثبیت شدند. تحلیل‌های انجام‌شده نشان داد که الگوریتم معمولاً پس از ۶۰ تا ۸۰ تکرار به پایداری کامل می‌رسد. مقادیر نهایی شاخص کیفیت برازش مناس برای هر تعداد کلاس محاسبه شد و در جدول مربوطه گزارش گردید. در این پژوهش، طبقه‌بندی با ۵ کلاس به‌عنوان حالت بهینه انتخاب شد، زیرا مقدار GVF = 0.84 را به دست داد و افزایش تعداد کلاس‌ها بهبود قابل‌توجهی در شاخص ایجاد نکرد.

۴-نتایج

۴-۱- ویژگی‌های تخلخل و تراوایی

داده‌های مربوط به سازند کنگان نشان می‌دهند که مقادیر تخلخل و تراوایی دامنه بسیار گسترده‌ای را پوشش می‌دهند. تخلخل نمونه‌ها بین کمتر از ۱ درصد تا بیش از ۲۵ درصد تغییر می‌کند. توزیع داده‌ها به گونه‌ای است که نزدیک به ۶۰ درصد نمونه‌ها دارای تخلخل کمتر از ۱۰ درصد هستند و تنها نزدیک به ۱۵ درصد نمونه‌ها تخلخل بالاتر از ۱۵ درصد دارند. میانگین کلی تخلخل در کل داده‌ها نزدیک به ۹ درصد محاسبه شد که نشان‌دهنده غلبه سنگ‌های کم‌تخلخل در این سازند است.

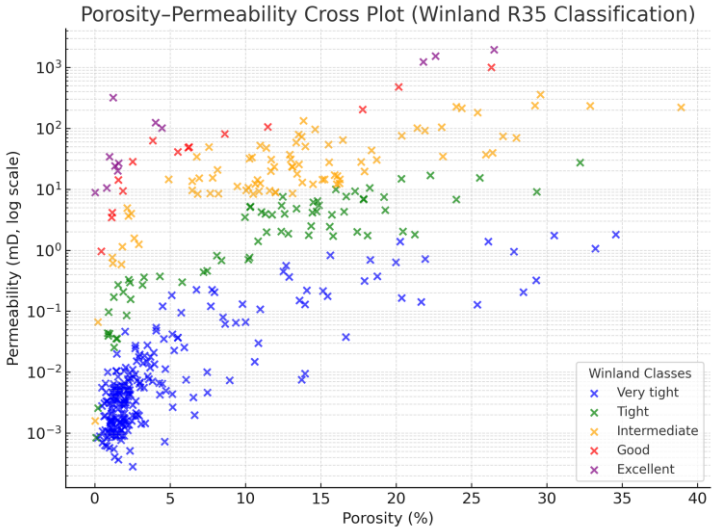
تراوایی در این مجموعه داده تغییرات شدیدتری نسبت به تخلخل دارد. مقادیر تراوایی از کمتر از ۰/۰۰۱ میلی‌دارسی در نمونه‌های بسیار متراکم تا بیش از ۱۹۰۰ میلی‌دارسی در نمونه‌هایی با کیفیت بالاتر متغیر است. بیش از نیمی از داده‌ها تراوایی کمتر از ۱ میلی‌دارسی دارند و تنها کمتر از ۱۰ درصد نمونه‌ها تراوایی بیش از ۱۰۰ میلی‌دارسی را نشان می‌دهند. میانگین کلی تراوایی نزدیک به ۳۰ میلی‌دارسی است، اما به دلیل وجود چند مقدار بسیار بالا توزیع داده‌ها دارای کشیدگی شدید به سمت راست است. میانه تراوایی تنها ۰/۵ میلی‌دارسی گزارش شد که اختلاف چشمگیری با میانگین دارد و نشان‌دهنده نامتقارن بودن توزیع است.

بررسی همبستگی کلی بین تخلخل و تراوایی نشان داد که ضریب تعیین (R^2) برابر با ۰/۴۶ است. این مقدار نشان می‌دهد که اگرچه بین تخلخل و تراوایی یک رابطه کلی وجود دارد، اما پراکندگی داده‌ها به‌ویژه در محدوده‌های تخلخل پایین بسیار زیاد است.

۴-۲- روش وینلند

بر اساس روش وینلند، پراکندگی داده‌ها در پنج کلاس اصلی نشان داد که بیش از نیمی از داده‌ها (نزدیک به ۵۶ درصد) در کلاس «بسیار متراکم» قرار دارند (شکل ۲). این کلاس بیانگر گلوگاه‌های منفذی کوچک‌تر از ۰/۵ میکرون است که تراوایی آن‌ها به‌طور معمول کمتر از ۱ میلی‌دارسی و در برخی نمونه‌ها حتی کمتر از ۰/۰۱ میلی‌دارسی است. کلاس «متراکم» نزدیک به ۱۹ درصد و کلاس «میانی» نزدیک به ۲۳ درصد داده‌ها را شامل می‌شوند که در مجموع نزدیک به یک‌سوم کل داده‌ها را تشکیل می‌دهند. در این دو کلاس، تراوایی از چند صدم تا نزدیک به ۳۰ میلی‌دارسی تغییر می‌کند و میانگین تخلخل بین ۷ تا ۱۰ درصد متغیر است. در مقابل، سهم کلاس «خوب» تنها نزدیک به ۵ درصد و کلاس «عالی» کمتر از ۱ درصد بود. تراوایی در این دو کلاس از ده‌ها تا صدها میلی‌دارسی متغیر است و مقادیر بیشینه بیش از ۸۰۰ میلی‌دارسی را نیز شامل می‌شود.

میانگین تخلخل در این بخش‌ها به بیش از ۱۵ درصد می‌رسد. بررسی ضریب تعیین بین تخلخل و تراوایی نشان داد که مقادیر به ترتیب برای کلاس‌های بسیار متراکم، متراکم، میانی و خوب برابر با ۰/۶۲، ۰/۵۹، ۰/۵۳ و ۰/۷۹ است. به دلیل کم بودن تعداد داده‌ها در کلاس عالی، محاسبه ضریب تعیین معتبر در این کلاس امکان‌پذیر نبود.



