

مطالعه رخساره‌های رسوبی سازند فراقان در میادین خلیج فارس و بررسی کیفیت مخزنی آنها با استفاده از لاگ‌های چاه‌پیمایی

ابراهیم سفیداری^(۱) و جواد امرایی^(۲)

۱. استادیار، گروه زمین‌شناسی نفت، پژوهشکده علوم پایه کاربردی جهاد دانشگاهی

۲. استادیار رسوب‌شناسی و سنگ‌های رسوبی، شرکت ملی نفت ایران

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۴/۲۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۵/۳۰

چکیده

سنگ‌های آواری از نظر ذخیره هیدروکربنی دارای اهمیت بالایی در مطالعات مخزنی می‌باشند. در سال‌های اخیر و به دنبال افزایش پی‌جویی‌ها و بهبود روش‌های اکتشافی، سنگ‌های آواری مربوط به پالئوزوئیک در سرتاسر خاورمیانه بخصوص کشورهای حاشیه خلیج فارس، اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است. مشخصات سنگ‌شناسی و محیط رسوبی این توالی از پارامترهای مهم، تاثیر گذار بر کیفیت مخزنی آنها می‌باشد. مطالعه حاضر به بررسی مشخصات رسوب‌شناسی و تعیین رخساره‌های سازند فراقان با استفاده از مطالعات رسوب‌شناسی در چهار چاه از میادین دور از ساحل کشور و انطباق آن با استفاده از مفهوم رخساره‌های لاگ در میادینی که تا فراقان حفاری شده‌اند، پرداخته است. بر اساس مطالعات پتروگرافی حاصل از خرده‌های حفاری شش رخساره ماسه‌سنگ، ماسه گری وکی، گل‌سنگ قرمز، شیل سیاه و سبز، سنگ‌آهک و رخساره سنگ مختلط در چاه مغزه‌دار تشخیص داده شد و در چهار زیرمحیط رسوبی (همراهی رخساره‌ای) دشت ساحلی، محیط ساحلی، تدریجی و دور از ساحل تقسیم‌بندی شدند.

با استفاده از داده‌های موجود از لاگ‌های چاه‌پیمایی، شش رخساره لاگ در چاهی که رخساره‌های رسوبی آن استخراج شده بود، مشخص شد. انطباق نتایج حاصل از رخساره‌های لاگ با رخساره‌های رسوبی و همراهی رخساره‌ها نشان می‌دهد، رخساره‌های لاگ استخراج شده انطباق مناسبی با رخساره‌های رسوبی دارند. رخساره لاگ یک دارای سنگ‌شناسی آهکی، رخساره لاگ دو و سه ماسه‌ای، رخساره لاگ چهار ماسه حاوی شیل، رخساره پنج شیلی و رخساره شش حاوی شیل‌های قرمز رنگ می‌باشد. گسترش رخساره‌های لاگ به چاه‌های فاقد مغزه حفاری شده در سازند فراقان نشان از تغییرات فراوانی این رخساره‌ها دارد و نشان‌دهنده تغییر جانی محیط رسوبی سازند فراقان است.

بررسی کیفیت مخزنی رخساره‌ها نشان می‌دهد که رخساره لاگ دو و چهار بهترین کیفیت مخزنی را دارا می‌باشند. رخساره‌های مذکور در بخش‌های فراقان دو (F2) و فراقان یک (F1) دارای بیشترین فراوانی می‌باشند. بنابراین بهترین بازه از نظر کیفیت مخزنی در سازند فراقان به گستره دو و یک سازند اختصاص دارند.

واژه‌های کلیدی: سازند فراقان، رخساره‌های رسوبی، رخساره لاگ، کیفیت مخزنی.

مقدمه

رسوبات آواری پالئوزویک زاگرس برای اولین بار در کوه فراقان (Mollazal, 1965) و سپس در کوه گهکم مورد بررسی قرار گرفت (Szabo and Kheradpir, 1978). در سال ۱۹۷۱ کمیته ملی چین‌شناسی ایران، اسم فراقان را که کوهی در نزدیکی محل شناسایی اولیه این سازند است را برای این رسوبات انتخاب کرد. بعدها بر اساس مطالعات پالینولوژی سن پرمین زیرین برای این سازند مشخص شد (Ghavidel, Syooki, 1988, 1993, 1995, 1997, 2003).

سازند بیان شده در بخش‌های مختلفی از ایران در برش‌های بالای زمین و زیرزمینی نظیر اشترانکوه، زردکوه، چالیشه، کوه دینار، کوه گهکم، کوه سورمه، کوه فراقان، کوه سیاه، میدان سلمان، میدان گلشن و پارس جنوبی (امرائی و همکاران، ۱۳۹۷) مورد مطالعه قرار گرفت. با توجه به استخراج گاز و نفت سبک در سازندهای معادل فراقان در کشورهای حاشیه جنوبی خلیج فارس (Al-Dajani et al., 2000; Macdonald et al., 2010; Birkle et al., 2019; Khodayeva, 2024) و اثبات وجود هیدروکربور در سازند فراقان در میدین سلمان، گلشن و کیش، این سازند در مرکز توجه کارهای اکتشافی در میدین واقع در خلیج فارس قرار گرفت.

باوجود بررسی‌های روی زمینی (Zamanzadeh et al., 2009)، هنوز مطالعه جامعی بر روی مشخصات سنگ‌شناسی و کیفیت مخزنی این سازند در برش‌های زیرسطحی وجود ندارد (مهدی‌نیا و حرمی ۱۳۸۸، امرائی و همکاران، ۱۳۹۷). با توجه به جایگاه چین‌شناسی این سازند در زیر سازندهای کنگان و دالان که سنگ مخزن بزرگ‌ترین ذخیره‌گازی خاورمیانه در پارس جنوبی است و قرارگیری این سازند در بالای سازندهای شیلی سیاه و سرچاهان به‌عنوان سنگ منشأ هیدروکربورهای پارس جنوبی (Kamali and Rezaee, 2003)، انجام مطالعات سنگ‌شناسی و بررسی کیفیت مخزنی این سازند از اهمیت خاصی برخوردار است. به دلیل ماهیت سنگ‌شناسی این سازند (ماسه‌سنگ‌های فاقد سیمان) و همچنین عمق بسیار زیاد و چاه‌های نادر و هزینه بالا در حال حاضر داده‌های مغزه جامعی از این

سازند در میدین خلیج فارس وجود ندارد. بنابراین مهم‌ترین اطلاعات موجود از این سازند را می‌توان به خرده‌های حفاری و لاگ‌های چاه پیمایی اشاره کرد. از آنجایی که لاگ‌های چاه پیمایی ثبت پیوسته‌ای از سازند را در شرایط زیرسطحی ارائه می‌دهد بنابراین از اهمیت بالایی در مطالعات زمین‌شناسی نفت برخوردار می‌باشند. از طرف دیگر با استفاده از خرده‌های حفاری و تهیه مقاطع نازک میکروسکوپی می‌توان رخساره‌های رسوبی اصلی سازند فراقان را شناسایی کرد. در این مطالعه با در نظر گرفتن عوامل بالا سعی شده مراحل کاری زیر انجام شود.

۱. بررسی رخساره‌های رسوبی سازند فراقان با استفاده از مقاطع نازک تهیه شده از سازند
۲. استخراج رخساره‌های لاگ با استفاده از لاگ‌های چاه‌پیمایی موجود در چاهی که مطالعات رسوب‌شناسی دارد
۳. بررسی ارتباط بین رخساره‌های لاگ و رخساره‌های رسوبی در چاه مغزه و خرده حفاری دار
۴. گسترش رخساره‌های رسوبی به چاه‌های موجود از میدین دیگر با استفاده از مفهوم رخساره لاگ
۵. بررسی کیفیت مخزنی رخساره‌های لاگ با استفاده از نتایج حاصل از ارزیابی‌های پتروفیزیکی

