

بررسی تأثیر رخساره‌های رسوبی و فرایندهای دیاژنزی بر واحدهای جریان هیدرولیکی سازند شوربجه در یکی از میادین گازی، شمال خاور ایران

میلاذ مرادی^۱، علی کدخدایی^{۲*} و حسین رحیم‌پوربناب^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی نفت، دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲- دانشیار گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

۳- استاد دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

نویسنده مسئول: kakhodaie_ali@tabrizu.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۱/۵/۱۹ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۸

نوع مقاله: پژوهشی

چکیده

سازند شوربجه به سن کرتاسه پیشین (نئوکومین - بarmین) مهم‌ترین سنگ مخزن آواری - کربناته در شمال خاور ایران است. عمده تولید گاز در زون‌های B و D این سازند صورت می‌گیرد. در این پژوهش برای درک عوامل کنترل‌کننده کیفیت مخزنی این سازند، بررسی‌های جامع پتروگرافی و پتروفیزیکی انجام گرفت. بر پایه مطالعات پتروگرافی تعداد ۵ رخساره رسوبی (پتروفاسیس) شامل میکروکنگلومرا، ماسه‌سنگ، رس‌سنگ/شیل، دولومادستون ماسه‌ای و آلییدگرینستون دولومیتی ماسه‌ای شناسایی شد. این رخساره‌های رسوبی (پتروفاسیس) متعلق به بخش بالایی پهنه جزرومدی، پهنه جزرومدی، لاگون، روخانه بریده بریده شامل پشته‌های طولی، و روخانه مئاندری (دشت سیلابی و دریاچه شاخ گاوی) بوده که در یک محیط رودخانه‌ای - دریایی نهشته شده‌اند. براساس داده تخلخل و تراوایی حاصل از آنالیز مغزه، تعداد ۴ واحد جریان هیدرولیکی (HFU) با استفاده از روش شاخص زون جریان (FZI) تفکیک گردید. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که گسترش فرآیندهای دیاژنزی انحلال، دولومیتی شدن و فشردگی شیمایی (استیلولیت و رگچه انحلالی) با رخساره‌های دانه درشت شامل کنگلومرا، ماسه‌سنگ و آلییدگرینستون دولومیتی ماسه‌ای مربوط به محیط پراثرزی رودخانه بریده بریده، لاگون و سدهای جزرومدی و واحدهای جریان سه و چهار (HFU4, HFU3) که بهترین کیفیت مخزنی را دارند در ارتباط است. گسترش فرآیندهای دیاژنزی سیمانی شدن (سیلیسی، کربناته و انیدریتی) و دگرسانی فلدسپات‌ها با رخساره‌های محیط کم انرژی رودخانه بریده بریده، مئاندری، دشت سیلابی و بالای جزرومدی و واحدهای جریان یک و دو (HFU2, HFU1) که پایین‌ترین کیفیت مخزنی را دارند در ارتباط است.

واژگان کلیدی: پتروفیزیکی، پتروفاسیس، دیاژنزی، واحد جریان هیدرولیکی، شاخص زون جریان، کیفیت مخزنی

۱- پیشگفتار

و همکاران، ۲۰۰۷). در مطالعه خصوصیات جامع مخزنی، شناخت رخساره رسوبی، فرآیند دیاژنزی و تعیین گونه‌سنگی برای مشخص کردن واحدهای جریان هیدرولیکی^۱ جزو ابتدایی‌ترین مراحل جهت توسعه مخازن هیدروکربنی به شمار می‌رود (ایزدی و غلامپور، ۲۰۱۳؛ هنرمند و امینی، ۲۰۱۷؛ کدخدایی و همکاران، ۲۰۱۸). برای تعیین گونه‌سنگی و مشخص کردن واحدهای جریان هیدرولیکی مختلف می‌توان از ترکیب مجموعه‌ای از داده‌ها استفاده کرد (رحیم‌پوربناب و همکاران، ۲۰۱۲؛ نوری و همکاران، ۲۰۱۴). واحد جریان تفکیک شده به کمک یکی از روش‌های تعیین گونه‌سنگی می‌تواند مخزن را به

کشف ذخایر عظیم گازی در حوضه رسوبی کپه‌داغ در طی چندین سال گذشته تاکنون و مرتبط بودن ذخایر با تله‌های چینه‌ای، بیانگر ضرورت مطالعات جامع‌تر زمین‌شناسی و مخزنی برای رسیدن به مدل رسوبی دقیق‌تر، تغییرات رخساره‌ها و تأثیر فرآیندهای دیاژنزی بر روی کیفیت مخزن در مطالعات اکتشافی و مدیریتی حائز اهمیت است. براساس مطالعات پیشین، حوضه کپه‌داغ پس از بسته شدن اقیانوس هرسی‌نین در اثر کوهزایی سمیرین پیشین و در زمان تریاس میانی تشکیل شده است (افشارحرب، ۱۹۷۹؛ بربریان و کینگ، ۱۹۸۱؛ پورسلطانی

¹hydraulic flow units: HFU

۱۹۷۹) (شکل ۱). بر مبنای شکل ۲ نقشه‌های جغرافیایی دیرینه در طی ژوراسیک و کرتاسه، حوضه ریفتی، درون کریتونی و حواشی قاره‌ای غیرفعال در لبه شمال صفحه هند وجود داشته است (استامپفل و بورل، ۲۰۲۲). رسوبات رودخانه‌ای و دریاچه‌ای به طور عمده در حوضه‌های درون کریتونی انباشته می‌شوند (نیکولز، ۲۰۰۹؛ هموند، ۲۰۰۹). در حوضه رسوبی کپه‌داغ، سازند شورجیج که در یک محیط رودخانه‌ای (بریده-بریده) و دریاچه‌ای (موقت) نهشته شده است این مرحله را نشان می‌دهد.

۳- داده‌ها و روش مطالعه

در این پژوهش با استفاده از داده مغزه، خرده‌حفری و نمودارهای چاه‌پیمایی هفت حلقه چاه، خصوصیات زمین‌شناسی و مخزنی سازند شورجیج مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور رسوب‌شناسی حدود ۳۱۸۱ عدد برش نازک که از خرده و مغزه حفاری در دسترس، سازند شورجیج مورد مطالعه قرار گرفت. برای نام‌گذاری سنگ‌های آواری (پتروفاسیس) روش پتی‌جان (۱۹۸۷) و به منظور تعریف رخساره رسوبی و تفسیر محیط رسوبی آن از دیدگاه میال (۲۰۰۶) استفاده شده است. برای تفسیر فرآیندهای دیاژنزی و محیط‌های آن از وردن و بورلی (۲۰۰۳) استفاده شده است. ارزیابی پتروفیزیکی سازند شورجیج با استفاده از روش ارزیابی احتمالی با استفاده از داده‌های نمودارهای چاه‌پیمایی (شامل: GR، CGR، DT، NPHI و RHOB). توسط نرم‌افزار ژئولاگ انجام شد. با استفاده از ۱۱۴۰ نمونه پلاگ تخلخل و تراوایی، واحدهای جریان هیدرولیکی به کمک مدل شاخص زون جریان تفکیک گردید.

۴- بحث و نتایج

۴-۱- رخساره رسوبی

مطالعات پتروگرافی منجر به شناسایی تعداد ۵ ریزرخساره (پتروفاسیس) در سازند شورجیج گردید. رخساره‌های رسوبی مخزن کرتاسه پیشین در چاه‌های مورد مطالعه شامل رخساره‌های متعلق به بخش بالایی پهنه جزرومدی، پهنه جزرومدی، لاگون، روخانه بریده بریده شامل پشته‌های طولی^۵، و روخانه مئاندردی (دشت سیلابی و دریاچه شاخ گاوی^۶) می‌باشد. تعداد ۵ رخساره اصلی

زون‌های تراوا و ناتراوا رده‌بندی کنند و بطور گسترده در توصیف خصوصیات مخازن هیدروکربنی مورد استفاده قرار گیرند (امبری و کلوان، ۱۹۷۱؛ گانتز و همکاران، ۱۹۷۹؛ فلوگل، ۲۰۱۰؛ مهربانی و همکاران، ۲۰۱۹). روش شاخص زون جریان^۲ متداول‌ترین روش برای مشخص کردن واحدهای جریان در مخازن است که با استفاده از آن می‌توان به بررسی نواحی مخزنی از غیرمخزنی پرداخت (آمفوله، ۱۹۹۳). تاکنون مطالعات زیادی از دید زمین‌شناسی و مخزنی بر روی نهشته‌های رسوبی سازند شورجیج انجام شده است، این مطالعات بیشتر در ارتباط با تاریخچه رسوب‌گذاری، رخساره رسوبی و فرآیند دیاژنزی بحث شده است (موسوی‌حرمی و برنر، ۱۹۹۰؛ موسوی حرمی و برنر، ۱۹۹۲؛ افشارحرب، ۱۹۷۹؛ موسوی حرمی و همکاران، ۲۰۰۹؛ مرادی و همکاران، ۲۰۲۲). اما مطالعات محدودی برای ارتباط رخساره رسوبی و فرآیند دیاژنزی بر روی واحد جریان هیدرولیکی صورت گرفته است. هدف این مطالعه بررسی نوع رخساره و محیط رسوبی، تاثیر فرآیند دیاژنزی بر کیفیت مخزنی و تفکیک واحدهای جریانی و ارزیابی کیفیت مخزنی می‌باشد.

۲- زمین‌شناسی و جغرافیای دیرینه

حوضه رسوبی کپه‌داغ بعد از واحد رسوبی - ساختاری زاگرس، جزو مهم‌ترین حوضه‌های رسوبی - ساختاری در شمال خاور ایران است (جمالی، ۲۰۱۱). این حوضه رسوبی در شمال خاور ایران، بخش وسیعی از ترکمنستان و شمال افغانستان را در بر می‌گیرد (افشارحرب، ۱۹۹۴). ذخایر گازی این حوضه در نهشته‌های کربناته مزدوران و آواری شورجیج تجمع یافته است (موسوی حرمی و برنر، ۱۹۹۲). توالی‌های ماسه‌سنگی سازند شورجیج در ایران بخش مخزنی میادین گازی را شکل داده است و معادل سازندهای کارابیل^۳، الموراد^۴ و شاتلیک^۵ که سنگ مخزن مهم گازی در ترکمنستان (بویژه در میادین دولت‌آباد و بایراملی) است. از لحاظ سنگ‌شناسی سازند شورجیج از رخساره‌های کنگلومرای و ماسه‌ای با میان لایه شیل سرخ عمدتاً در بخش باختری گسترش پیدا می‌کند در حالی که بخش شمال باختری و باختر مشهد رخساره‌های شیلی، ژپیس، ماسه‌سنگ با لایه‌های کربناته افزایش می‌یابد (افشارحرب،

⁵ Shatlyk Fm.

⁶ Longitudinal bars

⁷ Oxbow lake

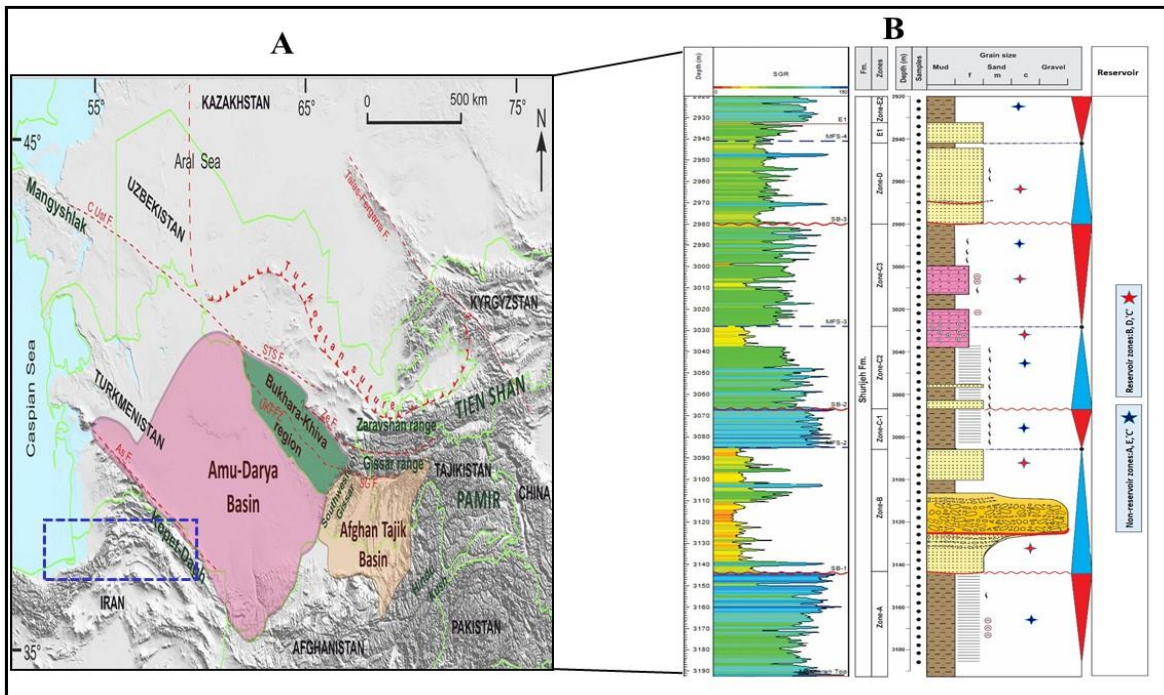
² flow zone indicator: FZI

³ Karabil Fm.

