

# بررسی دیاژنز، ژئوشیمی و کیفیت مخزنی سازند فهلیان در یکی از میادین نفتی جنوب غرب ایران

امیر کاظمی<sup>۱</sup>، محمدعلی صالحی<sup>۲</sup>، جواد سبحانی<sup>۳</sup>، جواد هنرمند<sup>۴</sup>، نواب خدایی<sup>۴</sup>

۱- کارشناس ارشد رسوب‌شناسی، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، ایران

۲- دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، ایران

۳- کارشناس ارشد رسوب‌شناسی، دانشکده زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تهران، ایران

۴- پردیس بالادستی، پژوهشگاه صنعت نفت، تهران، ایران

ma.salehi@sci.ui.ac.ir

## چکیده

سازند فهلیان (کرتاسه آغازین) از مخازن مهم نفتی در بسیاری از میادین حوضه زاگرس نظیر دشت آبادان و خلیج فارس محسوب می‌شود. به منظور بررسی دیاژنز، ژئوشیمی و کیفیت مخزنی این توالی کربناته در یکی از میادین واقع در ناحیه دشت آبادان، نتایج مطالعات زمین‌شناسی-پتروفیزیکی شامل مطالعه پتروگرافی مقاطع نازک میکروسکوپی، آنالیز معمول مغزه (تخلخل- تراوایی)، آنالیز پراش اشعه ایکس، نمودارهای پتروفیزیکی، آنالیز ایزوتوپ کربن-اکسیژن و آنالیز عنصری همراه با مطالعات میکروسکوپ الکترونی و کاتودولومینسانس تلفیق شده است. این سازند تحت تأثیر فرآیندهای دیاژنزی مختلفی شامل میکرایتی‌شدن، آشفستگی زیستی، تراکم، سیمانی‌شدن، انحلال، دولومیتی‌شدن و شکستگی قرار گرفته است. سیمانی‌شدن کلسیتی، تراکم و دولومیتی‌شدن فراگیر عوامل اصلی کنترل‌کننده کاهش تخلخل و تراوایی می‌باشند، در حالی که انحلال (به صورت حفره‌ای و قالبی) و شکستگی، کیفیت مخزنی توالی مورد مطالعه را افزایش داده‌اند. تخلخل و تراوایی مغزه در بخش مخزنی سازند فهلیان در توالی مورد مطالعه به ترتیب دارای تغییراتی در محدوده ۰/۰۱ تا ۲۷/۵ درصد و کمتر از ۰/۰۱ تا بیشتر از ۶۳۰ میلی‌داری می‌باشد. این تغییرات در تخلخل و تراوایی شدیداً وابسته به فرآیندهای دیاژنزی با پیروی از الگوی تغییرات رخساره‌ای است. بررسی‌های کیفیت مخزنی نیز نشان می‌دهد که دیاژنز تأثیر عمده‌ای به صورت مثبت و منفی در سازند فهلیان داشته و به میزان عمده‌ای توزیع سیستم منافذ را کنترل نموده است. با استفاده از داده‌های ژئوشیمی عنصری و ایزوتوپی اکسیژن و کربن یک سطح مطابق با حداکثر پایین افتادگی سطح نسبی آب دریا شناسایی گردید که می‌توان نتیجه گرفت که دیاژنز جوی تأثیر زیادی در بهبود کیفیت مخزنی توالی زیرین این سطح داشته است. به جهت بررسی کیفیت مخزنی رخساره

ها و ایجاد ارتباط بین رخساره‌ها با رده‌های پتروفیزیکی لوسیا و تعیین گونه‌های سنگی، داده‌های تخلخل و تراوایی مربوط به رخساره‌های بخش پایینی (مخزنی) سازند فهلیان بر روی نمودار لوسیا ترسیم و منجر به تفکیک چهار گونه سنگی متفاوت گردید؛ در بین آن‌ها فلوتستون/ باندستون-گرینستون از کیفیت مخزنی بالاتری برخوردار است. در راستای تعیین واحدهای جریان‌ی از دو روش پتروفیزیکی شامل شاخص زون جریان‌ی و شعاع گلوگاه تخلخل در اشباع ۳۵ درصد جیوه استفاده گردید. نتایج نشان داد که شاخص زون جریان‌ی و شعاع گلوگاه تخلخل، عمدتاً ناهمگنی‌های مخازن کربناته را در مقیاس کوچک آشکار می‌کند. بر اساس روش شاخص زون جریان‌ی، یک واحد غیر مخزنی و چهار واحد جریان‌ی و بر اساس روش شعاع گلوگاه تخلخل در اشباع ۳۵ درصد جیوه چهار گونه سنگی و یک گونه غیرمخزنی با توجه به اندازه منافذ شناسایی گردید.

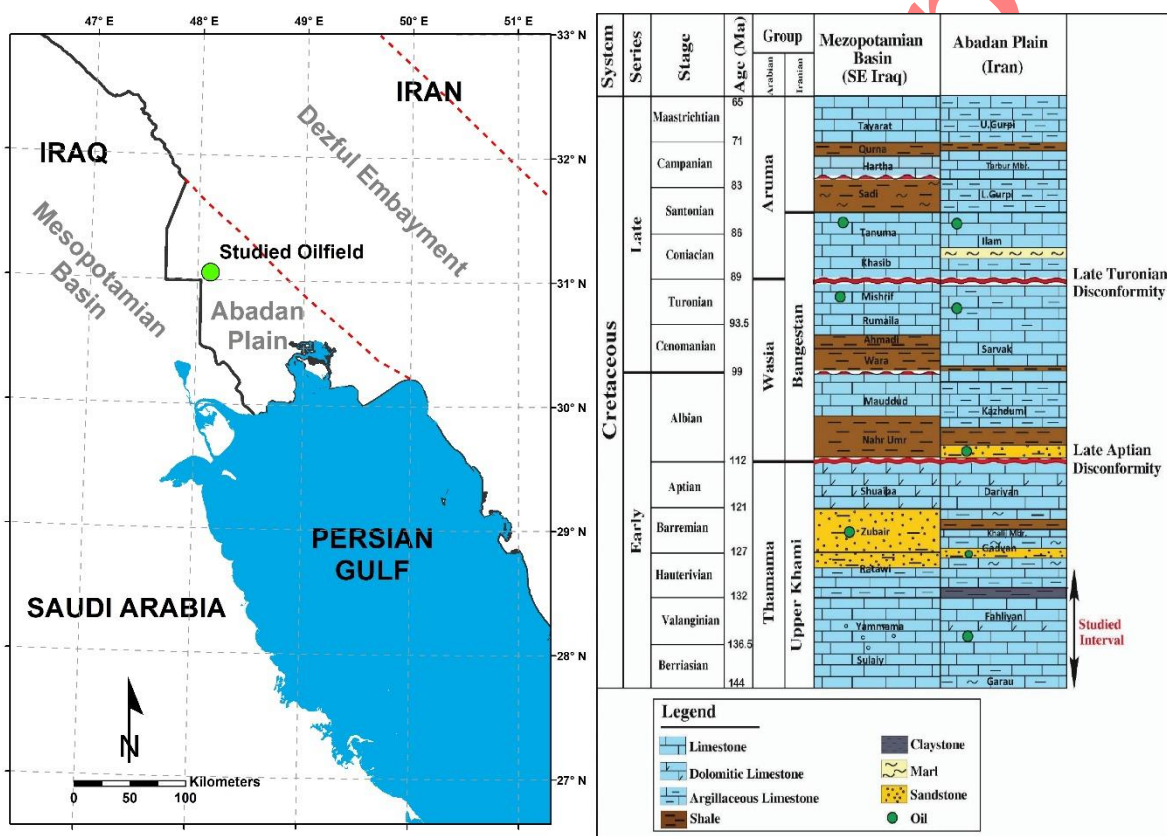
**کلمات کلیدی:** سازند فهلیان، دشت آبادان، دیاژنز جوی، ژئوشیمی ایزوتوپی، واحدهای جریان هیدرولیکی.

## ۱- مقدمه

با توجه به نیاز روز افزون صنعت به استفاده از منابع نفتی، اکتشاف مخازن جدید نفتی و نیز افزایش بهره‌وری از میادین نفتی در حال تولید اجتناب ناپذیر است. لازمه‌ی رسیدن به این مهم، شناسایی سنگ‌های منشاء، سنگ‌های دارای پتانسیل ذخیره هیدروکربن، پوش سنگ‌ها و نیز تأثیر فرآیندهای بعدی مانند عوامل دیاژنتیکی، در کاهش یا افزایش کیفیت آن‌ها می‌باشد [۱]. بررسی دقیق و کسب اطلاعات کاربردی در راستای تشخیص ویژگی‌های مخزنی و بهبود راندمان تولید از مخازن، نیازمند مطالعات ریزرخساره و فرآیندهای دیاژنتزی مؤثر بر سنگ‌های رسوبی است. سازند کربناته فهلیان یکی از سازندهای گروه خامی با سن بریازین-هوتروین است که عمدتاً در فارس و فروافتادگی دزفول گسترش دارد و از سنگ مخزن‌های مهم شناخته شده در میادین نفتی دشت آبادان نیز محسوب می‌شود. به دلیل مشترک بودن اغلب مخازن غرب دشت آبادان با کشور عراق (شکل ۱)، اهمیت شناخت دقیق در راستای افزایش تولید از این مخازن، از سوی شرکت ملی نفت ایران در اولویت قرار گرفته است. هدف این پژوهش، شناخت فرآیندهای دیاژنتزی حاکم بر سازند فهلیان در میدان نفتی مورد نظر، شناخت واحدهای جریان‌ی و ارزیابی کیفیت مخزنی آن، مطالعات ژئوشیمیایی عنصری و ایزوتوپی در تعیین روند دیاژنز و شناسایی عوامل مؤثر بر افزایش و کاهش کیفیت مخزنی است. با توجه به اهمیت شناخت دقیق مخازن این میدان در راستای اکتشافات آینده و افزایش تولید از آن‌ها، شناسایی افق‌های بهتر از لحاظ کیفیت مخزنی از جایگاه مهم و ویژه‌ای برخوردار است.

## ۲- موقعیت زمین‌شناسی و چینه‌شناسی منطقه

دشت آبادان به عنوان بخشی از حوضه پیش‌گودال مزوپتامین در گوشه جنوب غربی فروافتادگی دزفول، بخش شمال شرقی صفحه عربی را تشکیل داده و ویژگی‌های زمین‌شناسی آن بیشتر شبیه صفحه عربی است [2]. کرتاسه با یک پیشروی عمومی در ناحیه زاگرس آغاز می‌شود که نتیجه آن نهشته شدن سنگ‌آهک‌های کم‌عمق در جنوب شرقی زاگرس، قسمت اعظم خلیج فارس، عمان، قطر و ناحیه چین‌خورده حجاز در کرتاسه آغازین بوده است [3] (شکل ۱). به طور کلی کرتاسه آغازین یکی از با اهمیت‌ترین چرخه‌های رسوبی در خاورمیانه از لحاظ حجم ذخیره هیدروکربن است [4, 5].



شکل ۱- سمت چپ: موقعیت میدان نفتی مورد مطالعه در دشت آبادان (با علامت دایره سبز مشخص شده است). سمت راست: ستون چینه‌شناسی کرتاسه دشت آبادان و حوضه مزوپتامین جنوب شرق عراق (اقتباس با تغییراتی از [2, 6]).

کرتاسه در دشت آبادان با رسوبگذاری سازند گرو آغاز می‌گردد و این سازند در بخش بالایی به صورت تدریجی با سازند فهلیان تداخل داشته، و بخش فهلیان / گرو نامگذاری شده است اما در برخی از چاه‌ها این مرز با قطعیت قابل رویت نیست و تفکیک

مرز بین آن‌ها از جمله در چاه مورد مطالعه امکانپذیر نیست. سازند گدوان به سن بارمین-آپتین به صورت همساز (هم‌شیب) روی سازند فهلیان قرار می‌گیرد (شکل ۱).

سازند کربناتی فهلیان به سن بریازین-هوتروین، به طور عمده با تهنشست سنگ‌آهک‌های کم ژرفا، جزء سازندهای گروه خامی بالایی و از مخازن مهم نفتی در فروافتادگی دزفول و دشت آبادان به شمار می‌رود. در قاعده سازند، به طور محلی، برش انحلالی وجود دارد که ممکن است معادل سازند هیث باشد. مرز بالایی فهلیان با سازند گدوان واضح است ولیکن در شمال فروافتادگی دزفول که سازند گدوان وجود ندارد، سازند فهلیان و داریان قابل تفکیک نیستند. سازند فهلیان را می‌توان در تمام مناطق فارس، شمال شرقی خوزستان و شمال شرقی لرستان دید، ولی در جنوب غرب لرستان و خوزستان، این سازند به شیل و سنگ‌آهک‌های سازند گرو تبدیل می‌شود [3]. میدان مورد مطالعه در این پژوهش در دشت آبادان واقع شده است. سازند فهلیان، در چاه مورد مطالعه دارای ضخامت ۵۳۸ متر می‌باشد که به دو بخش فهلیان بالایی و فهلیان پایینی تقسیم می‌گردد. فهلیان بالایی از سنگ‌آهک‌های کرم و خاکستری گاهی با رس زیاد و پیریتی و لایه‌هایی از مارن و رس سنگ خاکستری تا خاکستری تیره و پیریتی و دارای سیلت و ماسه تشکیل شده است [7]. فهلیان پایینی از سنگ‌آهک‌های کرم، نخودی و قهوه‌ای رنگ پیریت‌دار، گاهی کمی رسی، با میان لایه‌های نازک دولومیت و سنگ‌آهک دولومیتی قهوه‌ای رنگ تا خاکستری روشن دارای تخلخل و شکستگی تشکیل شده است که آثار نفت و بیتومین در تخلخل‌ها و شکستگی‌ها مشاهده شده است. در قسمت انتهایی، سنگ-آهک‌های کرم و خاکستری روشن تا تیره و مارن خاکستری تیره تا سیاه و پیریتی حضور دارند.

### ۳- داده‌ها و روش مطالعه

#### ۳-۱- مطالعات پتروگرافی

به منظور بررسی پتروگرافی (تشخیص اجزای کربناته و غیرکربناته و فراوانی آن‌ها)، تعیین رخساره‌های میکروسکوپی، محیط رسوبی و فرآیندهای دیانژی، تعداد ۷۸۶ مقطع نازک میکروسکوپی تهیه شده از مغزه‌ها و خرده‌های حفاری جمعاً به متراژ ۲۳۹ متر، توسط میکروسکوپ نوری پلاریزان مطالعه گردید. برای نامگذاری و طبقه‌بندی رخساره‌ها از روش دانهام [8] و امبری و کلوان [9] استفاده شده و توصیف ریزرخساره‌ها و تعیین محیط رسوبی با استفاده از ریزرخساره‌های استاندارد فلوگل [10] انجام شده است. تعداد ۵۳ نمونه مقطع نازک نیز جهت شناسایی بهتر تخلخل تزریق اپوکسی صورت گرفته است. در راستای بررسی نسل‌های مختلف سیمان سنگ‌های کربناته و تفسیر شرایط دیانژنتیک موثر بر این سنگ‌ها، علاوه بر مطالعات پتروگرافی توسط

میکروسکوپ پلاریزان، از میکروسکوپ کاتدولومینسانس (CL مدل CTL Mk5-1) که بر روی میکروسکوپ پلاریزان نصب شده) استفاده گردیده است. همچنین جهت شناسایی و تهیه تصاویر سه بعدی از ریزتخلخل‌ها، برخی فرآیندهای دیاژنزی، کانی‌های رسی و سایر کانی‌های غیرکربناته تعدادی نمونه سنگی انتخاب شده و با استفاده از میکروسکوپ الکترونی (SEM) مدل VEGA\\TESCAN-XMU مجهز به میکرو آنالیز EDS مورد مطالعه قرار گرفته اند.