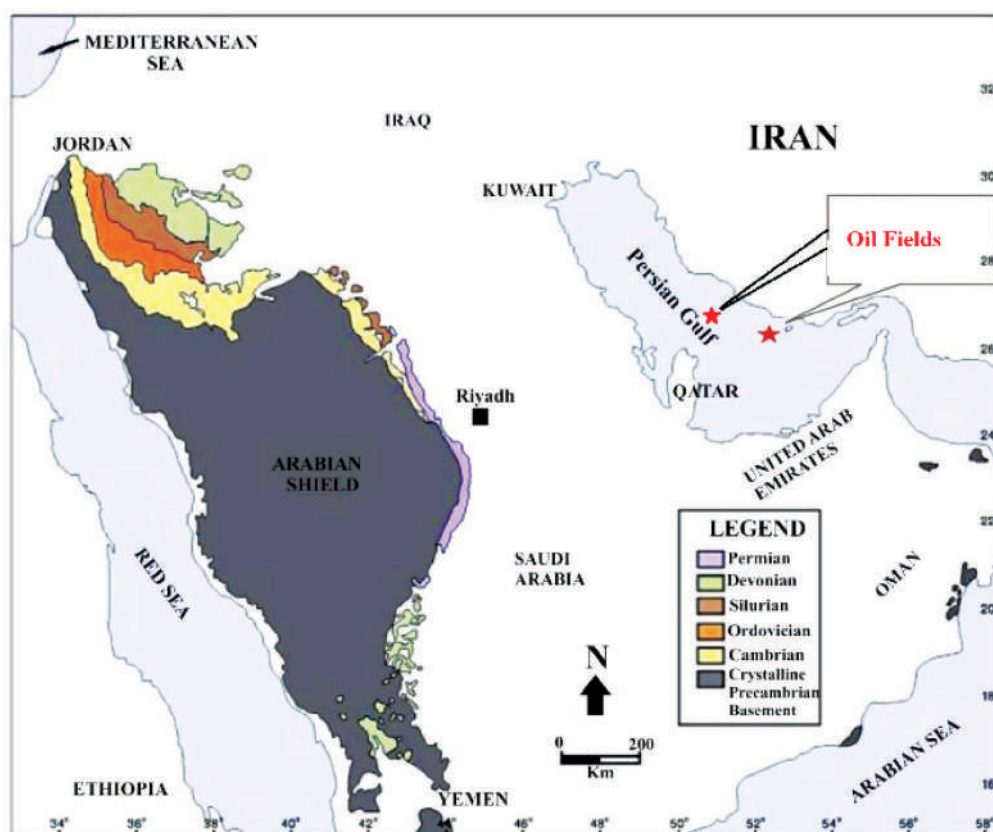
زمین‌شناسی گستره مورد مطالعه

گسترش جغرافیایی سنگ‌های پرمین ایران بسیار زیاد است و این باور وجود دارد که در زمان کربنیفر پسین یا پرمین پیشین، با آرام گرفتن رخدادهای زمین‌ساختی هرسی‌نین و حرکت‌های رو به پایین زمین، شرایط لازم برای پیشروی گسترده دریا فراهم آمده است (Zamanzadeh et al., 2009). به‌گونه‌ای که بسیاری از فراپوم‌های قدیمی در شمال آذربایجان، البرز، ایران مرکزی، سهند-سیرجان و زاگرس با دریای کم‌ژرفا و پیشرونده پرمین پوشیده شدند. بنابراین، سنگ‌های پرمین را می‌توان روی ردیف‌های گوناگون کربنیفر، دونین، سیلورین، اردوین و کامبرین مشاهده کرد. رسوبات پرمین ایران نشانگر سه چرخه بزرگ رسوبی است و هر چرخه با رخساره‌های آواری پیشرونده آغاز و با افزایش ژرفا، ردیف‌های کربناتی آهکی-دولومیتی تشکیل و

C و D به میدان گلشن اختصاص دارند. در مطالعه حاضر چاه A به صورت کامل سازند فراقان را حفاری کرده است. سازند بیان شده زیر سازند دالان (با تناوب ماسه لیتیکدار) به صورت پیوسته و بالای سازند زاگین (دونین پسین) به صورت ناپیوستگی فرسایشی قرار دارد. لیتولوژی سازند فراقان در چاه مورد مطالعه بیشتر شامل ماسه سنگ و شیل است و در بخش های بالا و پایین مقداری کربنات نیز دارد. مرز پایینی سازند فراقان با یک ناپیوستگی مشخص می شود و روی رسوباتی به سن دونین قرار دارد و مرز بالایی سازند فراقان با کربنات های سازند دالان تدریجی است.

در نهایت با نهشته های آواری پسرونده به اتمام می رسند. سازند ماسه سنگی فراقان در حال حاضر واحد سنگ چینه ای ردیف های پیشرونده پرمین پیشین است (Ghavidel-Syooki, 1995). در گذشته این سازند را به سن پرموکرئونفر و زمانی نیز به ردیف های دونین نسبت می دادند اما مطالعه پالینومورف های این سازند نشان داد این نهشته ها معرف ساکمارین (پرمین زیرین) هستند (Ghavidel-Syooki, 1988).

مطالعه حاضر بر روی چهار چاه حفاری شده تا سازند فراقان، در منطقه دور از ساحل ایران انجام گرفت (شکل ۱). چاه های A و B مربوط به میدان پارس جنوبی و چاه های



شکل ۱. موقعیت جغرافیایی میدانی مورد مطالعه (Al-Ghazi, 2007)

روش مطالعه

موجود از چاه A در بازه های یک متری ۲۴۵ مقطع نازک به منظور مطالعات رسوب شناسی تهیه شد. در سه چاه دیگر که تا سازند فراقان حفاری شده اند فقط لاگ های چاه پیمایی موجود است (جدول ۱). مطالعه حاضر در دو

این مطالعه بر اساس داده های موجود از چهار چاه اکتشافی که تا سازند فراقان حفاری شده اند انجام گرفته است. در چاه A سازند فراقان با ضخامت ۲۴۵ متر به صورت کامل حفاری شده است. در ابتدا از مغزه و خرده های حفاری

با استفاده از تخلخل مفید و اشباع شدگی حاصل از نتایج ارزیابی‌های پتروفیزیکی مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفت. در آخر رخساره‌های استخراج شده در چاه A با استفاده از مفهوم رخساره‌های لاگ به بقیه چاه‌ها گسترش داده شده و بین چاه‌ها انطباق برقرار شد.

مرحله انجام گرفت. در مرحله اول با استفاده از مقاطع نازک تهیه شده، رخساره‌های رسوبی در چاه A استخراج شد. در مرحله بعد با استفاده از روش خوشه‌سازی مبتنی بر گراف رخساره لاگ در چاه A استخراج شد. در ادامه بین رخساره‌های رسوب‌شناسی و رخساره‌های لاگ انطباق برقرار شد. کیفیت مخزنی هر یک از رخساره‌های استخراج شده

جدول ۱. شماره چاه‌ها و اطلاعات موجود از آنها در این مطالعه

Well name	core	cutting	Log data
A	✓	✓	✓
B	-	✓	✓
C	-	✓	✓
D	-	✓	✓

خوشه‌های مختلف، چندین افت محسوس دیده می‌شود و مربوط به جدایش خوشه‌های مختلف می‌باشند. شماره مربوط به این تغییرات ناگهانی به‌عنوان تعداد خوشه‌های بهینه در نظر می‌گیرند. مزیت این روش نسبت به روش‌های دیگر این است که تعداد خوشه‌های بهینه در طی یک مطالعه را به کاربر پیشنهاد می‌کند، همچنین کاربر می‌تواند روی انتخاب، ترکیب کردن و تفکیک کردن یک خوشه به خوشه‌های مجزا کنترل داشته باشد.

بحث

رخساره‌های رسوبی

بر اساس عواملی از قبیل بافت، ساخت رسوبی، فرم هندسی، محتوای فسیلی و سنگ‌شناسی در چاه مورد مطالعه شش پتروفاسیس براساس داده‌های سنگ‌شناسی و توصیف مغزه برای سازند فراقان معرفی شده‌اند. رخساره‌های بیان شده در چهار زیر محیط رسوبی متفاوت تقسیم‌بندی شدند که در زیر مشخصات آنها به تفصیل آورده شده است. رخساره ماسه‌سنگ (PF1) در بررسی‌های میکروسکوپی این رخساره شامل کوارتز آرنایت با جورشدگی خوب تا بد مشاهده می‌شود. دانه‌های کوارتز از نظر شکل دارای گردشدگی خوب تا نیمه گرد هستند و نشان‌دهنده انرژی بالا و حمل زیاد این قطعات است. به‌طور کلی نبود کانی‌های رسی، نشانگر انرژی بالا و سرعت رسوب‌گذاری آهسته محیط تهنشینی را نشان می‌دهد (شکل ۲-الف).