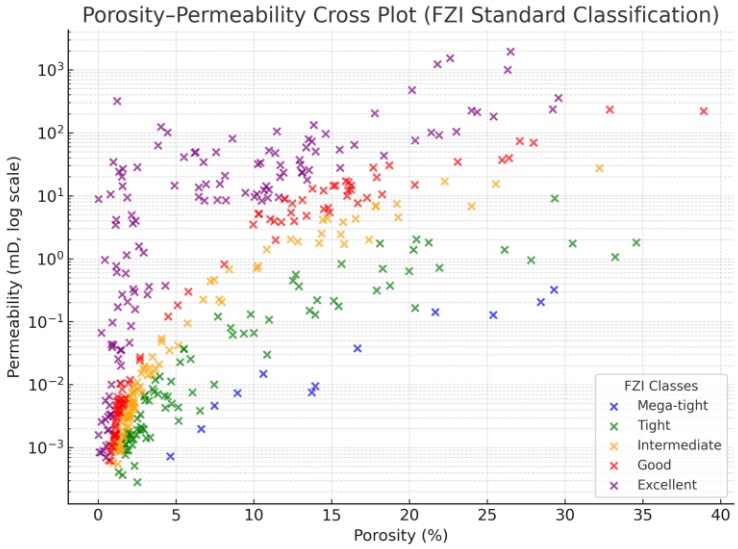
شکل ۲- نمودار تخلخل–تراوایی با استفاده از روش وینلند. نمونه‌ها بر حسب کلاس‌های کیفیت مخزن (از بسیار متراکم تا عالی) تفکیک شده‌اند.
Fig 2. Porosity–permeability cross plot using the Winland method. The samples are classified based on reservoir quality (very tight to excellent) classes.

۴-۳- روش شاخص منطقه جریان

داده‌های حاصل از محاسبه شاخص منطقه جریان نشان دادند که پراکندگی در این روش نسبت به وینلند متوازن‌تر است (شکل ۳). بیشترین سهم مربوط به کلاس «متراکم» با نزدیک به ۴۰ درصد و پس از آن کلاس «میانی» با نزدیک به ۳۴ درصد داده‌ها بود. این دو کلاس در مجموع بیش از ۷۰ درصد داده‌ها را شامل شدند. کلاس «خوب» نزدیک به ۶ درصد و کلاس «عالی» نزدیک به ۷ درصد داده‌ها را دربر گرفتند و سهم کلاس «بسیار متراکم» کمتر از ۳ درصد بود. تراوایی در کلاس‌های متراکم و بسیار متراکم عمدتاً کمتر از ۱ میلی‌دارسی است، در حالی که در کلاس‌های میانی این مقدار تا چند ده میلی‌دارسی افزایش می‌یابد. در کلاس خوب تراوایی میانگین نزدیک به ۲۵۰ میلی‌دارسی و در کلاس عالی بیش از ۳۰ میلی‌دارسی گزارش شد، اگرچه بیشینه تراوایی در این گروه به بیش از ۹۰۰ میلی‌دارسی نیز می‌رسید. میانگین تخلخل در کلاس‌های پایین‌تر (متراکم) نزدیک به ۷ درصد و در کلاس‌های بالاتر (خوب) بیش از ۸ درصد بود. نتایج ضریب تعیین نشان داد که مقدار این شاخص در کلاس بسیار متراکم برابر با ۰/۸۱، در کلاس متراکم ۰/۳۷، در کلاس میانی ۰/۶۸، در کلاس خوب ۰/۴۹ و در کلاس عالی ۰/۲۹ بود.

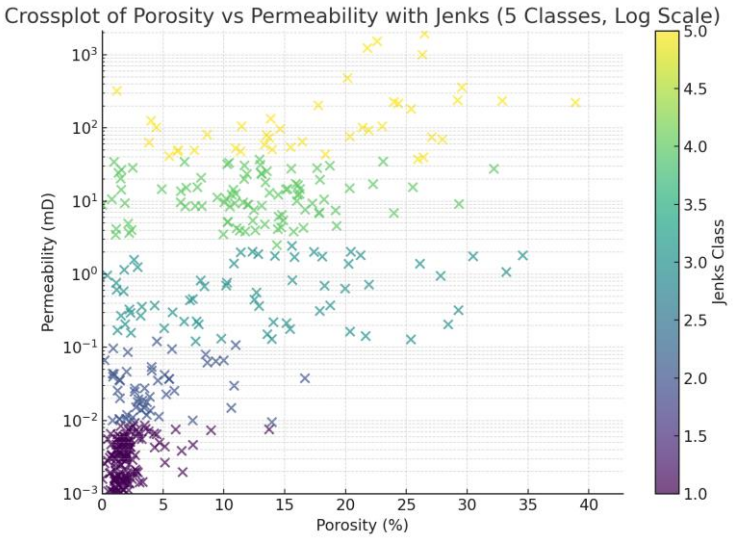
۴-۴- روش جنکس

کاربرد روش جنکس بر اساس تراوایی، داده‌ها را به پنج کلاس تقسیم کرد که هرکدام بین ۱۰ تا ۲۷ درصد از کل داده‌ها را شامل شدند (شکل ۴). کلاس اول که نزدیک به ۲۷ درصد داده‌ها را در بر می‌گرفت، کمترین مقادیر تراوایی (میانگین کمتر از ۰/۰۱ میلی‌دارسی) و میانگین تخلخل نزدیک به ۲ درصد را نشان داد. کلاس دوم با سهم نزدیک به ۱۱ درصد دارای تراوایی پایین (میانگین ۰/۰۴ میلی‌دارسی) و میانگین تخلخل نزدیک به ۴ درصد بود. کلاس‌های سوم و چهارم که مجموعاً بیش از ۳۳ درصد داده‌ها را شامل شدند، میانگین تخلخل نزدیک به ۱۲ درصد داشتند، اما تراوایی در آن‌ها از کمتر از ۱ میلی‌دارسی تا بیش از ۱۰ میلی‌دارسی متغیر بود. کلاس پنجم با سهم نزدیک به ۹ درصد بیشترین میانگین تخلخل (نزدیک به ۱۸ درصد) و بیشترین میانگین تراوایی (بیش از ۲۴۰ میلی‌دارسی) را نشان داد. با وجود این، مقادیر ضریب تعیین بین تخلخل و تراوایی در همه کلاس‌های جنکس بسیار پایین بود و از ۰/۰۰۱ در کلاس چهارم تا حداکثر ۰/۱۳ در کلاس اول تغییر می‌کرد.



شکل ۳- نمودار تخلخل–تراوایی با استفاده از روش شاخص منطقه جریان. نمونه‌ها بر حسب کلاس‌های کیفیت مخزن (از بسیار متراکم تا عالی) تفکیک شده‌اند.

Fig 3. Porosity–permeability cross plot using the Flow Zone Indicator method. The samples are classified based on reservoir quality (Mega-tight to excellent) classes.



شکل ۴- نمودار تخلخل–تراوایی با استفاده از روش جنکس. داده‌ها بر اساس مقادیر تراوایی در پنج کلاس تفکیک شده‌اند و الگوریتم جنکس با در نظر گرفتن تغییرات طبیعی داده‌ها، مرزهای بهینه بین کلاس‌های کیفیت مخزن را تعیین می‌کند.

Fig 4. Cross Plot of porosity–permeability with Jenks method. The data are divided into five permeability-based classes, and the Jenks algorithm defines optimal boundaries by accounting for natural data variation.

