



Dolomitization controls on the development of moldic and vuggy porosity in the Permian–Triassic carbonates of the Persian Gulf

Vahid Tavakoli^{1*} and Mehdi Martami²

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

2- M.Sc. (graduated), School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article type: Original Research	Although many studies have examined the general impact of diagenesis on porosity development, the direct relationship between the morphology and size of dolomite crystals and the distribution of different pore types has received less attention. This study systematically investigates this relationship in the Upper Dalan and Kangan formations of the central Persian Gulf. The dataset includes thin-section petrography and core-derived porosity and permeability measurements from a single well. The results reveal that increasing dolomite content significantly alters the pore system. With dolomitization, vuggy porosity shows an increasing trend, while moldic porosity decreases. The highest vuggy porosity occurs in fully dolomitized samples, whereas moldic porosity is most abundant in slightly dolomitized limestones. Dolomitization enhanced reservoir quality by generating intercrystalline pores that progressively evolved into vuggy porosity. Texturally, planar dolomite crystals exhibit higher porosity and, particularly, higher permeability than nonplanar types due to their more regular crystal boundaries and better-connected pore networks. Coarse, sucrosic dolomites also show higher porosity and permeability than fine-grained dolomicrites, as larger crystal size promotes the development of wider throats and more effective flow pathways. Conversely, anhydrite cementation and late calcite precipitation have locally reduced reservoir quality by occluding pores and throats. This study demonstrates that the combined analysis of microfacies and dolomite crystal characteristics provides a powerful approach for interpreting the controls on moldic and vuggy porosity. The findings offer a useful model for evaluating similar carbonate reservoirs worldwide.
Article history: Received: 2025 December 7 Accepted: 2026 May 20	
Keywords: Upper Dalan and Kangan Formations Persian Gulf Reservoir Quality Permian–Triassic Moldic and Vuggy porosities	

DOI: 10.22084/psj.2026.31880.1485

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

Cite this article: Vahid Tavakoli and Mehdi Martami (2026). Dolomitization controls on the development of moldic and vuggy porosity in the Permian–Triassic carbonates of the Persian Gulf, *Applied Sedimentology*, Vol. 14, No. 27, pp: 150-175.



Journal of Applied Sedimentology by Bu-Ali Sina University Press is licensed under CC BY-NC 4.0
Web Site: <https://psj.basu.ac.ir> **E-mail:** nfag@basu.ac.ir

Extended Abstract

Introduction

The Permian–Triassic carbonate successions of the Persian Gulf, mainly represented by the Dalan and Kangan formations, host some of the world's most prolific hydrocarbon reservoirs. The reservoir quality of these carbonates results from a complex interplay between depositional textures and diagenetic processes that have modified the original pore system through geological time. While dolomitization has long been recognized as a key factor in enhancing reservoir potential, the specific relationship between dolomite crystal morphology, porosity type, and permeability has not been adequately quantified.

This study aims to identify and evaluate the main sedimentological and diagenetic controls governing the development of moldic and vuggy porosity in the Upper Dalan and Kangan formations in the central Persian Gulf. By combining petrographic and petrophysical analyses, the study provides new insights into how depositional microfacies, dolomite textures, and secondary diagenetic alterations collectively influence reservoir quality in these formations.

Data and Methods

This study is based on detailed petrographic and petrophysical analyses of a 402-meter core from a representative well in the central Persian Gulf. A total of 1,570 thin sections were examined under transmitted light to identify allochems, textures, and diagenetic features. Microfacies were classified according to Dunham (1962) and Flügel (2010) and assigned to twelve types (MF1–MF12), later grouped into four reservoir units (K1–K4). For petrophysical evaluation, 1,400 measurements of porosity and permeability were obtained using Boyle's law and Darcy's law. Porosity types were categorized following Choquette and Pray (1970) into intergranular, moldic, vuggy, intercrystalline, and fracture-related forms. The integration of microfacies analysis, diagenetic interpretation, and petrophysical data allowed the identification of facies–diagenesis–reservoir relationships and the reconstruction of the paragenetic sequence controlling porosity and permeability evolution within the Upper Dalan and Kangan formations.

Results and Discussion

1-Depositional Microfacies and Environment

Twelve microfacies (MF1–MF12) were identified, representing three facies belts: tidal

flats, lagoonal settings, and shoal environments. The abundance of ooid, oncoid, and peloid grainstones and packstones indicates deposition within a shallow homoclinal ramp system. The progressive transitions among facies and the lack of reefal bioconstructions further support a ramp-type carbonate platform rather than a rimmed shelf. Among the microfacies, ooid grainstones (MF10) and ooid-biocl原因 packstones (MF8) are the most significant reservoir facies, accounting for the highest porosity (15–17%) and permeability (50–90 mD). Conversely, lagoonal mud-supported facies (MF2–MF5) show poor reservoir quality due to early marine cementation and compaction.

2-Diagenetic Processes and Their Reservoir Impact

Diagenesis in the studied succession occurred in marine, meteoric, and burial environments and includes micritization, cementation, dissolution, dolomitization, anhydritization, compaction, and recrystallization.

1. Marine diagenesis introduced early rim and fibrous calcite cements that partially occluded intergranular pores in high-energy shoal facies.
2. Meteoric diagenesis promoted selective dissolution of aragonitic allochems, producing moldic and vuggy pores that significantly improved porosity and connectivity, particularly near sequence boundaries.

3. Burial diagenesis led to the formation of stylolites, anhydrite cements, and saddle dolomite, variably reducing permeability.

Dolomitization emerged as the dominant control on permeability enhancement. Two main dolomitization mechanisms were recognized: Fabric-selective replacement of micrite by non-planar dolomite in mud-supported facies, which generally reduced permeability due to fine-grained crystal mosaics.

Replacement of grains and early cements by planar and sucrosic dolomite in grain-supported facies, producing interconnected intercrystalline networks that substantially increased permeability.

Planar and euhedral dolomite crystals exhibit much higher connectivity and permeability compared to non-planar, cloudy dolomicrite textures. Quantitatively, dolomitic samples, despite having slightly lower average porosity ($\approx 12\%$) than limestones ($\approx 18\%$), show significantly higher permeability (≈ 110 mD vs. 14 mD). Anhydrite and calcite cementation are identified as the main porosity-destructive processes, particularly within the lower-energy lagoon facies and the upper part of the K4 unit.

However, limited fracturing and localized dissolution along stylolites occasionally restored some effective porosity.

3- Reservoir Unit Comparison

K4 is the most prolific, displaying the best-developed vuggy and intercrystalline porosity owing to intense dolomitization and dissolution. K2 also shows favorable reservoir quality in ooid-rich and dolomitized zones. K3 and K1 contain mostly mud-supported facies where compaction and cementation have degraded reservoir potential, although isolated dolomitized intervals provide minor permeability pathways.

4- Porosity Types

The pore system includes a combination of intergranular, moldic, vuggy, intercrystalline, and fracture-related pores. Moldic and vuggy pores dominate in limestones, whereas intercrystalline porosity is characteristic of dolomitic intervals. The coexistence of these pore types indicates a multiphase diagenetic history involving dissolution and recrystallization under variable fluid regimes.

5. The impact of dolomitization on pore evolution

Petrographic and petrophysical analyses reveal that increasing dolomite content strongly influences both the type and effectiveness of porosity. Vuggy and intercrystalline pores become dominant with progressive dolomitization, whereas moldic pores decrease. Dolomitization initially produces fine intercrystalline pores, which later coalesce into larger vugs as crystal growth and selective dissolution proceed. Planar dolomite crystals provide the most efficient pore networks, characterized by well-connected throats and higher permeability, while nonplanar dolomites—although more abundant—develop irregular and less connected pore systems. Similarly, coarse sucrosic dolomites display higher porosity and permeability than fine-grained dolomicrites due to their larger crystal size and better pore connectivity. These results indicate that both the degree and texture of dolomitization govern the evolution of moldic, vuggy, and intercrystalline porosity.

Dolomitization of planar or coarse-crystalline fabrics enhances flow capacity and reservoir performance, whereas fine nonplanar dolomites and cemented fabrics yield lower-quality reservoirs. Therefore, the integration of crystal morphology, size, and microfacies characteristics provides a robust framework for predicting porosity architecture and reservoir heterogeneity in similar Permian–Triassic carbonate systems.

Conclusions

The Upper Dalan and Kangan formations of the central Persian Gulf represent a low-angle carbonate ramp system deposited in tidal-flat, lagoon, and shoal environments. Petrographic analysis identified twelve microfacies, among which the shoal-related ooid grainstones and packstones exhibit the best reservoir quality due to their grain-supported textures and early development of intergranular pores. Diagenetic processes have exerted the main control on reservoir heterogeneity. Among them, dolomitization and dissolution significantly enhanced porosity and permeability by generating well-connected intercrystalline and vuggy pores, whereas cementation, compaction, and anhydritization reduced reservoir effectiveness. The planar and sucrosic dolomites, particularly within the high-energy facies of units K4 and K2, provide the most favorable reservoir intervals, whereas nonplanar dolomicrites and heavily cemented limestones act as flow barriers. Overall, the reservoir quality in these formations is governed by the interaction of depositional facies and diagenetic evolution. The integrated facies–diagenesis model developed in this study highlights the predictive value of dolomite crystal texture and facies type in identifying potential high-quality zones. These findings not only clarify the diagenetic controls on the Dalan and Kangan reservoirs but also offer a reliable analogue for carbonate reservoirs of similar age and setting across the Middle East.



نقش دولومیتی‌شدن در ایجاد و گسترش تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای در کربنات‌های پرمین-تریاس یکی از میدان‌های بخش مرکزی خلیج فارس

وحید توکلی^{۱*} و مهدی مرتمی^۲

۱- استاد دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانش‌آموخته کارشناسی‌ارشد، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده‌گان علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
نوع مقاله: مقاله پژوهشی تاریخچه مقاله: تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۹/۱۶ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۲/۳۰ کلیدواژه‌ها: سازندهای دالان بالایی و کنگان خلیج فارس کیفیت مخزنی پرمین-تریاس تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای	اگرچه پژوهش‌های متعددی به بررسی اثر کلی دیاژنز بر توسعه تخلخل‌ها پرداخته‌اند، به ارتباط مستقیم میان شکل و اندازه بلورهای دولومیت و گسترش تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای کمتر توجه شده است. در این مطالعه، با تمرکز بر سازندهای دالان بالایی و کنگان در بخش مرکزی خلیج فارس، این ارتباط بررسی شد. داده‌های به‌کاررفته شامل مقاطع نازک و اندازه‌گیری‌های تخلخل و تراوایی از یک چاه می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که افزایش محتوای دولومیت در نمونه‌ها، الگوی تخلخل را به‌طور چشمگیری تغییر داده است. با افزایش دولومیت، تخلخل حفره‌ای روندی افزایشی و تخلخل قالبی روندی کاهشی نشان می‌دهد. بیشترین تخلخل حفره‌ای در نمونه‌های تمام‌دولومیتی و بیشترین تخلخل قالبی در سنگ‌آهک‌های کم‌دولومیت مشاهده شد. این تغییرات بیانگر آن است که دولومیتی‌شدن، با ایجاد و توسعه منافذ بین‌بلوری و تبدیل تدریجی آن‌ها به تخلخل‌های حفره‌ای، به‌طور مؤثری موجب افزایش کیفیت مخزنی شده است. از دیدگاه بافتی، بلورهای دولومیت صفحه‌ای نسبت به دولومیت‌های غیرصفحه‌ای تخلخل و به‌ویژه تراوایی بالاتری دارند؛ زیرا مرزهای منظم بلوری و گلوگاه‌های پیوسته، شبکه جریان سیال را کارآمدتر می‌سازد. همچنین، دولومیت‌های دانه‌شکری در مقایسه با دولومیکرایت‌ها، با فراهم کردن فضاهای بین‌بلوری درشت‌تر و گلوگاه‌های بازتر، نقش مؤثرتری در بهبود تراوایی داشته‌اند. از سوی دیگر، انیدریتی‌شدن و سیمانی‌شدن با پرکردن منافذ و گلوگاه‌ها مهم‌ترین عوامل تخریب‌کننده تخلخل هستند. این پژوهش برای نخستین‌بار نشان می‌دهد که بررسی ترکیبی ریزرخساره و ویژگی‌های بلوری دولومیت می‌تواند مبنایی برای تبیین عوامل کنترل‌کننده تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای باشد. یافته‌های این تحقیق می‌تواند به‌عنوان الگویی کاربردی برای تحلیل مخازن کربناته مشابه در دیگر نقاط جهان قابل استفاده باشد.

DOI: 10.22084/psj.2026.31880.1485

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

استناد: وحید توکلی و مهدی مرتمی (۱۴۰۵). نقش دولومیتی‌شدن در ایجاد و گسترش تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای در کربنات‌های پرمین-تریاس یکی از میدان‌های بخش مرکزی خلیج فارس، رسوب‌شناسی کاربردی، دوره ۱۴، شماره ۲۷، صفحه ۱۵۰ تا ۱۷۵.

این نشریه علمی رایگان است و حق مالکیت فکری خود را براساس لایسنس کپی‌رایت‌کامنز (CC BY-NC 4.0) به نویسندگان واگذار کرده است.



آدرس وبسایت نشریه: <https://psj.basu.ac.ir> ایمیل نشریه: nfag@basu.ac.ir

۱- پیشگفتار

به دلیل حضور منابع و میدان‌های هیدروکربنی بزرگ در بخش جنوب و جنوب‌غربی کشور ایران، مطالعه و بررسی میدان‌ها و سازندها در این مناطق، موضوع بسیار مهم و قابل توجه در بسیاری از پژوهش‌های اخیر است (الشرحان و نیرن، ۱۹۹۴؛ اهرنبرگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ مورر و همکاران، ۲۰۰۹؛ رحیم‌پوربناب و همکاران، ۲۰۱۰؛ عنایتی بیدگی و همکاران، ۲۰۱۴؛ نادری خوجین و همکاران، ۲۰۲۰؛ حقیقت و همکاران، ۲۰۲۰؛ داودی و همکاران، ۲۰۲۴؛ رضوان‌نیا و همکاران، ۲۰۲۵). کربنات‌ها سهم بزرگی از مخازن هیدروکربنی خاورمیانه را تشکیل می‌دهند و کیفیت مخزنی آن‌ها حاصل برهم‌کنش پیچیده فابریک رسوبی اولیه و تاریخچه دیاژنز است. نقش فابریک اولیه در تعیین معماری منافذ و گلوگاه‌ها بر اساس چارچوب «طبقه‌بندی فابریک-پتروفیزیکی» به‌خوبی شناخته شده است و نشان می‌دهد که اندازه دانه، جورشدگی و نسبت گل/دانه کنترل اولیه بر فضای بین‌دانه‌ای دارند، در حالی که فرآیندهای دیاژنزی می‌توانند این چارچوب را اصلاح یا تخریب کنند (لوسیا، ۱۹۹۵؛ فلوگل، ۲۰۱۰). در مخازن کربناته پرمین-تریاس خلیج‌فارس (سازندهای دالان و کنگان)، تکامل تخلخل و تراوایی در مقیاس سازند تا واحدهای مخزنی به فرآیندهای دیاژنتیکی وابسته است. به عنوان مثال فرآیندهای دیاژنزی همچون میکرایتی‌شدن و سیمانی‌شدن دریایی در ناحیه کم‌عمق، انحلال جوی و نوشکلی در دفن کم‌عمق، و در نهایت فشردگی فیزیکی و شیمیایی و سیمانی‌شدن دیررس در دفن عمیق همگی تأثیرگذار می‌باشند (تاگر و رایت، ۱۹۹۰؛ مورر، ۲۰۰۱). دولومیتی‌شدن یکی از کلیدی‌ترین عوامل تغییر شبکه منفذی در کربنات‌های پرمین-تریاس خلیج‌فارس است؛ زیرا با ایجاد تخلخل بین‌بلوری و بازآرایی فضاهای خالی، می‌تواند هم کیفیت مخزنی را افزایش دهد و هم در صورت همراهی با سیمان‌های سولفات، آن را محدود کند (وارن، ۲۰۰۶؛ پیروی و همکاران، ۲۰۱۵). شکل و اندازه بلورهای دولومیت نیز تأثیر زیادی بر رفتار پتروفیزیکی مخازن دارند. دولومیت‌های صفحه‌ای نسبت به دولومیت‌های غیرصفحه‌ای مسیرهای پیوسته‌تری برای جریان سیال فراهم می‌کنند، در حالی که دولومیت‌های ریزبلور غیرصفحه‌ای معمولاً تراوایی پایین‌تری دارند (سیبلی و گرگ، ۱۹۸۷). افزون بر این، مطالعات نشان داده‌اند که نوع