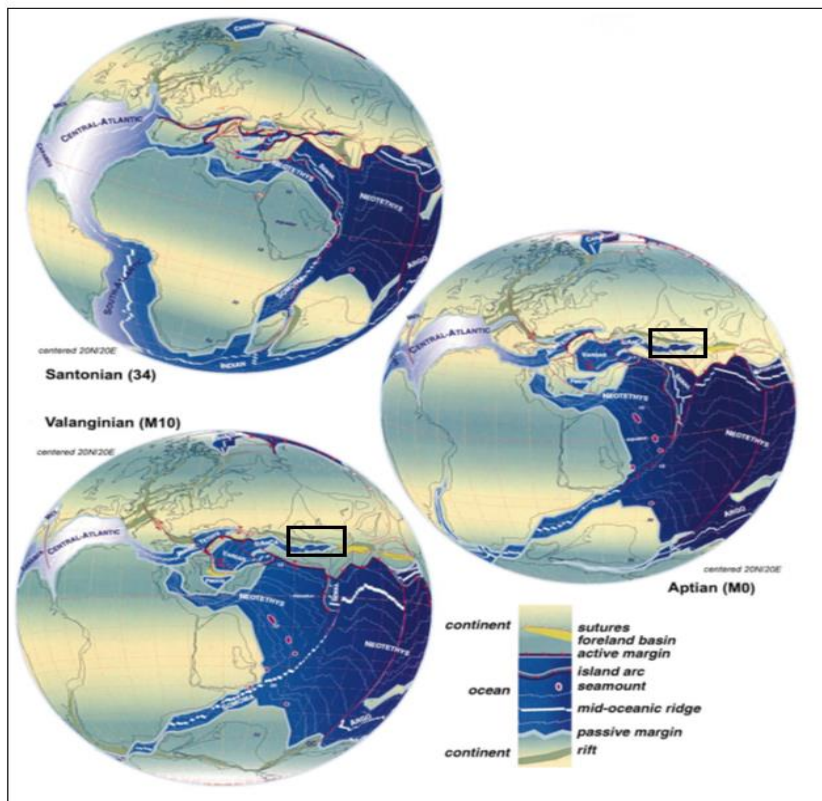
⁴ Almurad Fm.

بندی فولک (۱۹۷۴) و پتی جان و همکاران (۱۹۸۷) صورت گرفته و شرایط محیط رسوبی آن براساس طبقه‌بندی مایال (۲۰۰۶) تفسیر شده است.

شامل: میکروکنگومرا، ماسه‌سنگ، رس‌سنگ/شیل، دولومادستون ماسه‌ای و آئیدگرینستون دولومیتی ماسه‌ای شناسایی گردید. نام‌گذاری پتروفاسیس براساس طبقه



شکل ۱. A: ترسیم موقعیت جغرافیایی میدین هیدروکربنی ایران و کشورهای همسایه (موقعیت حوضه رسوبی کپه‌داغ با خطوط آبی مشخص شده است) (ماویف، ۱۹۸۶). B: ستون چینه‌شناسی سازند شورجیج (زون‌های مخزنی با علامت ستاره قرمز و غیرمخزنی با رنگ آبی مشخص شده است).



شکل ۲. مدل تکتونیک صفحه‌ای کرتاسه که در نظر گرفتن دینامیک مرز صفحات ترسیم شده است، بر روی شکل موقعیت حوضه رسوبی کپه‌داغ در لبه جنوبی صفحه توران (کرتاسه) به صورت مستطیل مشکی رنگ مشخص شده است (استامپفلی و بورل، ۲۰۰۲).

۳ درصد) می‌باشند. این پتروفاسیس دارای مقادیر زیادی اکسید آهن در زمینه بوده و از نظر بلوغ بافتی و کانی‌شناسی این پتروفاسیس در حد نابالغ تا نیمه‌بالغ می‌باشد. این پتروفاسیس ماسه‌سنگ با توجه به انواع آن می‌تواند به محیط‌های نسبتاً پراثرژی (پتروفاسیس کوارتز آرنایت) و کم اثرژی تر (ساب‌لیت آرنایت و کوارتزوک) رودخانه‌های بریده بریده نسبت داده شود که گاهاً به صورت میان لایه با تناوبی از رس‌سنگ‌ها و سیلتستون‌های بخش دشت سیلابی نهشته شده‌اند (مایال، ۲۰۰۶).

پتروفاسیس ۳ (PF4): رس‌سنگ/شیل^۵: این پتروفاسیس در توالی سازند مورد مطالعه عمدتاً در زون غیرمخزنی A، E و بصورت میان لایه در زون C و D قابل تفکیک است. این پتروفاسیس بصورت رس‌سنگ‌های قرمز و انیدریتی قابل مشاهده است. ذرات اصلی رس‌سنگ قرمز رنگ عمده از ذرات رس و ماسه ریز تشکیل شده ذرات کوارتز ریز دانه عمده به فرم زاویه‌دار تا نیمه زاویه‌دار قابل مشاهده هستند (شکل ۳). رس‌سنگ انیدریتی عمدتاً از ذرات رس، سیلت و بلورهای انیدریت به صورت نودول تشکیل شده است. پتروفاسیس رس‌سنگ قرمز می‌تواند معرف شرایط اکسیدان در محیط‌های کم‌اثرژی رودخانه بریده بریده (دشت سیلابی) در نظر گرفته شود (مایال، ۲۰۰۶). رس سنگ انیدریتی از نظر شرایط محیطی مربوط به نواحی کم اثرژی رودخانه مئاندری (دشت سیلابی^۶، خاکریز^۷ و دریاچه‌های شاخ‌گاو^۸) می‌باشد (مایال، ۲۰۰۶).

پتروفاسیس ۴ (PF4): دولومادستون ماسه‌ای^۹: این پتروفاسیس در توالی سازند مورد مطالعه در بخش‌های از زون C، ابتدای زون E و انتهای زون A قابل تفکیک است. این پتروفاسیس عمدتاً از زمینه دولومیکرایتی با ذرات ماسه دانه‌ریز تا متوسط به طور پراکنده تشکیل شده است (شکل ۳). و دارای جورشدگی ضعیف می‌باشد. وجود ذرات کوارتز در زمینه دولومیتی می‌تواند بیانگر گسترش این رخساره در محیط پری‌تایدال^{۱۰} (بالای جزرومدی تا لاگون) باشد.

پتروفاسیس ۵ (PF5): آئید گرینستون دولومیتی-ماسه‌ای/مختلط^{۱۱}: این پتروفاسیس در توالی سازند مورد

پتروفاسیس ۱ (PF1): میکروکنگلومرا^۱: این پتروفاسیس در توالی سازند مورد مطالعه در قاعده زون مخزنی B قابل تفکیک است. اجزای اصلی این پتروفاسیس شامل ذرات چرت و کوارتزهای پلی کریستالین و دارای پوشش اکسیدی و دیگر اجزای فرعی این پتروفاسیس شامل خرده‌های ماسه سنگی و کربناته هستند (شکل ۳). جورشدگی قطعات ضعیف تا متوسط می‌باشد. سیمان سیلیسی و کلسیتی مهم‌ترین سیمان‌های قابل تشخیص در این پتروفاسیس می‌باشند. این پتروفاسیس از نظر محیط تشکیل، به بخش پراثرژی رودخانه‌های بریده بریده شامل پشته‌های طولی^۲ و رسوبات غربال شده^۳ حاصل از مهاجرت جانبی کانال‌ها نسبت داده می‌شود (مایال، ۲۰۰۶).

پتروفاسیس ۲ (PF2): ماسه‌سنگ^۴: این پتروفاسیس در توالی سازند مورد مطالعه عمدتاً در زون مخزنی B، D و بصورت میان لایه در زون C قابل تفکیک است. پتروفاسیس ماسه‌سنگ در توالی سازند شوربجه در چاه‌های مورد مطالعه عمدتاً به صورت کوارتز آرنایت، ساب لیتارنایت، کوارتزوک و به میزان کمی ساب‌آرکوز مشاهده شده است (شکل ۳). اجزای اصلی تشکیل دهنده کوارتز آرنایت، ذرات کوارتز عمدتاً در حد ماسه ریز تا متوسط با جورشدگی خوب و نیمه‌زاویه‌دار و اجزای فرعی شامل چرت و گلاکونیت می‌باشد. مهم‌ترین سیمان‌های موجود در این پتروفاسیس شامل سیمان سیلیسی و کربناته (کلسیتی و دولومیتی) هستند. پتروفاسیس ساب‌لیتارنایت شامل دانه‌های چرت کوارتز چندبلوری، فلدسپات‌های تجزیه شده، خرده‌سنگ‌های کربناته و پلاژیوکلاز هستند. سیمان کربناته و سیلیسی وجود دارد. پتروفاسیس کوارتزوک عمدتاً از ذرات کوارتز تک‌بلور در زمینه بسیار دانه ریز از رس و گاهی گل کربناته اکسیدی از ۱۵ تا ۴۵ درصد تشکیل شده است، در تعداد کمی از نمونه‌ها ساب‌آرکوز نیز مشاهده شده است که اندازه ذرات آن در حد ماسه ریز تا ماسه متوسط و غالباً زاویه‌دار بوده و جورشدگی خوبی دارند. اجزای اصلی سازنده این پتروفاسیس شامل کوارتز (با رشد اضافی هم‌محور)، فلدسپات پتاسیم و پلاژیوکلاز (۵ تا ۱۰ درصد) و به میزان کمتر کانی‌های سنگین (۲ تا

⁷ Levee

⁸ Oxbow lake

⁹ Sandy Dolomudstone

¹⁰ Peritidal

¹¹ Sandy Dolomitic Ooid Grainstone / Hybrid

¹ Micro-Conglomerate

² Longitudinal bars

³ Sieve deposits

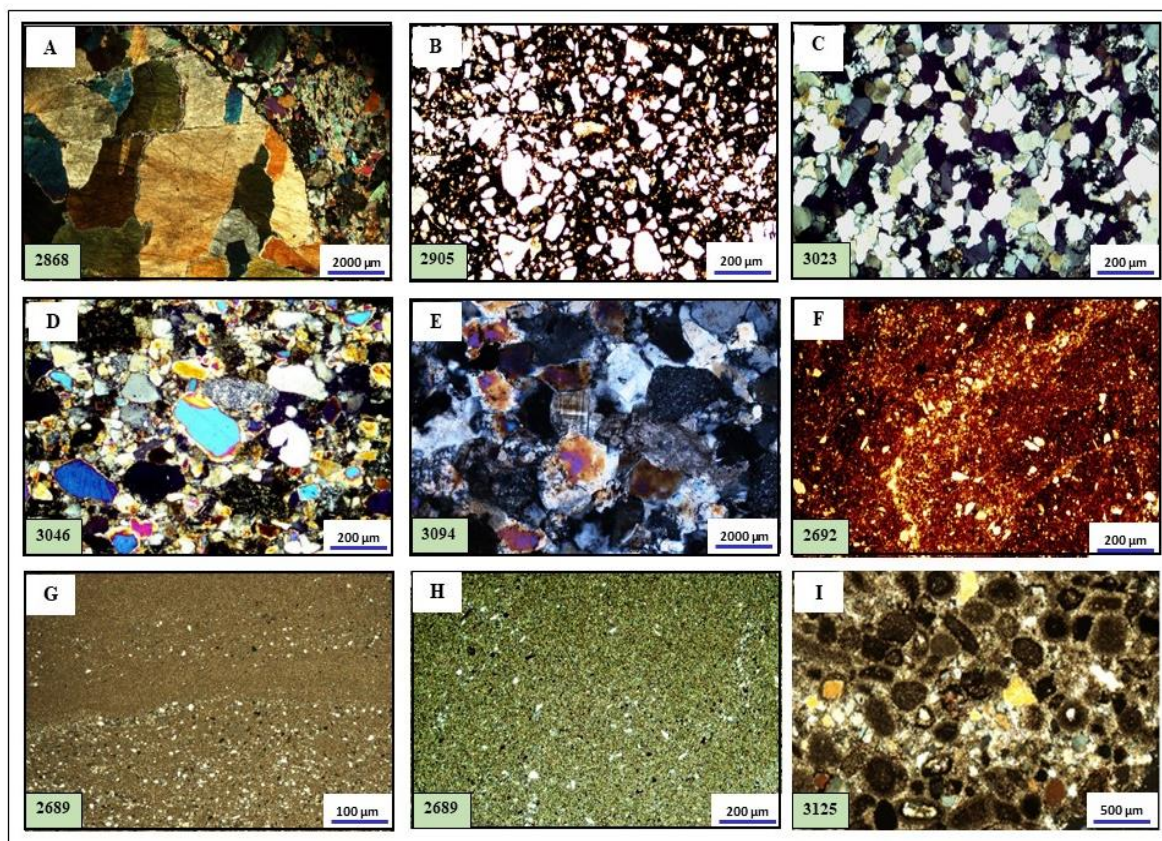
⁴ Sandstone

⁵ Claystone/ Shale

⁶ Flood plain

گردش‌دهی نسبتاً خوب می‌باشد. مهم‌ترین سیمان موجود در این پتروفاسیس، سیمان کلسیتی می‌باشد. گسترش این رخساره در بخش‌های پارانرژی لاگون تا سدهای جزرومدی یا شول می‌باشد.