برای بهبود عملکرد این روش، جنکس بر شاخص ترکیبی لگاریتم تراوایی تقسیم بر تخلخل نیز اعمال شد. در این حالت بیش از ۷۰ درصد داده‌ها در یک کلاس اصلی قرار گرفتند و نزدیک به ۲۷ درصد داده‌ها در دو کلاس دیگر توزیع شدند. کمترین سهم مربوط به یک کلاس کوچک با کمتر از ۳ درصد داده‌ها بود. نتایج ضریب تعیین نشان داد که این کلاس کوچک دارای مقدار بالاتری برابر با ۰/۵۷ بود، در حالی‌که در دو کلاس دیگر مقادیر ضریب تعیین همچنان پایین و کمتر از ۰/۱ باقی ماند.

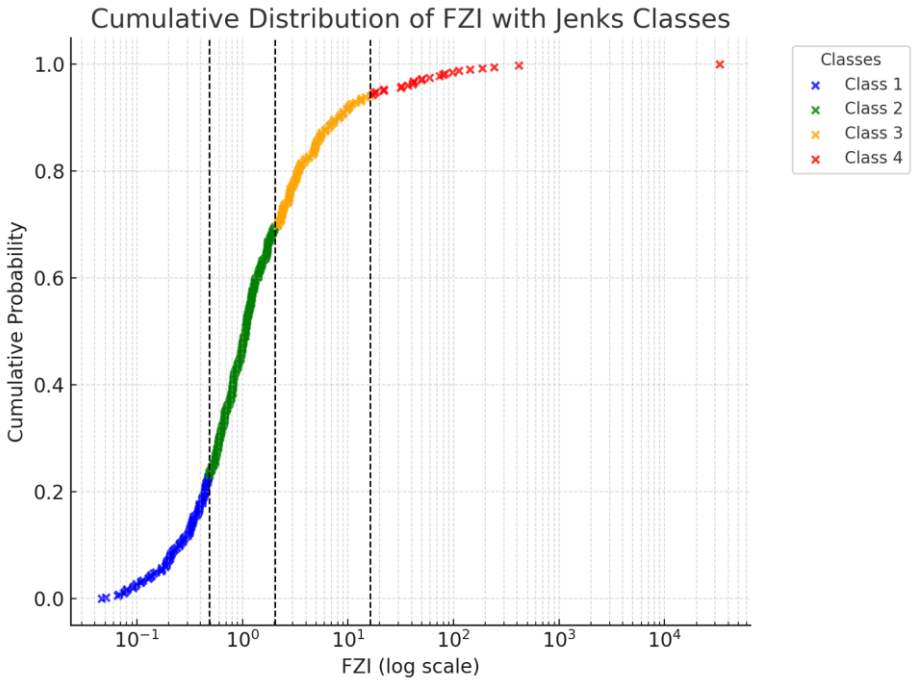
سپس روش جنکس بر روی داده‌های شاخص منطقه جریان و وینلند اعمال گردید تا توانایی آن برای دسته‌بندی نتایج روش‌های پتروفیزیکی نیز ارزیابی گردد (شکل‌های ۵ و ۶). در هر روش، ضریب تعیین بین تخلخل و تراوایی تعیین گردید و با سایر روش‌ها مقایسه شد (جدول ۱).

به‌منظور ارزیابی کارایی روش‌ها در دسته‌بندی داده‌ها، ضریب تعیین بین تخلخل و تراوایی در کلاس‌های مختلف محاسبه شد (جدول ۱). در روش وینلند، مقادیر به‌دست‌آمده برای کلاس‌ها در محدوده بالا قرار داشت و میانگین کل کلاس‌ها برابر با ۰/۷ بود. در روش شاخص منطقه جریان بر اساس مرزهای استاندارد، مقادیر ضریب تعیین بین کلاس‌ها متغیر بود و میانگین ۰/۵۳ به‌دست آمد. در مقابل، دسته‌بندی شاخص منطقه جریان بر اساس الگوریتم جنکس نتایج ضعیف‌تری نشان داد (جدول ۱) و میانگین ضریب تعیین آن ۰/۲۷ محاسبه شد. در روش جنکس بر مبنای روش وینلند، مقادیر ضریب تعیین در کلاس‌های مختلف در سطح نسبتاً بالاتری قرار داشت و میانگین آن ۰/۶۴ شد. برای مقایسه کلی، داده‌ها بدون دسته‌بندی نیز بررسی شدند که در این حالت مقدار ضریب تعیین تنها ۰/۱ بود. این نتایج در جدول ۱ به طور مقایسه‌ای گردآوری شد و میانگین ضریب تعیین برای هر روش به‌طور جداگانه گزارش گردید. بر اساس این جدول، روش وینلند بالاترین مقدار میانگین را به خود اختصاص داد و پس از آن جنکس بر مبنای روش وینلند، شاخص منطقه جریان استاندارد و شاخص منطقه جریان جنکس در رتبه‌های بعدی قرار گرفتند.

