

Original Research Paper

Evaluation of the role of dolomitization and anhydrite cementation on mechanical behavior in Kangan carbonates (Case study: South Pars gas field, Persian Gulf)

Shirin Samani¹, Ali Uromeihy^{1*}, Amirhossein Enayati², Imandokht Mostafavi³ and Misha Pezeshki³

¹ Department of Engineering Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

² Geology and Geophysics Department, Tehran Energy Consultants (TEC Co.), Tehran, Iran

³ Department of Geology, Pars Oil and Gas Company, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2023 July 29

Accepted: 2023 March 17

Available online: 2023 December 22

Keywords:

Kangan Formation

Carbonate reservoirs

Diagenesis

Dolomitization

Mechanical characterization

ABSTRACT

Diagenetic processes in carbonate rocks can be considered as one of the most important factors influencing the inherent characteristics of this type of reservoir on a small as well as large scale. Considering the importance of knowing the mechanical characteristics of reservoir rocks in geomechanical modeling and its application in the exploitation and development of hydrocarbon fields, it is necessary to find out how lithological characteristics affect its rock mechanical behavior. In this study, the impact of two diagenetic processes (Dolomitization and Anhydrite cement) on the physical and mechanical characteristics (such as Uniaxial Compressive Strength, Young's modulus, Cohesion, and Internal friction angle) of carbonate reservoirs of the Kangan Formation, are addressed. The evaluations have been done in two phases: i.e., lithological studies and rock mechanical tests. The results show that changes in mechanical properties are strongly influenced by diagenetic processes. The two main influential features on mechanical characteristics are dolomitization and anhydrite cementation, which strongly affect porosity, dominant pore type, and mineralogy. The results show that dolomitization in the studied samples has caused an increase in porosity and a decrease in strength and elasticity. While the presence of anhydrite has caused an improvement in the resistance characteristics with an opposite effect.

1. Introduction

Carbonate rocks are one of the most important hydrocarbon hosts in the world. Therefore, a comprehensive study of its sedimentary characteristics and diagenesis history of this type of reservoirs is crucial. These studies lead to a better understanding of the physical

characteristics and reservoir quality and help to better estimate the mechanical behavior of these reservoir rocks. Diagenetic processes can be considered as one of the most important factors controlling porosity and permeability, which are very important in recognizing

* Corresponding author: Ali Uromeihy; E-mail: uromeiea@modares.ac.ir

Citation:

Samani, Sh., Uromeihy, A., Enayati, A. H., Mostafavi, I., and Pezeshki, M., 2023. Evaluation of the role of dolomitization and anhydrite cementation on mechanical behavior in Kangan carbonates (Case study: South Pars gas field, Persian Gulf). Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, 33(4), 130, 81-94. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.390129.2072>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

doi: 10.22071/gsj.2023.390129.2072

doi: 20.1001.1.10237429.1402.33.4.3.6



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

the type, size and distribution of pores. Diagenetic processes can strongly affect pore networks, petrophysical properties, reservoir quality, and elastic properties, especially in carbonate rocks (Eberli et al., 2003; Baechle et al., 2008; Fournier and Borgomano, 2009; Fournier et al., 2011; Zhao et al., 2013; Makhloufi et al., 2013; Saneifar et al., 2015; Wang et al., 2015; Janjuhah et al., 2019). Considering the heterogeneity affected by diagenesis processes in carbonate rocks, estimating the mechanical properties in this type of reservoirs is much more difficult than in sandstone reservoirs.

A comprehensive understanding of mechanical characteristics of reservoir rocks is important and necessary in all stages of exploration, drilling, production and development (Edimann et al., 1998; Mateus et al., 2007; García et al., 2008; Abdideh and Ghasemi, 2014). The strength and elastic characteristics of reservoirs are widely used in hydraulic fracturing designs and geomechanical modeling of reservoirs (Eshkalak et al., 2014). To this purpose, it is very important to know the type and degree of the diagenesis alteration in this type of reservoirs.

The Early Triassic Kangan Formation carbonates are one of the most important hydrocarbon reservoirs in the Persian Gulf and Iran (Insalaco et al., 2006). The diagenetic processes of this formation have been studied by numerous researchers (Esrafil-Dizaji and Rahimpour-Bonab, 2009; Rahimpour-Bonab et al., 2010; Tavakoli et al., 2011; Mehrabi et al., 2015; Abdolmaleki et al., 2016; Enayati-Bidgoli and Rahimpour-Bonab, 2016; Tavakoli and Jamalain, 2019; Sharifi-Yazdi et al., 2020). However, the effect of diagenesis on the mechanical properties of this carbonate formation have not yet been addressed.

In this study, first, the sedimentary facies and the most influential diagenesis processes were identified by using the thin section petrography. Subsequently the effects of diagenesis on the mechanical behavior of these rocks were addressed by examining the physical and mechanical characteristics of the selected samples. It is hoped that the results of this study can contribute to a better and more optimal exploitation of the Kangan Formation in the studied field.

The studied well is located in South Pars offshore gas field. The Upper Permian and Lower Triassic successions are the main gas reservoirs in this field. From stratigraphic point of view, the Kangan Formation disconformably overlies the Dalan Formation. This contact corresponds to the Permian-Triassic boundary (Kashfi, 1992; Rahimpour-Bonab et al., 2009; Tavakoli, 2015). The Kangan Formation is covered by the Dashtak Formation that acts as a cap rock (Pöppelreiter et al., 2011). The thickness of the formation varies from 140m to 180m in the central Persian Gulf (Enayati-Bidgoli and Rahimpour-Bonab, 2016). In the studied well, it is about 175 meter thick. From a reservoir point of view the Kangan Formation comprises two reservoir units: i.e., the K2 or basal unit, made up of limestones and dolostones, while K1 consists of

dolostones and anhydrite-bearing dolostones. K2 starts with early Triassic thrombolites (Insalaco et al., 2006) and is followed by oncoid-oid shoal facies (Enayati-Bidgoli et al., 2014). It is the most porous part of the Kangan Formation. K1 is mainly composed of non-reservoir lagoonal facies along with some intercalations of good reservoir potential shoal facies.

2. Research methodology

This study is based on 175 meters of core, 580 thin sections (used in the sedimentology and rock mechanical study) and 46 cylindrical samples selected for mechanical tests in one of the wells of the South Pars gas field. Thin sections were studied under a polarizing light microscope. To define microfacies and depositional textures, the Dunham (1962) and Flügel (2013) classification schemes for carbonate rocks were used. All thin sections were stained with alizarin red solution (Dickson, 1965) for differentiating dolomite from calcite. 15 samples with different textural, facies and mineralogical characteristics have been examined and studied with a Zeiss SIGMA/VP electron microscope equipped with X-Ray detector. 15 and 46 samples were analyzed in terms of major and minor elements and mineralogy, respectively, based on XRF and XRD at Tarbiat Modares and KU Leuven universities. Physical and mechanical tests, including porosity measurement, density measurement, Uniaxial and Triaxial compressive strength under ambient temperature conditions, have been performed using standards (ASTM, 2004; Hudson and Ulusay, 2007). The multistage triaxial test was performed under three confining pressures of 20, 30 and 40 MPa.

3. Results and Discussions

Key petrographical features in this study were skeletal and non-skeletal allochems, sedimentary texture, and diagenetic features. They allowed to identify nine depositional and one fully crystalline diagenetic facies. Main sedimentological features of the identified microfacies in the studied samples are summarized in Table 1.

Generally, the Permian-Triassic carbonate successions in the Persian Gulf have been affected by several diagenetic processes. Detailed thin sections studies showed that micritization, cementation, dolomitization, recrystallization, chemical and physical compaction, dissolution and different forms of anhydrite cementation/replacements have been the main and influential diagenesis processes in the studied interval. However, dolomitization and anhydrite cementation are the most important and influential diagenesis processes in the 46 samples selected for rock mechanical tests.

According to the main goal of this study, the samples have been classified into four dolomite groups based on crystal size and degree of dolomitization development. The first group displays

small crystals that are scattered. Microscopic observations and image processing show the less than 10% dolomite occur in the samples of this group. In the second group, the crystals are slightly larger and in the form of sugar crystals that are affected by the texture (the size of the crystals is smaller than 20 microns. They occur in different parts of the samples. The third group includes samples that developed dolomitization that affected all samples. The size of the crystals in these samples varies between 20 and 100 microns. In the samples of group four, the crystals are well shaped and larger than 100 microns. In this group the original rock texture is completely destroyed and the development of dolomitization has reached its maximum value. The results of this research show that the porosity increases by increasing intensity and development of dolomitization. However, the effect of dolomitization on increasing or decreasing porosity is still debated in different studies.

As figures 6 to 9 show, the mechanical properties decrease with increasing development of dolomitization, although in this study, the presence of anhydrite in the second group of samples caused a significant increase in mechanical strength. The dispersion of the mechanical properties in group one is more than in the other groups. In this dolomite group, the diversity in texture and mineralogy is more than in the other groups, these variations can be considered as the main reason for this dispersion. The samples of the second group can be considered the most resistant samples studied. Their crystalline skeleton created by anhydrite cementation is the main reason for it. In the samples of the third and fourth groups, despite the wide range of porosity values, the mechanical properties are moderate and weak, respectively. Dolomitization in the third and especially the fourth group have a very clear effect on the physical and resistance characteristics of the rocks. In these groups, the process of dolomitization has led to the emergence and development of semi- to well-developed crystals that have completely obliterated or destroyed the primary textures. These samples are often characterized by high values of porosity and low mechanical resistance. Pervasive dolomitization results in porosity values above 20% and a significant reduction in mechanical properties.

Anhydrite cement was observed as cavity filler, intergranular space filler and poikilotopic cement in the studied samples. Regarding to the time of formation of this cement, it happened after dissolution and dolomitization or developed simultaneously with dolomitization. This type of cementation has led to the closure of dissolution holes. Anhydrite cement caused a significant decrease in porosity by partially or completely filling the intergranular space.

