تلفیق روش‌های مختلف در تعیین گونه‌های سنگی پتروفیزیکی برای بخش بالایی سازند سورمه در یکی از میادین نفتی بخش مرکزی خلیج فارس

محمدعلی صالحی[1*]، سجاد کاظم شیرودی[2و3]، سیدرضا موسوی حرمی[2]، محمد غفوری[2] و غلامرضا لشکری‌پور[2]

۱- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، ایران

۲- گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران

۳- اداره زمین‌شناسی شرکت نفت فلات قاره، تهران، ایران

تاریخ دریافت: ۹۳/۸/۱۸ تاریخ پذیرش: ۹۴/۶/۱

چکیده

بخش بالایی سازند سورمه (معادل با سازند عرب) به سن ژوراسیک پسین از مهم‌ترین مخازن نفتی ایران در خلیج فارس و کشورهای عربی هم‌جوار است. در این مطالعه آنالیز گونه‌های سنگی با استفاده از روش‌های مختلف و با هدف ارزیابی کیفیت مخزنی بخش بالایی سازند سورمه در یکی از میدان‌های بخش مرکزی خلیج فارس انجام گرفته است. بخش بالایی سازند سورمه عمدتاً از توالی دولومیت و انیدریت تشکیل شده است. مطالعه پتروگرافی مقاطع نازک میکروسکوپی سازند سورمه منجر به شناسایی ده رخساره میکروسکوپی گردید. رخساره‌های شناسایی شده در زیر محیط‌های پشته‌های اووئیدی، لاگون، جزر و مدی و بالای جزر و مدی در یک سکوی کربناته از نوع رمپ نهشته شده‌اند. به منظور برقراری ارتباط بین رخساره‌های میکروسکوپی معرفی شده در بخش بالایی سازند سورمه با رده‌های پتروفیزیکی، داده‌های تخلخل و تراوایی مربوط به رخساره‌های این سازند بر روی نمودار ترسیم گردید. با رسم داده‌های تخلخل-تراوایی بر روی نمودار، چهار گونه سنگی شناسایی شد. با هدف تعیین رخساره‌های الکتریکی روش خوشه‌بندی چند کیفیتی بر پایه نمودار (MRGC) مورد استفاده قرار گرفته است. روش خوشه‌سازی منجر به شناسایی شش رخساره الکتریکی در بخش بالایی سازند سورمه گردید. همچنین، در این مطالعه واحدهای جریانی هیدرولیکی در بخش بالایی سازند سورمه توسط داده‌های پیوسته و تخمینی تخلخل و تراوایی به روش‌های استفاده از شاخص زون جریانی (FZI) و نمودار لورنز اصلاح شده بر مبنای چینه‌نگاری (SMLP) شناسایی و تفکیک شده‌اند. این دو روش مطالعه به ترتیب منجر به شناسایی شش واحد جریانی هیدرولیکی و نه واحد مخزنی، سدی و تله‌ای در بخش بالایی سازند سورمه گردیده‌اند. واحدهای مختلف مخزنی شناسایی شده در این دو روش دارای انطباق خوبی می‌باشند. هچنین، مقایسه نتایج روش‌های مختلف استفاده شده در این مطالعه و کالیبراسیون آنها با مطالعات پتروگرافی حاکی از همخوانی نتایج با یکدیگر است. با تلفیق روش‌های مختلف در تعیین گونه سنگی، سه گونه سنگی نهایی در بخش بالایی سازند سورمه تفکیک گردید.

کلمات کلیدی: گونه سنگی، میکروفاسیس، رخساره‌های الکتریکی، واحدهای جریانی هیدرولیکی، سازند سورمه، خلیج فارس

*مسؤول مکاتبات
آدرس الکترونیکی ma.salehi@sci.ui.ac.ir

مقدمه

تعیین گونه‌های سنگی[1] با دسته‌بندی سنگ‌ها بر اساس ویژگی‌های پتروفیزیکی مشابه، یکی از با اهمیت ترین پارامترها برای ساختن مدل سه بعدی پتروفیزیکی مخازن هیدروکربنی است [۱-۲]. تعاریف متفاوتی برای گونه‌های سنگی وجود دارد و از طرفی استفاده از روش‌های متفاوت در این خصوص در طول زمان، بیانگر یک سیر تکاملی برای این مفهوم است [۲]. تفکیک گونه‌های سنگی براساس خواص پتروفیزیکی (تخلخل، تراوایی و اشباع شدگی) در کنار مشخصه‌های زمین‌شناسی، مفهوم گونه سنگی پتروفیزیکی[2] را به وجود آورده‌اند [۳].

در مخازن کربناته، رخساره الکتریکی یا الکتروفاسیس مفهوم جدیدی را برای گونه سنگی فراهم آورد [۴]. روش‌های متفاوت دیگری نیز برای بررسی گونه‌های سنگی ارائه شده است که از بین آنها می‌توان به روش تفکیک و تعیین گونه سنگی بر اساس واحدهای جریانی اشاره کرد [۵-۶]. روش آمافوله و همکاران [۵] با استفاده از پارامتر شاخص زون‌های جریانی[3] در تعیین واحد جریانی، روش متداولی است که مبنای مطالعه بسیاری افراد قرار گرفته است. از سایر روش‌ها و فرمول‌ها برای تعیین واحدهای جریانی می‌توان به روش نمودار لورنز اصلاح شده بر مبنای چینه‌نگاری[4] اشاره کرد[۷].

تعیین گونه سنگی یک کار پیچیده بوده و باید منابع مختلفی از داده‌ها (روش‌های مختلف) را با یکدیگر تلفیق کرد [۲, ۸-۹]. در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از روش‌های مختلف در زون‌های مخزنی بخش‌های بالایی سازند سورمه انواع گونه‌های سنگی به روش‌های تعیین رخساره‌های میکروسکوپی، رخساره‌های الکتریکی، تعیین گونه‌های سنگی پتروفیزیکی، تفکیک واحدهای جریانی با استفاده از روش آمافوله و همکاران [۵] و همچنین روش استفاده از نمودار لورنز تفکیک و توصیف شوند. در ادامه با کالیبراسیون نتایج از هر روش با آنچه که از مطالعات پتروگرافی به‌دست آمده است نتایج روش‌ها با یکدیگر مقایسه می‌گردند تا بتوان با بهره برداری بیشتر و شناخت زون‌های بهتر مخزنی در چاه‌هایی که داده‌هایی همچون مغزه وجود ندارد استفاده کرد.

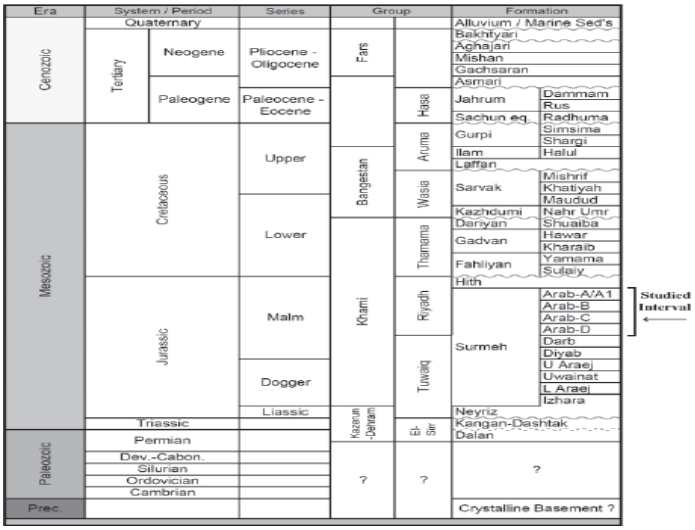
موقعیت زمین‌شناسی و چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه

میدان مورد مطالعه در بخش مرکزی خلیج فارس واقع شده است که یکی از افق‌های تولیدی آن بخش بالایی سازند سورمه (عرب) به سن ژوراسیک پسین می‌باشد. ژوراسیک پسین یکی از با اهمیت ترین چرخه‌های رسوبی در خاورمیانه از لحاظ حجم ذخیره هیدروکربن است [۱۰]. بخش بالایی سازند سورمه یک توالی کربناته- تبخیری است که در خلیج فارس نیز دارای ذخیره نفت قابل توجهی می‌باشد. این سازند حاصل ته نشست رسوبات کربناته-تبخیری بر روی حاشیه غیر فعال قاره‌ای صفحه عربستان است که در حوضه زاگرس و خلیج فارس گسترش دارد و به صورت همساز بر روی سازند نیریز و در زیر سازند هیث قرار دارد [۱۱] (شکل ۱).

در بخش جنوبی خلیج فارس بخش عرب از سازند سورمه شامل توالی دولومیت- انیدریت است. واحدهای دولومیتی بخش بالایی سازند سورمه متخلخل بوده و افق‌های تولیدی را در این میدان بوجود آورده‌اند و واحدهای انیدریتی با ایجاد سدهای ناتراوا به عنوان پوش سنگ عمل می‌کنند.

رایج‌ترین زون‌بندی که در اکثر کشورهای حاشیه خلیج فارس مرسوم بوده است این سازند را به چهار زون شامل A، B، C و D تقسیم می‌کنند. در میدان مورد مطالعه بخش بالایی سازند سورمه به پنج واحد لیتولوژیکی C A، A1، B، و D تقسیم بندی شده است که واحدهای A و D به ترتیب نازک‌ترین (۳ m) و ضخیم‌ترین (۱۶ m) واحد را تشکیل می‌دهند (شکل ۲).