۴-۵ روش خوشه‌بندی K-means

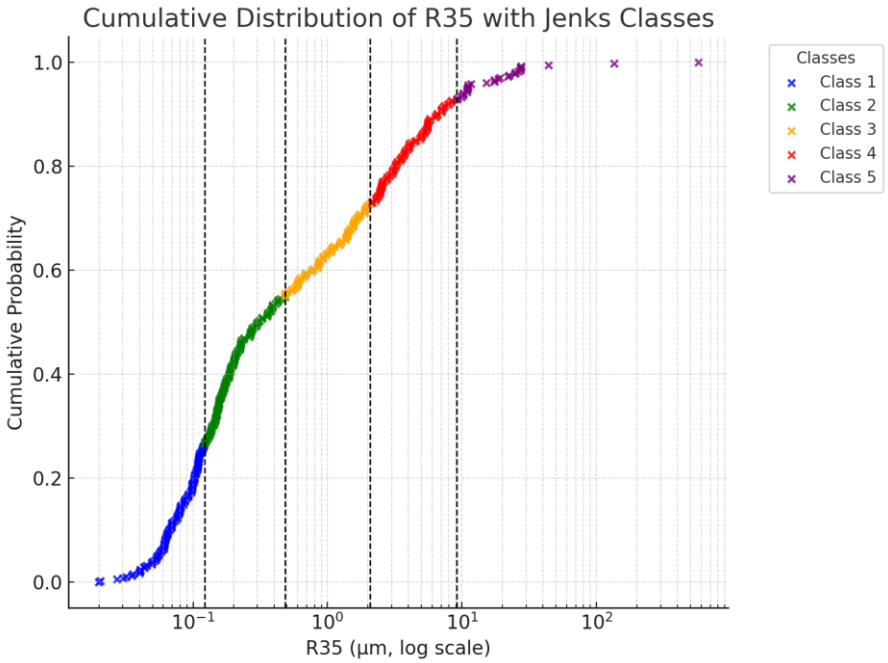
برای بررسی الگوهای درونی داده‌های تخلخل و تراوایی، الگوریتم K-means با درنظرگرفتن پنج خوشه بر روی مجموعه داده‌های سازند کنگان اعمال شد. این الگوریتم با گروه‌بندی داده‌ها بر اساس کمینه‌سازی فاصله نقاط از مرکز خوشه‌ها، توانست بخش مهمی از ناهمگنی موجود در داده‌ها را تفکیک کند و مجموعه‌هایی با رفتار نسبتاً متمایز ایجاد نماید (جدول ۲). نتایج نشان داد که خوشه‌های به‌دست‌آمده، محدوده‌های متفاوتی از کیفیت مخزنی را بازتاب می‌دهند. خوشه‌های دارای تراوایی بسیار پایین عموماً در بخش‌هایی قرار گرفتند که تغییرات تخلخل تأثیر اندکی بر رفتار جریان دارد و اغلب بیانگر سنگ‌های متراکم و فاقد مسیرهای جریانی مؤثر هستند. در مقابل، خوشه‌های دارای تراوایی بالاتر دامنه پراکندگی بیشتری داشته و ارتباط قوی‌تری میان تخلخل و تراوایی در آن‌ها دیده شد. برای هر خوشه، رابطه تخلخل–تراوایی به‌صورت جداگانه برازش شد. نتایج این تحلیل نشان داد که مدل بهینه در خوشه‌های مختلف یکسان نیست و بسته به ساختار منفذی هر گروه، مدل‌های متفاوتی بهترین عملکرد را دارند. در برخی خوشه‌ها مدل‌های غیرخطی (مانند مدل توانی یا نمایی) ضریب تعیین بالاتری ارائه کردند، در حالی‌که در گروه‌های دیگر مدل خطی یا چندجمله‌ای مناسب‌تر بود. این تنوع در نوع مدل‌های بهینه نشان می‌دهد که شبکه منفذی سازند کنگان از رژیم‌های جریانی متفاوتی تشکیل شده است.

به‌منظور ارزیابی رفتار تخلخل و تراوایی در کلاس‌های به‌دست‌آمده از دو روش طبقه‌بندی جنکس و K-means، مجموعه‌ای از مدل‌های ریاضی مختلف برای هر کلاس برازش شد تا مناسب‌ترین رابطه میان این دو متغیر شناسایی شود. در این بررسی، مدل‌های خطی، چندجمله‌ای درجه دو و سه، مدل لگاریتمی، مدل نمایی و مدل توانی مورد آزمون قرار گرفتند. نتایج نشان داد که الگوی تغییرات تخلخل و تراوایی در کلاس‌های مختلف یکسان نیست و هر کلاس بسته به نوع سنگ و ساختار منفذی آن، رفتار متفاوتی را دنبال می‌کند. همان‌گونه که در جدول ۳ نشان داده شده است، برای هر کلاس بهترین مدل بر اساس بیشترین مقدار ضریب تعیین انتخاب شده و نوع مدل بهینه، مقدار R^2، معادله دقیق رابطه و تعداد داده‌های موجود در هر کلاس گزارش گردیده است. مقایسه نتایج بین کلاس‌ها بیانگر آن است که در بسیاری از موارد، مدل‌های غیرخطی و به‌ویژه مدل‌های توانی و چندجمله‌ای توانسته‌اند همبستگی بالاتری ایجاد کنند. این موضوع نشان می‌دهد که شبکه منفذی سازند کنگان، به‌ویژه در کلاس‌هایی با تراوایی بالا یا پراکندگی قابل توجه، رفتاری غیرخطی نسبت به تخلخل دارد و انتخاب مدل‌های ساده خطی قادر به توضیح کامل این تغییرات نیست.



شکل ۵- نمودار توزیع تجمعی شاخص منطقه جریان با استفاده از طبقه‌بندی جنکس که در آن مرز کلاس‌ها بر اساس تغییرات طبیعی داده‌ها تعیین شده است.

Fig 5. Cumulative distribution of Flow Zone Indicator using the Jenks classification method, where class boundaries are determined based on natural data variations.



شکل ۶- نمودار توزیع تجمعی R35 با استفاده از روش جنکس که نواحی تغییر رفتار و مرز بین کلاس‌های مختلف کیفیت سنگ مخزن را مشخص می‌کند.

Fig 6. Cumulative distribution of R35 using the Jenks method, illustrating transition zones and boundaries between different reservoir quality classes.

جدول ۱- مقایسه ضریب تعیین (R^2) اندازه‌گیری شده بین تخلخل و تراوایی در روش‌ها و کلاس‌های مختلف.

Table 1. Comparison of coefficient of determination (R^2) between porosity and permeability across different methods and classes

Method	Class	R^2	Number of samples	Standard deviation Φ (%)	Standard deviation K (mD)
Winland (Standard)	Very tight	0.62	166	0.32	8.6
Winland (Standard)	Tight	0.59	195	1.23	0.41
Winland (Standard)	Intermediate	0.53	68	0.55	0.63
Winland (Standard)	Good	0.79	54	0.63	0.92
Winland (Jenks)	Class 1	0.75	141	2.18	1.35
Winland (Jenks)	Class 2	0.75	121	0.82	1.55
Winland (Jenks)	Class 3	0.56	64	0.95	17.50
Winland (Jenks)	Class 4	0.56	98	1.08	2.10
Winland (Jenks)	Class 5	0.59	59	1.21	22.30
FZI (Standard)	Mega-tight	0.81	98	1.34	28.90
FZI (Standard)	Tight	0.37	112	1.48	3.25
FZI (Standard)	Intermediate	0.68	85	1.61	1.25
FZI (Standard)	Good	0.49	65	1.78	4.90
FZI (Standard)	Excellent	0.29	123	1.03	41.30
FZI (Jenks)	Class 1	0.28	118	0.71	2.85
FZI (Jenks)	Class 2	0.38	165	2.18	12.81
FZI (Jenks)	Class 3	0.30	99	2.32	6.80
FZI (Jenks)	Class 4	0.12	101	0.23	9.40
Winland (Standard)	*Average*	*0.70*	*483*	*2.85*	*34.18*
Winland (Jenks)	*Average*	*0.64*			
FZI (Standard)	*Average*	*0.53*			
FZI (Jenks)	*Average*	*0.27*			

جدول ۲- نتایج تحلیل واریانس (ANOVA) برای روش‌های شاخص جنکس و خوشه‌بندی K-means در سازند کنگان. مقدار F نشان‌دهنده آزمایش آماری F و مقدار p نشان‌دهنده احتمال است.

Table 2. ANOVA results for the Jenks index and K-means clustering methods in the Kangan Formation. The F-value represents the F statistical test, and the p-value indicates the probability.