Consequently, anhydrite cementation is another major diagenetic process that affects mineralogy, pore system characteristics, and consequently porosity, as well as mechanical properties. In some samples, this diagenetic process reduces the porosity to almost zero by filling most of the pore space. Anhydrite cementation makes the rock more cohesive and gives it a more brittle behavior. It also increases its elastic properties.

4. Conclusion

In this study, the Kangan carbonates were evaluated in one of the wells of South Pars gas field. The results of the microscopic study of thin sections led to the identification of nine microfacies reflecting tidal-flat, lagoon, and shoal environments. Several diagenesis processes affected the studied sequence, among which dolomitization and anhydrite cementation were given special attention. These have significant impact on porosity as most important factors affecting mechanical properties. In order to better understand the impact of these diagenetic processes, four dolomite groups were differentiated according to the size of the crystals and the degree of development of dolomitization. The evaluation of mechanical characteristics in each of the groups showed that dolomitization in the studied sequence generally caused an increase in porosity, a decrease in mechanical strength and modulus of elasticity. However, the effect of anhydrite is completely reversed and its presence in the samples of the second dolomite group (with an average of 25%) compared to the fully dolomitized samples (fourth group) increased the mechanical strength results by 2 to 4 times. The dispersion of mechanical properties in the first group of dolomites justified by the difference in other properties such as texture.

بررسی نقش دو فرایند دیاژنزی دولومیتی شدن و سیمان انیدریتی در رفتار مکانیکی سنگ‌های کربناته سازند کنگان (میدان گازی پارس جنوبی، خلیج فارس)

شیرین سامانی^۱، علی ارومیه‌ای^{۱*}، امیرحسین عنایتی^۲، ایمان‌دخت مصطفوی^۳ و میشا پزشکی^۳

^۱ گروه زمین‌شناسی مهندسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

^۲ بخش زمین‌شناسی و ژئوفیزیک، شرکت مشاوران انرژی تهران، تهران، ایران

^۳ بخش زمین‌شناسی، شرکت نفت و گاز پارس، تهران، ایران

چکیده

فرایندهای دیاژنزی در سنگ‌های کربناته مهم‌ترین عوامل تأثیرگذار بر ویژگی‌های این نوع مخازن هستند. همچنین با توجه به اهمیت شناخت ویژگی‌های مکانیکی سنگ مخزن‌ها در مدل‌سازی ژئومکانیکی و کاربرد آن یافتن نحوه تأثیرگذاری فرایندهای دیاژنزی بر این ویژگی‌ها نیز ضروری است. در این پژوهش به بررسی نحوه اثرگذاری دو فرایند دیاژنزی دولومیتی شدن و سیمان انیدریتی بر ویژگی‌های مکانیکی مخازن کربناته سازند کنگان مانند مقاومت فشاری تک محوری، مدول الاستیسیته، چسبندگی و زاویه اصطکاک داخلی سنگ پرداخته شده است. مطالعه و ارزیابی‌ها در دو فاز مطالعات سنگ‌شناختی و اندازه‌گیری ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهند که تغییرات در ویژگی‌های مکانیکی به شدت تحت تأثیر این دو فرایند دیاژنتیکی که به شدت بر تخلخل، نوع منافذ و کانی‌شناسی تأثیر می‌گذارد، هستند. برای بررسی بیشتر دولومیت‌ها با توجه به شدت دولومیتی شدن به چهار گروه تفکیک شده‌اند. مطابق با نتایج دولومیتی شدن به طور کلی در نمونه‌های مورد مطالعه سبب افزایش تخلخل، کاهش مقاومت و مدول الاستیسیته شده است هرچند با اثر دیگر عوامل گروه دوم و چهارم به ترتیب مقاوم‌ترین و کم‌مقاوم‌ترین نمونه‌ها را در خود جای داده‌اند. حضور انیدریت به طور کاملاً معکوس و سبب بهبود ویژگی‌های مقاومتی شده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۲۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۵/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۱۰/۰۱

کلیدواژه‌ها:

سازند کنگان

مخازن کربناته

دیاژنزی

دولومیتی شدن

ویژگی‌های مکانیکی

۱- پیش‌نوشتار

سنگ‌های کربناته یکی از بزرگ‌ترین میزبان‌های مخازن نفت و گاز جهان هستند. از این نظر، درک و مطالعه ویژگی‌های رسوبی و پیشینه دیاژنزی این نوع مخازن با استفاده از روش‌های مختلف همواره ضروری به شمار آمده است. شناخت این ویژگی‌ها به ارزیابی بهتر از ویژگی‌های فیزیکی و کیفیت مخزنی انجامیده که در بررسی رفتار مکانیکی سنگ مخزن‌ها بسیار با اهمیت هستند. در این میان، فرایندهای دیاژنزی را می‌توان به عنوان مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده تخلخل و نفوذپذیری برشمرده که در شناخت نوع، اندازه و توزیع منافذ اهمیت بسیار دارند. فرایندهای دیاژنتیکی می‌توانند به شدت بر شبکه‌های منفذی، ویژگی‌های پتروفیزیکی، کیفیت مخزن و ویژگی‌های الاستیک، به ویژه در سنگ‌های کربناته تأثیر بگذارند (Eberli et al., 2003; Baechle et al., 2008; Fournier and Borgomano, 2009).

Fournier et al., 2011; Zhao et al., 2013; Makhouloufi et al., 2013; Saneifar et al., 2015; Wang et al., 2015; Janjuhah et al., 2019; Gharechelou et al., (2020a,b).

با توجه به پیچیدگی متاثر از فرایندهای دیاژنزی در سنگ‌های کربناته، تخمین ویژگی‌های مکانیکی در این نوع مخازن به مراتب سخت‌تر از مخازن ماسه‌سنگی می‌باشد.

از سوی دیگر، شناخت ویژگی‌های مکانیکی این نوع سنگ مخزن‌ها در بسیاری از مراحل مختلف اکتشاف، حفاری، تولید و توسعه بااهمیت و کارآمد است (Edimann et al., 1998; Mateus et al., 2007; García et al., 2008; Abdideh and Ghasemi, 2014). ویژگی‌های مقاومتی و الاستیک مخازن به طور گسترده در مدل‌سازی

* نویسنده مسئول: علی ارومیه‌ای؛ E-mail: uromeiea@modares.ac.ir

ماخذنگاری:

سامانی، ش.، ارومیه‌ای، ع.، عنایتی، ا. ح.، مصطفوی، ا. و پزشکی، م.، ۱۴۰۲، بررسی نقش دو فرایند دیاژنزی دولومیتی شدن و سیمان انیدریتی در رفتار مکانیکی سنگ‌های کربناته سازند کنگان (میدان گازی پارس جنوبی، خلیج فارس). فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۳(۴)، ۸۱-۹۴. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.390129.2072>

doi: 10.22071/gsj.2023.390129.2072



doi: 20.1001.1.10237429.1402.33.4.3.6

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شده‌اند. آزمون‌های فیزیکی و مکانیکی شامل تخلخل‌سنجی، اندازه‌گیری چگالی، مقاومت فشاری تک محوری و سه محوری با استفاده از استانداردهای موجود (ASTM, 2004; Hudson and Ulusay, 2007) در آزمایشگاه شرکت مصفا انجام شده است. در ادامه همراه با نتایج، ویژگی‌ها و چگونگی انجام آزمون‌ها آورده شده است.

۳- داده‌ها و اطلاعات

۳-۱- ویژگی‌های سنگ‌شناختی رسوبی

۳-۱-۱- رخساره

براساس ارزیابی میکروسکوپی مقاطع نازک مربوط به توالی مورد مطالعه ۹ ریزرخساره رسوبی و یک رخساره دیاژنزی شناسایی شده است که در محیط‌های پهنه جزرومدی، لاگون و شول و دریای باز نهشته شده‌اند. در ادامه، این ریزرخساره‌ها توصیف و تفسیر شده‌اند:

۳-۱-۱-۱- ریز رخساره دولومادستون با بافت فنسترال و ندولار (FG1: Fenestral-nodular dolomudstone): این رخساره بیشتر با دولومادستون دارای بافت ندولار و فنسترال مشخص می‌شود. این رخساره در مغزه‌های حفاری به‌صورت متراکم به رنگ کرم تیره تا قهوه‌ای دیده می‌شود. در مقطع نازک معمولاً هیچ جزء اسکلتی و غیراسکلتی، دیده نمی‌شود. به‌جز لامیناسیون، ساختار رسوبی دیگری آشکار نیست. تمامی ویژگی‌های این رخساره نشان از قرارگیری آن در یک محیط کم انرژی دارد. در مطالعه مقاطع میکروسکوپی این رخساره فاقد پتانسیل مخزنی است. این رخساره حدود ۱۲ درصد از کل رخساره‌های تشکیل‌دهنده سازند کنگان را نشان می‌دهد (شکل ۱-ا).

۳-۱-۱-۲- پکستون بلویدی بایوکلستی (FG2: bioclast peloid packstone): پلویدها مهم‌ترین آلوکم‌های غیراسکلتی در این نمونه‌ها می‌باشند. در این نمونه‌ها آشفستگی زیستی و لامیناسیون نیز دیده می‌شود. در مغزه‌ها به‌صورت دولومیت و آهک دولومیتی و دولومیت آهکی و با رنگ کرم روشن تا خاکستری روشن مشخص می‌شود. در این رخساره نیز وجود گل نشان از محیط آرام با انرژی کم دارد؛ هرچند که وجود جانداران کف‌زی همراه با رخساره‌های میان جزرومدی این رخساره را به محیط لاگون نزدیک‌تر می‌نماید. این رخساره در نمونه‌های مطالعه شده کمتر از ۷ درصد را به خود اختصاص می‌دهد (شکل ۱-ب).

