

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

محمدعلی صالحی^{۱*}، سجاد کاظم شیرودی^۲، سیدرضا موسوی حرمی^۳، محمد غفوری^۳ و غلامرضا لشکری پور^۳

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

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

۳- اداره زمین شناسی 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 چین‌نگاری (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. همچنین، 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

مقدمه

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 A، A1، B، و D تقسیم بندی شده است که واحدهای A، A1، B و D به ترتیب نازک‌ترین (۳ m) و ضخیم‌ترین (۱۶ m) واحد را تشکیل می‌دهند (شکل ۲).

تعیین گونه‌های سنگی^۱ 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^۲ 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^۳ 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^۴ 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

1. Rock Type

2. Petrophysical Rock Types

3. Flow Zone Indicator (FZI)

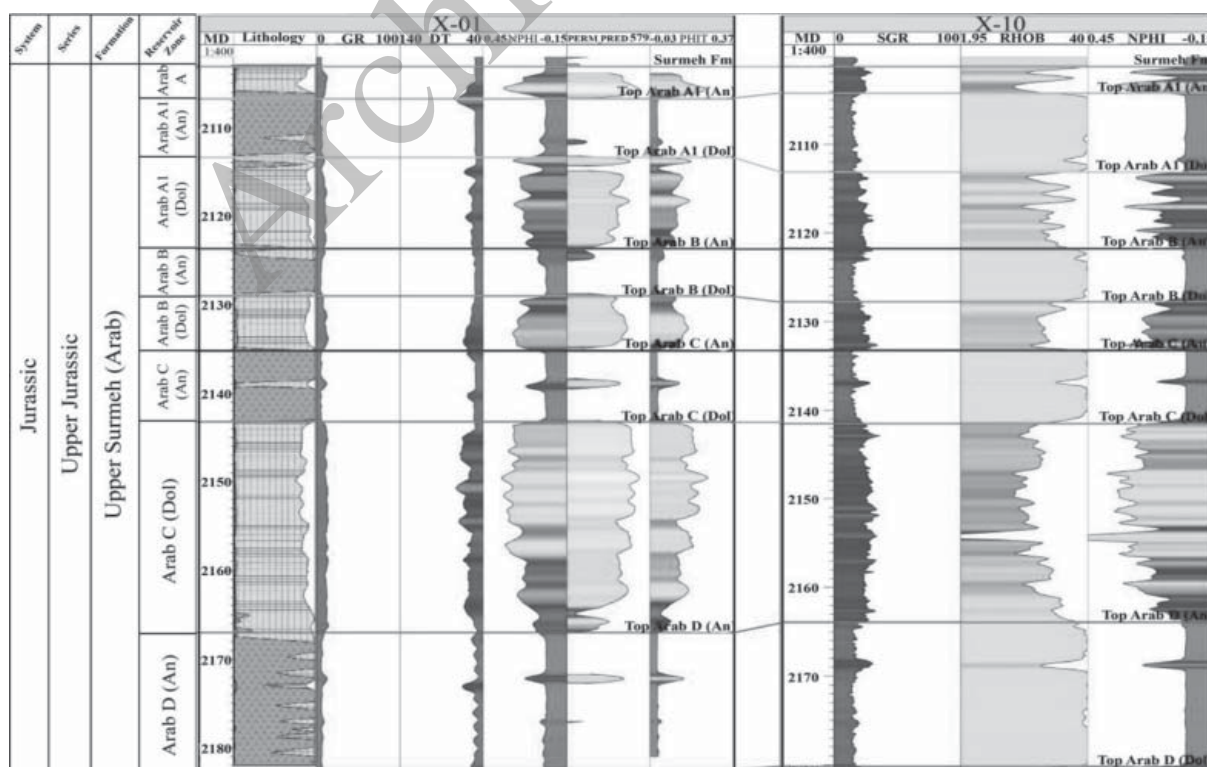
4. Stratigraphic Modified Lorenz Plot (SMLP)

Era	System / Period		Series	Group	Formation		
	Quaternary	Tertiary					
Cenozoic	Tertiary	Neogene	Pliocene - Oligocene	Fars	Alluvium / Marine Sed's Bakhtyar Aghajari Mishan Gachsaran Zahedi		
			Paleogene	Paleocene - Eocene	Hase	Jahrum Rus Sachun eq Radhuma Simsina	
	Cretaceous	Upper			Aruma	Gurpi Shargi Ilam Halul	
			Lower	Wasse	Mishrif Khatiyah Maudud		
	Jurassic	Malm		Khamrni	Thamama	Kazhdumi Nahr Umr Daryan Shuaiba Hawar Kharab Yamama Sulsiy	
			Riyadh		Fahliyan Sulsiy Hith		
	Paleozoic	Triassic	Liasic	Kazran - Jahran	Tuwaiq	Surmeh	Arab-A/A1 Arab-B Arab-C Arab-D Darb Diyab U Araaj Uwainat L Araaj Izhara
						Dogger	Neyriz Kangan-Dashtak Dalan
	Paleozoic	Permian	Dev.-Carbon	?	?	?	?
Prec.	Ordovician	Cambrian	?	?	?	Crystalline Basement ?	