Method	Variable	F-value	p-value
Kmeans	Porosity (%)	30.04	3.923e-22
Kmeans	Permeability (mD)	4350.25	0.000e+00
Jenks	Porosity (%)	25.98	2.286e-19
Jenks	Permeability (mD)	1521.40	1.355e-257

جدول ۳- بهترین مدل‌های برازش‌یافته برای رابطه تخلخل–تراوایی در کلاس‌های حاصل از روش‌های جنکس و K-means به همراه مقدار R^2 ، معادله مدل و تعداد داده‌های هر کلاس

Table 3 – Best-fit models for the porosity–permeability relationship within the classes derived from the Jenks and K-means methods, including R^2 values, model equations, and the number of data points in each class

Method	Class	Best Model	Best R^2	Equation	N_points
Kmeans	0	Power	0.43	k = 0.0057311 * φ^1.9547	355
Kmeans	1	Linear	0.48	k = 107.3 * φ + -902.27	23
Kmeans	2	Exponential	0.08	k = exp(-0.0086472 * φ + 5.7559)	10
Kmeans	3	Linear	0.33	k = -51.575 * φ + 2357.3	11
Kmeans	4	Cubic	0.09	k = 131.15 + -17.228 * φ + 1.3159 * φ^2 + -0.028709 * φ^3	29
Jenks	1	Power	0.64	k = 0.0056661 * φ^1.981	409
Jenks	2	Cubic	0.48	k = 138.56 + -18.979 * φ + 1.3985 * φ^2 + -0.027919 * φ^3	27
Jenks	3	Cubic	0.82	k = 345.94 + -29.419 * φ + 2.3653 * φ^2 + -0.044343 * φ^3	10
Jenks	4	Linear	0.78	k = 362.77 * φ + -6676.6	16
Jenks	5	Linear	0.63	k = 33.28 * φ + 418.2	24

۵-بحث

یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های داده‌های سازند کنگان، ناهمگنی شدید در رابطه میان تخلخل و تراوایی است. این ناهمگنی در نتایج آماری کلی نیز مشهود است؛ به‌طوری که میانگین تراوایی نزدیک به ۳۰ میلی‌دارسی است، اما میانه آن تنها ۰/۵ میلی‌دارسی محاسبه شد. اختلاف قابل توجه میان میانگین و میانه بیانگر آن است که تعداد کمی از داده‌های با تراوایی بسیار بالا توزیع را به سمت مقادیر بزرگ‌تر کشیده‌اند. چنین وضعیتی در اغلب مخازن کربناته مشاهده می‌شود و نشان‌دهنده آن است که بیشتر داده‌ها متعلق به سنگ‌های متراکم یا کم‌تراوا هستند و تنها تعداد محدودی از نمونه‌ها کیفیت جریانی بالایی دارند.

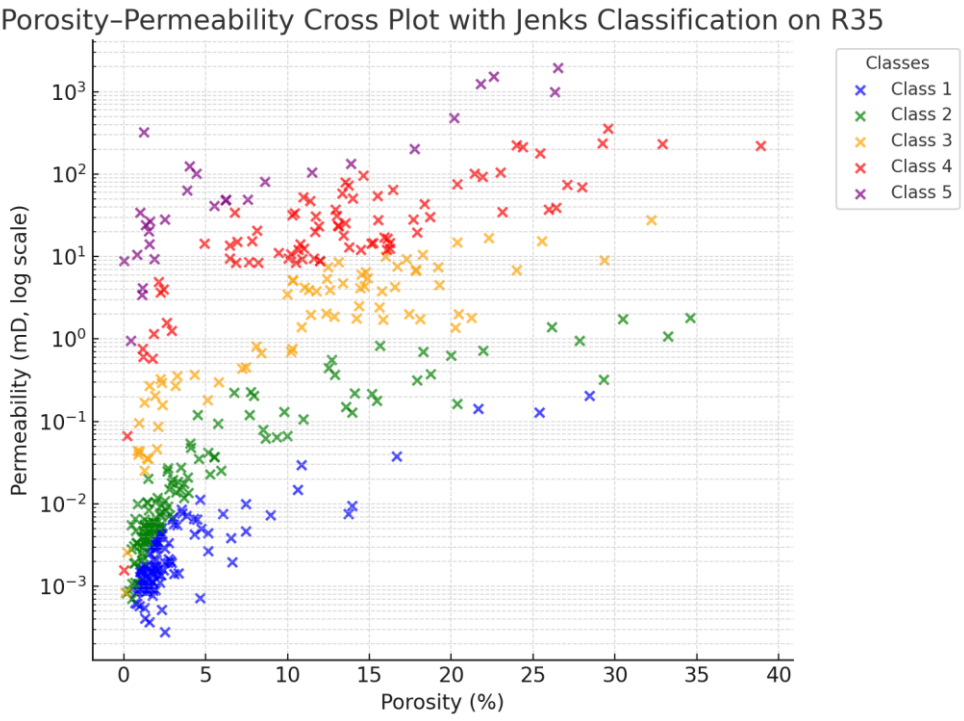
در روش وینلند، که بر اساس تخمین شعاع گلوگاه منفذی عمل می‌کند، تفکیک مناسبی میان داده‌های با کیفیت پایین و بالا ایجاد شد. بالاتر بودن ضریب تعیین در کلاس «خوب» (۰/۷۹) نشان می‌دهد که زمانی که اندازه گلوگاه‌ها به حدی می‌رسد که امکان برقراری پیوستگی مؤثر بین حفرات وجود دارد، تراوایی رفتاری منظم‌تر و قابل پیش‌بینی‌تری نسبت به تخلخل نشان می‌دهد. در مقابل، در کلاس‌های پایین‌تر مانند «متراکم» و «میانی» (با ضرایب تعیین ۰/۵۹ و ۰/۵۳) پراکندگی بیشتری دیده می‌شود. در سنگ‌های کم‌تراوا، وجود یا عدم وجود مسیرهای جریانی فعال به تغییرات جزئی در اندازه و اتصال گلوگاه‌ها وابسته است؛ بنابراین امکان دارد سنگ‌هایی با تخلخل مشابه، تراوایی‌های بسیار متفاوتی داشته باشند. محدود بودن سهم کلاس «عالی» نیز بازتاب‌دهنده آن است که شرایط ایجاد مسیرهای جریانی پایدار در این سازند نادر و وابسته به حضور گلوگاه‌های عریض و به‌هم‌پیوسته است.

