

تعیین گونه‌های سنگی با استفاده از مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی و بررسی توزیع آن توسط شبیه‌سازی شاخص متوالی، در مخزن سورمه بالایی (عرب) در یکی از میادین نفتی جنوب ایران

فریبا عبدی^۱، محمدرضا کمالی^{۲*}، سیدمحسن آل‌علی^۳ و علی کدخدایی^۴

۱ و ۳- گروه علوم زمین، دانشکده علوم پایه، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم تحقیقات، تهران

۲- پردیس پژوهش و توسعه صنایع بالادستی پژوهشگاه صنعت نفت، تهران

۴- گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز

نویسنده مسئول: Kamalimr@ripi.ir

دریافت: ۹۸/۱/۲۴ پذیرش: ۹۸/۷/۲۲

چکیده

تعیین خواص مخزن نقش کلیدی در تحقق برنامه‌های مدیریت و توسعه بهینه میادین هیدروکربنی را ایفا می‌نماید. برای ایجاد دیدی کلی از مخزن مورد مطالعه تعیین خواص پتروفیزیکی از جمله گونه‌های سنگی مخزن بسیار کارآمد است. روش‌های مختلفی برای تعیین گونه‌های سنگی جهت تقسیم‌بندی سنگ‌های مخزن به نواحی مجزا ارائه شده است که اساس بسیاری از آن‌ها داده‌های تخلخل و تراوایی است. یکی از این روش‌ها روش شاخص زون جریان FZI برای شناسایی واحدهای جریان هیدرولیکی (HFU) است. در این مطالعه گونه‌های سنگی ناپیوسته DRT بر اساس واحدهای جریان هیدرولیکی تعیین گردید و با استفاده از شبیه‌سازی شاخص متوالی، ساختار فضایی آن و توزیع احتمالی این پارامتر در شبکه سه بعدی مخزن، بررسی گردید. در نهایت پنج گونه سنگی ناپیوسته شناسایی گردید که گونه‌های سنگی DRT3 و DRT4 دارای بهترین کیفیت مخزنی و گونه‌های سنگی DRT1 و DRT2 و DRT5 دارای پایین‌ترین کیفیت مخزنی است. در مقطع طولی مخزن مورد مطالعه، در بخش میانی DRT3 گسترش بیش‌تری دارد که نشان‌دهنده کیفیت مخزنی بهتری در این بخش از مخزن نسبت به سایر بخش‌ها است. در مقطع عرضی، در بخش جنوبی و غربی DRT3 و DRT4 با کیفیت مخزنی بالا گسترش دارند ولی در بخش مرکزی و شرقی مخزن در این مقطع گونه‌های سنگی با کیفیت مخزنی پایین‌تری مشاهده می‌گردد. ذکر این نکته ضروری است که مدل‌های ساخته شده با دقت بالایی توزیع پراکندگی گونه‌های سنگی را در مخزن مورد مطالعه نشان می‌دهند.

واژه‌های کلیدی: شاخص زون جریان، واحدهای جریان هیدرولیکی، گونه‌های سنگی ناپیوسته، شبیه‌سازی شاخص متوالی

۱- مقدمه

تزیق موفق، مطالعات و شبیه‌سازی مخزن است (میرزایی پیامن و همکاران، ۲۰۱۸) گونه‌های سنگی نشان‌دهنده چگونگی توزیع و پراکندگی پارامترهای پتروفیزیکی و عامل مهمی جهت توصیف مخازن در مدل‌های سه‌بعدی زمین‌شناسی است (اسکالینسکی و کنتز، ۲۰۱۴). تعیین گونه‌های سنگی فرآیند اختصاص دادن خواص مخزن به رخساره‌های زمین‌شناسی است. در گونه‌های سنگی خصوصیات جریان و ذخیره‌سازی سیال است که اهمیت دارد. بنابراین ممکن است دو رخساره در یک گونه سنگی طبقه‌بندی شوند و یا یک رخساره به دو گونه سنگی تقسیم‌بندی گردد.

مفهوم گونه‌های سنگی اولین بار توسط آرچی (۱۹۵۰) ارائه شد و به واحدهای سنگی از مخزن اطلاق می‌شود که به دلیل داشتن تاریخچه رسوبی و دیاژنزی یکسان دارای خواص مخزنی (رابطه تخلخل - تراوایی، فشار

ایران با داشتن ۹/۳٪ نفت قابل استحصال و ۱۸/۲٪ گاز قابل برداشت جهان دارای رتبه اول از نظر مجموع ذخایر هیدروکربنی قابل استفاده در دنیاست. مخازن کربناته ایران با توجه به پیچیدگی‌های مخزنی و زمین‌شناسی، خواص مخزنی ویژه‌ای دارند که مدیریت و توسعه بهینه این مخازن، مطالعه جامع و همه‌جانبه آن‌ها را ضروری می‌کند. جهت توسعه موثر یک میدان نفتی توصیف یکپارچه مخزن ضروری است که برای تحقق این امر مطالعه و تعیین خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن از جمله تعیین گونه‌های سنگی ناپیوسته بسیار کارآمد است.

تعیین گونه‌های سنگی بر اساس ویژگی‌های پتروفیزیکی و زمین‌شناسی از مهم‌ترین اهداف در مطالعه مخازن است. شناسایی گونه‌های سنگی پتروفیزیکی در مخازن یکی از مهم‌ترین داده‌های ورودی برای حفاری، تولید و

الکتریکی اشاره نمود. استفاده از روش‌های هوشمند در کنار این روش‌ها در تعیین گونه‌های سنگی و بررسی ویژگی‌های مخزن کمک موثری می‌نماید (کدخدایی، ۱۳۹۷).

در این مطالعه با استفاده از مفهوم واحدهای هیدرولیکی جریان (HFU)^۱ گونه‌های سنگی در سازند سورمه بالایی (عرب) تعیین و جهت بررسی توزیع فضایی این پارامتر از روش شبیه‌سازی شاخص متوالی^۲ (SIS) استفاده است.

۲- زمین‌شناسی منطقه

مخزن مورد مطالعه در این پژوهش، یکی از مهم‌ترین مخازن نفتی خلیج فارس است. حوضه خلیج فارس از نظر منابع هیدروکربنی، غنی‌ترین حوضه هیدروکربنی جهان است که تقریباً ۶۰ درصد نفت جهان و ۴۰ درصد ذخایر گاز جهان را دربردارد. این حوضه در محدوده‌ای از خشکی‌های شرق عراق، جنوب و جنوب‌غرب ایران، شرق عربستان و سواحل امارات متحده عربی، قطر، بحرین و کویت قرار گرفته و حاوی تعداد زیادی از میادین نفتی و گازی است (خداویسی، ۱۳۹۱).