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 ژئولوگ 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-10 و X-1 (در این مطالعه)



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

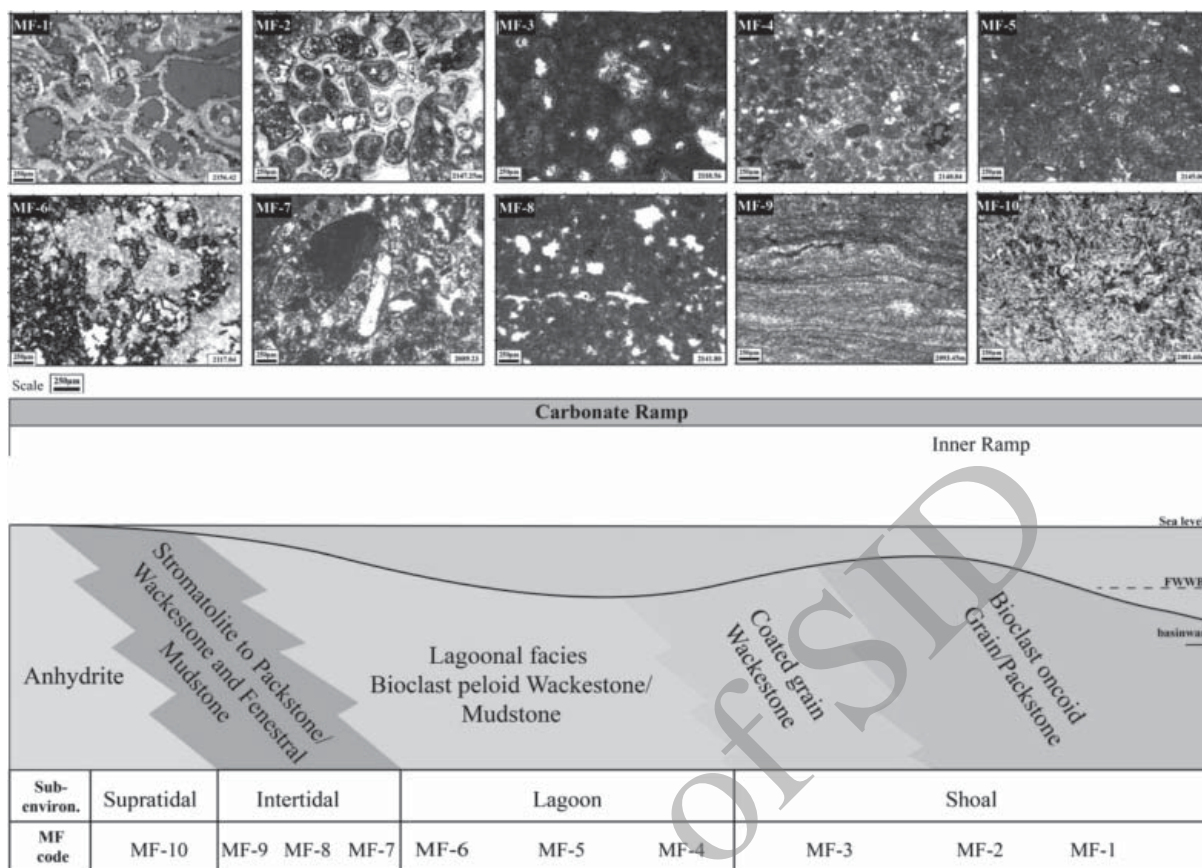
ژوراسیک پسین نهشته شده‌اند [۱۰، ۱۸].

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^۱ 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 دیاژنی شناسایی شده در سازند سورمه (عرب) در چاه X-10 (در این مطالعه)

کد ریز رخساره	نام ریز رخساره	زیر محیط رسوبی	فرآیندهای دیاژنی
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 میکروسکوپی اقتباس از [۲۱])

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 سلسله‌مراتبی با تعداد خوشه‌ها از ۶، ۱۰ و ۱۳ خوشه به دست آمد. مدل ۶ خوشه‌ای با توجه به اینکه تفکیک قابل قبولی از داده‌های گاما و چگالی را به وجود 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.