۳-۱-۱-۳- پکستون آئیدی-اینتراکلاستی (FG3: intraclast ooid packstone): این رخساره با پکستون حاوی اینتراکلاست و آئید شناخته می‌شود. به‌طور معمول اینتراکلاست‌های این رخساره از محیط بین جزرومدی و آئیدها از مجموعه شول منشأ گرفته است. ساختار رسوبی ویژه‌ای در این رخساره قابل تشخیص نیست. سنگ‌شناسی اصلی این رخساره دولومیت تا آهک دولومیتی است که در مغزه‌ها معمولاً خاکستری تا کرم تیره دیده می‌شود. در برخی از قسمت‌های بریده‌شده از مغزه‌های حفاری، آثار آشفستگی زیستی ملاحظه شده است. تمامی ویژگی‌ها از جمله جانوران کف‌زی و ساختارهای رسوبی مرتبط به جریان در این رخساره نشان‌دهنده یک محیط کم انرژی در بخش داخلی لاگون می‌باشد. در نمونه‌های مورد مطالعه درصد فراوانی این رخساره در سازند کنگان ۸ درصد است (شکل ۱-ج).

۳-۱-۱-۴- وکستون بایوکلستی - اینتراکلاستی (FG4: Intraclast bioclast wackestone): تفاوت این رخساره با رخساره قبل حضور چشمگیر بایوکلست‌هاست. افزون بر قطعات بایوکلستی، اینتراکلاست‌ها دیگر آلوکم‌های قابل توجه می‌باشند. در بعضی موارد به ندرت آنکوئیدها گزارش شده‌اند. معمولاً بافت گل چیره دارند و آشفستگی زیستی تنها ویژگی رسوبی این ریز رخساره به‌شمار می‌رود. در مقیاس مغزه برش‌خورده، برخی بایوکلست‌های درشت قابل تشخیص است. در مغزه‌های حفاری این رخساره

ژئومکانیکی و طراحی‌های مربوط به شکست هیدرولیکی و شبیه‌سازی مخازن مورد استفاده قرار می‌گیرد (Eshkalak et al., 2014). به همین دلیل شناخت نحوه و میزان اثرگذاری فرایندهای دیاژنزی در این نوع مخازن از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. کربنات‌های سازند کنگان با سن تریاس پیشین یکی از مهم‌ترین مخازن هیدروکربوری در خلیج فارس و ایران هستند (Insalaco et al., 2006). رخساره‌ها و محیط رسوبی و همچنین فرایندهای دیاژنتیکی سازند کنگان توسط پژوهشگران متعددی مورد مطالعه قرار گرفته است (Esrafil-Dizaji and Rahimpour-Bonab, 2009; Rahimpour-Bonab et al., 2010; Esrafil-Dizaji and Harchegani, 2011; Tavakoli et al., 2011; Esrafil-Dizaji et al., 2013; Mehrabi et al., 2015, 2016; Abdolmaleki et al., 2016; Enayati-Bidgoli and Rahimpour-Bonab, 2016; Tavakoli and Jamalain, 2019; Sharifi-Yazdi et al., 2020; Afroogh and Mehrabi, 2023). با این حال، روابط بین ویژگی‌های مکانیکی و اثرات دیاژنتیکی تا به حال در این سازند مورد توجه قرار نگرفته است. در این پژوهش، ابتدا با مطالعه مقاطع نازک در توالی مورد نظر، رخساره‌های رسوبی و فرایندهای دیاژنزی تأثیرگذار شناسایی شده و سپس با بررسی ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی در نمونه‌های انتخاب شده، اثرات دیاژنز بر رفتار مکانیکی سنگ‌ها مورد ارزیابی قرار گرفته است. امید است تا نتایج این مطالعه بتواند به بهره‌برداری بهتر و بهینه‌تر از سازند کنگان در میدان مورد مطالعه کمک کند.

چاه مورد مطالعه در میدان گازی دریایی پارس جنوبی قرار دارد. پارس جنوبی میدان بسیار عظیمی است که سنگ مخزن‌های اصلی آن را سازندهای کربناته توالی پرمین پسین تا تریاس پیشین تشکیل می‌دهند. میدان پارس جنوبی در موقعیت ۵۲ تا ۵۲/۵ درجه خاوری و ۲۶/۵ تا ۲۷ درجه شمالی واقع شده است. از دید چینه‌شناسی، سازند کنگان به‌طور ناپیوسته بر روی سازند دالان قرار گرفته است. این ناپیوستگی با مرز پرمین-تریاس مطابقت دارد (Kashfi, 1992; Rahimpour-Bonab et al., 2009; Tavakoli, 2015). این سازند توسط سازند دشتک پوشیده شده است که به عنوان سنگ پوش عمل می‌کند (Pöppelreiter et al., 2011). ستبرای سازند از ۱۴۰ متر تا ۱۸۰ متر در ناحیه مرکزی خلیج فارس متغیر است (Enayati-Bidgoli and Rahimpour-Bonab, 2016) و در چاه مورد مطالعه حدود ۱۷۵ متر است. سازند کنگان از نظر مخزنی شامل دو واحد مخزنی است. K2 از سنگ‌های آهک و دولوستون تشکیل شده است و با ترومبولیت‌های تریاس پیشین شروع می‌شود (Insalaco et al., 2006) و به دنبال آن رخساره‌های آئیدی و آنکوئیدی قرار می‌گیرد که متخلخل‌ترین قسمت سازند کنگان به‌شمار می‌رود (Enayati-Bidgoli et al., 2014). در حالی که K1 شامل دولوستون‌ها و دولوستون‌های انیدریت‌دار است که به‌طور عمده از رخساره‌های لاگونی غیرمخزنی همراه با برخی از رخساره‌های مخزنی خوب تشکیل شده است.

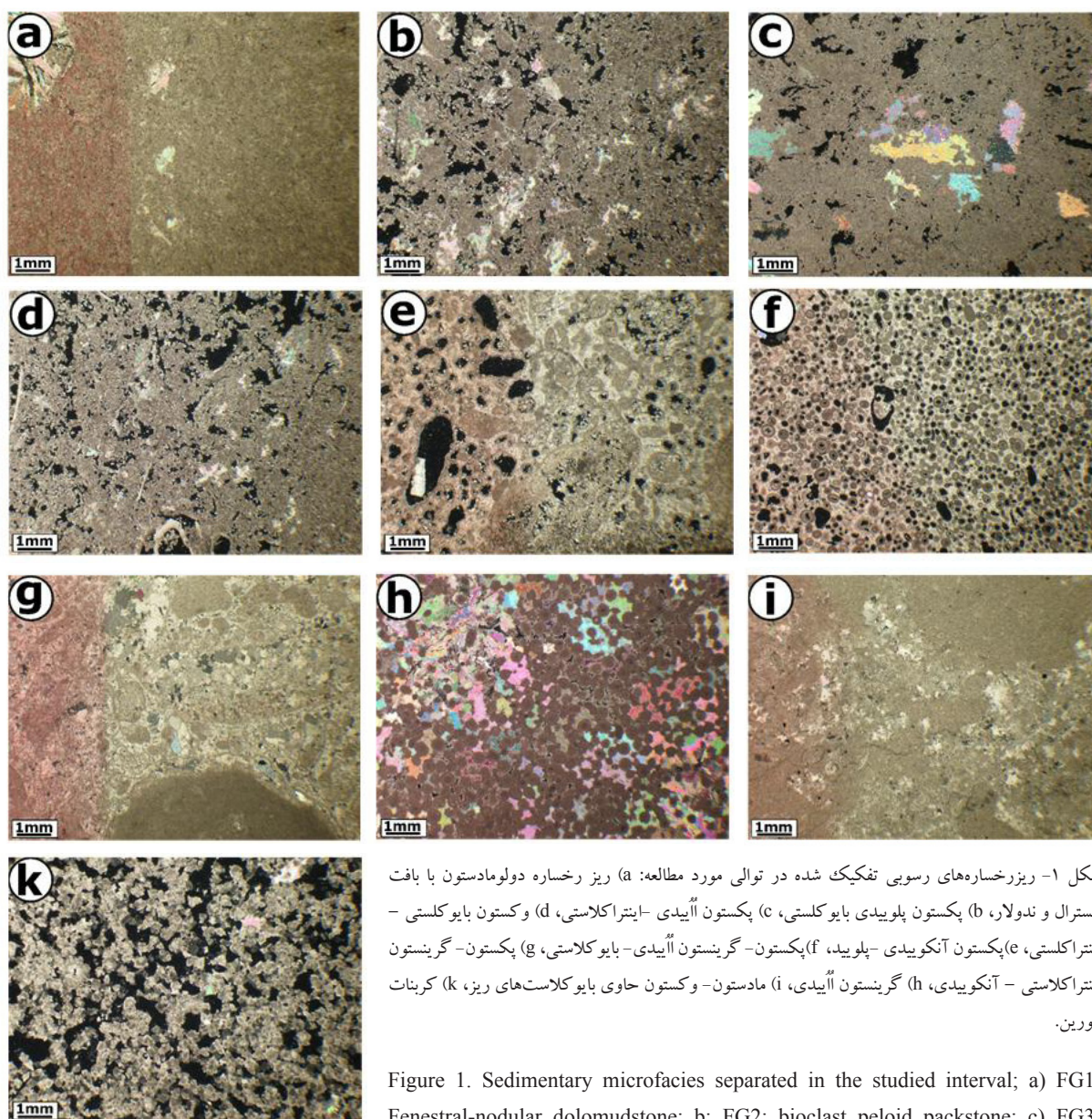
۲- روش پژوهش

این مطالعه براساس ۱۷۸ متر مغزه، ۵۸۰ عدد مقطع نازک (مطالعه رسوب‌شناسی و نمونه‌های مطالعات مکانیک سنگ) و ۴۶ عدد نمونه استوانه‌ای انتخاب شده برای آزمون‌های مکانیکی در یکی از چاه‌های میدان گازی پارس جنوبی انجام شده است. در این مطالعه، مقاطع نازک توسط محلول آلزاین قرمز به روش دیکسون (Dickson, 1965) به هدف تفکیک دولومیت و کلسیت رنگ‌آمیزی شده‌اند. برای نام‌گذاری بافتی از روش تقسیم‌بندی دانهام (Dunham, 1962) و نام‌گذاری ریزرخساره‌های شناسایی شده از تقسیم‌بندی فلوگل (Flügel, 2013) استفاده شده است. ۱۵ نمونه با ویژگی‌های بافتی، رخساره‌ای و کانی‌شناسی متفاوت با میکروسکوپ الکترونی در مرکز پژوهش‌های کاربردی سازمان زمین‌شناسی مورد بررسی و مطالعه قرار گرفته‌اند. ۱۵ و ۴۶ نمونه از نظر عناصر اصلی و فرعی و کانی‌شناسی به ترتیب به کمک روش XRD و XRF در دانشگاه‌های تربیت‌مدرس و KU Leuven آنالیز

هستند. ساختار رسوبی در این رخساره وجود ندارد. این رخساره اساساً در محیط پراثری، شول و تا حدی در ابتدای لاگون قابل انتظار است. بافت دانه چیره این رخساره نشان‌دهنده انرژی بالای محیط است که سبب حذف گل آهکی از محیط شده است. پلوئید و آنکوئید به عنوان اجزای اصلی در محیط لاگون شکل گرفته‌اند، سپس به وسیله جریان و امواج به محیط شول انتقال و تجمع یافته‌اند. به دلیل کانی‌شناسی ناپایدار، این آلوکم‌ها بیشتر تحت تاثیر انحلال و دولومیتی شدن قرار گرفته‌اند. جورشدگی و گردشدگی آلوکم‌ها خوب تا بسیار خوب است. همچنین بافت بدون گل این رخساره از ویژگی‌های محیط‌های پراثری است. این رخساره در مقاطع مورد مطالعه حدود ۱۸ درصد از کل نمونه‌ها را به خود اختصاص داده است (شکل ۱-ع).