منافذ (قالبی، حفره‌ای، بین‌بلورین یا شکستگی) همراه با پیوستگی گلوگاه‌ها (منافذ) عوامل تعیین‌کننده کیفیت مخزنی هستند و بدون درک همزمان فابریک و دیاژنز نمی‌توان رفتار پتروفیزیکی مخزن را بررسی کرد (لونوی، ۲۰۰۶). در سازندهای دالان و کنگان، رخداد همزمان تبخیری‌ها با کربنات‌های کم‌عمق موجب گسترش انیدریت به‌صورت نودولی و سیمانی شده است؛ عاملی که در بسیاری از میدان‌های خلیج‌فارس به‌عنوان سدهای درون‌مخزنی و عامل کاهش تراوایی شناخته می‌شود (وارن، ۲۰۰۶). همچنین، انحلال آلوم‌های آراگونیتی در آئید گرینستون‌ها می‌تواند تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای چشمگیری ایجاد کند، اما تداوم این کیفیت به سرعت سیمانی‌شدن (کلسیتی یا انیدریتی) و شدت فشردگی فیزیکی (استیلولیت‌ها) و شیمیایی (رگچه‌های انحلالی) وابسته است؛ به‌طوری‌که استیلولیت‌ها و رگچه‌های انحلالی هم می‌توانند کیفیت مخزنی را کاهش دهند و هم در برخی موارد به‌عنوان مسیر عبور سیالات و عامل افزایش تراوایی عمل کنند (مورر، ۲۰۰۱). با وجود مطالعات گسترده‌ای که در زمینه ویژگی‌های پتروفیزیکی سنگ‌آهک‌ها و دولومیت‌ها انجام شده است، هنوز دو خلأ اساسی در این حوزه وجود دارد. نخستین خلأ، عدم توانایی در کمی‌سازی همزمان سهم تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای در این سنگ‌ها است که باعث محدودیت در تحلیل دقیق ویژگی‌های ذخیره‌سازی و رفتار هیدرودینامیکی آن‌ها می‌شود. دومین خلأ، نیاز به بررسی تأثیرات شکل و اندازه بلورهای دولومیت بر پیوستگی منافذ و تغییرات انواع تخلخل در این سنگ‌ها است که تاکنون به‌طور جامع در مطالعات موجود بررسی نشده است. بر همین اساس، هدف اصلی این پژوهش، بررسی و کمی‌سازی همزمان تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای در سنگ‌های آهکی و دولومیتی است. در این پژوهش به‌ویژه به مطالعه فرآیندهای دیاژنزی نظیر دولومیتی‌شدن، انیدریتی‌شدن و انحلال، و تأثیر آن‌ها بر انواع تخلخل و ویژگی‌های پتروفیزیکی سازندهای دالان بالایی و کنگان پرداخته خواهد شد. استفاده از داده‌های پتروگرافی شامل تحلیل ریزرخساره‌ها و زیرمحیط‌های رسوبی، به‌همراه اندازه‌گیری‌های دقیق پتروفیزیکی، امکان شناسایی الگوهای توزیع تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای را فراهم می‌کند. ضرورت انجام این پژوهش در این است که تخلخل و ویژگی‌های پتروفیزیکی سنگ‌ها نقش اساسی در ارزیابی

به دو واحد K3 و K4 تقسیم شده و مرز بالایی آن با سازند کنگان به وسیله یک ناپیوستگی مشخص شده است (حیدری، ۲۰۰۸؛ رحیم پورناب و همکاران، ۲۰۰۹). سازند کنگان با سن تریاس زیرین عمدتاً از آهک و دولومیت و لایه‌های انیدریت تشکیل شده و به دو واحد مخزنی K1 و K2 تفکیک می‌شود که در بسیاری از میداین گازی حائز اهمیت است (اینسالاکو و همکاران، ۲۰۰۶). این سازند توسط انیدریت و شیل‌های سازند دشتک پوشیده شده است (شکل ۱) (رحیم پورناب و همکاران، ۲۰۰۹).

۳- داده‌ها و روش مطالعه

برای بررسی ویژگی‌های زمین‌شناسی و مخزنی سازندهای دالان بالایی و کنگان در بخش مرکزی خلیج فارس، داده‌های مغزه حاصل از حفاری یک چاه با ضخامت کل حدود ۴۰۲ متر مورد استفاده قرار گرفت. مغزه‌ها پس از آماده‌سازی و ثبت مشخصات سنگ‌شناسی، مبنای اصلی مطالعات پتروگرافی و پتروفیزیکی این پژوهش بوده‌اند. در مجموع ۱۵۷۰ مقطع نازک از پلاگ‌های برداشت‌شده از مغزه‌ها تهیه و با میکروسکوپ نوری مورد مطالعه قرار گرفت. به‌طور میانگین از هر ۳۰ سانتی‌متر از ستون مغزه یک نمونه برداشت شده است که فاصله نمونه‌برداری در بخش‌های مختلف، بسته به تغییرات بافتی و سنگ‌شناسی، بین ۷ تا ۵۹ سانتی‌متر متغیر بوده است. مقاطع نازک با هدف شناسایی آلومک‌های غیراسکلتی، نوع سیمان و بافت رسوبی، آثار دیاژنز و تخلخل، و همچنین تعیین محیط رسوبی مورد بررسی قرار گرفتند. شناسایی و دسته‌بندی ریزخساره‌ها بر اساس رده‌بندی دانام (دانام، ۱۹۶۲) و با توجه به ویژگی‌های بافتی و فسیلی انجام شد. تفسیر کمربندهای رخساره‌ای و محیط‌های رسوبی نیز بر مبنای نمودارهای ارائه شده توسط فلوگل (فلوگل، ۲۰۱۰) صورت گرفت. در ادامه، ریزرخساره‌ها بر اساس شاخص‌های رسوبی در چارچوب محیط رسوبی تفسیر شدند. برای ارزیابی ویژگی‌های پتروفیزیکی مخزن، تعداد ۱۴۰۰ داده تخلخل و تراوایی حاصل از آنالیزهای معمولی مغزه به کار گرفته شد. اندازه‌گیری تخلخل به روش تزریق گاز هلیوم و بر مبنای قانون بویل انجام شد. در این روش، حجم کل و حجم دانه‌ای نمونه تعیین و تخلخل کل از اختلاف این دو حجم محاسبه گردید. به‌منظور افزایش دقت، پیش از آزمایش، پلاگ‌ها در دمای ثابت (۷۰ درجه سانتی‌گراد) در آون خشک شدند تا

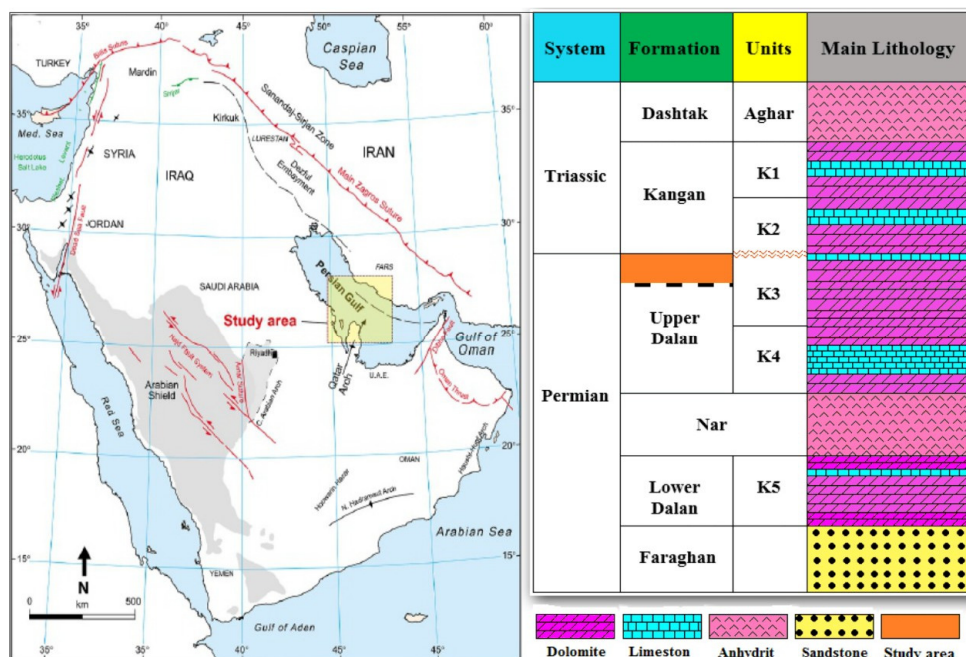
و بهره‌برداری از مخازن هیدروکربنی دارند. به‌ویژه، درک فرآیندهای دیاژنزی و تأثیر آن‌ها بر ویژگی‌های مخازن می‌تواند به بهبود مدل‌های شبیه‌سازی و استراتژی‌های بهره‌برداری از منابع طبیعی کمک شایانی کند. این پژوهش می‌تواند به بهینه‌سازی روش‌های ارزیابی و بهره‌برداری از مخازن نفتی و گازی کمک کرده و زمینه‌ساز توسعه رویکردهای پیشرفته و کارآمد در فرآیندهای مدیریت منابع زیرزمینی باشد. نتایج این مطالعه همچنین می‌تواند به ارتقاء دانش فنی و بهبود عملکرد سیستم‌های بازیافت و افزایش بهره‌وری منابع انرژی در مقیاس‌های مختلف کمک نماید.

۲- زمین‌شناسی و چینه‌نگاری

حوضه رسوبی خلیج فارس بخشی از حاشیه شرقی صفحه عربی است که از پرکامبرین پایانی تاکنون تحت تأثیر رخدادهای کششی، تغییرات اقلیمی و جابه‌جایی‌های زمین‌ساختی قرار داشته است. در اواخر پرکامبرین تبخیری‌های ضخیم سری هرمز نهشته شده‌اند و در طول پالئوزوئیک با پایداری نسبی سکوی رسوبی، لایه‌های کربناته و آواری کم‌عمق شکل گرفته‌اند (ادجل، ۱۹۹۶؛ شارلند و همکاران، ۲۰۰۱). شواهد دیرینه‌شناسی نشان می‌دهد که این ناحیه در پرمین بالایی و تریاس زیرین در کمر بند گرم و خشک استوایی- نیمه‌استوایی قرار داشته است (گلنی، ۲۰۱۰). این شرایط باعث گسترش یک سکوی وسیع اپی‌ریک در حاشیه شمالی نئوتتیس و نهشت رسوبات کربناته و تبخیری سازندهای فراقان، دالان و کنگان شد که پایه‌گذار مخازن هیدروکربنی عظیم منطقه هستند (الشرحان و نیرن، ۱۹۹۴؛ آنجولینی و همکاران، ۲۰۰۳). به طور کلی، سازندهای دالان و کنگان معادل سازند خوف در حاشیه جنوبی خلیج فارس بوده‌اند و بخشی از بزرگ‌ترین مخازن گازی جهان را تشکیل می‌دهند. تکامل زمین‌ساختی صفحه عربی و تغییرات اقلیمی گرم و خشک در پرمین و تریاس، نقش اساسی در تشکیل محیط‌های رسوبی و فرآیندهای دیاژنزی این توالی‌ها داشته و کیفیت مخزنی آن‌ها را در مقیاس ناحیه‌ای کنترل کرده است (غضبان، ۲۰۰۷). سازند دالان با سن پرمین بالایی شامل یک بخش کربناته زیرین، تبخیری میانی (نار) و کربناته بالایی است و از آهک، دولومیت و انیدریت تشکیل می‌شود (زابو و خردپیر، ۱۹۷۸؛ بردناوه، ۲۰۰۸). این سازند از نظر مخزنی

کالیبره گردید. طبقه‌بندی انواع تخلخل‌ها با تکیه بر تقسیم‌بندی چوکت و پری (چوکت و پری، ۱۹۷۰) انجام شد تا منشأ و تحول انواع فضای تخلخل از قبیل بین‌دانه‌ای، درون‌دانه‌ای، قالبی و حفره‌ای به‌طور دقیق مشخص شود. همچنین ارتباط بین نوع تخلخل و ویژگی‌های بافتی و دیاژنزی در چارچوب هر ریزرخساره بررسی گردید تا نقش فرآیندهای رسوبی و دیاژنزی در ایجاد و توسعه تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای تبیین شود.

هرگونه رطوبت یا سیال باقیمانده از بین برود. سپس ابعاد هر نمونه با کولیس دقیق اندازه‌گیری شد و حجم هندسی آن‌ها محاسبه گردید. در مرحله بعد، حجم دانه با تزریق گاز هلیوم به داخل محفظه اندازه‌گیری شد و از این طریق تخلخل مؤثر هر نمونه به‌دست آمد. مقادیر تراوایی از آزمایش‌های تزریق هوا در پلاگ‌ها و با استفاده از قانون دارسی به‌دست آمد. کلیه اندازه‌گیری‌ها در دمای اتاق و فشار اتمسفری انجام شد و دقت دستگاه‌ها به‌صورت دوره‌ای



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه (الحسینی، ۲۰۰۷) و ستون چینه‌شناسی مربوط به سازندهای دالان و کنگان (اسدالاهی شاد و همکاران، ۱۴۰۱)

Fig. 1. Geographic location of the study area (Al-Husseini, 2007) and the stratigraphic column related to the Dalan and Kangan formations (Asadolahi Shad et al., 2022)

۴- نتایج

۴-۱- ریزرخساره‌های رسوبی

مطالعات پتروگرافی و بررسی مقاطع نازک در سازندهای دالان بالایی و کنگان منجر به شناسایی ۱۲ ریزرخساره شده است (شکل ۲). ویژگی‌های مهم این ریزرخساره‌های شناسایی شده نیز مورد بررسی قرار گرفته است (جدول ۱). در منطقه مورد مطالعه بیشترین درصد فراوانی ریزرخساره‌های موجود به ترتیب مربوط به ریزرخساره‌های MF3، MF2، MF6، MF10 می‌باشد. ریزرخساره‌های MF4، MF9، MF11 به ترتیب دارای کمترین مقدار فراوانی می‌باشند (شکل ۳). میزان فراوانی و تمرکز ریزرخساره‌های شناسایی شده در سازندهای دالان و کنگان و در مقیاس

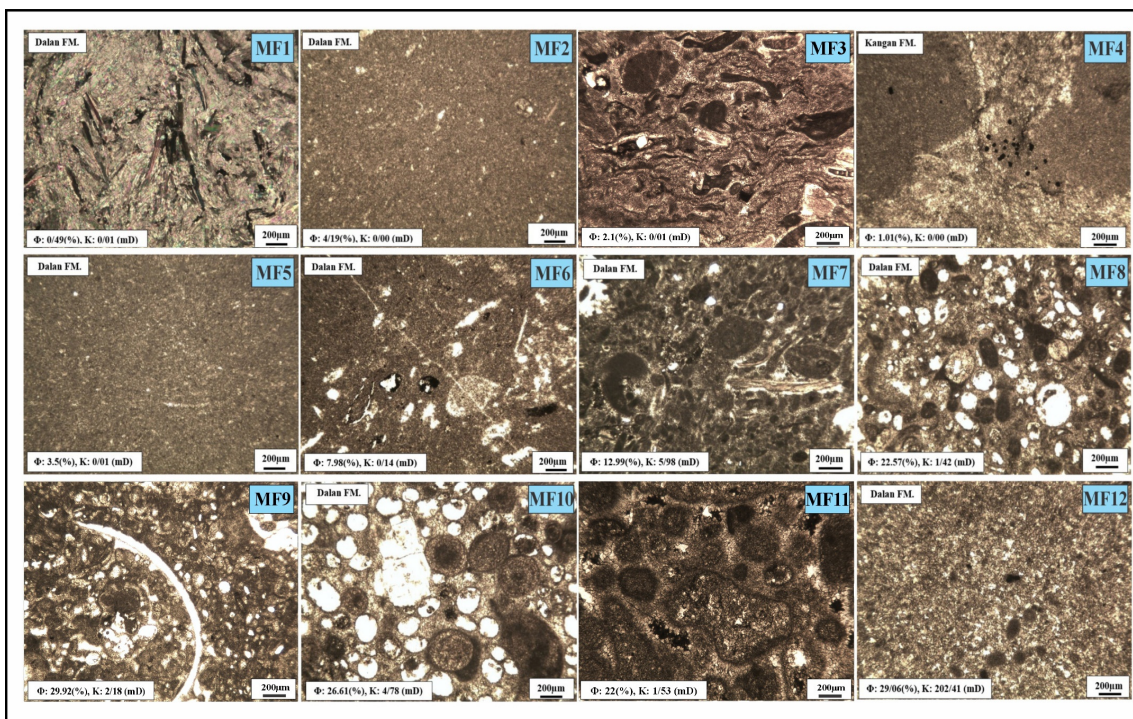
کوچک‌تر، در واحدهای مخزنی نیز محاسبه و ترسیم شده است (شکل‌های ۴ و ۵).