دیاژنز

از آنجائی که 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

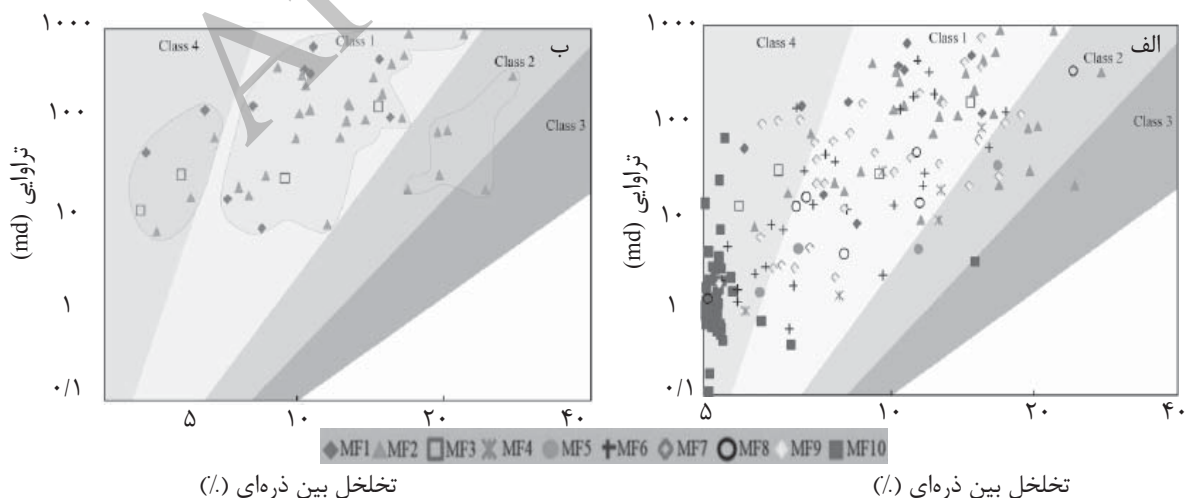
جدول ۲- رخساره‌های الکتریکی تعیین شده در سازند سورمه با استفاده از داده‌های لاگ، چاه X-10 (در این مطالعه)

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

تعیین گونه‌های سنگی به روش دسته‌بندی لوسیا^۱

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 به دست 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 کمر بند رخساره‌ای پشته‌های اووئیدی هستند در محدوده رده‌های مختلف پراکنده هستند (شکل ۴ ب). پراکندگی مذکور اثرات دیانز 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) پایین‌ترین 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 به عنوان رده چهار در نظر گرفته شده‌اند. ب) رخساره‌های یک تا سه در محدوده رده‌های مختلف پراکنده‌اند.

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-2 و MF-1	۱
۲	وکستون/مادستون	۱۳/۶۹	۷۰/۵	MF-6, MF-9 الی MF-3	۳ و ۲
۳	استروماتولیت تا پکستون/وکستون	۱۳	۲۳	MF-8 و MF-7	۳ و ۲
۴	انیدریت	۱/۴	۰/۴۸	MF-10	غیر مخزنی

واحدهای جریان

به صورت روبرو محاسبه می‌گردد: $\varepsilon = \phi / (1 - \phi)$ ؛
مقادیر RQI و FZI می‌توانند با استفاده از معادلات روبرو محاسبه شوند:

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

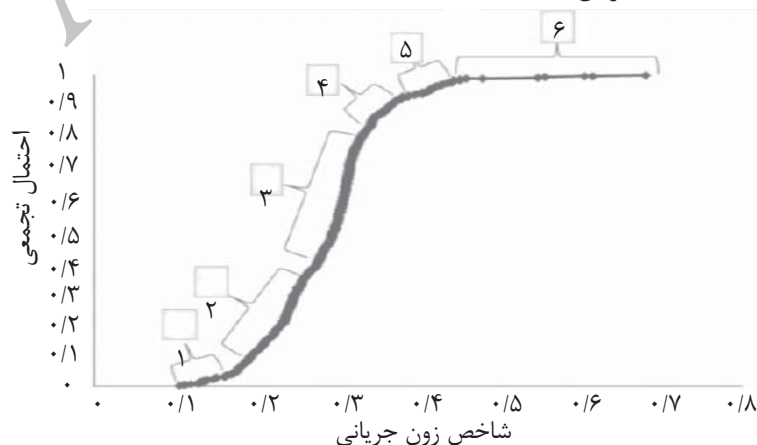
$$FZI = (0.0314/\varepsilon) \sqrt{(k/\phi)} RQI / \varepsilon$$

که در آن k تراوایی به میلی داریسی و ϕ تخلخل کسری است. سنگ‌های با محدوده باریکی از مقادیر FZI به یک واحد جریان 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 جریان 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 جریان (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).