### ۳-۲- مطالعات ژئوشیمیایی

به جهت شناخت شرایط ژئوشیمیایی حاکم بر حوضه رسوبی و تعیین روند دیاژنز کربنات‌های سازند فهلیان، پس از مطالعه دقیق مقاطع نازک، تعداد ۲۰ نمونه برای مطالعه عنصری انتخاب و به روش طیف‌سنجی تابشی پلاسمای جفت شده القایی (ICP-OES) تحت آنالیز عنصری قرار گرفته است. همچنین به منظور تعیین مقادیر ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن ( $\delta^{18}\text{O}$ ) و کربن ( $\delta^{13}\text{C}$ )، از پودر ۲۰ نمونه‌ای که تحت آنالیز عنصری قرار گرفتند، هر کدام به میزان ۰/۵ گرم در آزمایشگاه ژئوشیمی دانشکده علوم طبیعی دانشگاه ارلانگن آلمان مورد آنالیز قرار گرفته شده است.

### ۳-۳- مطالعات پتروفیزیکی

به منظور ارزیابی خواص مخزنی، مقادیر تخلخل و تراوایی ۳۹۶ پلاگ تهیه شده از مغزه‌های حفاری اندازه‌گیری شده است. برای تعیین تخلخل و تراوایی پلاگ‌های مغزه، تخلخل هلیم و تراوایی هوا در آزمایشگاه اندازه‌گیری شده است [11]. براساس داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه، از روش‌های تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی با استفاده از روش نشانگر زون جریان، و روش محاسباتی شعاع گلوگاه حفرات با استفاده از معادله وینلند و کلاس‌های پتروفیزیکی لوسیا استفاده شده است.

## ۴- نتایج

### ۴-۱- ریزرخساره‌ها و محیط رسوبی

مطالعات پتروگرافی در سازند فهلیان در چاه مورد مطالعه منجر به شناخت نه ریزرخساره کربناته و دو رخساره آواری در دو محیط رسوبی کربناته و کربناته-تخریبی گردیده است که در سه کمربند رخساره‌ای سد (شول)، لاگون و پهنه جزرومدی نهشته شده‌اند (برای مطالعه بیشتر در این زمینه به [12] مراجعه شود). خلاصه اطلاعات مربوط به ریزرخساره‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱- رخصاره‌های میکروسکوپی، اجزاء اصلی آن‌ها و فراوان‌ترین تخلخل‌های شناسایی شده در سازند فهلیان در چاه مورد مطالعه (با تغییراتی از [12]).

سیستم منافذ	زیر محیط	کد و نام ریز رخصاره/پتروفاسیس
بین دانه‌ای و حفره‌های مرتبط	شول	ریزرخساره ۱: گرینستون آئیدی اینتراکست‌دار
بین دانه‌ای، حفره‌های مرتبط و درون دانه‌ای	شول	ریزرخساره ۲: گرینستون اینتراکستی پلوئیددار
بین دانه‌ای، حفره‌های مرتبط و درون دانه‌ای	لاگون	ریزرخساره ۳: پکستون اینتراکستی پلوئیددار
بین دانه‌ای، حفره‌های مرتبط و قالبی	لاگون	ریزرخساره ۴: پکستون پلوئیدی دارای خرده فسیل و فرامینیفر کفزی
رشدی، قالبی، حفره‌های مرتبط	لاگون	ریزرخساره ۵: فلوتستون/باندستون لیتوکودومی
قالبی، حفره‌های مرتبط، درون دانه‌ای	لاگون	ریزرخساره ۶: وکستون خرده فسیل دار
قالبی، حفره‌های غیرمرتبط و مرتبط	لاگون	ریزرخساره ۷: وکستون/پکستون دارای داسی کلاد و فرامینیفر کفزی
قالبی، حفره‌های غیرمرتبط و مرتبط	لاگون	ریزرخساره ۸: وکستون دارای فرامینیفر کفزی و خرده فسیل
قالبی، حفره‌های غیرمرتبط و مرتبط	لاگون	ریزرخساره ۹: مادستون فسیل دار
ریز تخلخل	پهنه جزر و مدی	پتروفاسیس ۱: مادستون آهکی-ماسه‌ای
ریز تخلخل	پهنه جزر و مدی	پتروفاسیس ۲: رس سنگ آهکی/مارن دارای ماسه

## ۲-۴- دیاژنز

بر پایه مطالعات ماکروسکوپی و میکروسکوپی (پتروگرافی و تصاویر SEM) انجام شده، فرآیندهای دیاژنزی عمده سازند فهلیان در چاه مورد مطالعه شامل آشفستگی زیستی، تراکم، سیمانی شدن، انحلال، شکستگی، نوشکلی، میکرایتی شدن، فابریک ژئوپتال، دولومیتی شدن، دولومیت زدایی، پیریتی شدن و سیلیسی شدن می‌باشند. خلاصه شرح مهم‌ترین عوارض دیاژنزی در جدول ۲ و تصاویر میکروسکوپی آن‌ها در شکل ۲ و ۳ آورده شده است. به دلیل ترکیب کانی‌شناسی آراگونیتی اغلب اجزای اسکلتی در ریز رخصاره‌های شناسایی شده به ویژه جلبک‌های سبز و لیتوکودیوم و تأثیر عمده دیاژنز جوی، انحلال می‌تواند به عنوان مهم‌ترین فرآیند موثر در افزایش تخلخل و تراوایی سازند فهلیان نقش داشته باشد. نتایج بررسی انواع تخلخل نشان می‌دهد ریزتخلخل‌ها

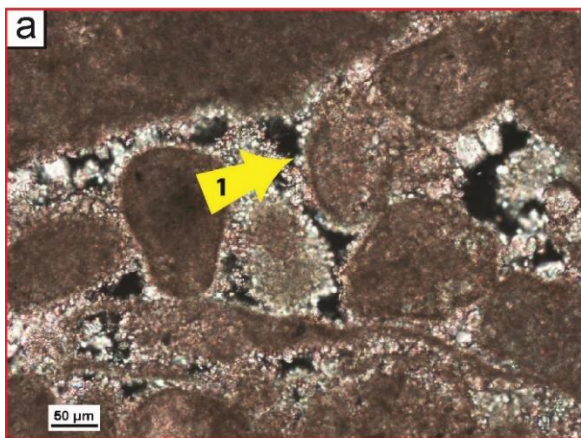
در بخش فلهیان بالایی در مقایسه با فلهیان پایینی فراوانی بیشتری دارند. در مقابل، توسعه قابل ملاحظه تخلخل‌های حفره‌ای، قالبی، شبکه‌ای و بین‌دانه‌ای در بخش فلهیان پایینی نقش عمده‌ای در ذخیره و انتقال هیدروکربن ایفاء می‌کنند. توزیع منافذ در بخش مخزنی سازند فلهیان نشان داد که تخلخل‌های حفره‌ای غیرمرتبط سیستم منفذی غالب می‌باشد. بررسی نحوه عملکرد فرآیندهای سیمانی‌شدن و میکرایتی‌شدن بر کیفیت مخزنی، از پیچیدگی خاصی برخوردار است در حالی که دولومیتی‌شدن و تراکم به وضوح سبب از بین رفتن تخلخل و تراوایی در رخساره‌ها شده‌اند. در بررسی مقاطع منتخب توسط میکروسکوپ کاتدولومینسانس زون‌بندی واضحی در سیمان بلوکی پرکننده فضای بین دانه‌ها مشاهده نمی‌شود که احتمالاً حاکی از نیمه‌بسته بودن سیستم دیاژنتیکی در توالی مورد مطالعه می‌باشد.

جدول ۲- خلاصه شرح مهم‌ترین عوارض دیاژنتزی شناسایی شده در سازند فلهیان در چاه مورد مطالعه به همراه نقش آن‌ها در کیفیت مخزنی.

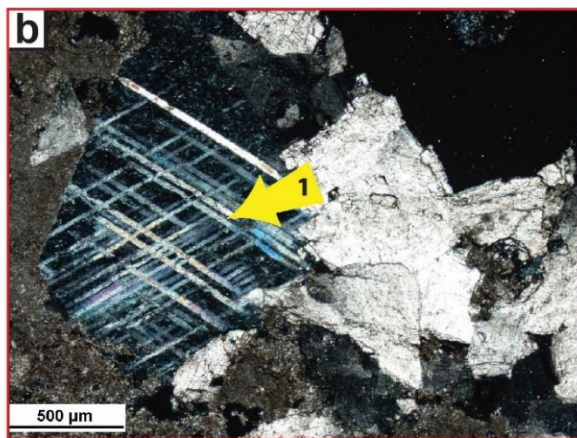
فرایند دیاژنتزی	ویژگی	تأثیر بر کیفیت مخزنی
انحلال انتخاب‌کننده فابریک	ایجاد حفرات قالبی بر اثر انحلال دانه‌ها یا آلوکم‌های ناپایدار در مقیاس‌های مختلف	منوط به ارتباط مناسب بین حفرات و عدم پرشدگی آن‌ها (حفظ حفرات به صورت کامل یا بخشی)، نقش فزاینده در افزایش کیفیت مخزنی
انحلال غیرانتخاب‌کننده فابریک	ایجاد حفرات حفره‌ای و کانالی بر اثر انحلال تمامی اجزا (سنگ و زمینه) در مقیاس‌های مختلف	کیفیت مخزنی
سیمان فیبری هم‌ضخامت	در اطراف قطعات فسیلی از قبیل آئیدها و نیز بیشتر در رخساره‌های دانه‌پشتیبان (گرینستون‌های آئیدی)	
سیمان پوئی کیلوتاپیک	به صورت بلورهای کلسیتی درشت (۲-۱ میلی‌متر) و پرکننده فضاهای خالی بین دانه‌ها و دربرگیرنده چند دانه	
سیمان هم‌بعد	به صورت موزائیکی از بلورهای بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار درشت و شفاف و جانشین شده در بخشی از صدف نرم‌تنان و پرکننده برخی از فضاهای بین آلوکم‌ها، حفره‌ها، رگه‌ها و شکستگی‌ها و نیز بیشتر در گرینستون‌های آئیدی	با ایجاد قشر سیمان دور اجزا و پر کردن حفرات و شکستگی‌ها، نقش فزاینده در کاهش کیفیت مخزنی
سیمان رشد اضافی هم‌محور	به شکل بلورهای شفاف منفرد کلسیت بر روی دانه‌ها (اغلب خرده‌های اکینودرم) به ویژه در رخساره‌های گرینستونی	
سیمان دروزی	به صورت بلورهایی که از حاشیه به مرکز درشت می‌شوند (از ۰.۱ تا ۰.۸ میلی‌متر متغییر) و پرکننده فضاهای خالی بین ذره‌ای و قالبی	

	به صورت بلورهای کلسیت اسپاری متوسط تا درشت دانه و گاهی رخ یک جهتی و دو جهتی و سطوح صاف و مرز مشخص و پرکننده برخی از شکستگی‌ها و حفرات انحلالی	سیمان کلسیت بلوکی
بدون تخلخل قابل توجه، عدم ایفای نقش در بهبود کیفیت مخزنی	اندازه‌ای بین ۸۰ تا ۱۵۰ میکرون، اغلب در رخساره‌های لاگونی، در اکثر موارد بافت رسوبی اولیه را تخریب کرده‌اند	دولومیت‌های متوسط بلور
	عمدتاً شکل‌دار با اندازه‌های ۵۰ تا ۳۵۰ میکرون، دارای مرزهای صاف و سطح کدر و غبار گرفته، سطح بلوری مسطح و خاموشی مستقیم، به صورت پراکنده در زمینه‌ای از گل آهکی (میکرایتی)	دولومیت‌های متوسط تا درشت بلور
	دارای بافت غیرمسطح، سطوح رخ منحنی شکل و خاموشی موجی، اغلب درون شکستگی‌ها، استیلولیت‌ها و تخلخل‌های قالبی و حفره‌ای	دولومیت زین‌اسبی (پاروک)
	بلورهای متوسط تا درشت (۴۰ تا ۵۰۰ میکرون) و شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار با مرزهای مسطح و حالت مات یا کدر در حاشیه یا درون استیلولیت‌ها	دولومیتی شدن مربوط به استیلولیت‌ها

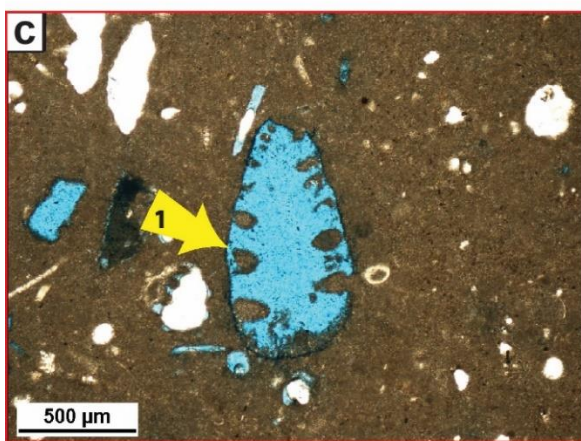




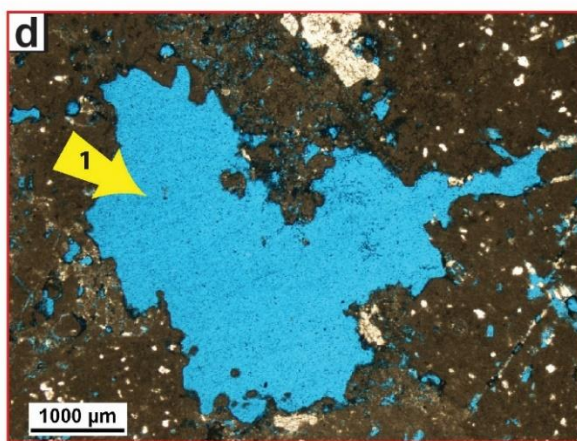
4098.32m, XPL.



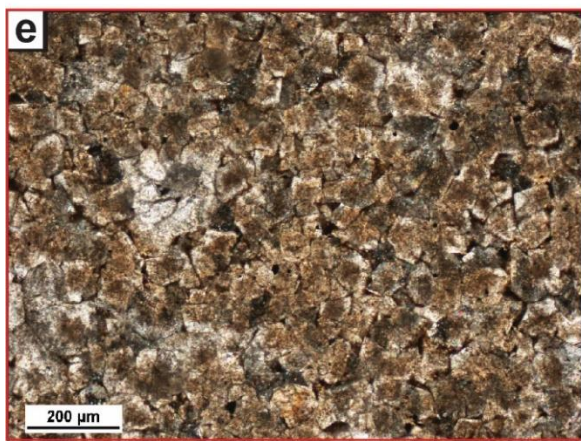
4370.40m, XPL.