۴-۲- مدل محیط رسوبی

ریزرخساره‌های شناسایی شده متعلق به ۳ کمربند رخساره‌ای پهنه‌های جزرومدی، لاگون و پشته‌های سدی (شول) می‌باشند. گسترش این ریزرخساره‌ها از بخش بالایی پهنه‌های جزرومدی تا بخش‌های پرنرزی پشته‌های سدی نشان‌دهنده تشکیل رسوبات در یک محیط رمپ کریناته کم‌عمق است (شکل ۶). بررسی رخساره‌ها در منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد که رخساره‌ها به صورت تدریجی به یکدیگر تبدیل می‌شوند و نبود تغییر ناگهانی در رخساره‌ها

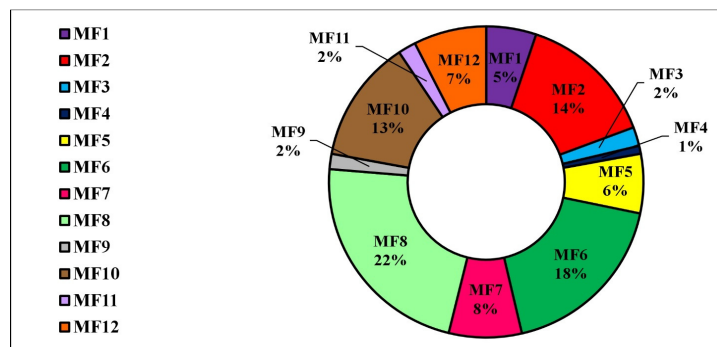
(مورر و همکاران، ۲۰۰۹؛ اهرنبرگ و همکاران، ۲۰۰۷؛ رحیمپوربناب و همکاران، ۲۰۱۰؛ رضوانیا و همکاران، ۲۰۲۵). نتایج حاصل از بررسی و محاسبه میزان درصد فراوانی حاکی از آن است که، بیشترین تمرکز ریزرخساره‌ها در محیط پهنه‌های جزرومدی بوده و این زیرمحیط بیشترین درصد را به خود اختصاص داده است (شکل ۷).

از ویژگی‌های رمپ کربناته می‌باشد. در این مطالعه رخساره‌های سدی با گسترش فراوان در هیچ یک از بخش‌های بازه مطالعاتی مشاهده نمی‌شود، زیرا وجود این رخساره مهم‌ترین دلیل گسترش شلف‌های لبه‌دار است. مطالعات پیشین گذشته نشانگر این موضوع می‌باشد که، این محیط به طور متناوب تحت شرایط تبخیری، محدودشدگی و تغییرات سطح آب دریا قرار داشته است



شکل ۲. تصاویر میکروسکوپی از ریزرخساره‌های سازند دالان بالایی و کنگان در منطقه مورد مطالعه. MF1: آنیدریت. MF2: ماسستون همراه با تبخیری. MF3: باندستون استروماتولیتی. MF4: باندستون ترومبولیتی. MF5: ماسستون فسیل دار. MF6: پلوتید بایوکلست وکستون. MF7: آنکوئید پلوتید پکستون. MF8: آئید بایوکلست پکستون. MF9: آئید بایوکلست گرینستون. MF10: آئید گرینستون. MF11: آئید اینتراکلست پکستون. MF12: کربنات بلورین.

Fig. 2. Microscopic images of microfacies of the Upper Dalan and Kangan Formations in the study area. MF1: Anhydrite. MF2: Mudstone with Evaporite. MF3: Stromatolite Boundstone. MF4: Thrombolite Boundstone. MF5: Fossiliferous Mudstone. MF6: Peloid Bioclast Wackestone. MF7: Oncoid Peloid Packstone. MF8: Ooid Bioclast Packstone. MF9: Ooid Bioclast Grainstone. MF10: Ooid Grainstone. MF11: Ooid Intraclast Packstone. MF12: Crystalline carbonate.



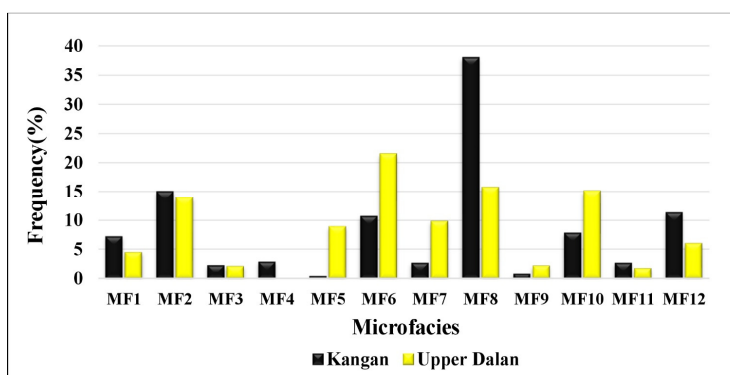
شکل ۳. نمودار فراوانی ریزرخساره‌های شناسایی شده سازندهای دالان بالایی و کنگان شده در چاه مورد مطالعه

Fig. 3. Frequency diagram of identified microfacies of the Upper Dalan and Kangan Formations in the studied well.

جدول ۱. خلاصه‌ای از ویژگی‌های ریزرخساره‌های توالی مطالعه شده سازندهای کنگان و دالان بالایی

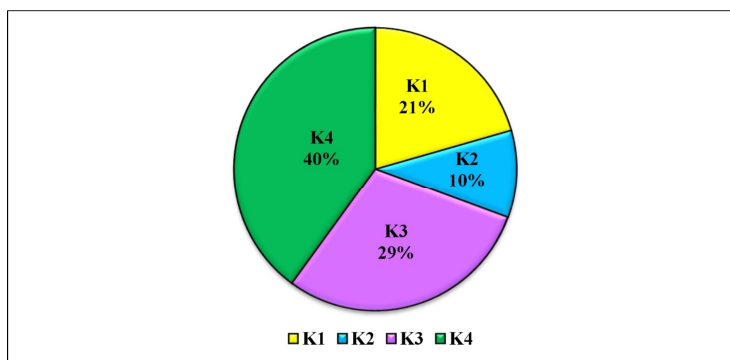
Table 1. Summary of microfacies characteristics of the studied sequences of the Kangan and Upper Dalan Formations

کد ریزرخساره	ریزرخساره	ریزرخساره استاندارد	محیط رسوبی
MF1	انیدریت	RMF 25	بالای پهنه جزرومدی (سابخا)
MF2	مادستون همراه با تبخیری	RMF 25	بالای پهنه جزرومدی (سابخا)
MF3	باندستون استروماتولیتی	RMF 23	بین جزرومدی
MF4	باندستون ترومبولیتی	RMF 23	بین جزرومدی
MF5	مادستون فسیل دار	RMF 19	لاگون
MF6	پلونید بایوکلیست و کستون	RMF 17	لاگون
MF7	آنتونید پلونید پکستون	RMF 20	لاگون
MF8	آئید بایوکلیست پکستون	RMF 30	پشته سدی رو به خشکی
MF9	آئید بایوکلیست گریستون	RMF 26	پشته سدی مرکزی
MF10	آئید گریستون	RMF 29	پشته سدی مرکزی
MF11	آئید اینتراکلیست پکستون	RMF 27	پشته سدی رو به دریا
MF12	کربنات بلورین	-	فاقد محیط



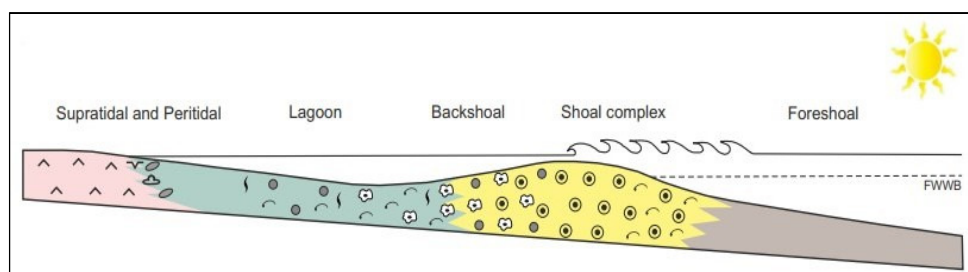
شکل ۴. نمودار فراوانی ریزرخساره‌های شناسایی شده به تفکیک در سازندهای دالان بالایی و کنگان

Fig. 4. Frequency diagram of identified microfacies separately in the Upper Dalan and Kangan Formations



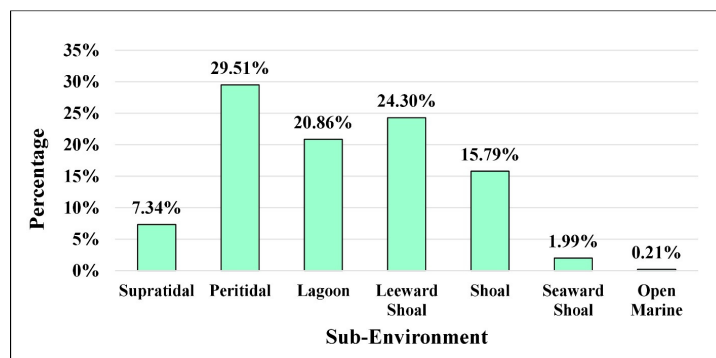
شکل ۵. نمودار فراوانی ریزرخساره‌های شناسایی شده در واحدهای مخزنی K1 تا K4

Fig. 5. Frequency diagram of identified microfacies in reservoir units K1 to K4



شکل ۶. مدل رسوبی مفهومی برای سازندهای دالان و کنگان (مهرابی و همکاران، ۲۰۱۵).

Fig. 5. Conceptual sedimentary model for the Dalan and Kangan formations (Mehrabi et al., 2015).



شکل ۷. نمودار فراوانی زیرمحیط‌های شناسایی شده

Fig. 7. Frequency chart of identified sub-environments

۳-۴- فرآیندهای دیاژنزی

فرآیندهای دیاژنزی اثرات قابل توجهی بر روی سنگ‌های کربناته دارد، به‌طوری‌که بررسی کیفیت مخزنی در واحدهای کربناته، نیازمند بررسی خصوصیات دیاژنزی می‌باشد. به دلیل شدت بالای دیاژنزی در توالی‌های کربناته دالان بالایی و کنگان این امر دارای اهمیت است. در این بخش به مطالعه فرآیندهای دیاژنزی توالی‌های رسوبی دالان بالایی و کنگان در مقاطع نازک پرداخته شده است (شکل ۸). هدف از مطالعه این فرآیندها تأثیرگذاری آن‌ها بر روی کیفیت مخزنی و ارتباط آن‌ها با کیفیت مخزنی است و همچنین پس از شناسایی فرآیندهای دیاژنزی به ویژه دولومیتی شدن، اثر این فرآیند بر روی تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای و ارتباط این فرآیند با تخلخل و تراوایی و در نهایت اثر نهایی آن بر کیفیت مخزنی مورد بررسی قرار گیرد. بررسی‌های انجام شده در سازندهای مورد مطالعه نشان می‌دهد که این توالی‌ها در هر سه محیط دیاژنزی دریایی، جوی و دفنی قرار داشته‌اند. فرآیندهای اصلی دیاژنزی در سازندهای مورد مطالعه در محیط دفن کم‌عمق یا محیط جوی رخ داده است.

۳-۴-۱- دیاژنزی دریایی

رسوبات پس از نهشته شدن در معرض سیالات دریایی قرار می‌گیرند و دیاژنزی دریایی نخستین مرحله از عملکرد فرآیندهای دیاژنزی است (لانگمن، ۱۹۸۰؛ تاکر و رایت، ۱۹۹۰؛ مور و وید، ۲۰۱۳). این مرحله شرایط رسوبی عادی در قسمت کم عمق یک سیستم رمپ کربناته را نشان می‌دهد. دیاژنزی دریایی در شرایط فوق‌اشباع از نمک در مکان‌های خشکی بر روی سکوه‌های کربناته رخ می‌دهد (رحیم‌پوریناب و همکاران، ۲۰۱۰). معمولاً دیاژنزی دریایی و

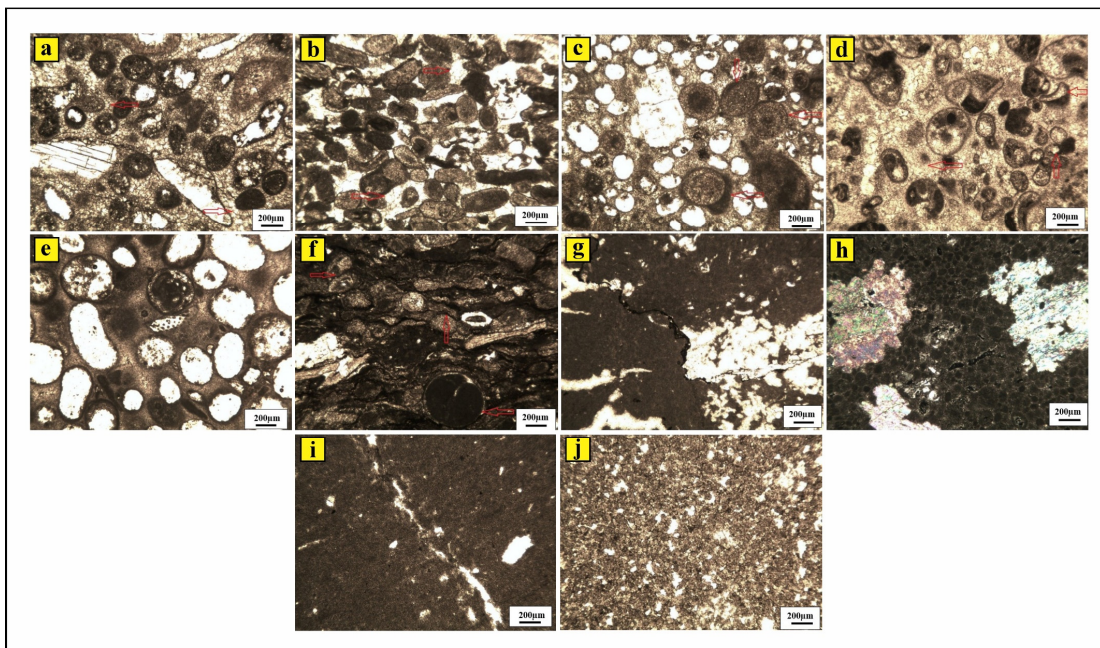
هم‌زمان با رسوب‌گذاری با میکرایتی شدن دانه‌ها نمایان می‌شود. مهم‌ترین اثرات دیاژنزی اولیه دریایی در سازندهای مورد مطالعه، سیمانی شدن دریایی و میکرایتی شدن است. پوشش میکرایتی در بسیاری از دانه‌ها آشکار است، همچنین رسوب سیمان‌های کلسیتی دریایی، سیمان‌های انیدریتی و نودول‌های انیدریت، دولومیتی شدن اولیه، فشردگی اولیه، برشی شدن، ترک‌های گلی و زیست‌آشفستگی از دیگر اثراتی هستند که در منطقه مطالعاتی مشاهده می‌شوند.

سیمان حاشیه‌ای هم‌ضخامت: سیمان‌های هم‌ضخامت به عنوان اولین نسل سیمان‌های کربناته شناخته می‌شوند که هم‌زمان یا پس از رسوب‌گذاری تشکیل می‌شوند. این سیمان‌ها معمولاً به شکل بلورهای ریز و ظریف، اطراف دانه‌ها را در بر می‌گیرند و بیشتر در حفرات بین‌دانه‌ای و گاهی درون‌دانه‌ای به‌عنوان پرکننده تخلخل دیده می‌شوند. سیمان‌های هم‌ضخامت در توالی مورد مطالعه به صورت سوزنی و تیغه‌ای مشاهده می‌شوند و به ویژه در رخساره‌های دانه‌پشتیبان و پرانرژی مانند پشته‌های سدی تشکیل می‌شوند. این سیمان‌ها در برخی رخساره‌ها مانند آئیدگرینستونی و دولومیتی به‌طور گسترده دیده می‌شوند. بیشترین فراوانی سیمان هم‌ضخامت در واحد مخزنی K4 است، و در واحدهای K1، K2 و K3 نیز به فراوانی در رخساره‌های خاصی مشاهده می‌شود (شکل ۹).

سیمان کلسیت تیغه‌ای: سیمان‌های کلسیت پرمینیم و آراگونیتی از رایج‌ترین سیمان‌های فریاتیک دریایی هستند که گاهی در محیط‌های هواده دریایی و در منطقه اختلاط آب دریا و آب شیرین تشکیل می‌شوند. این سیمان‌ها به‌ویژه در حاشیه ذرات سازنده رخساره‌های گرینستون اوئیدی و پکستون بایوکلستی درشت‌دانه مشاهده

میکرایتی‌شدن: در منطقه مورد مطالعه، میکرایتی‌شدن بیشترین تأثیر را بر روی واحد مخزنی K4 داشته و در رخساره‌های MF10 و MF8 بیشترین فراوانی را نشان می‌دهد. در واحدهای مخزنی K3 و K2 نیز میکرایتی‌شدن به مقدار کمتری در رخساره‌های خاص دیده می‌شود، و در واحد K1 نیز در رخساره‌های MF8 و MF10 به فراوانی مشاهده می‌گردد (شکل ۹).