پلت‌فرم کربناته ناحیه خلیج فارس در طی دوران ژوراسیک و کرتاسه به دلیل غنای بالای منابع هیدروکربنی از اهمیت زیادی برخوردار است. به طور کلی سازندهای ژوراسیک در خلیج فارس دارای پتانسیل نفتی بالایی هستند چرا که این سازندها شامل سنگ‌های منشاء خوب و سنگ مخرن‌های آهکی با تراوایی و تخلخل بالا هستند که در زیرپوش‌سنگ‌های عالی قرار گرفته‌اند. وجود ساختارهای چین‌خورده در این سازندها، تجمعات عظیم منابع هیدروکربنی را ممکن می‌سازند (ربانی، ۱۳۹۲).

سکانس رسوبی ژوراسیک در شمال خلیج فارس از دو رخساره متفاوت تشکیل شده است. این رخساره‌ها می‌توانند به دو واحد عمده تقسیم شوند:

- ۱- نهشته‌های محیط خشکی و حد واسط خشکی تا رسوبات آب‌های کم عمق
- ۲- رسوبات دریای آزاد (سازند سورمه)

موئینه و درجه اشباع آب) مشابهی در بالای سطح آب آزاد مخزن هستند (گانتز و همکاران، ۱۹۹۷).

مطالعات تعیین گونه‌های سنگی ابتدا بر اساس مطالعات مغزه و پتروگرافی در مخازن ماسه‌سنگی بود (پوراس و همکاران، ۱۹۹۹؛ داویس و همکاران، ۱۹۹۶) در مطالعات انجام شده بعدی (آپلین و همکاران، ۲۰۰۲؛ علی ناندال و گانتز، ۲۰۰۳؛ آکوستا و همکاران، ۲۰۰۵؛ راشینگ و همکاران، ۲۰۰۸) مبنای تعیین گونه‌های سنگی بر پایه پارامترهای تخلخل، تراوایی، اشباع آب، نشانگر زون جریان، مفاهیم رخساره الکتریکی و تعیین ویژگی‌های سیستم منافذ بوده است.

از جدیدترین مطالعات انجام شده در این زمینه در ایران می‌توان به پژوهش انجام شده توسط قره‌چلو و همکاران، (۲۰۱۸) اشاره نمود که در این مطالعه، گونه‌های سنگی جهت زون‌بندی در مخزن کربناته - آواری آسماری، تعیین گردیدند. از دیگر پژوهش‌ها می‌توان به مطالعات بیرانوند و کمالی (۲۰۰۴)؛ تقوی و همکاران (۲۰۰۷)؛ رحیم‌پور بناب و همکاران (۲۰۱۲)؛ دوستی ایرانی و همکاران (۱۳۹۴)؛ ایگدر (۱۳۹۴)؛ سلیمانی و همکاران (۱۳۹۵) اشاره نمود. در مطالعات و تحقیقات انجام شده پیش‌تر به موضوع تعیین گونه‌های سنگی براساس واحدهای جریان هیدرولیکی از روش‌های مختلف در مخازن هیدروکربنی پرداخته شده است.

در این پژوهش، پس از شناسایی واحدهای جریان هیدرولیکی در مخزن مورد مطالعه از دو روش آنالیز هیستوگرام و نمودار احتمال نرمال، گونه‌های سنگی ناپیوسته تعیین گردید که با مدل‌سازی سه‌بعدی، ساختار فضایی این پارامترها در شبکه سه‌بعدی مخزن و در هر یک از سلول‌های شبکه‌بندی مخزن و در هر یک از زون‌های مخزن بطور مجزا مشخص گردید که جهت پیش‌بینی گسترش و توزیع تعبیرات این پارامترها در سراسر مخزن حتی در مناطقی که داده کافی در دسترس نمی‌باشد جهت درک بهتر و دقیق‌تر از ساختار، عمق و گسترش لایه‌های مخزنی و تعیین بهترین مکان‌ها برای حفاری و تولید هیدروکربن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

از روش‌های رایج برای تعیین گونه‌های سنگی می‌توان به روش‌های: واحدهای جریان هیدرولیکی، واحدهای جریانی الکتریکی، روش لوسیا، روش‌های وینلند و پیتمن، روش آرچی، روش باکلز، نمودار لورنز و رخساره‌های

¹ Hydraulic Flow Unit

² Sequential Indicator Simulation

انیدریت تشکیل گردیده و براساس خصوصیات مخزنی به ده زیر لایه (U1, U2, U2A, U3, U4, U5, Upper Arab) تقسیم‌بندی شده است (U6, U7, U8, Lower Arab). با توجه به بررسی‌های انجام شده اگرچه (شکل ۱). ضخامت لایه‌ها در طول مخزن متغیر است و لایه‌های انیدریتی در برخی نقاط نازک یا حتی قطع می‌شوند با این‌حال لایه‌های نفت‌دار در سرتاسر میدان وجود دارد (امیر کافی، ۱۳۹۴).

سازند سورمه فوقانی به عنوان یک توالی کلاسیک کربناته یکی از سازندهای مخزنی بزرگ نفتی در ایران و خاورمیانه است که به عنوان یک سازند اکتشافی مهم در خلیج فارس مورد توجه است. بخش فوقانی سازند سورمه، معادل سازند عرب در کشورهای عربی با مخازن نفتی بزرگ، به ویژه در خلیج فارس محسوب می‌شود (ربانی، ۱۳۹۲). در میدان مورد مطالعه بخش بالایی این سازند (سازند عرب)، بیش‌تر از دولومیت همراه با لایه‌های نازک

U.A.E./Qatar				Iran		Lithology
Period	Epoch	Group	Rock Unit	Group	Rock Unit	
Cretaceous	Lower	Thamama	Shuaiba	Khami	Dariyan	
			Zubair		Gadvan	
			Upper Buwaib		Fahliyan	
			Lower Buwaib (B1-B3)		Hith	
			Yamama		Surmeh	
			Sulaiy			
Jurassic	Upper	Araej	Hith	Neyriz		
			Upper Arab (U1-U8)			
			Lower Arab (L1-L2)			
			Darb			
			Diyab			
	Middle	Araej	Upper Araej	Neyriz		
			Uwainat			
			Lower Araej			
	Lower	Araej	Izhara	Neyriz		
			Marrat			

شکل ۱. ستون چینه‌شناسی مخزن مورد مطالعه (بیگی و همکاران، ۲۰۱۷)

۳-۱- تعیین گونه‌های سنگی

امروزه روش‌های بسیار مختلفی برای تعیین گونه‌های سنگی توسعه یافته است. گاهی این روش‌ها به قدری با مفاهیم زون‌بندی یا لایه‌بندی مخزن (مانند Flow Unit و Speed Zone) ادغام می‌شوند که تفکیک آن‌ها را دشوار می‌سازد. ولی بایستی خاطر نشان کرد که گونه‌های سنگی می‌تواند اجزاء تشکیل‌دهنده واحدهای جریان‌ی باشد.