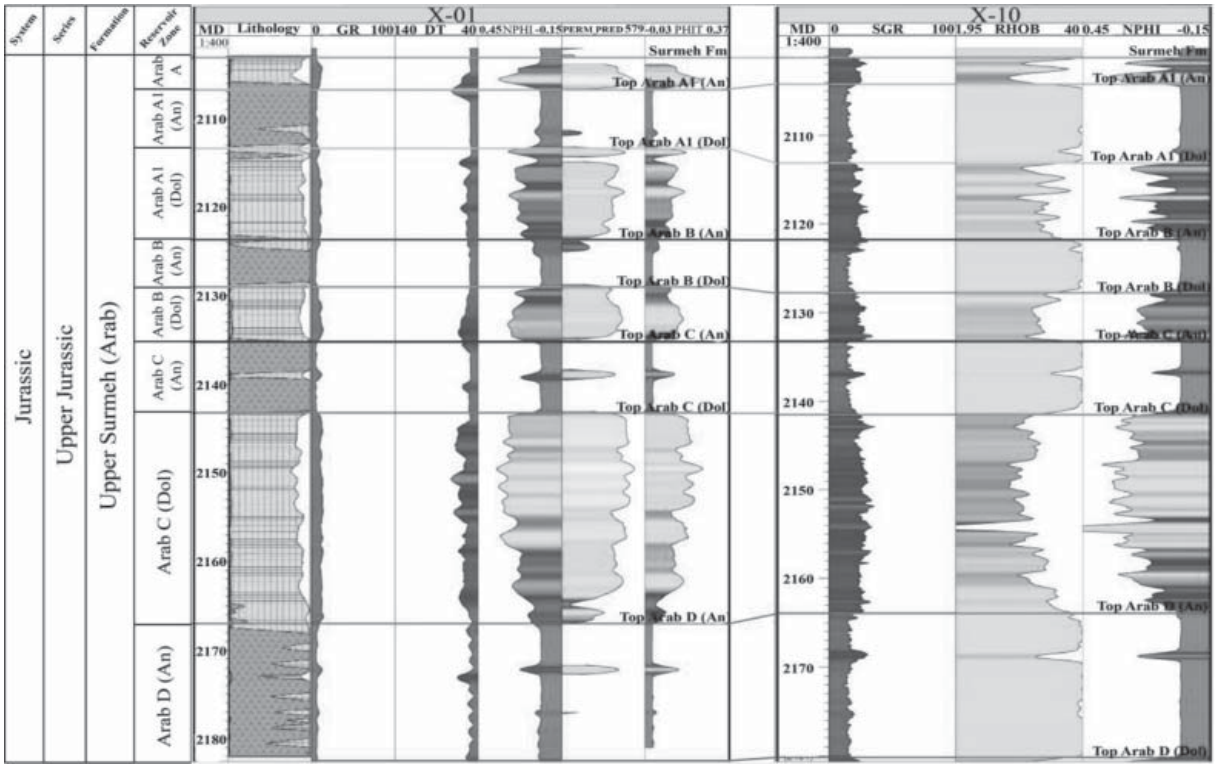
1. Rock Type
2. Petrophysical Rock Types
3. Flow Zone Indicator (FZI)
4. Stratigraphic Modified Lorenz Plot (SMLP)



شکل ۱- چینه‌شناسی خلیج فارس و کشورهای همجوار ([۱۴]؛ اقتباس با تغییراتی از [۱۵])

داده‌ها و روش مطالعه

در این پژوهش بخش بالایی سازند سورمه، مورد مطالعه قرار گرفته است. چاه‌های X-01 و X-10 از این میدان که دارای کامل‌ترین داده‌های پتروفیزیکی و مغزه در سازند سورمه بودند برای این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند. مطالعه ۱۶۶ مقطع نازک میکروسکوپی از مجموع ۶۰ m مغزه حفاری به منظور تعیین رخساره‌های رسوبی و ارائه مدل رسوبی در سازند سورمه انجام شده است. جهت نام‌گذاری رخساره‌ها از روش دانهام استفاده شده است [۱۲]. تعیین رخساره‌های الکتریکی در چاه‌های مورد مطالعه به کمک آنالیز خوشه‌بندی در نرم‌افزار ژئولاگ صورت گرفته است. تعیین گونه‌های سنگی پتروفیزیکی (PRT) به روش رده‌بندی لوسیا [۱۳]، تعیین واحدهای جریانی از روش آمافوله و همکاران [۵] و لورنز (SMLP) [۷] بر مبنای داده‌های تخلخل و تراوایی تخمینی از سایر روش‌های به‌کار رفته در این مطالعه بوده است.



شکل ۲- تطابق بخش بالایی سازند سورمه (عرب) در چاه‌های X-1 و X-10 (در این مطالعه)

پتروگرافی

رخساره‌های میکروسکوپی و محیط رسوبی

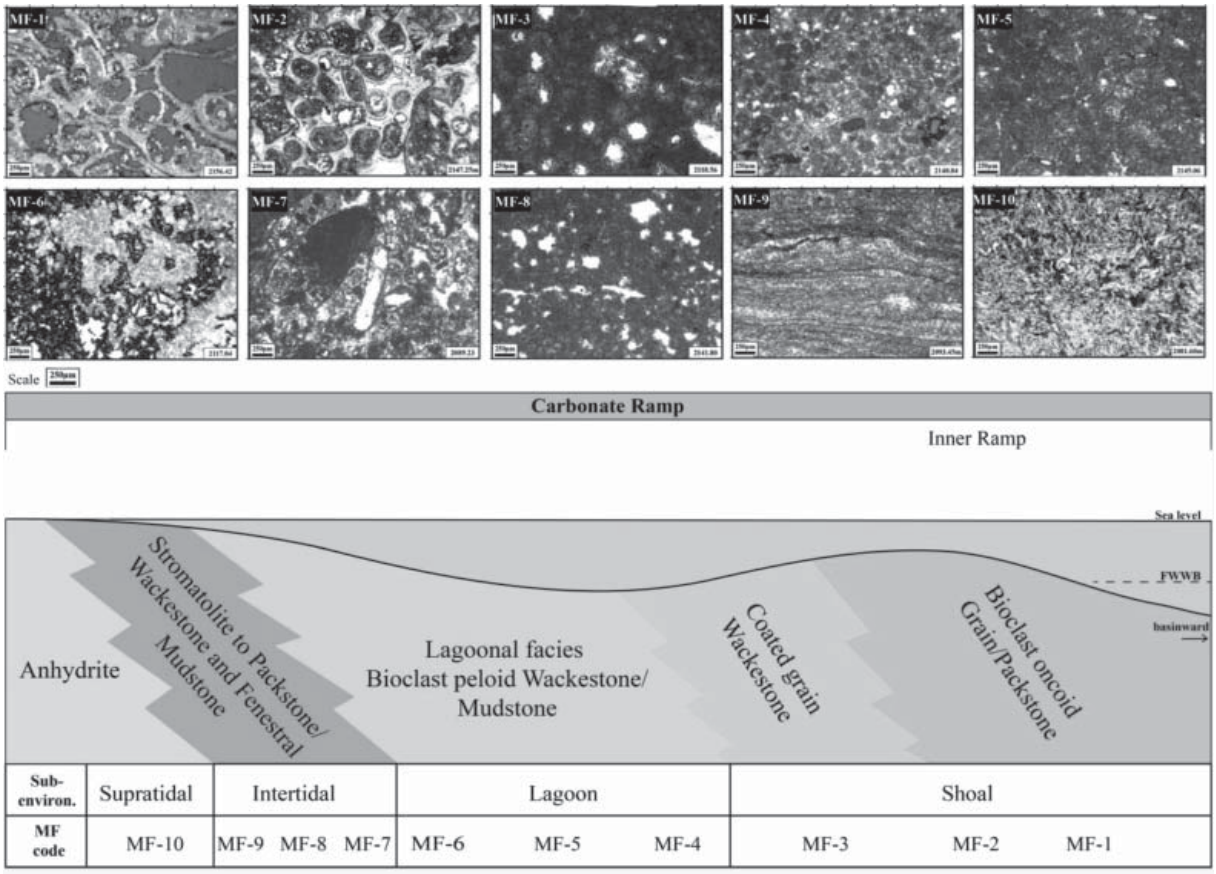
مطالعه پتروگرافی مقاطع نازک سازند سورمه در چاه X-10 منجر به شناخت ۱۰ رخساره میکروسکوپی گردیده است که در زیر محیط‌های پشته‌های اووئیدی، لاگون، جزر و مدی و بالای جزر و مدی که همگی مربوط به بخش داخلی پلتفرم کربناته هستند نهشته شده‌اند (جدول ۱). بررسی رخساره‌ها نشان می‌دهد که گسترش پشته‌های اووئیدی در این سازند نسبت به سایر زیر محیط‌ها بیشتر است و شامل رخساره‌های دانه غالب می‌باشد. بخش‌های لاگونی از رخساره‌های وکستون تا پکستون و پهنه جزر و مدی و بالای جزر و مدی از رخساره‌های مادستون و تبخیری تشکیل شده است. رخساره‌های بالای جزر و مدی به دلیل حضور انیدریت متراکم دارای تخلخل و تراوایی بسیار پایین هستند. به طور کلی سیکل‌های رسوبی بخش بالایی سازند سورمه در محیطی به سمت بالا کم عمق شونده رخ داده است که با یک توالی کربناته شروع و به یک توالی تبخیری ختم می‌گردد [۱۶-۱۷]. این توالی‌های کربناته-تبخیری بر روی یک سکوی کربناته وسیع و در اثر نوسانات کوچک مقیاس سطح دریا در طی ژوراسیک پسین نهشته شده‌اند [۱۰، ۱۸].

با توجه به رخساره‌های میکروسکوپی شناسایی گردیده (جدول ۱)، دسته‌بندی آنها و بررسی جانبی و عمودی رخساره‌ها براساس مدل‌های رخساره‌ای استاندارد فلوگل و ویلسون [۱۹-۲۰]، محیط رسوب‌گذاری سازند سورمه را در ناحیه مورد مطالعه و سایر بخش‌های جنوبی خلیج فارس یک سکوی کربناته از نوع رمپ با شیب ملایم[1] در نظر گرفته شده است[۱۶-۱۸، ۲۱] (شکل ۳). عدم وجود رخساره‌های چارچوب ساز، تغییر تدریجی کمربندهای رخساره‌ای، وجود رخساره‌های گرینستونی پر انرژی در سمت رو به خشکی و نبود یک شکست مشخص در شیب سکوی کربناته تأیید کننده ته نشست این توالی‌های کربناته بر روی یک پلتفرم کربناته از نوع رمپ است (شکل ۳). نتایج به‌دست آمده از این مطالعه منطبق بر نتایج به‌دست آمده از مطالعات رخساره‌ای در این چاه نیز می‌باشد [۲۱]. در بین چهار زیر محیط شناسایی شده محیط پشته‌های اووئیدی به دلیل تشکیل در محیط پر انرژی و حفظ شدن تخلخل اولیه بین دانه‌ای کیفیت مخزنی بهتری را به‌دست آورده‌اند.