می‌شوند. سیمان کلسیت تیغه‌ای در توالی‌های مورد مطالعه به مقدار کمی دیده می‌شود و بیشترین فراوانی آن در واحد مخزنی K4 در رخساره MF10 است. در واحد مخزنی K3 سیمان کلسیت تیغه‌ای مشاهده نمی‌شود و در واحدهای K1 و K2 به مقدار کم در رخساره‌های MF8 و MF10 دیده می‌شود (شکل ۹).



شکل ۸. تصاویر مربوط به فرآیندهای دیاژنزی مطالعه شده در مقاطع نازک است. (a) سیمان کلسیتی حاشیه‌ای هم‌ ضخامت، (b) سیمان کلسیتی بلوکی، (c) میکرایتی‌شدن، (d) نوشکلی‌شدن، (e) انحلال، (f) فشردگی فیزیکی، (g) فشردگی شیمیایی (استیلولیت)، (h) سیمان انیدریتی، (i) دولومیت‌های غیر صفحه‌ای، (j) دولومیت‌های صفحه‌ای، تمامی مقاطع در نور طبیعی مطالعه شده است.

Fig. 8. Images related to the diagenetic processes studied in thin sections. a) Isopachous rim calcite cement b) Blocky calcite cement c) Micritization d) Neomorphism e) Dissolution f) Physical compaction g) Chemical compaction (Stylolite) h) Anhydrite cement i) Non-planar dolomites j) Planar dolomites. All images are in PPL light.

در رخساره MF6 مشاهده می‌شود، و در سایر واحدها به‌طور محدود در رخساره‌های خاصی دیده می‌شود (شکل ۹).

برشی‌شدن: سنگ‌های کربناته تحت تأثیر فرآیندهای مخربی قرار می‌گیرند که منجر به بازشدن و پر شدن شکاف‌ها، حفره‌ها و رگه‌ها، و تشکیل برش‌های آهکی می‌شود. این برش‌ها معمولاً از قطعات سنگ‌آهک یا دولومیت تشکیل شده و در زمینه‌ای از ماتریس ریزدانه یا سیمان قرار دارند. در منطقه مورد مطالعه، این پدیده دیاژنزی گسترش محدودی دارد و بیشتر در رخساره‌های گل‌پشتیبان و محیط‌های اطراف پهنه‌های جزرومدی و

زیست‌آشفستگی: زیست‌آشفستگی به به‌هم‌ریختن رسوبات توسط موجودات زنده و تغییرات فیزیکی در رسوبات گفته می‌شود که تأثیر زیادی بر ترکیب رسوبات و پتانسیل مخزنی دارد. این فرآیند موجب ایجاد ناهمگنی در تخلخل و تراوایی رسوبات شده و مسیرهای مهاجرت سیالات و گازها را کنترل می‌کند. در منطقه مورد مطالعه، زیست‌آشفستگی بیشتر در رخساره‌های گل‌پشتیبان، بایوکلسیت و مادستون در محیط‌های لاگون و پهنه‌های جزرومدی مشاهده می‌شود. این فرآیند در سازند دالان‌بالایی (پرمین) بیشتر از سازند کنگان (تریاس) است. در واحدهای مخزنی، زیست‌آشفستگی بیشتر در واحد K4

گل‌پشتیبان دیده می‌شود و در برخی بخش‌ها اثر آن به صورت تبلور نسبی و دگرسانی ذرات میکرایتی آراگونیتی مشاهده می‌شود. بیشترین فراوانی این فرآیند در واحد مخزنی K3 در رخساره‌های MF6 و MF7 است و در واحدهای K4 و K1 نیز در رخساره‌های خاصی مشاهده می‌شود. در واحد مخزنی K2، فرآیند نوشکلی کمتر رایج است و بیشتر در رخساره‌های MF8 و MF4 دیده می‌شود (شکل ۹).

انحلال: فرآیند انحلال یکی از فرآیندهای اصلی دیاژنز در توالی‌های کربناته دالان بالایی و کنگان است و نقش کلیدی در تولید کیفیت مخزنی دارد. این فرآیند به‌ویژه در تولید تخلخل، به‌ویژه در آئید گرینستون، تأثیر زیادی دارد. انحلال جوی مهم‌ترین فرآیند دیاژنزی برای تولید تخلخل است و در سنگ‌آهک‌ها به دلیل انحلال کلسیت، تخلخل قالبی ایجاد می‌شود. در منطقه مورد مطالعه، این فرآیند در توالی‌های کربناته به دو صورت انتخاب‌کننده فابریک و تخریب‌کننده فابریک مشاهده می‌شود. انحلال اولیه جوی باعث تشکیل فضاهای قالبی و حفره‌ای می‌شود و در مرحله ثانویه دفنی، تخلخل درون‌دانه‌ای افزایش می‌یابد. فرآیند انحلال در واحد مخزنی K4 بیشترین تأثیر را داشته و در رخساره‌های MF10 و MF8 مشاهده می‌شود. در واحدهای K3، K2 و K1 نیز در رخساره‌های خاصی این فرآیند به‌شدت دیده می‌شود (شکل ۹).

۴-۳-۳- دیاژنز دفنی

نوشکلی دولومیت، فشردگی فیزیکی و شیمیایی، سیمانی شدن (انیدریت و کلسیت)، شکستگی و رسوب دولومیت زین‌اسبی از فرآیندهای دیاژنز تدفینی بوده که واحدهای مخزنی را در توالی‌های دالان بالایی و کنگان تحت تأثیر قرار می‌دهند. فشردگی فیزیکی و شیمیایی در این مرحله رخ می‌دهد. تماس مژرس و محدب مقعر بین دانه‌ها، شکستگی و دانه‌های تغییر جهت یافته از نشانه‌های فشردگی فیزیکی هستند. فشردگی شیمیایی از تشکیل استیلولیت و رگچه‌های انحلالی مشخص می‌شود. رگچه‌های انحلالی ناشی از کم‌بودن سیمان‌های دریایی بوده و در رخساره‌های گل‌پشتیبان مشاهده می‌شوند. سطوح استیلولیت به دلیل انباشت مواد نامحلول در سطح خود سبب کاهش کیفیت مخزنی می‌شوند؛ ولی در برخی موارد استیلولیت‌ها به صورت مجاری عبور سیال عمل کرده و

لاگون مشاهده می‌شود. برشی‌شدن در منطقه از فراوانی کمی برخوردار است، بیشترین فراوانی آن در واحد مخزنی K3 در رخساره‌های MF2 و MF6 است. در واحد مخزنی K4 نیز در رخساره‌های مشابه این فرآیند دیده می‌شود و در واحدهای K1 و K2 به‌طور محدودتر مشاهده می‌گردد (شکل ۹).

۴-۳-۲- دیاژنز جوی

بر اثر بیرون‌زدگی کربنات‌های دریایی و قرارگیری آن‌ها در محیط قاره‌ای دارای اقلیم مرطوب، شرایط ایجاد فرآیندهای دیاژنز جوی فراهم می‌شود. اگر اقلیم مربوطه خشک باشد محیط تبخیری می‌تواند ایجاد گردد. از ویژگی‌های پتروگرافی شاخص منطقه دیاژنز جوی می‌توان به سیمان کلسیت‌اسپاری هم‌بعد، سیمان کلسیت محیط غیراشباع، منافذ انحلالی درون‌دانه‌ای و بین‌دانه‌ای، حفره‌های بزرگ شده انحلالی و سیمان‌های آویزه‌ای اندک، اشاره کرد. سیمان حاشیه‌ای بر روی برخی از دانه‌ها به صورت کلسیت هم‌بعد رشد کرده است. اندازه این سیمان‌ها در حد چند ده میکرون می‌باشد. این سیمان‌ها شاخص خوبی برای تشخیص محیط دیاژنزی جوی می‌باشند.

سیمان بلوکی: سیمان بلوکی در مرحله دیاژنز جوی و تدفینی تشکیل می‌شود و معمولاً از کلسیت پرمینیزیم یا کم‌مینیزیم تشکیل می‌یابد. این سیمان‌ها در منافذ رسوبات رسوب کرده و دارای بلورهای درشت و رخ‌های مشخص هستند. در منطقه مورد مطالعه، سیمان بلوکی بیشتر در رخساره‌های ترومبولیتی مشاهده می‌شود که حفرات ناشی از انحلال بایوکلست‌ها را پر کرده است. همچنین در رخساره‌های آئید گرینستونی و بایوکلستی این سیمان‌ها در نزدیکی سیمان‌های سوزنی و تیغه‌ای دیده می‌شوند. سیمان بلوکی باعث کاهش کیفیت مخزنی با پرکردن فضاهای خالی می‌شود. بیشترین فراوانی این سیمان در واحد مخزنی K4 است، و در واحدهای K3، K2 و K1 نیز به فراوانی در رخساره‌های خاصی مشاهده می‌شود (شکل ۹).

نوشکلی: فرآیند نوشکلی شامل جاننشینی و تبلور مجدد است که در مراحل اولیه دیاژنز جوی و مراحل تأخیری دفن عمیق در دولومیت‌ها و سنگ‌آهک‌ها ایجاد می‌شود. این فرآیند باعث تبدیل میکرایت به میکرواسپارایت می‌شود و در برخی موارد ممکن است کیفیت مخزنی را کاهش دهد. در منطقه مطالعاتی، فرآیند نوشکلی بیشتر در رخساره‌های

سبب افزایش کیفیت مخزنی می‌گردند (تاکر و رایت، ۱۹۹۰؛ تاکر، ۲۰۰۱؛ ساتلر و همکاران، ۲۰۰۴؛ اهرنبرگ و همکاران، ۲۰۰۷).

فشردگی فیزیکی: تماس‌های مضرس و محدب مقعر بین دانه‌ها، شکستگی و تغییر جهت دانه‌ها، از نشانه‌های فشردگی فیزیکی هستند که به‌ویژه در درزه‌های انحلالی و تماس‌های دندانه‌ای بین دانه‌ها مشاهده می‌شود. فشردگی فیزیکی معمولاً تخلخل را در گرینستون‌های آئیدی کاهش می‌دهد و باعث ایجاد فابریک‌های به هم فشرده می‌شود. با این حال، در برخی موارد، فشردگی فیزیکی در رخساره‌های گرینستونی با شکستن قالب‌های آئید و اتصال آن‌ها به یکدیگر، موجب افزایش تراوایی و بهبود کیفیت مخزنی می‌شود. در منطقه مورد مطالعه، بیشترین فراوانی این فرایند در واحد مخزنی K4 در رخساره‌های MF8 و MF6 مشاهده می‌شود. در واحدهای مخزنی K3 و K1 نیز این فرایند به‌طور متغیر در رخساره‌های خاصی دیده می‌شود. در واحد مخزنی K2 نیز این فرایند بیشتر در رخساره‌های MF8 و MF12 مشاهده می‌شود (شکل ۹).

فشردگی شیمیایی: استیلولیت‌ها که معمولاً موازی با سطوح لایه‌ها هستند، تأثیر فشار روباره را نشان داده و می‌توانند جریان سیال را در سازندهای دالان و کنگان محدود کرده و کیفیت مخزنی را کاهش دهند. این فرایندها به دلیل اختلاف انحلال نسبی ذرات سازنده سنگ در طول افزایش فشار رخ می‌دهند و بیانگر دیاژنز دفنی در عمق متوسط تا عمیق هستند. در منطقه مورد مطالعه، استیلولیت‌ها بیشتر در رخساره‌های گل‌پشتیان دیده می‌شوند. این فرایند در واحد مخزنی K1 و K3 فراوان‌تر است و در واحدهای مخزنی K4 و K2 در رخساره‌های خاصی مشاهده می‌شود. درزه‌های انحلالی نیز در واحد مخزنی K3 گسترش بیشتری دارند و در رخساره‌های مختلفی در واحدهای مخزنی K1، K2 و K4 مشاهده می‌شوند (شکل ۹).

دولومیتی‌شدن: دولومیتی‌شدن یک فرایند شیمیایی و کانی‌شناسی است که در آن کربنات کلسیم (کلسیت) کم‌منیزیم و پرمینیزیم و آراگونیت) به کربنات منیزیم-کلسیم (دولومیت) تبدیل می‌شود. دولومیت‌ها به دو گروه اولیه و ثانویه تقسیم می‌شوند، که نوع ثانویه آن در طی دفن کم‌عمق تا عمیق تشکیل می‌شود. در منطقه مورد مطالعه، دولومیتی‌شدن به‌ویژه در واحد مخزنی K4 با شدت

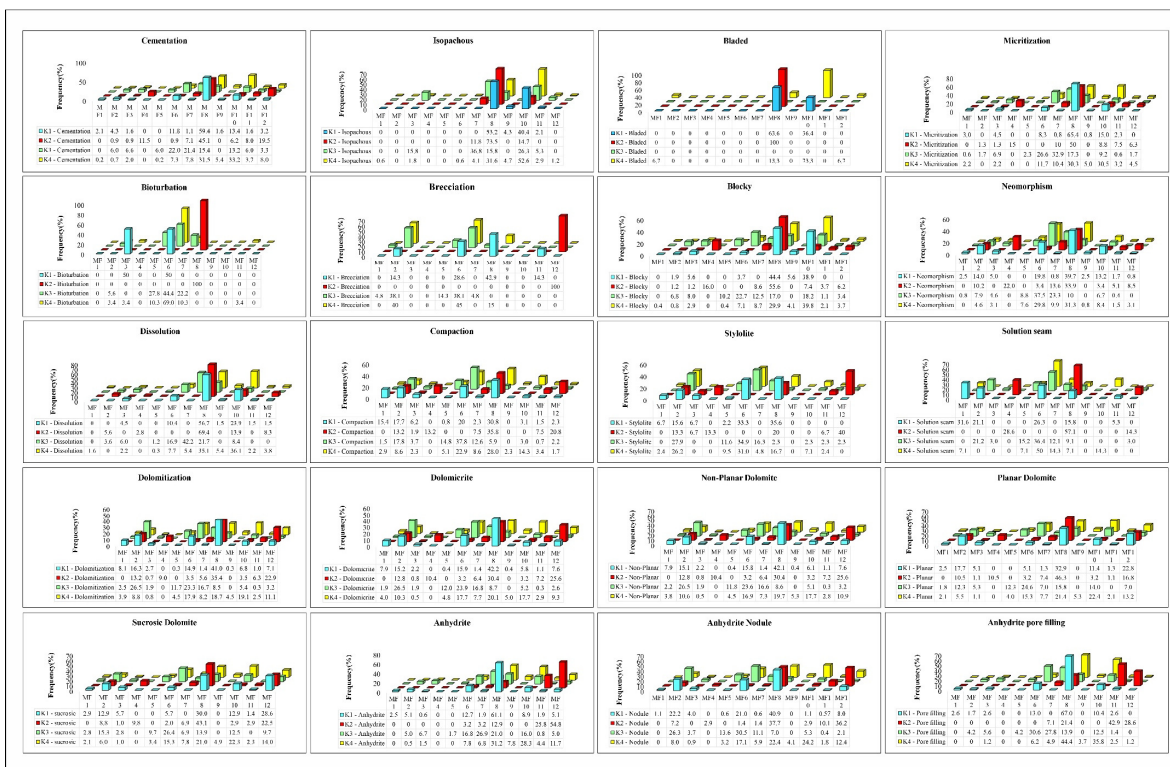
بالا مشاهده می‌شود، و رخساره‌های MF10، MF8 و MF6 بیشترین مقدار دولومیتی‌شدن را نشان می‌دهند. این فرایند در واحد مخزنی K3 در رخساره‌های MF2 و MF6 و در واحد مخزنی K2 در رخساره‌های MF8 و MF12 نیز به فراوانی دیده می‌شود. در واحد مخزنی K1، دولومیتی‌شدن بیشتر در رخساره‌های MF2، MF8 و MF6 مشاهده می‌شود (شکل ۹). در این مطالعه دولومیت‌ها بر اساس اندازه به ریزبلور و دانه‌شکری و براساس شکل به دولومیت‌های غیرصفحه‌ای و صفحه‌ای تقسیم شدند (سیبلی و گرگ، ۱۹۸۷). با توجه به تمرکز این مطالعه بر نقش دولومیت‌ها بر گسترش انواع تخلخل، به صورت گسترده‌تر مورد بررسی قرار می‌گیرند.