تفکیک گونه‌های سنگی بر اساس مفهوم واحدهای جریان روشی است که بطور گسترده‌ای در توصیف مخزن استفاده شده است (برای مثال [۵]، [۶]، [۲۵-۲۶]). در این مطالعه به منظور تعیین واحدهای جریان 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] به کار 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 $\text{Log RQI} = \text{Log FZI} + \text{Log } \varepsilon$ ؛ که در آن ε یا PMR^۱



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 داده های تخمینی تراوایی 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

لورنز	Cum. /PHIH	Cum. /KH	PHIH / KH	PHIH / KH	KH	R35	LOG R35	FZI HFU	FZI	ε	RQI	گروه پتروفیزیکی لوسیا (RT)	RPS	تخلخل (%)	تراوایی (md)	عمق (m)
۱	۷/۵۸	۱۴/۷۵	۰/۰۰۸۹	۰/۰۵۷۳	۰/۰۰۱۴۰	۰/۷۵۸۶	-۱/۱۲۰۰	۲	۰/۷۹۱۳	۰/۰۶۸۸	۰/۰۵۴۴	۳	۱۰/۰۸	۹/۲۰	۰/۹۲۸	۲۱۰۰۴۰۳
۱	۷/۵۸	۱۴/۷۵	۰/۰۴۲۷	۰/۳۱۵۲	۰/۰۱۷۲	۱/۰۷۷۸	۰/۰۳۲۵	۳	۰/۹۸۳۵	۰/۱۰۱۴	۰/۰۹۹۷	۳	۲/۱۵	۱۱/۲۸	۲/۳۷۳	۲۱۰۰۴۱۹
۱	۷/۵۸	۱۴/۷۵	۰/۰۴۶	۰/۳۳۳۷	۰/۰۱۸۲	۱/۱۸۶۶	۰/۰۷۴۴	۳	۱/۰۰۹۰	۰/۱۲۷۱	۰/۱۴۱۰	۳	۲۴/۳۸	۱۱/۹۴	۲/۹۱۱	۲۱۰۰۴۳۴
۱	۷/۵۸	۱۴/۷۵	۰/۰۳۰۸	۰/۳۳۰۸	۰/۰۱۸۰	۱/۱۶۷۷	۰/۰۶۹۳	۴	۱/۱۴۳۳	۰/۱۳۵۶	۰/۱۵۵۰	۳	۳۳/۶۳	۱۱/۸۴	۲/۷۹۷	۲۱۰۰۴۴۹
۱	۷/۵۸	۱۴/۷۵	۰/۰۲۹۷	۰/۳۲۹۷	۰/۰۱۸۰	۱/۱۶۶۶	۰/۰۶۸۰	۴	۱/۱۳۶۷	۰/۱۳۴۳	۰/۱۵۲۶	۳	۳۳/۵۵	۱۱/۸۰	۲/۷۹۰	۲۱۰۰۴۶۴
۱	۷/۵۸	۱۴/۷۵	۰/۰۲۸۵	۰/۳۲۴۴	۰/۰۱۸۶	۱/۱۴۴۴	۰/۰۹۶۷	۴	۱/۱۴۱۹	۰/۱۳۳۷	۰/۱۵۲۷	۳	۲۶/۸۶	۱۲/۱۸	۳/۳۷۲	۲۱۰۰۴۸۰
۱	۷/۵۸	۱۴/۷۵	۰/۰۳۷۹۲	۰/۳۷۹۲	۰/۰۲۰۷	۱/۵۲۱۲	۰/۱۸۲۲	۴	۱/۱۷۳۵	۰/۱۳۸۷	۰/۱۶۲۷	۳	۳۹/۴۹	۱۳/۵۷	۳/۳۵۸	۲۱۰۰۴۹۵
۱	۷/۵۸	۱۴/۷۵	۰/۰۴۴۴	۰/۴۴۴	۰/۰۲۴۲	۲/۰۱۰۱	۰/۳۰۲۲	۴	۱/۲۵۷۱	۰/۱۵۷۰	۰/۱۹۳۳	۲	۶۸/۳۷	۱۵/۸۶	۱۰/۸۳۱	۲۱۰۰۵۱۰
۱	۷/۵۸	۱۴/۷۵	۰/۰۵۱۵۹	۰/۵۱۵۹	۱/۶۵۰۷	۲/۶۲۸۵	۰/۴۱۹۷	۴	۱/۳۷۵۹	۰/۱۸۸۶	۰/۲۵۹۴	۲	۱۱۵/۶۷	۱۸/۴۶	۲۱/۳۵۰	۲۱۰۰۵۲۵
۱	۷/۵۸	۱۴/۷۵	۰/۰۹۸۳۰	۰/۵۸۸۴	۰/۰۳۲۱	۳/۳۱۵۷	۰/۵۲۰۶	۵	۱/۴۹۱۹	۰/۳۲۶۴	۰/۳۳۷۷	۱	۱۸۲/۶۲	۲۱/۰۵	۳۸/۴۴۴	۲۱۰۰۵۴۱