با سنگ‌شناسی دولومیت تا آهک دولومیتی و رنگ کرم تیره تا خاکستری روشن گزارش شده است. بافت گل چیره و فقدان هر ویژگی پلاژیک محیط‌های کم‌انرژی و سطحی به آن‌ها نسبت داده می‌شود. ویژگی‌های بافتی و اجزایی رخساره‌های نشان‌دهنده محیط لاگون می‌باشد. این رخساره درصد خیلی کمی از نمونه‌های مورد مطالعه را به خود اختصاص داده است (شکل ۱-د).

— **پکستون آنکوئیدی-پلوئید (FG5: Peloid oncoid packstone):** این رخساره با بافت دانه چیره (پکستون) و پلوئیدهای پوشش‌دار نمایش داده می‌شود. در مغزه‌های حفاری با رنگ کرم روشن تا قهوه‌ای با سنگ‌شناسی آهکی تا آهک دولومیتی مشخص می‌شود. حفرات خالی (قالب آنکوئیدها) در سطح مغزه‌ها قابل مشاهده



شکل ۱- ریزرخساره‌های رسوبی تفکیک شده در توالی مورد مطالعه: (a) ریز رخساره دولومادستون با بافت فنسترال و ندولار، (b) پکستون پلوئیدی بایوکلستی، (c) پکستون آئیدی-اینتراکلاستی، (d) وکستون بایوکلستی - اینتراکلاستی، (e) پکستون آنکوئیدی-پلوئید، (f) پکستون-گرینستون آئیدی-بایوکلستی، (g) پکستون-گرینستون اینتراکلاستی - آنکوئیدی، (h) گرینستون آئیدی، (i) مادستون-وکستون حاوی بایوکلست‌های ریز، (k) کربنات بلورین.

Figure 1. Sedimentary microfacies separated in the studied interval; a) FG1: Fenestral-nodular dolomudstone; b) FG2: bioclast peloid packstone; c) FG3: intraclast ooid packstone; d) FG4: Intraclast bioclast wackestone; e) FG5: Peloid oncoid packstone; f) FG6: Bioclast ooid packstone/ grainstone; g) FG7: Oncoid intraclast packstone/Grainstone; h) FG8: Ooid grainstone; i) FG9: Microbioclast mudstone/Wackestone; k) FG10: Crystalline carbonate. All photos are in XPL.

به ویژه در شناسایی حفرات، نوع حفرات و ارتباط آن‌ها بسیار مهم است (Melim, 1996; Whitaker et al., 1999; Melim et al., 2001). مطالعات گسترده سازند کنگان در نواحی مختلف، نقش فعال فرایندهای دیاژنزی را در واحدهای آهکی، دولومیتی و انیدریتی نشان می‌دهد که در محیط‌های متفاوت این سازند را تحت تاثیر قرار داده‌اند. (Alsharhan, 2006; Insalaco et al., 2006; Ehrenberg et al., 2007; Tavakoli et al., 2011; Enayati-Bidgoli and Rahimpour-Bonab, 2016; Jafarian et al., 2017, 2018; Tavakoli and Jamal, 2019). با توجه به تاثیر این فرایندها بر شبکه منفذی و کانی‌شناسی و کیفیت مخزنی به نظر می‌رسد از دیدگاه بررسی ویژگی‌های مقاومتی نیز بسیار اثرگذار باشند. بررسی دقیق مقاطع نازک نشان داد که میکراتیتی شدن، انواع سیمانی شدن کلسیتی (به ویژه سیمان هم‌ستبرای دریایی و سیمان درشت‌بلور تدفینی)، انواع دولومیتی شدن (از نظر شکل بلوری شامل بلورهای خودشکل و نیمه‌شکل‌دار و همی‌طور ریزبلورهای دولومیتی محیط بین جزرومدی و فراجزومدی)، تجدید تبلور، تراکم شیمیایی و فیزیکی، انحلال و اشکال متفاوت انیدریتی شدن از فرایندهای دیاژنزی اصلی و تاثیرگذار در توالی‌های مورد مطالعه بوده‌اند. با این حال دولومیتی شدن و سیمان انیدریتی مهم‌ترین فرایندهای دیاژنزی تاثیرگذار در ۴۶ نمونه انتخاب شده برای ارزیابی مکانیک سنگی به شمار آمده که در بخش بعد به توضیح این دو نوع فرایند و نحوه تاثیرگذاری آن‌ها پرداخته شده است.

بر اساس همین مطالعات و همچنین شواهد پتروفیزیکی، فرایندهای دیاژنزی یادشده در سه محیط یا قلمرو دیاژنزی دریایی، جوی و تدفینی تشکیل شده‌اند (شکل ۲). سایر پژوهشگران نیز در دیگر مطالعات با بررسی این سازند در سایر مناطق به تشکیل فرایندهای دیاژنزی در سه محیط اشاره نموده‌اند (Ehrenberg et al., 2007; Tavakoli et al., 2011; Enayati-Bidgoli et al., 2014; Abdolmaleki et al., 2016; Mehrabi et al., 2016; Jafarian et al., 2017, 2018; Tavakoli and Jamal, 2019).

۳-۲-۱- انیدریتی شدن (تشکیل ندول، بلور و سیمان انیدریتی)

انیدریت‌ها در توالی‌های مورد مطالعه نشان‌دهنده فراوان‌ترین فاز تبخیری هستند و به شکل‌های گوناگون ثبت شده‌اند (Koehrer et al., 2010, 2012; Peyravi et al., 2010, 2015). حضور انیدریت در ارتباط با ساخت‌ها و رخساره‌های رسوبی اولیه، نشانگر یک محیط محدود شده با شرایط آب و هوایی گرم و خشک است (Marenco et al., 2008). اقلیم گرم و خشک و تبخیر شدید در توالی‌های مورد مطالعه کنترل‌کننده گسترش این عوارض دیاژنزی اولیه بوده است (Warren, 2006). به دلیل فابریک لایه‌ای گرهک‌های انیدریتی و همراهی این عارضه با رخساره‌های بین‌جزرومدی، زمان نسبی تشکیل آن‌ها به صورت همزمان با رسوب‌گذاری بیان می‌شود.

سیمان انیدریتی به صورت پرکننده حفره، پرکننده فضای بین‌دانه‌ای و دربرگیرنده در توالی‌های مورد مطالعه مشاهده شد (شکل ۳). سیمان انیدریتی پرکننده حفره در حفرات ناشی از انحلال آئیدها و در رخساره‌های مجموعه سد بیشتر مشاهده می‌شود. از نظر زمان تشکیل، نهشت این سیمان‌ها پس از انحلال و دولومیتی شدن و یا همزمان با دولومیتی شدن روی داده است. این نوع سیمانی شدن به بسته شدن حفرات انحلالی انجامیده است. همچنین سیمان انیدریتی با پر کردن فضای بین‌دانه‌ای به صورت بخشی یا کامل سبب کاهش چشمگیر تخلخل شده است. سیمان انیدریت دربرگیرنده یا پویی‌کیلوتوپیک به صورت بلورهای درشت در فضای بین‌دانه‌ای و حفرات قالبی مشاهده می‌شود. تشکیل این سیمان ناشی از تاثیر شورابه‌های توالی‌های بالایی و محیط‌های تبخیری مجاور بر توالی‌های زیرین است (Lucia and Major, 1994).

— **پگستون - گرینستون آئیدی - بایوکلستی (FG6: Bioclast ooid packstone/grainstone):** این گروه رخساره‌ای از طیفی گسترده از آلوکم‌ها، آئید و ذرات اسکلتی، با بافتی دانه چیره (پگستون تا گرینستون) تشکیل شده است. سنگ‌شناسی قابل تشخیص در مغزه‌های حفاری آهک، دولومیت آهکی و آهک دولومیتی به رنگ کرم روشن تا قهوه‌ای می‌باشد. ویژگی‌های رخساره نشان‌دهنده محیط پرانرژی شول می‌باشد. بافت دانه چیره و نوع دانه‌ها حاصل قرارگیری در محیط پرانرژی و متاثر از جریان‌های شدید است که سبب حذف ذرات از بین دانه شده است. در نمونه‌های مطالعه شده این گروه رخساره‌ای حدود ۱۸ درصد از مجموع نمونه‌ها را به خود اختصاص داده است. محیط پرانرژی شول و به‌ویژه این گروه رخساره‌ای بیشترین درصد (۴۸ درصد) را در مجموع همه گروه‌ها در مقاطع مورد مطالعه به خود اختصاص داده است (شکل ۱-۴).