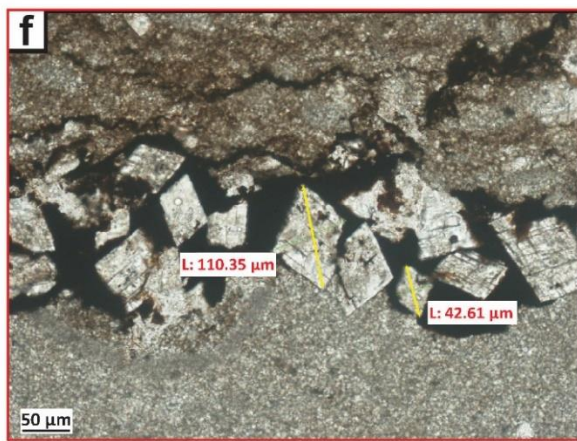
4293.54m, PPL.



4371.20m, PPL.

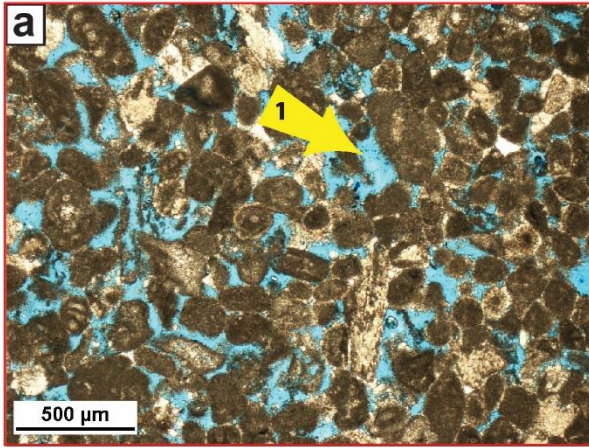


4243.12m, XPL.



4367.83m, PPL.

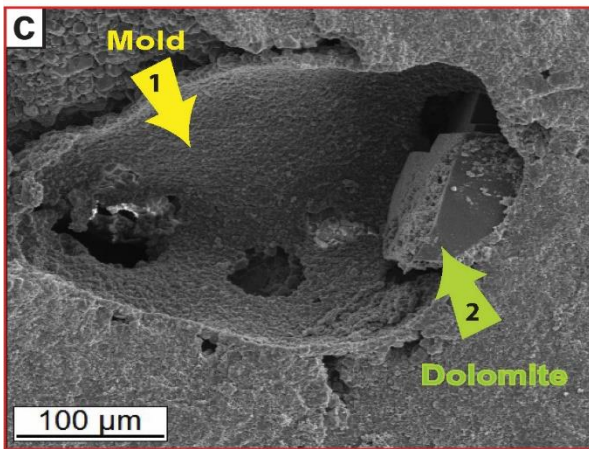
شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی از مهم‌ترین عوارض دیانژی شناسایی شده در سازند فهلیان در چاه مورد مطالعه. a: سیمان فیبری هم‌ضخامت در اطراف دانه‌ها. b: سیمان کلسیت بلوکی با رخ دو جهتی. c: انحلال قالبی در پوسته فرامینیفر (انتخاب‌کننده فابریک). d: انحلال حفره‌ای در رخساره گل‌پشتیان (غیرانتخاب‌کننده فابریک). e: بلورهای متوسط شکل‌دار و نیمه‌شکل‌دار دولومیت. f: بلورهای شکل‌دار دولومیت در طول استیلولیت با آغستگی نفتی.



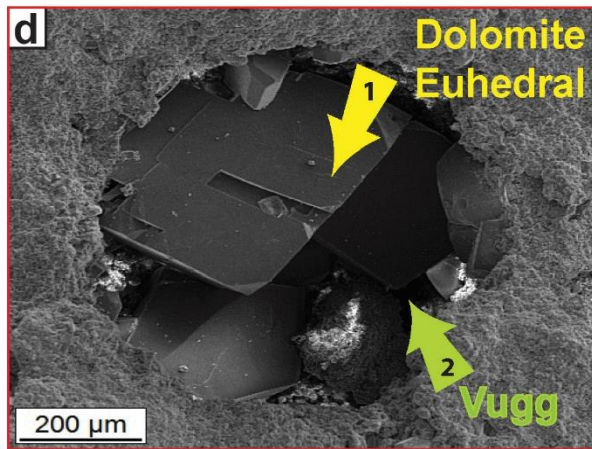
4258.12m, PPL.



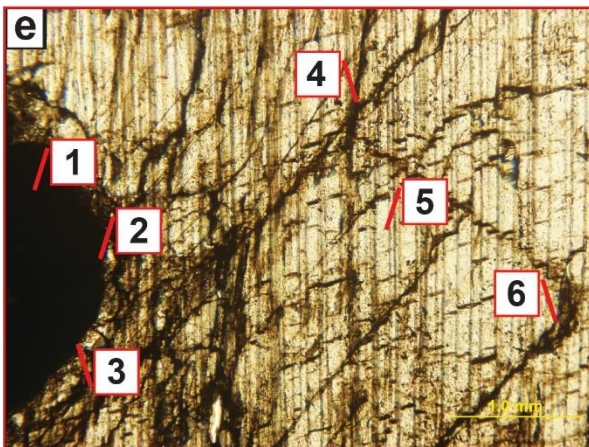
4101.55m, SEM.



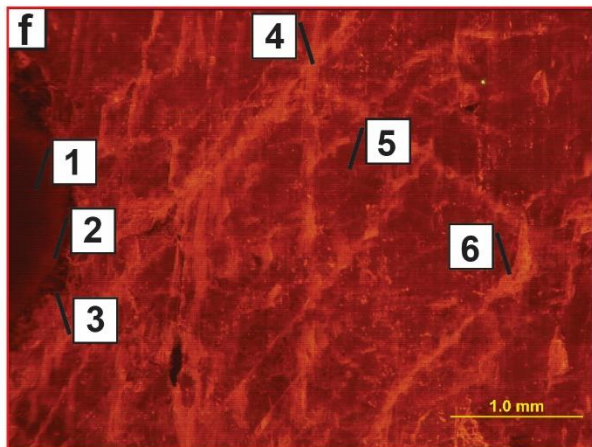
4237.58m, SEM.



4149.28m, SEM.



4342.88m, PPL.



4342.88m, CL.

شکل ۳- تصاویر منتخب مقطع نازک میکروسکوپی، میکروسکوپ الکترونی (SEM) و کاتودولومینسانس (CL) از مهم‌ترین عوارض دیاژنزی شناسایی شده در سازند فهلیان در چاه مورد مطالعه. a: تخلخل بین‌ذره‌ای و ارتباط بسیار خوب منافذ در رخساره دانه‌پشتیبان. b: بلورهای متوسط و درشت سیمان کلسیت اسپاری در تصویر SEM. c: قالب یک شکم‌پا (فلش ۱) همراه با بلور

دولومیت شکل‌دار (فلش ۲) در تصویر SEM. d: بلور درشت و کاملاً شکل‌دار دولومیت (فلش ۱) در تخلخل حفره‌ای (فلش ۲) در تصویر SEM. e و f: انواع سیمان در نور معمولی (PPL) و کاتدولومینسانس (CL). فازهای لومینسانس مشاهده شده عبارتند از: (۱) آلومها: دارای لومینسانس ضعیف قهوه‌ای روشن-تیره هستند. (۲) لامینه‌های اطراف آلومها: اغلب دارای لومینسانس همانند خود آلومها می‌باشند. (۳) سیمان وادوز اولیه در حاشیه آلومها: فاقد لومینسانس بوده و به رنگ تیره دیده می‌شود. (۴) تخلخل حاصل از شکستگی و یا فرآیندهای انحلالی. (۵) سیمان کلسیت بلوکی: دارای لومینسانس یکدست تیره، احتمالاً مربوط به دیاژنز دفنی می‌باشد. (۶) کلسیت نازک حاشیه‌ای: دارای لومینسانس قرمز روشن-نارنجی می‌باشد.

### ۳-۴- ژئوشیمی

در این مطالعه تعداد ۲۰ نمونه از کربنات‌های سازند فهلپان مورد آنالیز عنصری و نیز آنالیز ایزوتوپی کربن و اکسیژن قرار گرفته که کلیه داده‌های عناصر اصلی و فرعی و داده‌های ایزوتوپی نمونه‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. عناصر اصلی نمونه‌های کربناته شامل کلسیم با مقدار میانگین ۳۹.۴ درصد و منیزیم ۰/۲۸ درصد می‌باشد که بیانگر ترکیب سنگ‌آهک برای همه نمونه‌ها است (جدول ۴).

- استرانسیم (Sr)

میزان استرانسیم در سن آهک‌های سازند فهلپان بین ۲۴۹ پی‌پی‌ام و ۳۴۴ پی‌پی‌ام (میانگین ۲۸۶ پی‌پی‌ام) تغییر می‌کند (جدول ۴). تغییرات مقادیر استرانسیم با آراگونیت نسبت مستقیم و با کلسیت نسبت معکوس دارد [13] و با افزایش دمای آب دریا مقدار آن افزایش می‌یابد [14]. کاتیون‌های بزرگتر از کلسیم (مانند Na و Sr) ترجیحاً در شبکه باز اورتورومبیک آراگونیت جایگزین می‌شوند، در نتیجه مقدار Sr در آراگونیت بیشتر از کلسیت است.

- سدیم (Na)

میزان سدیم در سنگ‌آهک‌های سازند فهلپان بین ۱۳۲ پی‌پی‌ام و ۵۱۵ پی‌پی‌ام (میانگین ۲۸۲ پی‌پی‌ام) تغییر می‌کند (جدول ۴). افزایش شوری، عمق آب و میزان آراگونیت تأثیر مستقیمی بر افزایش مقادیر سدیم دارد [15]. تمرکز سدیم در آب‌های جوی کم است، بنابراین تأثیر دیاژنز جوی بر سنگ‌های آهکی می‌تواند موجب کاهش مقادیر سدیم شود. همچنین تبلور مجدد در طی رژیم دیاژنزی دریایی تدفینی سبب کاهش تمرکز سدیم در کربنات می‌شود [16].

- منگنز (Mn)

میزان منگنز در سنگ‌آهک‌های سازند فهلیان بین ۶ پی‌پی‌ام و ۵۰ پی‌پی‌ام (میانگین ۱۸ پی‌پی‌ام) تغییر می‌کند (جدول ۴). ترکیب کانی‌شناسی اولیه آراگونیتی [17]، و نیز وجود شرایط آکسیدان به دلیل ممانعت از ورود منگنز به شبکه کربنات کلسیم [18]، موجب کاهش و دیاژنز جوی موجب افزایش میزان منگنز در کربنات‌ها می‌شود. مقادیر کم منگنز در کربنات‌های مورد مطالعه می‌تواند حاکی از آراگونیتی بودن ترکیب کانی‌شناسی اولیه سازند فهلیان در این منطقه باشد [15].

- آهن (Fe)

میزان آهن در سنگ‌آهک‌های سازند فهلیان بین ۶ پی‌پی‌ام و ۷۶۶ پی‌پی‌ام (میانگین ۱۹۲ پی‌پی‌ام) تغییر می‌کند (جدول ۴). شرایط احیایی موجب افزایش و شرایط آکسیدان موجب کاهش مقادیر آهن و منگنز در فاز سیال می‌شود [15]. تمرکز پایین آهن در نمونه‌های مورد مطالعه می‌تواند بیانگر کاهش عمق آب و کاهش ورود مواد آواری باشد.

-اکسیژن ( $^{18}\text{O}\delta$ ) و کربن ( $^{13}\text{C}\delta$ )

مقادیر  $^{18}\text{O}\delta$  در کربنات‌های سازند فهلیان بین  $3/73\%$  PDB تا  $5/46\%$  PDB (میانگین  $4/48\%$  PDB) و مقادیر  $^{13}\text{C}\delta$  بین  $0/74\%$  PDB تا  $1/84\%$  PDB (میانگین  $1/27\%$  PDB) تغییر می‌کند (جدول ۴). با استفاده از ایزوتوپ‌های پایدار اکسیژن  $^{18}\text{O}\delta$  و کربن  $^{13}\text{C}\delta$  می‌توان اطلاعات با ارزشی در رابطه با دمای محیط دیرینه، دمای دیاژنتیکی، روند دیاژنز در محیط‌های دیاژنتیکی و تفکیک کربنات‌ها در نواحی مختلف به دست آورد [12, 19, 20]. مقادیر ایزوتوپ اکسیژن و کربن نمونه‌های مورد مطالعه در محدوده ایزوتوپی سنگ‌آهک‌های سازند فهلیان در برش نمونه فرار می‌گیرد و مشابهت دارد [21]. مقادیر ایزوتوپ اکسیژن نمونه‌ها بسیار مشابه نمونه‌های برش نمونه است اما مقادیر ایزوتوپ کربن نمونه‌ها مقادیر نسبتاً سنگین‌تری را نسبت به نمونه‌های برش نمونه نشان می‌دهند که می‌تواند حاکی از اثر کمتر دیاژنز متاتوریک در این منطقه باشد [12].

جدول ۴- فراوانی عناصر اصلی و فرعی و ایزوتوپ‌های اکسیژن و کربن به همراه مقادیر حداقل، حداکثر و میانگین در نمونه‌های آهکی مورد مطالعه سازند فهلیان در میدان مورد مطالعه.

Sample No.	Depth (m)	Ca (%)	Mg (%)	Fe (ppm)	Mn (ppm)	Na (ppm)	Sr (ppm)	d <sup>13</sup> C (permil V-PDB)	d <sup>18</sup> O (permil V-PDB)
387	4267.22	37.75	0.64	539	50	132	279	1.34	-3.73
429	4292.36	39.85	0.24	128	25	158	258	1.71	-4.17
433	4294.17	40.13	0.20	6	34	291	250	1.84	-4.84
484	4314.33	38.67	0.35	144	43	205	274	1.34	-4.08
493	4317.67	39.58	0.29	213	29	308	279	1.16	-4.53
503	4320.74	39.54	0.26	172	19	257	265	1.17	-4.48
510	4323.07	39.81	0.21	56	19	337	253	1.46	-4.30
514	4323.76	40.11	0.20	106	15	203	271	1.32	-4.50
519	4325.55	40.29	0.20	120	14	166	261	1.36	-4.56
524	4327.15	40.27	0.21	347	15	393	282	1.11	-4.81
529	4328.8	39.59	0.24	102	12	197	265	1.37	-4.31
533	4330.17	39.58	0.22	46	10	422	267	1.31	-4.41
542	4333.72	39.18	0.23	51	12	385	284	1.58	-3.88
555	4338.16	39.73	0.25	115	12	515	344	1.52	-3.89
580	4349.88	40.25	0.25	50	9	343	313	1.26	-4.68
590	4354.43	39.33	0.39	259	11	268	293	1.02	-5.46
609	4361.38	39.08	0.24	98	6	261	307	0.89	-4.80
624	4366.77	38.6	0.27	766	11	212	337	1.08	-4.65
674	4383.7	39.46	0.31	275	7	167	323	0.88	-4.71
702	4396.66	38.37	0.37	241	12	393	317	0.74	-4.73
Min	-	37.75	0.20	6	6	132	250	0.74	-5.46
Max	-	40.29	0.64	766	50	515	344	1.84	-3.73
Mean	-	39.45	0.28	192	18	282	286	1.27	-4.48

#### ۴-۴- تاریخچه دیاژنتیکی سازند فهلیان

با توجه به همپوشانی فرآیندهای دیاژنزی از نظر زمانی و مکانی و تأثیر آن‌ها بر یکدیگر، تعیین ترتیب رخداد این فرآیندها با مطالعات مختلف و در نظر گرفتن محیط رسوبی و شرایط زمین‌شناسی امکان‌پذیر می‌باشد. بر اساس شواهد دیاژنتیکی موجود در نمونه‌های ماکروسکوپی و میکروسکوپی توالی مورد مطالعه و استفاده از روش‌های پتروگرافی نظیر میکروسکوپ پلاریزان، الکترونی و کاتدولومینسانس و همچنین مطالعات ژئوشیمیایی، تاریخچه فرآیندهای دیاژنتیکی سازند فهلیان به شرح جدول ۳ می‌باشد.