مطالعه در بخش‌های میانی زون C قابل تفکیک است. ذرات اصلی تشکیل دهنده این پتروفاسیس شامل آئید و کوارتز در یک زمینه دولومیتی و اجزای فرعی شامل پیریت و در مواردی انیدریت هستند (شکل ۳). آئیدها این پتروفاسیس دارای فابریک مماسی و جورشدگی و



شکل ۳. تصاویر میکروسکوپی برای ۵ رخساره رسوبی (پتروفاسیس) شناسایی شده در سازند شوربچه. A: پتروفاسیس میکروکنگلومر، ذرات کوارتز چندبلوری در زمینه ماسه‌ای تا سیلتی (XPL)، B: پتروفاسیس ماسه‌سنگ کوارتزوک (PPL)، C: پتروفاسیس ماسه‌سنگ کوارتز آنارایت (XPL)، D: پتروفاسیس ماسه‌سنگ ساب‌لیتارنایت (XPL)، E: پتروفاسیس ماسه‌سنگ ساب‌آرکوز (XPL)، F: پتروفاسیس رسی قرمز رنگ (PPL)، G: پتروفاسیس رس‌سنگ انیدریتی (XPL)، H: پتروفاسیس دولومادستون ماسه‌ای، ذرات پراکنده کوارتز در زمینه دولومیتی (XPL)، I: پتروفاسیس آئید گرینستون دولومیتی - ماسه‌ای (XPL)

۴-۲- فرآیندهای دیاژنتیکی

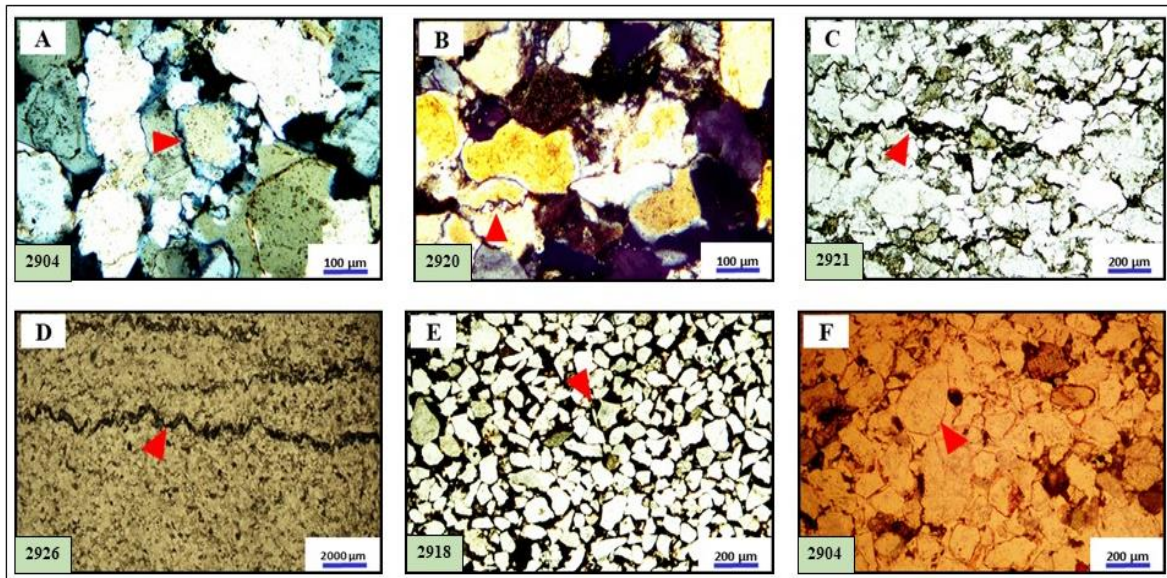
براساس فرآیندهای دیاژنتیک سازند شوربچه در دو رژیم هیدرولیکی؛ متئوریک و فشارشی^۱ به وقوع پیوسته است (وردن و بوری، ۲۰۰۳). فرآیندهای متئوریک محیطی نزدیک به سطح بوده و آب بین محیط و رسوبات سست در تماس است، صورت گرفته‌اند. فرآیندهای متئوریک تا حد زیادی توسط شیمی آب در محیط رسوبی کنترل می‌شوند. برخی از این فرآیندها تا محیط فشارشی ادامه می‌یابند. فرآیندهایی غیر از فرآیندهای اولیه دیاژنتیک در هنگامی

که آب از بخش‌های عمیق‌تر حوضه کپه‌داغ به ماسه‌سنگ‌های شوربچه نفوذ کرده آغاز می‌شوند. در طی فاز متئوریک ماسه‌سنگ‌های شوربچه تحت تأثیر فرآیندهای تراکم، تشکیل اکسید آهن و سیمانی شدن (سیمان کلسیت، دولومیت، سیلیس و انیدریت) قرار گرفته‌اند اما در طی فاز فشارشی فرآیندهایی از قبیل دگرسانی فلدسپات‌ها به کانی‌های رسی، دولومیتی شدن و انحلال سیمان‌های کلسیتی به وقوع پیوسته‌اند.

^۱ Compactional

پوشش‌های اکسید آهن (هماتیتی شدن): ماسه‌سنگ‌های موجود در زون‌های B، D و میان لایه‌های زون C سازند شوربچه در نمونه‌های مغزه و برش‌نازک به علت وجود ذرات هماتیتی در اندازه رس دارای رنگ قرمز بوده که سیمان قرمز اغلب دانه‌های ماسه‌ای را پوشش داده است. در برش‌های نازک سازند شوربچه، این پوشش‌های هماتیتی به رنگ قرمز بسیار تیره در اطراف ذرات و نیز بصورت خط غباری^۲ در مرز بین دانه‌های کوارتز و سیمان رشد اضافی و همچنین به صورت پراکنده در زمینه نمونه‌های حاوی ذرات گل دیده می‌شود (شکل ۴). سیمان اکسید آهن (هماتیتی شدن) در دو رژیم دیاژنتیکی شامل اتوژنتیک و تلوژنتیک تشکیل شده است. وجود اکسید آهن لایه نازک سطح دانه، همراه با منشا آواری این سنگ‌ها نشان‌دهنده رژیم اتوژنتیک می‌باشد، و تکه‌های پراکنده سیمان هماتیتی که بعد از رورشدی کوارتز تشکیل شده است نشان‌دهنده رژیم‌های تلوژنتیک می‌باشد که تشکیل این اکسید در اثر آلتراسیون کانی‌های سیلیکاته آهن‌دار موجود بویژه کلریت، آمفیبول و اپیدوت سبب تولید مقادیر زیادی یون آهن آزاد در آب‌های منفذی شده که پس از اکسیداسیون سبب تولید پوشش‌های هماتیتی را کرده است (موسوی حرمی و برنر، ۱۹۹۳).

فشردگی: فشردگی در اثر خارج شدن آب منفذی و در نتیجه کاهش حجم رسوبات به وجود می‌آید. به صورت نرمال این فرآیند در اثر افزایش بار طبقات بالایی در اثر رسوب‌گذاری سریع و همچنین در طی دفن عمیق اتفاق می‌افتد اما گاهی فشردگی در اثر فعال بودن تکتونیک منطقی به وجود می‌آید. از جمله عوامل مهم در شدت دیاژنز فشردگی وجود کانی‌های اتوژن می‌باشد که با کاهش این کانی‌ها مقدار فشردگی بیشتر و فرآیند سیمانی شدن کاهش پیدا می‌کند و بالعکس (کیم و همکاران، ۲۰۰۷؛ امین‌الاسلام، ۲۰۰۹؛ گردی و همکاران، ۲۰۱۱). فرآیند فشردگی در سازند شوربچه به دو صورت مکانیکی و شیمیایی دیده می‌شود (شکل ۴). فشردگی مکانیکی در سازند شوربچه در زمان رسوب‌گذاری (مرحله اتوژناژن) و انتهای دیاژنز (مرحله انتهای اتوژناژن) صورت گرفته و باعث تغییر شکل دانه‌های شکل‌پذیری (مانند قطعات خرده‌سنگی و فلدسپات‌ها)، شکستگی و همچنین تماس طولی و محذب- مقعر بین دانه‌ها شده است. فشردگی شیمیایی نیز به میزان کم و به صورت انحلال فشاری و استیلولیتی شدن، رگچه‌های انحلالی و سطح تماس مضرسی دانه‌ها در مرحله دیاژنز دفنی (مزودیاژنز) دیده می‌شود.



شکل ۴. تصاویر میکروسکوپی فرآیندهای دیاژنزی در رخساره‌های آواری؛ A و B) سطح تماس مضرسی بین دانه‌های کوارتز در اثر تراکم مکانیکی رسوبات (XPL)؛ C و D) استیلولیت و رگچه انحلالی در اثر تراکم شیمیایی رسوبات (PPL)؛ E) پوشش اکسید آهن به صورت پراکنده در پوشش‌های گل در اطراف دانه‌ها (PPL)؛ F) پوشش اکسید آهن به صورت خط غباری (Dust rim) در مرز بین دانه‌های کوارتز و سیمان رشد اضافی (PPL).