در روش شاخص منطقه جریان، داده‌ها به‌صورت متوازن‌تری بین کلاس‌ها توزیع شدند. این روش که ترکیبی از تخلخل و تراوایی است، توانایی بالاتری در ارزیابی ناهمگنی دارد. ضریب تعیین بالا در کلاس «بسیار متراکم» (۰/۸۱) نشان می‌دهد که در محدوده تراوایی بسیار پایین، تغییرات تخلخل تأثیر چندانی روی رفتار جریان ندارد و ساختار گلوگاه‌ها عامل اصلی کنترل‌کننده است. در کلاس «خوب»، ضریب تعیین نسبتاً بالا (۰/۴۹) رفتار منظم‌تر شبکه جریانی را نشان می‌دهد. اما در کلاس «عالی»، ضریب تعیین پایین (۰/۲۹) بیانگر آن است که در سنگ‌های با کیفیت بالا، تراوایی بیشتر تابع پیوستگی شبکه منافذ، کانال‌های ثانویه و توسعه فضاهای درشت‌منفذی (مانند قالبی‌ها و حفره‌های به‌هم‌پیوسته) است تا مقدار تخلخل کل.

روش جنکس، به دلیل ماهیت آماری خود، ضعیف‌ترین عملکرد را در توضیح رابطه تخلخل–تراوایی نشان داد. این روش تنها بر اساس توزیع داده‌ها عمل می‌کند و به ماهیت فیزیکی جریان سیالات یا هندسه منفذی اتکا ندارد. به همین دلیل مقادیر ضریب تعیین در همه کلاس‌ها پایین باقی ماند (۰/۰۰۱ تا ۰/۱۳). در واقع، جنکس توانست داده‌ها را از نظر پراکندگی

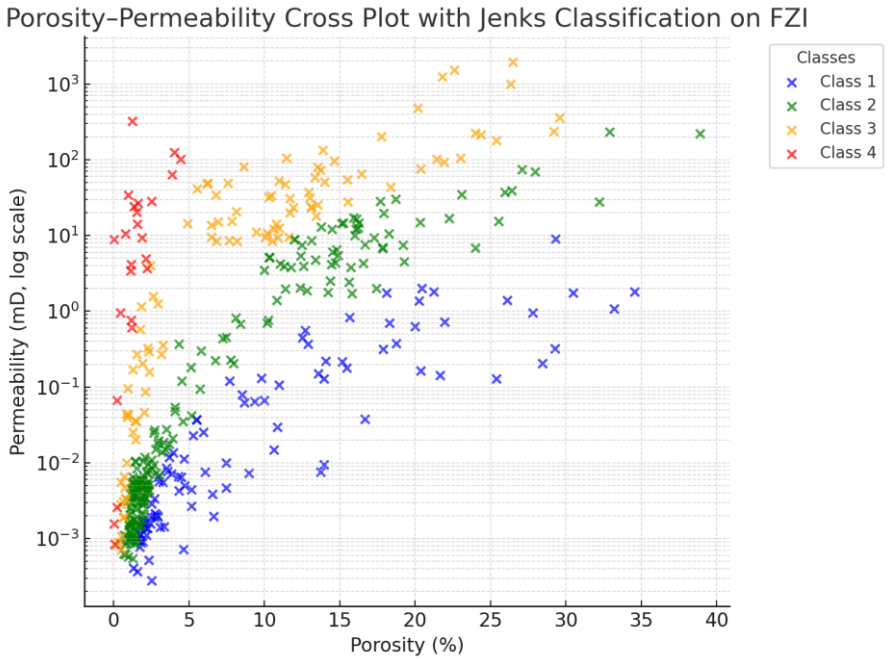
تراوایی مرتب کند، اما نتوانست رفتار هیدرودینامیکی را بازتاب دهد. هنگامی که جنکس بر شاخص ترکیبی لگاریتم تراوایی تقسیم بر تخلخل اعمال شد، یک کلاس توانست ضریب تعیین بالاتری (۰/۵۷) به‌دست آورد؛ نتیجه‌ای که نشان می‌دهد این الگوریتم تنها در صورتی عملکرد قابل قبولی دارد که ورودی آن قبلاً در قالب یک متغیر پتروفیزیکی معنادار خلاصه شده باشد. ضعف الگوریتم جنکس در تحلیل داده‌های کربناته را می‌توان از منظر زمین‌شناسی نیز توضیح داد. رفتار جریان در سنگ‌های کربناته شدیداً تحت تأثیر نوع رخساره، نوع فضای تخلخلی، نوع و میزان سیمان، اندازه و اتصال گلوگاه‌ها و فرایندهای دیاژنزی مانند انحلال، سیمانی‌شدن و دولومیتی شدن است. این فرایندها باعث ایجاد شبکه‌های منفذی غیرخطی، چندمقیاسی و ناهمگن می‌شوند. بنابراین، یک الگوریتم آماری مبتنی بر توزیع عددی (مانند جنکس) نمی‌تواند این پیچیدگی فیزیکی را در نظر بگیرد و مرزبندی آن الزاماً بازتاب رفتار جریانی نیست. در مقابل، روش‌هایی مانند وینلند و شاخص منطقه جریان دقیقاً بر اساس هندسه منفذی و روابط تجربی هیدرودینامیکی توسعه یافته‌اند و به همین دلیل توانایی بیشتری در توضیح رفتار واقعی مخزن دارند.

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که انتخاب روش مناسب برای گونه‌بندی سنگی تأثیر مستقیم بر شناخت ناهمگنی مخزن دارد. روش‌های مبتنی بر شاخص‌های پتروفیزیکی بیشترین توانایی را در جداسازی گونه‌های سنگی و توضیح رفتار جریان نشان دادند، در حالی که روش جنکس بیشتر به‌عنوان یک ابزار آماری مکمل قابل توصیه است. این موضوع در شکل‌های ۷ و ۸ نیز قابل مشاهده است. در مجموع، می‌توان نتیجه گرفت که کارایی پایین جنکس در این مطالعه ناشی از ماهیت آماری آن و عدم ارتباط مستقیم با فرایندهای فیزیکی حاکم بر شبکه منافذ است. بنابراین، برای تحلیل‌های اصلی و تفسیرهای مخزنی، استفاده از روش‌های پتروفیزیکی اولویت دارد و جنکس می‌تواند تنها به‌عنوان ابزار کمکی مورد بهره‌برداری قرار گیرد.



شکل ۷- نمودار تخلخل–تراوایی با استفاده از طبقه‌بندی جنکس بر مبنای روش وینلند (شعاع گلوگاه (R35)) که ارتباط میان تخلخل، تراوایی و اندازه گلوگاه را برای کلاس‌های مختلف کیفیت سنگ مخزن نشان می‌دهد.

Fig 7. Porosity–permeability cross plot using the Jenks classification based on Winland method (pore throat radius (R35)), illustrating the relationship between porosity, permeability, and pore throat size across different reservoir quality classes.



شکل ۸- نمودار تخلخل–تراوایی با استفاده از طبقه‌بندی جنکس بر اساس شاخص منطقه جریان که تغییرات کیفیت مخزن را در ارتباط با ویژگی‌های تخلخل و تراوایی مشخص می‌سازد.

Fig 8. Porosity–permeability cross plot using the Jenks classification based on Flow Zone Indicator, showing the variation of reservoir quality in relation to porosity and permeability characteristics.