دولومیت ریزبلور: دولومیت ریزبلور به‌عنوان نخستین محصول فرایند دولومیتی‌شدن، عمدتاً در محیط‌های بالای پهنه جزرومدی و در ارتباط نزدیک با رخساره‌های بین جزرومدی تشکیل شده است. این دولومیت‌ها با بلورهای بسیار ریز، بافت غیرمسطح و حفظ نسبی فابریک رسوبی اولیه مشخص می‌شوند که بیانگر دولومیتی‌شدن زودهنگام در شرایط کم‌عمق و تبخیری است. چنین ویژگی‌هایی به‌طور گسترده در توالی‌های پرمین-تریاس خلیج فارس، به‌ویژه در محدوده مورد مطالعه، مشاهده می‌شوند. در منطقه مطالعه، نودول‌های انیدریت و گاهی ژپیس، نشان‌دهنده اثر شورابه‌ها و سیالات تبخیری در پهنه بالای جزرومدی است. این دولومیت‌ها به‌عنوان مادرستون‌های دولومیتی متراکم در توالی‌های مورد مطالعه مشاهده می‌شوند. بیشترین فراوانی در واحد مخزنی K4 است و در رخساره‌های MF6، MF8 و MF10 در این واحد به فراوانی دیده می‌شود. در واحدهای مخزنی K3، K2 و K1 نیز این دولومیت‌ها در رخساره‌های خاصی مشاهده می‌شوند (شکل ۹).

دولومیت دانه‌شکری: دولومیت دانه‌شکری از بلورهای خودشکل که اندازه آن‌ها بین ۲۰ تا ۱۲۰ میکرون است، تشکیل شده‌اند (وارن، ۲۰۰۰). دولومیت دانه‌شکری دارای مرکز ابری و لبه‌های شفاف می‌باشد (شیچنگ و همکاران، ۲۰۲۰). در منطقه مورد مطالعه این نوع دولومیت‌ها به صورت خودشکل بوده و در رخساره‌های دانه غالب مشاهده می‌شوند. بلورهای شکل‌دار و دانه متوسط دولومیت شبکه بین بلورین متصلی را به وجود می‌آورند که می‌تواند تخلخل بین‌بلوری را در بافت سنگ افزایش دهد و موجب افزایش

دولومیت در واحد مخزنی K2 بیشترین فراوانی را در رخساره‌های MF8 و MF12 دارد. دولومیت دانه شکری در واحد مخزنی K3 در رخساره‌های MF2 و MF6 و در واحد مخزنی K1 در رخساره‌های MF8 و MF12 مشاهده می‌شود (شکل ۹).

کیفیت مخزنی شوند. این نوع دولومیت‌ها از نوع جانشینی بوده و بافت اولیه قبل از دولومیتی شدن در آن‌ها به راحتی قابل مشاهده نیست. دولومیت دانه شکری بیشترین فراوانی را در واحد مخزنی K4 دارد. در این واحد در رخساره‌های MF10، MF8 و MF6 به فراوانی مشاهده می‌شود. این نوع



شکل ۹. توزیع انواع فرآیندهای دیاژنزی در هر رخساره در واحدهای مخزنی K1 تا K4 سازندهای مورد مطالعه

Fig. 9. The distribution of various diagenetic processes in each microfacies within the reservoir units K1 to K4 of the studied formations.

دولومیت صفحه‌ای: دولومیت‌های صفحه‌ای نیمه‌شکل دار تا خودشکل عمدتاً رخساره‌های پشته‌های سدی و گرینستونی را تحت تأثیر قرار داده‌اند. این دولومیت‌ها اغلب به صورت جانشینی انتخاب‌کننده آلوکیم‌ها ظاهر شده و با افزایش اندازه بلور، شکل منظم و توسعه سیستم‌های منفذی یکنواخت همراه هستند. دولومیت‌های صفحه‌ای خودشکل، در مقایسه با انواع نیمه‌شکل‌دار، تراوایی بالاتری نشان می‌دهند که به یکنواختی شبکه منفذی و تبلور مجدد مؤثرتر آن‌ها نسبت داده می‌شود. این تغییرات بافتی و رخساره‌ای، بیانگر تشکیل دیرتر دولومیت‌های صفحه‌ای نسبت به دولومیت‌های ریزبلور اولیه است. این دولومیت‌ها بیشتر در رخساره‌های پشته‌های سدی و گرینستونی مشاهده شدند. بیشترین فراوانی دولومیت‌های صفحه‌ای در

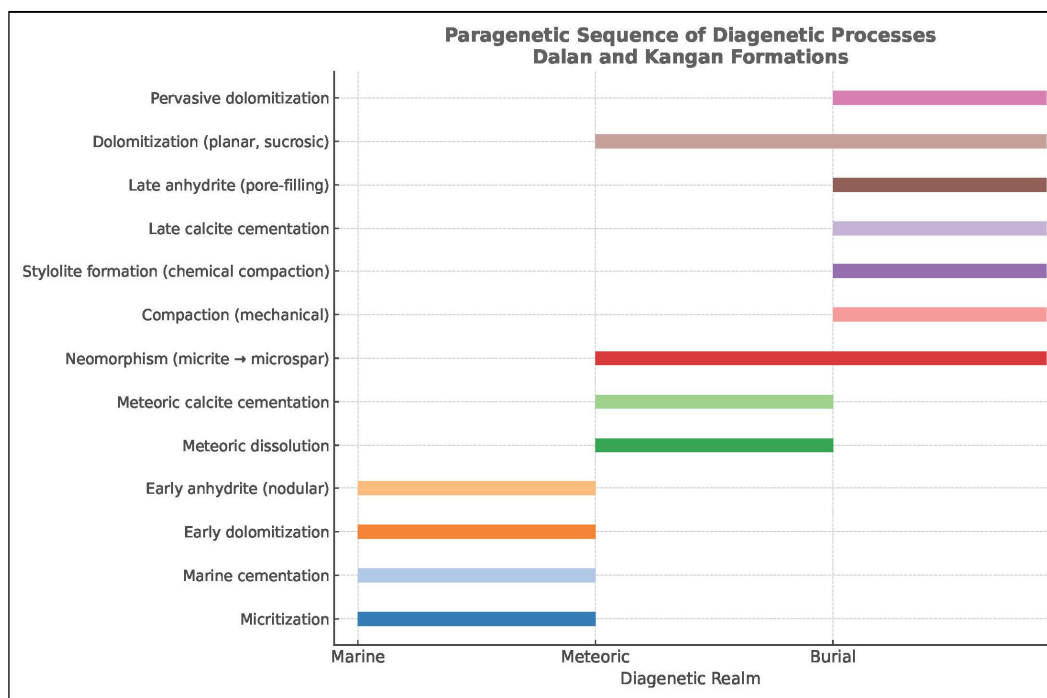
دولومیت غیر صفحه‌ای: دولومیت‌های غیر صفحه‌ای که از نوع جانشینی در مراحل اولیه هستند، معمولاً دارای تخلخل کم، دانه‌های بی‌شکل و مرزهای بلوری نامشخص می‌باشند. این دولومیت‌ها معمولاً اذخال‌ها و ظاهری کثیف دارند و خاموشی موجی را نشان می‌دهند. مرزهای بلورهای دولومیت به طور معمول انحنا دار، دنداندار و کم‌انی است. در منطقه مطالعه، این دولومیت‌ها بیشتر در محیط‌های جزرومدی، پشته‌های سدی و لاگون مشاهده می‌شوند، و پراکندگی آن‌ها در رخساره‌های گل‌پشتیان بیشتر است. بیشترین فراوانی دولومیت غیر صفحه‌ای در واحد مخزنی K4 است که در رخساره‌های MF8، MF10، MF6 و MF2 مشاهده می‌شود. واحد مخزنی K2 کمترین فراوانی را از این دولومیت‌ها دارد و بیشتر در رخساره‌های MF8 و MF12 مشاهده می‌شود (شکل ۹).

انیدریت پرکننده حفرات: بیشتر در رخساره‌های دانه‌پشتیان پشته‌های سدی و در سنگ‌های دولومیتی و آهکی دیده می‌شود. این سیمان در واحد مخزنی K1 و در رخساره‌های MF8 و MF6 بیشترین گسترش را دارد. در واحد مخزنی K4 نیز این سیمان در رخساره‌های MF8 و MF10 و در واحد K3 در رخساره‌های MF7 و MF6 فراوان‌تر است (شکل ۹).

در نهایت، الگوی آغاز و پایان فرایندهای دیاژنزی در هر محیط (توالی پاراژنزی) در سازندهای دالان‌بالایی و کنگان در منطقه مورد مطالعه، ارائه شد (شکل ۱۰).

واحد مخزنی K4 است، در حالی که واحد مخزنی K3 کمترین فراوانی را دارد (شکل ۹).

انیدریت نودولی: انیدریتی‌شدن اولیه فرایندی است که به صورت نودول‌های انیدریت در رسوبات با کانی‌شناسی انیدریت و ژئپس دیده می‌شود. این نودول‌ها معمولاً به شکل کروی، بیضی یا عدسی و در اندازه‌های میلی‌متری تا سانتی‌متری مشاهده می‌شوند. در منطقه مورد مطالعه، نودول‌های انیدریت بیشتر در محیط‌های بالای جزرومدی، پهنه‌های جزرومدی و پشته‌های سدی یافت می‌شوند. این نوع انیدریت در واحد مخزنی K4 بیشترین گسترش را دارد، در حالی که در واحد مخزنی K2 گسترش کمتری دارد (شکل ۹).



شکل ۱۰. توالی پاراژنزی فرآیندهای دیاژنزی سازندهای دالان‌بالایی و کنگان در منطقه مورد مطالعه. رنگ‌ها برای تفکیک بهتر متفاوت هستند.

Fig. 10. The paragenetic sequence of diagenetic processes in the Upper Dalan and Kangan formations in the studied area. The colors are different for better view.

تراوایی بالا می‌باشد. رخساره‌های دانه‌پشتیان معمولاً کیفیت مخزنی بالاتری نسبت به رخساره‌های گل‌پشتیان دارند، میانگین تخلخل و تراوایی برای هریک از ریزرخساره‌های شناسایی شده در جدول ۳ اندازه‌گیری و ثبت شده است. تغییرات سنگ‌شناسی از سنگ‌آهک به دولومیت و انیدریت، تأثیر زیادی بر تخلخل و تراوایی دارد. در رخساره‌های گرینستونی، انحلال شدید فابریک‌های اولیه

۴-۴- تخلخل و تراوایی

میزان تخلخل و تراوایی در این سازندها در منطقه مورد مطالعه بسیار متغیر است. مقدار تخلخل از نزدیک به صفر تا ۳۸ درصد و تراوایی از صفر تا ۳۸۰۰ میلی‌داری در تغییر است. توصیفات آماری داده‌های تخلخل و تراوایی در هر چهار واحد مخزنی در جدول ۲ محاسبه و بررسی شده است. در بخش‌های آهکی تخلخل بالا و در بخش‌های دولومیتی

شبکه‌ای یکپارچه‌تری از منافذ را ایجاد کرده‌اند که سبب افزایش میزان تراوایی در آن می‌شود. در مقابل، در واحد مخزنی K4 با وجود میانگین درصد تخلخل بالاتر، به دلیل وقوع فرآیندهای سیمانی شدن، به‌ویژه سیمان انیدریتی، و نبود پیوستگی مؤثر میان تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای، عملکرد شبکه منفذی محدود شده و در نتیجه میزان میانگین تراوایی این واحد به‌طور در مقایسه با واحد مخزنی K3 کمتر بوده است.

را از بین برده است و کیفیت مخزنی را افزایش می‌دهد. همچنین، رخساره‌های دولومیتی شده نزدیک به خشکی، به دلیل دولومیتی شدن بیش از حد، تخلخل پایین‌تری دارند، اما با دور شدن از منشأ شورابه، تخلخل بهبود می‌یابد. قابل ذکر است که علت تراوایی بالاتر در واحد مخزنی K3 این است که هرچند میزان میانگین درصد تخلخل در این واحد نسبت به واحد مخزنی K4 کمتر است، اما تخلخل‌های موجود در آن به واسطه ارتباط مؤثر و پیوسته با یکدیگر،

جدول ۲. میانگین تخلخل - تراوایی، کمترین و بیشترین مقدار تخلخل - تراوایی و ضریب هم‌بستگی در هر واحد مخزنی

Table 1. Average porosity-permeability, minimum and maximum porosity-permeability values and coefficient of determination in each reservoir unit

واحد‌های مخزنی	میانگین تخلخل (درصد)	میانگین تراوایی (میلی داری)	حداقل		حداکثر		ضریب همبستگی
			تراوایی	تخلخل	تراوایی	تخلخل	
K1	۵/۹۴	۳۰/۷۴	۰	۰/۰۲	۳۸/۹۰	۱۹۴۰/۵۱	۰/۱۲
K2	۹/۹۶	۱۶/۴۹	۰	۰/۶۲	۲۹/۵۷	۳۵۷/۵۲	۰/۲۶
K3	۶/۶۷	۶۳/۱۴	۰	۰/۱۶	۳۵/۱۶	۳۸۲۷/۸۷	۰/۱۹
K4	۱۴/۳۶	۳۵/۱۳	۰	۰/۰۹	۳۴/۹۱	۱۹۶۰/۷۰	۰/۰۳

جدول ۳. میانگین تخلخل - تراوایی ریزرخساره‌های شناسایی شده سازندهای دالان بالایی و کنگان در منطقه مورد مطالعه

Table 2. Average porosity-permeability of identified microfacies of the Upper Dalan and Kangan formations in the study area

کد ریزرخساره	تخلخل (درصد)	تراوایی (میلی داری)
MF1	۱/۹۷	۷/۱۳
MF2	۶/۶۰	۴/۶۰
MF3	۷/۳۸	۵/۹۳
MF4	بسیار ناچیز	بسیار ناچیز
MF5	بسیار ناچیز	بسیار ناچیز
MF6	۷/۱۹	۹/۶۹
MF7	۸/۹۹	۲۸/۲۰
MF8	۱۱/۶	۳۵/۱۶
MF9	۱۷/۴۶	۵۸/۰۱
MF10	۱۵/۴۱	۸۶/۷۰
MF11	۱۰/۲۷	۴۴/۶۱
MF12	۱۵/۳۹	۱۶۷/۳۳

۴-۵- انواع تخلخل‌ها

بررسی‌های پتروگرافی در سازندهای دالان بالایی و کنگان نشان می‌دهد که سیستم تخلخل در این سنگ‌های کربناته از ترکیب پیچیده‌ای از فضاهای اولیه و ثانویه تشکیل شده است. در مجموع، هفت نوع اصلی تخلخل در این سازندها شناسایی شد که شامل تخلخل‌های قالبی، حفره‌ای، بین‌دانه‌ای، درون‌دانه‌ای، بین‌بلورین، شکستگی و روزنه‌ای

است. بخش عمده‌ای از تخلخل‌های موجود ماهیت ثانویه و دیانزنی دارند و در اثر فرایندهایی مانند انحلال انتخابی، دولومیتی شدن و شکستگی‌ها به وجود آمده‌اند. **تخلخل قالبی:** تخلخل قالبی از مهم‌ترین و گسترده‌ترین انواع تخلخل در توالی‌های مورد مطالعه است و به‌طور مستقیم با فرایند انحلال دانه‌های ناپایدار در ارتباط است. این نوع تخلخل در نتیجه‌ی انحلال دانه‌های ائید و قطعات

دولومیت است. در مراحل اولیه دولومیتی‌شدن، منافذ بین‌بلوری به‌خوبی حفظ شده و موجب افزایش تراوایی شده‌اند؛ اما در مراحل بعدی، رشد بلورهای دولومیت موجب کاهش نسبی حجم تخلخل و کوچک‌شدن گلوگاه‌ها گردیده است. این نوع تخلخل در رخساره‌های مادستونی و گرینستونی دولومیتی بیشترین گسترش را دارد و در واحد K1 به صورت فراوان مشاهده می‌شود. در بسیاری از موارد، اتصال این نوع تخلخل با تخلخل‌های قالبی و بین‌دانه‌ای سبب بهبود قابل توجه کیفیت مخزنی شده است.

تخلخل شکستگی: تخلخل شکستگی اگرچه از نظر حجمی سهم اندکی در کل فضای حفره‌ای دارد، اما از دیدگاه تراوایی اهمیت بالایی دارد. شکستگی‌های باز و نیمه‌باز با اتصال تخلخل‌های قالبی و بین‌بلورین، مسیرهای مؤثری برای عبور سیالات ایجاد کرده‌اند. بیشتر شکستگی‌ها در مراحل مختلف دیاژنز تا حدودی با سیمان‌های کلسیتی یا انیدریتی پر شده‌اند، اما در برخی نواحی به‌ویژه در واحد K4 شکستگی‌های باز هنوز حفظ شده‌اند و در بهبود نفوذپذیری سنگ نقش مهمی دارند.