تعیین یک گونه سنگی ایده‌آل شامل تمام خصوصیات زمین‌شناسی، مخزن و نمودارهای لاگ در فواصل مخزنی است که این واحد ایده‌آل می‌تواند به صورت سه بعدی (3D) توزیع شود. تمام روش‌ها سعی بر کاهش ناهمگنی مخزن برای درک رفتار مخزن در مقیاس ماکروسکوپی و میکروسکوپی دارد (شکل ۲) (توکلی، ۲۰۱۸).

۳-۲- داده‌ها و روش مطالعه

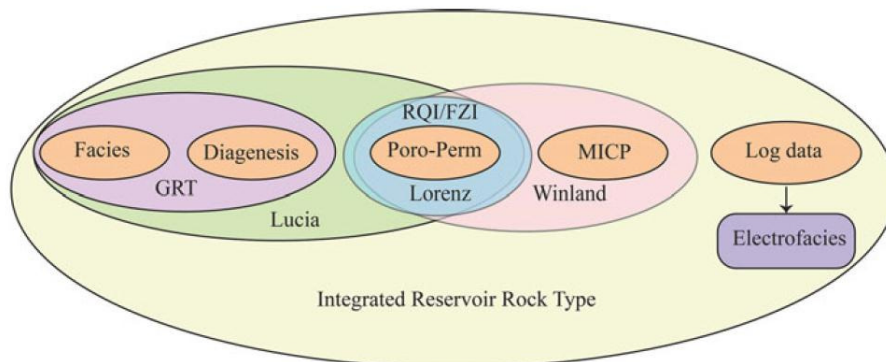
طی این مطالعه با استفاده از نتایج نمونه‌های مغزه (تخلخل و تراوایی) مربوط به ۶ حلقه چاه (۱۹۵ نمونه) و نگاره‌های چاه شامل نگاره نوترون، صوتی، چگالی و گاما، گونه‌های سنگی مخزن با بکارگیری روش نشانگر زون جریان^۱ تعیین گردید. در این روش با رسم نمودار احتمال نرمال و آنالیز هیستوگرام نشانگر زون جریان^۱ (FZI) تعداد پنج گونه سنگی پتروفیزیکی (DRT^۲) برای مخزن سورمه فوقانی تعیین و با استفاده از روش‌های زمین‌آماری (شبیه‌سازی شاخص متوالی^۳)، توزیع آن، توسط نرم‌افزار پترل^۴ به صورت سه‌بعدی بررسی شد.

¹ Flow Zone Index (FZI)

² Discrete Rock Typing

³ Sequential indicator Simulation (SIS)

⁴ PETREL



شکل ۲. ارتباط بین روش‌های تعیین گونه‌های سنگی (توکلی، ۲۰۱۸)

قابل پیش‌بینی از سایر حجم سنگ مخزن است که با استفاده از روش نشانگر زون جریانی (FZI) براساس رابطه ۱ مشخص می‌گردد (ای‌بانکس، ۱۹۸۷؛ آموفوله و همکاران، ۱۹۹۳؛ اسوریو، ۲۰۰۹). نشانگر زون جریانی خود تابعی از پارامتر شاخص کیفیت مخزنی^۲ (RQI) است (رابطه ۲) که تقریبی از میانگین شعاع هیدرولیکی در سنگ مخزن است (آموفوله و همکاران، ۱۹۹۳؛ عباس‌زاده و همکاران، ۱۹۹۶). اساس واحدهای جریانی هیدرولیکی بر پایه تخلخل و تراوایی است. تراوایی نه فقط به تخلخل وابسته است بلکه به فاکتورهایی از جمله: هندسه فضای خالی، پراکندگی اندازه دانه‌ها، واحد سطح ویژه، ضریب پیچاپیچی و اشباع سیال و دیگر عوامل وابسته است.

$$FZI = \frac{RQI}{\Phi_z} \quad (1)$$

$$RQI = 0.0314 \sqrt{\frac{k}{\Phi}} \quad (2)$$

K: تراوایی (میلی‌داریسی)، Φ : تخلخل (درصد)، Φ_z : نسبت پوکی^۳

با لگاریتم گرفتن از رابطه (۱) خواهیم داشت:

$$\text{Log}(RQI) = \text{Log}(FZI) + \text{Log}(\Phi_z) \quad (3)$$

با تعیین پارامترهای RQI و FZI که به گلوگاه منافذ مرتبط هستند واحدهای جریانی براساس مقادیر FZI تفکیک می‌شوند و می‌توانند مخزن را به گونه‌های سنگی پتروفیزیکی مجزا تقسیم کند به طوری که به هر واحد جریانی هیدرولیکی یک مقدار FZI اختصاص داده شود (ال‌عجمی و هلدیش، ۲۰۰۰).

تعیین گونه‌های سنگی براساس روش واحدهای هیدرولیکی جریان بر مبنای فیزیک جریان در مقیاس منافذ و پارامترهای زمین‌شناسی است (باقری‌پور، ۲۰۱۱). واحدهای هیدرولیکی جریان برای مشخص کردن گروه‌های سنگی^۱ و نیز جدا کردن بخش‌های با کیفیت مخزنی بالا از بخش‌های با کیفیت مخزنی پایین و حتی بخش‌های غیر مخزنی استفاده می‌شود. با استفاده از این روش می‌توان به ارتباط واحدهای جریانی با کمربندهای رخساره‌ای و همچنین چگونگی کنترل آن‌ها بر کیفیت رفتار مخزن پی برد (خداویسی، ۱۳۹۱).