جدول ۱- رخساره‌های میکروسکوپی و مهم‌ترین فرآیندهای دیاژنزی شناسایی شده در سازند سورمه (عرب) در چاه X-10 (در این مطالعه)

کد ریز رخساره	نام ریز رخساره	زیر محیط رسوبی	فرآیندهای دیاژنزی
MF-1	پکستون/ گرینستون آنکوئید و بایوکلست‌دار	پشته‌های اووئیدی	میکریتی شدن؛ سیمانی شدن؛ دولومیتی شدن؛ انحلال
MF-2	پکستون/ گرینستون دانه پوشش‌دار		میکریتی شدن؛ سیمانی شدن؛ دولومیتی شدن؛ انحلال
MF-3	وکستون دانه پوشش‌دار		دولومیتی شدن؛ انحلال
MF-4	وکستون/ پکستون پلوئید و بایوکلست‌دار	لاگون	دولومیتی شدن؛ انحلال
MF-5	وکستون/مادستون بایوکلست‌دار		دولومیتی شدن
MF-6	پوشش میکروبی		دولومیتی شدن
MF-7	پکستون/ وکستون اینتراکلست دار	جزر و مدی	دولومیتی شدن؛ انحلال، شکستگی؛ سیمان انیدریتی
MF-8	مادستون با فابریک فنسترال		دولومیتی شدن؛ سیمانی شدن
MF-9	استروماتولیت		دولومیتی شدن
MF-10	انیدریت	بالای جزر و مدی	تراکم

1. Homoclinal Ramp



شکل ۳- رخساره‌های میکروسکوپی و مدل شماتیک محیط رسوبی از بخش بالایی سازند سورمه (عرب) در میدان مورد مطالعه (تصاویر میکروسکپی اقتباس از [۲۱])

دیاژنز

از آنجائی‌که فرایندهای دیاژنزی نقش مهمی در تعیین کیفیت مخزنی نهایی توالی‌های کربناته دارند، فرآیندهای دیاژنزی در بخش بالایی سازند سورمه در مطالعات پتروگرافی بررسی شده‌اند. مهمترین فرایندهای دیاژنزی در این بخش از سازند شامل میکریتی شدن، سیمانی شدن، دولومیتی شدن، انحلال و فشردگی می‌باشند (جدول ۱). فرآیندهای میکریتی شدن و سیمانی شدن به دلیل گسترش و تأثیر کم بر رخساره‌ها اثر چندانی بر کیفیت مخزنی نداشته‌اند اما مهم‌ترین فرآیندها در افزایش تخلخل و تراوایی در سازند مورد مطالعه انحلال و دولومیتی شدن است.

رخساره‌های الکتریکی

رخساره الکتریکی یک روش برای دسته‌بندی سنگ‌ها به کمک لاگ‌های چاه‌پیمایی است [۲۲ و ۲۳]. در این مطالعه برای شناسایی و تفکیک رخساره‌های الکتریکی سازند سورمه از روش خوشه‌بندی چند کیفیتی بر پایه نمودار (MRGC) برای چاه‌های مورد مطالعه استفاده شده است. داده‌های لاگ‌های مورد استفاده در آنالیز خوشه‌بندی سازند سورمه شامل گاما (GR) و چگالی (RHOB) است.

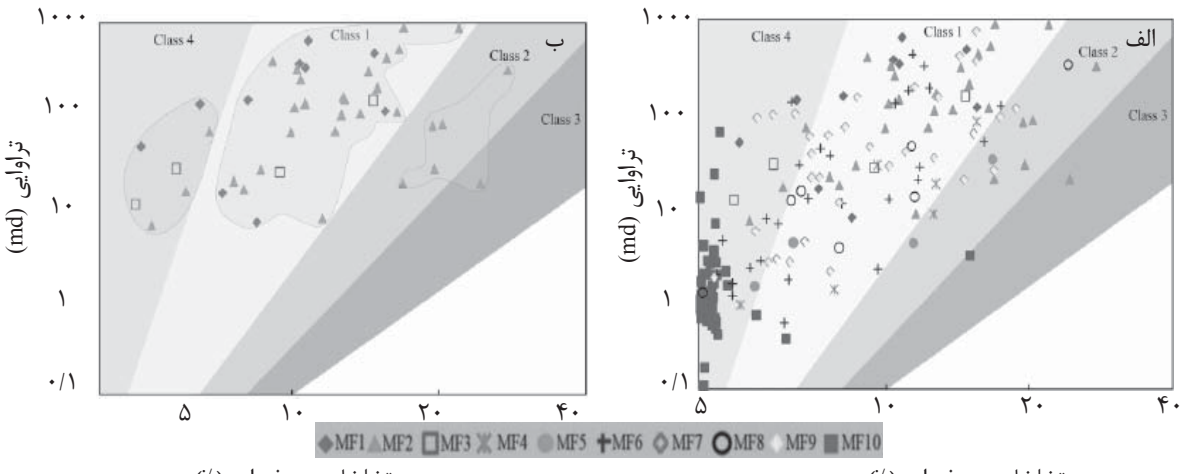
در این مرحله چندین مدل از گراف MRGC با تعداد متفاوتی از خوشه‌ها اجرا و نتایج با یکدیگر مقایسه گردید. در نهایت ۳ سطح خوشه‌بندی سلسله مراتبی با تعداد خوشه‌ها از ۶، ۱۰ و ۱۳ خوشه به‌دست آمد. مدل ۶ خوشه‌ای با توجه به اینکه تفکیک قابل قبولی از داده‌های گاما و چگالی را به‌وجود آورده بودند برای این سازند انتخاب گردید (جدول ۲). در این مرحله مدل ۶ رخساره‌ای در سرتاسر سازند سورمه (عرب) در چاه‌های مورد مطالعه توزیع شده است. برای آزمون میزان صحت و دقت این مدل نتایج با مطالعات رخساره میکروسکوپی مقایسه گردیده است که در ادامه بحث خواهد شد.

جدول ۲- رخساره‌های الکتریکی تعیین شده در سازند سورمه با استفاده از داده‌های لاگ، چاه X-10 (در این مطالعه)

رخساره الکتریکی	فراوانی نقاط	GR	RHOB
EF-1	۵۴	۱۵/۷۱	۲/۹۴
EF-2	۵۵	۱۶/۸۷	۲/۵۷
EF-3	۳۷	۱۸/۹۶	۲/۴۴
EF-4	۵۱	۱۷/۶	۲/۷۷
EF-5	۳۸	۲۱/۳۶	۲/۶۲
EF-6	۷۳	۲۳/۰۷	۲/۴۶

تعیین گونه‌های سنگی به روش دسته‌بندی لوسیا[1]

در این مطالعه در تعیین گونه‌های سنگی از ترکیب رخساره‌های استاندارد معرفی شده توسط دانهام [۱۲]، و طبقه‌بندی تخلخل توسط لوسیا [۲۴] استفاده شده است. به منظور بررسی کیفیت مخزنی رخساره‌ها با برقراری ارتباط بین رخساره‌های معرفی شده در بخش بالایی سازند سورمه با رده‌های پتروفیزیکی لوسیا و نیز تعیین گونه‌های سنگی، داده‌های تخلخل و تراوایی مربوط به رخساره‌های این سازند بر روی نمودار لوسیا ترسیم گردیده‌اند (شکل ۴ الف). در رسم داده‌ها از تخلخل کل به‌دست آمده از مغزه به جای تخلخل بین ذره‌ای استفاده شده است. در بخش بالایی سازند سورمه به طور مشخص با توجه به اینکه رخساره‌های شناسایی شده مربوط به رخساره‌های تبخیری-کربناته کم عمق هستند اکثراً داده‌های تخلخل و تراوایی نظیر رخساره میکروسکوپی ۱۰ (MF-10) در محدوده خارج از دسته‌بندی لوسیا و در نواحی نزدیک به محور عمودی که فاقد تخلخل هستند قرار گرفته‌اند. این داده‌ها به طور قراردادی در این مطالعه به عنوان رده ۴ در نظر گرفته شده‌اند (شکل، ۴ الف). از طرفی رخساره شماره ۱، ۲ و ۳ که رخساره‌های کمربند رخساره‌ای پشته‌های اووئیدی هستند در محدوده رده‌های مختلف پراکنده هستند (شکل ۴ ب). پراکندگی مذکور اثرات دیاژنز بر روی رخساره‌های پر انرژی را نشان می‌دهد. با تطبیق رخساره‌های مورد مطالعه با رده‌های پتروفیزیکی لوسیا [۱۳]، گونه‌های سنگی مختلفی در ارتباط با بخش بالایی سازند سورمه شناسایی شد. بر این اساس، این بخش از سازند سورمه به ۴ گونه سنگی (RT1 الی RT4) تقسیم‌بندی شده‌اند (جدول ۳). این گونه‌های سنگی بر اساس نوع رخساره و رده‌های پتروفیزیکی از یکدیگر متمایز شده‌اند. گونه سنگی ۱ (RT1) در این بخش از سازند دارای بالاترین کیفیت مخزنی و گونه سنگی چهار (RT4) پایین ترین کیفیت مخزنی (و یا فاقد کیفیت مخزنی) را دارا می‌باشد.



شکل ۴- نمودار تخلخل در مقابل تراوایی نمونه‌های سازند سورمه (عرب) در نمودار پتروفیزیکی لوسیا [۱۳]. الف) برخی از داده‌ها در محدوده خارج از رده‌بندی و در نواحی نزدیک به محور عمودی قرار گرفته‌اند که به طور قراردادی به‌عنوان رده چهار در نظر گرفته شده‌اند. ب) رخساره‌های یک تا سه در محدوده رده‌های مختلف پراکنده‌اند.

1. Lucia Rock Classes

جدول ۳- گونه‌های سنگی تعیین شده در سازند سورمه با تطبیق رخساره‌های میکروسکوپی با رده‌های پتروفیزیکی لوسیا

گونه سنگی (RT)	رخساره (بافت)	تخلخل (٪)	تراوایی (md)	ریز رخساره	گروه پتروفیزیکی لوسیا
۱	گرینستون/پکستون	۲۰/۴۸	۲۴۴	MF-1 و MF-2	۱
۲	وکستون/مادستون	۱۳/۶۹	۷۰/۵	MF-3 الی MF-6, MF-9	۲ و ۳
۳	استروماتولیت تا پکستون/وکستون	۱۳	۲۳	MF-7 و MF-8	۲ و ۳
۴	انیدریت	۱/۴	۰/۴۸	MF-10	غیر مخزنی

واحدهای جریانی

تفکیک گونه‌های سنگی بر اساس مفهوم واحدهای جریانی روشی است که بطور گسترده‌ای در توصیف مخزن استفاده شده است (برای مثال [۵، ۶، ۲۵-۲۶]). در این مطالعه به منظور تعیین واحدهای جریانی از داده‌های تخلخل و تراوایی تخمین زده شده از داده‌های لاگ مربوط به چاه‌های مورد مطالعه در این میدان استفاده شده است. دو روش تعیین واحد جریانی با استفاده از پارامتر FZI [۵] و روش استفاده از نمودار لورنز (SMLP) [۷] به‌کار گرفته شده‌اند.