روش خوشه‌سازی مبتنی بر گراف

در روش خوشه‌سازی مبتنی بر گراف، در ابتدا با استفاده از تراکم داده‌ها تعداد خوشه‌های بهینه با استفاده از مفهوم شاخص هم‌جواری تعیین می‌شود (Sfidari et al., 2012; 2014). شاخص هم‌جواری از رتبه هر داده نسبت به داده مورد نظر (x) به دست می‌آید. برای مثال رتبه داده y نسبت به x برابر است با:

$$D(y) = \exp(-m/k) \quad (1)$$

که در آن m شماره نقطه به ترتیب فاصله (نزدیک‌ترین نقطه به نقطه مورد نظر شماره یک، نقطه بعدی شماره دو و به همین ترتیب) و k تعداد نقاط مورد بررسی می‌باشد. بدین صورت:

$$s_{\min} = \min_{i=1,N} \{s(x_i)\}, \quad s_{\max} = \max_{i=1,N} \{s(x_i)\}, \quad s(x) = \sum_{n=1}^k \delta(x) \quad (2)$$

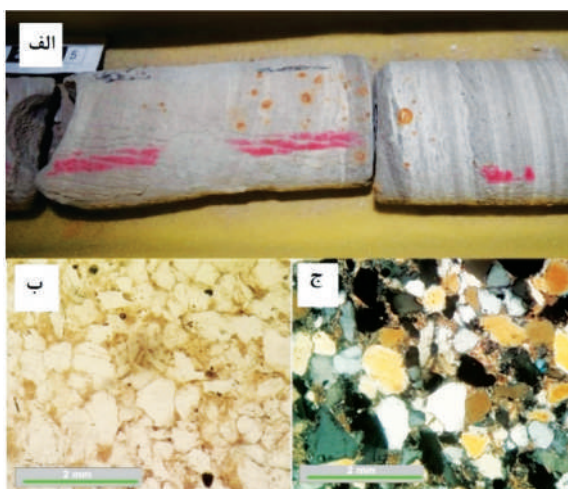
$$NI(x) = S(x) - S_{\min} / S_{\max} - S_{\min} \quad (3)$$

با توجه به این‌که در این روش به‌جای استفاده از فاصله مطلق از رتبه سایر داده‌ها استفاده می‌شود، شاخص هم‌جواری به تراکم داده‌ها در اطراف داده مورد نظر بستگی دارد. با استفاده از عدد مربوط به شاخص هم‌جواری، "شاخص نمایانگر متمرکز" برای دو خوشه تعریف می‌شود.

$$KRI(x) = m * NI(x) * D(x, y) \quad (4)$$

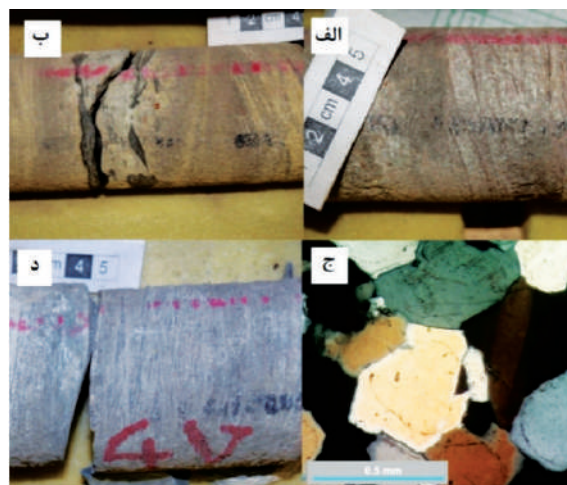
که در آن D(x,y) فاصله بین دو نقطه x و y در داخل خوشه‌ها می‌باشد. در روندی کلی کاهشی KRI در مقایسه

ماسه خیلی ریز تا خیلی درشت متغیرند و وجود خمیره رسی همراه با ذرات در اندازه سیلت یک طیف پیوسته از ذرات از اندازه رس تا ماسه خیلی درشت را در این رخساره شکل می‌دهد. این طیف وسیع ذرات منجر به جورشدگی بد در این رخساره شده است. ذرات کوارتز از نظر شکل گرد شده تا نیمه زاویه‌دار هستند. پیوستگی ذرات از نظر اندازه، جورشدگی و گردشدگی نشان از ارتباط زایشی آنها دارد. در مطالعات میکروسکوپی بر روی مغزه این رخساره ماسه‌سنگ گری وکی است و اندازه دانه‌های آنها از خیلی ریز تا خیلی درشت تغییر می‌کند و دارای مقادیر قابل توجهی خمیره رسی و سیلتی است. حضور مقادیر زیاد خمیره رسی باعث رنگ تیره‌تر آن در مقایسه با رخساره قبلی (PF1) شده است. حضور زیاد خمیره نشان‌دهنده انرژی پایین‌تر محیط رسوب‌گذاری آن نسبت به رخساره قبلی می‌باشد. طبقه‌بندی مورب غالب‌ترین ساخت رسوبی این رخساره است و عموماً از نوع کم شیب است (شکل ۳-الف)، بنابراین جریان‌های ایجادکننده این رخساره یک‌طرفه و با انرژی کمتر نسبت به رخساره قبلی است. وجود لامینه‌های شیلی در مواردی لایه‌بندی فلاسر در آن ایجاد کرده است و نشانگر دوره‌های آرامش جریان در محیط است. از مجموعه این مطالب می‌توان شرایط رسوب‌گذاری در اثر جزر و مد را برای محیط رسوب‌گذاری آن نتیجه گرفت.



شکل ۳. الف) ساخت طبقه‌بندی مورب همراه با لامینه‌های گل در رخساره ماسه گری وکی، ب) تصویر میکروسکوپی از رخساره کوارتز وکی با کوارتز نیمه زاویه‌دار تا نیمه گرد و زمینه کانی‌های رسی نور طبیعی و خ) نور پلاریزه

در بررسی‌های میکروسکوپی شامل ذرات کوارتزی در اندازه ماسه ریز تا شن است. گاه لامینه‌های شیلی در بین این افق‌های ماسه‌ای دیده می‌شود و کنده شدن این لامینه‌ها قطعات گلی را به وجود آورده است و گاهی همراه لامینه شیلی درون ماسه‌سنگ‌های این رخساره دیده می‌شوند (شکل ۲-ب). ساخت رسوبی متداول در این رخساره شامل لایه‌بندی مورب با شیب کم است (شکل ۲-ج) و در مواردی با حضور کانی‌های سنگین در سطوح لامینه‌ها به راحتی قابل مشاهده است. این موضوع نشان‌دهنده شرایط ساحلی می‌باشد. از دیگر ساخت‌های این رخساره می‌توان به لایه‌بندی موازی اشاره کرد. همچنین در مواردی که لامینه‌های شیلی حضور دارند با ماسه‌سنگ‌ها لایه‌بندی فلاسر تشکیل داده‌اند (شکل ۲-د) و محیطی با انباشت رسوب متنوع و نوسان انرژی قابل توجه را دلالت می‌کنند. سطح فرسایشی در بخش‌هایی از این رخساره ماسه‌سنگی به‌ویژه در مرز بین افق‌های ماسه‌ای و شیلی دیده می‌شود.



شکل ۲. الف) ساخت لایه‌بندی مورب در رخساره ماسه‌سنگی، ب) تصویر میکروسکوپی از رخساره ماسه‌سنگی، حضور قطعات شیلی داخل ماسه‌سنگ، ج) رخساره کوارتز آرنایت، دانه‌های چارچوب‌ساز کوارتز با گردشدگی خوب و سیمان سیلیسی هم‌محور می‌باشد (نور پلاریزه)، د) رخساره ماسه‌سنگی که در آن تناوب لایه‌های ماسه‌ای و لامینه‌های ظریف شیل به‌خوبی مشخص است

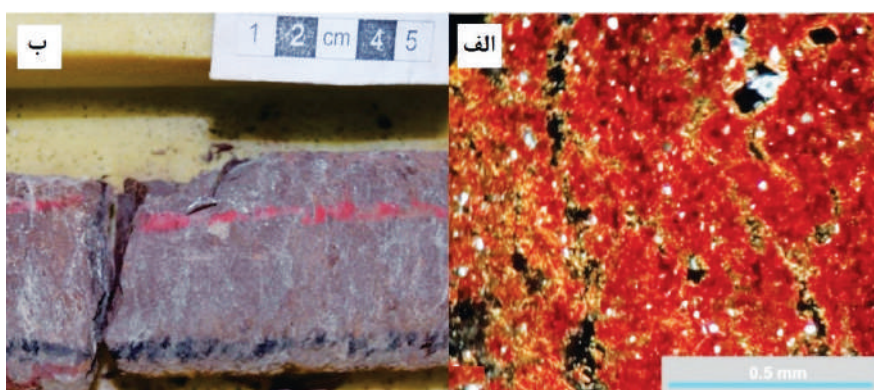
رخساره ماسه گری وکی (PF2) به‌صورت کوارتزوکی

با خمیره متفاوت رسی است (شکل ۳-الف). در بعضی از موارد دانه‌های کوارتز در خمیره رسی شناور هستند و در مواردی نیز خمیره فضای بین دانه‌های کوارتز را پر کرده است (شکل ۳-ب و ج). دانه‌های کوارتز از نظر اندازه از

رس سنگ تا سیلتستون و سیلتستون ماسه‌ای، می‌توان گفت انرژی محیط رسوب‌گذاری در آن در حال تغییر است و شرایط مشابه دشت سیلابی هستند.

