http://ui.ac.ir/en

Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches University of Isfahan
E-ISSN: 2423-8007
Vol. 37, Issue 2, No. 83, Summer 2021, pp. 1-20
Received: 13.09.2020 Accepted: 25.01.2021

Research Paper

Combined effects of depositional and diagenetic processes on the distribution of rock types in the Lucia petrophysical classification system: A case study of the Dalan and Kangan formations

Neda Shakeri
M.Sc of Sedimentology and Sedimentary Rocks, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran
Nedashakeri@ut.ac.ir

Hossain Rahimpour-Bonab*
Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran
rahimpor@ut.ac.ir

Vahid Tavakoli
Associate Professor, School of Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran
vtavakoli@ut.ac.ir

Elham Hajikazemi
Ph.D. Iranian Offshore Oil Company, Tehran, Iran
ekazemi@iooc.co.ir

Abstract
Upper Dalan and Kangan carbonate formations with Late Permian–Early Triassic ages are considered the main gas reservoir rocks in some Persian Gulf fields. In this study, to investigate the factors affecting the distribution of reservoir rock types, microfacies and diagenetic processes in the upper part of Dalan and Kangan formations in one of the Persian Gulf fields have been investigated. A total of 1110 thin sections and 840 porosity and permeability data (RCAL data) were used. In the petrographic studies, 15 microfacies were classified into four facies belts of the tidal zone, lagoon, shoal, and open marine in an epeiric carbonate platform environment. Studies showed that diagenetic imprints such as calcite cementation, dolomitization, anhydrite nodule formation, dissolution, and compaction had been occurred in three marine, meteoric, and burial diagenetic environments. To investigate and group the reservoir rock types on the Lucia petrophysical diagram, the porosity and permeability data were plotted on this diagram. Depending on the type of microfacies and diagenetic processes, porosity and permeability data are included in all parts of the diagram. This study shows that the reservoir rock of the studied field is very heterogeneous in terms of reservoir properties and is affected by sedimentary and diagenetic processes. Accordingly, grain supported samples have been moved from classes one and two to the lower parts of the diagram, in the non-reservoir section, due to calcite and anhydrite cement. In contrast, in some cases, dissolution and dolomitization in mud-supported microfacies led to data placement from class three of Lucia to classes one and two. Dissolution and dolomitization in grain-supported microfacies have resulted in the placement of these samples in the upper parts of classes one and two.
Keywords: Upper Dalan Formation, Kangan Formation, Microfacies, Diagenesis, Lucia diagram

Introduction

Diagenetic processes are one of the main reservoir quality controllers in carbonate reservoirs in the world. These processes play a constructive or destructive role in the reservoir. They could also have no effect on the initial reservoir quality of the facies (Ahr 2008). The most important application of the geological rock typing method is to investigate the effect of geological factors on petrophysical

*Corresponding author
Shakeri N. Rahimpour-Bonab H. Tavakoli V. Haji Kazemi E. (2021). Combined effects of depositional and diagenetic processes on the distribution of rock types in the Lucia petrophysical classification system: A case study of the Dalan and Kangan formations. Journal of Stratigraphy and Sedimentology Researches, 37(2):1-20.

2423-8007 / © 2021
This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9

behavior (Nazari et al. 2019). The petrophysical characteristics in Dalan and Kangan carbonate formations are under the control of sedimentary and diagenetic processes (Nazemi et al. 2019). One of the important methods for rock typing that connects geology and petrophysics is the Lucia method. The aim of this study is to investigate the effect of sedimentary and diagenesis processes on changing the reservoir quality of microfacies on the Lucia petrophysical diagram.

Material & Methods

For the present study, 242.7 m of the succession, including 1110 thin sections with distances of approximately 20 cm from the upper Dalan and Kangan formations were investigated from well X of one of the fields located in the east of the Persian Gulf. No thin section was available from the K4 unit. To determine the amount of calcite and dolomite, all thin sections were stained with Alizarin Red-S solution. Types of microfacies were described and named by the Dunham method (Dunham 1962). Flügel classification (Flügel 2010) was used to determine the sedimentary environments. Lucia petrophysical chart (Lucia 1995) with 840 porosity and permeability data (RCAL data) were used to investigate the reservoir characteristics of microfacies and the diagenetic processes affecting them. The frequency of each microfacies was determined in Lucia petrophysical classes.

Discussion of Results & Conclusions

Facies analysis led to the identification of 15 microfacies (MF1 to MF15) in the four facies belts (tidal zone, lagoon, shoal, and open marine) deposited in an epeiric carbonate platform. Studies showed that diagenetic imprints such as calcite cementation, dolomitization, anhydrite nodule formation, dissolution and compaction have occurred in three marine, meteoric, and burial diagenetic environments. In the upper Dalan and Kangan formations, moldic, fenestral, interparticle, intraparticle, intercrystalline and vuggy porosity are observed; but common porosities are moldic, intraparticle and vuggy. Sedimentary and diagenetic processes control the porosity and permeability of the rocks. Depending on the type of microfacies and diagenetic processes, porosity and permeability data are included in all parts of the diagram. An important factor in the distribution of porosity and permeability in carbonate reservoirs is diagenesis (Lucia 2007, Ahr 2008). Due to diagenesis, porosity can enter from one group to another. Dolomitization and dissolution have a positive effect while calcite cement, anhydrite nodule formation, and compaction have a negative effect on reservoir quality. Microfacies that have a higher frequency percentage in classes one and two have a better reservoir quality.

http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9

پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی
سال سی و هفتم، شماره پیاپی ۸۳، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۰، ص ۱-۲۰
تاریخ وصول: ۱۳۹۹/۰۶/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۱/۰۶

مقاله پژوهشی

آثار توأم فرایندهای رسوبی و دیاژنزی بر توزیع گونه‌های سنگی در سیستم طبقه‌بندی پتروفیزیکی لوسیا؛ مطالعهٔ موردی: سازندهای دالان و کنگان

ندا شاکری، دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکدهٔ زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران
Nedashakeri@ut.ac.ir
حسین رحیم‌پور بناب*، استاد، دانشکدهٔ زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران
rahimpor@ut.ac.ir
وحید توکلی، دانشیار، دانشکدهٔ زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران
vtavakoli@ut.ac.ir
الهام حاجی‌کاظمی، دکتری، شرکت نفت فلات قارهٔ ایران، تهران، ایران
ekazemi@iooc.co.ir

چکیده

سازندهای کربناتهٔ دالان بالایی و کنگان با سن پرمین پسین- تریاس پیشین به‌مثابهٔ سنگ مخزن اصلی گازی در بعضی از میادین خلیج فارس به شمار می‌آیند. در این پژوهش برای بررسی عوامل مؤثر بر توزیع کلاس‌های پتروفیزیکی لوسیا، ریزرخساره‌ها و فرایندهای دیاژنزی بخش بالایی سازند دالان و سازند کنگان در یکی از میادین خلیج فارس بررسی شده است. در این مطالعه ۱۱۱۰ مقطع نازک و ۸۴۰ دادهٔ تخلخل و تراوایی مربوط به مغزه‌های حفاری بررسی شده است. در مطالعات پتروگرافی ۱۵ ریزرخساره در قالب ۴ کمربند رخساره‌ای پهنهٔ جزر و مدی، لاگون، پشته‌های زیرآبی و دریای باز در یک محیط کم‌شیب کربناته شناسایی شد. بررسی‌ها نشان می‌دهد فرایندهای دیاژنزی سیمانی‌شدن کلسیتی، دولومیتی‌شدن، تشکیل ندول‌های انیدریتی، انحلال و تراکم در سه محیط دیاژنزی دریایی، جوّی و تدفینی، بخش فوقانی سازند دالان و سازند کنگان را متأثر ساخته است. به‌منظور گروه‌بندی گونه‌های سنگی مخزنی روی نمودار پتروفیزیکی لوسیا، داده‌های تخلخل و تراوایی روی این نمودار ترسیم شدند. با توجه به نوع ریزرخساره و شدت فرایندهای دیاژنزی، داده‌های تخلخل و تراوایی در تمامی قسمت‌های نمودار پتروفیزیکی لوسیا جای گرفته‌اند. این مطالعه نشان می‌دهد سنگ مخزن میدان مطالعه‌شده ازلحاظ مخزنی بسیار ناهمگن و متأثر از فرایندهای رسوبی و دیاژنزی است؛ بر این اساس سیمان‌های کلسیتی و انیدریتی باعث شده‌اند نمونه‌های دانه پشتیبان از کلاس ۱ و ۲ لوسیا به قسمت‌های پایینی کلاس‌ها و در بخش نمونه‌های غیرمخزنی نمودار جای گیرند؛ درمقابل در مواقعی انحلال و دولومیتی‌شدن در ریزرخساره‌های گل پشتیبان به قرارگیری از کلاس ۳ لوسیا به کلاس ۱ و ۲ منجر شده است. انحلال و دولومیتی‌شدن در ریزرخساره‌های دانه پشتیبان به قرارگیری داده‌های آن در قسمت‌های بالایی کلاس‌های ۱ و ۲ انجامیده است.

واژه‌های کلیدی: بخش فوقانی سازند دالان، سازند کنگان، ریزرخساره، دیاژنز، نمودار لوسیا

* نویسنده مسئول

شاکری، ن؛ رحیم‌پوربناب، ح؛ توکلی، و. و حاجی‌کاظمی، ا. (۱۳۹۹). آثار توأم فرایندهای رسوبی و دیاژنزی بر توزیع گونه‌های سنگی در سیستم طبقه‌بندی پتروفیزیکی لوسیا؛ مطالعهٔ موردی: سازندهای دالان و کنگان، پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، ۳۷(۲):۱-۲۰.

2423-8007 / © 2021
This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9

مقدمه

تغییرات زیاد تخلخل و تراوایی در خصوصیات مخزنی کربنات‌های کم‌عمق امری متداول است (Moore 2001; Lucia 2007). این تنوع مبین آثار فرایندهای مختلف رسوبی، شرایط محیطی و فرایندهای دیاژنزی است (Vincent el al. 2007). مطالعهٔ ریزرخساره‌ها و تعیین محیط رسوبی آنها در کنار بررسی فرایندهای دیاژنزی به ارائهٔ الگویی کاربردی برای بررسی‌های مخزنی و اکتشاف ذخایر هیدروکربنی منجر می‌شود. بزرگ‌ترین میدان گازی جهان در ناحیهٔ خلیج فارس در این دو سازند قرار گرفته است (Aali et al. 2006)؛ به همین دلیل این دو سازند در این نواحی از جنبه‌های مختلفی مانند محیط رسوبی، فرایندهای دیاژنزی، چینه‌نگاری سکانسی و تغییرات کیفیت مخزنی توجه بسیاری از پژوهشگران را جلب کرده‌اند (Insalaco et al. 2006; Esrafili-Dizaji and Rahimpour-Bonab 2009; Maurer et al. 2009; Tavakoli et al. 2011; Enayati-Bidgoli et al. 2016; Mehrabi et al. 2016; Tavakoli and Jamalian 2018, 2019; Yarmohammadi et al. 2020).