— **پگستون - گرینستون اینتراکلاستی - آنکوئیدی (FG7: Oncoid intraclast packstone/ Grainstone):** این گروه رخساره‌ای با بافت دانه چیره مشخص شده است. عمده تفاوت این گروه یا گروه‌های جانبی تغییر در نوع دانه‌هاست. اینتراکلاست‌ها و آنکوئیدها به ترتیب اولین و دومین دانه‌های مهم در این گروه به شمار می‌آیند. این گروه متعلق به محیط لاگون می‌باشد (شکل ۱-۵).

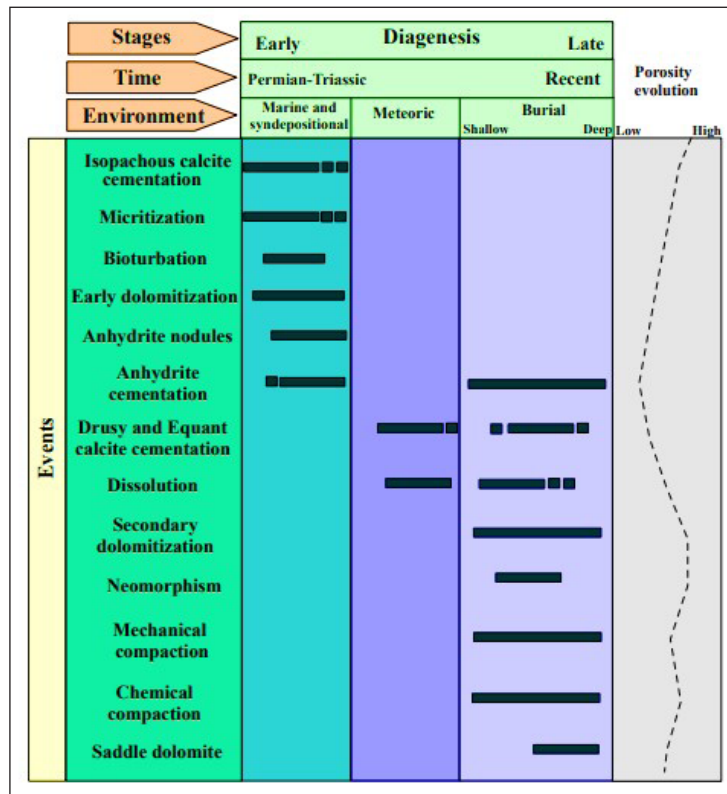
— **گرینستون آئیدی (FG8: Ooid grainstone):** این گروه رخساره‌ای با بافت دانه چیره و از نوع گرینستون مشخص شده است. این گروه متعلق به محیط لاگون می‌باشد. حضور انیدریت در برخی نمونه‌های این رخساره چشمگیر است (شکل ۱-۶).

— **مادستون - وکستون حاوی بایوکلست‌های ریز (FG9: Microbioclast mudstone/ Wackestone):** بافت این گروه گل چیره و قطعات اسکلتی خیلی ریز تنها اجزای بااهمیت آن‌ها به‌شمار می‌رود. اجزای اسکلتی به دلیل اندازه خیلی کوچک به سختی قابل تشخیص است. ساختار رسوبی با اهمیتی در این گروه دیده نمی‌شود. در بررسی مغزه‌های حفاری سنگ‌شناسی آهک تا دولومیت آهکی با رنگ خاکستری روشن تا تیره قابل تشخیص می‌باشد. برخی از کانی‌های کدر (اوپک) مانند پیریت در این رخساره گزارش شده است. بر اساس ویژگی‌های بافتی از جمله بافت گل چیره و حضور خرده‌های زیستی ریز، این گروه رخساره‌ای به محیط پهنه جزرومدی نسبت داده می‌شود. در مقاطع مطالعه شده این گروه رخساره‌ای حدود ۴ درصد از مجموع نمونه‌ها را به خود اختصاص داده است (شکل ۱-۷).

— **کربنات بلورین (Crystalline carbonate):** این گروه حاصل فرایند دولومیتی شدن و تبلور مجدد است که در برخی موارد بافت اولیه قابل تشخیص است. این رخساره دیاژنزی از نظر سنگ‌شناسی دولومیت تقریباً ریز بلور است و ندول انیدریت و ژپس نیز در آن مشاهده می‌شود. این رخساره دیاژنزی فاقد فسیل و ساختار میکروسکوپی است. بلورهای دولومیتی این رخساره به صورت خودشکل و نیمه‌شکل‌دار مشاهده می‌شوند. در تقسیم بندی فولک (Folk, 1962) این رخساره دولومیکرایت نامیده می‌شود. وجود این گونه نمونه‌ها در هر محیط رسوبی امکان‌پذیر و بنابراین نمی‌توان آن‌ها را به محیط خاصی نسبت داد و از این نظر در گروه مجزایی قرار می‌گیرد. حدود ۲۰ درصد از کل نمونه‌های مورد مطالعه متعلق به این گروه است (شکل ۱-۸). با توجه به فراوانی مختلف ریزرخساره‌ها و ویژگی‌های آن‌ها و به کمک قضاوت مهندسی از ریزرخساره‌های پر تکرار در این توالی، ۴۶ نمونه به منظور اندازه‌گیری آزمایشگاهی ویژگی‌های مکانیکی انتخاب شدند.

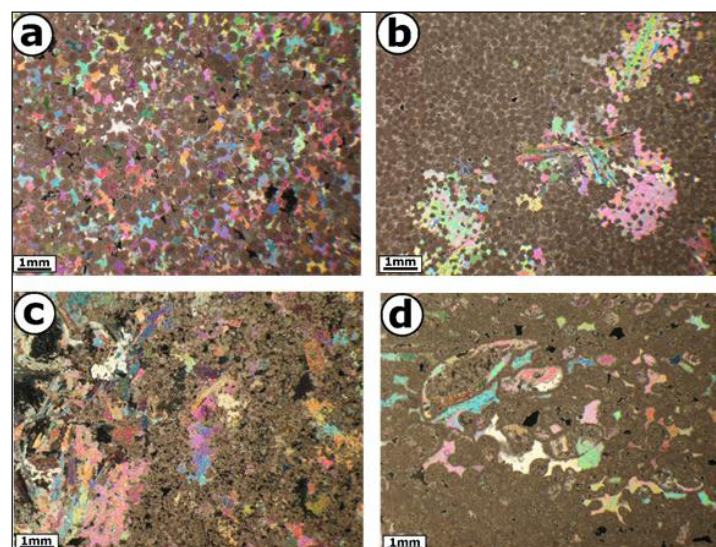
۳-۲- فرایندهای دیاژنزی

نقش فرایندهای دیاژنزی در سنگ‌های کربناته در پیش‌بینی کیفیت مخزنی،



شکل ۲- توالی دیاژنزی فرایندهای متفاوت دیاژنزی در سه محیط دریایی، جوی و تدفینی و تاثیر فرایندها بر میزان تخلخل در توالی پرمین- تریاس (Rahimpour-Bonab et al., 2009, 2010; Tavakoli et al., 2011; Tavakoli and Jamalian, 2019).

Figure 2. Permian-Triassic diagenetic sequences of the South Pars field (Rahimpour-Bonab et al., 2009, 2010; Tavakoli et al., 2011; Tavakoli and Jamalian, 2019).



شکل ۳- حضور سیمان انیدریتی در نمونه‌ها در نور XPL: (a) پویی کیلوتوپیک، (b) پویی کیلوتوپیک و تیغه‌ای، (c) جانشینی و ندول و (d) پرکننده.

Figure 3. Anhydrite cement types, a) poikilotopic; b) poikilotopic; c) FG3: replacement and nodule; d) pore filling. All photos are in XPL.

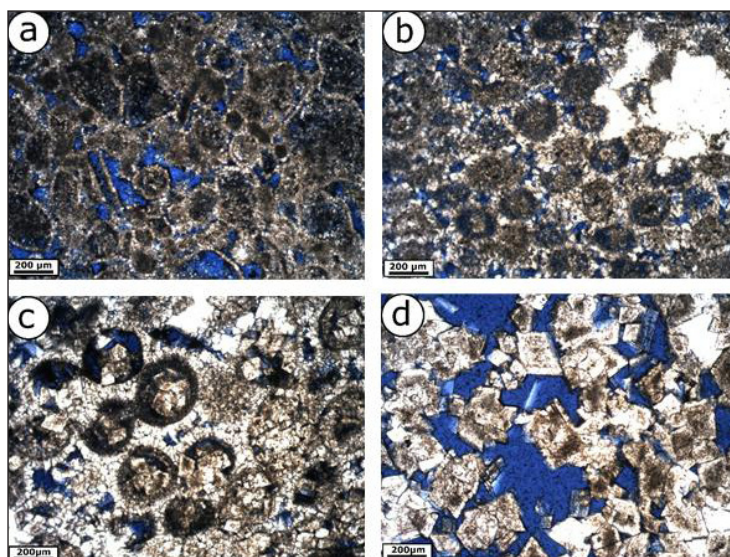
۳-۲-۲- دولومیتی شدن

دولومیتی شدن فرایند تغییر شیمیایی و کانی شناسی از کربنات کلسیم به کربنات کلسیم-منیزیم است. این فرایند یکی از مهم ترین فرایندهای دیاژنزی است که در توالی های مورد مطالعه بیش از ۷۰ درصد کیفیت مخزن را تحت تاثیر قرار داده است (Alsharhan, 2006). در سازند مورد مطالعه دولومیت ها غالباً به شکل های دولومیت اولیه ماتریکسی، دولومیت جانشینی تابع فابریک، دولومیت تخریب کننده فابریک مشاهده می شوند.

با توجه به هدف این مطالعه، نمونه ها براساس فراوانی اندازه بلورها و گسترش دولومیتی شدن در چهار گروه یا تیپ دسته بندی شده اند (شکل ۴). گروه اول بلورهای ریز به صورت پراکنده یا اطراف دانه ها دیده می شوند. نتایج مطالعات میکروسکوپی و پردازش تصویر حضور کمتر از ۱۰ درصد دولومیت را در نمونه های این گروه نشان می دهد. در گروه دوم بلورها کمی درشت تر هستند و به شکل دانه شکری و متاثر از بافت (اندازه بلورها کوچک تر از ۲۰ میکرون) بخش های بیشتری از نمونه را پوشانده اند. گروه سوم شامل نمونه هایی است که دولومیتی شدن توسعه یافته و تمامی

نمونه را تحت تاثیر قرار داده است. اندازه بلورها در این نمونه درشت تر و بین ۲۰ تا ۱۰۰ میکرون است. در نمونه های گروه چهارم بلورها به صورت شکل دار و بزرگ تر از ۱۰۰ میکرون دیده می شوند. این گروه از نوع دولومیت های از بین برنده بافت به حساب آمده و بافت اولیه نمونه به صورت کامل از بین رفته و توسعه دولومیتی شدن به بیشترین مقدار خود رسیده است.