مقایسه سه روش طبقه‌بندی نشان می‌دهد که تفاوت در نحوه جدایش داده‌ها می‌تواند اثر مستقیمی بر تعیین واحدهای جریانی و مدل‌سازی مخزن داشته باشد. روش‌های مبتنی بر ویژگی‌های پتروفیزیکی مانند وینلند و شاخص منطقه جریان، به دلیل اتکا به هندسه واقعی منفذها و ارتباط مستقیم با رفتار جریان در محیط متخلخل، واحدهایی ارائه می‌کنند که از نظر هیدرودینامیکی معنادارتر بوده و قابلیت بیشتری در بازتاب عملکرد واقعی مخزن دارند. این موضوع به‌ویژه برای تهیه نقشه‌های کیفیت مخزنی، شبیه‌سازی جریان سیال و پیش‌بینی نرخ تولید اهمیت دارد؛ زیرا پیوستگی یا ناپیوستگی واحدهای جریانی مستقیماً بر مسیرهای جریان و رژیم‌های فشار اثر می‌گذارد. در مقابل، الگوریتم‌های آماری مانند جنکس که بر اساس توزیع عددی داده‌ها عمل می‌کنند، قادر نیستند اتصال گلوگاه‌ها، اثر رخساره‌ها یا نقش فرآیندهای دیاژنزی را در رفتار جریانی به‌طور کامل منعکس کنند. بنابراین، اگرچه این روش می‌تواند به‌عنوان ابزار کمکی برای شناسایی الگوهای کلی یا کاهش تعداد کلاس‌ها مورد استفاده قرار گیرد، اما برای مدل‌سازی مخزن و تفکیک واحدهای جریان اصلی به‌تنهایی کفایت نمی‌کند. طبقه‌بندی‌های صرفاً آماری ممکن است واحدهایی ایجاد کنند که از نظر جریان سیال درون مخزن با یکدیگر ارتباط فیزیکی نداشته باشند و این موضوع در مراحل پیش‌بینی تولید یا طراحی برنامه‌های بهره‌برداری می‌تواند منجر به خطا شود. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که استفاده از روش‌های مبتنی بر شاخص‌های پتروفیزیکی به‌ویژه در مخازن کربناته ناهمگن مانند سازند کنگان برای تعیین واحدهای جریانی و مدل‌سازی رفتار مخزن از دقت و قابلیت اعتماد بیشتری برخوردار است، در حالی که روش‌هایی مانند جنکس می‌توانند در مراحل مقدماتی و به‌عنوان ابزار تکمیلی مورد استفاده قرار گیرند.

۶-نتیجه‌گیری

بررسی داده‌های تخلخل و تراوایی سازند کنگان نشان داد که ناهمگنی قابل توجهی در کیفیت مخزنی این سازند وجود دارد و رابطه میان این دو پارامتر به‌صورت ساده و خطی قابل توضیح نیست. مقایسه سه رویکرد تعیین گونه‌های سنگی شامل روش وینلند، شاخص منطقه جریان و الگوریتم آماری جنکس بیانگر آن است که هر روش بر اساس منطق خود بخشی از این

ناهمگنی را توضیح می‌دهد. روش وینلند توانست بر پایه شعاع گلوگاه منفذی، جدایش روشنی بین سنگ‌های با کیفیت پایین و بالا ایجاد کند و در کلاس‌های با کیفیت بهتر، همبستگی قوی‌تری میان تخلخل و تراوایی نشان داد (با ضریب تعیین ۰/۷۹ در کلاس خوب). روش شاخص منطقه جریان نیز با بهره‌گیری از ترکیب مستقیم تخلخل و تراوایی، دسته‌بندی متوازن‌تری ارائه کرد و در کلاس‌های بسیار متراکم و خوب، ارتباط منظم‌تری بین این دو پارامتر به‌دست داد (به ترتیب با ضرایب تعیین ۰/۸۱ و ۰/۴۹). در مقابل، روش جنکس در حالت تک‌متغیره عملکرد ضعیف‌تری داشت (با حداکثر ضریب تعیین ۰/۱۳)، اما با به‌کارگیری شاخص ترکیبی لگاریتم تراوایی بر تخلخل توانست تا حدودی نتایج بهتری ایجاد کند (با حداکثر ضریب تعیین ۰.۵۷).

نتایج این مطالعه نشان داد که روش‌های مبتنی بر شاخص‌های پتروفیزیکی فیزیکی-تجربی مانند وینلند و شاخص منطقه جریان در توضیح رفتار تخلخل-تراوایی و گونه‌بندی سنگی کارایی بیشتری دارند. با این حال، استفاده از روش‌های آماری عمومی نظیر جنکس می‌تواند به‌عنوان ابزاری مکمل در کنار این روش‌ها مفید باشد، به‌ویژه زمانی که هدف بررسی توزیع داده‌ها یا تعریف شاخص‌های ترکیبی جدید است. این یافته‌ها اهمیت انتخاب روش مناسب و استفاده از رویکردهای ترکیبی را در تحلیل ناهمگنی مخازن کربناته برجسته می‌سازد.

در این پژوهش، الگوریتم جنکس برای دسته‌بندی داده‌های پتروفیزیکی سازند کنگان بر روی قطر گلوگاه و شاخص منطقه جریان به‌کار گرفته شد. نتایج نشان داد که این روش توانایی محدودی در بهبود همبستگی بین تخلخل و تراوایی دارد و مقادیر ضریب تعیین به‌طور محسوسی پایین‌تر از روش‌های متداول وینلند و شاخص منطقه جریان با مرزهای استاندارد بود. روش‌های وینلند و شاخص منطقه جریان به‌ترتیب با متوسط ضرایب تعیین ۰/۷ و ۰/۵۳ عملکرد بهتری در توصیف رابطه تخلخل-تراوایی نشان دادند. در مقایسه، روش جنکس بر پایه این دو شاخص، با متوسط ضرایب تعیین پایین‌تر ۰/۶۴ و ۰/۲۷ را ارائه کرد که بیانگر دقت و کارایی کمتر آن در تبیین رفتار مخزنی سازند کنگان است. دلیل اصلی این عملکرد ضعیف آن است که جنکس صرفاً بر اساس الگوهای آماری و تراکم داده‌ها مرزبندی می‌کند، در حالی که شاخص‌های پتروفیزیکی ماهیتاً حاصل روابط غیرخطی میان تخلخل و تراوایی هستند و بخش مهمی از ناهمگنی را از قبل در خود دارند. از سوی دیگر، ناهمگنی‌های شدید ناشی از فرایندهای دیاژنزی در مخازن کربناته موجب می‌شود که توزیع این شاخص‌ها پیوسته و بدون مرزهای مشخص باشد و الگوریتم آماری جنکس نتواند دسته‌بندی‌هایی منطبق بر رفتار هیدرودینامیکی سنگ ایجاد کند. به‌طور کلی، بهره‌گیری از رویکردهای ترکیبی مبتنی بر روش‌های تجربی و آماری می‌تواند به بهبود تحلیل داده‌های پتروفیزیکی و افزایش دقت در ارزیابی ناهمگنی مخازن کربناته منجر شود.