به‌طور کلی توزیع ویژگی‌های مخزنی در ردهٔ اول به توزیع رخساره‌ها در محیط رسوب‌گذاری وابسته است (Lucia 2007; Ahr 2008). فرایندهای دیاژنزی، یکی از اصلی‌ترین فرایندهای کنترل‌کنندهٔ کیفیت مخزنی در مخازن کربناتهٔ دنیا محسوب می‌شوند که نقش سازنده، مخرب و بدون تأثیر در کیفیت مخزنی اولیهٔ رخساره‌ها دارند (Ahr 2008)؛ بنابراین انجام مطالعات رخساره‌ای و دیاژنزی که از عوامل اصلی مؤثر بر کیفیت مخزنی است، امری ضروری در شناخت دقیق مخازن کربناته محسوب می‌شود (Lucia 2007; Ahr 2008). تعیین گونه‌های سنگی یا دسته‌بندی سنگ‌ها براساس ویژگی‌های پتروفیزیکی مشابه، یکی از مهم‌ترین اقدامات برای ساختن مدل سه‌بعدی پتروفیزیکی مخازن هیدروکربنی است (Skalinski and Kenter 2014). تعریف‌های متفاوتی برای گونه‌های سنگی وجود دارد و استفاده از روش‌های متفاوت در این‌باره، در طول زمان بیان‌کنندهٔ یک سیر تکاملی برای این مفهوم است (Skalinski and Kenter 2014). به گروهی از نمونه‌های سنگی که خصوصیات زمین‌شناسی، پتروفیزیکی و مخزنی مشابه دارند، «گونه‌های سنگی زمین‌شناسی» می‌گویند (Kopaska-Merkel and Mann 1991). مهم‌ترین کاربرد تعیین گونه‌های سنگی به روش زمین‌شناسی، بررسی آسان‌تر تأثیر عوامل زمین‌شناسی بر رفتار پتروفیزیکی است (Honarvar Nazari et al. 2019). خصوصیات پتروفیزیکی سازندهای کربناتهٔ کنگان و دالان به فرایندهای رسوبی و دیاژنزی وابسته است (Nazemi et al. 2019)؛ بنابراین اولین مرحله، تعیین ریزرخساره‌ها، محیط رسوب‌گذاری آنها و فرایندهای دیاژنزی است که به‌طور چشمگیری ویژگی‌های مخزنی ریزرخساره‌ها را تغییر می‌دهد. یکی از روش‌های مهم تعیین گونه‌های سنگی که بین زمین‌شناسی و پتروفیزیک ارتباط برقرار می‌کند، روش لوسیاست. نمودار پتروفیزیکی لوسیا برپایهٔ بافت سنگ کربناته استوار است و این طبقه‌بندی بر اندازهٔ دانه، نوع حفره‌ها و هندسهٔ حفره‌ها تأکید دارد (Lucia 1995, 2007). هدف این مطالعه، بررسی اثر فرایندهای رسوبی و دیاژنزی بر تغییر کیفیت مخزنی ریزرخساره‌ها روی نمودار پتروفیزیکی لوسیاست.

زمین‌شناسی و چینه‌شناسی

کربنات‌های پرمین- تریاس در حوضهٔ زاگرس با نام سازندهای دالان و کنگان (معادل سازند خوف) شناخته می‌شوند (Insalaco et al. 2006). توالی‌های سازند خوف و معادل‌های زمانی آن در حاشیهٔ غیرفعال قاره‌ای اقیانوس نئوتتیس (شمال شرقی ابرقارهٔ گندوانا) با محدوده‌ای بیش از ۲۵۰۰ کیلومتر در امتداد شمال غربی- جنوب شرقی و بیش از ۱۵۰۰ کیلومتر در امتداد شمال شرقی- جنوب غربی به‌واسطهٔ عملکرد نیروهای ائوستاتیکی[1]- زمین‌ساختی[2] طی پیشروی سطح آب دریا و فرونشینی کف حوضه نهشته شده‌اند (Sharland et al. 2001; Insalaco et al. 2006). عرض جغرافیای دیرینهٔ این حوضه حدود ۲۰° تا ۲۵° جنوبی در پرمین بالایی

1. Eustatic
2. Tectonic

http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9

و ۱۷° تا ۲۰° جنوبی در تریاس پیشین بوده است (Angiolini et al. 2003). مطالعات پیشین نشان داده این مجموعهٔ کربناته- تبخیری در یک رمپ کربناته با شیب بسیار ملایم تشکیل شده است (Rahimpour-Bonab et al. 2010). سازندهای دالان و کنگان با سن پرمین پسین و تریاس پیشین، مخزن اصلی گاز در منطقه‌اند (Kashfi 1992). دو سازند دالان و کنگان از واحدهای کربناته و تبخیری تشکیل شده‌اند (Szabo and Kheradpir 1987; Kashfi 2000). شیل‌های سیلورین به‌مثابهٔ سنگ‌منشأ گاز موجود در سازندهای کنگان و دالان در بخش مرکزی خلیج فارس معرفی شده‌اند (Aali et al. 2006; Bordenave 2014). توالی کربناته- تبخیری دالان بالایی روی انیدریت‌های عضو نار قرار دارد. سازند کنگان روی سازند دالان قرار دارد و مرز دو سازند در مطالعات مختلف بررسی شده و امروزه عقیده بر آن است که این مرز به‌صورت کاهش سطح آب دریا همراه با عارضه‌های مربوط به آن مشخص می‌شود (Tavakoli 2015). یک نبود رسوبی کم‌اهمیت با رخنمون‌یافتگی و دیاژنز جوّی همراه است (Insalaco et al. 2006; Szabo and Kheradpir 1987). مرز کنگان- دالان در خلیج فارس با ظهور توالی‌های ترومبولیتی پس از انقراض پرموتریاس مشخص می‌شود. بخش بالایی سازند دالان و سازند کنگان به ۴ واحد مخزنی اصلی K1، K2، K3 و K4 تفکیک می‌شود (Kashfi 1992; Rahimpour-Bonab et al. 2010). سازند کنگان به K1 و K2 و بخش فوقانی سازند دالان به K3 و K4 تقسیم می‌شود. مرز پرمین- تریاس بین واحدهای مخزنی K3 و K2 قرار دارد (Tavakoli and Rahimpour-Bonab 2012). واحدهای اصلی تولید K2 و K4 هستند (Aali et al. 2006; Moradpour et al. 2008; Ehrenberg et al. 2007; Nazemi et al. 2018). در این مطالعه واحد K4 مغزه‌گیری نشده است و مقطع نازک ندارد. موقعیت جغرافیایی میدان مطالعه‌شده و ستون چینه‌شناسی بخش شرقی خلیج فارس در شکل ۱ نشان داده شده است.

داده‌ها و روش‌ها

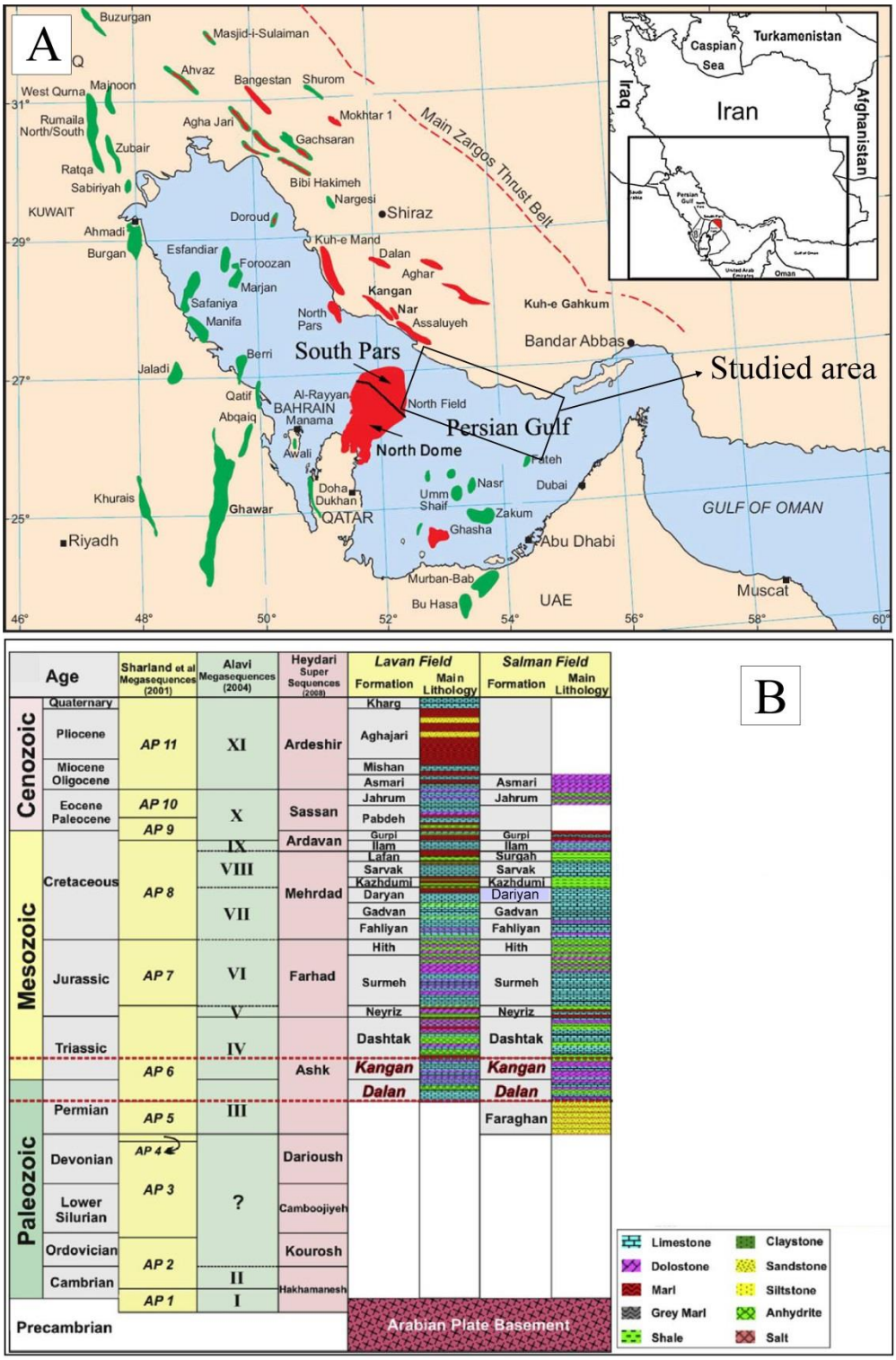
در مطالعهٔ حاضر ۲۴۲٫۷ متر از رسوبات چاه X، یکی از میدان‌های واقع در شرق خلیج فارس در قالب ۱۱۱۰ مقطع نازک با فواصل تقریباً ۲۰سانتی‌متری از سازندهای دالان بالایی و کنگان بررسی شد. واحد K4 مغزه‌گیری نشده است و مقطع نازک ندارد. به‌منظور تعیین مقادیر کلسیت و دولومیت، یک‌سوم از همهٔ مقاطع نازک با محلول آلیزارین قرمز رنگ‌آمیزی شد. انواع ریزرخساره‌های رسوبی با روش Dunham 1962 توصیف و نام‌گذاری شد. در تعیین محیط رسوبی انواع ریزرخساره‌های رسوبی از تقسیم‌بندی Flügel 2010 استفاده شد. از نمودار پتروفیزیکی Lucia 1995 به همراه ۸۴۰ دادهٔ تخلخل و تراوایی به‌منظور بررسی و درک ویژگی‌های مخزنی ریزرخساره‌ها و فرایندهای دیاژنزی مؤثر بر آنها استفاده شد. با محاسبهٔ فابریک سنگی نمونه‌ها، درصد فراوانی هر ریزرخساره در کلاس‌های لوسیا ترسیم و در ادامه ریزرخساره‌ها به تفکیک بررسی شد.