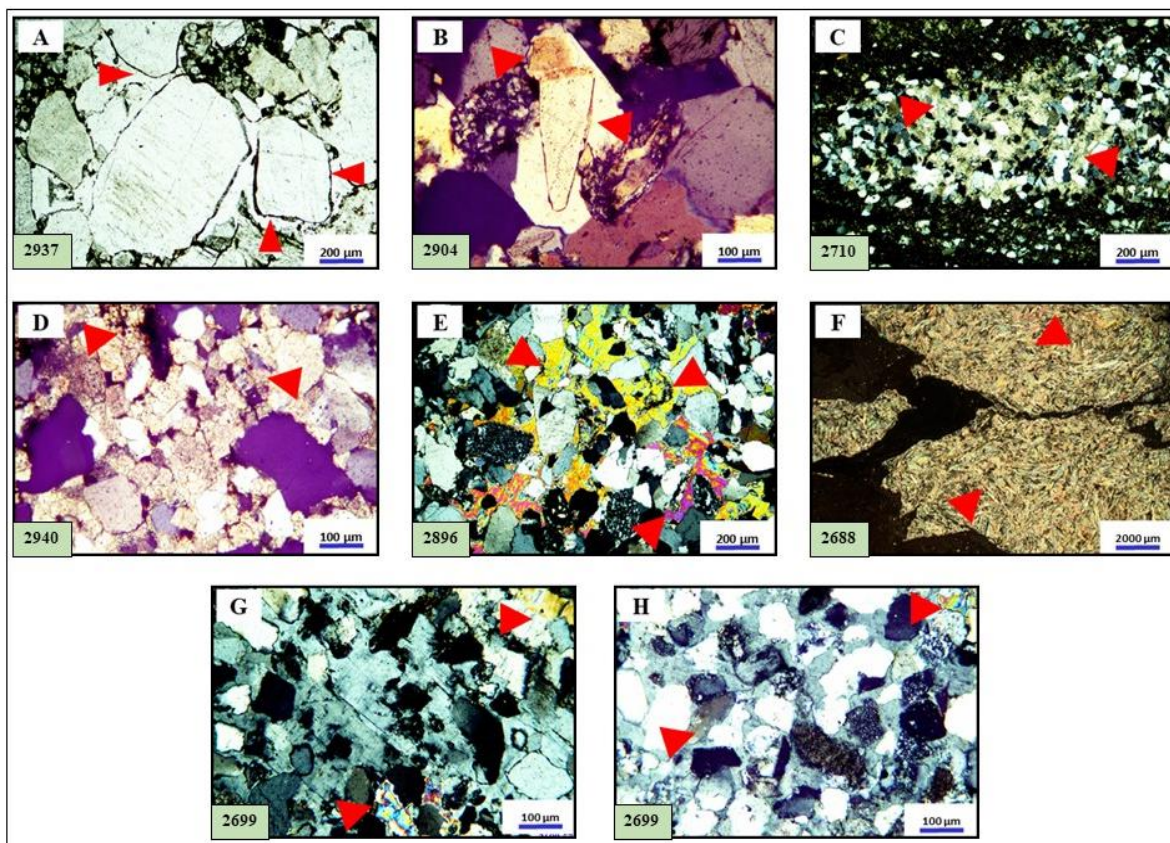
² Dust rim

بیشتر برش‌های نازک مورد بررسی سازند شوربچه سیمان‌های کلسیتی و دولومیتی اصلی‌ترین سیمان کربناته بوده و سیمان سیدریت قابل مشاهده نبود و این سیمان‌ها از مهم‌ترین فرآیندهای دیاژنتیکی تضعیف کیفیت مخزنی (تخریب تخلخل) در سازند شوربچه بودند (شکل ۵). سیمان کلسیتی در سازند مطالعه‌ای در طی دیاژنز اولیه و دفنی و بصورت بلورهای موزاییکی و پویکلوئوپیک تشکیل شده است. توالی ماسه‌های سازند شوربچه قبل از مرحله مزوژنتیک و در اثر فرآیند تراکم تحت فرآیند تولید سیمان کلسیتی بوده و گاهاً باعث تشکیل ماسه‌سنگ‌هایی با میزان بسیار کم سطح تماس دانه‌ها شده‌اند. رسوب اولیه سیمان کلسیتی در توالی ماسه‌سنگ سازند شوربچه در ابتدا توسط آب‌های جوی (دی‌اکسیدکربن و یون هیدروژن) کنترل می‌شود. منشا دی‌اکسیدکربن برای تشکیل سیمان کلسیتی در اثر اکسیداسیون مواد آلی رسوبات رودخانه‌ای می‌باشد (موسوی حرمی و برنر، ۱۹۹۳). سیمان‌های کلسیتی که طی مراحل فشرده‌گی احتمالاً از آب‌های اشباع از کلسیتی در رژیم مزوژنتیک حاصل شده است که به علت دگرسانی سنگ‌های حاوی آلومینوسیلیکات‌های کلسیم‌دار تشکیل شده است.

سیمان انیدریتی: سیمان‌های انیدریتی در سازند شوربچه به صورت پرکننده حفرات و نیز در برخی زون‌ها به ویژه در رخساره‌های گل‌سنگی به صورت نودول‌های انیدریتی قابل مشاهده است. نودول‌های انیدریتی به صورت بلورهای ریز و درهم بافته با جهت‌گیری تصادفی است که اندازه بلورها از چند ده میکرون تا چند صد میکرون و حتی گاه در حد سانتی‌متر متغیر است (شکل ۵). میزان غلبه این سیمان به ویژه در رخساره‌های ماسه‌سنگی مشهودتر است. مطالعات پتروگرافی بر روی سازند شوربچه نشان می‌دهد که نهشته شدن انیدریت بصورت مستقیم به دلیل شرایط خاص آن (دما بالا، شوری و خشکی شدید) به دلیل گسترش سیستم رودخانه‌ای در زمان نفوکومین در بخش کپه‌داغ وجود نداشته است. منشا یون سولفات سیمان انیدریتی احتمالاً گل‌سنگ‌های ژپسی بین‌لایه‌ای در توالی‌های ماسه‌سنگی می‌باشد، در نتیجه در سازند شوربچه ابتدا ژپس از آب‌های غنی از سولفات کلسیم تشکیل شده و سپس در طی دفن عمیق‌تر و در مرحله مزوژنتیک و بالا رفتن دما و در اثر از دست دادن آب به انیدریت تبدیل شده است (موسوی حرمی و برنر، ۱۹۹۳).

سیمان سیلیسی: سیمان سیلیسی ساده‌ترین نوع سیمان‌ها از نظر کانی‌شناسی می‌باشد اما در شکل‌های بسیار متنوعی تشکیل و مشاهده می‌شوند. از عمده‌ترین سیمان‌های سیلیسی قابل مشاهده در سازند مورد مطالعه سیمان کوارتزی رشد ثانویه می‌باشند (شکل ۵). سیمان سیلیسی بصورت رشد ثانویه با ضخامت تقریباً یکسان و به صورت هم‌محور با محورهای نوری ذره مرکزی بر روی ذرات تخریبی کوارتز تشکیل شده است (واو، ۱۹۷۱؛ الغالی و همکاران، ۲۰۰۶؛ گردی و همکاران، ۲۰۱۱). سیمان سیلیسی در محیط اولیه دفن (مرحله ائودیاژنز) در سازند شوربچه نهشته شده و به طور نسبی و یا کامل فضاهای خالی بین دانه‌ها را پر کرده‌اند اما در مقایسه با سیمان‌های کربناته گسترش کمتری را دارد، بطور معمول سیمان‌های سیلیسی پس از تشکیل سیمان‌های هماتیتی و کربناته پرکننده حفرات تشکیل شده است و همچنین در ماسه‌سنگ‌های دانه‌درشت و کنگلومرا سیمان‌های سیلیسی هم‌محور گسترش بیشتری دارد. سیلیس موجود در سازند شوربچه تحت تاثیر منشاء داخلی و خارجی بوده است، تشکیل این نوع سیمان معمولاً از فشرده‌گی شیمیایی و انحلال دانه‌های کوارتز، سیلیس آزاد شده در اثر انحلال توسط آب‌های زیرزمینی، سیلیس آزاد شده در اثر فشرده‌گی شیل‌ها و همچنین تبدیل کانی‌های رسی اسمکتیت به ایلیت و دگرسان شدن فلدسپات‌ها، خرده‌های سنگی ولکانیک و کانی‌های رسی تشکیل شده است (گلوپاس و همکاران، ۲۰۰۰؛ هندری و تروین، ۱۹۹۵). همچنین گاه منشا سیلیس خارجی بوده و ناشی از ورود شورابه‌هایی با میزان بالای سیلیس به منطقه می‌باشد (وردن و مراد، ۲۰۰۰). در سازند شوربچه سیمان سیلیسی در مراحل ائوژنتیک بوده و به عبارت دیگر در تاریخچه دیاژنتیک این سازند تشکیل سیمان سیلیسی مقدم بر فشرده‌گی و بعد از دگرسان شدن کانی‌های رسی و ایجاد پوشش‌های اکسید آهن صورت گرفته است، لذا انحلال شیمیایی فشرده‌گی دانه کوارتز نمی‌تواند منشا تامین سیلیس مورد نیاز برای این نوع سیمان‌ها باشد (موسوی حرمی و برنر، ۱۹۹۳)، بنابراین منشاء دیگر سیمان سیلیسی سازند را تحت تاثیر قرار داده است.

سیمان کربناته: سیمان کربناته شامل انواع سیمان‌ها کلسیت، دولومیت و سیدریت هستند و در سنگ‌های آواری در طی رژیم ائوژنتیک و یا مزوژنتیک تشکیل می‌شوند. در



شکل ۵. تصاویر میکروسکوپی فرآیندهای دیازنزی در رخساره‌های آواری؛ (A و B) سیمان رشد اضافی کوارتز، در تمامی تصاویر وجود پوشش هماتیتری اطراف دانه‌های کوارتز مشخص است (A: PPPL, B: XPL)؛ (C و D) سیمان کلسیتی به صورت‌های موزاییکی و پویکیلو توپیک (XPL)؛ (E) سیمان انیدریتی به صورت پرکننده حفرات (XPL)؛ (F) نودول‌های انیدریتی در رخساره گل‌سنگی (XPL)؛ (G و H) سیمان ژیبس به صورت پویکیلو توپیک (XPL).

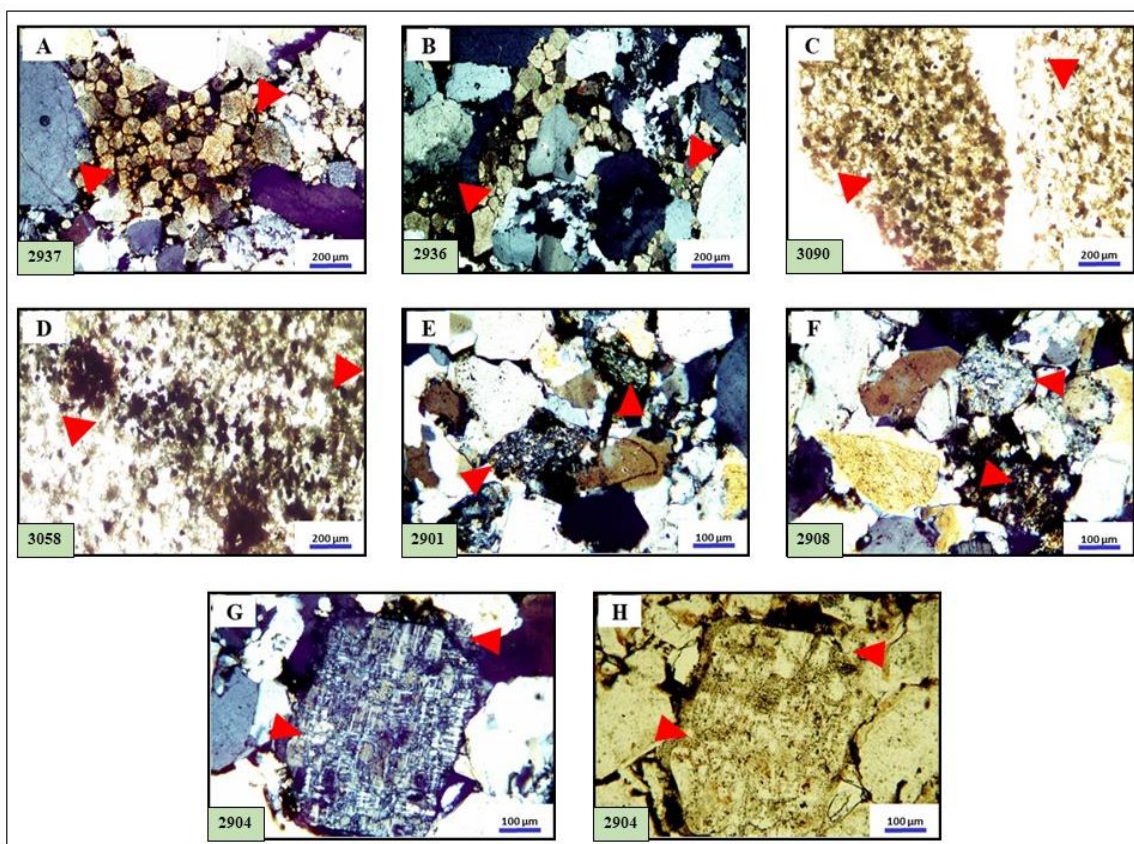
تشکیل پیریت: در برش‌های مورد مطالعه سازند شوربچه، کانی پیریت به صورت بلورهای ریز و پراکنده قابل مشاهده می‌باشد. بطور کلی تشکیل این نوع پیریت‌ها در هر دو مرحله اتوژنتیک و مزوژنتیک تشکیل می‌شود و اغلب کمتر از یک درصد حجم ماسه‌سنگ‌ها را شامل می‌شوند (شکل ۶). فرم اتوژنتیک آن‌ها معمولاً به صورت کریستال‌های خوشه‌ای بوده و در نتیجه احیای میکروبی ذرات آهن تخریبی و وجود سولفات در آب‌های منفذی و در طی مراحل اولیه دفن پدید می‌آید (لاو، ۱۹۶۷). در مقابل پیریت‌های مرحله مزوژنتیک معمولاً دارای بلورهای درشت و نیمه‌شکل‌دار هستند. این پیریت‌ها یکی از آخرین سیمان‌هایی می‌باشند که همراه با احیای هماتیت و در حضور هیدروکربن‌ها تشکیل می‌شوند (المور و همکاران، ۱۹۸۷).