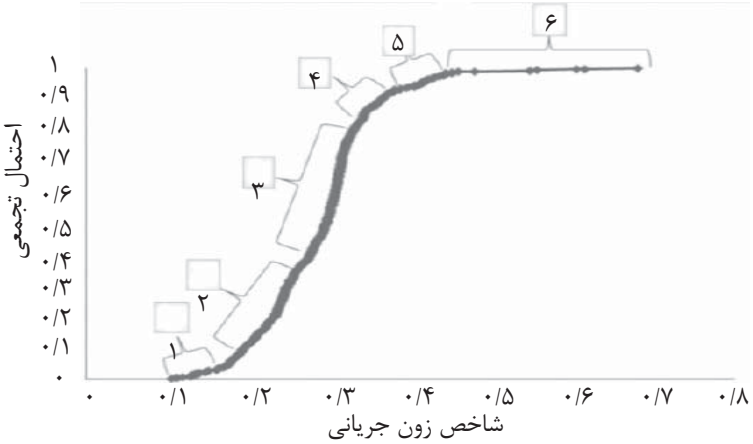
روش آمافوله و همکاران [۵]

در این روش هر واحد جریانی با یک شاخص زون جریانی (FZI) مشخص می‌شود که می‌تواند بر حسب روابط بین حجم فضای خالی (ε) و توزیع هندسی فضای خالی (که به صورت شاخص کیفیت مخزنی کمی می‌شود) به صورت زیر محاسبه شود Log RQI = Log FZI + Log ε [۵]؛ که در آن ε یا PMR[1]؛ به صورت روبرو محاسبه می‌گردد: $\varepsilon = \varphi / (1- \varphi)$؛ مقادیر RQI و FZI می‌توانند با استفاده از معادلات روبرو محاسبه شوند:

$$RQI = 0.0314\sqrt{(k/\varphi)} \quad (1)$$

$$FZI = (0.0314/\varepsilon)\sqrt{(k/\varphi)}\, RQI/\varepsilon$$

که در آن k تراوایی به میلی دارسی و φ تخلخل کسری است. سنگ‌های با محدوده باریکی از مقادیر FZI به یک واحد جریانی منفرد متعلق هستند، یعنی آنها دارای خواص جریان یکسانی هستند [۲۵]. ترسیم نمودار فراوانی تجمعی احتمالی مقادیر FZI روش مناسبی برای تعیین تعداد بهینه واحدهای جریانی است [۲۷]. نمودار تجمعی احتمال نرمال سازند سورمه در چاه‌های مورد مطالعه وجود ۶ شیب عمده را نشان داد که حاکی از وجود ۶ واحد جریانی (HFU1 الی HFU6) مجزا از هم در این سازند است که به ترتیب کیفیت مخزنی از واحد جریانی ۱ (HFU1) به واحد جریانی ۶ (HFU6) افزایش می‌یابد (شکل ۵، جدول ۴).



شکل ۵- واحدهای جریانی تفکیک شده بر روی نمودار فراوانی تجمعی احتمالی مقادیر FZI در بخش بالایی سازند سورمه (عرب)، چاه X-01

1. Pore to Matrix atio (PMR)

جدول ۴- بخشی از داده‌های تخمینی تخلخل و تراوایی استفاده شده برای تعیین واحدهای جریانی در بخش بالایی سازند سورمه به روش استفاده از پارامتر FZI و لورنز در چاه X-01

عمق (m)	تراوایی (md)	تخلخل (٪)	تخلخل	RPS	گروه پتروفیزیکی لوسیا (RT)	RQI	ε	FZI	FZI HFU	LOG R35	R35	KH	PHIH	KH٪	PHIH ٪	Cum. ٪KH	Cum. ٪PHIH	لورنز
۲۱۰۴/۰۳	۰/۹۲۸	۹/۲۰	۰/۰۹	۱۰/۰۸	۳	۰/۰۵۴۴	۰/۰۶۸۸	۰/۷۹۱۳	۲	-۰/۱۲۰۰	۰/۷۵۸۶	۰/۰۲۹۵	۰/۰۱۴۰	۰/۰۰۸۹	۰/۲۵۷۳	۱۴/۷۵	۷/۵۸	۱
۲۱۰۴/۱۹	۲/۲۷۳	۱۱/۲۸	۰/۱۱	۲۰/۱۵	۳	۰/۰۹۹۷	۰/۱۰۱۴	۰/۹۸۳۵	۳	۰/۰۳۲۵	۱/۰۷۷۸	۰/۱۴۱۴	۰/۰۱۷۲	۰/۰۴۲۷	۰/۳۱۵۲	۱۴/۷۵	۷/۵۸	۱
۲۱۰۴/۳۴	۲/۹۱۱	۱۱/۹۴	۰/۱۲	۲۴/۳۸	۳	۰/۱۴۱۰	۰/۱۲۷۱	۱/۱۰۹۰	۳	۰/۰۷۴۳	۱/۱۸۶۶	۰/۳۴۶۳	۰/۰۱۸۲	۰/۱۰۴۶	۰/۳۳۳۷	۱۴/۷۵	۷/۵۸	۱
۲۱۰۴/۴۹	۲/۷۹۷	۱۱/۸۴	۰/۱۲	۲۳/۶۳	۳	۰/۱۵۵۰	۰/۱۳۵۶	۱/۱۴۳۳	۴	۰/۰۶۷۳	۱/۱۶۷۷	۰/۴۴۳۶	۰/۰۱۸۰	۰/۱۳۴۰	۰/۳۳۰۸	۱۴/۷۵	۷/۵۸	۱
۲۱۰۴/۶۴	۲/۷۹۰	۱۱/۸۰	۰/۱۲	۲۳/۶۵	۳	۰/۱۵۲۶	۰/۱۳۴۳	۱/۱۳۶۷	۴	۰/۰۶۸۰	۱/۱۶۹۶	۰/۴۲۶۲	۰/۰۱۸۰	۰/۱۲۸۸	۰/۳۲۹۷	۱۴/۷۵	۷/۵۸	۱
۲۱۰۴/۸۰	۳/۲۷۲	۱۲/۱۸	۰/۱۲	۲۶/۸۶	۳	۰/۱۵۲۷	۰/۱۳۳۷	۱/۱۴۱۹	۴	۰/۰۹۶۷	۱/۲۴۹۴	۰/۴۲۵۲	۰/۰۱۸۶	۰/۱۲۸۵	۰/۳۴۰۴	۱۴/۷۵	۷/۵۸	۱
۲۱۰۴/۹۵	۳/۳۵۸	۱۳/۵۷	۰/۱۴	۳۹/۴۹	۳	۰/۱۶۲۷	۰/۱۳۸۷	۱/۱۷۳۵	۴	۰/۱۸۲۲	۱/۵۲۱۲	۰/۴۹۸۶	۰/۰۲۰۷	۰/۱۵۰۶	۰/۳۷۹۲	۱۴/۷۵	۷/۵۸	۱
۲۱۰۵/۱۰	۱۰/۸۳۱	۱۵/۸۶	۰/۱۶	۶۸/۲۷	۲	۰/۱۹۷۳	۰/۱۵۷۰	۱/۲۵۷۱	۴	۰/۳۰۳۲	۲/۰۱۰۱	۰/۸۱۶۶	۰/۰۲۴۲	۰/۲۴۶۷	۰/۴۴۳۴	۱۴/۷۵	۷/۵۸	۱
۲۱۰۵/۲۵	۲۱/۳۵۰	۱۸/۴۶	۰/۱۸	۱۱۵/۶۷	۲	۰/۲۵۹۴	۰/۱۸۸۶	۱/۳۷۵۹	۴	۰/۴۱۹۷	۲/۶۲۸۵	۱/۶۵۰۷	۰/۰۲۸۱	۰/۴۹۸۷	۰/۵۱۵۹	۱۴/۷۵	۷/۵۸	۱
۲۱۰۵/۴۱	۳۸/۴۴۴	۲۱/۰۵	۰/۲۱	۱۸۲/۶۲	۱	۰/۳۳۷۷	۰/۲۲۶۴	۱/۴۹۱۹	۵	۰/۵۲۰۶	۳/۳۱۵۷	۳/۲۵۳۷	۰/۰۳۲۱	۰/۹۸۳۰	۰/۵۸۸۴	۱۴/۷۵	۷/۵۸	۱
۲۱۰۵/۵۶	۵۴/۴۴۲	۲۲/۷۴	۰/۲۳	۲۳۹/۴۵	۱	۰/۴۲۴۳	۰/۲۶۶۶	۱/۵۹۱۴	۶	۰/۵۸۰۵	۳/۸۰۶۵	۵/۸۵۸۹	۰/۰۳۴۷	۱/۷۷۰۱	۰/۶۳۵۵	۱۴/۷۵	۷/۵۸	۱
۲۱۰۵/۷۱	۶۱/۱۴۵	۲۳/۳۰	۰/۲۳	۲۶۲/۴۱	۱	۰/۴۸۵۹	۰/۲۹۴۳	۱/۶۵۱۲	۶	۰/۶۰۱۰	۳/۹۹۰۰	۸/۲۹۷۰	۰/۰۳۵۵	۲/۵۰۶۷	۰/۶۵۱۲	۱۴/۷۵	۷/۵۸	۱
۲۱۰۵/۸۶	۵۵/۰۰۱	۲۲/۷۳	۰/۲۳	۲۴۲/۰۰	۱	۰/۵۰۸۷	۰/۳۰۳۸	۱/۶۷۴۳	۶	۰/۵۸۳۳	۳/۸۳۰۶	۹/۳۱۸۶	۰/۰۳۴۶	۲/۸۱۵۳	۰/۶۳۵۲	۱۴/۷۵	۷/۵۸	۱
۲۱۰۶/۰۲	۳۶/۳۵۳	۲۰/۷۰	۰/۲۱	۱۷۵/۵۹	۱	۰/۴۸۸۵	۰/۲۹۴۱	۱/۶۶۰۷	۶	۰/۵۱۲۵	۳/۲۵۴۹	۸/۳۸۲۱	۰/۰۳۱۶	۲/۵۳۲۴	۰/۵۷۸۶	۱۴/۷۵	۷/۵۸	۱
۲۱۰۶/۱۷	۱۶/۰۳۹	۱۷/۲۳	۰/۱۷	۹۳/۱۰	۱	۰/۴۱۶۱	۰/۲۶۱۱	۱/۵۹۳۷	۶	۰/۳۷۲۵	۲/۳۵۷۹	۵/۵۴۰۱	۰/۰۲۶۳	۱/۶۷۳۸	۰/۴۸۱۵	۱۴/۷۵	۷/۵۸	۱
۲۱۰۶/۳۲	۵/۱۷۰	۱۳/۳۵	۰/۱۳	۳۸/۷۲	۳	۰/۳۰۳۰	۰/۲۰۸۱	۱/۴۵۵۶	۵	۰/۱۷۹۰	۱/۵۱۰۱	۲/۴۴۴۳	۰/۰۲۰۴	۰/۷۳۸۵	۰/۳۷۳۲	۱۴/۷۵	۷/۵۸	۱
۲۱۰۶/۴۷	۱/۱۳۵	۹/۴۷	۰/۰۹	۱۱/۹۹	۳	۰/۱۹۵۴	۰/۱۵۴۱	۱/۲۶۷۷	۴	-۰/۰۷۹۲	۰/۸۳۳۳	۰/۷۸۷۹	۰/۰۱۴۴	۰/۲۳۸۰	۰/۲۶۴۷	۱۴/۷۵	۷/۵۸	۱
۲۱۰۶/۶۳	۰/۰۴۷	۴/۷۳	۰/۰۵	۱/۰۰	۴	۰/۱۰۸۷	۰/۱۰۴۶	۱/۰۳۹۱	۳	-۰/۶۲۹۶	۰/۲۳۴۶	۰/۱۷۳۰	۰/۰۰۷۲	۰/۰۵۲۳	۰/۱۳۲۲	۱۴/۷۵	۷/۵۸	۱
۲۱۰۶/۷۸	۰/۰۰۰	۱/۳۴	۰/۰۱	۰/۰۱	۴	۰/۰۳۱۴	۰/۰۴۹۶	۰/۶۳۳۳	۲	-۱/۷۳۰۴	۰/۰۱۸۶	۰/۰۰۷۲	۰/۰۰۲۰	۰/۰۰۲۲	۰/۰۳۷۵	۰/۳۴	۱/۶۴	۲
۲۱۰۶/۹۳	۰/۰۰۰	۰/۱۲	۰/۰۰	۰/۰۰	۴	۰/۰۰۲۷	۰/۰۱۳۶	۰/۱۹۹۳	۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۳۳	۰/۳۴	۱/۶۴	۲
۲۱۰۷/۰۸	۰/۰۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۴	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۲	۰/۳۴	۱/۶۴	۲
۲۱۰۷/۲۳	۰/۰۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۴	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۲	۰/۳۴	۱/۶۴	۲
۲۱۰۷/۳۹	۰/۰۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰	۰/۰۰	۴	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۲	۰/۳۴	۱/۶۴	۲