گروه های اول و دوم را می توان به عنوان دولومیت اولیه و شامل بلورهای ریز جانشین شده در آلوکم ها یا ماتریکس دولومیتی در رخساره های دانه و گل چیره مشاهده نمود. این نوع دولومیت ها بیشتر در رخساره های فراجزرومدی و بین جزرومدی مشاهده می شوند. گاهی در این رخساره ها گسترش گرهک های انیدریتی و آثار تراکم شیمیایی مانند رگچه های انحلالی مشاهده می شود. تشکیل این نوع از دولومیت ها به مراحل اولیه دیاژنزی و بلافاصله پس از رسوب گذاری توسط سیال های بسیار شور نسبت داده می شود (Sibley and Gregg, 1987). گسترش آن در رخساره های دانه چیره، می تواند سبب ایجاد گروه اول دولومیت های شناسایی شده در این مطالعه شود.



شکل ۴- گروه های مختلف دولومیتی در نور XPL: (a) گروه ۱، (b) گروه ۲، (c) گروه ۳ و (d) گروه ۴.

Figure 4. Dolomite groups; a) Grope 1; b) Grope 2; c) Grope 3; d) Grope 4.

All photos are in XPL.

۴- بحث

۴-۱- ویژگی های فیزیکی و کانی شناسی

میانگین نتایج اندازه گیری آزمایشگاهی تخلخل با استفاده از تخلخل سنج هلمی، چگالی و همچنین نتایج کانی شناسی براساس گروه بندی دولومیتی در جدول ۱ ارائه شده است. در گروه اول مقدار چگالی متاثر از کانی شناسی (کلسیت) کمتر از گروه های دیگر می باشد. مقدار چگالی در سه گروه دیگر به هم نزدیک است. نکته شایان توجه در مورد تغییرات مقدار تخلخل، کاهش چشمگیر تخلخل در گروه دوم به دلیل حضور بیشتر انیدریت می باشد. از سوی دیگر، بالاترین میزان تخلخل در گروه چهارم با بیشترین درصد کانی دولومیت است. با توجه به اهمیت بافت و کانی شناسی نتایج حاصل از سنگ نگاری و آنالیز شیمیایی با استفاده از مطالعه میکروسکوپی الکترونی و شناساگر کانی صحت سنجی شده است. تصاویر و نتایج در شکل ۵ قابل مشاهده است.

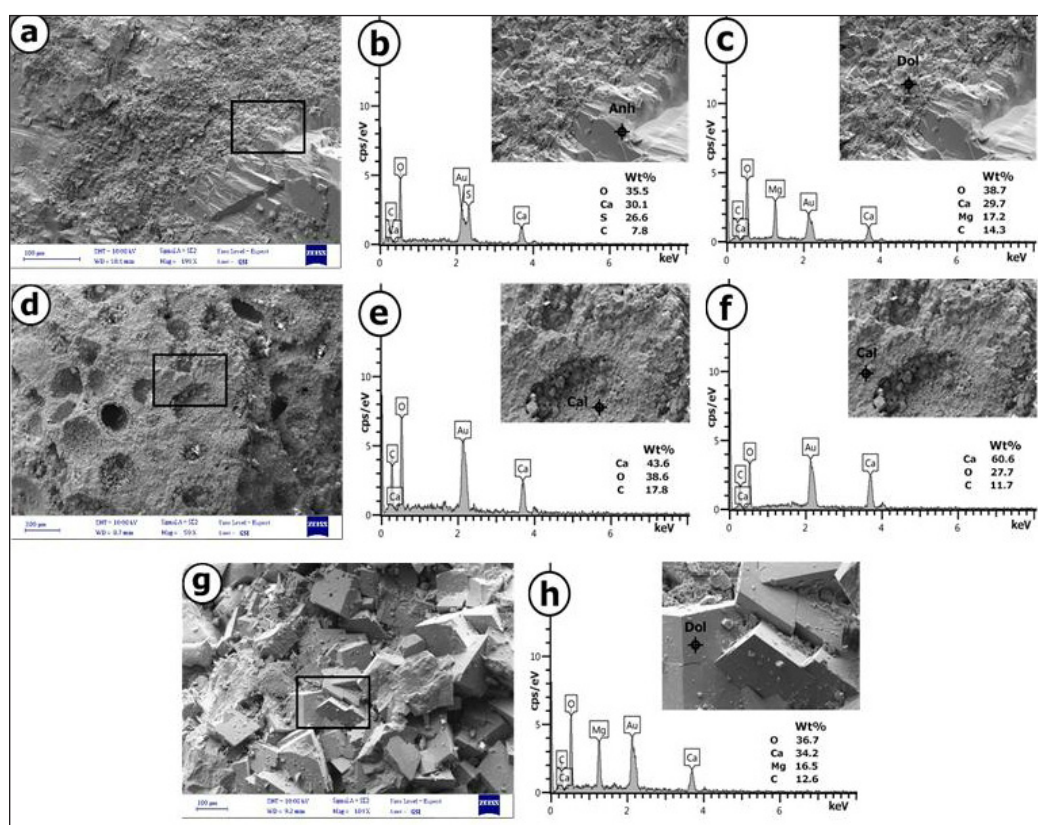
گروه سوم نیز شامل دولومیت های جانشینی تابع فابریک به صورت بلورهای ریز تا متوسط و بی شکل تا نیمه شکل دار آلوکم هایی مانند آئیدها و بایوکلست ها هستند. این فرم از دولومیتی شدن به فراوانی در توالی مورد مطالعه در رخساره های لاگون و ابتدای سد (سد رو به خشکی) مشاهده می شود. قالب آئیدها و فابریک تراکم فیزیکی پس از دولومیتی شدن نیز آشکار است. همراهی این دولومیت ها با سیمان انیدریتی گویای تشکیل آن ها ناشی از شورابه های نشت یافته به توالی های زیرین در قسمت محدود سکوی کربناته است.

گروه چهارم از دولومیت های شناسایی شده در این مطالعه، در واقع حاصل تبلور مجدد دولومیت های پیشین هستند که به صورت از بین برنده فابریک شناخته می شوند و در طی دفن توالی های دولومیتی شده، ایجاد می شوند.

جدول ۱- ویژگی های فیزیکی و کانی شناسی.

Table 1. Physical and mineralogical properties.

کانی شناسی			ویژگی های فیزیکی		
گروه دولومیتی	چگالی (گرم / سانتی متر مکعب)	تخلخل (درصد)	کلسیت (درصد)	دولومیت (درصد)	انیدریت (درصد)
۱	۲/۷۴	۷/۴۳	۸۳	۱۴	۲
۲	۲/۸۹	۳/۶۲	۷	۶۶	۲۷
۳	۲/۸۷	۲۰/۰۵	۳	۸۹	۸
۴	۲/۸۶	۲۷/۲۰	۴	۹۱	۵



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپ الکترونی و نتایج آنالیز شیمیایی نقطه‌ای.

Figure 5. SEM images and EDX results.

گروه‌هاست. با توجه به این که در این گروه دولومیتی تنوع در بافت و کانی شناسی بیشتر از گروه‌های دیگر است، می‌توان این تغییرات را اصلی‌ترین دلیل این پراکندگی دانست. نمونه‌های گروه دوم را می‌توان مقاوم‌ترین نمونه‌های مورد مطالعه دانست از یک سو، دولومیتی شدن سبب ایجاد و توسعه اسکلت بلوری مقاوم شده و از سوی دیگر، سیمان انیدریتی کلیه فضاهای خالی را پوشانده است. در نمونه‌های گروه سوم و چهارم به‌رغم دامنه تغییرات تخلخلی گسترده، ویژگی‌های مکانیکی به ترتیب به صورت متوسط و ضعیف دیده شده‌اند.

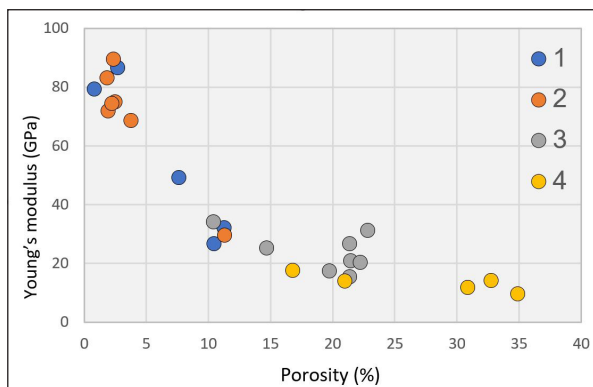
۳-۴ اثر دولومیتی شدن بر تخلخل و ویژگی های مکانیکی

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد با افزایش شدت و گسترش دولومیتی شدن، تخلخل افزایش می‌یابد. هرچند تاثیر دولومیتی شدن بر افزایش یا کاهش تخلخل در مطالعات مختلف

۲-۴ ویژگی‌های ژئومکانیکی

۲۵ و ۲۱ نمونه استوانه‌ای با نسبت طول به قطر ۲ (قطر: ۳۷/۵ میلی متر و طول: ۷۵ میلی‌متر) به ترتیب برای آزمون‌های مقاومت فشارشی تک‌محوری و سه‌محوری و در شرایط دمایی محیطی ارزیابی شدن انتخاب شده‌اند. آزمون سه‌محوری با توجه به ژرفای قرارگیری مخزن در سه فشار جانبی ۲۰، ۳۰ و ۴۰ مگاپاسکال به روش چند مرحله‌ای (Multistage) انجام شد. نمودارهای مربوط به آزمون سه‌محوری برای نمونه‌هایی با درجه دولومیتی شدن مختلف در پیوست ارائه شده است. همان‌گونه که شکل‌های ۵ تا ۹ نشان می‌دهند، به طور کلی با گسترش دولومیتی شدن، کاهش ویژگی‌های مکانیکی را شاهد هستیم؛ هرچند در این مطالعه حضور انیدریت در نمونه‌های گروه دوم سبب افزایش چشمگیر نتایج شده است. پراکندگی نتایج همه چهار ویژگی مکانیکی بررسی شده در نمونه‌های گروه یک بیش از دیگر