دگرسانی فلدسپات‌ها و سرسیتی شدن: حجم کمی از ماسه‌سنگ‌های شناسایی شده در سازند شوربچه دارای انواع فلدسپات بوده و در برخی موارد رخساره‌های سنگی

دولومیتی شدن و سیمان‌های دولومیتی: سیمان‌های دولومیتی در ماسه‌سنگ‌ها سازند شوربچه معمولاً از بلورهای ریز رومبوندری پرکننده فضای خالی تا موزاییک‌های درشت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار متغیر می‌باشد. بلورهای رومبوندری در برخی نمونه‌ها حفرات را به طور کامل پر کرده است. در بعضی نمونه‌ها بلورهای دولومیت در اندازه اسپار و میکرواسپار به طور کامل زمینه ماسه‌سنگ‌ها را تشکیل می‌دهند به طوری که تماس بین دانه‌ها در آن‌ها بسیار کم شده و در برخی موارد تبدیل به دولوستون ماسه‌ای می‌شود (شکل ۶). منیزیم مورد نیاز برای تشکیل دولومیت‌ها می‌تواند از دگرسانی کانی‌های رسی و یا انحلال سیلیکات‌های غنی از منیزیم و یارس‌های اتوژنتیک (مرحله مزوژنتیک) سرچشمه گرفته باشد (تاگر، ۲۰۰۹)، همچنین تمرکز بالای یون‌ها در اثر تبخیر آب‌های جوی در سطح در مناطق خشک و نیمه‌خشک می‌تواند به عنوان یک منبع اضافی برای تولید یون‌های منیزیم و کربنات عمل کند.

ایلیت صورت می‌گیرد. بسته به اینکه دانه‌های فلدسپات پتاسیم و پلاژیوکلازها است هر کدام به مقادیر مختلفی دگرسان شده و منجر به تولید رس‌های درجا می‌شوند. دانه‌های پلاژیوکلاز به دلیل عدم ثبات شیمیایی به شدت دگرسان شده در حالی که ارتوکلازها و میکروکلین‌ها به علت پایداری شیمیایی بیش‌تر به صورت محدود دگرسان می‌شوند. فرآیند دگرسانی فلدسپات‌ها در سازند شورپیجه بیش‌تر در طی دفن (مزوژنتیک) و در هنگام تماس با آب‌های رژیم دفنی دگرسان شده است (موسوی‌حرمی و برنر، ۱۹۹۳).

شناسایی شده را به سمت ساب‌فلدسپاتیک آرنایت و یا ساب‌آرکوز می‌برد، لذا دگرسانی فلدسپات‌های موجود در مرحله دفن عمیق (مزوژنتیک) صورت می‌گیرد (شکل ۶). بلورهای فلدسپات در طی حمل و نقل نیز دچار دگرسانی می‌شوند که میزان این دگرسانی بستگی به انرژی محیط و نیز آب و هوا دارد بطور مثال فلدسپات‌های محیط رودخانه‌ای نسبت به محیط ساحلی معمولاً حفظ‌شدگی بیش‌تری نشان می‌دهند (ماک، ۱۹۷۸). بطور کلی دگرسانی فلدسپات‌ها توسط اسید کربنیک و توسط جانمایی کانی‌های رسی، نظیر سرسیت، کائولینیت و



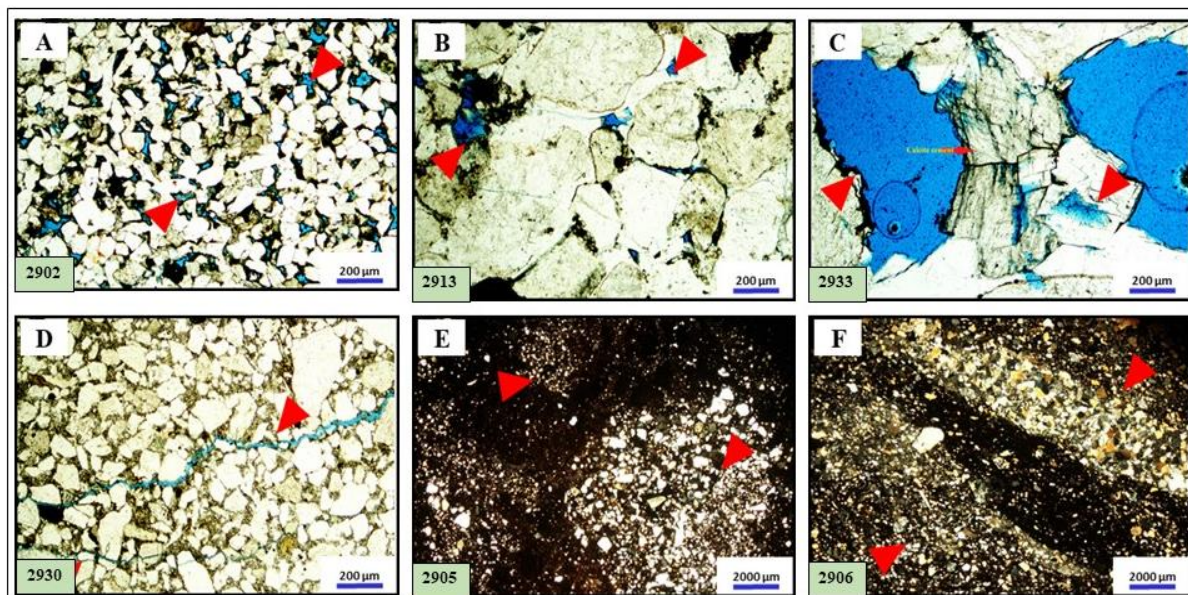
شکل ۶. تصاویر میکروسکوپی فرآیندهای دیازنی در رخساره‌های آواری؛ A و B) بلورهای سیمان دولومیتی پرکننده حفرات، وجود رنگدانه‌های همانیتی در شکل A مشخص است (XPL)؛ C و D) بلورهای ریز پیریت در سازند شورپیجه (PPL)؛ E و F) دگرسانی فلدسپات‌ها به صورت سرسیتی شدن (XPL)؛ G و H) دگرسان شدن دانه میکروکلین در مرکز تصویر (G: XPL, H: PPL).

آب‌های اسیدی احتمالاً حاصل از دگرسانی مواد آلی موجود در گل‌های دریایی و آزاد کردن دی‌اکسیدکربن در آب‌های سازندی قبل از تولید گاز می‌باشند (موسوی‌حرمی و برنر، ۱۹۹۳). انحلال انیدریت نیز می‌تواند تا حد کمی در تولید تخلخل ثانویه موثر باشد اما شواهد خاصی مبنی بر این مطلب در مقاطع مورد مطالعه به ندرت مشاهده شده است. لازم به ذکر است که تخلخل ناشی از شکستگی نیز به

انحلال: تخلخل ثانویه در سازند شورپیجه شامل خلل و فرج ناشی از انحلال سیمان‌های کربناته می‌باشد. اندازه بزرگ این خلل و فرج و حضور بقایای سیمان‌های کربناته در آن‌ها بیانگر این مطلب است که این فضاهای خالی در نتیجه انحلال سیمان‌های کربناته تولید شده‌اند. انحلال کلسیت در زمانی که این ماسه‌سنگ‌ها در معرض آب‌های اسیدی در رژیم فشارشی قرار گرفته‌اند، صورت گرفته است. این

آشفته‌گی زیستی: پدیده آشفته‌گی زیستی یا بهم‌ریختگی رسوبات توسط موجودات زنده در سازند شوربجه و غالباً در رخساره‌های گلی و ریزدانه و گل‌پشتیبان مشاهده می‌شوند (شکل ۷). پدیده آشفته‌گی زیستی می‌تواند اثر مثبت بر روی خصوصیات مخزنی بویژه تراوایی مخزن داشته باشد (پمبرتون و جینگراس، ۲۰۰۵).

ندرت در برش‌های مورد مطالعه مشاهده شده است. بطور کلی انحلال و تشکیل تخلخل ثانویه در سازند شوربجه را می‌توان به دو نوع کنترلی توسط فابریک (قالبی، فنسترال) و غیرکنترلی توسط فابریک (انحلال و رگه) تقسیم کرد. احتمال تشکیل انحلال در هر سه رژیم آئوژنتیک، مزوژنتیک و تلوژنتیک وجود دارد (شکل ۷).



شکل ۷. تصاویر میکروسکوپی فرآیندهای دیازنزی در رخساره‌های آواری؛ (A) تخلخل‌های انحلالی و بین‌دانه‌ای (PPL)؛ (B) تخلخل بین‌دانه‌ای حفظ شده در بین سیمان‌های کوارتزی رشد اضافی (PPL)؛ (C) بقایای سیمان کلسیتی در خلل و فرج نمونه (PPL)؛ (D) شکستگی (PPL)؛ (E) و (F) آشفته‌گی زیستی در رخساره‌های گل‌سنگی (XPL).

دولومیتی شده، فشردگی شیمیایی (استیلولیت و رکچه انحلالی) و بصورت موضعی زیست‌آشفته‌گی (افزایش تراوایی) باعث افزایش کیفیت مخزنی شده است.

۴-۴- واحد جریان هیدرولیکی

هر واحد جریان به حجمی از مخزن گفته می‌شود که در یک یا چند ویژگی مخزنی با هم ترکیب شده و در آن واحد جریان با هم در ارتباط و با واحدهای دیگر کاملاً متفاوت هستند (تیاب و دونالدسون، ۲۰۰۴). روش‌های مختلفی برای مشخص کردن واحد جریان وجود دارد که شاخص زون جریان یکی از بهترین مدل‌ها برای تفکیک این واحدهای جریانی هستند خود شاخص زون جریان تابعی از پارامترهای شاخص کیفیت مخزنی^۱ است. زون‌بندی مخزن با استفاده از شاخص زون جریان، و شناسایی واحدهای جریان برای ارزیابی کیفیت مخزنی

۴-۳- توالی پارائنتیکی

اگر چه تعیین دقیق نوع و زمان فرآیندهای دیائنتیکی با محیط‌های دیائنتیکی غیر ممکن است، اما براساس ارتباطات بافتی و مطالعات دقیق پتروگرافی می‌توان این عدم قطعیت را به حداقل رساند. سنگ‌های آواری - کربناته سازند شوربجه حوضه رسوبی کپه‌داغ، تحت تاثیر فرآیندهای دیائنتیکی در هر سه محیط آئوژنتیک، مزوژنتیک و تلوژنتیک قرار گرفته است. در جدول ۱ بصورت خلاصه توالی پارائنتیکی رسوبات سیلیسی آواری - کربناته در سازند شوربجه در ناحیه مورد مطالعه و تاثیر آن بر کیفیت مخزنی (تخلخل) آورده شده است. براین اساس فرآیندهای دیائنتزی شامل فشردگی (فیزیکی)، تشکیل انواع سیمان‌ها (سیلیسی، کربناته و انیدریتی)، دگرسانی فلدسپان/سرسیتی شده و پیریتی شدن به عنوان فرآیندهای تخریب کیفیت مخزنی و فرآیندهای انحلال و

¹ Reservoir Quality Index

در این رابطه FZI : شاخص زون جریان، RQI شاخص کیفیت مخزن و PMR : تخلخل نرمال شده، K : تراوایی (میلی‌داریسی) و ϕ : تخلخل مفید (درصد) می‌باشد. همانطوری که در جدول ۲ آمده است براساس روش شاخص زون جریان برای سازند شوربجه چهار واحد جریان مختلف تعریف گردید، که با افزایش شاخص زون جریان کیفیت مخزنی افزایش پیدا می‌کند. واحد جریان اول با تخلخل ۰/۰۶ و تراوایی ۰/۴۲ میلی‌داریسی بدترین افق مخزنی و واحد جریان چهارم با تخلخل ۰/۰۳ و تراوایی ۲۷/۴۵ میلی‌داریسی بهترین افق مخزنی در توالی رسوبی سازند شوربجه را به وجود آورده است (شکل‌های ۸ و ۹).