جدول ۳- تاریخچه فرآیندهای دیاژنتیکی سازند فهلیان در توالی مورد مطالعه.

تأخیری ←	افزایش زمان	ابتدایی →	فرآیندهای دیاژنتیکی
	← - - - →		آشفستگی زیستی
	← - - - →		فابریک ژئوپتال
	← - - - →		تخلخل‌های اولیه (بین‌ذره‌ای، درون‌ذره‌ای)
	← - - - →		سیمان فیبری هم‌ضخامت
	← - - - →		میکرایتی‌شدن
	← - - - →		سیمان هلالی و آویزه‌ای
	← - - - →		تراکم فیزیکی (تماس نقطه‌ای و محدب-مقعر)
	← - - - →		سیمان کلسیت اسپاری هم‌بعد ریزبلور
	← - - - →		سیمان دروزی
	← - - - →		دولومیتی‌شدن انتخابی
	← - - - →		نوشکلی افزایشی
	← - - - →		تخلخل‌های (قالبی، حفره‌ای، بین‌بلوری، کانالی)
	← - - - →		سیمان کلسیت رشد اضافی هم‌محور
	← - - - →		سیمان کلسیتی درشت‌بلور-بلوکی
	← - - - →		شکستگی، درزه‌های انحلالی
	← - - - →		استیلولیتی‌شدن
	← - - - →		دولومیتی‌شدن مرتبط با استیلولیت‌ها
	← - - - →		دولومیت زین‌اسبی
	← - - - →		دولومیت‌زدایی
	← - - - →		پیریتی‌شدن
	← - - - →		سیلیسی‌شدن

#### ۴-۵- واحدهای جریان هیدرولیکی

#### ۴-۵-۱- تعیین گونه‌های سنگی به روش دسته‌بندی لوسیا

به منظور بررسی کیفیت مخزنی رخساره‌ها و ایجاد ارتباط بین رخساره‌ها با رده‌های پتروفیزیکی لوسیا و تعیین گونه‌های سنگی، داده‌های تخلخل و تراوایی مربوط به رخساره‌های بخش پایینی (مخزنی) سازند فهلیان بر روی نمودار لوسیا ترسیم گردیده‌اند (شکل ۴-ا). در این نمودار بیشتر نمونه‌های دانه‌غالب ریزرخساره‌های MF1 تا MF3 مربوط به محیط پشته‌های سدی در کلاس ۱ واقع شده‌اند، در صورتی که برخی از نمونه‌های ریزرخساره‌های MF2، MF3 و به‌ویژه MF4 در محدوده رده‌های مختلف پراکنده بوده و اثرات دیاژنز بر روی رخساره‌های پراثرژی را نشان می‌دهند. سایر ریزرخساره‌ها خارج از کلاس‌های پتروفیزیکی لوسیا و در کلاس فرضی شماره ۴ قرار گرفته‌اند که این موضوع می‌تواند برگرفته از موارد ذیل باشد:

۱- تغییرات شدید و ناهمگن رخساره‌ای در فواصل اندک، ۲- عدم توسعه فرآیند دولومیتی شدن فراگیر (تخلخل بین‌بلوری) در نمونه‌ها، ۳- تأثیر شدید فرآیندهای دیاژنزی بر روی کیفیت مخزنی با تبعیت از الگوی رخساره‌ای.

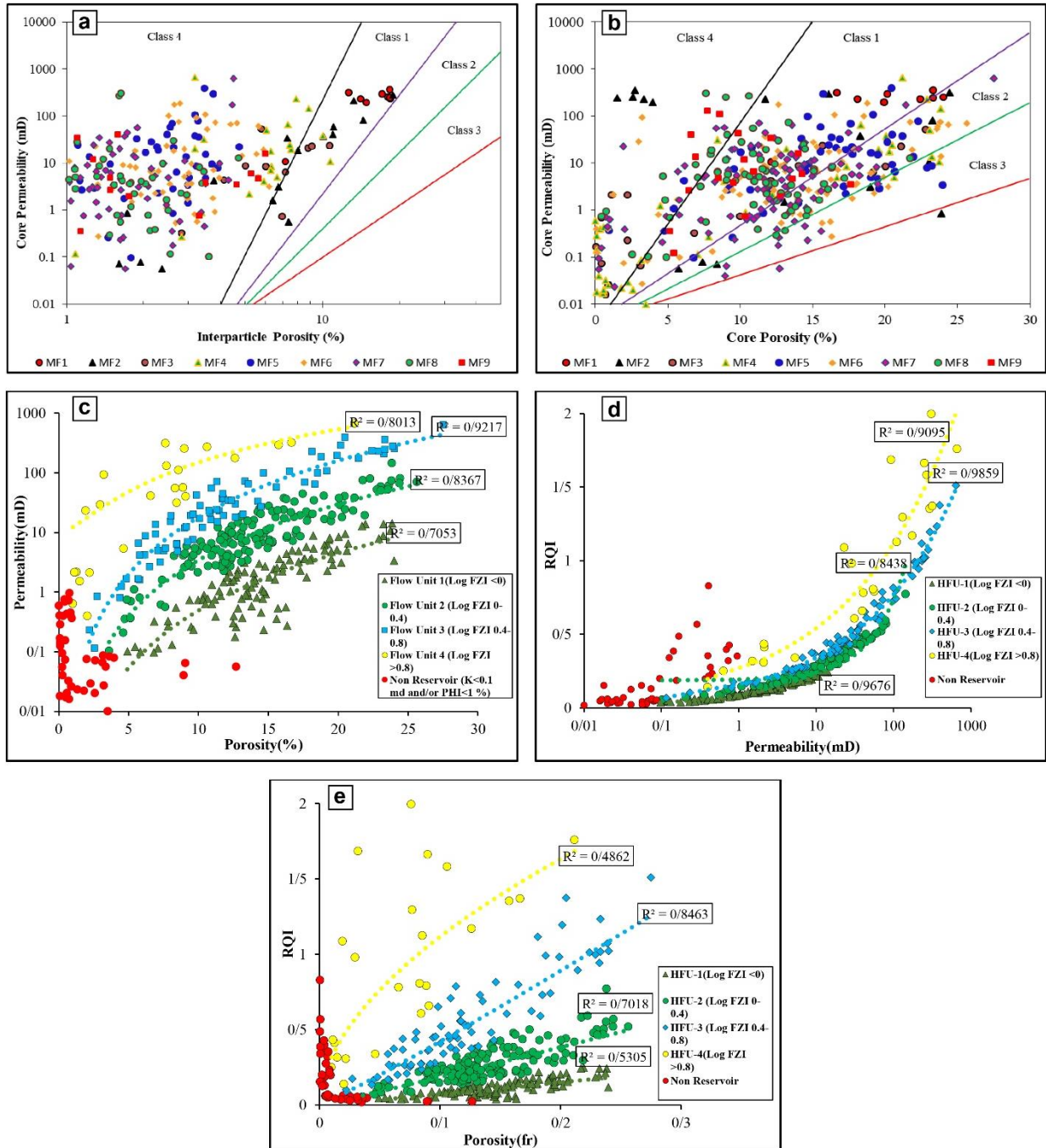
با توجه به موارد بالا می‌توان نتیجه گرفت که کلاس‌های پتروفیزیکی لوسیا ارتباط صحیحی با رخساره‌ها و به‌ویژه رخساره‌های گل‌غالب سازند فهلیان در میدان مورد مطالعه نشان نمی‌دهند و با استفاده از این روش نمی‌توان کیفیت مخزنی رخساره‌ها را به خوبی بررسی کرد.

از آنجایی که تشخیص ریزتخلخل‌ها و تفکیک درصد فراوانی آن‌ها در مقاطع نازک به سختی امکانپذیر است، اختلاف بین تخلخل کل حاصل از مغزه با مجموع تخلخل‌های مشاهده شده در مقاطع نازک به عنوان درصد ریزتخلخل برای هر نمونه در نظر گرفته شده است [22] که این روش از نظر جامعه آماری دقت لازم را ندارد، لذا با ایجاد تغییراتی در نمودار لوسیا، برای رسم داده‌ها از تخلخل کل به دست آمده از مغزه (با مقیاس عددی) به جای تخلخل بین‌دانه‌ای لوسیا (با مقیاس لگاریتمی) استفاده شده و دسته‌بندی رخساره‌ای و تعیین گونه‌های سنگی بر این اساس صورت گرفته است (شکل ۴-ب). برخی از محققین از این روش برای تعیین گونه‌های سنگی استفاده نموده‌اند (برای مثال: [23]) با توجه به این نمودار در سازند فهلیان داده‌های تخلخل و تراوایی ریزرخساره MF1 که مربوط به کمربند رخساره‌ای سدی است و ریزرخساره‌های MF5، MF6، MF7 و MF8 که مربوط به کمربند رخساره‌ای لاگون هستند در کلاس ۱، ریزرخساره‌های MF2 و MF3 مربوط به کمربند رخساره‌ای سدی و ریزرخساره MF5 که مربوط به کمربند رخساره‌ای لاگون است در کلاس ۲ قرار می‌گیرند. همچنین بسیاری از نمونه‌های ریزرخساره MF4

و MF9 که مربوط به کمر بند رخساره‌ای لاگون هستند، به دلیل تخلخل و تراوایی بسیار پایین در خارج از محدوده کلاس‌های پتروفیزیکی لوسیا در نواحی نزدیک به محور قائم و به صورت فرضی در کلاس ۴ واقع شده‌اند (شکل ۴-b). تخلخل ۰/۰۷ تا ۲۴/۴ درصد با میانگین ۱۲/۴۳ درصد و تراوایی ۰/۰۲ تا ۳۶۰ میلی‌داری با میانگین ۶۵ میلی‌داری از خصوصیات رخساره‌های کمر بند رخساره‌ای سدی و تخلخل ۰/۰۱ تا ۲۷/۵ درصد با میانگین ۱۲/۲ درصد و تراوایی ۰/۰۱ تا ۶۳۶ میلی‌داری با میانگین ۱۷/۷ میلی‌داری از ویژگی‌های رخساره‌های کمر بند رخساره‌ای لاگونی سازند فهلیان در منطقه مورد مطالعه می‌باشد.

با تطبیق رخساره‌های مورد مطالعه با کلاس‌های پتروفیزیکی لوسیا، ۴ گونه‌سنگی مختلف (RT1 to RT4) مرتبط با مخزن سازند فهلیان شناسایی و دسته‌بندی گردید. این گروه‌ها بر اساس نوع رخساره، شدت تأثیر فرآیندهای دیاژنزی و با اصلاحاتی در کلاس‌های پتروفیزیکی لوسیا از یکدیگر متمایز شده‌اند. از گونه‌ی سنگی ۱ (RT1) به سمت گونه‌ی سنگی چهار (RT4) کیفیت مخزنی کاهش می‌یابد به نحوی که گونه‌ی سنگی ۱ بهترین و گونه‌ی سنگی ۴ ضعیف‌ترین کیفیت مخزنی (فاقد کیفیت مخزنی) را دارا می‌باشند. مقایسه شکل ۴-a با ۴-b نشان می‌دهد که کیفیت مخزنی در سازند فهلیان در منطقه مورد مطالعه به شدت تحت تأثیر فرآیندهای دیاژنزی به ویژه در رخساره‌های لاگونی قرار داشته و تغییر الگوی رخساره‌ای در رتبه‌ی بعد جای دارد. به عبارت دیگر با توجه به گسترش اندک رخساره‌های سدی در این منطقه، کیفیت مخزنی سازند فهلیان مرهون عملکرد فزاینده فرآیندهای دیاژنزی می‌باشد. در این مطالعه با انطباق فرآیندهای دیاژنزی با نمودار تخلخل در برابر تراوایی برای رخساره‌های مختلف بخش مخزنی سازند فهلیان گروه‌های مخزنی مختلف تفکیک شده‌اند که از سمت راست نمودار به سمت چپ در غالب فرآیندهای دیاژنزی مختلفی به ترتیب شامل توسعه انحلال در تخلخل‌های شبکه‌ای، انحلال قالبی اجزای اسکلتی، توسعه سیمانی‌شدن، تراکم و دولومیتی‌شدن و در نهایت شکستگی‌ها تفکیک شده‌اند [12]. اثر فرایند دیاژنزی بر کیفیت مخزنی در بخش بحث مقاله تشریح خواهد شد.





شکل ۴-ا: توزیع تخلخل در برابر تراوایی در ریزرخساره‌های سازند فهلیان در نمودار پتروفیزیکی لوسیا که بر اساس آن سه محدوده پتروفیزیکی مجزا مشخص شده است [24]. تنها ریزرخساره‌های گرینستونی-پکستونی MF1-MF3 در محدوده کلاس ۱ و سایر ریزرخساره‌ها خارج از کلاس‌های پتروفیزیکی لوسیا (کلاس فرضی ۴) و تعدادی از نمونه‌ها به علت تخلخل کمتر از یک درصد بیرون از نمودار قرار گرفته‌اند. برخی از نمونه‌های ریزرخساره‌های MF2 و MF3 به دلیل سیمانی شدن گسترده دارای تخلخل و تراوایی بسیار ناچیز بوده و در کلاس فرضی ۴ واقع شده‌اند. b: توزیع تخلخل در برابر تراوایی در ریزرخساره‌های سازند فهلیان با تغییراتی در نمودار پتروفیزیکی لوسیا که بر اساس آن سه محدوده پتروفیزیکی مجزا مشخص شده است [24]. c:

واحدهای جریان تفکیک شده به روش FZI در بخش مخزنی سازند فهلیان. توزیع تخلخل-تراوایی در این واحدهای جریان نشان می‌دهد که از واحد یک به واحد چهار با اندکی کاهش در مقادیر تخلخل، تراوایی افزایش می‌یابد و به ترتیب واحدهای ۳، ۲ و ۱ دارای بهترین کیفیت مخزنی می‌باشند. d: نمودار RQI در مقابل تراوایی در بخش مخزنی سازند فهلیان. فاصله کم نقاط و عدد رگرسیون بالای منحنی‌های برازش شده بیانگر انطباق خوب بین نمونه‌ها با روندها می‌باشد. e: نمودار RQI در مقابل تخلخل در بخش مخزنی سازند فهلیان. پراکندگی زیاد نمونه‌های واحد جریان ۴ (فاصله زیادتر نقاط از منحنی برازش شده)، تنوع سیستم منافذ و تأثیر متفاوت فرآیندهای دیاژنزی بر این واحد جریان را نشان می‌دهد.