تخلخل درون‌دانه‌ای: تخلخل درون‌دانه‌ای به‌طور محدود در حفرات زیستی مانند فرامینفرها، جلبک‌ها و پوسته‌های گاستروپودها مشاهده می‌شود. این نوع تخلخل عمدتاً در رخساره‌های لاگونی و بخش‌های داخلی پشته‌های سدی وجود دارد و اغلب با سیمان‌های کلسیتی بلوکی یا انیدریتی پر شده است. سهم این نوع تخلخل در کیفیت مخزنی ناچیز است و تنها در تعداد محدودی از نمونه‌های واحد K4 دیده شده است.

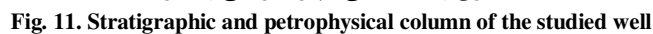
تخلخل روزنه‌ای: تخلخل روزنه‌ای بیشتر در مادستون‌های پلوئیدی و مادستون‌های دولومیتی‌شده بخش‌های جزرومدی مشاهده می‌شود. این نوع تخلخل به‌صورت حفرات میلی‌متری با شکل‌های نامنظم یا لایه‌ای در امتداد بستر تشکیل شده و غالباً در مراحل بعدی دیاژنز با سیمان‌های انیدریتی پر شده است. فراوانی آن در واحدهای مخزنی پایین بوده و تأثیر قابل‌توجهی بر ویژگی‌های پتروفیزیکی ندارد. در ادامه ستون چینه‌شناسی و پتروفیزیکی چاه مورد مطالعه برای سازندهای کنگان و دالان رسم شده است (شکل ۱۱).

زیستی ایجاد شده و در رخساره‌های دانه‌پشتیبان گرینستونی و پکستونی بیشترین گسترش را دارد. توسعه این نوع تخلخل در واحدهای مخزنی K4 و K2 بیش از سایر بخش‌ها است. در بسیاری از نمونه‌ها، تخلخل قالبی در ارتباط با منافذ بین‌بلوری یا بین‌دانه‌ای بوده و این پیوستگی موجب افزایش قابل‌توجه تراوایی شده است. بیشترین تمرکز این نوع تخلخل در رخساره‌های انیدی- بایوکلسیتی MF8 و MF10 مشاهده می‌شود که دارای انرژی بالای محیطی و بافت دانه‌پشتیبان هستند.

تخلخل حفره‌ای: این نوع تخلخل در رخساره‌های دولومیتی و آهک‌های دانه‌پشتیبان به‌ویژه در واحد K4 توسعه فراوان دارد و گاه به‌صورت حفرات درشت با ارتباط‌های موضعی بین یکدیگر دیده می‌شود. در برخی نمونه‌ها، این فضاها با سیمان‌های انیدریتی پر شده‌اند که بیانگر فعالیت دیاژنز تبخیری در مراحل بعدی است. تخلخل حفره‌ای نسبت به تخلخل قالبی گسترش بیشتری دارد و در رخساره‌های گل‌پشتیبان دولومیتی نیز مشاهده می‌شود. این نوع تخلخل سهم قابل‌توجهی در افزایش تراوایی سنگ داشته و در رخساره‌های MF6، MF8، MF12 و MF2 به‌ویژه چشمگیر است.

تخلخل بین‌دانه‌ای: تخلخل بین‌دانه‌ای از نوع تخلخل‌های اولیه است که در زمان رسوب‌گذاری شکل گرفته و در رخساره‌های دانه‌پشتیبان، میان دانه‌های انید، بیوکلاست و پلوئید توسعه دارد. در بسیاری از نمونه‌ها، حفظ این تخلخل به دلیل جورشدگی مناسب دانه‌ها و سیمانی‌شدن دیر هنگام ممکن شده است. همچنین در مواردی که فرایند دولومیتی‌شدن جزئی رخ داده، با کاهش حجم دانه‌ها و بازشدن فضاها بین‌بلوری، این نوع تخلخل گسترش یافته است. بیشترین فراوانی تخلخل بین‌دانه‌ای در رخساره‌های MF8 و MF10 در واحدهای K4 و K1 مشاهده می‌شود و در برخی نمونه‌ها مقادیر تراوایی بالای ۵۰ میلی‌داری را نشان می‌دهد.

تخلخل بین‌بلورین: تخلخل بین‌بلورین از فرآیند تبدیل سنگ‌آهک به دولومیت حاصل شده و یکی از شاخص‌ترین انواع تخلخل‌های ثانویه در سازندهای مورد مطالعه است. اندازه و گسترش این تخلخل‌ها تابع اندازه و شکل بلورهای



۵- بحث

۵-۱- تکامل مخزنی

تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای از مهم‌ترین انواع فضای تخلخل در سنگ‌های کربناته به‌شمار می‌روند که نقش چشمگیری در کیفیت مخزنی این سنگ‌ها دارند. در سازندهای دالان بالایی و کنگان، این نوع تخلخل‌ها نه تنها در نتیجه ویژگی‌های رسوبی اولیه، بلکه تحت تأثیر مجموعه‌ای از فرآیندهای دیاژنزی نظیر انحلال، سیمانی‌شدن و دولومیتی‌شدن شکل گرفته و تحول یافته‌اند. درک منشأ، گسترش، و تغییرات عمقی این تخلخل‌ها برای تفسیر رفتار مخزنی و پیش‌بینی کیفیت جریان سیال در این سازندها ضروری است. کیفیت مخزنی سازندهای دالان بالایی و کنگان در منطقه مورد مطالعه حاصل برهم‌کنش پیچیده‌ای از عوامل رسوبی، دیاژنزی و سنگ‌شناسی است. ترکیب این عوامل در مقیاس‌های مختلف موجب ایجاد تغییرات قابل‌توجهی در تخلخل و تراوایی سنگ‌ها شده است. در مقیاس ریزرخساره‌ای، ویژگی‌های رسوبی محیط‌های رسوبی نقش بنیادی در تعیین بافت، نوع تخلخل اولیه و در نهایت رفتار مخزنی دارد. رخساره‌های دانه‌پشتیبان با انرژی بالای محیطی، به‌ویژه گریستن‌ها و پکستون‌های ائیدی- بایوکلستی MF8-MF10، بهترین کیفیت مخزنی را دارا هستند. این ریزرخساره‌ها دارای بافت متخلخل و قطر گلوگاهی کارآمدی‌اند که جریان سیال را به‌خوبی منتقل می‌کند و میانگین تخلخل و تراوایی در آن‌ها بیش از ۱۵ درصد و ۵۰ میلی‌داری است. در مقابل، ریزرخساره‌های گل‌پشتیبان لاگونی و جزرومدی (MF2-MF5) که در محیط‌های کم‌انرژی نهشته شده‌اند، به دلیل غلبه میکرایت، سیمانی‌شدن زودهنگام و فشردگی، معمولاً کیفیت مخزنی پایین‌تری دارند. در بخش‌هایی از این ریزرخساره‌ها که انحلال یا دولومیتی‌شدن موضعی رخ داده، بهبود نسبی در کیفیت مخزنی دیده می‌شود. ریزرخساره‌های کربنات بلورین (MF12) نیز در صورت توسعه بافت دانه‌شکری و تخلخل بین‌بلوری پیوسته، عملکردی مشابه رخساره‌های دانه‌پشتیبان داشته‌اند، هرچند دولومیکرایت‌های ریزبلور معمولاً از تراوایی پایین‌تری برخوردارند.

از دیدگاه دیاژنزی، کیفیت مخزنی این سازندها تحت تأثیر متقابل فرآیندهای دیاژنزی سازنده و تخریب‌کننده قرار گرفته است. در میان فرآیندهای سازنده، انحلال و

دولومیتی‌شدن بیشترین نقش را در افزایش تخلخل داشته‌اند. انحلال جوی در مراحل اولیه دیاژنز سبب تشکیل تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای در ریزرخساره‌های ائیدی و بایوکلستی شده است و این نوع تخلخل‌ها عمدتاً در قاعده واحد مخزنی K2 و راس واحد مخزنی K4 گسترش دارند. فرآیند دولومیتی‌شدن در ریزرخساره‌ها از دو سازوکار اصلی تبعیت کرده است. نخست، جایگزینی انتخابی میکرایت توسط دولومیت‌های غیرصفحه‌ای در ریزرخساره‌های گل‌پشتیبان، و دوم، جایگزینی دانه‌ها و سیمان‌های اولیه توسط دولومیت‌های دانه‌شکری در ریزرخساره‌های دانه‌پشتیبان می‌باشد. نوع دوم با ایجاد شبکه‌ای پیوسته از منافذ بین‌بلوری، نقش مؤثرتری در افزایش تراوایی ایفا کرده است. در مقابل، دولومیتی‌شدن شدید و غیرصفحه‌ای در برخی ریزرخساره‌های گل‌پشتیبان، با پرکردن فضاهای خالی توسط بلورهای ریز، منجر به انسداد منافذ و افت کیفیت مخزنی شده است. در مقابل، فرآیندهای دیاژنزی تخریبی مانند سیمانی‌شدن و فشردگی بیشترین سهم را در کاهش کیفیت مخزنی دارند. سیمان‌های کلسیتی و انیدریتی در ریزرخساره‌های دانه‌پشتیبان، به‌ویژه در واحدهای K1 و K4، به‌صورت پرکننده فضای بین‌دانه‌ای عمل کرده‌اند و در برخی نمونه‌ها تخلخل مؤثر را به‌طور کامل از بین برده‌اند. فشردگی مکانیکی نیز در ریزرخساره‌های میکرایتی موجب شکستگی و تغییر شکل دانه‌ها و کاهش محسوس تخلخل اولیه شده است.

از نظر معماری منافذ، مخزن مورد مطالعه شامل مجموعه‌ای از تخلخل‌های اولیه و ثانویه است که در انواع درون‌دانه‌ای، بین‌دانه‌ای، روزنه‌ای، قالبی، بین‌بلوری، حفره‌ای و شکستگی طبقه‌بندی می‌شوند. ریزرخساره‌های دانه‌پشتیبان دارای تخلخل‌های بین‌دانه‌ای و قالبی حاصل از انحلال ائیدها و بایوکلست‌ها هستند که شبکه‌ای پیوسته از منافذ را ایجاد می‌کند. در ریزرخساره‌های دولومیتی، تخلخل بین‌بلوری غالب بوده و عامل اصلی افزایش تراوایی محسوب می‌شود. داده‌های پتروفیزیکی نشان می‌دهد که دولومیت‌ها با وجود داشتن تخلخل کمتر (میانگین ۱۲ درصد در مقایسه با ۱۸ درصد در آهک‌ها)، تراوایی بسیار بالاتری (میانگین ۱۱۰ میلی‌داری در برابر ۱۴ میلی‌داری) دارند که این موضوع اهمیت پیوستگی شبکه منفذی را در سنگ‌های دولومیتی برجسته می‌کند (فیفا و همکاران، ۲۰۲۰). تفاوت بین واحدهای چینه‌شناسی نیز مؤید نقش فرآیندهای دیاژنزی

و رخساره‌ای در کنترل کیفیت مخزنی است. واحد مخزنی K4، ضخیم‌ترین و از نظر مخزنی کارترین بخش سازند است که، بیشترین میزان تخلخل مؤثر را دارا می‌باشد. انحلال گسترده و دولومیتی شدن وسیع در این واحد مخزنی، موجب توسعه قابل توجه تخلخل‌های قالبی، حفره‌ای و بین‌بلوری شده است. در واحد مخزنی K2 نیز ریزرخساره‌های انیدیدی و دولومیتی شده نقش مهمی در ارتقای کیفیت مخزنی داشته‌اند، در حالی که در واحد مخزنی K3، با وجود غلبه ریزرخساره‌های گل‌پشتیبان، دولومیتی شدن موضعی توانسته است مسیرهای تراوایی محدودی ایجاد کند. واحد مخزنی K1 نیز در بخش‌هایی از ریزرخساره‌های دانه‌پشتیبان و دولومیتی شده، عملکرد نسبتاً مناسبی از نظر تخلخل و تراوایی نشان داده است، هرچند فشردگی و سیمانی شدن شدید در سایر قسمت‌ها موجب افت محسوس کیفیت شده است.

از دیدگاه سنگ‌شناسی، بیشترین کیفیت مخزنی در سنگ‌های دولومیتی دیده می‌شود که در آن‌ها تخلخل بین‌بلوری و حفره‌ای توسعه یافته است (شکل ۱۱). در مقابل، تخلخل قالبی بیشتر در سنگ‌آهک‌ها و سنگ‌آهک‌های دولومیتی دیده می‌شود و با بافت اولیه و ساختار دانه‌ای مرتبط است. بررسی رابطه بین میزان دولومیت و نوع تخلخل نشان می‌دهد که با افزایش درصد دولومیت، سهم تخلخل بین‌بلوری و حفره‌ای افزایش می‌یابد و در مقابل، تخلخل قالبی کاهش پیدا می‌کند. شکل و اندازه بلورهای دولومیت نیز نقش مهمی در رفتار مخزنی دارند؛ بلورهای صفحه‌ای و دانه‌شکری تراوایی را به‌طور چشمگیری افزایش می‌دهند، در حالی که دولومیت‌های ریزبلور و غیرصفحه‌ای (دولومیکرایت) سبب انسداد گلوگاه‌ها و کاهش تراوایی می‌شوند (فیضان و همکاران، ۲۰۲۳). این موضوع نشان می‌دهد که نه تنها حضور دولومیت، بلکه نوع بافت و شکل بلورها نیز در تعیین کارایی مخزنی نقش کلیدی دارد.

۵-۲- دولومیتی شدن و گسترش تخلخل

سنگ‌شناسی غالب توالی‌های مطالعه شده آهک و دولومیت است و تغییرات سهم دولومیت در بافت سنگ، الگوی تخلخل را به‌طور معناداری دگرگون کرده است. با افزایش محتوای دولومیت، تخلخل حفره‌ای افزایش می‌یابد؛ اما این افزایش یکنواخت نیست: در مقادیر پایین دولومیت، ابتدا

رشد ملایم، سپس افت کوتاه مدت، و با عبور از آستانه‌های میان‌مرتبه، جهش محسوس رخ می‌دهد تا جایی که نمونه‌های با دولومیت بسیار بالا تا تمام دولومیتی بیشترین تخلخل حفره‌ای را نشان می‌دهند (شکل ۱۲). در مقابل، تخلخل قالبی با افزایش دولومیت غالباً کاهش می‌یابد (شکل ۱۲). بیشینه آن در بافت‌های کربناته با دولومیت بسیار کم است و با جایگزینی پیشرونده دولومیت افت می‌کند. فقط در بازه‌های میانی افزایش خفیفی دیده می‌شود و در نمونه‌های تمام دولومیتی دوباره پایین می‌آید. به‌طور خلاصه، در این توالی‌ها آهک‌ها مستعد تخلخل قالبی و دولومیت‌ها مستعد تخلخل حفره‌ای و بین‌بلوری هستند؛ بدین ترتیب دولومیتی شدن در مجموع کیفیت مخزنی را ارتقا داده است. در این تکامل تخلخل، ابتدا تخلخل بین‌بلوری در جریان دولومیتی شدن ایجاد می‌گردد. در مراحل آغازین، ریزبلورهای دولومیت منافذ بین‌بلوری ریز اما پیوسته‌ای ایجاد می‌کنند (هزارخانی و توکلی، ۲۰۲۵). با تداوم دیاژنز، بزرگ شدن انتخابی بلورها و پیوند منافذ باعث بزرگ شدن گلوگاه‌ها و ادغام حفرات بین‌بلوری به تخلخل‌های حفره‌ای درشت‌تر می‌شود؛ بنابراین بخش مهمی از تخلخل حفره‌ای مشاهده شده، فرآورده تکامل تخلخل بین‌بلوری اولیه است. در مقابل، تخلخل قالبی عمدتاً از انحلال انتخابی دانه‌های ناپایدار در سنگ‌آهک‌ها (انیدید، قطعات زیستی) پدید می‌آید و در محیط‌های دانه‌پشتیبان انرژی بالا بیشتر است. در برخی موارد، سیمان انیدریتی/کلسیتی قادر است حفرات را پر کرده و از کارایی تخلخل حفره‌ای و قالبی بکاهد.

در نمونه‌ها، دولومیت غیرصفحه‌ای فراوان‌تر است، اما از منظر کارایی مخزنی، بلورهای صفحه‌ای به‌طور میانگین تخلخل و به‌ویژه تراوایی بالاتری هنگامی که با تخلخل حفره‌ای همراه هستند، نشان می‌دهند. این یعنی مرزهای صفحه‌ای، تماس بلور-بلور و گلوگاه‌های کارآمدتری می‌سازند و شبکه‌ی بین‌بلوری-حفره‌ای را مؤثرتر به هم متصل می‌کنند. در سوی دیگر، گرچه نمونه‌های غیرصفحه‌ای هم می‌توانند تخلخل قابل قبولی ایجاد کنند، اما پراکندگی اندازه و زوایای مرزی نامنظم، پیوستگی شبکه و کارایی گلوگاه‌ها را محدود کرده و تراوایی را به‌طور مشخص پایین‌تر نگه می‌دارد. این تفاوت در توزیع تراوایی نیز دیده می‌شود. غیرصفحه‌ای‌ها در بازه‌های نفوذپذیری پایین فراوان‌تر، و صفحه‌ای‌ها در بازه‌های میانی نفوذپذیری

غالب هستند. از نظر عملکرد مخزنی، دولومیت دانه‌شکری (درشت‌بلور) معمولاً تخلخل و تراوایی بالاتری دارند؛ چه در همراهی با تخلخل حفره‌ای و چه قالبی، بزرگ‌شدن بلورها باعث افزایش اندازه فضاهای خالی و گلوگاه‌ها می‌شود. در بافت‌های گل‌پشتیبان، رشد ریزبلورها و تبدیل آنان به بلورهای بزرگ‌تر، پیوستگی مسیرهای جریانی را بهبود می‌دهد (تان و همکاران، ۲۰۲۳).