یافته‌های پژوهش

ریزرخساره‌ها

ریزرخساره‌های موجود در سازندهای کنگان و دالان بالایی تاکنون در مطالعات مختلفی بررسی شده است (Insalaco et al. 2006; Esrafili-Dizaji and Rahimpour-Bonab 2009; Rahimpour-Bonab et al. 2009; Abdolmaleki et al. 2016; Enayati-Bidgoli and Rahimpour-Bonab 2016). در این پژوهش با استفاده از مطالعهٔ مقاطع نازک درمجموع ۱۵ ریزرخساره متعلق به ۴ کمربند رخساره‌ای شناسایی شد (شکل ۲). در جدول ۱ به مهم‌ترین ویژگی‌های ریزرخساره‌ها به‌طور خلاصه اشاره شده است. ریزرخساره‌های ترمبولیت، شیل و پلویید گرینستون با بافت کیستون فقط در سازند کنگان مشاهده شد.

http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9



شکل ۱. A- موقعیت جغرافیایی میدان مطالعه‌شده در آب‌های خلیج فارس (Insalaco et al. 2006)؛ B. ستون چینه‌شناسی بخش شرقی خلیج فارس (Enayatie-Bidgoli and Rahimpour-Bonab 2016) با اندکی تغییرات

Fig. 1. A- Geographical location of the study field in the waters of the Persian Gulf (Insalaco et al. 2006)**; B. Stratigraphic column of the eastern part of the Persian Gulf** (Enayatie-Bidgoli and Rahimpour-Bonab 2016) **with slight changes**

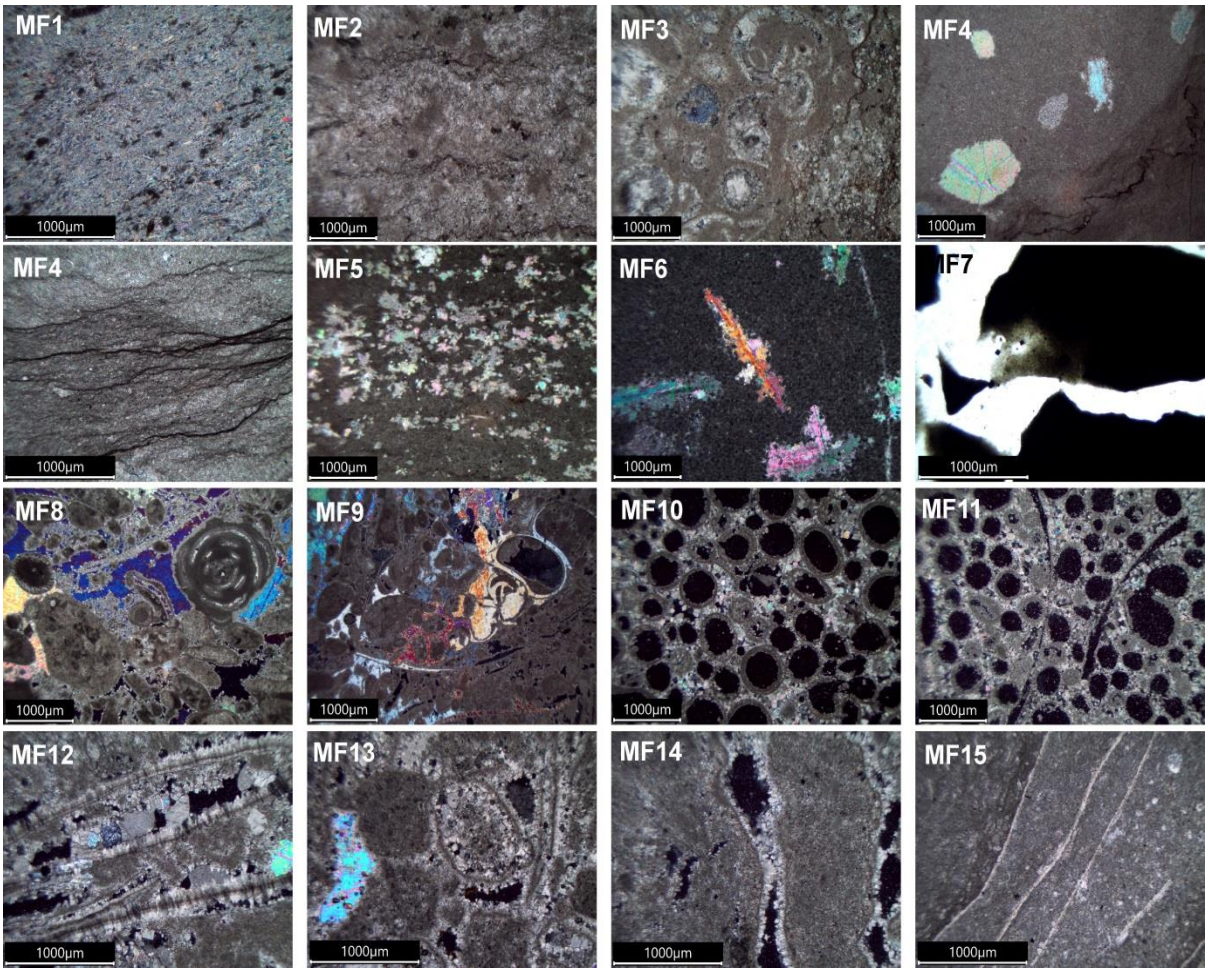
http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9

جدول ۱- ویژگی‌های مهم ریزرخساره‌ها در توالی مطالعه‌شده

Table 1- Important characteristics of microfacies in the studied sequence

کد	ریزرخساره	اجزای تشکیل‌دهنده	محیط تشکیل	ریزرخسارهٔ استاندارد
MF1	انیدریت (Anhydrite)		سابخا	معادل RMF 25 فلوگل
MF2	استروماتولیت (Stromatolite)	جلبک سبز و آبی، استراکود، فرامینیفرای ریز	پهنهٔ جزر و مدی	
MF3	ترمبولیت (Thrombolite)	جلبک سبز و آبی، استراکود، فرامینیفرای ریز، دوکفه‌ای	پهنهٔ جزر و مدی	
MF4	مادستون تا دولومادستون (Mud/Dolomudstone)	استراکود به مقدار خیلی اندک و پراکنده	پهنهٔ جزر و مدی	معادل RMF 19 فلوگل
MF5	دولومادستون فنسترال (Fenestral lime Mudstone)		پهنهٔ جزر و مدی	
MF6	پلوییید گرینستون با بافت کیستون (Pelloid Grainstone Bearing Keystone)	پلوییید	پایین پهنهٔ جزر و مدی تا لاگون	
MF7	شیل (Shale)		پهنهٔ جزر و مدی تا لاگون	
MF8	بایوکلست وکستون تا پکستون (Bioclast Wacke/Packstone)	جلبک سبز، گاستروپود، دوکفه‌ای، استراکود، خارپوست	لاگون	معادل RMF 17,20 فلوگل
MF9	بایوکلست پلوییید وکستون تا پکستون (Pelloid Bioclast Wacke/Packstone)	پلوییید، جلبک سبز، گاستروپود، دوکفه‌ای، استراکود، فرامینیفرا	لاگون	
MF10	اوئید گرینستون (Ooid Grainstone)	اوئید	شول مرکزی	معادل RMF 29 فلوگل
MF11	بایوکلست اوئید گرینستون (Bioclast Ooid Grainstone)	اوئید، دوکفه‌ای، گاستروپود به مقدار کمتر	شول رو به دریا و پشت به دریا	معادل RMF 30 فلوگل
MF12	بایوکلست پکستون تا گرینستون (Bioclast Pack/Grainstone)	دوکفه‌ای، به مقدار کمتر گاستروپود و اکینودرم	شول مرکزی و رو به دریا	معادل RMF 26,27 فلوگل
MF13	اینتراکلست بایوکلست پکستون تا گرینستون (Intraclast Bioclast Pack/Grainstone)	اینتراکلست، دوکفه‌ای، گاستروپود به مقدار کمتر	شول مرکزی و رو به دریا	
MF14	اینتراکلست گرینستون (Intraclast Grainstone)	اینتراکلست، اوئید و دوکفه‌ای به مقدار ناچیز	شول مرکزی	
MF15	بایوکلست وکستون (Bioclast Wackestone)	دوکفه‌ای (کلاریا)، استراکود و فرامینیفرای کوچک	دریای باز	معادل RMF 18 فلوگل

http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9



شکل ۲- ریزرخساره‌های شناسایی‌شده در بخش فوقانی سازند دالان و سازند کنگان در میدان مطالعه‌شده در خلیج فارس (تمامی عکس‌ها به جز MF7 در نور پلاریزه تهیه شده‌اند.)

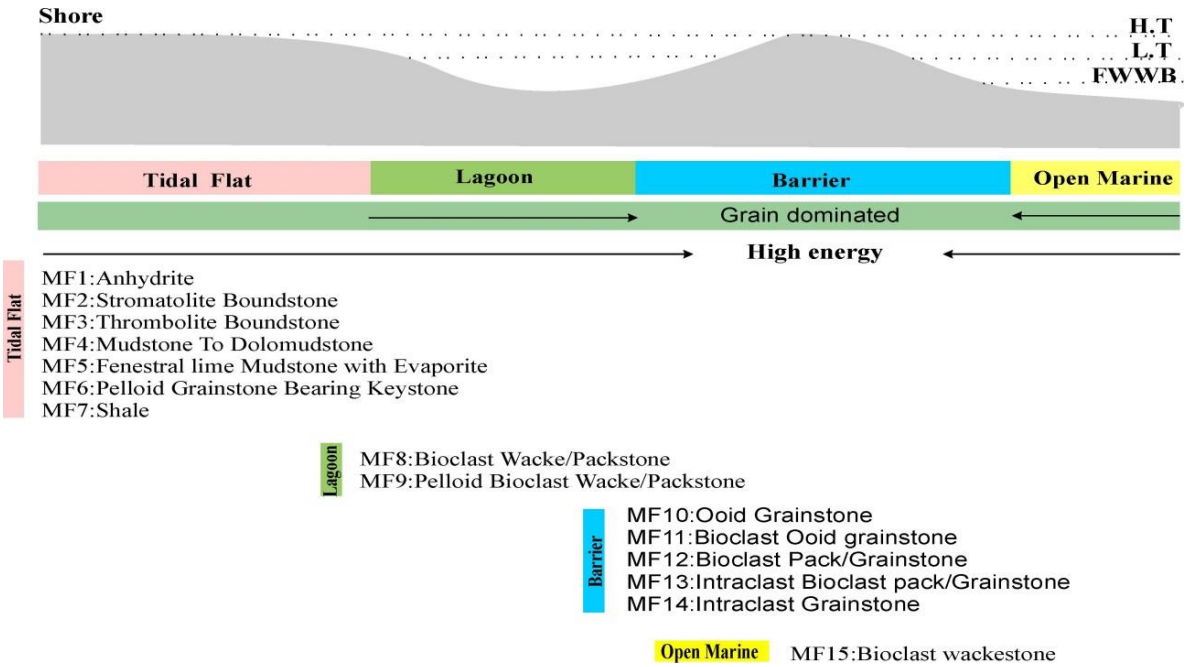
Fig 2- Microfacies identified in the upper part of Dalan and Kangan Formations in the studied field in the Persian Gulf (all photos except MF7 were taken in polarized light.)

مدل محیط رسوبی

تغییرات بسیار تدریجی ریزرخساره‌ها در توالی رسوبی، فراوانی ریزرخساره‌های کم‌عمق و همچنین نبود سد ریفی و موجودات ریف‌ساز از ریزرخساره‌های سابخایی تا پشته‌های زیرآبی، حاکی از تشکیل آنها در یک محیط کم‌شیب کربناته در طول دورهٔ پرمین و تریاس است (شکل ۳). در مطالعات پیشین نیز این محیط رسوبی برای این سازندها در نظر گرفته شده است (Sharland et al. 2001; Tavakoli et al. 2011; Abdolmaleki et al. 2016; Jafarian et al. 2017).

در شکل ۴ نمودار رسوب‌شناسی چاه مطالعه‌شده نشان داده شده که دربردارندهٔ اطلاعاتی از ریزرخساره‌ها و محیط تشکیل آنها به همراه لیتولوژی، بافت، تخلخل، تراوایی و لاگ‌های معمول است.

http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9



شکل ۳- مدل شماتیکی از محیط رسوبی بخش فوقانی سازند دالان و سازند کنگان در میدان مطالعه‌شده

Fig 3- Schematic model of the sedimentary environment of the upper part of Dalan Formation and Kangan Formation in the studied field

دیاژنز

فرایندهای دیاژنزی از مهم‌ترین عوامل مؤثر در کنترل کیفیت مخزنی مخازن کربناته‌اند (Lucia 2007). فرایندهای دیاژنزی بسیاری بر رسوبات کربناته و کیفیت مخزنی آنها تأثیر گذاشته‌اند.