در بررسی مشخصات ماکروسکوپی این رخساره جزء رخساره‌های دانه‌ریز طبقه‌بندی می‌شود. در بعضی از موارد، تناوب گل و ماسه به آن ماهیت فلاسر داده است (شکل ۴-ب). این ساخت نشان‌دهنده زیر محیط جزرو مدی با برتری نهشته‌های گلی است. مهم‌ترین شاخصه این رخساره رنگ قهوه‌ای و فراوانی قطعات آواری گل در آن است.

رخساره گل‌سنگ قرمز (PF3) در مطالعات میکروسکوپی به‌صورت رس سنگ و سیلتستون‌هایی است که با نسبت‌های متفاوتی باهم اختلاط یافته‌اند. حضور اکسیدهای آهن رنگ قرمز به آن داده است (شکل ۴-الف). در برخی رس سنگ‌ها دانه‌های پراکنده سیلت و گاه ماسه‌ریز و خیلی ریز مشاهده می‌شود، فراوانی‌های مختلفی دارند. سیلتستون‌ها نیز چنین وضعیتی مشاهده می‌شود به‌گونه‌ای که گاه وجود ماسه‌های ریز و خیلی ریز پراکنده ماهیت سیلتستون ماسه‌ای ایجاد کرده است. با توجه به تغییرات بافتی در این رخساره از



شکل ۴. الف) تصویر میکروسکوپی از پتروفاسیس رس سنگ حاوی کوارتز (نور پلاریزه)، ب) تصویر ماکروسکوپی از رخساره گل‌سنگ قرمز با فراوانی قطعات آواری گل در آن، سازند فراقان

دیاژنزی بعدی دارد.

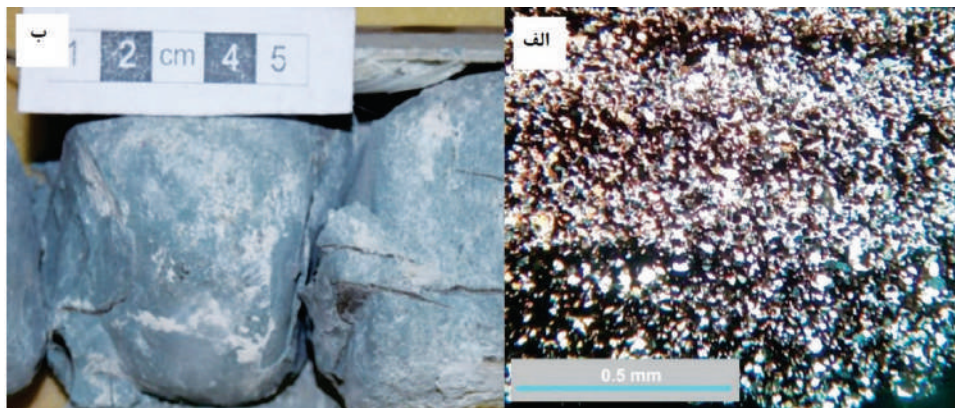
رخساره سنگ آهک (PF5) حاوی گل‌سنگ آهکی است که نسبت به رخساره‌های قبلی فراوانی کمتری دارد. در زیر میکروسکوپ به‌صورت مادستون آهکی مشاهده می‌شود. طی تدفین عمیق تبلور مجدد یافته و درشت بلورتر شده است. در برخی مقاطع درون گل‌سنگ‌های آهکی بلورهای ریز و پراکنده کوارتز وجود دارند. با توجه به سنگ‌شناسی این رخساره می‌توان آن را به بخش‌های دور از ساحل نسبت داد که در اثر جریان‌های آواری نبوده است (شکل ۶).

رخساره سنگ مختلط (PF6) شامل سنگ‌های آهکی می‌شود که بیش از ۳۰ درصد دانه‌های آواری کوارتز دارند و در مطالعات مغزه بسیار شبیه ماسه سنگ است به‌گونه‌ای که تمایز آن‌ها گاهی مشکل است. بخش کربناته آن بیشتر گل کربناته است و سپس طی دیاژنزی تبلور مجدد یافته و درشت بلور شده است. حضور دانه‌های آواری کوارتز درون گل‌های آهکی دلالت بر کم‌عمق بودن رخساره بیان شده

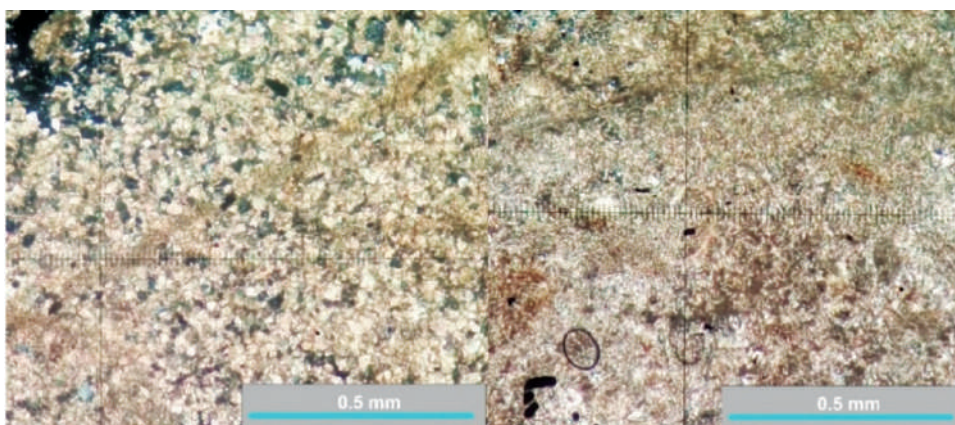
رخساره شیل سیاه و سبز (PF4) در زیر میکروسکوپ

به‌صورت رس سنگ و سیلتستون‌های خاکستری تا سیاه رنگ دیده می‌شود. در واقع دانه‌های پراکنده سیلتی در رس و ذرات در اندازه ماسه کوارتزی در سیلتستون به آن‌ها ماهیت رس سیلتی و سیلت‌های ماسه‌ای داده است (شکل ۵-الف). این رخساره در محیطی با انرژی پایین نهشته شده است. این رسوبات با وجود آواری بودن در یک محیط احیا نهشته شده‌اند، می‌توان آن را به محیط‌های دریایی دور از ساحل و یا شرایط محیطی نیمه بسته مانند لاگون نسبت داد.

در مشاهدات مغزه به‌صورت شیل‌هایی است که برخلاف رخساره قبلی رنگ آنها سبز و سیاه می‌باشد (شکل ۵-ب). رنگ سبز و سیاه شیل‌ها دلالت بر نبود اکسیژن برای اکسیداسیون مواد آلی (مواد آلی و Fe^{2+}) دارد. بنابراین، شیل‌ها در محیطی احیایی ته‌نشین شده‌اند و در آن آهن‌های دو ظرفیتی سپس در شکل‌گیری پیریت شرکت کرده‌اند. این رخساره دلالت بر شرایطی احیا در محیط رسوبی و محیط



شکل ۵. الف) تصویر میکروسکوپی از رخساره سیلتستون، ب) ذرات سیلتی کوارتز در زمینه کانی‌های رسی و بلورهای ریز پیریت‌های درجا (بخش‌های تیره)، (نور پلاریزه)، تصویر مغزه نهشته شیلی سازند فراقان



شکل ۶. تصویر میکروسکوپی از گلسنگ آهکی، بخشی از آن توسط گلسنگ کربناته تبلور مجدد یافته و درشت‌بلور شده است

دارد. به نظر می‌رسد رخساره بیان شده در بخش دور از ساحل تشکیل شده و به به‌طور متناوب از خشکی تغذیه شده است. سنگ‌های مختلط در آن دارای دو منشأ آواری و شیمیایی است. دانه‌های کوارتز با منشأ آواری و محیطی شده‌اند که رسوبات کربناته (عمدتاً گلسنگ کربناته) در حال ته‌نشست بوده است. در اکثر موارد، دانه‌های کوارتز با گرد شدگی خوب در زمینه بلورهای درشت سیمان کربناته شناور هستند (شکل ۷).