۱	۷/۵۸	۱۴/۷۵	۰/۰۶۳۵۵	۰/۶۳۵۵	۰/۰۳۴۷	۳/۸۰۶۵	۰/۵۸۰۵	۶	۱/۵۹۱۴	۰/۴۶۶۶	۰/۴۴۴۳	۱	۲۴۹/۴۵	۲۲/۷۴	۵۴/۴۴۲	۲۱۰۰۵۵۶
۱	۷/۵۸	۱۴/۷۵	۰/۰۶۵۱۲	۰/۶۵۱۲	۰/۰۳۵۵	۳/۹۹۰۰	۰/۶۰۱۰	۶	۱/۶۵۱۲	۰/۴۹۴۳	۰/۴۸۵۹	۱	۲۶۲/۴۱	۲۳/۳۰	۶۱/۱۴۵	۲۱۰۰۵۷۱
۱	۷/۵۸	۱۴/۷۵	۰/۰۶۳۵۲	۰/۶۳۵۲	۰/۰۳۴۶	۳/۸۳۰۶	۰/۵۸۳۳	۶	۱/۶۷۴۳	۰/۳۰۳۸	۰/۵۰۸۷	۱	۲۴۲/۰۰	۲۲/۷۳	۵۵/۰۰۱	۲۱۰۰۵۸۶
۱	۷/۵۸	۱۴/۷۵	۰/۰۵۷۸۶	۰/۵۷۸۶	۰/۰۳۱۶	۳/۲۵۴۹	۰/۵۱۲۵	۶	۱/۶۶۰۷	۰/۲۹۴۱	۰/۴۸۸۵	۱	۱۷۵/۵۹	۲۰/۷۰	۳۶/۳۵۳	۲۱۰۰۶۰۲
۱	۷/۵۸	۱۴/۷۵	۰/۰۶۸۱۵	۰/۶۸۱۵	۰/۰۳۶۳	۳/۳۵۷۹	۰/۳۷۲۵	۶	۱/۵۹۳۷	۰/۲۶۱۱	۰/۴۱۶۱	۱	۹۳/۱۰	۱۷/۲۳	۱۶/۰۳۹	۲۱۰۰۶۱۷
۱	۷/۵۸	۱۴/۷۵	۰/۰۳۷۳۲	۰/۳۷۳۲	۰/۰۲۰۴	۲/۴۴۴۳	۰/۱۷۹۰	۵	۱/۴۵۵۶	۰/۳۰۸۱	۰/۳۰۳۰	۳	۳۸/۷۲	۱۳/۳۵	۵۱/۷۰	۲۱۰۰۶۳۲
۱	۷/۵۸	۱۴/۷۵	۰/۰۲۶۷	۰/۲۶۷	۰/۰۱۴۴	۰/۸۸۷۹	۰/۰۷۹۲	۴	۱/۲۶۷۷	۰/۱۵۴۱	۰/۱۹۵۴	۳	۱۱/۹۹	۹/۴۷	۱/۱۳۵	۲۱۰۰۶۴۷
۱	۷/۵۸	۱۴/۷۵	۰/۰۵۲۳	۰/۵۲۳	۰/۰۰۷۲	۰/۳۴۴۶	۰/۶۲۹۶	۳	۱/۰۳۹۱	۰/۱۰۶۶	۰/۱۰۸۷	۴	۱/۰۰	۴/۷۳	۰/۰۴۷	۲۱۰۰۶۶۳
۲	۱/۶۴	۰/۳۴	۰/۰۳۷۵	۰/۰۳۷۵	۰/۰۰۲۰	۰/۰۱۸۶	۰/۱۷۳۰۴	۲	۰/۶۳۳۳	۰/۰۴۹۶	۰/۰۳۱۴	۴	۰/۰۱	۱/۳۴	۰/۰۰۰	۲۱۰۰۶۷۸
۲	۱/۶۴	۰/۳۴	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۳۳	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۲	۰/۱۹۹۳	۰/۰۱۳۶	۰/۰۰۲۷	۴	۰/۰۰	۰/۱۲	۰/۰۰۰	۲۱۰۰۶۹۳
۲	۱/۶۴	۰/۳۴	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۰	۴	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰۰	۲۱۰۰۷۰۸
۲	۱/۶۴	۰/۳۴	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰	۴	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰۰	۲۱۰۰۷۲۳
۲	۱/۶۴	۰/۳۴	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۱۲	۰/۰۰۰۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۰	۱	۰/۰۰۰۰	۰/۰۰۰۴	۰/۰۰۰۰	۴	۰/۰۰	۰/۰۴	۰/۰۰۰	۲۱۰۰۷۳۹

روش لورنز^۱

و ذخیره بسیار پایین یا در حد صفر دارند.