روابط تخلخل و تراوایی می‌تواند در چارچوب واحدهای هیدرولیکی جریان و به منظور تعیین سنگ‌های مخزنی ناهمگن به کار گرفته شود (مصدق، ۱۳۹۵). روش‌های پتروفیزیکی تعیین گونه‌های سنگی غالباً بر اساس داده‌های تخلخل و تراوایی (k/ϕ) و فشار موئینه (Pc) است. از مهم‌ترین و کاربردی‌ترین این روش‌ها تعیین گونه‌های سنگی به روش نشانگر زون جریانی (FZI) است که به طرق مختلف (DRT, Histogram Analysis,....) می‌توان واحدهای سنگی را از هم تفکیک نمود. برای تفکیک گونه‌های سنگی از روش‌های آماری و ریاضی مختلفی استفاده می‌شود (Histogram Analysis, Error analysis, Log FZI vs. Depth, Probability Plot) که توسط عباس‌زاده و همکاران (۱۹۹۶) مرور شده است. از مهم‌ترین روش‌های تفکیک گونه‌های سنگی روش FZI است. هر واحد جریانی هیدرولیکی، حجمی از سنگ مخزن است که در آن خواص زمین‌شناسی و پتروفیزیک که جریان سیال را تحت تاثیر قرار می‌دهند، یکسان و

² Reservoir Quality Index

³ Void Ratio

¹ Rock Type

روش شبیه‌سازی شاخص متوالی ساده و انعطاف‌پذیر است. در این روش هر پارامتر به طور مجزا بررسی می‌شود و داده‌های محاسبه شده‌ای که فقط در محل چاه‌ها وجود داشتند در درون تمامی سلول‌های یک شبکه سه بعدی قرار خواهند گرفت.

یکی از رایج‌ترین نرم‌افزارهای مدل‌سازی سه‌بعدی مخزن، نرم‌افزار پترل محصول شرکت شلمبرژه است که با تلفیق داده‌های مخزن یک مدل جامع ارائه می‌نماید. در این روش یک شبکه سلول‌بندی شده متناسب با مخزن ایجاد می‌گردد که به عنوان قالب اصلی مدل، امکان تلفیق همزمان داده‌های مختلف به منظور ساخت مدل را فراهم می‌نماید (شلمبرژه، ۲۰۰۸).

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

در این مطالعه با استفاده از داده‌های تخلخل و تراوایی بدست آمده از شش حلقه چاه مخزن سورمه بالایی (سازند عرب) ابتدا متغیرهای Q_z ، RQI ، FZI برای هر یک از نمونه‌های مورد مطالعه در نرم‌افزار اکسل (EXCEL) محاسبه گردید.

جهت تعیین تعداد و تفکیک واحدهای جریان هیدرولیکی از دو روش آنالیز هیستوگرام^{۱۰} و نمودار احتمال نرمال^{۱۱} استفاده گردید.

۴-۱- آنالیز هیستوگرام: در روش هیستوگرام توزیع لگاریتم شاخص زون جریان $(\log(FZI))$ برای هر واحد جریان هیدرولیکی به صورت توزیع نرمال است. در واقع هر توزیع نرمال در نمودار هیستوگرام نشان‌دهنده‌ی یک دسته داده‌ی منحصر به فرد است (غلامی، ۱۳۹۵؛ عباس‌زاده و همکاران، ۱۹۹۶). در پژوهش حاضر با توجه به شاخص زون جریان (FZI) محاسبه شده برای تمامی داده‌های تخلخل و تراوایی، با رسم نمودار هیستوگرام لگاریتم شاخص زون جریان در نرم‌افزار اکسل، تعداد پنج واحد جریان هیدرولیکی شناسایی گردید (شکل ۳).

۴-۲- نمودار احتمال نرمال: براساس اصول واحدهای جریان هیدرولیکی، آنالیز احتمال نرمال لگاریتم شاخص زون جریان در هر واحد جریان هیدرولیکی به صورت توزیع خطی است. لذا براساس خطوط مشخص شده

متغیر پیوسته FZI را جهت استفاده آسان‌تر در مدل‌سازی می‌توان براساس فرمول زیر به متغیر ناپیوسته گونه‌های سنگی تبدیل نمود، گونه‌های سنگی ناپیوسته (DRT) مفهوم دیگری در تحلیل و آنالیز گونه‌های سنگی بخصوص در شبیه‌سازی و پیش‌بینی رفتار مخازن است (عابدینی، ۲۰۱۱؛ سوخال، ۲۰۱۶).

$$DRT = \text{Round}.[2\ln(FZI) + 10.6] \quad (4)$$

تعیین یک گونه سنگی ایده‌آل شامل تمام خصوصیات زمین‌شناسی، مخزن و نمودارهای لاگ در فواصل مخزنی است که این واحد ایده‌آل می‌تواند به صورت سه‌بعدی (3D) توزیع شود.

۳-۲- مدل‌سازی و شبیه‌سازی گونه‌های سنگی

زمین‌آمار در گستره‌ی وسیعی به عنوان روشی برای شبیه‌سازی استفاده می‌شود و در کاربردهای مختلف مهندسی (به ویژه شبیه‌سازی مخزن) مورد توجه است. روش‌های مدل‌سازی و شبیه‌سازی متغیرها به دو دسته کلی قطعی^۴ و تصادفی^۵ تقسیم‌بندی می‌شوند که تفاوت این دو روش در نحوه استفاده از پارامترها و جواب خروجی‌هاست (امین‌زاده و همکاران، ۱۳۹۲).

در روش‌های قطعی، فقط یک خروجی از مدل‌سازی ارائه می‌شود و در روش‌های تصادفی با هر بار اجرا بر روی یک سری داده ثابت، جواب‌های مختلفی به دست می‌آید که احتمال وقوع آن‌ها با هم برابر است (ال‌بروانی و همکاران، ۲۰۰۰؛ امین‌زاده و همکاران ۱۳۹۲).

شبیه‌سازی سه‌بعدی با استفاده از روش‌های زمین‌آماري به لحاظ ایجاد تحقق‌های^۶ متعدد از مخزن که در آن‌ها تغییرات متغیرها به خوبی نمایش داده می‌شود، یکی از کارآمدترین روش‌ها برای توصیف مخزن و تهیه مدل سه‌بعدی از آن، است (امیدوار و همکاران، ۱۳۹۲). از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های کریجینگ^۷، روش شبیه‌سازی گوسی ترتیبی^۸ (SGS) و روش شبیه‌سازی شاخص متوالی^۹ (SIS) اشاره نمود. در این مطالعه جهت مدل‌سازی گونه‌های سنگی ناپیوسته از شبیه‌سازی شاخص متوالی (SIS) در نرم‌افزار پترل استفاده می‌شود.