مراجع

Abdolmaleki, J., Tavakoli, V., Asadi-Eskandar, A., 2016. Sedimentological and diagenetic controls on reservoir properties in the Permian–Triassic successions of Western Persian Gulf, Southern Iran. Journal of Petroleum Science and Engineering 141, 90–113. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.01.020

Ahr, W.M., 2008. Geology of carbonate reservoirs: The identification, description, and characterization of hydrocarbon reservoirs in carbonate rocks. John Wiley and Sons. p. 296. https://doi.org/10.1002/9780470370650

Amaefule, J.O., Altunbay, M., 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. SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Paper SPE-26436. https://doi.org/10.2118/26436-MS

Brewer, C.A., Pickle, L., 2002. Evaluation of methods for classifying epidemiological data on choropleth maps in series. Annals of the Association of American Geographers 92(4), 662–681. https://doi.org/10.1111/1467-8306.00310

Daneshvar, M.R.M., Mansouri-Daneshvar, P., Moussavi-Harami, R. et al., 2023. A new insight into the evolution of the Qatar Arch to recognize faults and a new gas field. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology 13, 2157–2170. https://doi.org/10.1007/s13202-023-01674-7

Eftekhari, S.H., Memariani, M., Maleki, Z., Aleali, M., Kianoush, P., 2024. Hydraulic flow unit and rock types of the Asmari Formation, an application of flow zone index and fuzzy C-means clustering methods. Scientific reports 14(1), 5003. https://doi.org/10.1038/s41598-024-55741-y

Esrafili-Dizaji, B., Rahimpour-Bonab, H., 2009. Effects of depositional and diagenetic characteristics on carbonate reservoir quality: A case study from the South Pars gas field, Persian Gulf. Petroleum Geoscience 15(4), 325–344. https://doi.org/10.1144/1354-079309-817

Falahatkhah, O., Kadkhodaie, A., Ciabeghodsi, A.A., Li, M., 2021. Cyclostratigraphy of the Lower Triassic Kangan Formation in the Salman gas field, eastern Persian Gulf, Iran. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 561, 110045. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.110045

Haghighat, N., Hashemi, H., Tavakoli, V., Nestell, G.P., 2020. Permian–Triassic extinction pattern revealed by foraminifers and geochemical records in the central Persian Gulf, southern Iran. Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology 543, 109588. https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2020.109588

Homaie, M., Mahboubi, A., Hartmann, D.J., Kadkhodaie, A., Moussavi Harami, R., 2024. Flow unit classification and characterization with emphasis on the clustering methods: a case study in a highly heterogeneous carbonate reservoir, eastern margin of Dezful Embayment, SW Iran. Journal of Petroleum Exploration and Production Technology 14, 2703–2734. https://doi.org/10.1007/s13202-024-01847-y

Insalaco, E., Virgone, A., Courme, B., Gaillot, J., Kamali, M.R., 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(2), 75–176. https://doi.org/10.2113/geoarabia110275

Jafarian, A., Javanbakht, M., Koeshidayatullah, A., Pimentel, N., Hersi, O.S., Yahyaei, A., Beigi, M., 2017. Paleoenvironmental, diagenetic, and eustatic controls on the Permo–Triassic carbonate–evaporite reservoir quality, Upper Dalan and Kangan formations, Lavan Gas Field, Zagros Basin. Geological Journal 53(4), 1442–1457. https://doi.org/10.1002/gj.2965

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

Kaveh-Ahangar, S., Nozaem, R., Tavakoli, V., 2023. The effects of planar structures on reservoir quality of Triassic Kangan formation in the central Persian Gulf, an integrated approach. Journal of African Earth Sciences 197, 104764. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104764

Konyuhov, A.I., Maleki, B., 2006. The Persian Gulf Basin: Geological history, sedimentary formations, and petroleum potential. Lithology and Mineral Resources 41, 344-361. https://doi.org/10.1134/S0024490206040055

Krivoshchekov, S., Kochnev, A., Kozyrev, N., Botalov, A., Kochneva, O., Ozhgibesov, E., 2023. Rock Typing Approaches for Effective Complex Carbonate Reservoir Characterization. Energies 16(18), 6559. https://doi.org/10.3390/en16186559

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. p. 336. https://doi.org/10.1007/978-3-540-72742-2

Mohammadi, M., Kadkhodaie, A., Rahimpour-Bonab, H., Kadkhodaie, R., Aleali, M., 2024. Sequence stratigraphy, diagenesis and geological zonation of the lower Triassic carbonate reservoir of the Kangan formation from the central to Northern Persian Gulf. Carbonates and Evaporites 39(3). https://doi.org/10.1007/s13146-024-00998-7

Moore, C.H., Wade, W.J., 2013. Carbonate reservoirs: Porosity and diagenesis in a sequence stratigraphic framework (2nd ed., Vol. 67). Elsevier. p. 392.

Oliveira, G.P., Santos, M.D., Roque, W.L., 2020. Constrained clustering approaches to identify hydraulic flow units in petroleum reservoirs. Journal of Petroleum Science and Engineering 186, 106732. https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106732

Peyravi, M., Kamali, M., 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 Bulletin 76(2), 191–198. https://doi.org/10.1306/BDFF87A4-1718-11D7-8645000102C1865D

Sharland, P.R., Archer, R., Casey, D.M., Davies, R.B., Hall, S.H., Heward, A.P., Horbury, A.D. and Simmons, M.D. 2001. Arabian Plate Sequence Stratigraphy. GeoArabia Special Publication 2. Gulf Petrolink Bahrain. p. 371.

Spearing, M.C., Allen, T., McAulay, G., 2001. Review of the Winland R35 method for net pay definition and its application in low permeability sands. Abstracts SCA 2001-63, 2001 International Symposium of the Society of Core Analysts, 17-19 September.

Szabo, F., Kheradpir, A., 1978. Permian and Triassic stratigraphy, Zagros Basin, southwest Iran. Journal of Petroleum Geology 1, 57–82. https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1978.tb00611.x

Tavakoli, V., 2015. Chemostratigraphy of the Permian-Triassic Strata of the Offshore Persian Gulf, Iran. Chemostratigraphy: Concepts, Techniques, and Applications. pp. 373–393.

Tavakoli, V., 2016. Ocean chemistry revealed by mineralogical and geochemical evidence at the Permian-Triassic mass extinction, offshore the Persian Gulf, Iran. Acta Geologica Sinica 90(5), 1852–1864. https://doi.org/10.1111/1755-6724.12821