سیمانی‌شدن کلسیتی

سیمان هم‌ضخامت و هم‌بعد در ریزرخساره‌های دانه پشتیبان دیده می‌شود (شکل ۵، A، D و E). سیمان‌های دروزی و بلوکی بیشتر در ریزرخساره‌های گل پشتیبان مشاهده می‌شوند که تخلخل و فضاهای خالی را پر کرده‌اند (شکل ۵، B و C). با تشکیل سیمان کلسیتی هم‌بعد در ریزرخساره‌های دانه‌پشتیبان، تخلخل بین دانه‌ای از بین رفته و معکوس‌شدگی تخلخل[1] ایجاد کرده است (شکل ۵، E). اندازهٔ بلورهای سیمان‌های دروزی، از سمت دیوارهٔ حفره به سمت مرکز و داخل حفره افزایش می‌یابد و این سیمان در بالای مرز پرموتریاس و در واحد مخزنی K2 گسترش زیادی دارد. سیمان‌های هم‌ضخامت که در محیط دریایی تشکیل شده‌اند، نقش مهمی در حفظ آلوکم‌ها درمقابل فشردگی دارند و تخلخل و تراوایی اولیه را حفظ کرده‌اند (Tavakoli et al. 2011) که در تمامی ریزرخساره‌های دانه پشتیبان پشته‌های زیرآبی مشاهده می‌شوند (شکل ۵، A و S). سیمان‌های بلوکی و دروزی، هر دو در محیط‌های جوّی و تدفینی تشکیل می‌شوند (Flügel 2010).

دولومیتی‌شدن

در توالی مطالعه‌شده دولومیت‌ها به‌صورت جانشینی و سیمان دولومیتی تشکیل شده‌اند (شکل ۵، F تا H). دولومیت‌های جانشینی به دو صورت تخریب‌کنندهٔ فابریک[2] و حفظ‌کنندهٔ فابریک[3] عمل کرده‌اند و در ریزرخساره‌های دانه پشتیبان به‌ویژه اوئید گرینستون مشاهده می‌شوند. در دولومیت‌های تخریب‌کنندهٔ فابریک، بافت اولیه به‌وضوح مشخص نیست و

[1] Porosity Inversion

[2] Fabric Destructive

[3] Fabric Retentive

http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9

فقط شبحی از آن باقی مانده است و بلورهای درشت آن باعث افزایش تخلخل بین بلوری و تراوایی شده‌اند (شکل ۵، G). در دولومیت‌های حفظ‌کنندهٔ فابریک، بلورهای دولومیت تقریباً از دانه‌ها کوچک‌ترند و خواص پتروفیزیکی آنها از فابریک سنگ پیروی می‌کند و به‌صورت انتخابی و تقلیدی[1] آلوکم‌ها را دولومیتی کرده‌اند (شکل ۵، H) و در ریزرخساره‌های لاگون و پشته‌های زیرآبی فراوانی زیادی دارند. در ریزرخساره‌هایی که دولومیتی‌شدن به‌صورت حفظ کنندهٔ فابریک صورت گرفته است، گسترش سیمان انیدریت به‌خوبی مشاهده می‌شود (شکل ۵، H). مطالعات پیشین نشان می‌دهد دولومیتی‌شدن در رسوبات گل پشتیبان و دانه پشتیبان، کیفیت مخزنی را افزایش می‌دهد (Tavakoli and Jamalian 2019).

تشکیل ندول و سیمان‌های انیدریتی

دولومیتی‌شدن و سیمان‌های انیدریتی، مهم‌ترین فاکتورهای کنترل‌کنندهٔ کیفیت مخزنی در سازندهای دالان و کنگان هستند (Rahimpour-Bonab et al. 2010). انیدریت در این توالی به‌صورت سیمان دربرگیرنده[2]، پرکنندهٔ حفره‌ها[3]، انیدریت لایه‌ای و ندولی دیده می‌شود (شکل ۵، I تا L). انیدریت پرکنندهٔ تخلخل، تمامی منافذ و تخلخل‌ها را پر کرده و در بعضی از داده‌ها جانشین فسیل‌ها و اوئیدها شده که تأثیر منفی بر کیفیت مخزنی گذاشته است (شکل ۵، M و N). ندول‌های انیدریت معمولاً طی مراحل اولیهٔ دیاژنز در محیط‌های سابخایی و در رسوبات دانه‌ریز مانند دولومادستون‌ها تشکیل می‌شوند (Warren 2006). انیدریت لایه‌ای به‌صورت لایه‌های ممتد دیده می‌شود و این نوع انیدریت احتمالاً به‌صورت بلورهای ژیپس از شورابه‌های سابخایی تشکیل شده و سپس در اثر تراکم یافتن و از دست دادن آب به انیدریت تبدیل شده است (Lucia 1999).

[1] Mimic
[2] Poikilitopic
[3] Pore- filling

انحلال

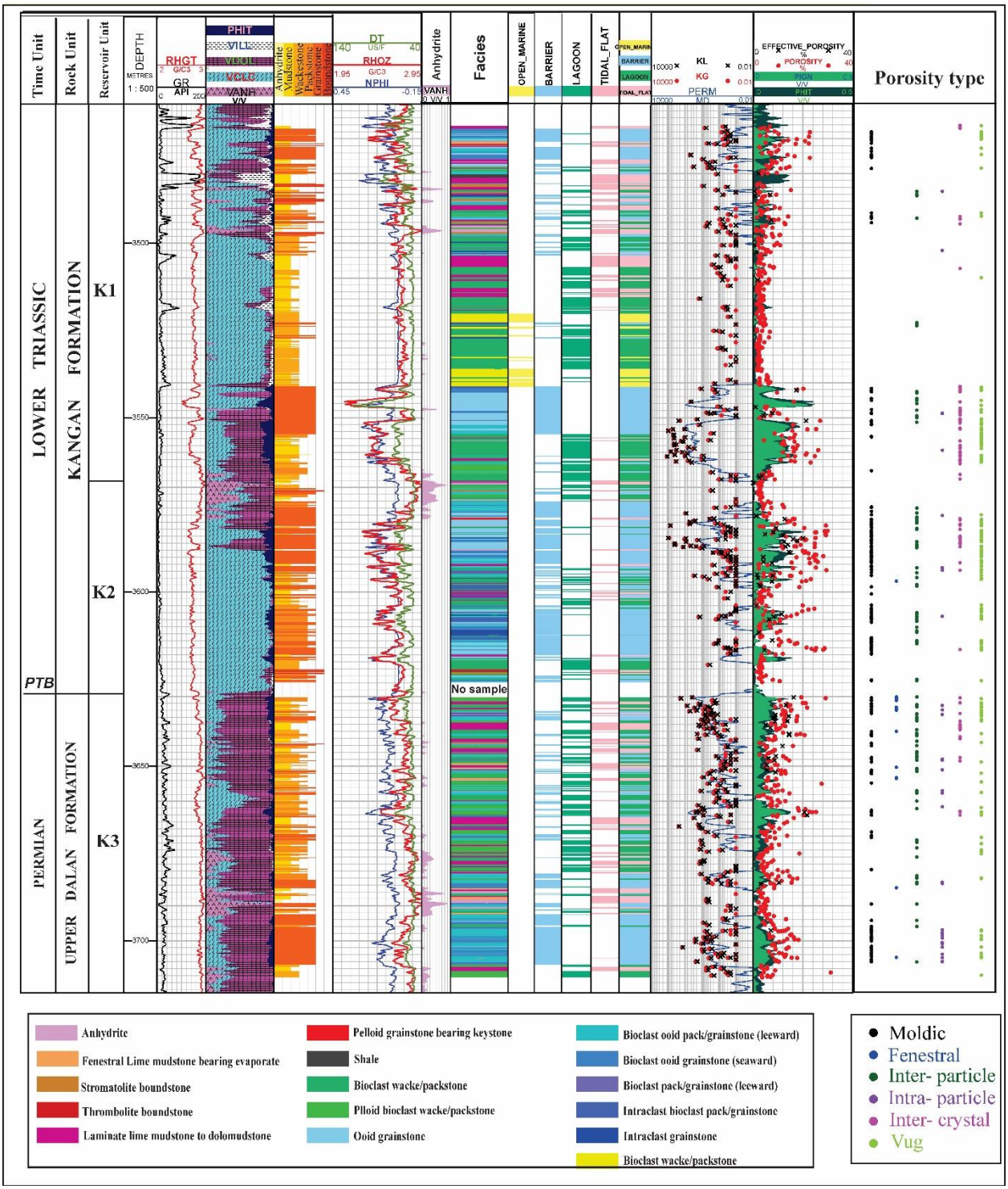
انحلال، یکی از مهم‌ترین فرایندهای دیاژنزی است که در بیشتر ریزرخساره‌ها مشاهده می‌شود. انحلال در ریزرخساره‌های دانه پشتیبان به‌صورت تخلخل قالبی و درون‌دانه‌ای (شکل ۵، D و E) و در ریزرخساره‌های گل پشتیبان به‌صورت تخلخل‌های حفره‌ای و درون‌دانه‌ای ایجاد شده است (شکل ۵، O و P). انحلال باعث افزایش تخلخل شده است؛ ولی در بعضی از داده‌ها به‌ویژه در ریزرخساره‌های دانه پشتیبان، پشته‌های زیرآبی به دلیل مرتبط‌کردن تخلخل‌ها به یکدیگر باعث افزایش نفوذپذیری نیز شده است (شکل ۵، Q و R).

فشردگی و تراکم

فشردگی به دو صورت مکانیکی و شیمیایی رخ داده است. فشردگی مکانیکی باعث ایجاد مرزهای محدب- مقعر، شکستگی آلوکم‌ها و نیز خردشدن اوئیدها شده است (شکل ۵، S تا V). فشرده‌شدن آلوکم‌ها و تشکیل مرزهای محدب- مقعر در ریزرخساره‌های دانه پشتیبان لاگون و پشته‌های زیرآبی به فراوانی مشاهده می‌شود. وجود سیمان‌های دوردانه در اطراف آلوکم‌ها در ریزرخساره‌های دانه پشتیبان از تراکم و فشردگی بیش از حد آنها جلوگیری کرده است (شکل ۵، S)؛ اما در مواردی که دانه‌هایی مانند اوئید سیمانی نشده‌اند، در اثر فشردگی باعث شکسته‌شدن آنها شده و اوئیدهای اسپاستولیتی[4] را به وجود آورده است (شکل ۵، V). با افزایش عمق، تراکم شیمیایی ایجاد می‌شود؛ آثار فشردگی شیمیایی به‌صورت مرزهای مضرسی، رگچه‌های انحلالی و استیلولیتی‌شدن مشاهده می‌شود. رگچه‌های انحلالی در ریزرخساره‌های گل پشتیبان دیده می‌شوند (شکل ۵، W)، ولی استیلولیتی‌شدن در بیشتر ریزرخساره‌ها دیده می‌شوند (شکل ۵، X و Y).

[4] Spastolith

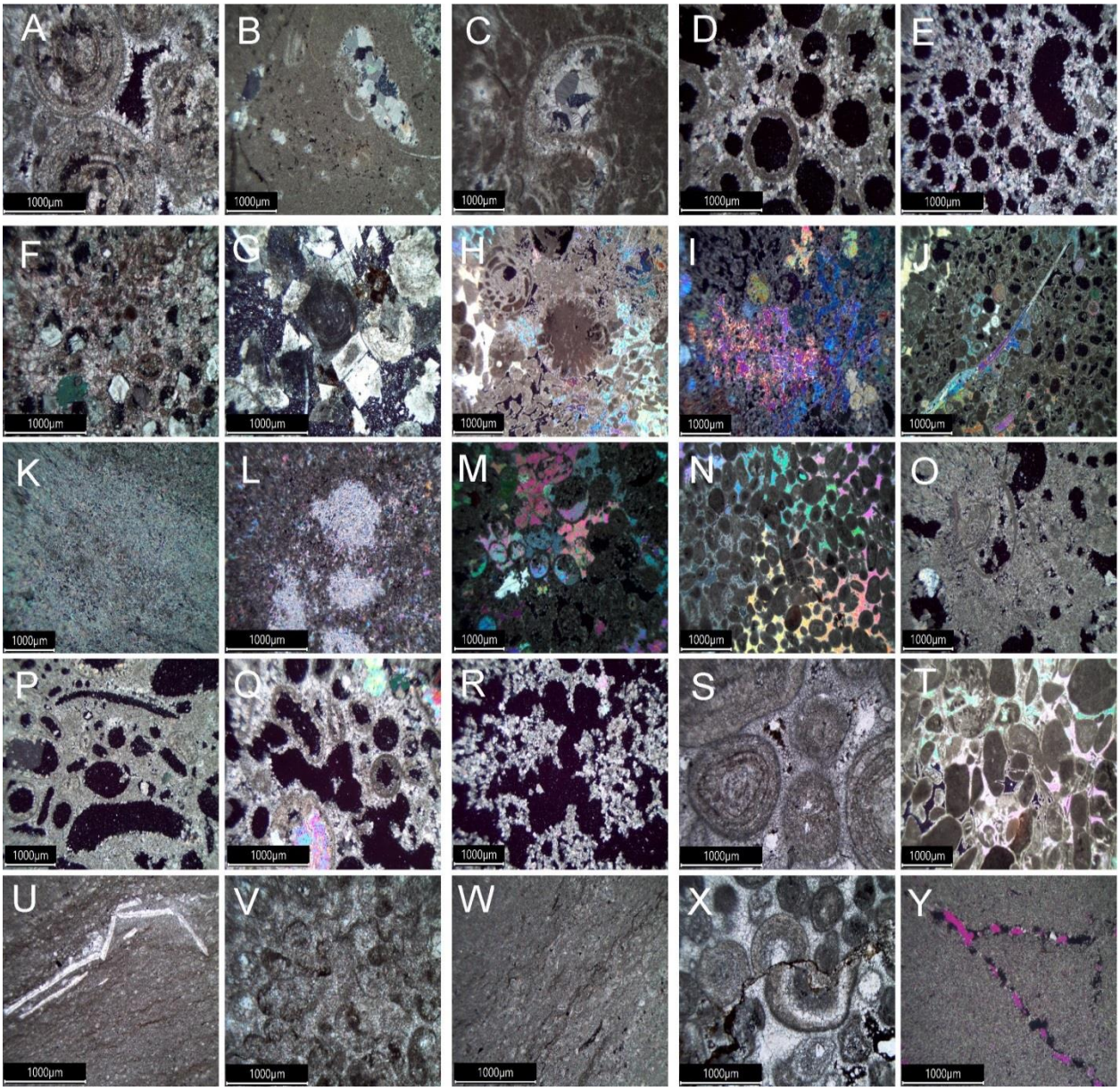
http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9