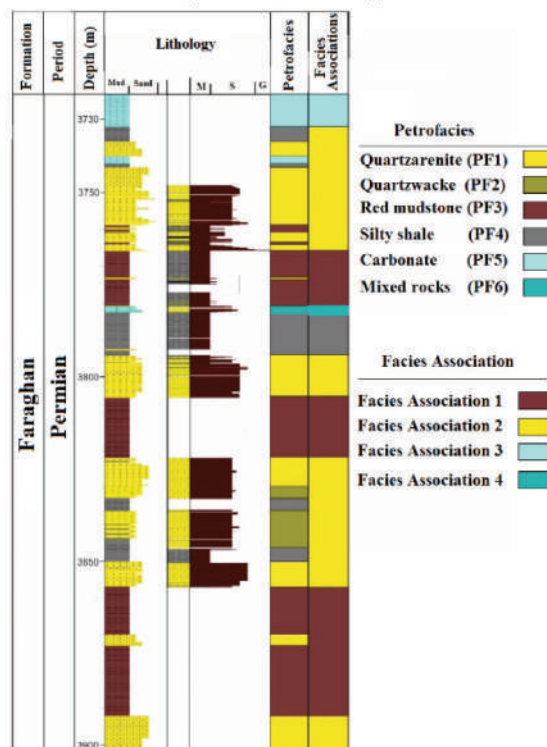
شکل ۷. الف) تصویر میکروسکوپی از رخساره سنگ‌های مختلط در نور پلاریزه، ب) دانه‌های کوارتز در زمینه میکرایتی به‌صورت شناور هستند و بعدها طی دیاژنز تبلور مجدد یافته است (نور طبیعی)

مجموعه‌های رخساره‌ای

رخساره‌های معرفی شده در چهار زیرمجموعه محیطی با عنوان مجموعه‌های رخساره‌ای در ادامه تفکیک شده‌اند.

مجموعه رخساره‌ای زیر محیط دشت ساحلی این مجموعه رخساره‌ای از رخساره‌های گل‌سنگ قرمز (PF3) و ماسه‌سنگ (PF1-PF2) تشکیل شده است. نهشته‌های قرمز-قهوه‌ای رنگ از یک محیط اکسیدان حکایت دارند و نشان‌دهنده رخنمون یافتن رسوبات است. با توجه به بررسی‌های انجام شده، این مجموعه رخساره‌ای به دشت ساحلی نسبت داده می‌شود (شکل ۸).

مجموعه رخساره‌ای زیر محیط ساحلی این مجموعه از رخساره‌های شیل (PF4) و ماسه‌سنگ (PF1-PF2) تشکیل شده است. حضور رخساره ماسه‌سنگی از نوع کوارتز آرنایت که نشان‌دهنده انرژی بالای محیط می‌باشد و لامینه‌های شیل (معرف شرایط آرام)، شرایط محیط ساحلی برای آن پیشنهاد می‌شود. رخساره کوارتز وکی در حدفاصل کوارتز آرنایت‌ها و شیل‌ها نهشته شده است (شکل ۸).



شکل ۸. ستون سنگ‌شناسی، رخساره‌ها و مجموعه‌های رخساره‌ای سازند فراقان

مجموعه رخساره‌ای زیر محیط تدریجی این مجموعه از رخساره‌های شیلی (PF4) و ماسه‌ای (PF1) تشکیل شده است. مشخصات رسوب‌شناسی آن معرف زیر محیط زون گذر تدریجی به محیط‌های دور از ساحل است. به صورتی که بیشترین ضخامت این مجموعه شامل شیل‌ها و مقدار کمتر رخساره‌های ماسه‌ای می‌باشد (شکل ۸).

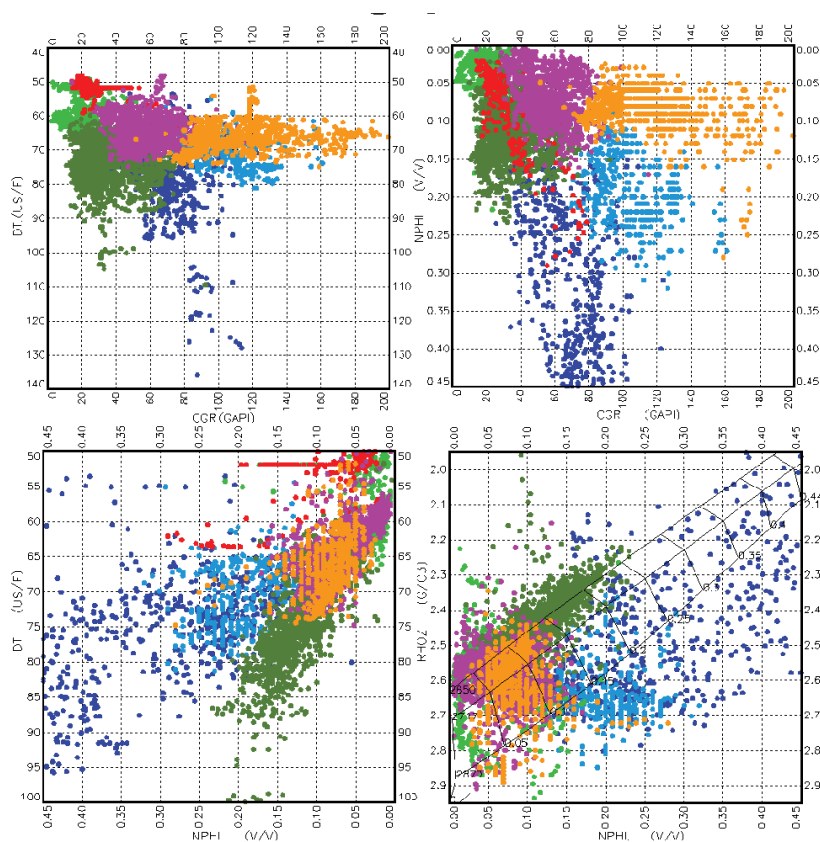
مجموعه رخساره‌ای زیر محیط دور از ساحل این مجموعه رخساره‌ای از رخساره‌های کربنات (PF5) و مختلط (PF6) تشکیل شده است و نشان‌دهنده محیطی عمیق با گردش جریان محدود است. با توجه به مشخصات رسوب‌شناسی و همبستگی رخساره‌ها، این مجموعه می‌تواند در گستره دور از ساحل، رسوب‌گذاری کند. رخساره مختلط به دلیل ورود ماسه‌ها به این زیر محیط تشکیل شده‌اند (شکل ۸).

رخساره‌های لاگ

در یک ارزیابی خوشه‌ای، اولین مرحله انتخاب متغیرهای است که قرار است با سنجش فاصله آنها در ابعاد مختلف (ابعاد داده‌ها برابر با تعداد متغیرها) خوشه‌سازی انجام شود (Kalhori et al., 2024). در این مطالعه لاگ‌هایی که بیشترین تاثیر را از سنگ‌شناسی، محیط رسوبی و کیفیت مخزنی داشتند به عنوان ورودی‌های خوشه‌سازی مورد استفاده قرار گرفتند. بنابراین نگارهای گاما به دلیل تاثیرپذیری از محیط رسوبی و حجم شیل، نگارهای تخلخل شامل نوترون، چگالی و صوتی برای شناسایی سنگ‌شناسی و تخلخل و همچنین نگار فتوالکتریک برای شناسایی سنگ‌شناسی در این مطالعه مورد استفاده قرار گرفتند. مرحله بعد از انتخاب ورودی‌ها، انتخاب خوشه بهینه می‌باشد. اگر تعداد ورودی‌ها محدود باشد، می‌توان با پلات‌های متقاطع دوبعدی و سه‌بعدی و مقایسه آنها با همدیگر، توزیع فضایی داده‌ها را مشخص و تعداد خوشه بهینه را انتخاب کرد، ولی اگر تعداد متغیرهای ورودی بیش از سه مشخصه باشد، دیگر نمی‌توان از این پلات‌های متقاطع برای مشخص شدن توزیع فضایی داده‌ها استفاده کرد. در این حالت روش‌های مختلفی وجود دارد که به کمک آنها و با محاسبه فاصله داده‌ها در ابعاد مختلف و با الگوریتم‌های

دیگر رسید و ادامه کار را بر اساس آن انجام داد. در آخر پس از انتخاب تعداد خوشه‌های بهینه در چاه مغزه‌دار، خوشه‌سازی بر اساس روشی که در بالا توضیح داده شد انجام گرفت. تصاویر متقاطع دوبعدی خروجی حاصل از خوشه‌سازی در شکل ۹ نشان داده شده است. همچنین جدول ۱ سنگ‌شناسی، تخلخل مفید حاصل از ارزیابی‌های پتروفیزیکی، میانگین هر یک از متغیرهای ورودی برای خوشه‌سازی و رنگ اختصاص داده شده برای هر رخساره در این مطالعه و در ادامه کار را نشان می‌دهد.