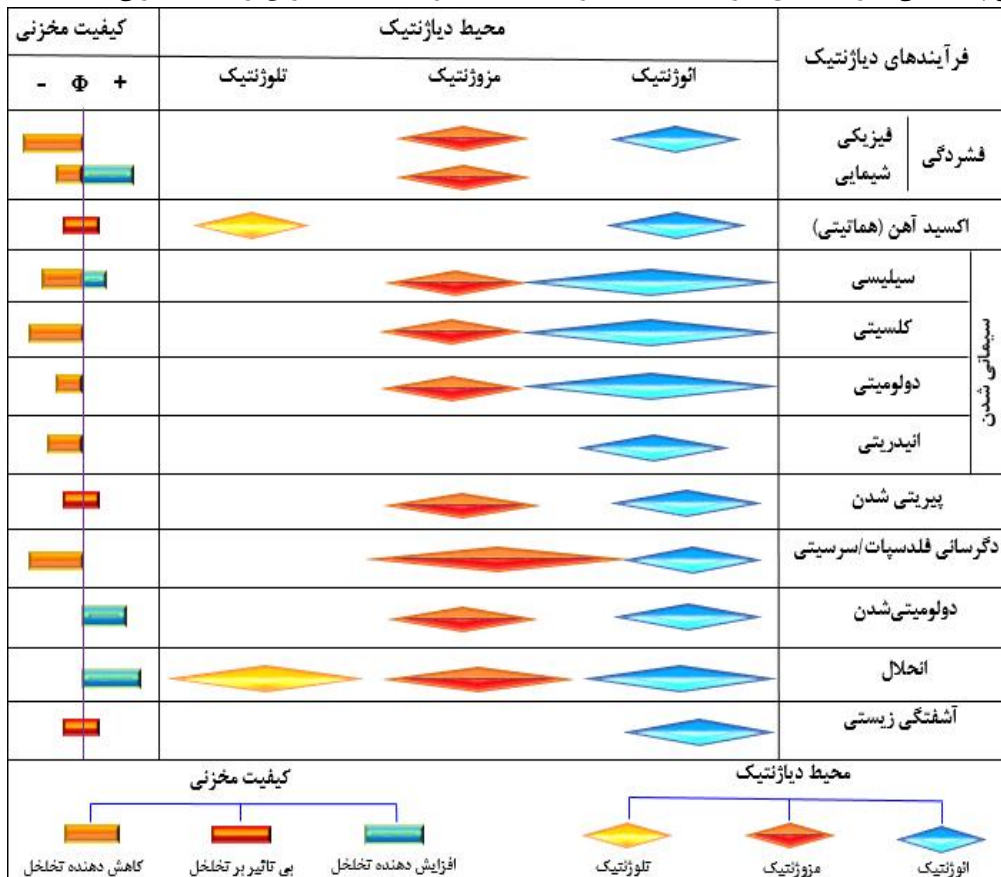
براساس روابط تخلخل-تراوایی استفاده می‌شود (البدلوی و ناصر، ۲۰۱۳). آمفوله برای تعریف گونه سنگی واحدهای جریان هیدرولیکی را براساس شاخص زون جریان تعریف کرد و خود شاخص زون جریان را طبق معادله (۱) و از نسبت شاخص کیفیت مخزن (RQI) به نسبت تخلخل به سنگ زمینه (PMR) تعریف کرد (آمفوله ۱۹۹۳).

$$FZI = \frac{RQI}{PMR} \quad \text{معادله ۱}$$

$$RQI = 0.0314 \times \sqrt{\frac{K}{\phi}} \quad \text{معادله ۲}$$

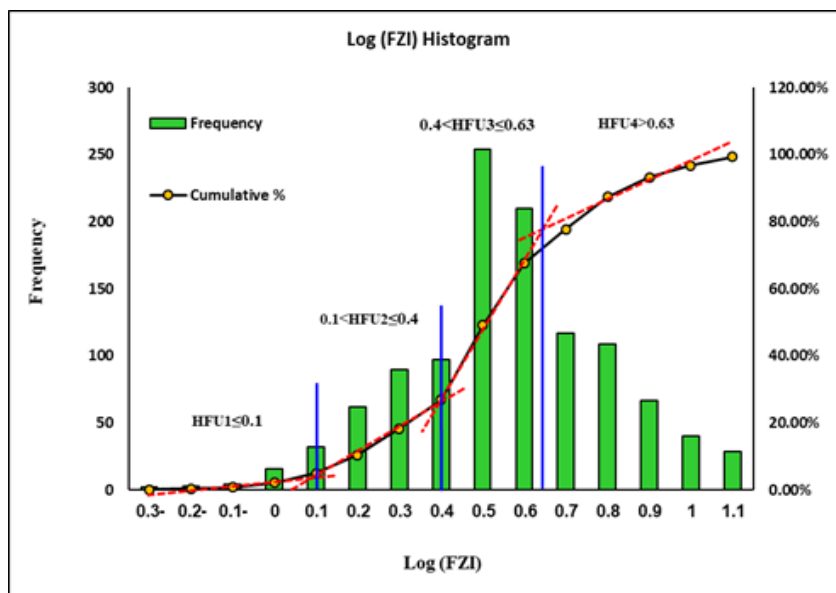
$$PMR = \frac{s}{s-1} \quad \text{معادله ۳}$$

جدول ۱. توالی پاراژنتیکی رسوبات آواری- کربناته در سازند شوربجه در ناحیه مورد مطالعه و تاثیر آن بر کیفیت مخزنی (تخلخل) سازند شوربجه

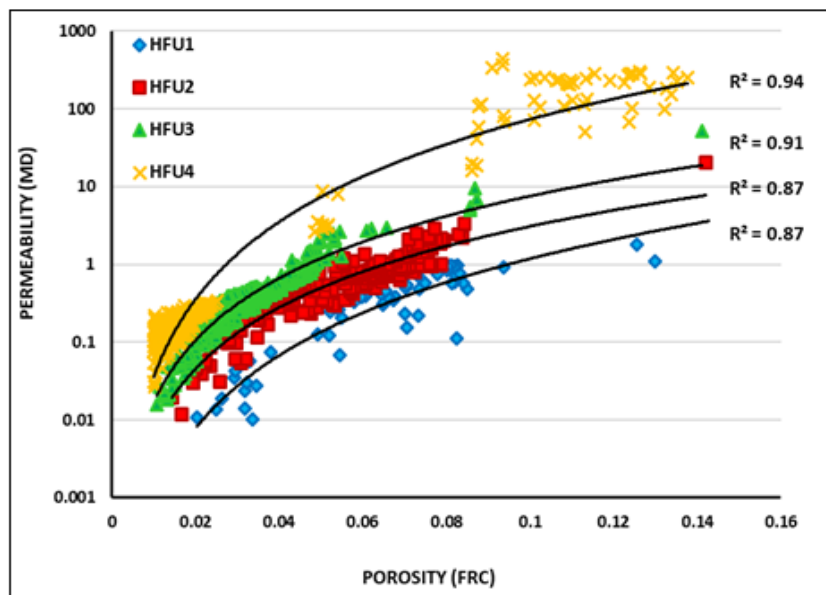


جدول ۲. میانگین تخلخل، تراوایی و رنج لگاریتم شاخص زون جریان برای هر واحد جریان هیدرولیکی

دامنه لگاریتم شاخص زون جریان	میانگین شاخص زون جریان	میانگین شاخص کیفیت مخزن	میانگین تخلخل	میانگین تراوایی	Log FZI (Domain)



شکل ۸. نمودار احتمالی لگاریتم شاخص زون جریان و آنالیز هیستوگرام، که براساس نقاط شکست چهار واحد جریان هیدرولیکی برای سازندهای شوربچه تفکیک گردید.



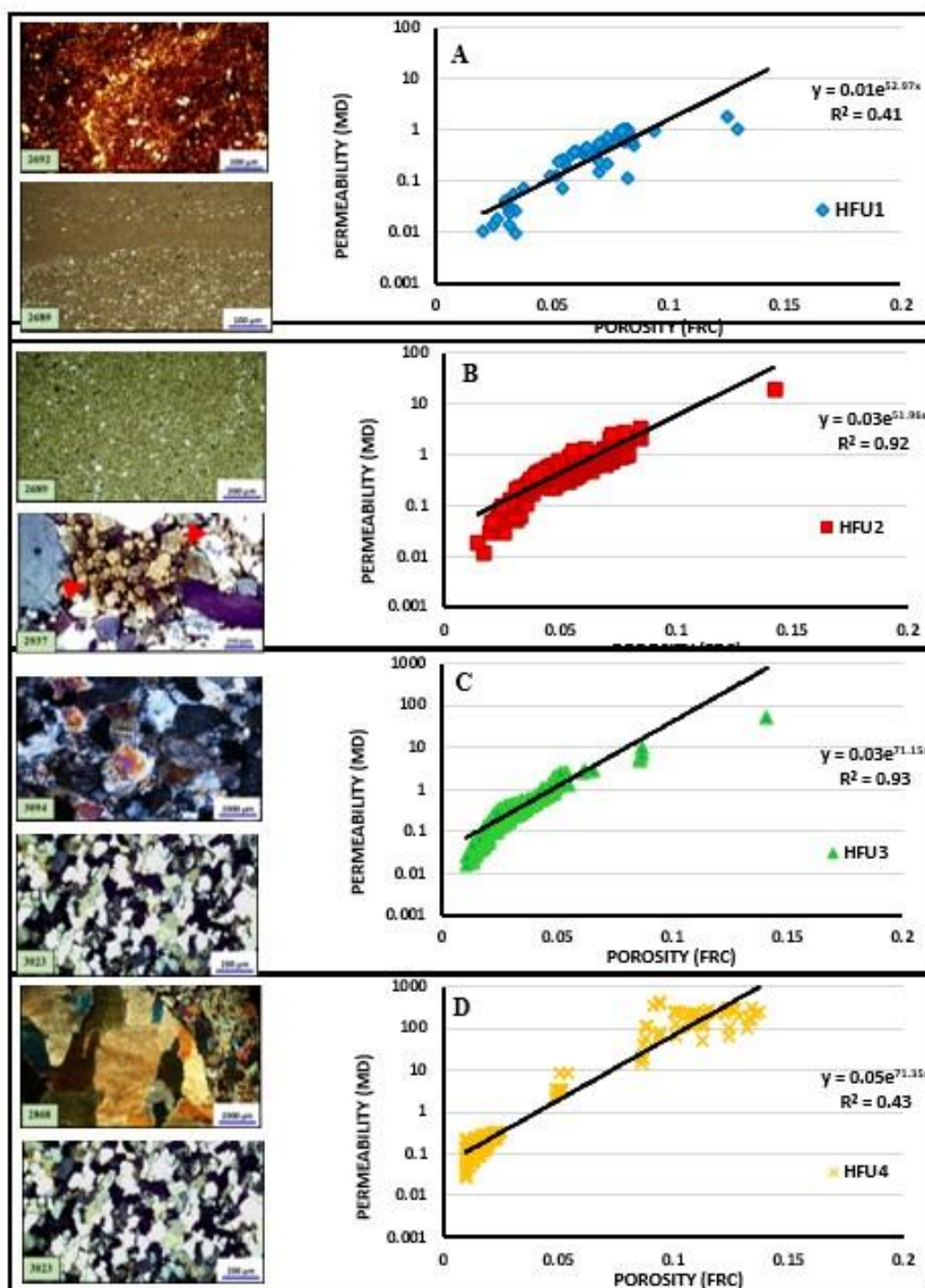
شکل ۹. ترسیم نمودار تخلخل و تراوایی واحدهای جریانی تفکیک شده سازند شوربچه.

دیازنز می‌توانند خواص جریانی یکسانی از نظر ظرفیت ذخیره (تخلخل) و ظرفیت جریان (تراوایی) داشته باشند. در نتیجه عوامل دیازنتیکی مخرب مانند سیمان شدن، رفتار سنگ‌های دانه غالب مشابه گل‌سنگ‌ها ریزدانه است یا گل‌سنگ‌ها می‌توانند به دلیل فرآیند انحلال، تخلخل و تراوایی بالایی از خود نشان دهند. با این حال، رخساره‌های دیازنتیکی می‌تواند راه حل خوبی برای غلبه بر چنین ناهماهنگی‌ها باشد. بر این اساس، ما تمام تلاش خود را برای یافتن معادل‌های مناسب از ریزرخساره‌ها برای هر نوع سنگ مخزنی انجام دادیم. براین اساس واحد جریان یک

در این مطالعه سعی بر آن است تا بین انواع سنگ‌های مبتنی بر واحد جریان هیدرولیکی و رخساره‌های رسوبی (پتروفاسیس) حاصل از مطالعه پتروگرافی برش‌های نازک ارتباط برقرار شود. در واقع، یافتن ریزرخساره‌های معادل مناسب برای هر نوع سنگ مخزن منفرد دشوار است. به عنوان مثال، هر نوع سنگ مخزنی می‌تواند با همه ریزرخساره‌های رسوبی در ارتباط باشد. این عدم تطابق از این واقعیت ناشی می‌شود که نقش‌های دیازنتیکی رفتار مخزن را پیچیده می‌کند. به عنوان مثال، سنگ دانه اوئید و گل‌سنگ دو ریزرخساره متفاوت هستند، اما به دلیل

گرفته است، این واحد جریانی به دلیل کیفیت مخزنی بسیار ضعیفی که دارند اغلب در ارتباط با رخساره‌های غیرمخزنی سازند شوربچه شامل رس‌سنگ‌های قرمز زون A و E و بصورت متناوب در زون های C و D و رس‌سنگ انیدریتی غالباً در زون A و C گسترش پیدا کرده است (شکل ۱۰-A).