⁴ Deterministic

⁵ Stochastic

⁶ Realization

⁷ Kriging

⁸ Sequential Gaussian Simulation

⁹ Sequential indicator Simulation

¹⁰ Histogram Analysis

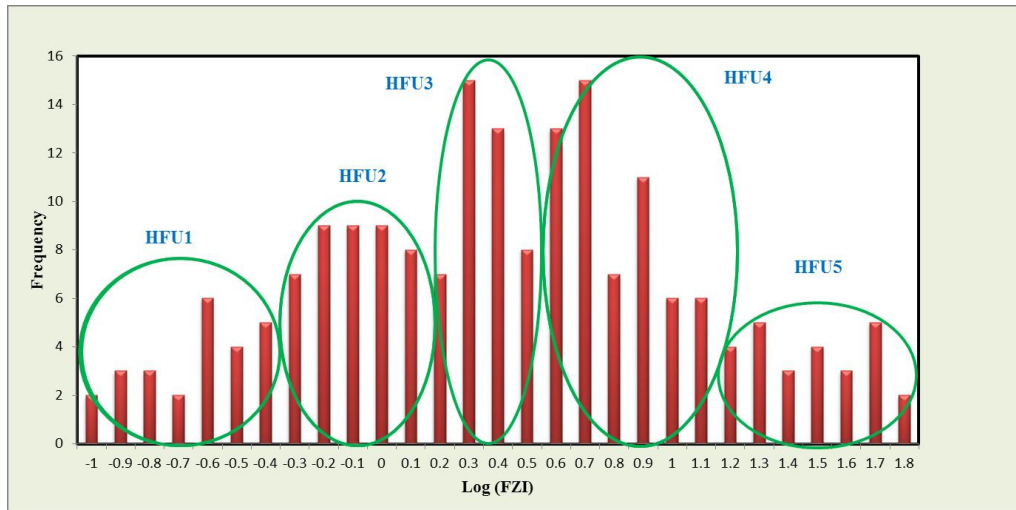
¹¹ Normal Probability Plot

و تغییر شیب روی نمودار مشخص می‌گردد (غلامی، ۱۳۹۵؛ ایگدر، ۱۳۹۴).

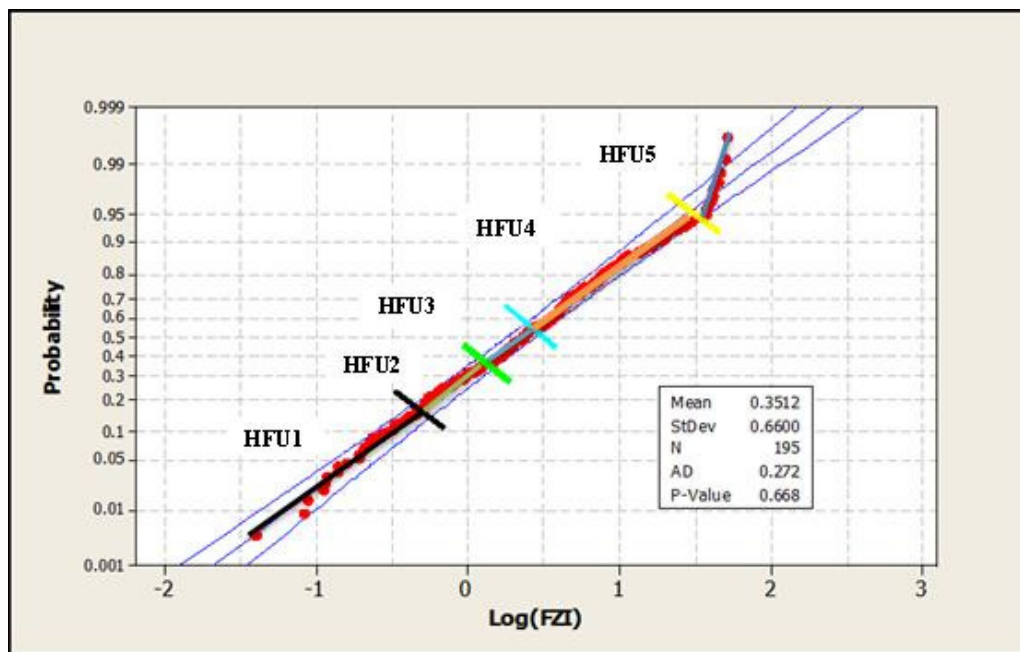
در این مطالعه، پس از رسم نمودار احتمال نرمال لگاریتم شاخص زون جریان در نرم‌افزار MINITAB براساس نقاط شکست منحنی، پنج واحد هیدرولیکی جریان شناسایی گردید (شکل ۴).

روش آنالیز نرمال به دلیل سهولت شناسایی خطوط مستقیم نسبت به روش هیستوگرام از دقت بیشتری برخوردار است.

می‌توان تعداد واحدهای جریانی را مشخص نمود. به عبارت دیگر، در این نمودار هر توزیع نرمال یک خط مستقیم مجزا را تشکیل می‌دهد (تیاب و دونالدستون، ۲۰۱۵). در این روش، آنالیز احتمال نرمال بر روی داده‌های لگاریتم شاخص زون جریان با رسم نمودار فراوانی تجمعی شاخص زون جریان در مقابل لگاریتم آن انجام می‌گردد. با رسم این نمودار، تعداد بهینه‌ی واحدهای هیدرولیکی جریان براساس تعیین نقاط شکستگی که مرزهای واحدهای هیدرولیکی جریان است



شکل ۳. آنالیز هیستوگرام بر روی داده‌های لگاریتم نشانگر زون جریان



شکل ۴. نمودار احتمال نرمال نشانگر زون جریانی و تفکیک واحدهای هیدرولیکی جریان

کننده نفوذپذیری نسبی برای هر نمونه و مشخص کننده چگونگی حرکت سیالات در هر فابریک سنگی است (گومز و همکاران، ۲۰۰۸).

سپس نمودار تراوایی براساس تخلخل برای گونه‌های مختلف سنگی رسم گردید که گونه‌های سنگی از نظر کیفیت مخزنی مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۵). در واقع هر گونه سنگی ناپیوسته دارای محدوده مشخصی به لحاظ مقادیر تخلخل و تراوایی بر روی نمودار است که در ارتباط با ویژگی‌های سیستم حفره‌ای است که خود تحت تاثیر ویژگی‌های بافتی و دیاژنزی حاکم با آن گونه سنگی است (کخدایی ایلخچی، ۱۳۹۵).