واحدهای جریان 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^۷ شامل ستون لیتولوژی، نمودارهای تخلخل، تراوایی، مقادیر محاسباتی R35، نسبت تراوایی به تخلخل^۸، 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:

$$\text{Log } R35 = 0.732 + 0.588 (\text{Log } k_{\text{air}}) + 0.864 (\text{Log } \phi) \quad (2)$$

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).

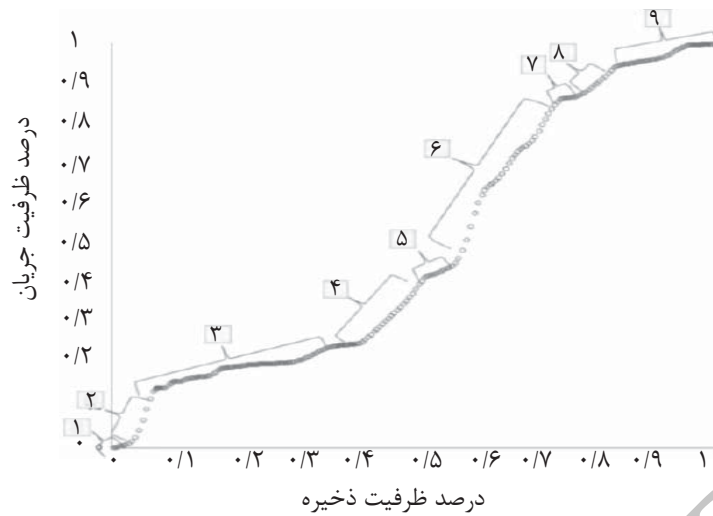
در این مطالعه به جهت اینکه مفهوم زمین شناسی به واحدهای جریانی داده شود ارتباط آنها را با رخساره‌های شناسایی شده در این سازند در چارچوب چینه‌نگاری سکانسی مورد بررسی قرار گرفته است. چینه‌نگاری سکانسی در چاه مورد مطالعه از مطالعات پیشین اقتباس گردیده است [۱۵]. در زیر به تشریح واحدهای جریانی شناسایی شده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

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]).