شکل ۴- ستون چینه‌شناسی بخش فوقانی سازند دالان و سازند کنگان به همراه داده‌های پتروفیزیکی (تخلخل- تراوایی و لاگ‌های معمول)

Fig 4- Stratigraphic column of the upper part of Dalan Formation and Kangan Formation with petrophysical data (porosity-permeability and common logs)

http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9



شکل ۵- فرایندهای دیاژنزی در توالی مطالعه‌شده: A. سیمان هم‌ضخامت، B. سیمان دروزی، C. سیمان بلوکی، D. سیمان هم‌بعد، E. معکوس‌شدگی تخلخل و تخلخل قالبی، F. سیمان دولومیتی خودشکل، G. دولومیت تخریب‌کنندهٔ فابریک، H. دولومیت حفظ‌کنندهٔ فابریک، I. انیدریت دربرگیرنده، J. انیدریت پرکنندهٔ تخلخل، K. انیدریت لایه‌ای، L. انیدریت ندولی، M و N. Anhydrite Plugging، O و Q. تخلخل واگی، P. تخلخل درون‌دانه‌ای، R. تخلخل کانالی، S. مرزهای محدب- مقعر، T و U. خردشدن دانه‌ها، V. اوئیدهای شکسته، W. رگچه‌های انحلالی، X و Y. استیلولیت (تمام عکس‌ها به جز U در نور پلاریزه تهیه شده‌اند).

Fig 5- Diagenetic processes in the studied sequence, A: Isopachous cement, B: Drusy cement, C: Blocky cement, D: Equant cement, E: Porosity Inversion and moldic porosity, F: Self-shaped dolomitic cement, G: Fabric destructive, H: Fabric retentive, I: Poikilitopic anhydrite, J: Pore filling anhydrite, K: layered anhydrite, L: nodular anhydrite, M and N: Anhydrite Plugging, O and Q : Vuggy porosity, P: Intraparticle porosity, R: Channel porosity, S: Convex- concavo contacts, T and U: Brittle of grains, V: Spastolith, W: Dissolution seams, X and Y: Stylolite. (All photos except U are in polarized light).

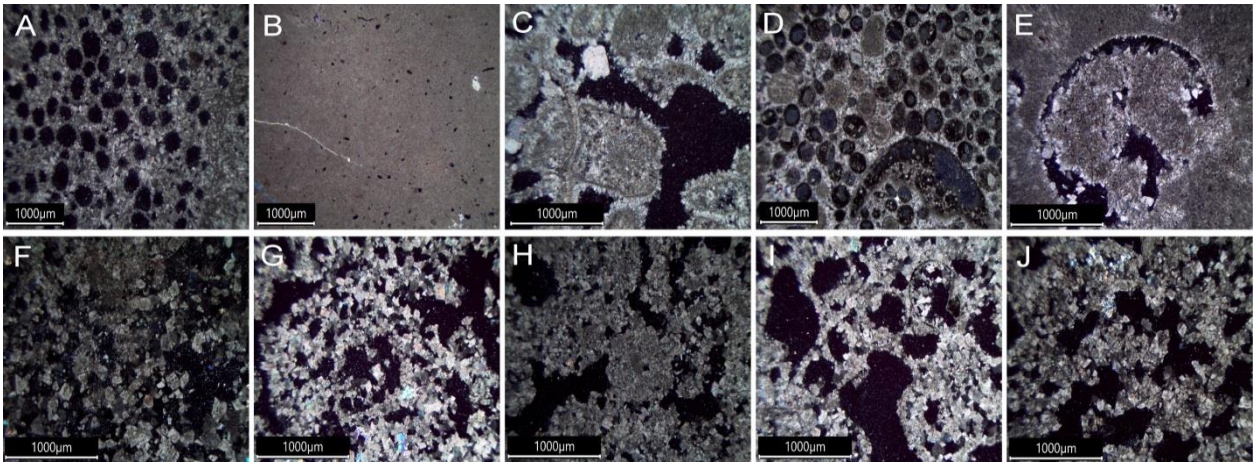
سیستم منافذ

در سازندهای دالان بالایی و کنگان، تخلخل‌های قالبی،

http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9

فنسترال، بین دانه‌ای، درون‌دانه‌ای، بین بلوری و واگی مشاهده می‌شوند؛ اما تخلخل شایع از نوع قالبی، درون‌دانه‌ای و حفره‌ای است (شکل ۴). تخلخل قالبی در ریزرخساره‌های دانه پشتیبان به‌ویژه اوئید گرینستون‌ها به فراوانی مشاهده می‌شود (شکل ۶، A). تخلخل‌های قالبی تخلخل زیاد و تراوایی کمتری را نشان می‌دهند که این موضوع در واحد K2 به‌خوبی دیده می‌شود (شکل ۴). تخلخل فنسترال، یکی از معیارهای مهم در تشخیص محیط‌های پهنهٔ جزر و مدی است. این نوع تخلخل در ریزرخساره‌های پهنهٔ جزر و مدی مشاهده می‌شود و فراوانی کمی دارد (شکل ۶، B). تخلخل‌های بین دانه‌ای در ریزرخساره‌های پشته‌های زیرآبی به فراوانی مشاهده می‌شود و وجود سیمان‌های دریایی در حفظ این نوع تخلخل‌ها بسیار مؤثر است (شکل ۶، C). تخلخل‌های درون‌دانه‌ای در بایوکلست‌ها به‌ویژه دوکفه‌ای‌ها و گاستروپودها دیده می‌شود. مقدار این تخلخل به نوع آلوکم و مقدار آن بستگی دارد (شکل ۶، D و E). تخلخل بین بلوری در ریزرخساره‌هایی که دولومیتی شده‌اند، به‌ویژه در دولومیت‌های تخریب‌کنندهٔ فابریک دیده می‌شود که علاوه بر افزایش تخلخل، نفوذپذیری را به‌طور چشمگیری افزایش داده است (شکل ۶، F و G). تخلخل حفره‌ای تقریباً در تمامی ریزرخساره‌ها مشاهده می‌شود که در اثر بزرگ‌شدن تخلخل‌های دیگر به وجود آمده است (شکل ۶، I و J).

انواع تخلخل ازنظر هندسهٔ منافذ، ویژگی‌های مخزنی و روند تغییرات تخلخل- تراوایی، تفاوت‌های عمده‌ای را نشان می‌دهند (Ahr 2008). در مخازن کربناته به دلیل تنوع منافذ، عموماً رابطهٔ تخلخل و تراوایی به‌صورت مستقیم نیست. تخلخل‌های بین دانه‌ای و بین بلوری رابطهٔ مستقیم دارند، ولی در تخلخل‌های قالبی، حفره‌ای و درون‌دانه‌ای، سیستم منافذ با پیچیدگی و ارتباط غیرمستقیم تخلخل و تراوایی همراه است. تخلخل‌های درون‌دانه‌ای، قالبی و حفره‌ای غیرمرتبط، تخلخل زیاد و تراوایی کمی را نشان می‌دهند. با تأثیر فرایندهای دیاژنزی ازجمله انحلال و دولومیتی‌شدن، ارتباط بین تخلخل‌های غیرمرتبط ایجاد می‌شود و تراوایی نیز افزایش می‌یابد. فرایندهای دیاژنزی با شدت و فراوانی مختلف بر ویژگی‌های منافذ و کیفیت مخزنی تأثیرگذار بوده‌اند.



شکل ۶- انواع تخلخل در توالی مطالعه‌شده: A. قالبی، B. فنسترال، C. بین دانه‌ای، D. درون‌دانه‌ای و قالبی، E. درون‌دانه‌ای، F. بین بلوری، G و H. بین بلوری و واگی، I و J. واگی (تمام عکس‌ها در نور پلاریزه تهیه شده‌اند).

Fig 6- Types of porosity in the studied sequence - A: moldic, B: fenestral, C: interparticle, D: intraparticle and moldic, E: intraparticle, F: intercrystalline, G and H: intercrystalline and vuggy, I and J: Vuggy (All photos were taken in polarized light).

بحث

عوامل مؤثر بر توزیع داده‌ها در کلاس‌های پتروفیزیکی

لوسیا و بررسی کیفیت مخزنی

Lucia 2007 بین اندازهٔ ذرات، اندازهٔ حفره‌ها و کیفیت

http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9

مخزنی آنها ارتباط برقرار و بر این اساس مفهوم فابریک سنگی[1] را تعریف کرد:

$$\text{Log}(k) = (9.7982 - 12.0838\ \text{Log}(RFN)) + ((8.6711 - 8.2965\ \text{Log}(RFN))\ \text{Log}(\varphi_{ip}))$$

مقدار RFN[2] از ۰٫۵ تا ۴ تغییر می‌کند، φ_{ip}[3] تخلخل بین دانه‌ای (Fraction) و k تراوایی (mD) است.

با توجه به ویژگی‌های پتروفیزیکی (تخلخل و تراوایی) و زمین‌شناسی، این نمودار به ۳ کلاس طبقه‌بندی می‌شود؛ کلاس ۱، گرینستون، دولومیت‌های درشت‌بلور (۱۰۰–۵۰۰ میکرون)؛ کلاس ۲، پکستون دانه پشتیبان، دولوستون‌های متوسط بلور و دولوپکستون متوسط و ریزبلور (۲۰–۱۰۰ میکرون) و کلاس ۳، فابریک گل پشتیبان، دولوستون‌های ریزبلور (۲۰> میکرون). فرایندها و محصولات رسوبی و دیاژنزی، تخلخل و تراوایی سنگ را کنترل می‌کند. ویژگی‌های پتروفیزیکی تخلخل بین دانه‌ای با اندازهٔ دانه‌ها، جورشدگی و تخلخل بین دانه‌ای ارتباط دارد (Lucia 2007).

با محاسبهٔ فابریک سنگی نمونه‌ها، درصد فراوانی هر کلاس پتروفیزیکی برای هر ریزرخساره به‌صورت نمودار دایره‌ای ترسیم شد (شکل ۱۰). همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود، ریزرخساره‌ها در هر ۳ کلاس نمودار لوسیا پراکنده شده‌اند. تعداد زیادی از نمونه‌ها به علت داشتن تخلخل و تراوایی کم (تخلخل ٪۵> و تراوایی ۰٫۱mD>) در بیرون از کلاس‌ها و در قسمت پایین و چپ نمودار قرار گرفته‌اند و به‌مثابهٔ نمونه‌های غیرمخزنی در نظر گرفته شده‌اند؛ اما قسمت بالا و چپ نمودار (بیرون از کلاس‌ها) به علت داشتن تخلخل کم و تراوایی نسبتاً زیاد که به نظر می‌رسد به دلیل وجود شکستگی‌هاست، به‌مثابهٔ نمونه‌های دارای شکستگی در نظر گرفته شده است. برای بررسی دقیق شکستگی‌ها به مطالعات ماکروسکوپی مغزه نیاز است؛ درنتیجه از بحث شکستگی‌ها در این مطالعه صرف‌نظر می‌شود.