#### ۴-۵-۲- روش شاخص زون جریانی

ابتدا حد برش تراوایی معین گردیده و نمونه‌هایی با تراوایی کمتر از ۰/۱ میلی‌داری و یا تخلخل کمتر از ۱ درصد در گروه واحدهای غیرمخزنی قرار داده شده‌اند. بر اساس روش شاخص زون جریانی، چهار واحد جریانی همراه با یک واحد غیرمخزنی تفکیک شده از طریق حد برش، در چاه مورد بررسی شناسایی شده است (شکل ۴-۴). روند تغییرات تخلخل-تراوایی نشان می‌دهد که از واحد جریانی یک به واحد چهار با وجود افزایش تراوایی، تخلخل روند کاهش نسبی نشان می‌دهد. با توجه به مقادیر تخلخل-تراوایی و میزان فراوانی نمونه‌ها می‌توان به ترتیب واحدهای ۳، ۲ و ۱ را به عنوان بهترین واحدهای جریانی در نظر گرفت. واحد جریانی ۴ با وجود تراوایی بالا به دلیل پایین بودن تخلخل و فراوانی کم نمونه‌ها از نظر کیفیت مخزنی در رتبه چهارم قرار می‌گیرد (شکل ۴-۴). منحنی‌های برازش شده مربوط به داده‌های تخلخل و تراوایی برای واحدهای جریانی شناسایی شده ترسیم شده‌اند که فاصله کم قرارگیری نقاط از منحنی بیانگر تفکیک صحیح آن‌ها می‌باشد (شکل ۴-۴ d و ۴-۴ e). در نمودار تخلخل در برابر RQI بیشترین پراکندگی مربوط به واحد جریانی ۴ می‌باشد (عدد رگرسیون پایین‌تر و فاصله نقاط از منحنی زیادتر) که این امر برگرفته از تنوع سیستم منافذ و تأثیر متفاوت فرآیندهای دیاژنزی بر نمونه‌های این واحد جریانی است (شکل ۴-۴ e).

#### ۴-۵-۳- روش شعاع گلوگاه تخلخل

در این مطالعه از فرمول پیتمن [25] که در آن ضرایب معادله وینلند تصحیح شده است برای تعیین گونه‌های سنگی استفاده شده است. گونه‌های سنگی که از طریق روش وینلند ارائه می‌شوند منعکس کننده هر دو فابریک رسوبی و دیاژنزی هستند [23, 25]. این گونه‌های سنگی زون‌های با نسبت تخلخل به تراوایی ثابت را ارائه می‌دهند که با شعاع گلوگاه تخلخل ارتباط مستقیم داشته و ابزاری کارآمد جهت تعیین زون‌های مخزنی به شمار می‌روند [26]. در این مطالعه با استفاده از حد برش

تخلخل بیشتر از ۱ درصد و تراوایی بیشتر از ۰/۱ میلی‌داری، مقادیر R35 محاسبه شده برای سازند فلهلیان در چهار دسته (گونه سنگی) و یک واحد غیرمخزنی به شرح زیر قابل تفکیک هستند:

واحد غیرمخزنی: منافذ در حد نانو با مقدار R35 کوچکتر از ۰/۱ میکرون.

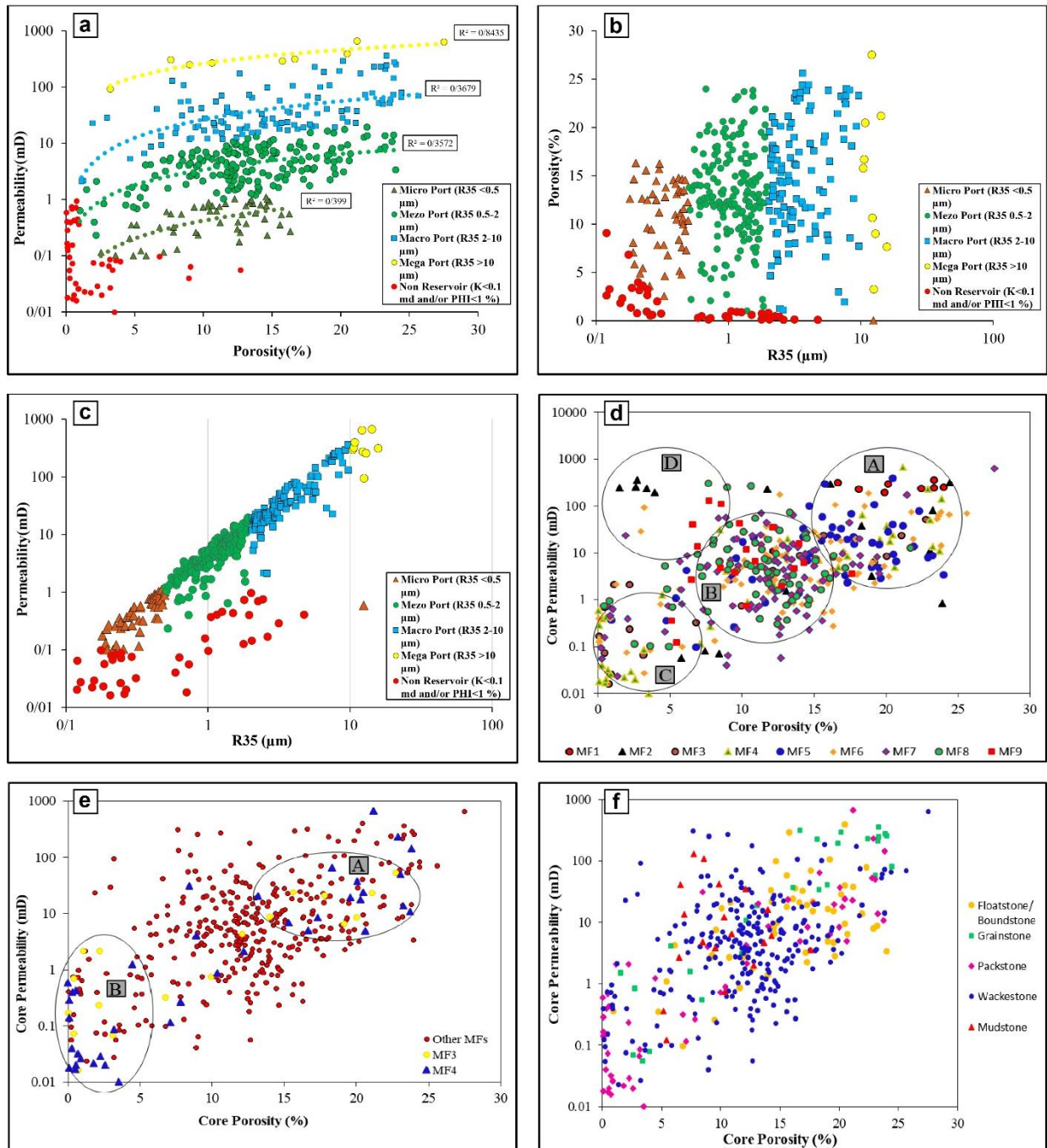
گونه سنگی ۱: منافذ کوچک با مقدار R35 بین ۰/۱ تا ۰/۵ میکرون.

گونه سنگی ۲: منافذ متوسط با مقدار R35 بین ۰/۵ تا ۲ میکرون.

گونه سنگی ۳: منافذ بزرگ با مقدار R35 بین ۲ تا ۱۰ میکرون.

گونه سنگی ۴: منافذ خیلی بزرگ با مقدار R35 بزرگتر از ۱۰ میکرون.

تعیین گونه‌های سنگی از طریق روش وینلند در شکل ۵-a نشان داده شده است. منافذ با شعاع گلوگاه بزرگتر تراوایی بالاتری نشان می‌دهند [27]. ترسیم مقادیر شعاع گلوگاه تخلخل در اشباع ۳۵ درصد جیوه در مقابل تخلخل ارتباط معینی نشان نمی‌دهد که حاکی از این است که تخلخل دیاژنزی غیر مرتبط تأثیری بر شعاع گلوگاه تخلخل ندارد و بنابراین منجر به افزایش تراوایی نمی‌شود (شکل ۵-b)، در حالی که با افزایش اندازه گلوگاه تخلخل، تراوایی افزایش می‌یابد و بالاترین مقادیر تراوایی در نمونه‌های با اندازه منافذ خیلی بزرگ مشاهده می‌شود (شکل ۵-c).



شکل ۵- a: گونه‌های سنگی تفکیک شده به روش شعاع گلوگاه تخلخل (R35) در بخش مخزنی سازند فهلیان. توزیع تخلخل- تراوایی در چهار گونه سنگی و یک واحد غیرمخزنی تفکیک شده نشان می‌دهد که با افزایش اندازه گلوگاه تخلخل از گونه سنگی ۱ به ۴، بدون تغییر قابل ملاحظه تخلخل، تراوایی افزایش می‌یابد و گونه سنگی ۴ دارای بهترین کیفیت مخزنی است. b: ارتباط نامعین بین شعاع گلوگاه تخلخل با مقادیر تخلخل در بخش مخزنی سازند فهلیان در میدان مورد مطالعه. c: ارتباط مستقیم افزایش شعاع گلوگاه تخلخل با مقادیر تراوایی در بخش مخزنی سازند فهلیان در میدان مورد مطالعه. d: تأثیر فرآیندهای دیاژنزی بر توزیع تخلخل و تراوایی مغزه در بخش مخزنی سازند فهلیان با تفکیک ریزرخساره‌ها. در نمونه‌هایی که

فرآیندهای انحلال و شکستگی توسعه یافته کیفیت مخزنی بالا و در نمونه‌های دارای سیمانی شدن غالب، میکرایتی شدن و تراکم، کیفیت مخزنی پایین است. محدوده‌های رخساره‌ای مشخص شده در شکل به ترتیب عبارتند از: A) رخساره‌های همراه با تخلخل شبکه‌ای و توسعه انحلال. B) رخساره دارای انحلال قالبی اجزای اسکلتی. C) رخساره‌های دارای توسعه سیمانی شدن، تراکم و دولومیتی شدن. D) رخساره دارای شکستگی‌های باز. e: توزیع تخلخل و تراوایی در دو ریزرخساره MF3 و MF4 و مقایسه آن با سایر ریزرخساره‌های بخش مخزنی سازند فهلیان. تأثیر متفاوت فرآیندهای دیاژنزی منجر به پراکندگی نمونه‌های این دو ریزرخساره و تفاوت چشمگیر کیفیت مخزنی در آن شده است. در محدوده A تأثیر افزایش فرآیندهای دیاژنزی به ویژه انحلال سبب بهبود کیفیت مخزنی و در محدوده B تأثیر مخرب فرآیندهای دیاژنزی به ویژه سیمانی شدن، تراکم، دولومیتی شدن و میکرایتی شدن سبب از بین رفتن کیفیت مخزنی این دو ریزرخساره شده است. f: توزیع تخلخل و تراوایی مغزه از دیدگاه بافت‌های مختلف رسوبی در رخساره‌های بخش مخزنی سازند فهلیان. پراکندگی بالایی در بین گروه‌های مختلف دیده می‌شود و روند معینی قابل شناسایی نیست که حاکی از تأثیر متفاوت فرآیندهای دیاژنزی بر رخساره‌ها می‌باشد.

## ۵- بحث

### ۵-۱- تأثیر دیاژنزی بر کیفیت مخزنی

فرآیندهای دیاژنزی نقش بسیار مهمی در تعیین کیفیت مخزنی نهایی توالی‌های کربناته دارند، لذا فرآیندهای دیاژنزی سازند فهلیان در مطالعات پتروگرافی بررسی شده‌اند. با توجه به مهم‌ترین فرآیندهای دیاژنزی تأثیرگذار در بخش مخزنی سازند فهلیان شناسایی شده و همچنین بررسی تخلخل و تراوایی در بخش مخزنی سازند فهلیان در توالی مورد مطالعه نشان داد این تغییرات در تخلخل و تراوایی شدیداً وابسته به فرآیندهای دیاژنزی با پیروی از الگوی تغییرات رخساره‌ای است. سایر مطالعات بر روی سازند فهلیان در دشت آبادان نیز به عملکرد فرایند دیاژنزی در ایجاد رخساره‌های مخزنی اشاره کرده‌اند [28, 29]. بررسی کیفیت مخزنی با استفاده از پارامترهای پتروفیزیکی نیازمند در نظر گرفتن تأثیرات هم‌زمان کلیه پارامترهای تأثیرگذار به ویژه رخساره اولیه و تأثیر فرآیندهای دیاژنزی می‌باشد. به دلیل گل‌غالب بودن ماهیت بیشتر رخساره‌ها، ناهمگن بودن تغییرات رخساره‌ای و تأثیر عمده دیاژنزی، تعیین روند تغییرات تخلخل و تراوایی به راحتی امکان‌پذیر نیست (شکل ۵-d). بنابراین کمربندهای رخساره‌ای از نظر کیفیت مخزنی به ویژه در رخساره‌های لاگونی سازند فهلیان فاقد نظم بوده و روند معینی را نشان نمی‌دهند. رخساره‌های دانه‌غالب زیرمحیط پشته‌های سدی (به ویژه بخش مرکزی شول) از کیفیت مخزنی بسیار خوبی در توالی مورد مطالعه برخوردارند، ولیکن با توجه به نگاره‌های چاه‌پیمایی، بررسی مغزه‌های حفاری و مقاطع نازک، فاقد آغستگی نفتی بوده و در زیر سطح تماس آب و نفت واقع شده‌اند. از سوی دیگر کیفیت مخزنی برخی از رخساره‌های زیرمحیط لاگونی به دلیل تأثیر گسترده فرآیندهای دیاژنزی ثانویه بهبود قابل ملاحظه‌ای یافته و این رخساره‌ها را در سطح رخساره‌های مخزنی مطلوب قرار داده است. سنگ‌های مخزنی بر اساس دامنه تغییرات تخلخل و تقسیم‌بندی کیفی مخزنی به ۴ دسته اصلی بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط و خوب

قابل تقسیم می‌باشند [30]. بر مبنای تغییرات تراوایی بیشتر سنگ‌های مخزنی به ۵ دسته بسیار ضعیف، ضعیف، متوسط، خوب و عالی قابل تقسیم می‌باشند [30]. تقدم، تأخر و شدت فرآیندهای دیاژنزی با تأثیر عمده بر سیستم منافذ، منجر به افزایش و یا کاهش تخلخل و تراوایی و بهبود یا از بین رفتن کیفیت مخزنی در رخساره‌های مختلف شده و بررسی تأثیر هم‌زمان تمامی این فرآیندها بر کیفیت مخزنی سازند فلهلیان در میدان مورد مطالعه بسیار دشوار است. در شکل ۵-d توزیع تخلخل و تراوایی در ریزرخساره‌های مختلف بخش مخزنی سازند فلهلیان ترسیم شده است. بر اساس تأثیر دیاژنزی می‌توان کیفیت مخزنی را به سه گروه عمده تفکیک نمود [31]:

۱- کیفیت مخزنی بالا: حاصل توسعه انحلال (تمایل داده‌ها در سمت راست نمودار تخلخل در مقابل تراوایی) و شکستگی (تمایل داده‌ها در سمت چپ و بالای نمودار) و عدم تأثیر سیمانی‌شدن و تراکم می‌باشد.