مشخص می‌توان تعداد خوشه بهینه را انتخاب کرد. در این مطالعه بر اساس تلفیقی از روش‌های مختلف و با در نظر گرفتن ویژگی‌های زمین‌شناسی سازند مورد مطالعه شش خوشه به عنوان تعداد خوشه‌های بهینه انتخاب شد. از طرف دیگر روش خوشه‌سازی تفکیکی مبتنی بر گراف، شماره‌های خاصی را به عنوان تعداد خوشه بهینه پیشنهاد می‌دهد. بنابراین می‌توان با در نظر گرفتن توزیع و پراکندگی داده‌ها در گروه‌های مختلف تعداد خوشه‌ها را با هم ترکیب کرد تا به عدد مورد نظر (شش خوشه) به دست آمده از روش‌های



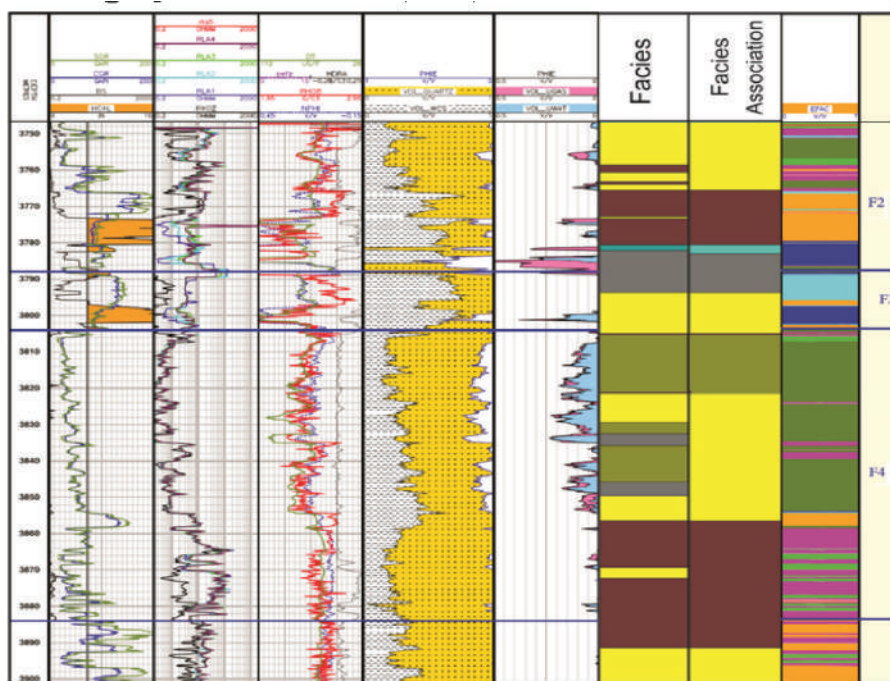
شکل ۹. رسم دو بعدی نگار گاما در مقابل سرعت صوت (بالا چپ)، گاما در مقابل نوترون (بالا راست)، تخلخل نوترون در مقابل سرعت صوت (پایین سمت چپ) و نوترون در مقابل چگالی (پایین سمت راست) در تمام چاه‌ها به صورت پیوسته

جدول ۱. سنگ‌شناسی، تخلخل مفید، میانگین متغیرهای ورودی خوشه‌سازی و رنگ اختصاص داده شده به رخساره

Facies	COLOR	Lithology	GR	DT	NPHI	RHOB	(/) PHIE	Petrofacies
Facies_1		lime	۲۱/۱۷	۵۷/۵۳	۰/۰۴	۲/۶۲	۰/۰۴	PF-5
Facies_2		Sand, Shale	۳۴/۷۰	۷۴/۷۰	۰/۱۲	۲/۴۲	۰/۱۲	PF-1
Facies_3		Sand Shale	۵۵/۷۹	۶۴/۵۱	۰/۰۷	۲/۵۹	۰/۰۰۴	PF4
Facies_4		Shale, Sand	۶۹/۰۸	۷۷/۶۸	۰/۳۱	۲/۳۱	۰/۱۰	PF-2
Facies_5		Shale	۱۰۵/۴۷	۷۰/۶۰	۰/۱۹	۲/۶۴	۰/۰۰۳	PF-4,6
Facies_6		Read Shale	۱۱۶/۳۰	۶۶/۰۵	۰/۰۸	۲/۶۲	۰/۰۰۸	PF-3

نازک حاصل از خرده‌های حفاری مشخص شده‌اند را نشان می‌دهد. انطباق خوبی بین رخساره‌های لاگ استخراج شده و رخساره‌های مغزه دیده می‌شود. از طرف دیگر می‌توان بین زیر محیط‌های مشخص شده در چاه A و رخساره‌های لاگ انطباق خوب مشاهده کرد. در ادامه با توجه به انطباق قابل قبول بین رخساره‌های استخراج شده از لاگ با مغزه، می‌توان در بقیه چاه‌های موجود از میدینی که تا فراقان حفاری شده‌اند و دارای لاگ چاه پیمایی هستند ولی فاقد داده مغزه می‌باشند روش ارائه شده را گسترش داد. در ادامه لاگ‌های چاه‌پیمایی موجود از هر چهار چاه به صورت یک فایل واحد درآمده و روش معرفی شده بر روی آنها اجرا شد. شکل ۱۲ نتیجه انطباق حاصل از رخساره‌های لاگ را در چهار چاه مورد مطالعه نشان می‌دهد.

در مرحله بعد بین رخساره‌های لاگ استخراج شده و رخساره‌های زمین‌شناسی در چاه مغزه‌دار انطباق برقرار شد. بر اساس انطباق انجام شده در اکثر موارد رخساره لاگ شماره یک با لیتولوژی کربناته معادل رخساره زمین‌شناسی پنج و شش (رخساره سنگ‌آهک و رخساره مختلط)، رخساره‌های لاگ شماره دو و سه با لیتولوژی شیل و شیل ماسه‌ای معادل رخساره زمین‌شناسی چهار (شیل سیاه و سبز)، رخساره لاگ چهار با لیتولوژی ماسه معادل رخساره زمین‌شناسی یک (رخساره ماسه‌سنگی) رخساره لاگ شماره پنج با لیتولوژی شیل ماسه‌ای معادل رخساره زمین‌شناسی شش (رخساره گل‌سنگ قرمز) می‌باشند. شکل ۱۰ این انطباق را در چاه مغزه‌دار و شکل ۱۱ این انطباق را در چاهی که رخساره‌های زمین‌شناسی بر اساس مقاطع

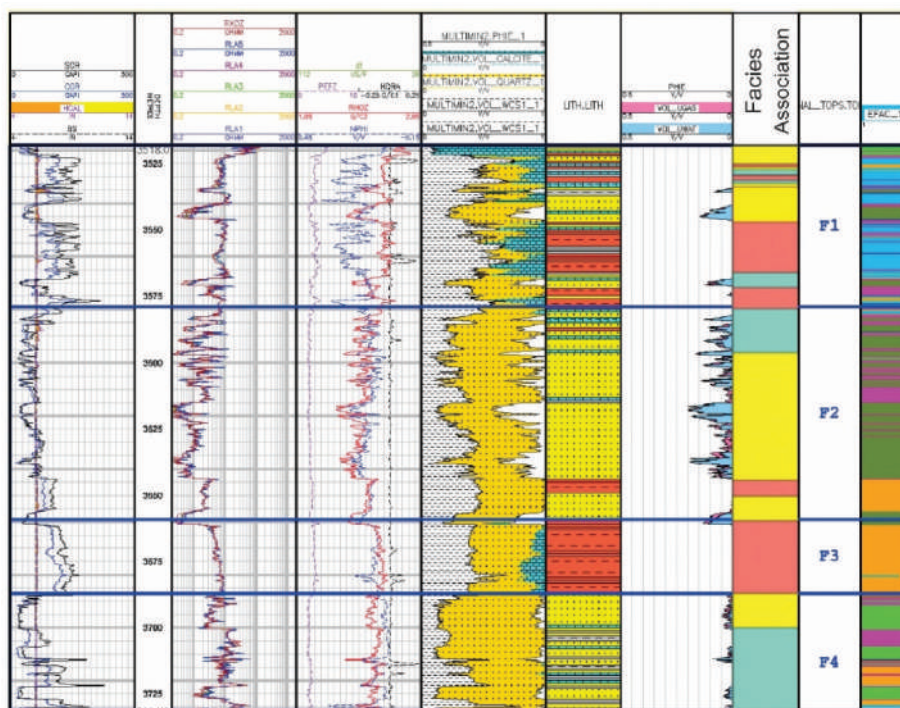


شکل ۱۰. انطباق بین رخساره‌های زمین‌شناسی با رخساره‌های لاگ استخراج شده از لاگ‌های چاه‌پیمایی در چاه A