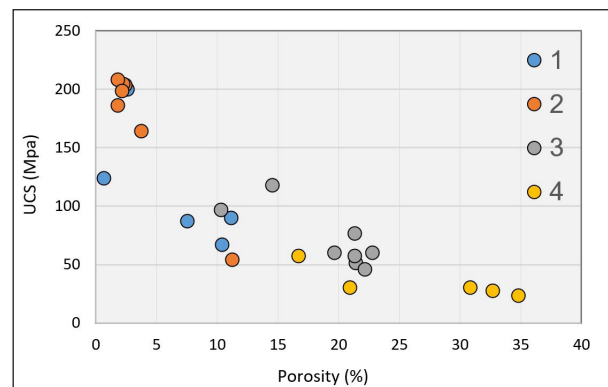
دولومیتی شدن در گروه‌های سوم و به ویژه چهارم تاثیر بسیار آشکاری بر ویژگی‌های فیزیکی و مقاومتی سنگ‌ها دارد. در این گروه‌ها، فرایند دولومیتی شدن به شکل گیری و گسترش بلورهای نیمه شکل یافته تا شکل یافته که بافت‌های اولیه را به صورت کلی محو کرده یا از بین برده‌اند، انجامیده است. این نمونه‌ها بیشتر با مقادیر بالای تخلخل و مقاومت پایین مشخص می‌شوند. دولومیتی شدن فراگیر به تخلخل بالای ۲۰ درصد و کاهش قابل توجه ویژگی‌های مکانیکی می‌انجامد.



شکل ۷- مدول الاستیسیته سنگ با گروه‌های مختلف دولومیتی.

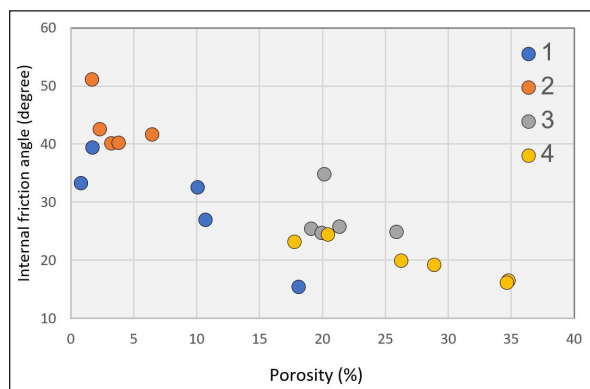
Figure 7. Young's modulus within dolomite groups.

همچنان مورد بحث است (Wang et al., 2015; Tavakoli and Jamalain, 2019). کرنات‌های بلورین در مقایسه با نمونه‌های آهکی، ویژگی‌های مقاومتی بسیار کمتری دارد. دولومیتی شدن در گروه‌های اول و دوم نشان دهنده مراحل اولیه و کم توسعه یافته دولومیت هستند و با توجه به نتایج اثرات کمتر بر ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی دارند. دولومیتی شدن در اینجا به طور عمده به یک تغییر کانی شناسی همراه با تغییر در تراکم دانه می‌انجامد.



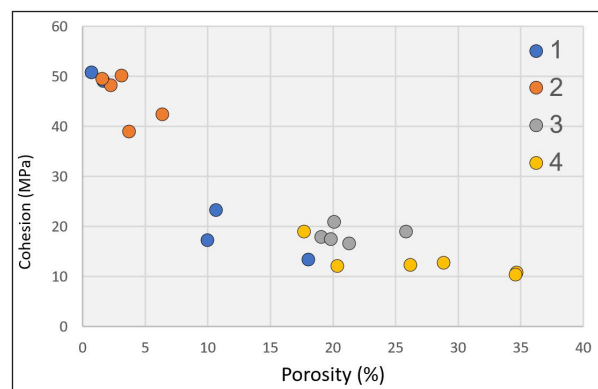
شکل ۶- مقاومت فشارشی تک‌محوری سنگ با گروه‌های مختلف دولومیتی.

Figure 6. Uniaxial compressive strength within dolomite groups.



شکل ۹- زاویه اصطکاک داخلی سنگ با گروه‌های مختلف دولومیتی.

Figure 9. Internal friction angle within dolomite groups.



شکل ۸- چسبندگی سنگ با گروه‌های مختلف دولومیتی.

Figure 8. Cohesion within dolomite groups.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به هدف این مطالعه، سازند کنگان در یکی از چاه‌های میدان گازی پارس جنوبی مورد ارزیابی قرار گرفت. در این پژوهش با ارزیابی‌های صورت گرفته نتایج زیر حاصل شد. نتایج مطالعه میکروسکوپی مقاطع نازک به شناسایی ۹ ریزرخساره رسوبی و یک رخساره دیاژنزی در زیر محیط‌های پهنه جزرومدی، لاگون، شول و دریای باز انجامید. فرایندهای دیاژنزی متعددی توالی مطالعه را تحت تاثیر قرار داده‌اند که در این میان دولومیتی شدن و سیمان انیدریتی باتوجه به شدت و تاثیر

۴-۴- نقش سیمان انیدریتی در رفتار مکانیکی

سیمان انیدریتی یکی دیگر از فرایندهای اصلی دیاژنتیکی است که بر کانی‌شناسی، ویژگی‌های سیستم منافذ و در نتیجه تخلخل و همچنین در پی آن ویژگی‌های مکانیکی تاثیر می‌گذارد. در برخی از نمونه‌ها، این فرایند دیاژنتیکی با پر کردن بیشتر فضای منافذ، تخلخل نمونه را تقریباً به صفر می‌رساند. در نمونه‌های مورد مطالعه، انسجام بیشتر سنگ در اثر سیمان انیدریتی (حدود ۲۵ درصد) سبب رفتار سلب‌تر و افزایش ویژگی‌های الاستیک در آن‌ها می‌شود.

سبب افزایش ۲ تا ۴ برابری نتایج شده است.

- پراکندگی ویژگی‌های مکانیکی در گروه اول دولومیتی نشان از تفاوت در دیگر ویژگی‌های همچون بافت دارد.

سپاسگزاری

نویسندگان از شرکت نفت و گاز پارس به دلیل همکاری و اجازه چاپ داده‌های این مقاله قدردانی می‌نمایند. همچنین از همکاری صمیمانه خانم دکتر عادلہ جمالیان در مطالعه مقاطع نازک و آقای مهندس امیرمہیار اژدرپور در مطالعه میکروسکوپی الکترونی سپاسگزاریم. این پژوهش با حمایت مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور با شماره طرح: ۹۷۰۱۰۸۸۶ انجام شده است.

چشم گیر بر میزان تخلخل به عنوان مهم ترین عامل تاثیر گذار بر ویژگی‌های مکانیکی مورد توجه ویژه قرار گرفتند. با هدف درک بهتر از تاثیر این فرایند دیاژنزی، با توجه به اندازه بلورها و گسترش دولومیتی شدن چهار گروه دولومیتی تفکیک شده که ارزیابی ویژگی‌های مکانیکی در هریک از گروه‌ها نشان دهنده نتایج زیر می‌باشد:

- دولومیتی شدن در توالی مورد مطالعه به طور کلی سبب افزایش تخلخل، کاهش مقاومت و مدول الاستیسته شده است.
- دولومیت‌های گروه دوم و چهارم به ترتیب مقاوم ترین و کم مقاومت ترین نمونه‌ها هستند.
- سیمان انیدریتی کاملاً معکوس عمل کرده و با حضور در نمونه‌های گروه دوم (متوسط ۲۵ درصد) در مقایسه با نمونه‌های کاملاً دولومیتی شده (گروه چهارم)

References

- Abdideh, M., and Ghasemi, A., 2014. A comparison of various statistical and geostatistical methods in estimating the geomechanical properties of reservoir rocks. *Petroleum Science and Technology*, 32(9), 1058–1064.
- 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.
- Afroogh, A., and Mehrabi, H., 2023. How geomechanical attributes control the morphology of stylolites in carbonate sequences? A case from Permian–Triassic gas reservoirs in the Persian Gulf. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 33, 100424.
- Alsharhan, A. S., 2006. sedimentological character and hydrocarbon parameters of the middle Permian to Early Triassic Khuff Formation, United Arab Emirates. *GeoArabia*, 11(3), 121–158.
- ASTM International and American Society for Testing and Materials, 2004. Annual book of ASTM Standards.
- Baechele, G. T., Colpaert, A., Eberli, G. P., and Weger, R. J., 2008. Effects of microporosity on sonic velocity in carbonate rocks. *The Leading Edge*, 27(8), 1012–1018.
- Dickson, J. A. D., 1965. A modified staining technique for carbonates in thin section. *Nature*, 205(4971), 587.
- Dunham, R.R., 1962. Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture in: *Classification of Carbonate Rocks* (W.E. Ham, Editor). Mem. Am. Assoc. Petrol. Geol. Pp. 183.
- Eberli, G. P., Baechele, G. T., Anselmetti, F. S., and Incze, M. L., 2003. Factors controlling elastic properties in carbonate sediments and rocks. *The Leading Edge*, 22(7), 654–660.
- Edimann, K., Somerville, J. M., Smart, B. G. D., Hamilton, S. A., and Crawford, B. R., 1998. Predicting rock mechanical properties from wireline porosities. *SPE/ISRM Rock Mechanics in Petroleum Engineering*.
- Ehrenberg, S. N., Nadeau, P. H., and Aqrawi, A. A. M., 2007. A comparison of Khuff and Arab reservoir potential throughout the Middle East. *AAPG Bulletin*, 91(3), 275–286.
- Enayati-Bidgoli, A. H., and Rahimpour-Bonab, H. 2016. A geological based reservoir zonation scheme in a sequence stratigraphic framework: A case study from the Permo-Triassic gas reservoirs, Offshore Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 73, 36–58.
- Enayati-Bidgoli, A. H., Rahimpour-Bonab, H., and Mehrabi, H., 2014. flow unit characterisation in the Permian-Triassic carbonate reservoir succession at South Pars Gas field, offshore Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 37(3), 205–230.
- Eshkalak, M. O., Mohaghegh, S. D., and Esmaili, S., 2014. Geomechanical properties of unconventional shale reservoirs. *Journal of Petroleum Engineering*, 2014.
- Esrafil-Dizaji, B., and Harchegani, F. K., 2011. Persia: Land of Black Gold. *GEO ExPro* December 2011. pp. 30-34. DOI: 10.13140/2.1.4264.0001.
- Esrafil-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.
- Esrafil-Dizaji, B., Harchegani, F. K., Rahimpour-Bonab, H., and Kamali, M. R., 2013. 10 Controls on Reservoir Quality in the Early Triassic Kangan Formation, Iran. In book: *Permo-Triassic Sequence of the Arabian Plate* (pp.219-245) Chapter: 10. Publisher: EAGEE. ditors: Michael Pöppelreiter.
- Flügel, E., 2013. *Microfacies of carbonate rocks: analysis, interpretation and application*. Springer-Verlag, Berlin, 996 p.
- Folk, R. L., 1962. Spectral subdivision of limestone types. In: W. E. Ham, Ed., *Classification of Carbonates Rocks*. A Symposium, Tulsa, OK, American Association of Petroleum Geologist Memoirs, 1962, pp. 62-84.
- Fournier, F., and Borgomano, J., 2009. Critical porosity and elastic properties of microporous mixed carbonate-siliciclastic rocks Critical porosity of microporous carbonates. *Geophysics*, 74(2), E93–E109.