روش لورنز[1]

روش نمودار لورنز اصلاح شده بر مبنای چینه‌نگاری (SMLP) یکی از بهترین روش‌ها برای دستیابی به حداقل تعداد واحدهای جریانی در مخزن است (برای مثال [۷، ۲۶، ۲۸].

تکنیک نمودار لورنز (SLMP) بر اساس رسم ظرفیت جریانی[2] مجموع بر حسب ظرفیت ذخیره[3] مجموع، با حفظ ترتیب چینه شناسی آنها می‌باشد. نقاط عطف در نمودار SLMP، بیانگر تغییرات در خواص جریانی محیط متخلخل است. روش کار تعیین واحدهای جریانی به روش لورنز بدین صورت است که ابتدا تخلخل و تراوایی پیوسته (طول به طول) و نسبت تراوایی به تخلخل (k/φ) متناسب در یک نظم چینه‌شناسی مرتب می‌شوند (جدول ۴). سپس، حاصل‌ضرب تراوایی در عمق مربوطه (K.h) و تخلخل در اعماق مربوطه (φ.h) محاسبه گردیده است. مجموع تجمعی داده‌های حاصل‌ضرب تراوایی در عمق و تخلخل در عمق، محاسبه شده و سپس داده‌های حاصل شده به ۱۰۰٪ نرمال می‌شوند. داده‌های به‌دست آمده از حاصل‌ضرب تراوایی در عمق و تخلخل در عمق، به ترتیب با عنوان ظرفیت جریان و ظرفیت ذخیره نامیده می‌شوند. سپس مقادیر ظرفیت ذخیره در مقابل ظرفیت جریان بر روی یک نمودار رسم می‌شوند [۲۸].

پس از ترسیم نمودار مذکور در یک نظم چینه‌شناسی چهار نوع واحد جریانی شناسایی گردید که شامل واحدهای مخزنی، سدها یا موانع جریان[4]، زون‌های سرعت یا گذرگاه‌ها[5] و بافل‌ها[6] یا زون‌هایی که در حرکت سیال آشفتگی ایجاد می‌کنند، می‌باشد. ویژگی این واحدهای کلیدی بدین صورت است که واحدهای مخزنی دارای ظرفیت جریان و ظرفیت ذخیره بالا، زون سرعت دارای ظرفیت جریان بالا و ظرفیت ذخیره بسیار پایینی هستند. زون‌های بافل دارای ظرفیت ذخیره بالا اما ظرفیت جریان پایین می‌باشند و در نهایت زون‌های سدی ظرفیت جریان و ذخیره بسیار پایین یا در حد صفر دارند.

واحدهای جریانی بخش بالایی سازند سورمه

استفاده از داده‌های پیوسته تخمینی تخلخل و تراوایی در این مطالعه به روش‌های استفاده از شاخص زون جریانی (FZI) (روش آمافوله) و نمودار لورنز (SMLP) به ترتیب منجر به شناسایی ۶ و ۹ واحد جریانی در بخش بالایی سازند سورمه گردیده است. تفکیک این تعداد واحد جریانی بر پایه نقاط شکست در نمودار بوده است (شکل ۶). میزان ظرفیت جریان و ذخیره در هر واحد جریانی تفکیک شده متفاوت است.

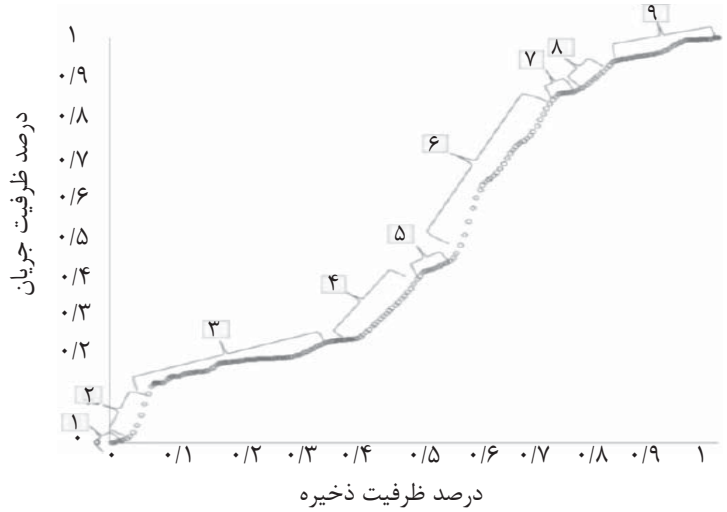
در ادامه نیمرخ چینه نگاری جریان[7] شامل ستون لیتولوژی، نمودارهای تخلخل، تراوایی، مقادیر محاسباتی R35، نسبت تراوایی به تخلخل[8]، درصد ظرفیت جریان و ذخیره برای چاه X-01 رسم شده است (شکل ۷). پارامتر R35 یا شعاع گلوگاه حفره در اشباع ۳۵٪ جیوه از طریق رابطه وینلند [۲۹] محاسبه می‌شود:

$$\text{Log R35} = 0.732 + 0.588\ (\text{Log } k_{air})\ 0.864\ (\text{Log} \varnothing_e) \quad (۲)$$

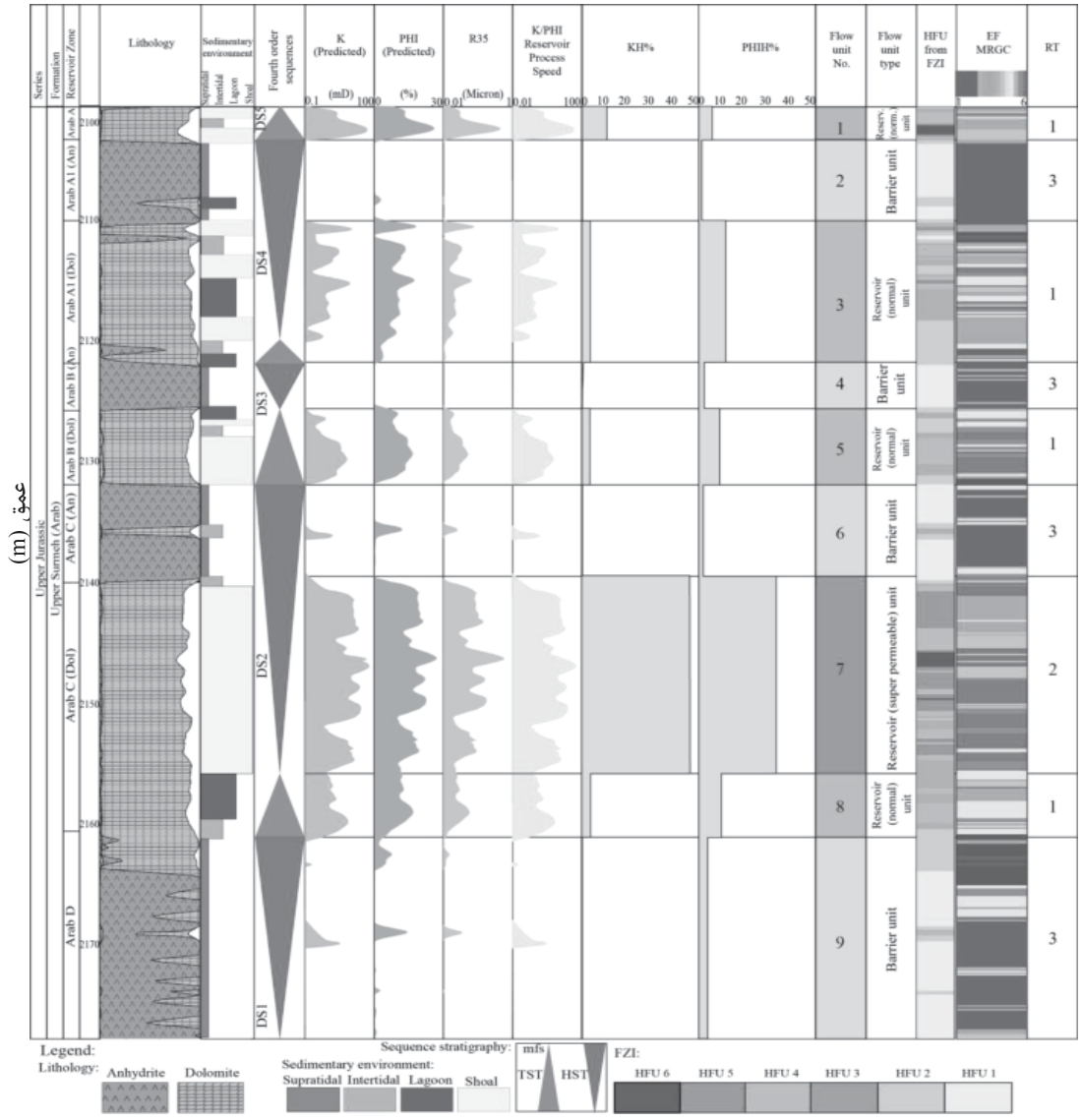
با رسم MLP و SFP نهایی به طور کلی چهار زون مخزنی نرمال، یک زون مخزن بسیار با کیفیت و چهار زون سدی تفکیک شده است (شکل ۷).