(HFU1) با داشتن تخلخل غیرمفید بالا و تراوایی خیلی ضعیف عمدتاً می‌تواند در ارتباط با رخساره‌های رس‌سنگ/شیل (رس‌سنگ قرمز و رس‌سنگ انیدریتی) باشد. این واحد جریان تحت تاثیر فرآیندهای دیازنزی مخرب کیفیت مخزنی مانند سیمان‌های انیدریتی (نودول‌های انیدریتی) و کلسیتی و همچنین تشکیل پوشش هماتیستی (اکسید آهن) و آشفستگی زیستی قرار



شکل ۱۰. ارتباط واحدهای جریان هیدرولیکی، رخساره‌رسوبی و فرآیند دیازنزی در توالی سازند شوربچه

مخزنی این واحد جریان ایجاد نکرده است، در مقابل به دلیل اندازه بزرگ دانه و تخلخل بین‌دانه‌ای و مرتبط و تاثیر فرآیند انحلال (کربناته) کیفیت مخزنی شدت افزایش یافته است. واحد جریان چهار (HFU4) با کیفیت مخزنی خیلی خوب بیشتر در زون‌های مخزنی B (اغلب قاعده)، D و میان لایه زون C گسترش دارد (شکل ۱۰-D). در شکل ۱۱ ارتباط واحدهای جریان با نمودارهای پتروفیزیکی و نتایج ارزیابی سازند در دو چاه میدان ترسیم شده است.

نتیجه‌گیری

مطالعات انجام شده بر روی برش‌های نازک میکروسکوپی تهیه شده از مغزه‌ها و خرده‌حفاری، پلاگ تخلخل و تراوایی آنالیز مغزه و نمودارهای چاه‌پیمایی سازند شورپیجه برای مشخص کردن تاثیر رخساره و فرآیندهای دیاژنزی بر واحدهای جریان منجر به نتایج زیر شد:

با بررسی‌های پتروگرافی ۵ رخساره رسوبی (پتروفاسیس) با مشخصات بافتی و ترکیبی شامل میکروکنگلومر، ماسه‌سنگ، رس‌سنگ/شیل، دولومادستون ماسه‌ای و آئیدگرنستون دولومیتی ماسه‌ای در ارتباط با محیط‌های رسوبی بخش بالایی پهنه جزرومدی، پهنه جزرومدی، لاگون، روخانه بریده بریده شامل پشته‌های طولی، و رودخانه مئاندری (دشت سیلابی و دریاچه شاخ گاوی) شناسایی گردید.

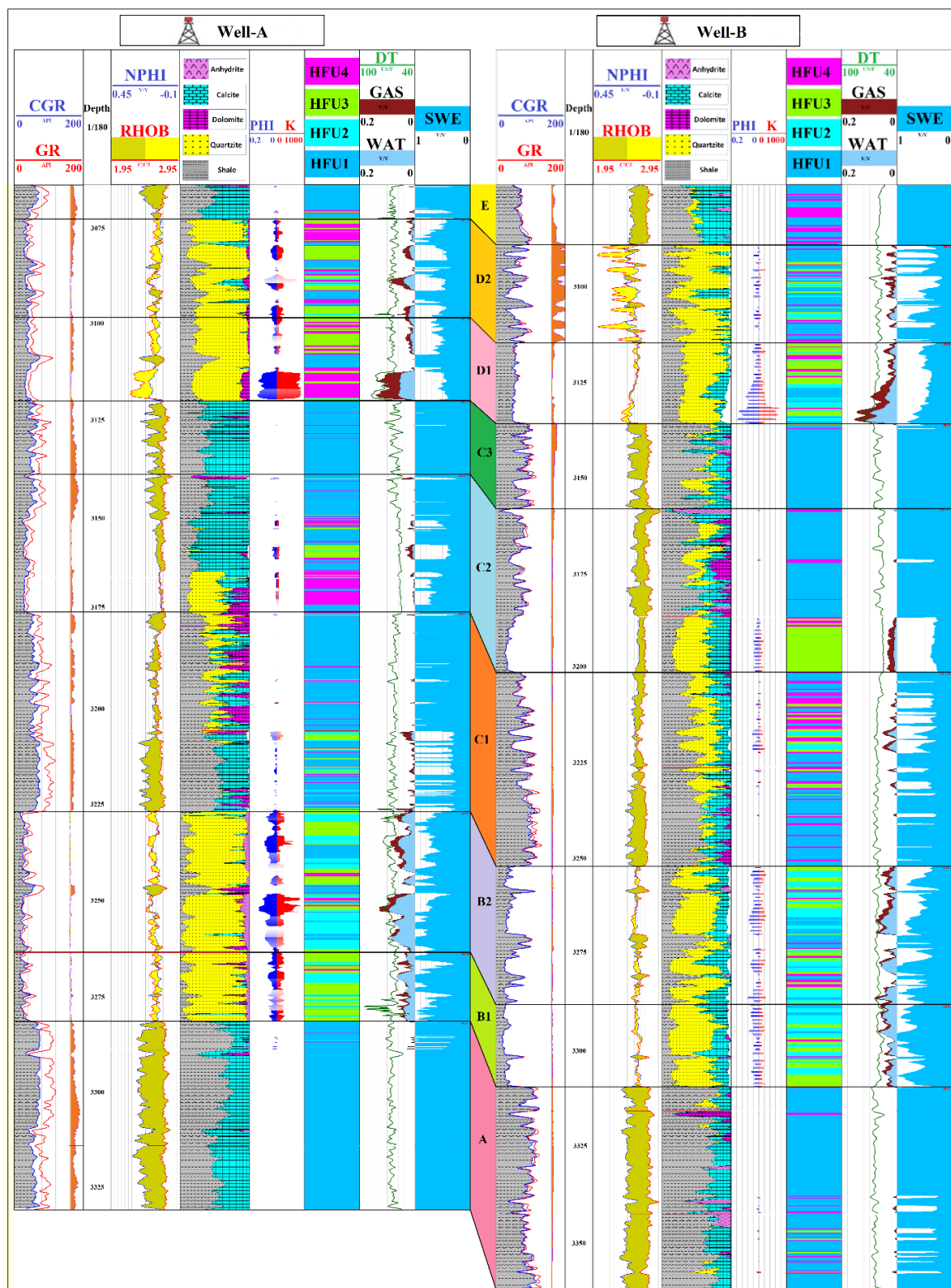
فرآیندهای دیاژنزی در سازند شورپیجه نقش دوگانه بر روی کیفیت مخزنی داشته و باعث تضعیف و بهبود کیفیت مخزنی شده است. فرآیندهای دیاژنزی مختلفی مانند فشردگی (فیزیکی)، تشکیل انواع سیمان‌ها (سیلیسی، کربناته و انیدریتی)، دگرسانی فلدسپات/سرسیتی شدن و پیریتی شدن به عنوان فرآیندهای تخریب کیفیت مخزنی و فرآیندهای انحلال (غالباً) و تا حدودی دولومیتی شده، فشردگی شیمیایی (استیلولیت و رگچه انحلالی) و زیست‌آشفنگی (افزایش تراوایی) باعث افزایش کیفیت مخزنی شده است اما در کل به دلیل آواری بودن سازند شورپیجه، کیفیت مخزنی آن عمدتاً توسط بافت رسوبی اولیه کنترل می‌شود و برعکس مخازن کربناته کمتر تحت تاثیر فرآیندهای دیاژنزی می‌باشند.

براساس داده تخلخل و تراوایی حاصل از آنالیز مغزه با استفاده از روش شاخص زون جریان (FZI) و براساس نقاط شکست بر روی نمودار احتمال نرمال و آنالیز هیستوگرام

واحد جریان دو (HFU2) با داشتن تخلخل و تراوایی متوسط دارای کیفیت مخزنی بهتر از واحد جریان یک می‌باشد. این واحد جریان با رخساره دولومادستون ماسه‌ای که اغلب از زمینه دولومیکرایتی با ذرات ماسه دانه‌ریز تا متوسط جورشدهگی پایین و زاویه‌دار در ارتباط است. این واحد جریان تحت تاثیر فرآیندهای دیاژنزی مخرب کیفیت مخزنی شامل سیمان کربناته (کلسیتی و دولومیتی) و فرآیند دولومیتی شدن به عنوان افزایش‌دهندی کیفیت مخزنی قرار گرفته است در نتیجه نسبت به واحد جریان سه (HFU3) دارای میانگین تراوایی تاحدودی بالاتر می‌باشد. واحد جریان دو (HFU2) با کیفیت مخزنی متوسط، بیش‌تر در بخش‌های از زون C، ابتدای زون E، انتهای زون A گسترش یافته است (شکل ۱۰-B). واحد جریان سه (HFU3) با داشتن تخلخل کمتر از واحد جریان دو (HFU2) و تراوایی متوسط کیفیت مخزنی خوبی را ایجاد کرده است. این واحد جریان با رخساره ماسه‌سنگ (ساب‌لیتارنایت و کوارتزوک) در ارتباط است. در این واحد جریان فرآیند دیاژنزی مخرب و افزایش دهنده کیفیت مخزنی بصورت همزمان رخ داده است. فرآیند دیاژنزی مخرب کیفیت مخزنی این واحد جریان شامل فرآیند فشردگی فیزیکی (متراکم کننده) و سیمان سیلیسی و کلسیتی، بصورت پراکنده نودول‌های انیدریتی و همچنین دگرسانی فلدسپات و سرسیتی شدن می‌باشد. فرآیندهای مانند تشکیل فشردگی شیمیایی و تشکیل رگچه انحلالی و همچنین انحلال موضعی سیمان کربناته سبب افزایش کیفیت مخزنی شده است، بطور کلی این واحد جریان به دلیل دانه غالب بودن و تخلخل‌های بین‌دانه‌ای مرتبط دارای کیفیت مخزنی خوبی در سازند شورپیجه می‌باشد. واحد جریان سه (HFU3) با کیفیت مخزنی خوب بیشتر در زون‌های مخزنی B، D و میان لایه زون C گسترش پیدا کرده است (شکل ۱۰-C). واحد جریان چهار (HFU4) با داشتن تخلخل متوسط و تراوایی بالا بهترین واحد جریان مخزنی سازند شورپیجه را شکل داده است. این واحد جریان با رخساره‌های میکروکنگلومر، آئید گرنستون دولومیتی/ماسه‌ای/مختلط و ماسه‌سنگ‌های کوارتز آرنایتی دانه درشت در ارتباط است. در این واحد جریان فرآیند دیاژنزی مخرب کیفیت مخزنی شامل سیمانی شدن کلسیتی، سیلیسی و انیدریتی خیلی ضعیف عمل کرده است، بطوری که تاثیر شدیدی بر روی تخریب کیفیت

جریانی سوم و چهارم (HFU3، HFU4) با میانگین تخلخل و تراوایی بالا بهترین افق‌های مخزنی سازند شوریجه را تشکیل داده‌اند.