با توجه به اینکه ریزرخساره‌های انیدریت (MF1)، استروماتولیت (MF2) و ترمبولیت (MF3) تخلخل و تراوایی چشمگیری ندارند، عمدتاً در قسمت نمونه‌های غیرمخزنی قرار دارند (شکل‌های ۷ و ۱۰).

داده‌های ریزرخسارهٔ مادستون تا دولومادستون (MF4) تقریباً در هر ۳ کلاس لوسیا قرار گرفته‌اند (شکل‌های ۷ و ۱۰)؛ با توجه به بافت این ریزرخساره که گل پشتیبان است، قرارگرفتن داده‌های این ریزرخساره‌ها در کلاس ۱ حدود ٪۲۱ و کلاس ۲، ٪۱۵ ارتباط مستقیمی با فرایندهای دیاژنزی در این ریزرخساره دارد. براثر دولومیتی‌شدن، کیفیت مخزنی این ریزرخساره‌ها به‌طور چشمگیری تغییر یافته است و داده‌های آنها با توجه به مقدار و اندازهٔ بلورهای دولومیت در کلاس‌های لوسیا جای گرفته‌اند (شکل ۹، A). انحلال و ایجاد تخلخل‌های واگی در بعضی از نمونه‌ها موجب بهبود زیاد کیفیت مخزنی شده است (شکل ۹، C). تشکیل ندول و سیمان‌های انیدریتی، تخلخل‌ها را پر کرده و به قرارگیری داده‌ها در قسمت‌های پایینی کلاس‌ها و قسمت غیرمخزنی نمودار منجر شده است (شکل ۹، B). به علت تأثیر دیاژنز بر این ریزرخساره، درصد فراوانی کلاس‌های لوسیا زیاد است (شکل ۱۰).

تمرکز ریزرخساره‌های لاگون (بایوکلست وکستون تا پکستون (MF8) و بایوکلست پلویید وکستون تا پکستون (MF9)) در قسمت نمونه‌های غیرمخزنی نمودار لوسیاست، ولی در ۳ کلاس دیگر و نمونه‌های دارای شکستگی نیز مشاهده می‌شوند. این دو ریزرخساره که ازنظر بافتی وکستون تا پکستون هستند، براساس بافتی باید در کلاس‌های ۲ و ۳ قرار گیرند و وجود آنها در سایر کلاس‌ها با فراوانی زیاد نشان از تأثیر فرایندهای دیاژنزی بر این دو ریزرخساره دارد. در ریزرخسارهٔ بایوکلست وکستون تا پکستون کلاس ۱، ٪۱۶، کلاس ۲ و ۳ به ترتیب ٪۹ و ٪۱۰ و نیز نمونه‌های غیرمخزنی ٪۵۲ و نمونه‌های دارای شکستگی ٪۱۳ فراوانی دارند. در بایوکلست پلویید وکستون تا پکستون از کلاس ۱ تا ۳ به ترتیب ٪۱۴، ٪۲۷ و ٪۱۶ و نمونه‌های غیرمخزنی و دارای شکستگی به ترتیب ٪۲۷ و ٪۱۶ فراوانی دارند. انیدریت دربرگیرنده و پرکنندهٔ حفره‌ها، یکی از فرایندهای مهم در این دو ریزرخساره است که باعث شده داده‌های این دو

[1] Rock Fabric
[2] Rock Fabric Number
[3] interparticle Porosity

http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9

ریزرخساره در قسمت‌های پایینی کلاس‌ها و نمونه‌های غیرمخزنی قرار گیرند (شکل ۹، D). دولومیتی‌شدن حفظ‌کنندهٔ فابریک در این دو ریزرخساره فرایند رایجی است که با توجه به سایز دولومیت‌ها و همراهی آنها با انیدریت رفتار متفاوتی نسبت به یکدیگر از خود نشان می‌دهند (شکل ۹، E). در بعضی از داده‌ها انحلال و ایجاد تخلخل‌های درون‌دانه‌ای به همراه دولومیتی‌شدن باعث افزایش کیفیت مخزنی (شکل ۹، F) و پراکندگی داده‌ها در همهٔ قسمت‌های نمودار شده است. درصد فراوانی کلاس‌های پتروفیزیکی برای هر ریزرخساره در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

ریزرخسارهٔ اوئید گرینستون (MF10) با توجه به بافت گرینستونی خود باید در کلاس ۱ قرار گیرد؛ ولی داده‌های مربوط به آن در همهٔ قسمت‌های نمودار لوسیا جای گرفته‌اند. کلاس ۱، ٪۱۷، کلاس ۲، ٪۳۰ و کلاس ۳، نمونه‌های غیرمخزنی و دارای شکستگی به ترتیب ٪۳۳، ٪۱۳ و ٪۷ است که در این میان کلاس ۳ فراوانی بیشتری دارد. تعداد زیادی از داده‌های این ریزرخساره به علت داشتن تخلخل‌های واگی جدا، در بیرون از کلاس‌ها و در سمت راست نمودار قرار گرفته‌اند؛ این قسمت به دلیل انحلال اوئیدها، تخلخل زیاد (۲۰-۳۰٪) است، ولی به دلیل وجود سیمان‌های کلسیتی در بین دانه‌ها و معکوس‌شدگی تخلخل، تراوایی کمی (کمتر از ۱mD) را نشان می‌دهند (شکل ۸، B و شکل ۹، G). انحلال و دولومیتی‌شدن با توجه به اندازهٔ دولومیت‌ها موجب افزایش تراوایی و تخلخل شده‌اند؛ این امر باعث ایجاد تخلخل‌های واگی متصل شده است و داده‌ها در قسمت‌های بالایی کلاس ۲ قرار گرفته‌اند (شکل ۸، A و شکل ۹، H). هرچقدر بلورهای دولومیت درشت‌تر باشند، تخلخل و تراوایی آنها نسبت به بلورهای کوچک‌تر بیشتر است. در بعضی داده‌ها، سیمان کلسیتی و انیدریت دربرگیرنده و پرکنندهٔ حفره‌ها، تخلخل‌های قالبی و بین دانه‌ای را پر کرده‌اند و همچنین فشردگی که باعث شده‌اند داده‌ها در قسمت‌های پایینی کلاس‌ها و نمونه‌های غیرمخزنی قرار گیرند (شکل ۹، I و J). درصد فراوانی این ریزرخساره در کلاس‌های لوسیا زیاد است و کلاس‌هایی با بافت دانه پشتیبان فراوانی خوبی دارند (شکل ۱۰).

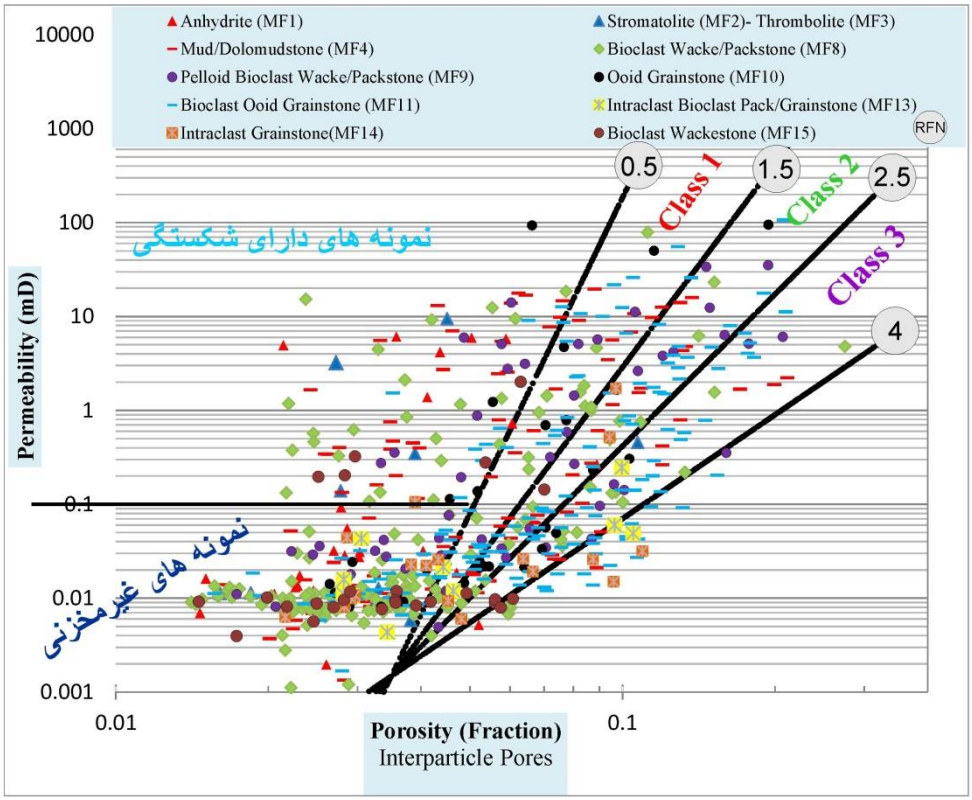
در ریزرخسارهٔ بایوکلست اوئید پکستون تا گرینستون (MF11) نمونه‌ها در کلاس‌های ۱ و ۲ لوسیا به ترتیب ٪۱۷ و ٪۱۹ از فراوانی برخوردارند و در کلاس‌های ۳، نمونه‌های غیرمخزنی و دارای شکستگی به ترتیب ٪۴۳، ٪۱۷ و ٪۴ فراوانی دارند؛ این موضوع بیان‌کنندهٔ تأثیر فرایندهای دیاژنزی این ریزرخساره است (شکل‌های ۷ و ۱۰). دولومیتی‌شدن و انحلال باعث شده است بعضی داده‌ها در خود کلاس ۱ قرار گیرند. فشردگی و سیمانی‌شدن کلسیتی، گسترش انیدریت دربرگیرنده و پرکنندهٔ تخلخل، تأثیر منفی بر کیفیت مخزنی داشته‌اند؛ با توجه به شدت این فرایندها و همراهی آنها با دولومیتی‌شدن و انحلال، رفتار پیچیده‌ای از خود نشان می‌دهند. فرایندهای دیاژنزی به حدی در ریزرخساره‌های رسوبی تأثیر گذاشته‌اند که به‌طور قطع نمی‌توان مکان هریک از فرایندهای دیاژنزی را در نمودار پتروفیزیکی لوسیا مشخص کرد. دولومیتی‌شدن بسته به اندازهٔ بلورها و همراهی انحلال با آن در کلاس‌های مختلف لوسیا قرار می‌گیرد (شکل ۹، N). ولی تخلخل‌های جدا از هم، درون‌دانه‌ای و قالبی که جزو تخلخل‌های واگی جدا محسوب می‌شوند، در سمت راست نمودار و بیرون از کلاس‌های لوسیا جای گرفته‌اند (شکل ۸، B و شکل ۹، K). انیدریت دربرگیرنده و پرکنندهٔ تخلخل و نیز فشردگی باعث شده‌اند داده‌ها در قسمت‌های پایینی کلاس‌ها جای گیرند (شکل ۹، L و M).