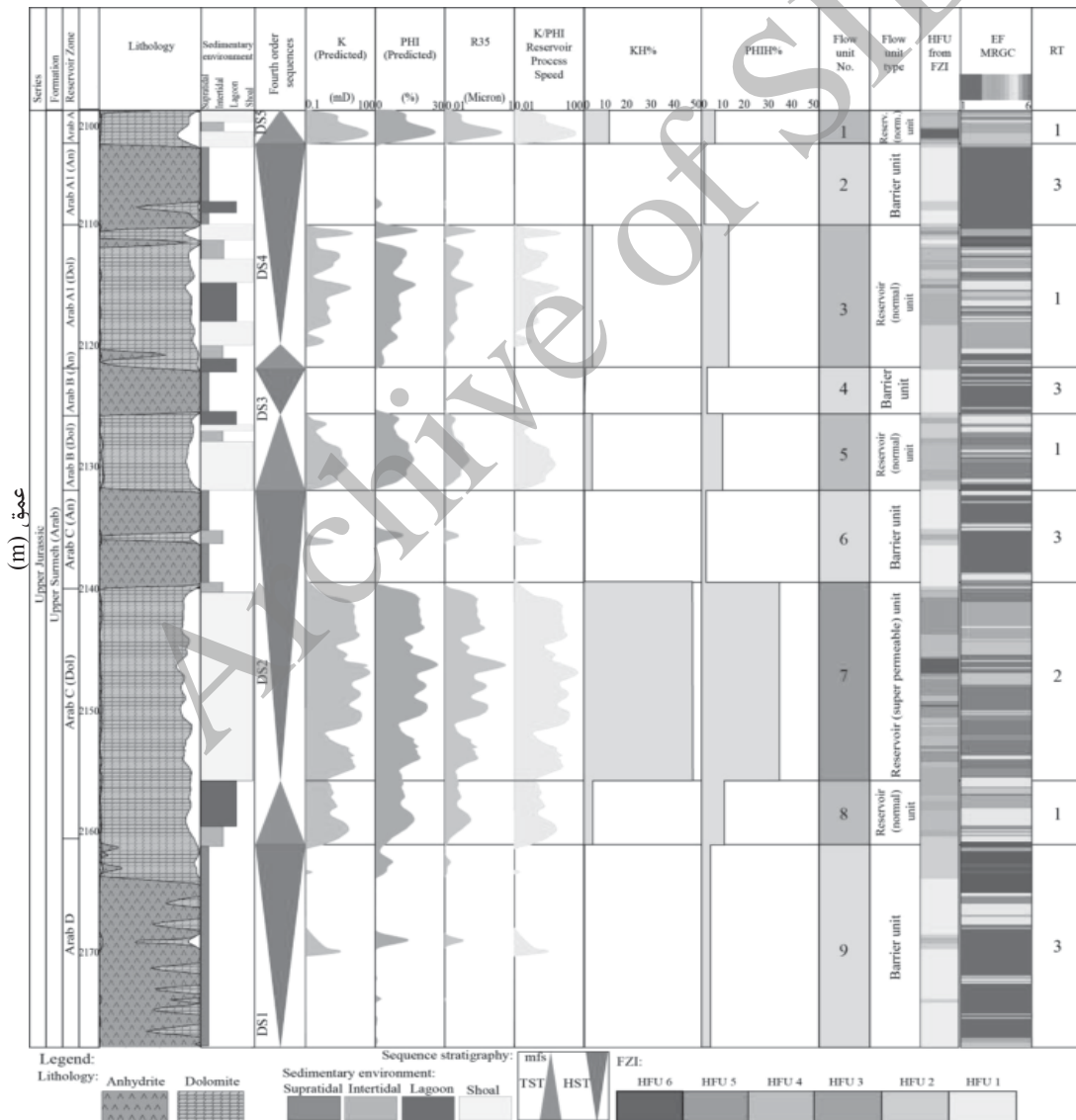
تکنیک نمودار لورنز (SLMP) بر اساس رسم ظرفیت جریانی^۲ مجموع بر حسب ظرفیت ذخیره^۳ مجموع، با حفظ ترتیب چینه شناسی آنها می‌باشد. نقاط عطف در نمودار SLMP، بیانگر تغییرات در خواص جریانی محیط متخلخل است. روش کار تعیین واحدهای جریانی به روش لورنز بدین صورت است که ابتدا تخلخل و تراوایی پیوسته (طول به طول) و نسبت تراوایی به تخلخل (k/ϕ) متناسب در یک نظم چینه‌شناسی مرتب می‌شوند (جدول ۴). سپس، حاصل ضرب تراوایی در عمق مربوطه ($K.h$) و تخلخل در اعماق مربوطه ($\phi.h$) محاسبه گردیده است. مجموع تجمعی داده‌های حاصل ضرب تراوایی در عمق و تخلخل در عمق، محاسبه شده و سپس داده‌های حاصل شده به ۱۰۰٪ نرمال می‌شوند. داده‌های به دست آمده از حاصل ضرب 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^۴، زون‌های سرعت یا گذرگاه‌ها^۵ و بافل‌ها^۶ 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

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 جریان تفکیک شده به روش لورنز در بخش بالایی سازند سورمه (عرب)، چاه X-01



شکل ۷- نیمرخ چین‌نگاری 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 جریان 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)

در مجموع این واحد جریانی به عنوان یک زون مخزنی نرمال در نظر گرفته می‌شود.

واحد جریانی ۴: این واحد (با ضخامت متوسط m ۵) شبیه به واحد جریانی ۲ از انیدریت تشکیل شده است واحد جریانی ۴ مطابق با دسته رخساره HST سکانس سوم و زون انیدریتی B در سازند سورمه است. تخلخل تخمینی در این واحد جریانی از ۰ تا ۱٪ تغییر می‌کند و تراوایی آن صفر است.

واحد جریانی ۵: این واحد یک واحد مخزنی و دارای لیتولوژی دولومیت به ضخامت متوسط m ۵ است. رخساره‌های این واحد جریانی بسیار متنوع و در عین حال شبیه به واحد جریانی ۳ هستند. به ترتیب فراوانی رخساره‌های MF-9، MF-6، MF-2 و MF-8 در این واحد جریانی شناسایی شده‌اند. فراوان ترین رخساره‌های الکتریکی در این واحد جریانی رخساره‌های ۵ و ۶ (EF-5 و EF-6) می‌باشند. از لحاظ کیفیت مخزنی این واحد جریانی بسیار شبیه به واحد جریانی ۳ و از نوع مخزن نرمال است. این واحد در غالب دسته رخساره TST سکانس سوم (از سکانس‌های رده چهارم) در سازند سورمه قرار می‌گیرد. تخلخل مغزه در این واحد جریانی از ۳/۴۴ تا ۲۴/۷۲٪ و تراوایی در محدوده ۱/۲۵ تا ۷۳۸ md تغییر می‌کند. واحد جریانی ۵ مطابق با زون دولومیتی B در سازند سورمه است.