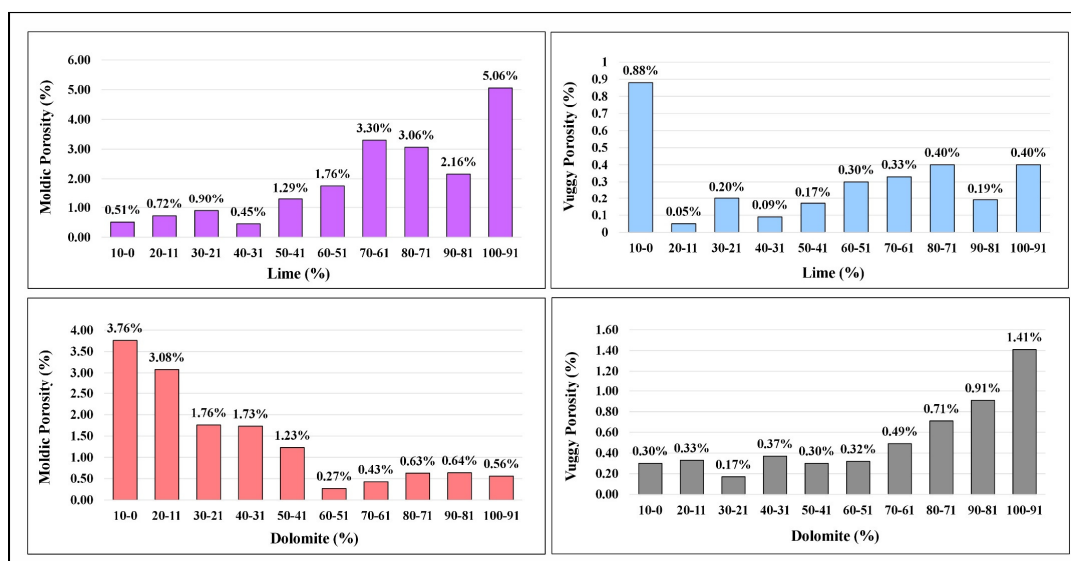
به این ترتیب، الگوی مشاهده‌شده نشان می‌دهد که نوع و میزان دولومیتی‌شدن نه تنها توزیع نسبی تخلخل‌های قالبی/حفره‌ای/بین‌بلوری را کنترل می‌کند، بلکه از طریق شکل و اندازه بلورهای دولومیت، پیوستگی شبکه منافذ و کارایی گلوگاه‌ها را تعیین کرده و در نهایت کیفیت مخزنی ریزرخساره‌ها را باز تعریف می‌کند. نتیجه کاربردی برای مدل‌سازی مخزن آن است که در واحدهایی با دولومیت صفحه‌ای و/یا دانه‌شکری و حضور تخلخل حفره‌ای-بین‌بلوری، انتظار تراوایی بالاتر و رفتار جریانی کارتر می‌رود؛ درحالی‌که ریزبلورهای غیرصفحه‌ای و قالب‌های منفصل در سنگ‌آهک‌ها بیشتر به تخلخل غیرمفید یا مفید همراه با غیرمفید می‌انجامند. تخلخل‌های قالبی، حفره‌ای و بین‌بلوری از مهم‌ترین انواع فضای تخلخل در سنگ‌های کربناته هستند و نقش قابل‌توجهی در کیفیت مخزنی سازندهای دالان بالایی و کنگان دارند. این تخلخل‌ها نه تنها نتیجه ویژگی‌های رسوبی اولیه‌اند، بلکه تحت تأثیر فرآیندهای دیاژنزی متنوعی نظیر انحلال، سیمانی‌شدن و دولومیتی‌شدن شکل گرفته و تحول یافته‌اند. درک منشأ، گسترش و تغییرات عمقی این تخلخل‌ها برای پیش‌بینی رفتار مخزنی و جریان سیال در این سازندها ضروری است. کیفیت مخزنی سازندهای مورد مطالعه، محصول برهم‌کنش پیچیده‌ای از عوامل رسوبی، دیاژنزی و ویژگی‌های سنگ‌شناسی است. در مقیاس ریزرخساره‌ای، ویژگی‌های رسوبی محیط‌های انرژی بالا، به‌ویژه رخساره‌های دانه‌پشتیبان مانند گریستون‌ها و پکستون‌های آئیدی-بایوکستی (MF8-MF10)، با بافت متخلخل و قطر گلوگاهی مناسب، میانگین تخلخل بیش از ۱۵ درصد و تراوایی بیش از ۵۰ میلی‌داری دارند و کیفیت مخزنی بالایی ارائه می‌کنند. در مقابل، ریزرخساره‌های گل‌پشتیبان لاگونی و جزرومدی (MF2-MF5) که در محیط‌های کم‌انرژی نهشته شده‌اند، به دلیل غلبه میکرایت، سیمانی‌شدن زودهنگام و فشردگی، معمولاً کیفیت مخزنی

پایین‌تری دارند، اگرچه انحلال و دولومیتی‌شدن موضعی می‌تواند بهبود نسبی ایجاد کند. ریزرخساره‌های کربنات بلورین (MF12) نیز در صورت توسعه بافت دانه‌شکری و تخلخل بین‌بلوری پیوسته عملکردی مشابه رخساره‌های دانه‌پشتیبان دارند، هرچند دولومیکرایت‌های ریزبلور معمولاً تراوایی پایین‌تری دارند. فرآیندهای دیاژنزی سازنده و تخریب‌کننده، نقش تعیین‌کننده‌ای در کیفیت مخزنی دارند. انحلال و دولومیتی‌شدن اصلی‌ترین فرآیندهای سازنده هستند: انحلال جوی اولیه موجب تشکیل تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای در ریزرخساره‌های آئیدی و بایوکستی می‌شود و این تخلخل‌ها عمده‌تاً در قاعده واحد مخزنی K2 و راس واحد K4 گسترده‌اند. دولومیتی‌شدن از دو مسیر رخ داده است: جایگزینی انتخابی میکرایت توسط دولومیت‌های غیرصفحه‌ای در ریزرخساره‌های گل‌پشتیبان و جایگزینی دانه‌ها و سیمان‌های اولیه توسط دولومیت‌های دانه‌شکری در ریزرخساره‌های دانه‌پشتیبان. نوع دوم، با ایجاد شبکه پیوسته‌ای از منافذ بین‌بلوری، نقش مؤثرتری در افزایش تراوایی دارد. در مقابل، دولومیتی‌شدن شدید و غیرصفحه‌ای در برخی ریزرخساره‌های گل‌پشتیبان، با پر کردن منافذ توسط بلورهای ریز، موجب کاهش کیفیت مخزنی می‌شود. فرآیندهای تخریبی مانند سیمانی‌شدن (کلسیتی و انیدریتی) و فشردگی نیز بیشترین تأثیر را در کاهش کیفیت دارند. از منظر معماری منافذ، مخزن شامل مجموعه‌ای از تخلخل‌های اولیه و ثانویه در انواع درون‌دانه‌ای، بین‌دانه‌ای، روزنه‌ای، قالبی، بین‌بلوری، حفره‌ای و شکستگی است. ریزرخساره‌های دانه‌پشتیبان دارای تخلخل‌های بین‌دانه‌ای و قالبی حاصل از انحلال آئیدها و بایوکست‌ها هستند که شبکه‌ای پیوسته ایجاد می‌کند. در ریزرخساره‌های دولومیتی، تخلخل بین‌بلوری غالب است و عامل اصلی افزایش تراوایی محسوب می‌شود. داده‌های پتروفیزیکی نشان می‌دهند که هرچند میانگین تخلخل دولومیت‌ها (۱۲ درصد) کمتر از آهک‌ها (۱۸ درصد) است، تراوایی بسیار بالاتر (۱۱۰ میلی‌داری در برابر ۱۴ میلی‌داری) دارند، که اهمیت پیوستگی شبکه منافذ را برجسته می‌کند (ژنگ و همکاران، ۲۰۲۴).

واحدهای چینه‌شناسی نیز نقش مهمی دارند: واحد K4 با ضخامت و کیفیت مخزنی بالا، بیشترین تخلخل مؤثر را دارد که ناشی از انحلال گسترده و دولومیتی‌شدن وسیع است و تخلخل‌های قالبی، حفره‌ای و بین‌بلوری توسعه یافته‌اند.

سنگ آهک‌ها ایجاد می‌شود و در محیط‌های دانه‌پشتیبان انرژی بالا بیشتر است. سیمان انیدریتی یا کلسیتی می‌تواند بخشی از حفرات را پر کرده و کارایی تخلخل حفره‌ای و قالبی را کاهش دهد. نوع بلورهای دولومیت نیز نقش کلیدی دارد: بلورهای صفحه‌ای و دانه‌شکری تراوایی بالاتری دارند و شبکه بین‌بلوری - حفره‌ای را به‌خوبی متصل می‌کنند، در حالی که دولومیت‌های ریزبلور و غیرصفحه‌ای (دولومیکرایت) انسداد گلوگاه‌ها ایجاد کرده و تراوایی را کاهش می‌دهند. تفاوت در توزیع تراوایی نیز مشهود است: غیرصفحه‌ای‌ها در بازه‌های نفوذپذیری پایین و صفحه‌ای‌ها در بازه‌های میانی غالب‌اند. دولومیت دانه‌شکری معمولاً با حضور تخلخل حفره‌ای یا قالبی، بیشترین تخلخل و تراوایی را دارد. در بافت‌های گل‌پشتیبان، رشد ریزبلورها و تبدیل آن‌ها به بلورهای بزرگ‌تر، پیوستگی مسیرهای جریان را بهبود می‌دهد. در نهایت، نوع و میزان دولومیتی شدن نه تنها توزیع نسبی تخلخل‌های قالبی، حفره‌ای و بین‌بلوری را کنترل می‌کند، بلکه از طریق شکل و اندازه بلورها، پیوستگی شبکه منافذ و کارایی گلوگاه‌ها کیفیت مخزنی ریزخساره‌ها را بازتعریف می‌کند. بنابراین، واحدهایی با دولومیت صفحه‌ای و/یا دانه‌شکری و حضور تخلخل حفره‌ای - بین‌بلوری، انتظار تراوایی بالاتر و عملکرد جریان مؤثرتر دارند، در حالی که ریزبلورهای غیرصفحه‌ای و قالب‌های منفصل در سنگ آهک‌ها بیشتر به تخلخل غیرمفید یا مخلوط می‌انجامند.

واحد K2 نیز با ریزخساره‌های ائیدی و دولومیتی‌شده کیفیت مناسبی ارائه می‌دهد، در حالی که واحد K3، با غلبه ریزخساره‌های گل‌پشتیبان، تنها مسیرهای تراوایی محدودی دارد و واحد K1 در بخش‌هایی از ریزخساره‌های دانه‌پشتیبان و دولومیتی‌شده عملکرد نسبتاً مناسبی دارد، اما فشردگی و سیمانی شدن شدید در برخی نقاط، کیفیت را کاهش می‌دهد. سنگ‌شناسی غالب آهک و دولومیت است و تغییرات درصد دولومیت الگوی تخلخل را به‌طور معنی‌داری دگرگون می‌کند. با افزایش محتوای دولومیت، تخلخل حفره‌ای افزایش می‌یابد؛ این افزایش در مقادیر پایین ملایم، در میانه کاهش کوتاه‌مدت و پس از عبور از آستانه‌های میان‌مرتبه، جهش محسوسی دارد، تا جایی که نمونه‌های تمام‌دولومیتی بیشترین تخلخل حفره‌ای را نشان می‌دهند (شکل ۱۱). در مقابل، تخلخل قالبی با افزایش دولومیت کاهش می‌یابد، با بیشینه در بافت‌های کربناته با دولومیت کم، کاهش در بازه‌های میانی و پایین‌ترین مقدار در نمونه‌های تمام‌دولومیتی. به‌طور خلاصه، آهک‌ها مستعد تخلخل قالبی و دولومیت‌ها مستعد تخلخل بین‌بلوری و حفره‌ای هستند و دولومیتی‌شدن کیفیت مخزنی را ارتقا می‌دهد. تخلخل بین‌بلوری ابتدا در جریان دولومیتی‌شدن ایجاد می‌شود؛ ریزبلورهای دولومیت منافذ ریز اما پیوسته‌ای فراهم می‌کنند که با رشد انتخابی بلورها و ادغام منافذ، تخلخل‌های حفره‌ای درشت‌تر شکل می‌گیرند. تخلخل قالبی عمدتاً از انحلال انتخابی دانه‌های ناپایدار در



شکل ۱۲. نمودارهای مربوط به توزیع تخلخل‌های حفره‌ای و قالبی در لیتولوژی‌های سنگ آهک و دولومیت

Fig.12. Diagrams of the distribution of vuggy and moldic porosity in limestone and dolomite lithologies

و سازندها می‌تواند نتایج این نوع از مطالعات را دقیق‌تر و کلی‌تر نماید تا امکان استفاده در سایر موارد نیز میسر گردد.

۶- نتیجه‌گیری

مطالعات سنگ‌شناسی انجام‌شده بر روی مقاطع نازک با استفاده از محتوای فسیلی و ویژگی‌های بافتی اجزا منجر به شناخت ۱۲ ریزخساره رسوبی شده است. این ریزخساره‌ها از قسمت بالای پهنه جزرومدی تا بخش رو به دریای پشته‌های سدی گسترش دارند. گسترش و پراکندگی ریزخساره‌ها در توالی‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که گروه ریزخساره‌های پشته‌های سدی بیشترین فراوانی را در منطقه مورد مطالعه دارند. در هر دو سازند دالان‌بالایی و کنگان گروه‌های ریزخساره‌های پشته‌های سدی و پهنه‌های جزرومدی بیشترین فراوانی را دارند. نتایج مطالعات ریزخساره‌های نشان می‌دهد که محیط رسوبی سازندهای مورد مطالعه یک رمپ کربناته کم شیب می‌باشد. تغییرات تدریجی در ریزخساره‌ها، نبود موجودات ریف‌ساز، حضور ریزخساره‌های انیدی فراوان ولی با گسترش کم و نزدیکی سازندهای مورد مطالعه به مرز انقراض پرمین - تریاس همگی نشان دهنده سکوی کربناته رمپ هستند. بر اساس مطالعات کانی‌شناسی و نوع سیمان‌ها مشخص شد که سازندهای دالان‌بالایی و کنگان تحت تأثیر هر سه محیط دیاژنزی دریایی، جوی و دفنی قرار گرفته‌اند. فرایندهای دیاژنزی دولومیتی‌شدن، انحلال، سیمانی‌شدن و انیدریتی‌شدن بیشترین اثر را بر روی کیفیت مخزنی داشته‌اند. فرایندهای میکراتیتی‌شدن و فشردگی (فیزیکی، شیمیایی) تأثیر کمتری بر روی کیفیت مخزنی داشتند. نوشکلی، زیست‌آشفستگی، برشی‌شدن و ترک‌های گلی از دیگر فرایندهای دیاژنزی شناخته شده هستند که فراوانی اندکی در توالی‌های مورد مطالعه دارند. دولومیتی‌شدن نقش مهمی در کیفیت مخزنی منطقه مورد مطالعه داشته است. این فرایند بیشترین گسترش را در بخش بالایی واحد K2 و بخش پایینی واحد K4 دارد. سنگ‌های دولومیتی مربوط به محیط پشته‌های سدی بهترین کیفیت مخزنی را نشان می‌دهند. دولومیتی‌شدن موجب تشکیل تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای فراوانی شده و کیفیت مخزنی را افزایش داده است. در نرخ پایین دولومیتی‌شدن تخلخل‌های قالبی زیادی گسترش یافته‌اند، ولی با افزایش شدت دولومیتی‌شدن، تخلخل‌های حفره‌ای

مقایسه نتایج این پژوهش با مطالعات پیشین نشان می‌دهد که کیفیت مخزنی در سنگ‌های کربناته به‌طور مشترک تحت تأثیر برهم‌کنش رخساره‌های رسوبی و فرایندهای دیاژنزی قرار دارد، اما نوع و شدت عوامل کنترل‌کننده این برهم‌کنش در مطالعات مختلف متفاوت است. در مطالعه حاضر، تکامل مخزن عمدتاً در چارچوب فرایندهای دیاژنزی متعارف شامل انحلال، سیمانی‌شدن و دولومیتی‌شدن و نیز کنترل‌های ریزخساره‌ای تبیین شده است، در حالی که در برخی مطالعات انجام‌شده بر روی سازندهای مشابه، علاوه بر این عوامل، نقش پارامترهایی مانند ریخت‌شناسی دیرینه، تغییرات سطح دریا، فعالیت‌های زمین‌ساختی و تأثیر سیالات هیدروترمال نیز به‌عنوان کنترل‌کننده‌های مهم معرفی شده‌اند (جیانگ و همکاران، ۲۰۱۸؛ دوان و همکاران، ۲۰۲۱؛ تن و همکاران، ۲۰۲۳؛ گاو و همکاران، ۲۰۲۳). با وجود این تفاوت‌ها، یک الگوی مشترک در تمامی مطالعات قابل مشاهده است؛ به‌طوری که رخساره‌های دانه‌پشتیبان پراثری به‌عنوان بهترین واحدهای مخزنی شناخته شده و تخلخل‌های بین‌دانه‌ای، بین‌بلوری و انحلالی مهم‌ترین انواع فضای منفذی محسوب می‌شوند. همچنین، نقش مثبت دولومیتی‌شدن در بهبود کیفیت مخزنی، به‌ویژه از طریق توسعه تخلخل بین‌بلوری و افزایش پیوستگی شبکه منافذ، در تمامی این پژوهش‌ها مورد تأکید قرار گرفته است. با این حال، در مطالعاتی که تأثیر سیالات هیدروترمال یا زمین‌ساخت برجسته‌تر است، الگوی توزیع تخلخل و تراوایی پیچیده‌تر بوده و ناهمگنی مخزن افزایش یافته است، در حالی که در این پژوهش، تغییرات کیفیت مخزنی بیشتر در چارچوب فرایندهای درون‌حوضه‌ای و قابل پیش‌بینی تفسیر می‌شود. در نتیجه، اگرچه مدل‌های ارائه شده در مطالعات پیشین از نظر زایشی پیچیده‌تر هستند، اما مدل مفهومی ارائه شده در این تحقیق، با تأکید بر کنترل‌های رخساره‌ای و دیاژنزی غالب، از انسجام مفهومی بالاتر و قابلیت تعمیم بیشتری برای تفسیر و پیش‌بینی رفتار مخازن کربناته مشابه برخوردار است.