۲- کیفیت مخزنی متوسط: برآیند تأثیر فرآیندهای دیاژنزی برابر بوده و نمی‌توان فرآیند دیاژنزی بارزی را به عنوان عامل تأثیر گذار غالب در افزایش یا کاهش تخلخل و تراوایی برشمرد.

۳- کیفیت مخزنی پایین: تأثیر سیمانی‌شدن، دولومیتی‌شدن، میکرایتی‌شدن و تراکم منجر به از بین رفتن خواص مخزنی می‌شود.

به‌منظور تشخیص بهتر تأثیر فرآیندهای دیاژنزی بر کیفیت مخزنی به‌صورت نمونه توزیع تخلخل و تراوایی در ریزرخساره‌های دانه‌پشتیبان MF3 و MF4 سازند فلهلیان مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۵-e). همان‌گونه که مشاهده می‌شود این ریزرخساره‌ها دارای دو ساختار متفاوت می‌باشند به‌طوری که برخی از نمونه‌ها دارای تخلخل و تراوایی خوبی بوده و تأثیر دیاژنزی در بهبود کیفیت مخزنی را به وضوح نشان می‌دهند. در سوی دیگر تأثیر مخرب فرآیندهای دیاژنزی به‌ویژه سیمانی‌شدن، میکرایتی‌شدن فراگیر، تراکم و دولومیتی‌شدن در برخی نمونه‌های این ریزرخساره‌ها موجب از بین رفتن تخلخل و تراوایی و به دنبال آن کیفیت مخزنی شده است. بررسی توزیع تخلخل و تراوایی از دیدگاه بافت‌های مختلف رسوبی در رخساره‌های سازند فلهلیان در توالی مورد مطالعه حاکی از پراکندگی بالای نمونه‌ها در بین گروه‌های مختلف بوده و روند معینی قابل شناسایی نیست که این موضوع بیانگر تأثیر شدید و متفاوت فرآیندهای دیاژنزی بر خصوصیات مخزنی رخساره‌ها می‌باشد (شکل ۵-f).

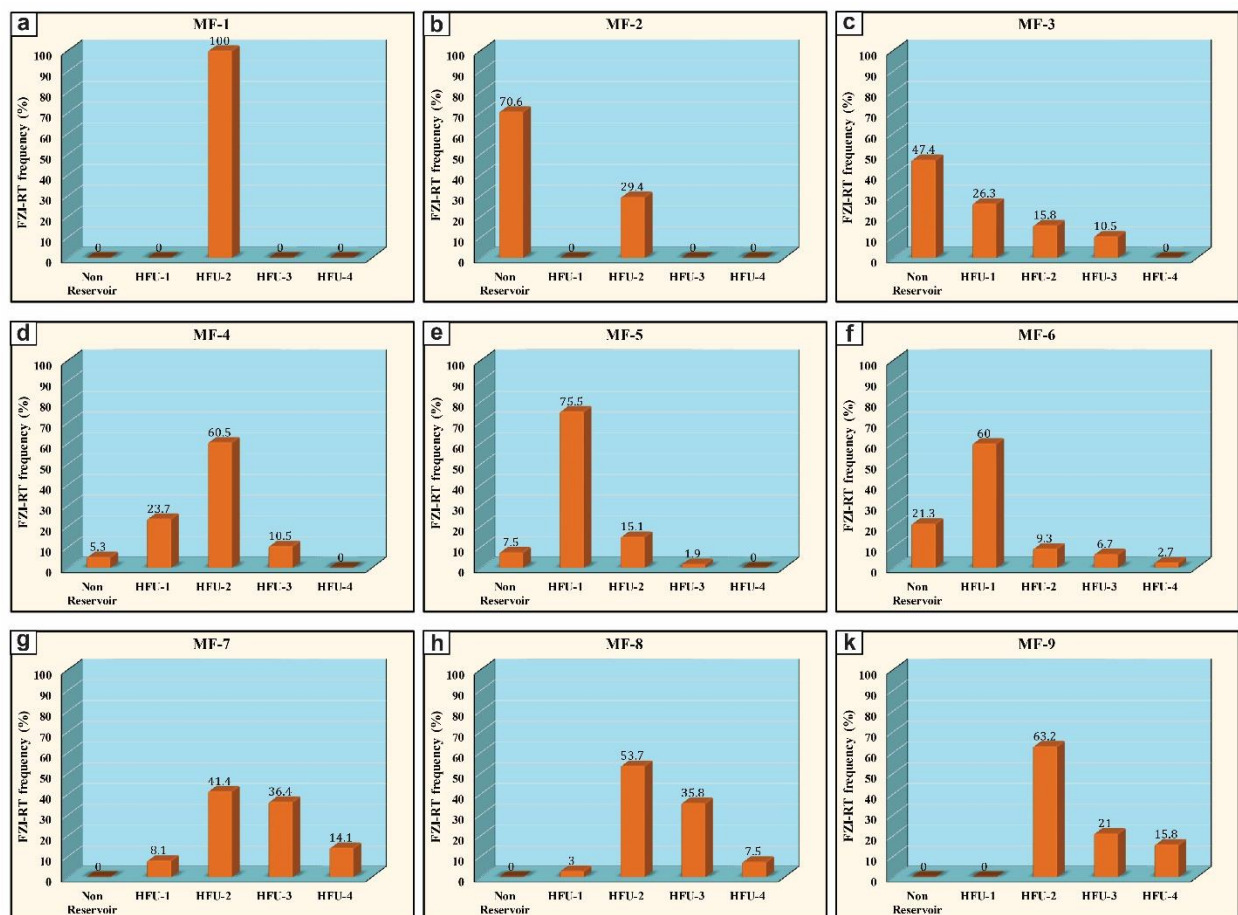
## ۲-۵- ارتباط رخساره‌ها و گونه‌های سنگی تعیین شده به روش شاخص زون جریانی

به‌منظور مشخص نمودن مفهوم زمین‌شناسی واحدهای جریانی تفکیک شده به روش FZI و تعیین کیفیت مخزنی رخساره‌ها، ارتباط آن‌ها با ریزرخساره‌های شناسایی شده در سازند فلهلیان بررسی گردیده است. سپس فراوانی واحدهای جریانی منفرد به

روش شاخص زون جریانی در هر ریزرخساره و نیز مجموع ریزرخساره‌های بخش مخزنی سازند فهلیان محاسبه شده (جدول ۵) و هیستوگرام مربوط به آن‌ها ترسیم شده است (شکل ۶). با بررسی نحوه توزیع هر یک از واحدهای جریانی در ریزرخساره‌ها، می‌توان تا حدودی کیفیت مخزنی ریزرخساره‌ها را تعیین کرد، هرچند ممکن است که ارتباط معینی بین واحدهای FZI با رخصاره‌ها وجود نداشته باشد. نتایج نشان می‌دهد که واحد ۲ با ۴۳/۲ درصد و واحد ۴ با ۴/۵ درصد، به ترتیب دارای بیشترین و کمترین فراوانی واحدهای جریانی در ریزرخساره‌های بخش مخزنی سازند فهلیان در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. تأثیر ناهمگن فرآیندهای دیاژنزی و تنوع سیستم منافذ موجب کاهش کیفیت مخزنی و پراکندگی زیاد واحدهای جریانی مرتبط با ریزرخساره‌های دانه‌غالب MF3 و MF4 شده است (شکل ۶). این موضوع در بخش مربوطه بررسی و کاهش کیفیت مخزنی متأثر از ناهمگنی دیاژنتیک در این دو ریزرخساره تفسیر شده است (شکل ۵-e). از سوی دیگر افزایش کیفیت مخزنی و تنوع زیاد واحدهای جریانی ناشی از تأثیر شدید دیاژنز و تنوع سیستم منافذ به ترتیب در ریزرخساره‌های گل غالب MF7 و MF8 به چشم می‌خورد. با توجه به میزان پراکندگی واحدهای جریانی هیدرولیکی در رخصاره‌ها می‌توان نتیجه گرفت ریزرخساره MF1 (صرفاً شامل یک واحد جریانی)، و ریزرخساره MF6 (شامل هر چهار واحد جریانی و نیز واحد غیرمخزنی) به ترتیب یکنواخت‌ترین (همگن‌ترین) و غیریکنواخت‌ترین (ناهمگن‌ترین) ریزرخساره‌های بخش مخزنی سازند فهلیان را در چاه مورد مطالعه تشکیل می‌دهند.

جدول ۵- درصد فراوانی واحدهای جریانی به روش شاخص زون جریانی در ریزرخساره‌های بخش مخزنی سازند فهلیان در میدان مورد مطالعه.

Microfacies	Non Reservoir	HFU-1	HFU-2	HFU-3	HFU-4
MF-1	0	0	100	0	0
MF-2	70.6	0	29.4	0	0
MF-3	47.4	26.3	15.8	10.5	0
MF-4	5.3	23.7	60.5	10.5	0
MF-5	7.5	75.5	15.1	1.9	0
MF-6	21.3	60	9.3	6.7	2.7
MF-7	0	8.1	41.4	36.4	14.1
MF-8	0	3	53.7	35.8	7.5
MF-9	0	0	63.2	21	15.8
Total Percent	16.9	21.8	43.2	13.6	4.5



شکل ۶- a-k: درصد فراوانی واحدهای جریان هیدرولیکی به روش شاخص زون جریانی در ریزرخساره‌های MF1 تا MF9 بخش مخزنی سازند فهلیان در میدان مورد مطالعه. تأثیر ناهمگن فرآیندهای دیاژنتیک و تنوع سیستم منافذ موجب پراکندگی زیاد واحدهای جریانی و کاهش کیفیت مخزنی در ریزرخساره‌های MF3 و MF4 شده است. ریزرخساره MF1 به دلیل کمترین تنوع (فقط شامل واحد جریانی ۲) و ریزرخساره MF6 به دلیل بیشترین تنوع واحدهای جریانی به ترتیب همگن‌ترین و ناهمگن‌ترین ریزرخساره‌های بخش مخزنی سازند فهلیان در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. تأثیر ناهمگن فرآیندهای دیاژنتیک و تنوع سیستم منافذ موجب پراکندگی زیاد واحدهای جریانی و افزایش کیفیت مخزنی در ریزرخساره‌های MF7 و MF8 شده است. واحد جریانی ۲ و ۴ به ترتیب دارای بیشترین و کمترین فراوانی در بخش مخزنی سازند فهلیان در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. پراکندگی واحدهای جریانی بیانگر پیچیدگی مخزنی سازند فهلیان می‌باشد.

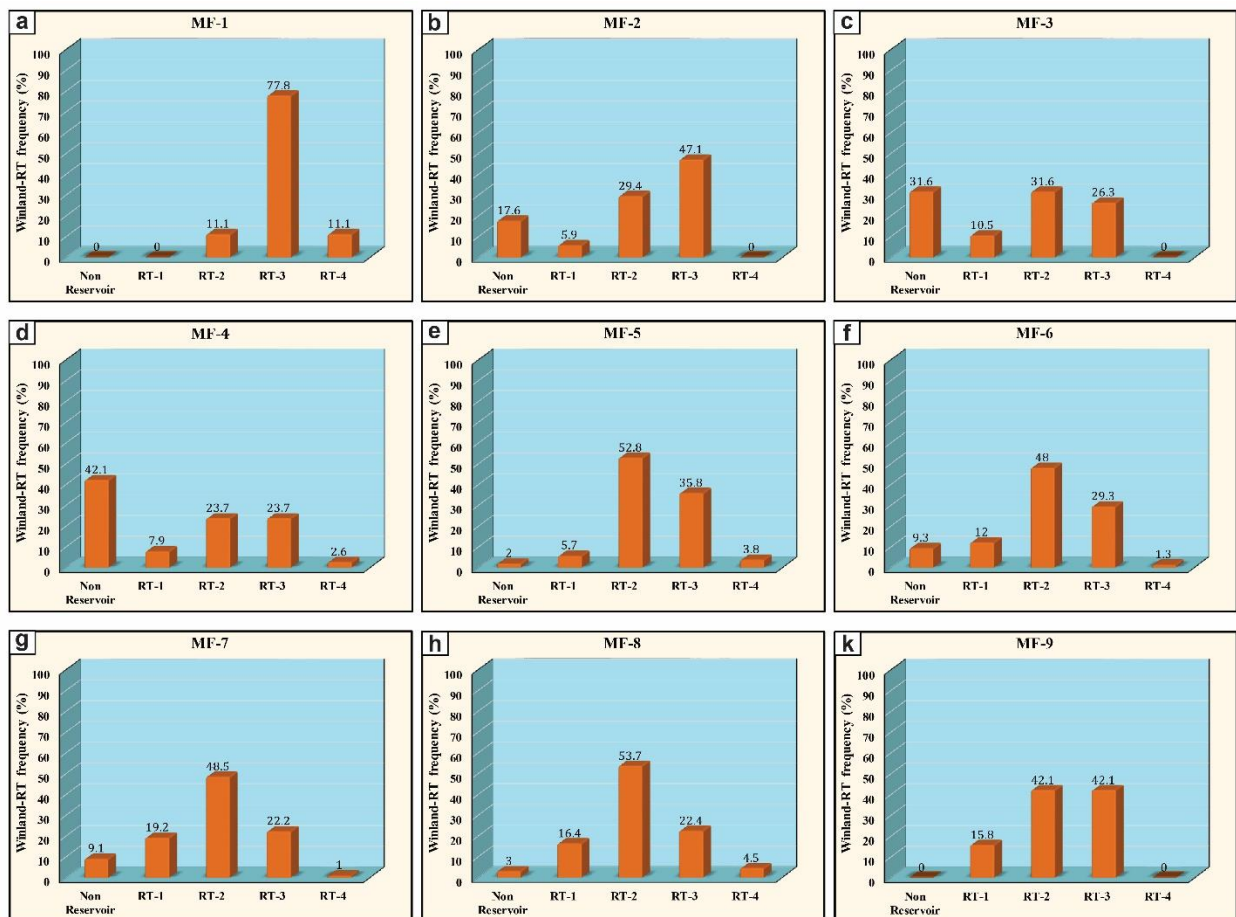


### ۳-۵- ارتباط رخساره‌ها و گونه‌های سنگی وینلند

در راستای درک بهتر مفهوم زمین‌شناسی گونه‌های سنگی و تعیین کیفیت مخزنی رخساره‌ها، ارتباط آن‌ها با ریزرخساره‌های شناسایی شده در سازند فهلیان بررسی شده است. ابتدا درصد فراوانی هر یک از گونه‌های سنگی وینلند در هر ریزرخساره و نیز مجموع ریزرخساره‌های بخش مخزنی سازند فهلیان محاسبه شد (جدول ۶). سپس هیستوگرام مربوط به آن ترسیم گردید (شکل ۷). با محاسبه درصد فراوانی هر یک از واحدها در ریزرخساره‌ها می‌توان بهترین و ضعیف‌ترین ریزرخساره‌ها را از نظر کیفیت مخزنی تعیین کرد. یک رخساره می‌تواند در بخش‌های مختلف مخزن تخلخل ثابت داشته، اما تراوایی متفاوتی را نشان دهد که این امر حاکی از وجود واحدهای جریان‌ی مختلف می‌باشد [23]. با توجه به گسترش اندک گونه سنگی ۴ (بهترین کیفیت مخزنی) در سازند فهلیان، مجموع فراوانی گونه‌های سنگی ۳ و ۴ مبنای تعیین کیفیت مخزنی ریزرخساره‌ها قرار گرفته است. لذا می‌توان گفت که ریزرخساره‌های MF1 و MF2 مربوط به کمر بند رخساره‌ای سدی و ریزرخساره‌های MF9، MF5 و MF6 مربوط به کمر بند رخساره‌ای لاگون دارای بهترین کیفیت مخزنی می‌باشند. ریزرخساره‌های MF3 و MF4 به ترتیب مربوط به کمر بند رخساره‌ای سدی و لاگون نزدیک سد ضعیف‌ترین کیفیت مخزنی را دارند.