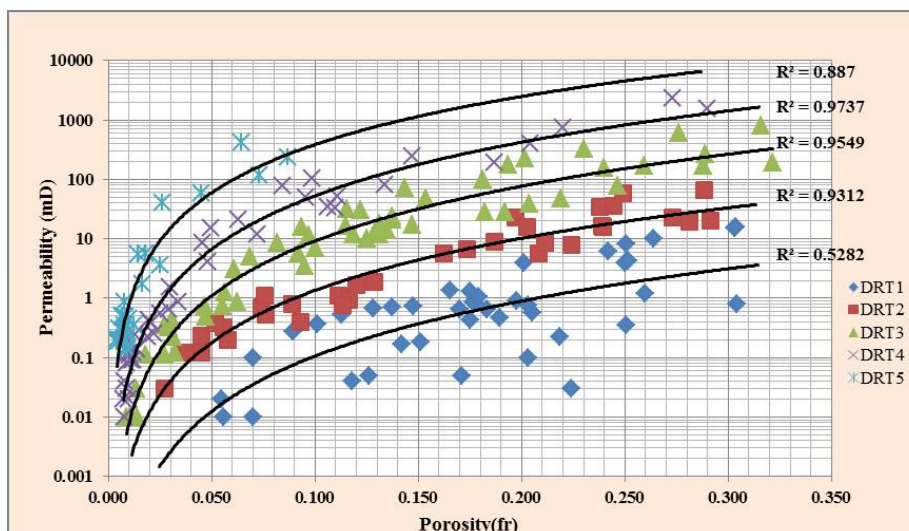
بازه لگاریتم شاخص زون جریان و مقادیر متوسط تخلخل و تراوایی برای هر یک از واحدهای جریانی در جدول ۱ آورده شده است. در تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی، پتانسیل مخزنی سازند بر اساس تخلخل و تراوایی مورد بررسی قرار می‌گیرد، چرا که مخازن کربناته بسیار تحت تاثیر فرآیندهای دیاژنزی هستند که هر رخساره می‌تواند هر نوع تخلخل و تراوایی را از خود نشان دهد (کخدایی و امینی، ۲۰۰۹). سپس در مرحله بعدی این پژوهش گونه‌های سنگی و مقادیر DRT براساس نشانگر زون جریان (FZI)، و رابطه ۴ تعیین گردید (جدول ۲). اختلاف اصلی بین گونه‌های سنگی، اثر متقابل سنگ-سیال در هر گروه پتروفیزیکی است. این اثر متقابل تعیین

جدول ۱. مقادیر Log(FZI) برای هر یک از واحدهای هیدرولیکی جریان

HFU	Log (FZI)	Perm (mD)	Porosity (%)
HFU1	Log FZI < -0.28	4.607	14.436
HFU2	-0.28 < Log FZI < 0.08	10.650	10.159
HFU3	0.08 < Log FZI < 0.41	17.381	10.379
HFU4	0.41 < Log FZI < 1.500	54.610	6.636
HFU5	Log FZI > 1.500	17.921	0.477

جدول ۲. مقادیر DRT برای هر یک از گونه‌های سنگی

DRT	DRT
DRT1	DRT ≤ 9
DRT2	10 ≤ DRT ≤ 11
DRT3	12 ≤ DRT ≤ 13
DRT4	14 ≤ DRT ≤ 15
DRT5	DRT ≥ 16



شکل ۵. نمودار توزیع تراوایی - تخلخل برای پنج گونه‌سنگی مربوط به مخزن سورمه بالایی

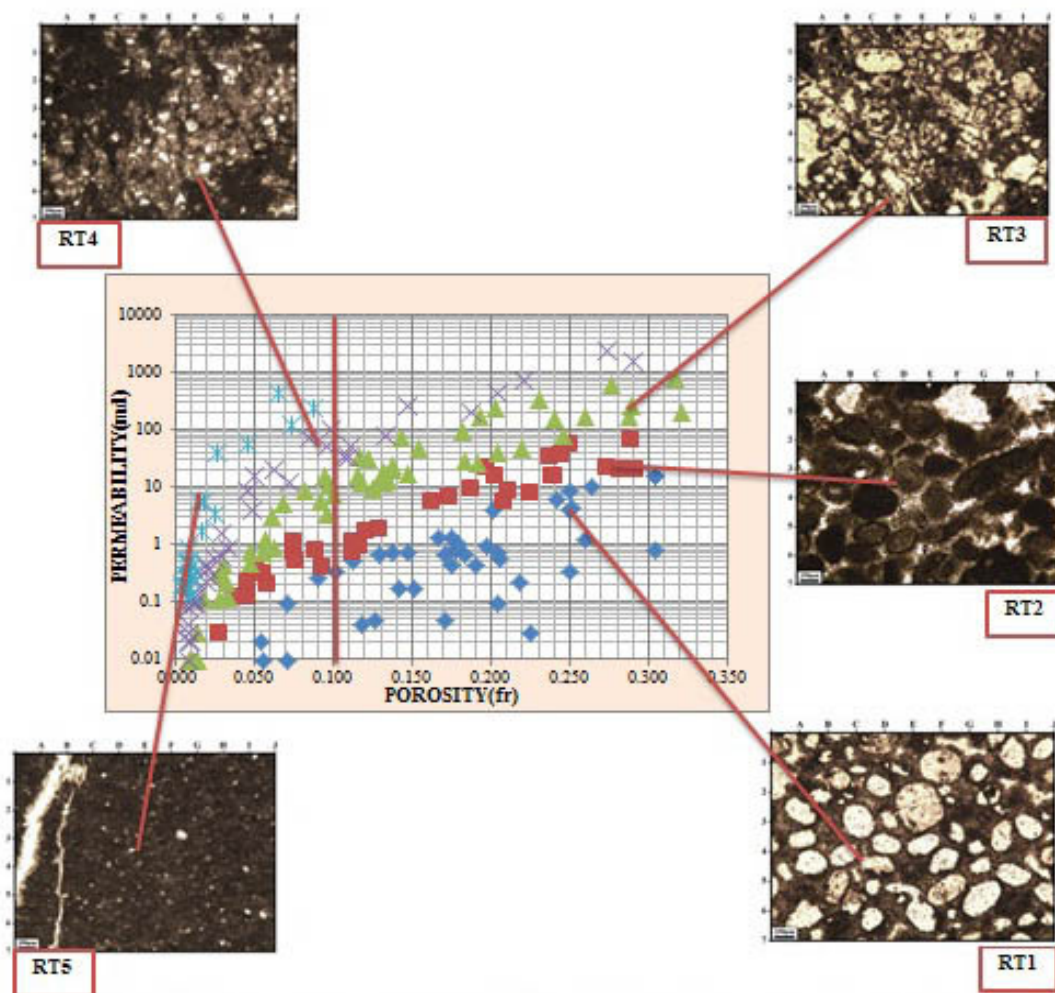
۳-۴- ارتباط بین گونه‌های سنگی ناپیوسته و رخساره‌های رسوبی

در این بخش سعی بر آن است که بین گونه‌های سنگی تعیین شده براساس واحدهای جریانی و رخساره‌های رسوبی ارتباطی برقرار شود. یافتن رخساره رسوبی مناسب برای هرگونه سنگی به دلیل عملکرد فرآیندهای دیاژنری مانند انحلال یا سیمانی شدن کاری دشوار است (کخدایی و همکاران، ۲۰۱۸).