در این مطالعه به جهت اینکه مفهوم زمین شناسی به واحدهای جریانی داده شود ارتباط آنها را با رخساره‌های شناسایی شده در این سازند در چارچوب چینه‌نگاری سکانسی مورد بررسی قرار گرفته است. چینه‌نگاری سکانسی در چاه مورد مطالعه از مطالعات پیشین اقتباس گردیده است [۱۵]. در زیر به تشریح واحدهای جریانی شناسایی شده در این سازند می‌پردازیم.

1. Lorenz
2. Flow Capacity
3. Storage Capacity
4. Barriers
5. Conduits
6. Baffles
7. Stratigraphic Flow Profile (SFP)
8. Reservoir Process Speed (RPS)



شکل ۶- واحدهای جریانی تفکیک شده به روش لورنز در بخش بالایی سازند سورمه (عرب)، چاه X-01



شکل ۷- نیمرخ چینه‌نگاری جریان (SFP) ترسیم شده برای سازند سورمه در چاه X-01 که شامل ستون لیتولوژی، محیط رسوبی، نمودارهای تراوایی، تخلخل، R35، نسبت تراوایی به تخلخل (RPS)، درصد ظرفیت جریان و ذخیره است و واحدهای جریانی براساس روش لورنز و پارامتر FZI بر روی آن مشخص شده است. رخساره‌های الکتریکی و گونه سنگی نهایی در امتداد ستون آورده شده است. (در این مطالعه)

واحـد جریانـی ۱: ایـن واحـد مخزنـی (بـا ضخامـت متوسـط m ۴) در رأس سـازند سـورمه و در تمامـی چاه‌هـا مـورد مطالعـه قابـل شناسـایی اسـت. لیتولـوژی غالـب ایـن واحـد جریانـی دولومیـت و اغلـب بـه ترتیـب شـامل رخسـاره‌های میکروسـکپی MF-9، MF-2 و MF-8 اسـت. رخسـاره‌های الکتریکـی ۲ و ۳ (EF-2 و EF-3) در ایـن واحـد جریانـی فـراوان اسـت. ایـن واحـد جریانـی منطبـق بـر دسـته رخسـاره TST (از سـکانس‌های رده چهـارم) بـوده و مطابـق بـا زون مخزنـی A در سـازند سـورمه اسـت (شـکل ۷). تخلخـل مغـزه در ایـن واحـد جریانـی از ۱۹ تـا ۲۲/۸ درصـد و تراوایـی در محـدوده ۲۰ تـا ۳۲ md تغییـر می‌کنـد. در مجمـوع ایـن واحـد جریانـی بـه عنـوان یـک زون مخزنـی نرمـال در نظـر گرفتـه می‌شـود.

واحـد جریانـی ۲: ایـن واحـد سـدی (بـا ضخامـت متوسـط m ۷) از انیدریـت تشـکیل شـده اسـت و بجـز رخسـاره‌های غالـب انیدریتـی (MF-10 یـا EF-1)، رخسـاره‌های از نـوع MF-6 بـا ضخامـت ناچیـز سـازنده ایـن واحـد جریانـی هسـتند. واحـد جریانـی ۲ مطابـق بـا دسـته رخسـاره HST و زون انیدریتـی A1 در سـازند سـورمه اسـت. تخلخـل تخمینـی در ایـن واحـد جریانـی از ۰ تـا ۱۳٪ تغییـر می‌کنـد امـا تراوایـی در آن صفـر اسـت.

واحـد جریانـی ۳: ایـن واحـد مخزنـی (بـا ضخامـت متوسـط m ۱۲) بـا لیتولـوژی دولومیـت مشـخص می‌شـود و بـه ترتیـب فراوانـی از رخسـاره‌های MF-8، MF-9، MF-6، MF-MF-2 و MF-7 تشـکیل شـده اسـت. رخسـاره‌های الکتریکـی در ایـن واحـد جریانـی عمدتـاً EF-3 می‌باشـد. ایـن رخسـاره‌ها در زیرمحیط‌هـای مختلفـی از جملـه پشـته‌های اووئیـدی، لاگـون و پهنـه جـزر ومـدی نهشـته شـده‌اند. ایـن واحـد جریانـی نسـبت بـه واحـد جریانـی ۱ کیفیـت مخزنـی ضعیـف تـری دارد کـه علـت آن فراوانـی رخسـاره‌های لاگونـی در ایـن واحـد جریانـی اسـت. واحـد جریانـی ۳ مطابـق بـا زون دولومیتـی A1 در سـازند سـورمه اسـت. تخلخـل مغـزه در ایـن واحـد جریانـی از ۵/۴ تـا ۱۷/۹٪ و تراوایـی در محـدوده ۲ تـا ۱۵۷۷ md تغییـر می‌کنـد. در مجمـوع ایـن واحـد جریانـی بـه عنـوان یـک زون مخزنـی نرمـال در نظـر گرفتـه می‌شـود.

واحـد جریانـی ۴: ایـن واحـد (بـا ضخامـت متوسـط m ۵) شـبیه بـه واحـد جریانـی ۲ از انیدریـت تشـکیل شـده اسـت واحـد جریانـی ۴ مطابـق بـا دسـته رخسـاره HST سـکانس سـوم و زون انیدریتـی B در سـازند سـورمه اسـت. تخلخـل تخمینـی در ایـن واحـد جریانـی از ۰ تـا ۱٪ تغییـر می‌کنـد و تراوایـی آن صفـر اسـت.

واحـد جریانـی ۵: ایـن واحـد یـک واحـد مخزنـی و دارای لیتولـوژی دولومیـت بـه ضخامـت متوسـط m ۵ اسـت. رخسـاره‌های ایـن واحـد جریانـی بسـیار متنـوع و در عیـن حـال شـبیه بـه واحـد جریانـی ۳ هسـتند. بـه ترتیـب فراوانـی رخسـاره‌های MF-9، MF-6، MF-2 و MF-8 در ایـن واحـد جریانـی شناسـایی شـده‌اند. فـراوان تریـن رخسـاره‌های الکتریکـی در ایـن واحـد جریانـی رخسـاره‌های ۵ و ۶ (EF-5 و EF-6) می‌باشـند. از لحـاظ کیفیـت مخزنـی ایـن واحـد جریانـی بسـیار شـبیه بـه واحـد جریانـی ۳ و از نـوع مخـزن نرمـال اسـت. ایـن واحـد در غالـب دسـته رخسـاره TST سـکانس سـوم (از سـکانس‌های رده چهـارم) در سـازند سـورمه قـرار می‌گیـرد. تخلخـل مغـزه در ایـن واحـد جریانـی از ۳/۴۴ تـا ۲۴/۷۲٪ و تراوایـی در محـدوده ۱/۲۵ تـا ۷۳۸ md تغییـر می‌کنـد. واحـد جریانـی ۵ مطابـق بـا زون دولومیتـی B در سـازند سـورمه اسـت.

واحـد جریانـی ۶: ایـن واحـد سـدی (بـا ضخامـت متوسـط m ۹) شـبیه بـه واحـد جریانـی ۲ و ۴ اسـت. لایـه دولومیتـی در بیـن واحـد انیدریتـی شـامل رخسـاره MF-8 و رخسـاره MF-9 اسـت. واحـد جریانـی ۶ مطابـق بـا بخـش انتهایـی دسـته رخسـاره HST سـکانس دوم و زون انیدریتـی C در سـازند سـورمه اسـت. تخلخـل تخمینـی در ایـن واحـد جریانـی از ۰ تـا ۱۰/۷ و تراوایـی در محـدوده ۰ تـا ۱/۸ md تغییـر می‌کنـد.

واحـد جریانـی ۷: ایـن واحـد مخزنـی بـا ضخامـت متوسـط m ۱۵ از لیتولـوژی غالـب دولومیتـی تشـکیل یافتـه اسـت. رخسـاره‌های ایـن واحـد جریانـی شـبیه بـه واحـد جریانـی ۳ و ۵ اسـت. بـه ترتیـب فراوانـی

رخساره‌های MF-9، MF-2 و MF-4 در این واحد جریانی شناسایی شده‌اند. رخساره‌های الکتریکی ۵ و ۶ (EF-5 و EF-6) در این واحد جریانی گسترش زیادی دارند. این واحد در غالب بخش ابتدایی دسته رخساره HST قرار می‌گیرد و در سایر چاه‌ها قابل تطابق است. تخلخل مغزه در این واحد جریانی از ۴/۱۵ تا ۳۳/۷۶ و تراوایی در محدوده ۱ تا ۱۸۰۹ md تغییر می‌کند. این واحد جریانی با کیفیت ترین واحد جریانی در سازند سورمه است و به عنوان یک مخزن با تراوایی بسیار بالا در نظر گرفته می‌شود. واحد جریانی ۷ مطابق با بخش بالایی زون دولومیتی C در سازند سورمه است.