جدول ۶- درصد فراوانی گونه‌های سنگی وینلند در ریزرخساره‌های بخش مخزنی سازند فهلیان در میدان مورد مطالعه.

Microfacies	Non Reservoir	RT-1	RT-2	RT-3	RT-4
MF-1	0	0	11.1	77.8	11.1
MF-2	17.6	5.9	29.4	47.1	0
MF-3	31.6	10.5	31.6	26.3	0
MF-4	42.1	7.9	23.7	23.7	2.6
MF-5	2	5.7	52.8	35.8	3.8
MF-6	9.3	12.0	48	29.3	1.3
MF-7	9.1	19.2	48.5	22.2	1
MF-8	3	16.4	53.7	22.4	4.5
MF-9	0	15.8	42.1	42.1	0
Total Percent	12.7	10.4	37.9	36.3	2.7



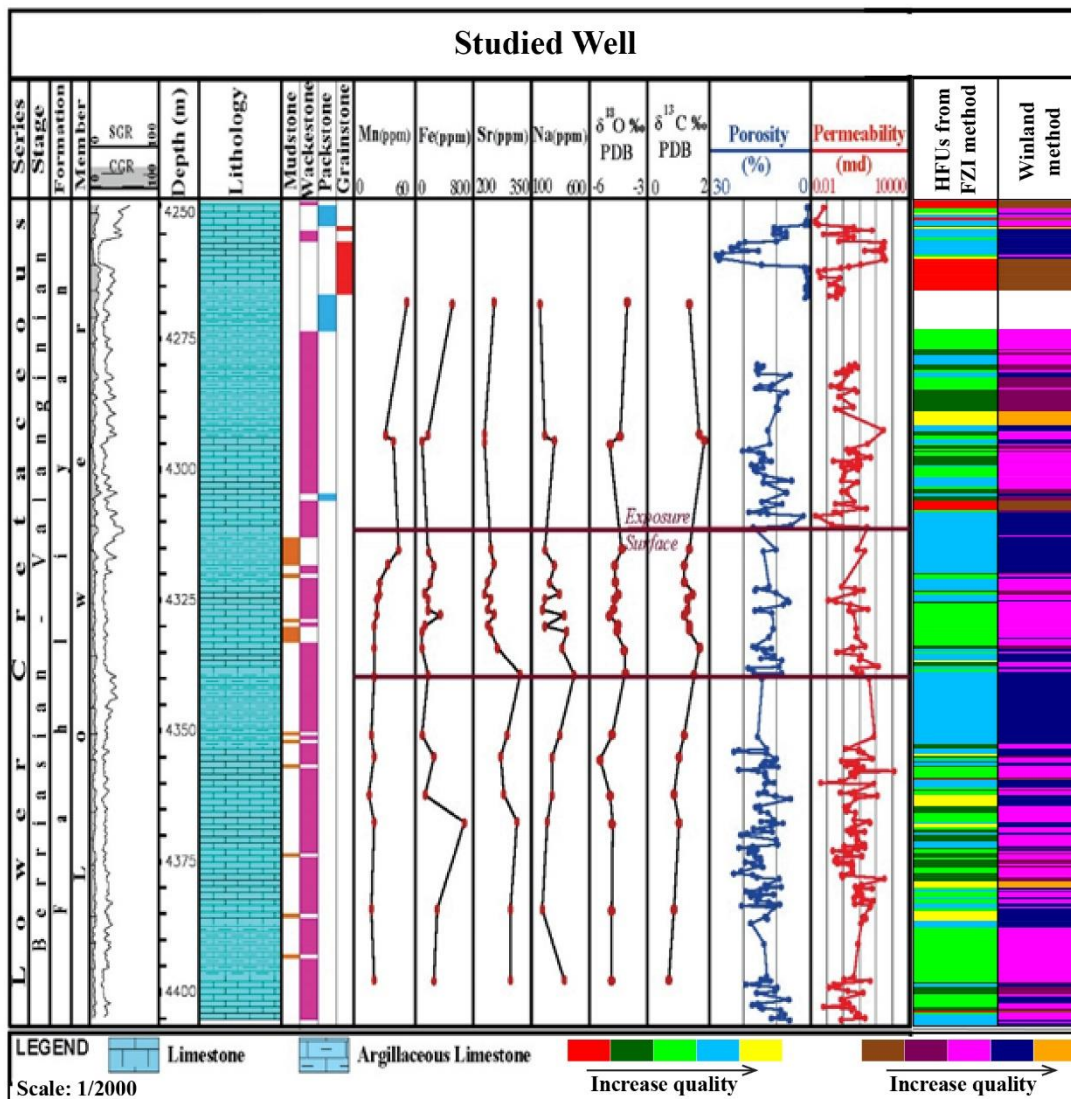
شکل ۷-ا: درصد فراوانی گونه‌های سنگی وینلند در ریزرخساره‌های MF1 تا MF9 بخش مخزنی سازند فهلیان در میدان مورد مطالعه. مجموع گونه‌های سنگی سه و چهار با بهترین کیفیت مخزنی دارای بیشترین فراوانی در MF1 می‌باشد، در حالی که واحد غیرمخزنی بیشترین فراوانی را در MF4 دارد. مجموع واحدهای جریان ۳ و ۴ با بهترین کیفیت مخزنی بیشترین فراوانی را در MF8 و MF7 و واحد غیرمخزنی بیشترین فراوانی را در MF7 دارد.

#### ۴-۵- ارتباط دیاژنز و کیفیت مخزنی با استفاده از داده‌های ژئوشیمی

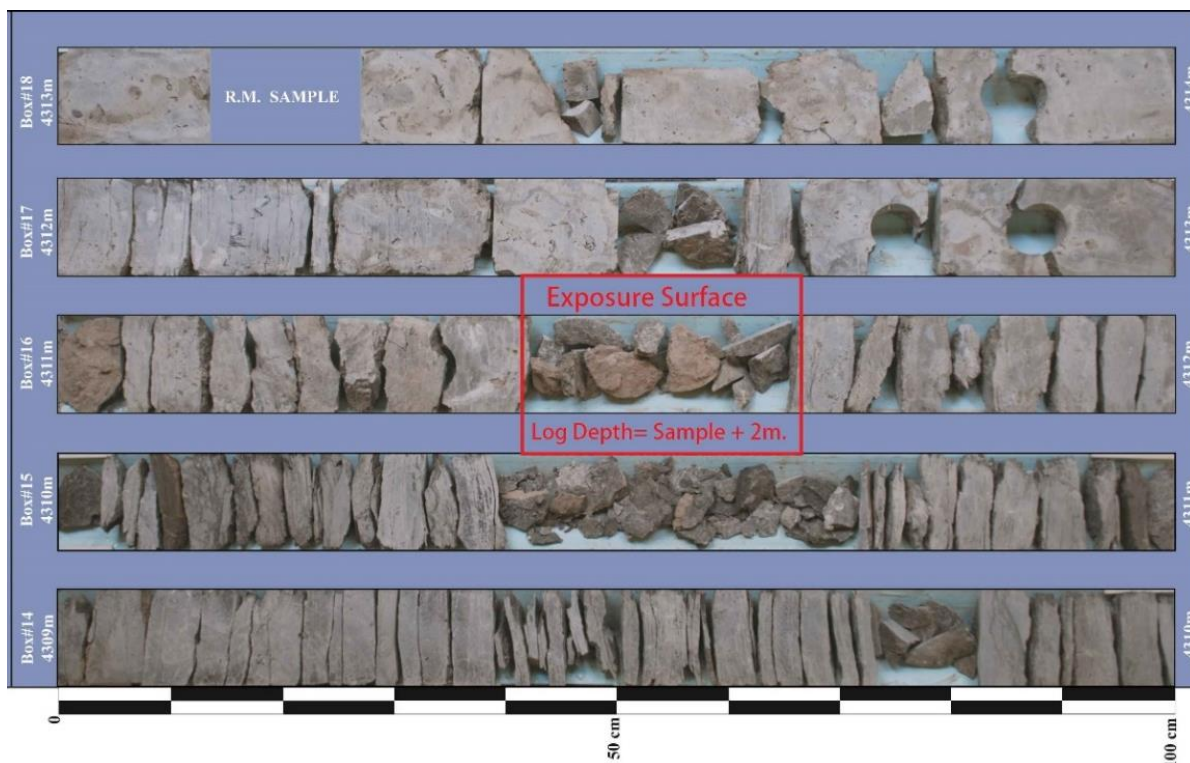
با ترسیم نتایج آنالیز عناصر فرعی و نتایج ایزوتوپ آکسیژن ۱۸ و کربن ۱۳ در یک نمودار می‌توان به خوبی روند دیاژنتیکی موثر بر سازند فهلیان در توالی مورد مطالعه را مشخص کرد. همچنین از تلفیق نتایج مذکور با مقادیر تخلخل و تراوایی مغزه می‌توان تأثیر دیاژنز بر افزایش و یا کاهش کیفیت مخزنی را توجیه نمود. تغییرات تخلخل و تراوایی وابستگی زیادی به فرآیندهای دیاژنزی و تغییرات رخساره‌ای دارد [32]. تغییرات گسترده کیفیت مخزنی و ناهمگنی فراوان موجود در مخازن کربناته که حاصل تأثیر ریزرخساره‌ها و محیط رسوبی، فرآیندهای دیاژنزی، تحول تکتونیکی و مورفولوژی حوضه است، به دشواری تولید و ازدیاد

برداشت از این مخازن منجر می‌گردد [33]. روندهای مثبت یا منفی عناصر فرعی Mn, Fe, Sr, Na و ایزوتوپ‌های اکسیژن ۱۸ و کربن ۱۳ در برابر ستون چینه‌شناسی، حاکی از تأثیر دیاژنز جوی بر سازند فلهلیان در توالی مورد مطالعه می‌باشد (شکل ۸). روند نامنظم پارامترهای مخزنی در بازه‌های مختلف و تلفیق آن با بافت رسوبی بیانگر تأثیر هم‌زمان دیاژنز و ریزرخساره‌ها در کنترل کیفیت مخزنی سازند فلهلیان می‌باشد. به عنوان مثال با بررسی تغییرات در بازه ۴۳۳۸-۴۳۱۳ متری بر اساس نگاره‌های چاه‌پیمایی و شناسایی یک سطح مطابق با حداکثر پایین‌افتادگی سطح نسبی آب دریا در عمق حدود ۴۳۱۳ متری، می‌توان گفت که دیاژنز جوی تأثیر قابل ملاحظه‌ای در بهبود کیفیت مخزنی توالی زیرین این سطح داشته است (شکل ۸). شواهدی نظیر وجود اثرات انحلال جوی و خردشدگی شدید مغزه‌های حفاری (شکل ۹)، افزایش قابل توجه مقادیر تخلخل و تراوایی مغزه وجود یک سطح مطابق با حداکثر پایین‌افتادگی سطح نسبی آب دریا و عملکرد دیاژنز جوی در عمق مذکور در سازند فلهلیان در منطقه مورد مطالعه را تأیید می‌کنند.

همچنین از عمق ۴۳۳۸ متری به سمت بالای توالی، مقادیر ایزوتوپ‌های اکسیژن و کربن، عناصر Sr, Na و تا حدودی Fe روند کاهشی، و فقط مقدار Mn روند افزایشی نشان می‌دهد که بیانگر کاهش عمق حوضه رسوبی سازند فلهلیان و عملکرد دیاژنز جوی می‌باشد (شکل ۸). در عمق ۴۳۳۸ متری ایزوتوپ اکسیژن دارای سنگین‌ترین و عناصر Sr و Na دارای بیشترین مقادیر خود در نمونه‌های آنالیز شده می‌باشند. مقادیر بسیار پایین Mn می‌تواند نشانه عمق بیشتر، تبادلات سنگ و آب کمتر و شرایط احیایی در حوضه رسوبی باشد. با توجه به موارد فوق می‌توان گفت که حوضه رسوبی در این بخش دارای عمق بیشتری بوده و تأثیر دیاژنز جوی در این عمق ضعیف‌تر می‌باشد.



شکل ۸- تغییرات عناصر فرعی Mn، Fe، Sr، Na، ایزوتوپ‌های  $\delta^{18}\text{O}$  و  $\delta^{13}\text{C}$  و مقادیر تخلخل و تراوایی مغزه به همراه توزیع واحدهای جریان براساس روش‌های شاخص زون جریان (FZI) و مقادیر شعاع گلوگاه تخلخل در اشباع ۲۵ درصد جیوه (R35) در امتداد ستون چینه‌شناسی بخش پایینی سازند فهلیان در یکی از چاه‌های میدان مورد مطالعه.



شکل ۹- سطح دیاژنز جوی (عمق ۴۳۱۱/۵ متری) روی مغزه‌های حفاری توالی مورد مطالعه سازند فهلیان. اثرات خردشدگی و تغییر رنگ به دلیل ورود مواد رسی به خوبی مشاهده می‌شود.

## ۶- نتیجه‌گیری

به‌منظور بررسی کیفیت مخزنی سازند فهلیان در یکی از میداین دشت آبادان تلفیقی از نتایج مطالعات پتروگرافی، ژئوشیمی عنصری و ایزوتوپی، داده‌های پتروفیزیکی (تخلخل و تراوایی حاصل از ۳۹۶ پلاگ مغزه و ۵۳ نمونه اپوکسی) استفاده شده است. مطالعات ماکروسکوپی مغزه و میکروسکوپی مقاطع نازک منجر به شناسایی فرآیندهای دیاژنز اثرگذار بر روی کیفیت مخزنی توالی مورد مطالعه شده است. ریزتخلخل‌ها در بخش فهلیان بالایی در مقایسه با فهلیان پایینی فراوانی بیشتری دارند. در مقابل، توسعه قابل ملاحظه تخلخل‌های حفره‌ای، قالبی، شبکه‌ای و بین‌دانه‌ای در بخش فهلیان پایینی نقش عمده‌ای در ذخیره و انتقال هیدروکربن ایفاء می‌کنند.