در ریزرخساره‌های اینتراکلست بایوکلست پکستون تا گرینستون (MF13) و اینتراکلست گرینستون (MF14) پشته‌های زیرآبی، با توجه به بافت دانه پشتیبان آنها، نمونه‌های کلاس ۱ اینتراکلست بایوکلست پکستون تا گرینستون حدود ٪۱۲ است و کلاس ۱ و ۲ اینتراکلست گرینستون به ترتیب ٪۵ و ٪۲۰ است؛ در صورتی که نمونه‌های کلاس ۳ و غیرمخزنی فراوانی بیشتری دارند؛ این امر به علت فرایندهای دیاژنزی در این دو ریزرخساره است. گسترش سیمان کلسیتی و تشکیل ندول‌های انیدریت باعث شده است داده‌های آنها بیشتر در پایین کلاس ۳ و قسمت غیرمخزنی نمودار جای گیرند (شکل ۹، O)؛ این امر به‌شدت در کاهش کیفیت مخزنی

http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9

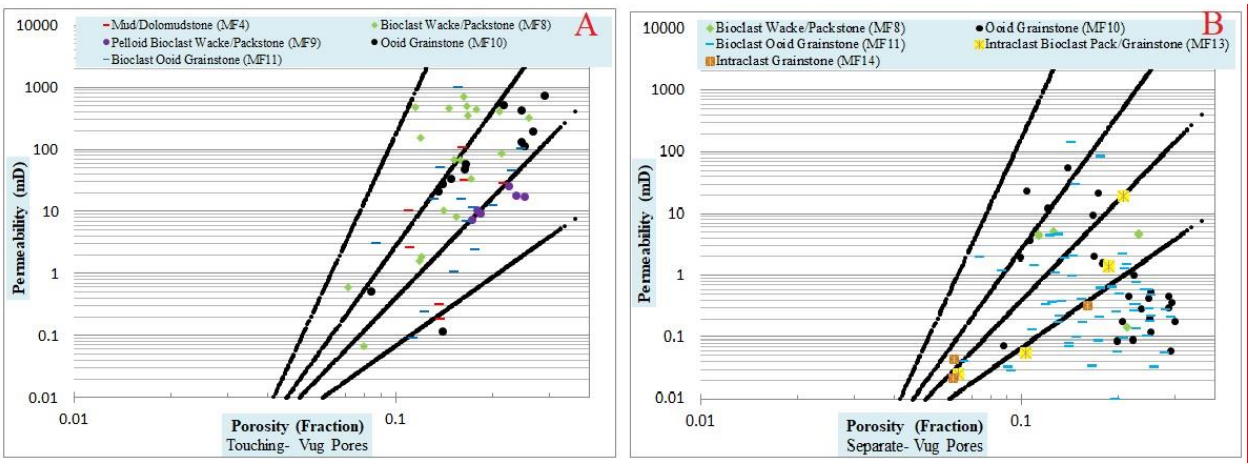
آنها مؤثر بوده است (شکل‌های ۷ و ۱۰). در بعضی داده‌ها به دلیل بازبودن تخلخل بین دانه‌ای در ریزرخسارهٔ اینتراکلست گرینستون، داده‌های آنها در کلاس ۲ قرار گرفته‌اند.

داده‌های ریزرخسارهٔ بایوکلست وکستون (MF15) که به دریای باز مربوط است، بیشتر در پایین قسمت غیرمخزنی نمودار جای گرفته‌اند (شکل ۷)؛ به دلیل گل پشتیبان بودن، وضعیت مخزنی ضعیفی دارند و قسمت نمونه‌های غیرمخزنی از فراوانی بیشتری برخوردارند (شکل ۱۰).



شکل ۷- تخلخل‌های بین دانه‌ای ریزرخساره‌های بخش فوقانی سازند دالان و سازند کنگان در نمودار پتروفیزیکی لوسیا (Lucia 1995, 2007)

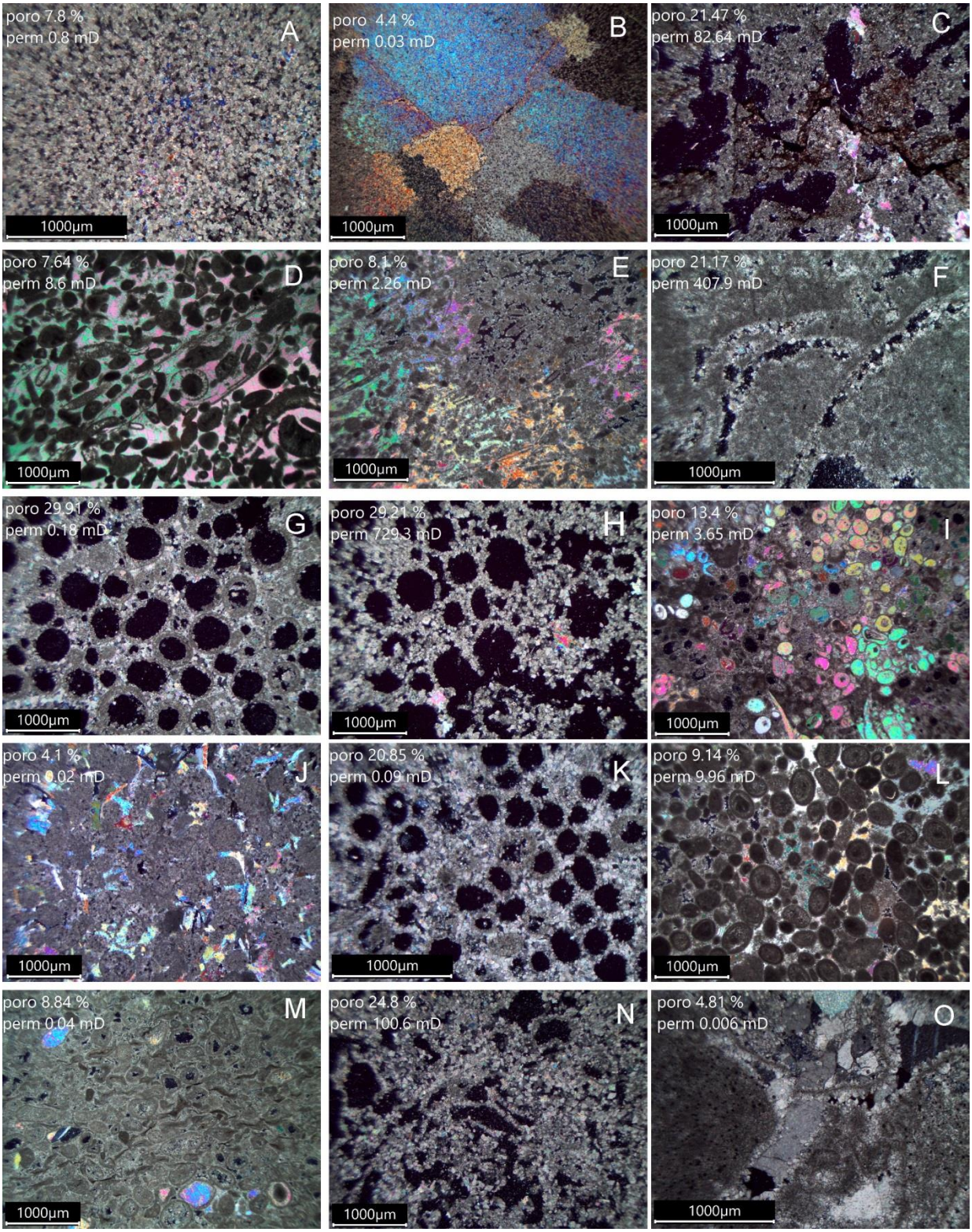
Fig 7- Interparticle porosity in microfacies of the upper part of Dalan Formation and Kangan Formation in Lucia Petrophysical Diagram (Lucia 1995, 2007)



شکل ۸- تخلخل‌های واگی ریزرخساره‌های توالی مطالعه‌شده: **A**. تخلخل‌های مرتبط، **B**. تخلخل‌های غیرمرتبط در نمودار لوسیا (Lucia 1995, 2007)

Fig 8- Vuggy porosity in microfacies of the studied sequence-A: Touching porosity, B: Separate porosity in Lucia diagram (Lucia 1995, 2007)

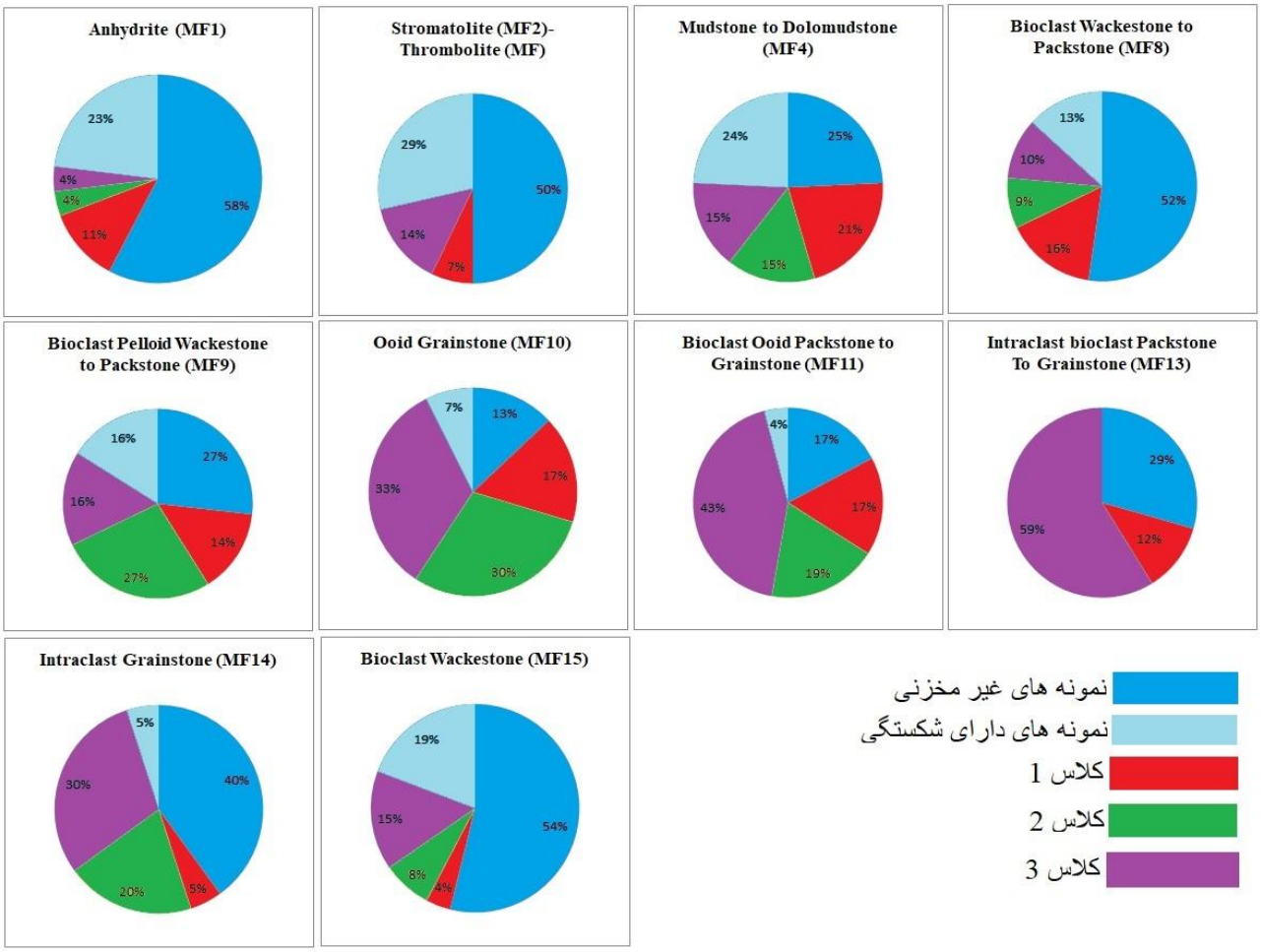
http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9



شکل ۹- ریزرخساره‌ها و فرایندهای دیاژنزی به همراه داده‌های تخلخل و تراوایی

Fig 9- Microfacies and diagenetic processes with porosity and permeability data

http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9



شکل ۱۰- درصد فراوانی ریزرخساره‌ها در کلاس‌های پتروفیزیکی لوسیا با محاسبهٔ RFN

Fig 10- Percentage of microfacies in Lucia petrophysical classes with RFN calculation

ریزرخساره‌ها و فرایندهای دیاژنزی مؤثر بر آنها، توأم با یکدیگر در توزیع داده‌ها در کلاس‌های پتروفیزیکی لوسیا و کیفیت مخزنی نقش داشته‌اند؛ ولی مهم‌ترین عامل، توزیع تخلخل و تراوایی در مخازن کربناتهٔ دیاژنز است (Lucia 2007; Ahr 2008). در این مطالعه نیز دیاژنز بر ریزرخساره‌ها تأثیر زیادی گذاشته و سهم بسزایی در کنترل کیفیت مخزنی داشته است. بر اثر دیاژنز، تخلخل از یک گروه وارد گروه دیگر شده است؛ اوئید گرینستون‌ها (MF10) با داشتن هر سه نوع تخلخل بین دانه‌ای، قالبی مرتبط و قالبی غیرمرتبط این موضوع را تأیید می‌کنند. فرایندهای دولومیتی‌شدن و انحلال تأثیر مثبت و سیمان کلسیتی، تشکیل ندول‌های انیدریت و فشردگی اثر منفی بر کیفیت مخزنی گذاشته‌اند.