واحد جریانی ۶: این واحد سدی (با ضخامت متوسط m ۹) شبیه به واحد جریانی ۲ و ۴ است. لایه دولومیتی در بین واحد انیدریتی شامل رخساره MF-8 و رخساره MF-9 است. واحد جریانی ۶ مطابق با بخش انتهایی دسته رخساره HST سکانس دوم و زون انیدریتی C در سازند سورمه است. تخلخل تخمینی در این واحد جریانی از ۰ تا ۱۰/۷ و تراوایی در محدوده ۰ تا ۱/۸ md تغییر می‌کند.

واحد جریانی ۷: این واحد مخزنی با ضخامت متوسط m ۱۵ از لیتولوژی غالب دولومیتی تشکیل یافته است. رخساره‌های این واحد جریانی شبیه به واحد جریانی ۳ و ۵ است. به ترتیب فراوانی

واحد جریانی ۱: این واحد مخزنی (با ضخامت متوسط m ۴) در رأس سازند سورمه و در تمامی چاه‌ها مورد مطالعه قابل شناسایی است. لیتولوژی غالب این واحد جریانی دولومیت و اغلب به ترتیب شامل رخساره‌های میکروسکی MF-9، MF-2، MF-8 و MF-8 است. رخساره‌های الکتریکی ۲ و ۳ (EF-2 و EF-3) در این واحد جریانی فراوان است. این واحد جریانی منطبق بر دسته رخساره TST (از سکانس‌های رده چهارم) بوده و مطابق با زون مخزنی A در سازند سورمه است (شکل ۷). تخلخل مغزه در این واحد جریانی از ۱۹ تا ۲۲/۸ درصد و تراوایی در محدوده ۲۰ تا ۳۲ md تغییر می‌کند. در مجموع این واحد جریانی به عنوان یک زون مخزنی نرمال در نظر گرفته می‌شود.

واحد جریانی ۲: این واحد سدی (با ضخامت متوسط m ۷) از انیدریت تشکیل شده است و بجز رخساره‌های غالب انیدریتی (MF-10 یا EF-1)، رخساره‌های از نوع MF-6 با ضخامت ناچیز سازنده این واحد جریانی هستند. واحد جریانی ۲ مطابق با دسته رخساره HST و زون انیدریتی A1 در سازند سورمه است. تخلخل تخمینی در این واحد جریانی از ۰ تا ۱۳٪ تغییر می‌کند اما تراوایی در آن صفر است.

واحد جریانی ۳: این واحد مخزنی (با ضخامت متوسط m ۱۲) با لیتولوژی دولومیت مشخص می‌شود و به ترتیب فراوانی از رخساره‌های MF-8، MF-9، MF-6، MF-2، MF-MF-2، MF-7 و MF-7 تشکیل شده است. رخساره‌های الکتریکی در این واحد جریانی عمدتاً EF-3 می‌باشد. این رخساره‌ها در زیرمحیط‌های مختلفی از جمله پشته‌های اووئیدی، لاگون و پهنه جزر ومدی نهشته شده‌اند. این واحد جریانی نسبت به واحد جریانی ۱ کیفیت مخزنی ضعیف تری دارد که علت آن فراوانی رخساره‌های لاگونی در این واحد جریانی است. واحد جریانی ۳ مطابق با زون دولومیتی A1 در سازند سورمه است. تخلخل مغزه در این واحد جریانی از ۵/۴ تا ۱۷/۹٪ و تراوایی در محدوده ۲ تا ۱۵۷۷ 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 به دست آمده حاکی از همخوانی نتایج در اغلب روش‌ها با یکدیگر است (شکل ۷). به طوری که رخساره‌های میکروسکوپی با پتانسیل کیفیت مخزنی بالا (رخساره‌های کمر بند پشته‌های اوئیدی) 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 به دست 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.

رخساره‌های MF-9، MF-20 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 اوئیدی 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.

بررداری بیشتر استفاده کرد.

از این رو 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-3، EF-4، EF-5، EF-6) می‌باشند. گونه سنگی پتروفیزیکی ۲ (RT2) و ۳ (RT3) نیز 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.

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

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 سد: ۲، ۴، ۹، ۶	۱-۲	۱	غیر مخزنی (۴)	پهنه بالای جزر و مدی	۱/۴	۰/۴۸

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 مینا 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

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 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 میداین 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 به دست 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

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

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 petrophysical and rock typing methods", SPE 81048, Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, 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-saturation modeling: a case study in a clastic reservoir in the Oriente Basin", SPE 97033, 2005.
- [9]. Kadkhodaie A. and Kharrat R., "Rock typing of Salman field". Kish Petroleum 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]. Esrafil-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-scriptor 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.