نتایج مطالعه پتروگرافی مقطع نازک میکروسکوپی نمونه‌های مغزه جهت تعیین رخساره‌های رسوبی در سازند سورمه فوقانی بررسی گردید (شکل ۶).

با توجه به نمودار ۵ می‌توان گفت مخزن سورمه بالایی به واحدهایی تقسیم شده است که همبستگی بین تخلخل و تراوایی در این واحدها به خوبی قابل مشاهده است و پنج سیستم حفره‌ای با ویژگی‌های پتروفیزیکی متفاوت در این مخزن را از هم تفکیک می‌نماید. در حالی که نمودار تخلخل و تراوایی مخزن بدون تقسیم‌بندی به واحدهای جریانی، همبستگی خوبی را نشان نمی‌دهد.

در هر یک از گونه‌های سنگی مشخص شده، داده‌های تخلخل و تراوایی دارای یک روند مشخص و مجزا از دیگر گونه‌های سنگی بوده و نشان‌دهنده مشابه بودن ویژگی‌های منافذ در هر یک از این واحدهای سنگی ناپیوسته است (جدیری آقایی و همکاران ۱۳۹۶).



شکل ۶. تصاویر مقاطع میکروسکوپی منتخب جهت تطابق با گونه‌های سنگی تعیین شده براساس واحدهای جریانی: RT1- رخساره گرینستون آئیدی با تخلخل قالبی. RT2- رخساره گرینستون آئیدی اینتراکلاست‌دار. RT3- رخساره گرینستون اینتراکلاست‌دار- بایوکلاست‌دار دولومیتی. RT4- رخساره وکستون اسکلتی با خرده‌های استراکود (F3) و اثرات بیوتوربیشن. RT5- رخساره وکستون اسکلتی با کمی خرده‌های اسکلتی، شکستگی و پرشدگی با انیدریت.

بالایی است. RT4 دارای تخلخل کم تا متوسط و تراوایی بالایی است و RT5 معادل واحد جریان هیدرولیکی HFU5 دارای تخلخل کم و تراوایی خوب است.

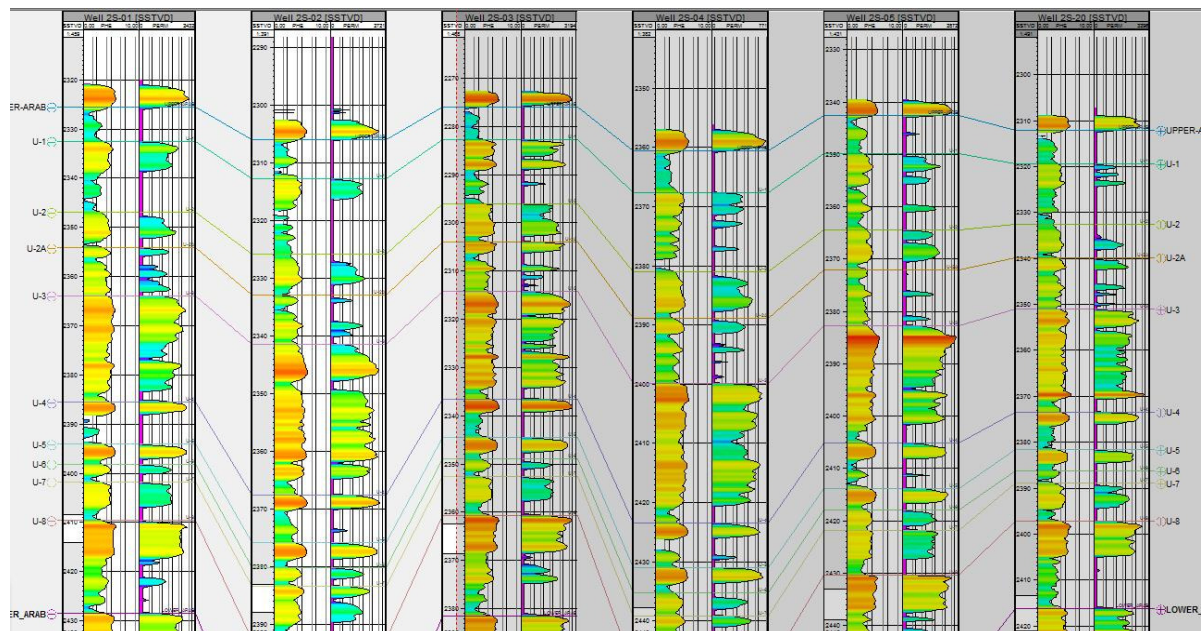
۴-۴-۴ مدل‌سازی و تجزیه و تحلیل آن

جهت مدل‌سازی مخزن مورد مطالعه باید داده‌ها و اطلاعات مورد نیاز به شرح زیر به نرم‌افزار پترل وارد گردد:

- ۱- ورود اطلاعات موقعیت شش چاه و تعیین مرزهای پروژه مورد مطالعه.
- ۲- ورود اطلاعات مرتبط با سرسازندها (Well Tops).
- ۳- بارگذاری اطلاعات لاگ‌ها (Well Logs).
- ۴- ورود داده‌های مرتبط با واحدهای هیدرولیکی جریان و گونه‌های سنگی، این داده‌ها به صورت داده ناپیوسته^۴ و نگاره چاه^۵ وارد نرم‌افزار می‌گردد (شکل ۷).