ذکر این نکته ضروری است که این مطالعه تنها بر روی یک چاه و در یک میدان انجام شده است. اگرچه تعداد داده‌های این چاه برای یک تجزیه و تحلیل آماری کافی می‌باشد، استفاده از نتایج آن بر روی سایر سازندها و میدان‌ها باید با دقت کافی انجام شود و به شرایط خاص هر منطقه و سازند توجه گردد. انجام مطالعات مشابه در سایر مناطق، میدان‌ها

بسته و کم‌اثر بوده است. در مجموع، این تحقیق نشان می‌دهد که تغییرات بافتی حاصل از فرآیند دولومیتی شدن نه تنها نوع و اندازه تخلخل‌ها را کنترل می‌کند، بلکه پیوستگی شبکه منافذ و کارایی انتقال سیال را نیز تعیین کرده و در نهایت، ویژگی‌های مخزنی ریزرخساره‌ها را باز تعریف می‌کند.

References

- Al-Husseini, M. I. (2007) Iran's crude oil reserves and production, *GeoArabia*, 12: 69-94. <https://doi.org/10.2113/geoarabia120269>.
- Alsharhan, A. S., Nairn, A. E. M. (1994) The late Permian carbonates (Khuff formation) in the western Arabian Gulf: Its hydrocarbon parameters and Paleogeographic aspects, *Carbonates and evaporites*, 9: 132-142. <https://doi.org/10.1007/BF03175226>.
- Angiolini, L., Balini, M., Garzanti, E., Nicora, A., Tintori, A., Crasquin, S., Muttoni, G. (2003) Permian climate and Paleogeographic changes in Northern Gondwana: The Khuff formation of interior Oman, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 191: 269-300. [https://doi.org/10.1016/S0031-0182\(02\)00668-5](https://doi.org/10.1016/S0031-0182(02)00668-5).
- Asadolahi, S., Tavakoli, V., Rahimpour-Bonab, H. (2022) The effects of Qatar-Arc on the upper part of the K3 Reservoir Unit of the Upper Dalan Formation in the lower part of the Permian-Triassic Boundary: Comparison of two fields in the Central Persian Gulf Basin. *Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches*, 38: 59-90 (in Persian). <https://doi.org/10.22108/jssr.2022.133702.1227>.
- Bordenave, M. L. (2008) The origin of the Permian-Triassic gas accumulations in the Iranian Zagros foldbelt and contiguous offshore areas: A review of the Palaeozoic petroleum system, *Journal of petroleum geology*, 31: 3-42.
- Choquette, P. W., Pray, L. C. (1970) Geological nomenclature and classification of porosity in sedimentary carbonates, *The American association of petroleum geologists Bulletin*, 54: 207-250. <https://doi.org/10.1306/5D25C98B-16C1-11D7-8645000102C1865D>
- Davoodi, S., Asadolahi Shad, S., Tavakoli, V. (2024) A fresh look at the Lucia classification using mud- and grain-dominated reservoirs of the Persian Gulf. *Geoenergy Science and Engineering*, 232: 212437. <https://doi.org/10.1016/j.geoen.2023.212437>.
- Duan, Y., Zheng, R., Wu, X., Liu, J. (2021) Characteristics and controlling factors of dolomite reservoirs in the Permian Qixia Formation, Sichuan Basin, SW China. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 196, 107731.
- بیشتری تولید و کیفیت مخزنی بالا رفته است. در رخساره‌های گل‌پشتیبان دولومیتی شدن با اتصال تخلخل‌های حفره‌ای جداشده به هم کیفیت مخزنی را بهبود بخشیده که این امر در بافت‌های مادستونی، وکستونی و پکستون‌های گل‌پشتیبان مشاهده می‌شود. در برخی موارد در دولومیت‌هایی که در منطقه بالای جزرومدی تشکیل شده‌اند به دلیل وجود سیالات سولفاته و تشکیل سیمان‌های انیدریت، کیفیت مخزنی کاهش یافته است. تخلخل‌های حفره‌ای در هر دو رخساره گسترش یافته؛ ولی در رخساره‌های گل‌پشتیبان کمی بیشتر هستند.
- بررسی‌های سنگ‌نگاری و پتروفیزیکی نشان داد که دولومیتی شدن عامل کلیدی در کنترل نوع و گسترش تخلخل در سازندهای دالان بالایی و کنگان است. افزایش محتوای دولومیت در نمونه‌ها سبب افزایش چشمگیر تخلخل حفره‌ای و در مواردی کاهش نسبی تخلخل قالبی شده است. در سنگ‌آهک‌ها، انحلال انتخابی دانه‌های ناپایدار موجب شکل‌گیری تخلخل‌های قالبی شده، در حالی که در سنگ‌های دولومیتی، تشکیل و رشد بلورهای دولومیت با ایجاد منافذ بین‌بلوری و حفره‌ای، نقش اصلی را در بهبود کیفیت مخزنی ایفا کرده است. در نتیجه، در این سازندها تخلخل قالبی عمدتاً به سنگ‌آهک‌ها و تخلخل حفره‌ای به دولومیت‌ها تعلق دارد. تراوایی در نمونه‌های دولومیتی دارای تخلخل حفره‌ای بالا می‌باشد؛ ولی نمونه‌های دولومیتی با تخلخل قالبی، تراوایی پایین‌تری را نشان می‌دهند. بررسی نوع بلورهای دولومیت نشان داد که دولومیت‌های صفحه‌ای نسبت به دولومیت‌های غیرصفحه‌ای تراوایی بالاتری دارند، زیرا مرزهای بلوری منظم و گلوگاه‌های پیوسته‌تر باعث کارایی بیشتر شبکه جریان سیال می‌شود. دولومیت‌های غیرصفحه‌ای که در مراحل اولیه دیاژنز و در شرایط دفنی کم‌عمق تشکیل شده‌اند، اگرچه از نظر فراوانی بیشترند، اما به دلیل ساختار نامنظم، پیوستگی کمتری در مسیرهای جریانی ایجاد کرده‌اند. از نظر اندازه، دولومیت‌های دانه‌شکری نسبت به دولومیکرایت‌ها تخلخل و تراوایی بالاتری نشان می‌دهند. رشد بلورهای دولومیت از ریز به درشت موجب افزایش اندازه حفرات، بهبود پیوستگی بین منافذ و افزایش چشمگیر تراوایی شده است. در مقابل، در نمونه‌های ریزبلور، تخلخل موجود عمدتاً از نوع بین‌بلوری

- Dunham, R. J. (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W. E. (Ed.), *Classification of Carbonate Rocks: American Association of Petroleum Geologists Memoir*, 1: 108–121.
- Edgell, H. S. (1996) Salt tectonism in the Persian Gulf basin, Geological society, London, Special publications, 100: 129–151. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1996.100.01.10>
- Ehrenberg, S. N., Nadeau, P. H., Aqrabi, A. A. M. (2007) A comparison of Khuff and Arab reservoir potential through the Middle East, AAPG Bulletin, 91: 275–286. <https://doi.org/10.1306/09140606054>.
- Enayati-Bidgoli, A. H., Rahimpour-Bonab, H., Mehrabi, H. (2014) Flow unit characterization in the Permian-Triassic carbonate reservoir succession at South Pars Gas Field, offshore Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 37: 205–230. <https://doi.org/10.1111/jpg.12580>.
- Feifan, L., Xiucheng, T., Di, X., Kaibo, S., Minglong, L., Ya, Z., Haofu, Z., Yixin, D. (2023) Sedimentary Control on Diagenetic Paths of Dolomite Reservoirs in a Volcanic Setting: A Case Study of the Permian Chihhsia Formation in the Sichuan Basin China, *Sedimentary Geology*, 454: 106451.
- Flügel, E. (2010) *Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 976p.
- Gao, Z., He, S., Hu, Z., Yang, W. (2023) Hydrothermal dolomitization and its impact on reservoir quality in deeply buried carbonates: Insights from the Permian Qixia Formation, Sichuan Basin. *Geological Journal*, 58: 1452–1468. <https://doi.org/10.1002/gj.4567>.
- Ghazban, F. (2007) *Petroleum geology of the Persian Gulf*, Tehran university and National Iranian oil company, 707p.
- Glennie, K. W. (2010) Structural and stratigraphic evolution of Abu Dhabi in the context Arabia, *Arab Journal of Geosciences*, 3: 331–349. <https://doi.org/10.1007/s12517-010-0194-2>.
- 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>.
- Heydari, E. (2008) Tectonics versus eustatic control on supersequences of the Zagros mountains of Iran, *Tectonophysics*, 451: 56–70. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.046>.
- Hezarkhani, Y., Tavakoli, V. (2025) Heterogeneity dynamics: influencing rock type responses to overburden pressure, Permian-Triassic of the Persian Gulf. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 21: 2982–3001.
- 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 straphic architecture, *GeoArabia*, 11: 75–176. <https://doi.org/10.2113/geoarabia110275>.
- Jiang, L., Worden, R. H., Li, Y., Chen, J. (2018) Diagenesis and porosity evolution of deeply buried carbonate reservoirs: A case study from the Permian of the Sichuan Basin, China. *Sedimentary Geology*, 364: 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.12.004>.
- Longman, M. W. (1980) Carbonate diagenetic textures from nearsurface diagenetic environments, *American association of petroleum geologists Bulletin*, 64: 461–487.
- Lonoy, A. (2006) Making sense of carbonate pore systems, AAPG Bulletin, 90: 1381–1405. <https://doi.org/10.1306/03130605104>.
- Lucia, F. J. (1995) Rock-Fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization, AAPG Bulletin, 79: 1275–1300.
- Maurer, F., Martini, R., Rettori, R., Hillgartner, H., Cirilli, S. (2009) The geology of Khuff outcrop analogues in the Musandam Peninsula, United Arab Emirates and Oman, *GeoArabia*, 14: 125–158. <https://doi.org/10.2113/geoarabia1403125>.
- Mehrabi, H., Rahimpour-Bonab, H., Enayati-Bidgoli, A. H., Esrafil-Dizaji, B. (2015) Impact of contrasting paleoclimate on carbonate reservoir architecture: Cases from arid Permian-Triassic and humid Cretaceous platforms in the south and southwestern Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 126: 262–283.
- Moore, C. H., Wade, W. J. (2013) *Carbonate reservoirs: Porosity, evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework*, Second edition, Elsevier, 369p.
- Moore, C. H. (2001) *Carbonate Reservoirs: Porosity Evolution and Diagenesis in a Sequence Stratigraphic Framework*. Elsevier, Amsterdam, 444p.
- Naderi-Khujin, M., Tavakoli, V., Seyrafian, A., Vaziri-Moghaddam, H. (2020) How a mud-dominated ramp changed to a carbonate-clastic oil reservoir: sea-level fluctuations in Cretaceous of the central Persian Gulf. *Marine and Petroleum Geology*, 116: 104301.
- Peyravi, M., Rahimpour-Bonab, H., Nader, F. H., Kamali, M. R. (2015) Dolomitization and burial history of lower Triassic carbonate reservoir-rocks in the Persian Gulf (salman offshore field), *Carbonate evaporites*, 30: 25–43. <https://doi.org/10.1007/s13146-014-0197-2>.
- 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: 341-364.
<https://doi.org/10.1002/gj.1148>.
- Rahimpour-Bonab, H., Esrafil-Dizaji B., Tavakoli V. (2010) Dolomitization and anhydrite precipitation in Permo-Triassic carbonates at the South Pars gas field, offshore Iran: controls on reservoir quality, *Journal of petroleum geology*, 33: 43-66.
- Rezvannia, F., Mosadegh, H., Biravaand, B., Nestel, G., Tavakoli, V. (2025) Late Permian-Early Triassic transition in the carbonate-evaporite strata of the eastern part of the Qatar-Fars Arch, Persian Gulf basin. *Marine and Petroleum Geology*, 181: 107524.
- Sattler, U., Zampetti, V., Schlager, W., Immenhauser, A. (2004) Late leaching under deep burial conditions: a case study from the Miocene Zhujiang carbonate reservoir, South China Sea, *Marine and Petroleum Geology*, 21: 977-992.
- 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*, 371p.
- Sibley, D. F., Gregg, J. M. (1987) Classification of dolomite textures, *Journal of Sedimentary Petrology*, 57: 967-975.
- Szabo, F., Kheradpir, A. (1978) Permian and Triassic stratigraphy, Zagros Basin, South-West Iran, *Journal of Petroleum Geology*, 1: 57-82.
- Tan, K., Wu, Q., Chen, J., Yao, J., Qin, Y., Zhang, Y. (2023) Development Characteristics and Controlling Factors of Dolomite Reservoirs of Permian Qixia Formation in Central Sichuan Basin, *Frontiers in Earth Science*, 148: 10.3389/feart.2022.1067316.
<https://doi.org/10.3389/feart.2022.1067316>.
- Tan, X., Li, Z., Zhang, Y., Wang, H. (2023) Diagenesis and reservoir quality evolution of dolostones in the Permian Qixia Formation, Sichuan Basin, China. *Marine and Petroleum Geology*, 148: 106020.
- Tucker, M. E. (2001) *Sedimentary Petrology: An introduction to the origin of sedimentary rocks*, Blackwell science, 291p.
- Tucker, M. E., Wright, V. P. (1990) *Carbonate Sedimentology*. Blackwell Science Ltd., Oxford, 496p.
- Warren, J. (2000) Dolomite: occurrence, evolution and economically important associations, *Earth-Science reviews*, 52: 1-81.
[https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(00\)00022-2](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(00)00022-2)
- Warren, J. K. (2006) *Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons: Sediments, Resources, and Hydrocarbons*. Springer, Berlin, 1052 p.
- Xiucheng, T., Feifan, L., Yuan, Z., Bing, L., Benjian, Z., Ya, Z., Minglong, L., Di, X., Xiaofang, W., Wei, Z. (2020) Origin of the penecontemporaneous sucrosic dolomite in the Permian Qixia Formation, northwestern Sichuan Basin, SW China, *Petroleum exploration and development*, 47: 1218-1234.
[https://doi.org/10.1016/S1876-3804\(20\)60131-3](https://doi.org/10.1016/S1876-3804(20)60131-3)
- Zheng, B., Zhou, R., Mou, Ch., Ge, X., Hou, Q., Zhao, J., Howard, D. (2024) Origin of the Upper Permian reef-dolostone and Reservoir Evolution in Northern South China, *Marine and Petroleum Geology*, 162: 106748.