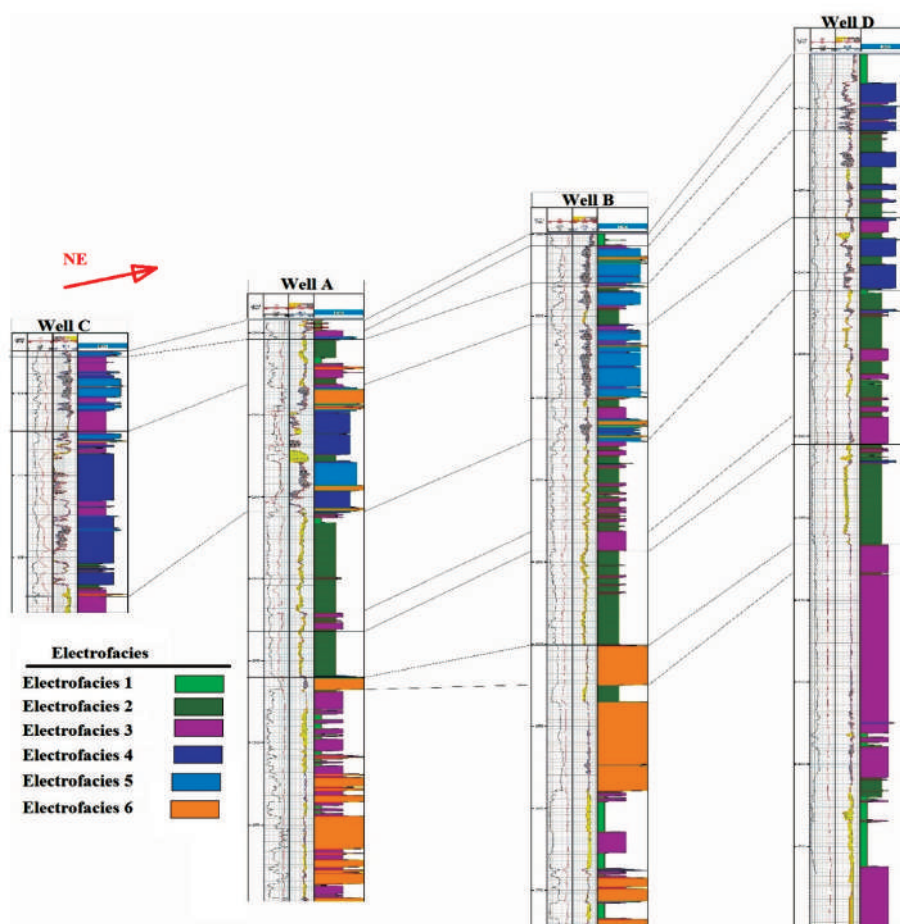
کیفیت مخزنی رخساره‌های معرفی شده

مناسب‌تری نسبت به بقیه رخساره‌های شناسایی شده برخوردار می‌باشند. میانگین تخلخل مفید برای رخساره‌های استخراج شده در شکل ۱۴ دیده می‌شود. بر اساس شکل ۱۴، این مقدار برای رخساره‌های دو و چهار بالاتر از ۱۰ درصد می‌باشد.

انطباق دوبعدی رخساره‌ها در شکل ۱۲ نشان داده شده است. شکل ۱۳ نمودار دوی بعدی آب اشباع شدگی در مقابل تخلخل حاصل از نتایج ارزیابی پتروفیزیکی را برای رخساره‌های معرفی شده نشان می‌دهد. بر اساس مشاهدات موجود، رخساره‌های دو و چهار از کیفیت مخزنی

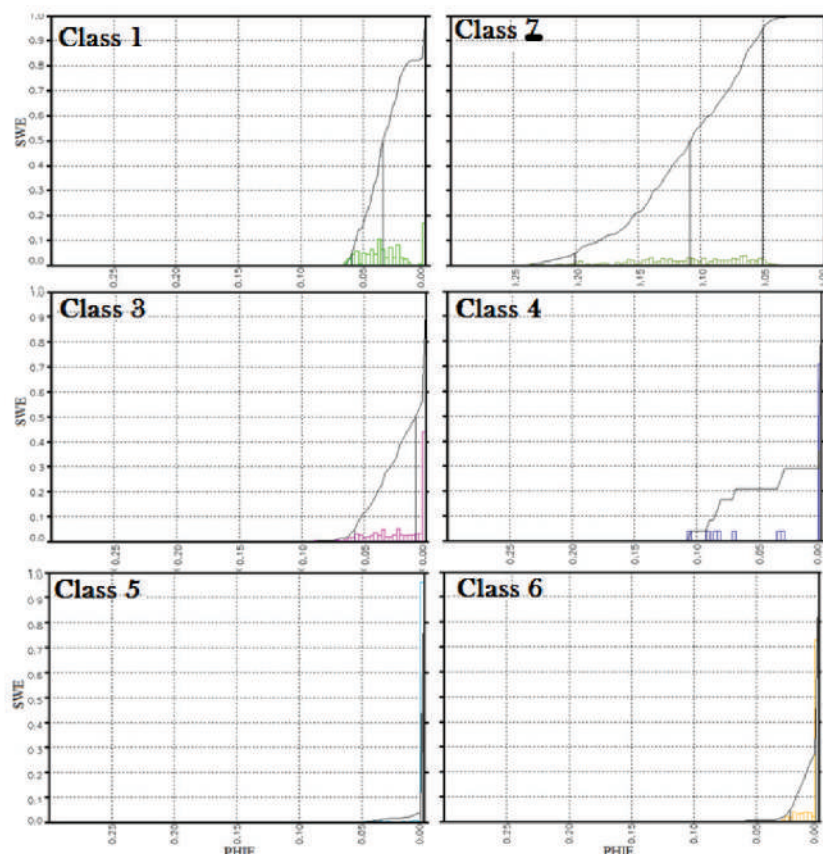


شکل ۱۱. انطباق بین رخساره‌های زمین‌شناسی با رخساره‌های لاگ استخراج شده از لاگ‌های چاه‌پیمایی در چاه B

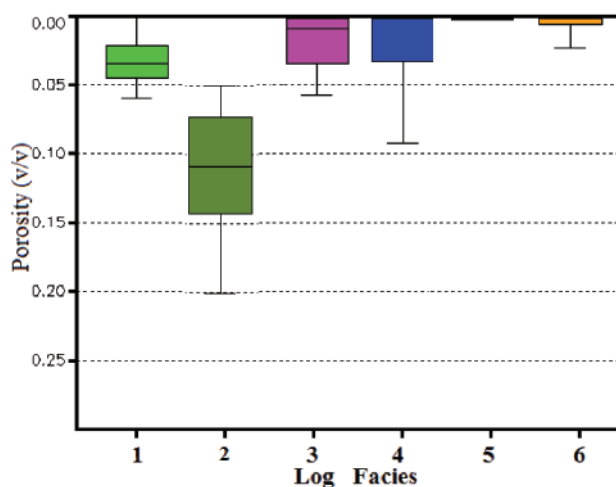


شکل ۱۲. انطباق بین رخساره‌های لاگ استخراج شده از لاگ‌های چاه‌پیمایی در چهار چاه حفاری شده تا سازند فراقان

رخساره‌های یک، سه و شش دارای تخلخل مفید کمتر از پنج درصد را دارا می‌باشند. بنابراین می‌توان گفت که هر کجا رخساره‌های دو و چهار دیده شوند مستعد کیفیت مخزنی می‌باشند. با نگاه به گسترش عمودی این رخساره‌ها در چاه‌های مورد مطالعه می‌توان دید که رخساره‌های دو و چهار در زون‌های یک و دو سازند فراقان یعنی زونی که رخساره زمین‌شناسی ماسه‌سنگی کوارتز آرنایتی گسترش دارد از فراوانی بالایی برخوردار می‌باشند. بنابراین بهترین زون مخزنی در تمام چاه‌ها در سازند فراقان را می‌توان زون دو و بعد از آن زون یک در نظر گرفت.