- Fournier, F., Leonide, P., Biscarrat, K., Gallois, A., Borgomano, J., and Foubert, A., 2011. Elastic properties of microporous cemented grainstones. *Geophysics*, 76(6), E211–E226.
- García, R. A., Saavedra, N. F., Calderón-Carrillo, Z., and Mateus, D., 2008. Development of experimental correlations between indentation parameters and unconfined compressive strength (UCS) values in shale samples. *CTyF - Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3(4).
- Gharechelou, S., Amini, A., Bohloli, B., and Swennen, R., 2020a. Relationship between the sedimentary microfacies and geomechanical behavior of the Asmari Formation carbonates, southwestern Iran. *Marine and Petroleum Geology*, 116, 104306.
- Gharechelou, S., Amini, A., Bohloli, B., Swennen, R., Nikandish, A., and Farajpour, V., 2020b. Distribution of geomechanical units constrained by sequence stratigraphic framework: Useful data improving reservoir characterization. *Marine and Petroleum Geology*, 117, 104398.
- Hudson, R., and Ulusay, J. A., 2007. The ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring: 2007-2014. Springer.
- 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-Baghtash, R., Mattern, F., and Heubeck, C., 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.
- Jafarian, A., Javanbakht, M., Koeshidayatullah, A., Pimentel, N., Hersi, O. S., Yahyaie, A., and Beigi, M., 2018. Paleoenvironmental, diagenetic, and eustatic controls on the Permo-Triassic carbonate–evaporite reservoir quality, Upper Dalan and Kangan formations, Lavan Gas Field, Zagros Basin. *Geological Journal*, 53(4), 1442–1457.
- Janjubah, H. T., Alansari, A., and Vintaned, J. A. G., 2019. Quantification of microporosity and its effect on permeability and acoustic velocity in Miocene carbonates, Central Luconia, offshore Sarawak, Malaysia. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 175, 108–119.
- Kashfi, M. S., 1992. Geology of the Permian “Super-Giant” gas reservoirs in the greater Persian gulf area. *Journal of Petroleum Geology*, 15(3), 465–480.
- Koehrer, B. S., Heymann, C., Prousa, F., and Aigner, T., 2010. Multiple-scale facies and reservoir quality variations within a dolomite body–outcrop analog study from the Middle Triassic, SW German Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 27(2), 386–411.
- Koehrer, B., Aigner, T., Forke, H., and Pöppelreiter, M., 2012. Middle to Upper Khuff (Sequences KS1 to KS4) outcrop-equivalents in the Oman Mountains: Grainstone architecture on a subregional scale. *GeoArabia*, 17(4), 59–104.
- Lucia, F. J., and Major, R. P., 1994. Porosity evolution through hypersaline reflux dolomitization. *Dolomites: A Volume in Honour of Dolomieu*, 325–341.
- Makhloufi, Y., Collin, P.-Y., Bergerat, F., Casteleyn, L., Claes, S., David, C., Menendez, B., Monna, F., Robion, P., and Sizun, J.-P., 2013. Impact of sedimentology and diagenesis on the petrophysical properties of a tight oolitic carbonate reservoir. The case of the Oolithe Blanche Formation (Bathonian, Paris Basin, France). *Marine and Petroleum Geology*, 48, 323–340.
- Marengo, P. J., Corsetti, F. A., Kaufman, A. J., and Bottjer, D. J., 2008. Environmental and diagenetic variations in carbonate associated sulfate: an investigation of CAS in the Lower Triassic of the western USA. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 72(6), 1570–1582.
- Mateus, J., Saavedra, N., Carrillo, Z. C., and Mateus, D., 2007. Correlation development between indentation parameters and uniaxial compressive strength for Colombian sandstones. *CT & F-Ciencia, Tecnología y Futuro*, 3(3), 125–136.
- 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.
- Mehrabi, H., Rahimpour-Bonab, H., Enayati-Bidgoli, A. H., and Esrafil-Dizaji, B., 2015. Impact of contrasting paleoclimate on carbonate reservoir architecture: cases from arid Permo-Triassic and humid Cretaceous platforms in the south and southwestern Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 126, 262–283.
- Melim, L. A., 1996. Limitations on lowstand meteoric diagenesis in the Pliocene-Pleistocene of Florida and Great Bahama Bank: Implications for eustatic sea-level models. *Geology*, 24(10), 893–896.
- Melim, L. A., Swart, P. K., and Maliva, R. G., 2001. Meteoric and marine-burial diagenesis in the subsurface of Great Bahama Bank, subsurface geology of a prograding carbonate platform margin, Great Bahama Bank: results of the Bahamas Drilling Project. *Society for Sedimentary Geology*, 137-161. DOI:10.2110/pec.01.70.0137.
- Peyravi, M., Kamali, M. R., and Kalani, M., 2010. Depositional environments and sequence stratigraphy of the Early Triassic Kangan Formation in the northern part of the Persian Gulf: implications for reservoir characteristics. *Journal of Petroleum Geology*, 33(4), 371–386.
- Peyravi, M., Rahimpour-Bonab, H., Nader, F. H., and Kamali, M. R., 2015. Dolomitization and burial history of lower Triassic carbonate reservoir-rocks in the Persian Gulf (Salman offshore field). *Carbonates and Evaporites*, 30(1), 25–43.
- Pöppelreiter, M. C., Schneider, C. J., Obermaier, M., Forke, H. C., Koehrer, B., and Aigner, T., 2011. Seal turns into reservoir: Sudair equivalents in outcrops, Al Jabal al-Akhdar, Sultanate of Oman. *GeoArabia*, 16(1), 69–108.
- 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 Journal*, 44(3), 341–364.

- Rahimpour-Bonab, H., Esrafil-Dizaji, B., and Tavakoli, V., 2010. Dolomitization and Anhydrite Precipitation in Permo-Triassic Carbonates at the South Pars Gasfield, Offshore Iran: Controls on Reservoir Quality. *Journal of Petroleum Geology*, 33(1), 43–66.
- Saneifar, M., Conte, R., Chen Valdes, C., Heidari, Z., and Pope, M. C., 2015. Integrated rock classification in carbonate formations based on elastic and petrophysical properties estimated from conventional well logs. *AAPG Bulletin*, 99(7), 1261–1280. <https://doi.org/10.1306/02091514167>.
- Sharifi-Yazdi, M., Rahimpour-Bonab, H., Nazemi, M., Tavakoli, V., and Gharechelou, S., 2020. Diagenetic impacts on hydraulic flow unit properties: insight from the Jurassic carbonate Upper Arab Formation in the Persian Gulf. *Journal of Petroleum Exploration and Production Technology*, 1–20.
- Sibley, D. F., and Gregg, J. M., 1987. Classification of dolomite rock textures. *Journal of Sedimentary Research*, 57(6), 967–975.
- Tavakoli, V., 2015. Chemostratigraphy of the Permian–Triassic strata of the offshore Persian Gulf, Iran. In *Chemostratigraphy* (pp. 373–393). Elsevier.
- 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(February), 106191. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2019.106191>.
- Tavakoli, V., Rahimpour-Bonab, H., and Esrafil-Dizaji, B., 2011. Diagenetic controlled reservoir quality of South Pars gas field, an integrated approach. *Comptes Rendus Geoscience*, 343(1), 55–71.
- Wang, Z., Wang, R., Weger, R. J., Li, T., and Wang, F., 2015. Pore-scale modeling of elastic wave propagation in carbonate rocks. *Geophysics*, 80(1), D51–D63.
- Warren, J. K., 2006. *Evaporites: sediments, resources and hydrocarbons*. Springer Science & Business Media.
- Whitaker, F.F., Smart, P.L., Hague, H., Waltham, D., and Bosence, D., 1999. Structure and function of a coupled two-dimensional diagenetic and sedimentological model of carbonate platform evolution. In: *Numerical Experiments in Stratigraphy* (Eds. J.H., Harbaugh, W.L., Watney, E.C., Rankey, R., Slingerland, R.H., Goldstein and E.K., Franseen), SEPM: Spec. Publ. 62, 339–356.
- Zhao, L., Nasser, M., and Han, D., 2013. Quantitative geophysical pore-type characterization and its geological implication in carbonate reservoirs. *Geophysical Prospecting*, 61(4), 827–841.