واحد جریانی ۸: این واحد مخزنی نیز با لیتولوژی دولومیت مشخص می‌شود و به ترتیب فراوانی از رخساره‌های MF-1 و MF-2 تشکیل شده است که غالباً در زیر محیط پشته‌های اووئیدی نهشته شده‌اند. فراوان ترین رخساره‌های الکتریکی در این واحد جریانی رخساره‌های ۳ و ۴ (EF-3 و EF-4) می‌باشند. واحد جریانی ۸ (با ضخامت متوسط ۶ m) مطابق با دسته رخساره TST سکانس دوم و بخش ابتدایی زون دولومیتی C در سازند سورمه است. تخلخل مغزه در این واحد جریانی از ۳/۳۵ تا ۲۶/۲۲٪ و تراوایی در محدوده ۴ تا ۴۶۶۹ md تغییر می‌کند. در مجموع این واحد جریانی به عنوان یک زون مخزنی نرمال در نظر گرفته می‌شود.

واحد جریانی ۹: این واحد سدی دارای ضخامت متوسط ۱۴ m و شبیه به واحد جریانی ۲، ۴ و ۶ است. این واحد جریانی غالباً از انیدریت (MF-10 یا EF-1) و بین لایه‌های نازک از دولومیت تشکیل شده است. لایه دولومیتی در بین واحد انیدریتی شامل رخساره MF-8 و رخساره MF-6 است. واحد جریانی ۹ مطابق با دسته رخساره HST سکانس اول و زون انیدریتی D در سازند سورمه است. تخلخل تخمینی در این واحد جریانی از ۰ تا ۱۰/۷ و تراوایی در محدوده ۰ تا ۳/۷ md تغییر می‌کند.

مقایسه روش‌های تعیین گونه سنگی در بخش بالایی سازند سورمه

در این پژوهش روش‌های تعیین گونه‌های سنگی مختلف برای بخش بالایی سازند سورمه استفاده گردیده است. مقایسه نتایج روش‌های مختلف و کالیبراسیون آنها با آنچه که از مطالعات پتروگرافی به‌دست آمده حاکی از همخوانی نتایج در اغلب روش‌ها با یکدیگر است (شکل ۷). به طوری که رخساره‌های میکروسکوپی با پتانسیل کیفیت مخزنی بالا (رخساره‌های کمربند پشته‌های اووئیدی) با واحدهای مخزنی تفکیک شده از روش‌های مختلف و گونه‌های سنگی با کیفیت مخزنی بالا مطابقت می‌کنند.

در صورتی که واحدهای جریانی تفکیک شده با استفاده از پارامتر FZI به شکل گروهی بررسی گردند اختلاف چندانی بین آنها وجود ندارد. به طوری که واحدهای جریانی یک (HFU1) و دو (HFU2) (رنگ‌های زرد و نارنجی) در واحدهای جریانی ۲، ۴، ۶ و ۹ تفکیک شده از روش لورنز (که ویژگی سدی دارند) فراوان تر هستند. گونه سنگی پتروفیزیکی ۴ (RT4) نیز در واحدهای جریانی سدی قرار می‌گیرند (جدول ۴). واحدهای جریانی هیدرولیکی دو (HFU2)، سه (HFU3) و چهار (HFU4) (رنگ‌های نارنجی، آبی و سبز) در واحدهای مخزنی ۳، ۵ و ۸ که ویژگی مخزن نرمال دارند غالب هستند. گونه سنگی پتروفیزیکی ۲ (RT2) نیز در واحدهای جریانی مخزنی نرمال فراوان است. واحدهای جریانی ۴ (HFU4)، ۵ (HFU5) و ۶ (HFU6) دارای بالاترین کیفیت در بین واحدهای جریانی به‌دست آمده از روش FZI هستند و فراوانی آنها در واحد مخزنی ۷ به حداکثر می‌رسد. واحد جریانی ۶ (HFU6) در واحد مخزنی ۱ (مخزن نرمال) نیز حضور دارد اما فراوانی آن بسیار کم است. گونه سنگی پتروفیزیکی ۱ (RT1) در واحدهای مخزنی ۱ و ۷ فراوان هستند (جدول ۴). به طور کلی واحدهای جریانی تفکیک شده از روش لورنز به واسطه قدرت تفکیک پایین تر خود در مقیاس میدانی قابل تطابق هستند.

در چاه‌های مورد مطالعه، رخساره‌های الکتریکی ۱ (رنگ آبی در شکل ۷) فاقد کیفیت مخزنی بوده، رخساره‌های الکتریکی ۲ تا ۴ (رنگ سبز تیره و روشن در شکل ۷) انواع با کیفیت متوسط و رخساره‌های ۵ و ۶ (رنگ زرد و قرمز) دارای بهترین کیفیت مخزنی هستند (شکل، ۷). رخساره‌های الکتریکی ۱ معادل با رخساره‌های انیدریتی محیط بالای پهنه جزر و مدی (یا رده پتروفیزیکی ۴ (RT4) در نمودار لوسیا)، رخساره‌های الکتریکی ۲ تا ۴ معادل با رخساره‌های مربوط به کمربند لاگون (یا رده پتروفیزیکی ۲ (RT2) و رخساره‌های الکتریکی ۵ و ۶ معادل با کمربند رخساره‌ای پشته‌های اووئیدی و یا گونه سنگی پتروفیزیکی ۱ (RT1) هستند (شکل ۷). در این مطالعه روش‌های مختلف تعیین گونه سنگی با هدف تفکیک انواع گونه‌های سنگی از جنبه کیفیت مخزنی انجام شده است اما با بررسی نتایج حاصل از این مطالعه بهترین روش‌ها برای تعیین گونه‌های سنگی در این مخزن تفکیک واحدهای جریانی بر مبنای داده‌های پیوسته لاگ توسط دو روش استفاده از پارامتر FZI (روش آمافوله) و نمودار اصلاح شده چینه نگاری لورنز معرفی شده است. با توجه به اینکه داده‌های لاگ به طور پیوسته از تمامی محدوده مخزن برداشت می‌گردند، لذا این دو روش بهترین و کامل‌ترین روش‌ها در تفکیک گونه‌های سنگی در مخزن سورمه هستند که به ترتیب گونه‌های سنگی را در دو مقیاس کوچک و بزرگ تفکیک می‌کنند و می‌توان از این دو روش در چاه‌هایی که فاقد مغزه هستند جهت شناخت بهتر مخزن و برای بهره برداری بیشتر استفاده کرد.

از این‌رو در این مطالعه با تلفیق روش‌های مختلف در تعیین گونه سنگی و با مبنا قرار دادن روش لورنز می‌توان سه گونه سنگی نهایی را در بخش بالایی سازند سورمه به شرح زیر تفکیک کرد (جدول ۵):

گونه سنگی ۱: این گونه سنگی دارای لیتولوژی دولومیت بوده و رخساره‌های آن به ترتیب فراوانی در زیرمحیط‌های پشته‌های اووئیدی، لاگون و پهنه جزر و مدی نهشته شده‌اند. واحدهای جریانی دو (HFU2)، سه (HFU3) و چهار (HFU4) در این گونه سنگی غالب هستند. فراوان ترین رخساره‌های الکتریکی در این گونه سنگی رخساره‌های ۳ تا ۶ (EF-6، EF-5، EF-4، EF-3) می‌باشند. گونه سنگی پتروفیزیکی ۲ (RT2) و ۳ (RT3) نیز در در این گونه سنگی فراوان است. این گونه سنگی غالباً در دسته رخساره TST در سازند سورمه قرار می‌گیرد. در مجموع این گونه سنگی به عنوان یک گونه مخزنی با کیفیت خوب در نظر گرفته می‌شود و معادل با واحد جریانی از نوع مخزن نرمال هستند.

گونه سنگی ۲: این گونه سنگی نیز از لیتولوژی غالب دولومیتی تشکیل یافته است. زیر محیط پشته‌های اووئیدی در این گونه سنگی گسترش زیادی دارد. فراوانی واحدهای جریانی ۴ (HFU4)، ۵ (HFU5) و ۶ (HFU6) در این گونه سنگی به حداکثر می‌رسد. فراوان ترین رخساره‌های الکتریکی در این گونه سنگی رخساره‌های ۴ و ۶ (EF-4، EF-6) می‌باشند. گونه سنگی پتروفیزیکی ۱ (RT1) در این گونه سنگی فراوان است.

جدول ۵- گونه‌های سنگی نهایی تعیین شده در بخش بالایی سازند سورمه با تطبیق روش‌های به‌کار رفته در این مطالعه

گونه سنگی نهایی	واحد جریانی لورنز	واحد جریانی آمافوله	رخساره الکتریکی	گروه پتروفیزیکی	کمربند رخساره‌ای	تخلخل (٪)	تراوایی (md)
۱	واحد مخزنی نرمال: ۱، ۳، ۵، ۸	۲-۴	۳ الی ۶	۲ و ۳	پشته‌های اووئیدی، لاگون، پهنه جزر و مدی	۱۳/۶۹	۷۰/۵
۲	واحد مخزنی با تراوایی بسیار بالا: ۷	۴-۶	۴ و ۶	۱	پشته‌های اووئیدی	۲۰/۴۸	۲۴۴
۳	واحد سدی: ۲، ۴، ۶، ۹	۱-۲	۱	غیر مخزنی (۴)	پهنه بالای جزر و مدی	۱/۴	۰/۴۸

این گونه سنگی در غالب بخش ابتدایی دسته رخساره HST قرار می‌گیرد. این گونه سنگی به عنوان یک مخزن با کیفیت بسیار خوب در نظر گرفته می‌شود و معادل با واحد جریانی مخزنی با تراوایی بسیار بالا در بخش بالایی سازند سورمه است.