شکل ۱۳. نمودار گستره تغییرات تخلخل مفید در مقابل آب اشباع‌شدگی در رخساره‌های مختلف در چاه SPD1-14



شکل ۱۴. گستره تغییرات تخلخل مفید در رخساره‌های لاگ معرفی شده در چاه‌های مورد مطالعه

نتیجه‌گیری

این مطالعه به بررسی رسوب‌شناسی و تعیین رخساره‌های رسوبی سازند فراقان در چهار چاه حفاری شده تا این سازند در میادین خلیج فارس پرداخته است. با استفاده از مطالعات مغزه، مقاطع نازک و خرده‌های حفاری شش رخساره ماسه‌سنگ، ماسه گری وکی، گل‌سنگ قرمز، شیل سیاه و سبز، سنگ آهک و رخساره سنگ مختلط در چهار محیط رسوبی دشت ساحلی، محیط ساحلی، تدریجی و دور از ساحل برای این سازند معرفی شد.

بر اساس روش خوشه‌سازی مبتنی بر گراف شش رخساره لاگ در چاه مغزه‌دار و دارای لاگ چاه پیمایی معرفی شد. بین رخساره‌های لاگ معرفی شده و رخساره‌های زمین‌شناسی در چاه مغزه‌دار انطباق برقرار شد. انطباق نتایج حاصل از رخساره‌های لاگ با رخساره‌های رسوبی و همراهی رخساره‌ها نشان می‌دهد، رخساره لاگ یک دارای سنگ‌شناسی آهکی، رخساره لاگ دو و سه ماسه‌ای، رخساره لاگ چهار ماسه حاوی شیل، رخساره پنج شیلی و رخساره شش حاوی شیل‌های قرمز رنگ می‌باشد.

روش ارائه شده برای تعیین رخساره‌های لاگ به چاه‌های حفاری شده تا سازند فراقان دارای لاگ چاه‌پیمایی و فاقد مغزه گسترش داده شد و در بقیه چاه‌ها رخساره‌های لاگ معرفی شد. گسترش رخساره‌های لاگ به چاه‌های فاقد مغزه حفاری شده در سازند فراقان نشان از تغییرات فراوانی این رخساره‌ها دارد که نشان‌دهنده تغییر جانبی محیط رسوبی سازند فراقان است.

با استفاده از نتایج ارزیابی‌های پتروفیزیکی کیفیت مخزنی رخساره‌های معرفی شده مورد ارزیابی قرار گرفت. بررسی کیفیت مخزنی رخساره‌ها نشان داد، رخساره لاگ دو و چهار دارای بهترین کیفیت مخزنی می‌باشند. رخساره‌های مذکور در بخش‌های فراقان دو (F2) و فراقان یک (F1) دارای بیشترین فراوانی می‌باشند. بنابراین می‌توان نتیجه‌گیری کرد که بهترین بازه از نظر کیفیت مخزنی در سازند فراقان به زون‌های دو و یک سازند اختصاص دارند.

سپاسگزاری

نویسندگان از شرکت نفت و گاز پارس برای اجازه انتشار نتایج این تحقیق و همچنین پژوهشکده علوم پایه کاربردی به خاطر حمایت‌های مالی تشکر فراوان دارند.

منابع

- امرایی، ج.، رضایی، پ.، امینی، ع.، زمان زاده، س.م. و توکلی، و.، ۱۳۹۷. تحلیل ریزرخساره‌ها و پتروفاسیس‌ها، ویژگی‌های دیاژنتیکی و شرایط محیطی سازند فراقان در بخش مرکزی خلیج فارس. فصلنامه زمین‌شناسی ایران، ۱۳، (۵)، ۱۵-۲۳.
- مهدی‌نیا، م. و موسوی حرمی، س.ر.، ۱۳۸۸. پتروگرافی و تفسیر محیط رسوبگذاری نهشته‌های پرمین پیشین (سازند فراقان) در میدان گلشن در خلیج فارس. رسوب و سنگ رسوبی، ۲، ۶، ۱-۱۱.
- Al-Dajani, A., Burns, D., Toksöz, M.N. and Saggaf, M., 2000, August. Aeolian and fluvial depositional systems discrimination in wireline logs: Unayzah formation, Central Saudi Arabia. In SEG International Exposition and Annual Meeting (SEG-2000). SEG.
- Al-Ghazi, A., 2007. New evidence for the Early Devonian age of the Jauf Formation in northern Saudi Arabia. *Revue de Micropaleontologie*, 50, 59-72.
- Birkle, P., Van Dijk, C., Dasgupta, K., Murphy, M.J., Kharaka, Y.K., Thordsen, J.J. and Bischoff, J.L., 2019. Controls on illite cementation in Unayzah sandstones, Saudi Arabia: mineralogy, K-Ar dating, numerical modeling, and hydrothermal experiments. *Journal of Sedimentary Research*, 89(2) 89-109.
- Ghavidel-Syooki, M., 1988. Palynostratigraphy and Palaeoecology of the Faraghan Formations of Southeastern Iran. Ph.D. Theses. Michigan State University. 279.
- Ghavidel-Syooki, M., 1993. Palynological Study of Paleozoic Sediments of the Chal-I-Sheh Area, Southwestern Iran. *Journal of Sciences. Islamic Republic of Iran*, 4, 1, 32-45.

- Ghavidel-Syooki, M., 1995. Palynostratigraphy and palaeogeography of a Palaeozoic sequence in the Hassanakdar area, Central Alborz Range, northern Iran. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 86(1-2), 91-109.
- Ghavidel-Syooki, M. 1997., Palynostratigraphy and Paleogeography of Early Permian Strata in the Zagros Basin, Southeast-Southwest Iran. *Journal of Sciences. Islamic Republic of Iran*, 8, 4, 243-261.
- Ghavidel-Syooki, M., 2003. Palynostratigraphy of Devonian sediments in the Zagros Basin, southern Iran. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 127(3-4), 241-268.
- Kalhori, M., Mehrabi, H., Sfidari, E. and Khiabani, S.Y., 2024. Target zone selection for hydraulic fracturing using sedimentological and rock mechanical studies with the support of the machine learning method of cluster analysis. *Geo-energy Science and Engineering*, 237, 212826.
- Kamali, M.R. and Rezaee, M.R., 2003. Burial history reconstruction and thermal modeling at Kuh-e Mond, SW Iran. *Journal of petroleum Geology*, 26(4), 451-464.
- Khodayeva, A., 2024. Assessment of CO2 Storage Potential in the Unayzah Formation, Central Saudi Arabia (Doctoral dissertation), 185.
- Macdonald, F.A., Smith, E.F., Strauss, J.V., Cox, G.M., Halverson, G.P., Roots, C.F., MacFarlane, K.E., Weston, L.H. and Relf, C., 2010. Neoproterozoic and early Paleozoic correlations in the western Ogilvie Mountains, Yukon. *Yukon Exploration and Geology*, 161-182.
- Mollazal, Y., 1965. The geology of the Kuh-e Neyse and adjoining area. *Iranian Oil Operating Companies Report*, (1098).
- Sfidari, E., Kadkhodaie-Ilkhchi, A. and Najjari, S., 2012. Comparison of intelligent and statistical clustering approaches to predicting total organic carbon using intelligent systems. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 86, 190-205.
- Sfidari, E., Kadkhodaie-Ilkhchi, A., Rahimpour-Bbonab, H. and Soltani, B., 2014. A hybrid approach for litho-facies characterization in the framework of sequence stratigraphy: a case study from the South Pars gas field, the Persian Gulf basin. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 121, 87-102.
- Szabo, F. and Kheradpir, A., 1978. Permian and Triassic Stratigraphy Zagros basin Southwest Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 1-2, 57-82.
- Zamanzadeh, S.M., Amini, A. and Ghavidel-Syooki, M., 2009. Sequence stratigraphic controls on early-diagenetic carbonate cementation of shallow marine clastic sediments (the Devonian Zakeen Formation, southern Zagros, Iran). *Geosciences Journal*, 13, 31-57.