بررسی میزان فراوانی عناصر و روندهای مثبت یا منفی آن‌ها (نظیر Mn, Fe, Sr, Na) و ایزوتوپ‌های پایدار (نظیر اکسیژن ( $^{18}\text{O}\delta$ ) و کربن ( $^{13}\text{C}\delta$ )) در نمونه‌های مورد مطالعه از بخش مخزنی، حاکی از تأثیر دیاژنز جوی بر سازند فهلیان در توالی مورد مطالعه

می‌باشد. روند کاهش مقادیر ایزوتوپ‌های  $^{18}\text{O}$  و  $^{13}\text{C}$ ، عناصر Sr و Na و تا حدودی Fe و روند افزایشی عنصر Mn بیانگر کاهش عمق حوضه رسوبی سازند فهلیان و عملکرد دیاژنز جوی می‌باشد.

با استفاده از داده‌های ژئوشیمی عنصری و ایزوتوپی اکسیژن و کربن یک سطح مطابق با حداکثر پایین‌افتادگی سطح نسبی آب دریا شناسایی گردید و می‌توان گفت دیاژنز جوی تأثیر زیادی در بهبود کیفیت مخزنی توالی زیرین این سطح داشته است.

تقسیم‌بندی پتروفیزیکی لوسیا برای نمونه‌های مورد مطالعه منجر به تفکیک چهار گونه سنگی متفاوت گردید، که در بین آن‌ها فلوتستون / باندستون - گرینستون از کیفیت مخزنی بالاتری برخوردار است. توزیع سیستم منافذ در این روش بیانگر تأثیر عمده فرآیندهای دیاژنزی در ایجاد و توسعه تخلخل‌های حفره‌ای است. به عبارت دیگر، سیستم منافذ در بخش مخزنی سازند فهلیان عمدتاً تحت تأثیر فرآیندهای دیاژنزی شکل گرفته است، به طوری که در نمودار تخلخل در برابر تراوایی شکستگی‌های باز در رخساره‌های لاگونی آن‌ها را به سمت چپ و بالای نمودار و توسعه انحلال در این رخساره‌ها آن‌ها را به سمت راست نمودار سوق داده است.

در راستای تعیین واحدهای جریان‌ی از دو روش پتروفیزیکی شامل: شاخص زون جریان‌ی و شعاع گلوگاه تخلخل در اشباع ۳۵ درصد جیوه استفاده گردید. نتایج نشان داد که شاخص زون جریان‌ی و شعاع گلوگاه تخلخل، عمدتاً ناهمگنی‌های مخازن کربناته را در مقیاس کوچک آشکار می‌کند.

بر اساس روش شاخص زون جریان‌ی یک واحد غیرمخزنی و چهار واحد جریان‌ی شناسایی گردید که به ترتیب، واحدهای جریان‌ی ۳، ۲ و ۱ دارای کیفیت بهتری می‌باشند و واحد جریان‌ی ۴ با وجود تراوایی بالاتر، به دلیل پایین بودن نسبی تخلخل و فراوانی بسیار کم نمونه‌ها، در رتبه پایین‌تری قرار می‌گیرد. ترسیم مقادیر تراوایی در مقابل RQI بیانگر انطباق خوب نمونه‌ها با منحنی-های برازش و تأثیر مستقیم افزایش تراوایی در بهبود شاخص کیفیت مخزنی می‌باشد، در حالی که ترسیم مقادیر تخلخل در مقابل RQI حاکی از پراکندگی بیشتر نمونه‌ها به‌ویژه در واحد جریان‌ی ۴ می‌باشد و تنوع سیستم منافذ و تأثیر ناهمگن فرآیندهای دیاژنزی بر این واحد جریان‌ی را نشان می‌دهد. توزیع مقادیر شاخص زون جریان‌ی در هر یک از ریزرخساره‌ها و نیز در کل توالی حاکی از وجود بیشترین و کمترین میزان همسانی به ترتیب در ریزرخساره‌های MF1 و MF6 می‌باشد. همچنین واحدهای جریان‌ی ۲ و ۴ به ترتیب دارای بیشترین و کمترین فراوانی در این توالی هستند.

بر اساس روش شعاع گلوگاه تخلخل در اشباع ۳۵ درصد جیوه و با استفاده از حد برش چهار گونه سنگی و یک گونه غیرمخزنی با توجه به اندازه منافذ شناسایی گردید. توزیع تخلخل-تراوایی در گونه‌های سنگی تفکیک شده نشان می‌دهد که با افزایش اندازه گلوگاه تخلخل از گونه سنگی ۱ به ۴، بدون تغییر قابل ملاحظه تخلخل، تراوایی افزایش می‌یابد و گونه سنگی ۴ دارای بهترین کیفیت مخزنی است، هر چند گونه سنگی شماره ۲ و ۳ با پراکندگی بسیار نزدیک به هم، دارای بیشترین فراوانی در بخش مخزنی سازند فهلیان در توالی مورد مطالعه می‌باشند. ترسیم مقادیر R35 در مقابل تخلخل بیانگر ارتباط نامعین می‌باشد در حالی که با تراوایی ارتباط مستقیم دارد. توزیع گونه‌های سنگی به روش شعاع گلوگاه تخلخل در رخساره‌های مختلف نشان داد که مجموع گونه سنگی ۳ و ۴ با بهترین کیفیت مخزنی دارای بیشترین فراوانی در MF1 می‌باشد، در حالی که واحد غیر مخزنی بیشترین فراوانی را در MF4 دارد.

## منابع

- [۱] رحیم‌پور بناب، حسین، (۱۳۹۶)، "سنگ‌شناسی کربناته با نگرشی بر کیفیت مخزنی"، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ سوم، ۵۷۶ صفحه.
- [2] Abdollahie Fard, I. (2006). Structural models for the South Khuzestan area based on reflection seismic data. Shahid Beheshti University, Iran. Ph.D thesis, 171p.
- [۳] مطیعی، همایون، (۱۳۷۲)، "چینه‌شناسی زاگرس، زمین‌شناسی ایران"، طرح تدوین کتاب، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، ۵۳۶ صفحه.
- [4] صالحی، محمدعلی. بیرانوند، بیژن. ایمن‌دوست، علی. (۱۳۹۵)، "چینه‌شناسی و رخساره‌های سنگی سازنده‌های فهلیان-گرو در خلیج فارس با هدف کاربرد در مدل‌سازی سیستم‌های هیدروکربنی"، فصلنامه پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، سال ۳۲، شماره ۶۴، صفحات ۱۳۰-۱۰۹.
- [5] Alsharhan, A.S. (2014). Petroleum systems in the Middle East. Journal of Geological Society of London, 392: 361-408.
- [6] Christian, L. (1997). Cretaceous subsurface geology of the Middle East region. GeoArabia, 2(3): 239-256.
- [7] کاظمی، امیر، (۱۳۹۷)، "بررسی رخساره‌ها، محیط رسوبی، دیاژنز و کیفیت مخزنی سازند فهلیان در میدان یادآوران، جنوب غرب ایران". پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه اصفهان. ۲۰۸ صفحه.
- [8] Dunham, R.J. (1962). Classification of carbonate rocks according to depositional texture. American Association of Petroleum Geologists Memoir, 1: 108-121.
- [9] Embry, AF. and Klovan, J.E. (1971). A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island Northwest Territories. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 19: 730-781.

- [10] Flügel, E. (2010). *Microfacies of Carbonate Rocks*. 2<sup>nd</sup> edition, Springer, 984p.
- [11] Khodaei, N. (2012). *Comprehensive geological study of YAD-020 (F15) well cores (Fahliyan Formation), Yadavaran Field*. Research Institute of Petroleum Industry, Unpublished Report, 304p.
- [12] کاظمی، امیر. صالحی، محمدعلی. پاکزاد، حمیدرضا. هنرمند، جواد. خدایی، نواب. (۱۳۹۹)، "بررسی عوامل کنترل کننده کیفیت مخزنی و معرفی واحدهای جریان‌سازنده فلهیان در یکی از میادین نفتی دشت آبادان، جنوب غرب ایران"، پژوهش نفت، دوره ۳۰ (۹۹-۱)، شماره پیاپی ۱۱۰، صفحه ۲۰-۴.
- [13] Rao, C.P. and Adabi, M.H. (1992). Carbonate minerals, major and minor elements and oxygen and carbon isotopes and their variation with water depth in cool, temperate carbonates, western Tasmania, Australia. *Marine Geology*, 103: 249-272.
- [14] Morse, J.W. and Mackenzie, F.T. (1990). *Geochemistry of Sedimentary Carbonates*. Developments in Sedimentology, Elsevier, Amsterdam, 48: 707p.
- [۱۵] آدابی، محمدحسین، (۱۳۹۰)، "ژئوشیمی رسوبی"، انتشارات آرین زمین، ۵۰۳ صفحه.
- [16] Adabi, M.H. and Asadi Mehmandosti, E. (2008). Microfacies and geochemistry of the Ilam formation in the Tang-E Rashid area, Izeh, S.W. Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 33: 267-277.
- [17] Adabi, M.H. and Rao, C.P. (1991). Petrographic and geochemical evidence for original aragonitic mineralogy of Upper Jurassic carbonate (Mozduran formation), Sarakhs area, Iran. *Sedimentary Geology*, 72: 253-267.
- [18] Pingitore, N.E. (1978). The behaviour of Zn and Mn during carbonate diagenesis, theory and applications. *Journal of Sedimentary Petrology*, 48(3): 799-814.
- [19] Marshall, J.D. (1992). Climatic and oceanographic isotopic signals from the carbonate rock record and their preservation. *Geological Magazine*, 129: 143-160.
- [20] Rao, C.P. (1996). *Modern Carbonates, Tropical, Temperate, Polar*. Introduction to Sedimentology and Geochemistry, Art of Tasmania, 206p.
- [21] Adabi, M.H. Salehi, M.A. and Ghabeishavi, A. (2010). Depositional environment, sequence stratigraphy and geochemistry of Lower Cretaceous carbonates (Fahliyan Formation), south-west Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(3): 148-160.
- [22] Cantrell, D.L. and Hagerty, M.H. (1999). Microporosity in Arab formation carbonates. *GeoArabia*, 4(2): 129-154.
- [23] صالحی، محمدعلی، (۱۳۹۳)، "بررسی کارآیی روش‌های تعیین گونه‌های سنگی سازنده‌های داریان و سورمه در میدان رشادت"، طرح نخبگان وظیفه، شرکت نفت فلات قاره ایران، پژوهش و فناوری، ۸۹ صفحه.
- [24] Lucia, F.J. (1999). *Carbonate Reservoir Characterization*. Springer, 226p.



[25]Pittman, E.D. (1992). Relationship of porosity and permeability to various parameters derived from mercury Injection-capillary pressure curves for sandstone. American Association Petroleum Geologists Bulletin, 72(2): 191-198.

[26]Gunter, G.W., Finneran, J.M., Hartmann, D.J. and Miller, J.D. (1997). Early determination of reservoir flow units using an integrated petrophysical method, SPE 38679, Annual Technical Conference and Exhibition, 373-380.

[27]Bliefnick, D.M. and Kaldi, J.G. (1996). Pore geometry control on reservoir properties, Walker Creek Field, Columbia and Lafayette counties, Arkansas. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, 80:1027-1044.

[28]مضانی اکبری عباس، رحیم پور بناب، حسین، کمالی، محمد رضا، موسوی حریمی، رضا، کدخدایی، علی (۱۳۹۵)، "میکروفاسیس، محیط رسوبی و چینه‌نگاری سکansı سازند فهلیان در میداین نفتی دشت آبادان"، پژوهش نفت، شماره ۸۸(۳)، صفحات ۶۸-۸۱.

[29] Tavoosi Iraj, P. Rajabi, M. and Ranjbar-Karami, R. (2023). Integrated petrophysical and heterogeneity assessment of the karstified Fahliyan Formation in the Abadan Plain, Iran. *Natural Resources Research*, 32(3): 1067-1092.

[30]Ahr, W.M. (2008). *Geology of Carbonate Reservoirs, The Identification, Description and Characterization of Hydrocarbon Reservoirs in Carbonate Rocks*. Wiley, 277p.

[31]اسعدی، علی. هنرمند، جواد. معلمی، علی. عبداللهی فرد، ایرج، (۱۳۹۵)، "تأثیر فرآیندهای دیاژنزی بر کیفیت مخزنی بخش بالایی سازند سروک در یکی از میداین دشت آبادان، جنوب غرب ایران"، نشریه پژوهش‌های چینه‌نگاری و رسوب‌شناسی، جلد ۳۲، شماره ۱، صفحات ۵۷-۸۰.

[32]Esrafilii -Dizaji, B. and Rahimpour -Bonab, H. (2014). Generation and evolution of oolitic shoal reservoirs in the Permo -Triassic carbonates, the South Pars Field, Iran. *Facies*, 60(4): 921-940.

[33]Esteban, M. and Taberner, C. (2003). Secondary porosity development during late burial in carbonate reservoirs as a result of mixing and/or cooling of brines. *Journal of Geochemical Exploration*, 78: 355-359.

# Diagenesis, geochemistry and reservoir quality of the Fahliyan Formation in one of the oil fields in southwestern Iran

## Abstract

The Fahliyan Formation (Early Cretaceous) is considered to be one of the major oil reservoirs in many fields of the Zagros sub-basins such as Abadan Plain and the Persian Gulf. In order to investigate the diagenesis, geochemistry and reservoir quality of this carbonate succession in one of the fields located in the Abadan Plain, the results of geological-petrophysical studies including petrographic study of microscopic thin sections, conventional core analysis (porosity-permeability), XRD, petrophysical diagrams, carbon-oxygen isotope and elemental geochemical analysis are combined with SEM and CL microscopy. This formation has been affected by various diagenetic processes, including micritisation, bioturbation, compaction, cementation, dissolution, dolomitization, and fracturing. Calcite cementation, compaction and extensive dolomitization are the main factors that have controlled the decrease of porosity and permeability, while dissolution (in the form of voids and molds) and fracturing have increased the reservoir quality of the studied succession. The core porosity and permeability data in the reservoir part of the Fahliyan Formation range from 0.01 to 27.5% and from less than 0.01 to more than 630 md. These changes in porosity and permeability are strongly dependent on diagenetic processes that follow the pattern of facies changes. Reservoir quality studies also show that diagenesis has had a major positive and negative impact on the Fahliyan Formation and has largely controlled the distribution of the pore system. Using elemental geochemistry and oxygen and carbon isotopic data, a surface corresponding to the maximum relative sea-level fall was identified, which can be concluded that meteoric diagenesis has had a major impact on improving the reservoir quality of the underlying strata of this surface. In order to check the reservoir quality of the facies and to establish a relationship between the facies with the petrophysical rock classes of Lucia and to determine the rock types, the porosity and permeability data associated with the facies of the lower (reservoir) part of the Fahliyan Formation were plotted on the Lucia diagram resulting in the separation of four different rock types, among which the floatstone/bondstone-greenstone has a higher reservoir quality. Two petrophysical methods were used to determine flow units, including flow zone index and porosity throat radius at 35% mercury saturation. The results showed that the FZI and the porosity throat radius mainly reveal the inhomogeneities of the carbonate reservoirs on a small scale. Based on the FZI method, one non-reservoir unit and four reservoir flow units were identified, and based on the porosity throat radius method at 35% mercury saturation, four rock types and one non-reservoir rock type were identified according to the pore size.

**Keywords:** Fahliyan Formation, Abadan Plain, Meteoric diagenesis, Isotope geochemistry, Hydraulic flow units.