گونه سنگی ۳: این گونه سنگی از لیتولوژی انیدریت و رخساره انیدریتی مربوط به بخش‌های بالای پهنه جزر و مدی در آن فراوان است. واحدهای جریانی یک (HFU1) و دو (HFU2) در در این گونه سنگی گسترش زیادی دارد. رخساره‌های الکتریکی ۱ (EF-1) در این گونه سنگی فراوان است. گونه سنگی پتروفیزیکی ۴ (RT4) در گونه سنگی قرار می‌گیرد. این گونه سنگی مربوط به بخش انتهایی دسته رخساره HST می‌باشد. این گونه سنگی به عنوان یک واحد فاقد کیفیت مخزنی در نظر گرفته می‌شود و معادل با واحد جریانی سدی در نظر گرفته می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، گونه‌های سنگی و واحدهای جریانی بخش بالایی سازند سورمه در یکی از میادین بخش مرکزی خلیج فارس توسط روش‌های مختلف انجام شده است که نتایج آن به شرح زیر می‌باشد:

۱- مطالعه پتروگرافی مقاطع نازک میکروسکوپی در چاه مورد مطالعه منجر به شناسایی ۱۰ رخساره میکروسکوپی در این سازند گردید. رخساره‌های محیط پشته‌های اووئیدی به دلیل تشکیل در محیط پر انرژی و حفظ شدن تخلخل اولیه بین دانه‌ای، کیفیت مخزنی بهتری را به‌دست آورده‌اند. رخساره‌های بالای جزر و مدی به دلیل حضور انیدریت متراکم دارای بدترین کیفیت مخزنی هستند.

۲- به منظور تعیین گونه‌های سنگی داده‌های تخلخل و تراوایی مربوط به رخساره‌های این سازند در نمودار پتروفیزیکی لوسیا رسم گردیدند. با تطبیق رخساره‌های مورد مطالعه با رده‌های پتروفیزیکی، چهار گونه سنگی (RT1 الی RT4) در سازند سورمه شناسایی شد. گونه سنگی ۱ (رخساره‌های گرینستونی) در این سازند دارای بالاترین کیفیت مخزنی و گونه سنگی چهار (رخساره‌های انیدریتی) فاقد کیفیت مخزنی هستند.

۳- روش خوشه‌سازی MRGC منجر به شناسایی ۶ رخساره الکتریکی شده است. این بررسی نشان داد رخساره الکتریکی ۱ معادل با رخساره‌های انیدریتی و فاقد کیفیت مخزنی، رخساره‌های الکتریکی ۲ تا ۴ معادل با انواع رخساره‌های با کیفیت مخزنی متوسط (رخساره‌های لاگونی و پهنه جزر و مدی) و رخساره‌های ۵ و ۶ دارای بهترین کیفیت مخزنی (رخساره‌های پشته‌های اووئیدی) هستند.

۴- روش استفاده از پارامتر FZI بر روی داده‌های پیوسته تخمینی تخلخل-تراوایی منجر به شناسایی ۶ واحد جریان هیدرولیکی (HFU1 الی HFU6) در سازند سورمه شده است. از واحدهای جریانی ۱ به ۶ میزان تراوایی افزایش می‌یابد.

۵- روش SMLP منجر به شناسایی ۹ واحد جریانی مخزنی، سدی و تله‌ای در بخش بالایی سازند سورمه (عرب) شده است. واحدهای جریانی شناسایی شده شامل چهار زون مخزنی نرمال، یک زون مخزنی بسیار با کیفیت و چهار زون سدی است.

۶- مقایسه نتایج روش‌های مختلف مطالعه شده در تعیین گونه‌های سنگی و واحدهای جریانی حاکی از همخوانی نسبی نتایج با یکدیگر است. روش استفاده از پارامتر FZI و روش SMLP بر اساس داده‌های پیوسته تخمینی تخلخل و تراوایی بهترین و کامل ترین تفکیک را به ترتیب در دو مقیاس کوچک و بزرگ را در این مخزن فراهم می‌کنند. با تلفیق روش‌های مختلف در تعیین گونه سنگی و با مبنا قرار دادن روش لورنز می‌توان سه گونه سنگی نهایی را در بخش بالایی سازند سورمه تفکیک کرد.

تشکر و قدردانی

نویسندگان مقاله از اداره پژوهش و فناوری شرکت نفت فلات قاره به سبب حمایت از این تحقیق و از اداره زمین‌شناسی به دلیل در اختیار قرار دادن داده‌ها

سپاسگزاری می‌نمایند. همچنین از واحد پتروفیزیک پژوهشگاه صنعت نفت به سبب در اختیار قرار دادن اطلاعات داده‌های تخلخل و تراوایی تخمینی تشکر می‌گردد.

مراجع

[1]. Hollis C., Vahrenkamp V., Tull S., Mookerjee A., Taberner C., and Huang Y., "*Pore system characterisation in heterogeneous carbonates: An alternative approach to widely-used rock-typing methodologies",* Marine and Petroleum Geology, Vol. 27, No. 4, pp. 772–793, 2010.

[2]. Skalinski M. and Kenter J. A. M., "*Carbonate petrophysical rock typing: integrating geological attributes and petrophysical properties while linking with dynamic behaviour*", Geological Society, London, Special Publications, Vol. 406, pp. 229–259, 2014.

[3]. Ali-Nandalal J. and Gunter G. W., "*Characterizing reservoir performance for the Mahogany 20 Gas Sand based on petrophysica*

l and rock typing methods", SPE 81048, Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conferece, Trinidad, West Indies, 2003.

[4]. Perez H. H., Datta-Gupta A., and Mishra S., "*The role of electrofacies, lithofacies, and hydraulic flow units in permeability predictions from well logs: A comparative analysis using classification trees*", SPE Reservoir Evaluation & Engineering, Vol. 8, pp. 143–155, 2005.

[5]. Amaefule J. O., Altunbay M., Tiab D., Kersey D. G., and Keelan D. K., "*Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells*", SPE 26436, 1993.

[6]. Kadkhodaie-Ilkhchi A. and Amini A., "*A fuzzy logic approach to estimating hydraulic flow units from well log data: a case study from the Ahwaz oil field, south Iran*", Journal of Petroleum Geology, Vol. 32, No. 1, pp. 67–78, 2009.

[7]. Gunter G. W., Finneran J. M., Hartmann D. J., and Miller J. D., "*Early determination of reservoir flow units using an integrated petrophysical method*", SPE 38679, 1997.

[8]. Guo G., "*Rock typing as an effective tool for permeability and water-sauration modeling: a case study in a clastic reservoir in the Oriente Basin*", SPE 97033, 2005.

[9]. Kadkhodaie A. and Kharrat R., "R*ock typing of Salman field*". Kish Petrolum Engineering Report for IOOC, Unpublished report. pp. 213, 2013.

[10]. Alsharhan A. S., "*Petroleum systems in the Middle East*", Geological Society of London, Vol. 392, pp. 361–408, 2014.

[11]. Ghazban F., *Petroleum Geology of the Persian Gulf*, Tehran University Press, 2007.

[12]. Dunham R., "*Classification of carbonate rocks according to depositional – texture. In: Ham W. E. (Eds.), Classification of carbonate rocks*", American Association of Petroleum Geologist Memoir, Vol. 1, pp. 108–121. 1962.

[13]. Lucia F. J., *Carbonate reservoir characterization*, Springer-Verlag, 1999.

[14]. Alsharhan A. S. and Nairn A. E. M., "*Sedimentary Basins and Petroleum Geology of the Middle East*", Elsevier Science, 1997.

[15]. IOOC/TEC, Geo-Science Studies of Reshadat Field (Renovation and Development Project), Interim Report

No. 4.1, pp. 155. 2006.

[16]. Alsharhan A. S. and Whittle G. L., "*Carbonate-evaporite sequences of the Late Jurassic, southern and south-western Persian Gulf*", American Association of Petroleum Geologist Bulletin", Vol. 79, pp. 1608–1630, 1995.

[17] Daraei M., Rahimpour-Bonab H., and Fathi N., "*Factors shaping reservoir architecture in the Jurassic Arab carbonates: A case from the Persian Gulf*", Journal of Petroleum Science and Engineering,Vol. 122, pp. 187-207 .

[۱۸]. فتحی ن.، رحیم پور بناب ح.، دارایی م. و اسعدی ع.، "عوامل کنترل کننده کیفیت مخزنی سازند عرب در میدان نفت سنگین فردوسی در بخش دور از ساحل خلیج فارس، مجله پژوهش‌های چینه نگاری و رسوب شناسی"، دوره ۵۴، شماره ۱، صفحات ۷۸-۵۹، ۱۳۹۳.

[19] Wilson J. L., *Carbonate Facies in Geologic History*, Springer, 1975.

[20] Flügel E., "*Microfacies analysis of limestone: analysis*", Interpretation and Application, 2nd ed., Springer , 2010.

[21]. Esrafili-Dizaji B. and Mehrabi H., "*Facies analysis of Hith and Arab Formations in the Reshadat Field*", IOOC Unpublished Report, 2014.

[22]. Ye S. J. and Rabiller P., *A new tool for electro-facies analysis: multi-resolution graph-based clustering*, 41st Annual Logging Symposium, SPWLA, Houston, TX, 2000.

[23]. Tavakoli V. and Amini A., "*Application of multivariate cluster analysis in logfacies determination and reservoir zonation, case study of Marun Field, south of Iran*", Journal of Sciences University of Tehran, Vol. 32, No. 2, pp 69–75, 2006.

[24]. Lucia F. J., "*Rock fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization*", American Association of Petroleum Geologist Bulletin, Vol. 79, pp. 1275–1300, 1995.

[25]. Prasad M., "*Velocity-permeability relations within hydraulic units*", Geophysics, Vol. 68, pp. 108–117, 2003.

[26]. Rahimpour-Bonab H., Enayati-Bidgoli A. H., Navidtalab A., Mehrabi H., "*Appraisal of intra reservoir barriers in the Permo-Triassic successions of the Central Persian Gulf*", Offshore Iran. Geologica Acta, Vol. 12, pp. 87–107, 2014.

[27]. Svirsky D., Ryazanov A., Pankov M., Corbett P., and Posysoev A., "*Hydrolic flow units resolve reservoir de-scripton challenges in a Siberian oil field*", SPE 87056, 2004.

[28]. Gomes J. S., Ribeiro M. T., Strohmenger C. J., Negahban S., and Kalam M. Z., "*Carbonate reservoir rock typing"*, The link between geology and SCAL, SPE 118284, 2008.

[29] Winland H. D., *Oil accumulation in response to pore size changes*, Weyburn Field, Saskatchewan. Amoco Production Research Report No. F72-G-25, 1972.