تعداد ۴ واحد جریان هیدرولیکی (HFU) تفکیک گردید. واحد جریان یک و دو (HFU1، HFU2) با تخلخل مفید و تراوایی پایین ضعیف‌ترین کیفیت مخزنی و واحدهای



شکل ۱۱. ترسیم نمودارهای پتروفیزیکی و نتایج حاصل از ارزیابی سازند با واحدهای جریان تفکیک شده در چاه شماره یک و دو (Well-B، Well-A) سازند شوریجه

- (Eds.), Classification of Carbonate Rocks. American Association of Petroleum Geologist Memoir, 1: 108–121.
- El-ghali, M. A. K., Mansurbeg, H., Morad, S., AL-Aasm, I., Ramseyer, K (2006) Distribution of diagenetic alterations in glaciogenic sandstones within a depositional facies and sequence stratigraphic framework: Evidence from the Upper Ordovician of the Murzuq basin, SW Libya. *Sedimentary Geology*, 190: 323-351.
- Elmore, R. D., Engel, M., Crawford, L., Nick, K., Imbus, S. & Sofer, Z (1987) Evidence for a relationship between hydrocarbons and authigenic magnetite, *Nature*, 325: 428-430.
- Embry, A. F., Klovan, J. E (1971) A late Devonian reef tract on northeastern Banks Island Northwest Territories. *Bulletin of Canadian Petroleum Geology*, 19: 730–781.
- Flügel, E (2010) *Microfacies of carbonate rocks, analysis, interpretation and application*. Springer, Berlin, 984 p.
- Folk, R. L (1974) *Petrology of Sedimentary Rocks*. Hemphill Publishing Co., Austin, 170 p.
- Gluyas, J., Garland, C., Oxtoby, N. H., and Hogg, A. J. C (2000) Quartz cement: The Miller's tale, in Worden, R.H., and Morad, S., eds., *Quartz cementation in sandstones*. Special Publication of the International Association of Sedimentologists: Oxford, UK, Blackwell, 29: 1–20.
- Gunter, G. W., Finneran, J. M., Hartmann, D. J., & Miller, J. D (1997) Early determination of reservoir flow units using an integrated petrophysical method. In SPE annual technical conference and exhibition. *OnePetro*.
- Hemond, C (2009) Sediment geochemistry and tectonic setting: Application of discrimination diagrams to early stages of intracontinental rift evolution, with examples from the Okavango and Southern Tanganyika rift basins. *Journal of African Earth Sciences*, 53: 33-44.
- Hendry, J. P., Trewin, N. H (1995) Authigenic quartz microfabrics in Cretaceous turbidites; evidence for silica transformation processes in sandstones. *Journal of Sedimentary Research*, 65 (2a): 380-392.
- Honarmand, J., Amini, A (2017) Association of the flow units with facies distribution, depositional sequences, and diagenetic features: Asmari Formation of the Cheshmeh-Khush Oil Field, SW Iran. *Journal of Petroleum Science and Technology*, 7(3): 47–66.
- Izadi, M., Ghalambor, A (2013) New approach in permeability and hydraulic-flow-unit determination. *Society of Petroleum Engineers*, 16(3): 257–264.
- Jamali, A (2011) *Biostratigraphy and lithostratigraphy of the Lower Cretaceous deposits in the east of Kopet-Dagh*. Unpublished PhD thesis. University of Shahid Beheshti. p. 448.
- Kadkhodaie-Ilkhchi, A., Kadkhodaie-Ilkhchi, R (2018) A review of reservoir rock typing methods in carbonate reservoirs: relation between geological seismic, and reservoir rock types. ارتباط بین انواع سنگ مبتنی بر واحد جریان هیدرولیکی، رخساره رسوبی (پتروفاسیس) و انواع فرآیندهای دیاژنزی مشخص شد. براین اساس واحدهای جریان یک و دو (HFU1, HFU2) با محیط‌های کم انرژی (رودخانه بریده بریده، مئاندری، دشت سیلابی و بالای جزرومدی) و رخساره‌های شیلی و دولومادستون ماسه‌ای که تحت تاثیر فرآیندهای مخرب کیفیت مخزنی مانند انواع سیمانی شده و دگرسانی قرار گرفته‌اند در ارتباط می‌باشد. واحدهای جریان سه و چهار (HFU3, HFU4) با محیط‌های پرانرژی (رودخانه بریده بریده، بخش پرانرژی لاگون تا سد جزرومدی) و رخساره‌های کنگلومرا، ماسه‌سنگ و آئیدگریستون دولومیتی ماسه‌ای، که تحت تاثیر فرآیندهای دیاژنزی افزایش دهنده کیفیت مخزنی مانند انحلال، فشردگی شیمیایی (استیلولیت و رگچه انحلالی) قرار گرفته‌اند در ارتباط می‌باشد.
- منابع**
- Afshar-Harb, A (1979) The stratigraphy, tectonics and petroleum geology of Kopet-Dagh region, northern Iran. Unpublished PHD thesis, Petroleum Geology Section, Imperial College, London, 316 pp.
- Afshar Harb, A (1994) *Geology of Kopeh Dagh*. Geological Survey of Iran, 275 p.
- Al-Baldawi, B. A., & Nasser, M. E (2013) Investigation of reservoir flow unit and rock types of Mishrif Formation in Amara Oil Field and prediction of performance. In *Proceeding of the 2nd International Conference on Iraq Oil Studies*, 11:10-24.
- Robert, M., Alexandra, M., Jean Letouzey, Mohammad, A (2014) Kavooosi, Sharham Sherhati, Carla Müller, Jaime Vergés, and Abdollah Aghababaei. "Structural evolution of the Kopeh Dagh fold-and-thrust belt (NE Iran) and interactions with the South Caspian Sea Basin and Amu Darya Basin. *Marine and Petroleum Geology*, 57: 68-87.
- Amaefule, J. O., Alnubay, M., Tiab, D., Kersey, D. G., Keeland, D. K (1993) Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in un-cored intervals/wells. *Society of Petroleum Engineers*, SPE 26436: 1–16.
- Aminul Islam, M (2009) Diagenesis and reservoir quality of Bhuban sandstones (Neogene), Titas Gas Field, Bengal Basin, Bangladesh. *Journal of Asian Earth Sciences*, 35: 89-100.
- Berberian, M. and King, G. C. P (1981) Toward a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal Earth Sciences*, 18: 210- 265.
- Dunham, R (1962) Classification of carbonate rocks according to depositional – texture. In: Ham W.E.

- based on petrographic, geochemical data. *Cretaceous Research*, 30(5): 1146-1156.
- Nichols, G (2009) *Sedimentology and Stratigraphy*. Wiley-Blackwell: Chichester, 419 p.
- Noori Al-Jawad, S., Saleh, A. H., Al-Dobaj, A., Al-Rawi, Y. T (2014) Reservoir flow unit identification of the Mishrif Formation in north Rumaila Field. *Arabian Journal of Geosciences*, 7: 2711–2728.
- Pemberton, G, Gingeras, M (2005) Classification and characterizations of biogenically enhanced permeability. *AAPG Bulletin*, 89(11): 1493-1517.
- Pettijohn, F. J., Potter, P. E., and Siever, R (1987) *Sand and Sandstone*. 2nd Edition, Springer-Verlag, New York, 553 p.
- Poursoltani, M. R., Moussavi-Harami, R. and Gibling, M. R (2007) Jurassic deepwater fans in the Neo-Tethys Ocean, the Kashafud Formation of the Kopet-Dagh Basin Iran. *Sedimentary Geology*, 198: 53–74.
- Rahimpour-Bonab, H., Mehrabi, H., Navidtalab, A., Izadi-Mazidi, E (2012) Flow unit distribution and reservoir modelling in Cretaceous carbonates of the Sarvak Formation, Abteymour Oilfield, Dezful Embayment, SW Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 35(3): 213–236.
- Stampfli, G., Borel, G. D (2002) A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrones. *Earth and Planetary Science Letters*, 196: 17-33.
- Tiab, D., Donaldson, E. C (2004) *Petrophysics: Theory and Practice of Measuring Reservoir Rock and Fluid Transport Properties*. 2nd Edition, Elsevier, Gulf Professional Publishing, 915 p.
- Tucker, M. E (2009) *Sedimentary petrology: an introduction to the origin of sedimentary rocks*. Third edition, 261 pp.
- Waugh, B (1971) Formation of quartz overgrowths in the Penrith Sandstone (Lower Permian) of northwest England as revealed by scanning electron microscopy. *Sedimentology*, 17: 309–320.
- Worden, R. H., & Morad, S (2000) Quartz cementation in oil field sandstones: a review of the key controversies. *Quartz cementation in sandstones*, 29: 1-20.
- Worden, R. H., & Burley, S. D (2003) Sandstone diagenesis: the evolution of sand to stone. *Sandstone diagenesis: Recent and ancient*, 4: 3-44.
- Iranian Journal of Oil & Gas Science and Technology, 7(4): 13–35.
- Kim, J. C., Lee, Y. I., Hisada, K (2007) Depositional and compositional controls on sandstone diagenesis, the Tetori Group (Middle Jurassic–Early Cretaceous), central Japan. *Sedimentary Geology*, 195: 183–202.
- Kordi, M., Turner, B., Salem, A. M. K (2011) Linking diagenesis to sequence stratigraphy in fluvial and shallow marine sandstones: Evidence from the Cambrian Ordovician lower sandstone unit in southwestern Sinai, Egypt. *Marine and Petroleum Geology*, 28: 1554-1571.
- Love, L. G (1967) Early diagenetic iron sulphide in recent sediments of the Wash (England). *Sedimentology*, 9(4): 327-352.
- Mack, G. H (1978) The survivability of labile light-mineral grains in fluvial, aeolian and littoral marine environments: The Permian Cutler and Cedar Mesa Formations, Moab, Utah. *Sedimentology*, 25: 587-604.
- Mavyev, N. C (1986) Catagenesis of petroleum-bearing Mesozoic and upper Paleozoic formations of the southwestern Turan plate [Katagenez neftegazonosnykh mezozoyskikh I verkhnepaleozoyskikh formatsiy yugo-zapada Turanskoy plity]: Ashkhabad, Turkmenistan, Ylym, 218 p.
- Mehrabi, H., Ranjbar-Karami, R., & Roshani-Nejad, M (2019) Reservoir rock typing and zonation in sequence stratigraphic framework of the Cretaceous Dariyan Formation, Persian Gulf. *Carbonates and Evaporites*, 34(4): 1833-1853.
- Miall, A. D (2013) *The geology of fluvial deposits: sedimentary facies, basin analysis, and petroleum geology*. Springer.
- Moradi, M., Rahimpour-Bonab, H., Kadkhodaie, A., & Chehrizi, A (2022) Analysis and distribution of Hydraulic flow unit and Electrofacies in the framework of sedimentary sequences in one of the gas fields in northeastern Iran. *Journal of Petroleum Research*, 32(123): 3-18.
- Moussavi-Harami, R., Brenner, R. L (1990) Lower Cretaceous (Neocomian) fluvial deposits in eastern Kopet-Dagh basin, northeastern Iran. *Cretaceous Research*, 11(2): 163-174.
- Moussavi-Harami, R., Brenner, R. L (1992) Geohistory analysis and petroleum reservoir characteristics of Lower Cretaceous (Neocomian) sandstones, eastern Kopet-Dagh Basin, northeastern Iran. *AAPG bulletin*, 76(8): 1200-1208.
- Moussavi-Harami, R., Brenner, R. L (1993) Diagenesis of non-marine petroleum reservoirs: The Neocomian (Lower Cretaceous) Shurijeh Formation, Kopet-Dagh Basin, NE Iran. *Journal of Petroleum Geology*, 16(1): 55-72.
- Moussavi-Harami, R., Mahboubi, A., Nadjafi, M., Brenner, R., Mortazavi, M (2009) Mechanism of calcrete formation in the Lower Cretaceous (Neocomian) fluvial deposits, northeastern Iran

Controls of depositional facies and diagenetic processes on hydraulic flow units of the Shurijeh Formation in the one Gas field, Northeast of Iran

M. Moradi¹, A. Kadkhodaie^{2*} and H. Rahimpour-bonab³

1- M. Sc., student. Dept., of Petroleum Geology, College of Science, University of Tehran, Tehran, Iran

2- Assoc. Prof., Dept., of Geology, University of Tabriz, Tabriz, Iran

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

* kadkhodaie_ali@tabrizu.ac.ir

Received: 2022/8/10 Accepted: 2023/1/28

Abstract

Shurijeh Formation (Neocomian - Barremian) is the main hydrocarbon reservoir in north east Iran. Most gas reservoir production place in zones B and D of this formation. In this study, comprehensive petrographic and petrophysical studies were performed to understand the factors controlling the reservoir quality of this formation. With respect to the petrographic studies, well log data, evidence achieved from the core and drill cuttings, five primary facies (petrofacies), including micro-conglomerate, sandstone, claystone/shale, sandy dolomudstone, and dolomitic- sandy dolomitic ooid grainstone / hybrid, were identified in the deposits of Shurijeh Formation. Sedimentary facies of the Early Cretaceous reservoir in the studied wells belong to the upper part of the supratidal zone, intertidal zone, lagoon, braided river (longitudinal bars) and meandering river (flood plain and oxbow lake). In this study, based on porosity and permeability data, 4 units of Hydraulic flow units (HFUs) were identified using flow zone indicator (FZI) method. The results of this study showed that the diagenetic processes like dissolution, dolomitization and chemical compaction (stylolites and dissolved vein) are related to the grain supported facies including micro-conglomerate, sandstone and dolomitic- sandy dolomitic ooid grainstone / hybrid and hydraulic flow units (HFU4) and hydraulic flow unit (HFU3) that have the best reservoir quality are connected. The results of this study showed that the diagenetic processes like dissolution, dolomitization and pressure dissolution (stylolites and dissolved vein) are related to the grain supported facies including micro-conglomerate, sandstone and dolomitic- sandy dolomitic ooid grainstone / hybrid and hydraulic flow units 4 and 3 that have the best reservoir quality are connected. Diagenetic processes of cementation (Silica, carbonate and anhydrite) and alteration of feldspars are associated with the dominant mud facies including claystone/shale, sandy dolomudstone of hydraulic flow units 2 and 1 which have the lowest reservoir quality.

Keywords: Petrophysics, Petrophysics, Diagenesis, Hydraulic flow units, Flow zone indicator, Reservoir quality.