نتیجه

براساس مطالعات صورت‌گرفته درمجموع ۱۵ ریزرخسارهٔ اصلی مربوط به ۴ کمربند رخساره‌ای پهنهٔ جزر و مدی، لاگون، پشته‌های زیرآبی و دریای باز در یک محیط کم‌شیب کربناته شناسایی شد. فرایندهای دیاژنزی سیمانی‌شدن کلسیتی، دولومیتی‌شدن، تشکیل ندول و سیمان‌های انیدریتی، انحلال و فشردگی بر ریزرخساره‌ها تأثیر گذاشته است. بررسی ریزرخساره‌ها با استفاده از نمودار پتروفیزیکی لوسیا و نیز تعیین درصد فراوانی کلاس‌های پتروفیزیکی در هر ریزرخساره نشان داد علاوه بر خصوصیات رسوبی مشابه، دیاژنز نیز نقش بسیار مهمی در تغییر و دورشدن خواص

http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9

پتروفیزیکی داده‌ها و قرارگیری آنها در کلاس‌های پتروفیزیکی لوسیا داشته است؛ به‌طوری که انحلال و دولومیتی‌شدن باعث شده‌اند داده‌ها در همهٔ قسمت‌های نمودار پخش شوند. با توجه به نوع ریزرخساره و شدت این دو فرایند، داده‌های آن بیشتر در قسمت‌های بالایی کلاس‌های ۱ و ۲ لوسیا جای گرفته‌اند. انحلال آلوکم‌ها به‌ویژه اوئیدها و ایجاد تخلخل‌های قالبی و جدا از هم باعث قرارگیری داده‌ها در کلاس ۳ لوسیا شده است. سیمانی‌شدن کلسیتی و تشکیل ندول‌های انیدریت با توجه به‌شدت آنها و همچنین نوع ریزرخساره به قرارگیری داده‌ها در قسمت غیرمخزنی و قسمت پایینی کلاس‌ها منجر شده‌اند. سنگ مخزن این میدان در مقیاس میکروسکوپی (مقاطع نازک) بسیار ناهمگنی دارد و ویژگی‌های مخزنی آن تابع فرایندهای رسوبی و دیاژنزی است. همین امر باعث شده است نمونه‌ها در تمامی قسمت‌های نمودار پتروفیزیکی لوسیا جای گیرند؛ درصد فراوانی ریزرخساره‌ها در هریک از کلاس‌های پتروفیزیکی لوسیا این موضوع را تأیید می‌کند. ریزرخساره‌هایی که درصد فراوانی کلاس‌های ۱ و ۲ آنها از مقدار بیشتری برخوردار است، کیفیت مخزنی بهتری دارند. براساس پراکندگی ریزرخساره‌ها در کلاس‌های مختلف لوسیا مشخص شد ریزرخساره و دیاژنز، هر دو به صورت همزمان، ولی با نسبت‌های متفاوت روی نمودار لوسیا تأثیر داشته‌اند. درمجموع بررسی‌ها نشان می‌دهد نمودار پتروفیزیکی لوسیا، یکی از ابزارهای ارزشمند در بررسی عوامل مؤثر بر کیفیت مخزنی به شمار می‌آید.

تشکر و قدردانی

از شرکت نفت فلات قارهٔ ایران برای در اختیار قرار دادن داده‌های مورد نیاز به‌منظور انجام این پژوهش صمیمانه سپاسگزاری می‌شود.

References

Aali J. Rahimpour-Bonab H. and Kamali M.R. 2006. Geochemistry and origin of the world's largest gas field from Persian Gulf, Iran. Petroleum Science and Engineering, 50: 161-175.

Abdolmaleki J. Tavakoli V. and 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.

Ahr W.M. 2008. Geology of carbonate reservoir. John Wiley and Sons, Chichester, 296 p.

Angiolini L. Balini M. Garzanti E. Nicora A. Tintori A. Crasquin S. and Muttoni G. 2003. Permian climate and paleogeographic changes in northern Gondwana: Khuff Formation of interior Oman. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 191: 269-300.

Bordenave M. L. 2014. Petroleum systems and distribution of the oil and gas fields in the Iranian part of the Tethyan region. AAPG Special Volumes, 505- 540.

Dunhum R.J. 1962. Classification of carbonate rocks according to depositional texture. AAPG, 108-121.

Ehrenberg S. N. Nadeau P. H. and Aqrawi A. A. M. 2007. Comparison of Khuff and Arab reservoir potential throughout the Middle East. AAPG Bulletin, 91(3): 275-286.

Enayati-Bidgoli A. and Rahimpour-Bonab H. 2016. A geological based reservoir zonation scheme in a sequencestratigraphic framework: A case study from the Permo-Triassic gas reservoirs, Offshore Iran. Marine and Petroleum Geology, 73: 36-58.

Esrafili-Dizaji B. and Rahimpour-Bonab H. 2009. Effects of depositional and diagenetic characteristics on carbonate reservoir quality: a case study from the South Pars gas field in the Persian Gulf. Petroleum Geoscience, 15(4): 325-344.

Flügel E. 2010. Microfacies Analysis of Carbonate Rocks, Analysis, Interpretation and Application. Springer Verlag, 976 p.

Honarvar Nazari M. Tavakoli V. Rahimpour-Bonab H. and Sharifi-Yazdi M. 2019. Investigation of factors influencing geological heterogeneity in tight gas carbonates, Permian reservoir of the Persian Gulf. Journal of Petroleum Science and Engineering, 183: 106-124.

Insalaco E. Virgone A. Courme B. Gaillot J. Kamali M. Moallemi A. Lotfpour M. and 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.

Jafarian A. Fallah-Bagtash R. Mttern F. Heubeck Ch. 2017. Reservoir quality along a homoclinal carbonate ramp deposit: the Permian upper Dalan Formation, South Pars Field, Persian Gulf Basin. Marine and Petroleum Geology, 88: 587-604.

Kashfi M. 2000. Greater Persian Gulf Permian-

Rahimpour-Bonab H. Esrafili-Dizaji B. and Tavakoli V. 2010. Dolomitization and anhydrite precipitation in Permo-Triassic carbonates at the South Pars gas field, offshore Iran. Petroleum Geology, 33(1): 43-66.

Sharland P.R. Archer R. Casey D.M. Davies R.B. Hall S.H. Heyward A.P. Horbury A.D. and Simmons M.D. 2001. Arabian Plate sequence stratigraphy. Gulf PetroLink, Bahrain, Special Publication 2, 371 p.

Skalinski M. and Kenter J.A.M. 2014. Carbonate petrophysical rock typing: integrating geological attributes and petrophysical properties while linking with dynamic behavior. Geological Society, London, Special Publications, 406: 229–259.

Szabo F. and Kheradpir A. 1978. Permian and Triassic Stratigraphy, Zagros Basin, South-West Iran. Petroleum Geology, 1(2): 57-82.

Tavakoli V. 2015. Chemostratigraphy of the Permian–Triassic Strata of the Offshore Persian Gulf, Iran. In: Ramkumar M. (Ed.) Chemostratigraphy: Concepts, Techniques, and Applications. Elsevier, Amsterdam, 373-393.

Tavakoli V. and Jamalian A. 2018. Microporosity evolution in Iranian reservoirs, Dalan and Dariyan formations, the central Persian Gulf. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 52: 155-165.

Tavakoli V. and Jamalian A. 2019. Porosity evolution in dolomitized Permian–Triassic strata of the Persian Gulf, insights into the porosity origin of dolomite reservoirs. Journal of Petroleum Science and Engineering, 181: 106-191.

Tavakoli V. and Rahimpour-Bonab H. 2012. Uranium depletion across Permian–Triassic Boundary in Persian Gulf and its implications for paleooceanic conditions. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 350: 101-113.

Tavakoli V. Rahimpour-Bonab H. and Esrafili-Dizaji B. 2011. Diagenetic controlled reservoir quality of South Pars gas field, an integrated approach. Geoscience, 343(1): 55-71.

Vincent B. Emmanuel L. Houel P. and Loreau J.P. 2007. Geodynamic control on carbonate diagenesis: Petrographic and isotopic investigation of the Upper Jurassic formations of the Paris Basin (France). Sedimentary Geology, 197(3): 267–289.

Warren J.K. 2006. Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons. Springer Verlag, Brunei, 1036 p.

Yarmohammadi S. Wood D.A. and Kadkhodaie A. 2020. Reservoir microfacies analysis exploiting microscopic image processing and classification algorithms applied to carbonate and sandstone reservoirs. Marine and Petroleum Geology, 121: 104609.

Triassic. Oil and Gas Journal, 98(45): 36-43.

Kashfi M.S. 1992. Geology of Permian supergiant gas reservoir in the greater Persian Gulf area. Journal Petroleum Geology, 15(3): 465-480.

Kopaska-Merkel D.C. and Mann S.D. 1991. Pore facies of Smackover carbonate reservoirs in southwest Alabama. Gulf Coast Association of Geological Societies Transactions, 41: 374-382.

Lucia F.J. 1995. Rock fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization. AAPG Bulletin, 79: 1275-1300.

Lucia F.J. 1999. Carbonate reservoir characterization. Springer, New York, 226 p.

Lucia F.J. 2007. Carbonate reservoir characterization: an integrated approach. 2nd. Edition. Springer-Verlag, Berlin, 336 p.

Maurer F. Martin R. Rettori R. Hillgarther H. Cirilli S. 2009. The geology of khuff outcrop analogues in the Musandam Peninsula, United Arab Emirates and Oman. GeoArabia, 14: 125–158.

Mehrabi H. Mansouri M. Rahimpour-Bonab H. Tavakoli V. and Hassanzadeh M. 2016. Chemical compaction features as potential barriers in the Permian-Triassic reservoirs of Southern Iran. Journal of Petroleum Science and Engineering, 145: 95-113.

Moore C.H. 2001. Carbonate reservoirs porosity evolution and diagenesis in a sequence stratigraphic framework. Elsevier, Amsterdam, 444 p.

Moradpour M. Zamani Z. and Moallemi S.A. 2008. Controls on reservoir quality in the lower triassic Kangan formation, Southern Persian Gulf. Journal of Petroleum Geology, 31(4): 367-385.

Nazemi M. Tavakoli V. Rahimpour-Bonab H. Hosseini M. and Sharifi-Yazdi M. 2018. The effect of carbonate reservoir heterogeneity on Archie's exponents (a and m), an example from Kangan and Dalan gas formations in the central Persian Gulf. Journal of Natural Gas Science and Engineering, 59: 297-308.

Nazemi M. Tavakoli V. Sharifi-Yazdi M. Rahimpour-Bonab H. and Hosseini M. 2019. The impact of micro-to macro-scale geological attributes on Archie's exponents, an example from Permian–Triassic carbonate reservoirs of the central Persian Gulf. Marine and Petroleum Geology, 102: 775-785.

Rafiei M. Rahimpour-Bonab H. Tavakoli V. and Khorasani E. 2016. Quantifying sedimentary and diagenetic controls on fracturing: an application in rock engineering systems. Journal of Geophysics and Engineering, 13(6): 928-939.

Rahimpour-Bonab H. Asadi-Eskandar A. and Sonei R. 2009. Effects of the Permian–Triassic boundary on reservoir characteristics of the South Pars gas field, Persian Gulf. Geological, 44(3): 341-364.

http://dx.doi.org/10.22108/jssr.2021.25404 https://dorl.net/dor/20.1001.1.20087888.1400.37.2.1.9