رخساره‌های رسوبی شناسایی شده در سازند سورمه فوقانی به شرح زیر است:

- ۱: وکستون تا پکستون بیوکلاستی (دولومیتی)
 - ۲: پکستون تا گرینستون ائیدی/پلوئیدی دولومیتی شده
 - ۳: گرینستون بایوکلاستی / پلوئیدی دولومیتی شده
 - ۴: گرینستون اینتراکلاستی / ائیدی دولومیتی شده
 - ۵: گرینستون بایوکلاست / اینتراکلاست دولومیتی شده
- در ادامه با انتخاب یک حد مرزی روی نمودار توزیع تخلخل در احتمال ۵۰٪ که برابر تخلخل ۱۰٪ است، گونه‌های سنگی به دو دسته کم تخلخل (کمتر از ۱۰٪) و پر تخلخل بیش‌تر از ۱۰٪ تفکیک شده‌اند (شکل ۶).
- براساس این نمودار RT1 که معادل واحد جریان هیدرولیکی HFU1 است، دارای تخلخل بالا و تراوایی پایین است. RT2 با تخلخل کم و تراوایی بیش‌تر نسبت به واحد جریان هیدرولیکی HFU1 است و RT3 معادل با واحد جریان هیدرولیکی HFU3 دارای تخلخل و تراوایی



شکل ۷. نمایی از نگارهای تخلخل و تراوایی همراه با سرسازندها مربوط به چاه‌های مورد مطالعه

از داده‌های پتروفیزیکی انجام می‌گردد که این مرحله شامل مدل کردن واریوگرام‌ها در سه جهت اصلی، فرعی و عمودی است (شکل ۹). واریوگرام ابزار گرافیکی برای تعیین مقدار همبستگی فضایی یک متغیر ناحیه‌ای است (اصغری و همکاران، ۱۳۹۱).

بعد از ورود اطلاعات، مخزن شبکه‌بندی^۱ شده، افق‌های بالا و پایین که در این مطالعه سازندهای عرب بالایی و عرب زیرین این افق‌ها هستند، و لایه‌بندی^۲ با توجه به مقدار متوسط ضخامت هر زون^۳، مشخص می‌گردد (شکل ۸). در مراحل بعدی آنالیز داده‌ها و تهیه مدل واریوگرام

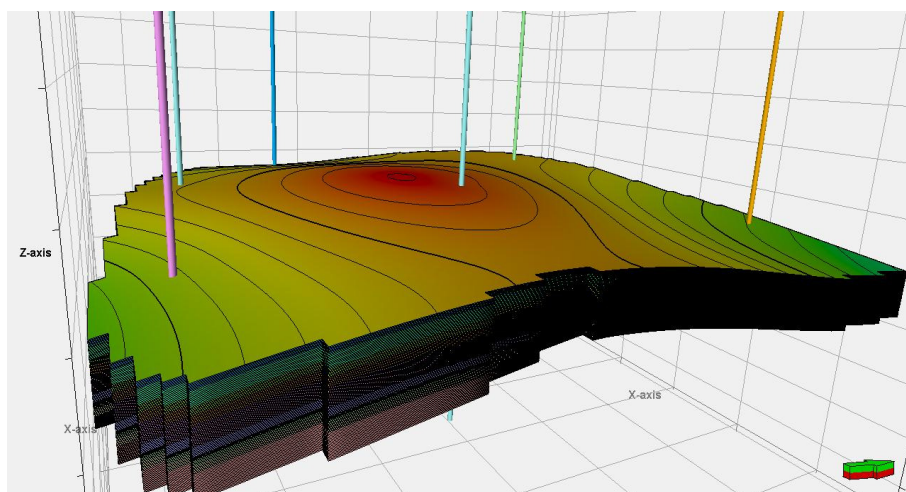
^۴ Discrete

^۵ log

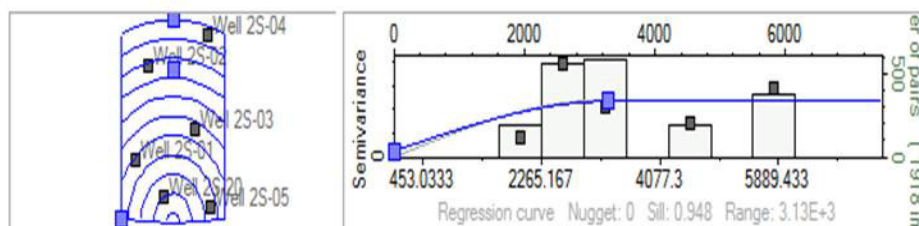
^۱ Pillar Gridding

^۲ layering

^۳ Mean



شکل ۸. نمایی سه‌بعدی از مخزن مورد مطالعه بعد از لایه‌بندی زون‌ها



شکل ۹. نمودار واریوگرام واحدهای جریان هیدرولیکی در جهت اصلی (Major)

زون‌های دارای کیفیت مخزنی بهتر در جدول ۴ آورده شده است:

با توجه به مقدار میانگین تراوایی و تخلخل بدست آمده برای هر کدام از گونه‌های سنگی (جدول ۵)، می‌توان گفت گونه‌های سنگی DRT3 و DRT4 بهترین کیفیت مخزنی و گونه‌های سنگی DRT1 و DRT2 و DRT5 پایین‌ترین کیفیت مخزنی را دارا هستند که پراکندگی و گسترش هر کدام از این پارامترها را می‌توان در تمامی زون‌ها (شکل ۱۰)، و مقاطع عرضی و طولی (شکل‌های ۱۱ و ۱۲) آن‌ها مشاهده نمود.

بر اساس مدل تهیه شده سازند سورمه فوقانی بطور کلی دارای کیفیت مخزنی مناسب است بطوری که پراکندگی گونه‌های سنگی با کیفیت مخزنی خوب در کل مخزن مشاهده می‌گردد که این پراکندگی در هر زون به تفکیک نیز قابل مشاهده است.

در مقطع طولی مخزن مورد مطالعه، در بخش میانی گونه‌های سنگی DRT3 گسترش بیشتری دارد که نشان دهنده کیفیت مخزنی بهتری در این بخش از مخزن نسبت به سایر بخش‌ها است. از بخش غرب به شرق

مدل‌سازی سه‌بعدی گونه‌های سنگی با استفاده از خروجی مرحله واریوگرافی به روش شبیه‌سازی شاخص متوالی انجام گردید. برای شبیه‌سازی متغیرهای ناپیوسته، روش شبیه‌سازی شاخص متوالی به علت سادگی و انعطاف‌پذیری روش محبوبی است. در این مرحله گونه‌های سنگی تعیین شده که فقط در محل چاه‌ها وجود داشتند، با استفاده از روش زمین‌آماري شبیه‌سازی شاخص متوالی در درون تمامی سلول‌های یک شبکه سه بعدی قرار گرفتند.

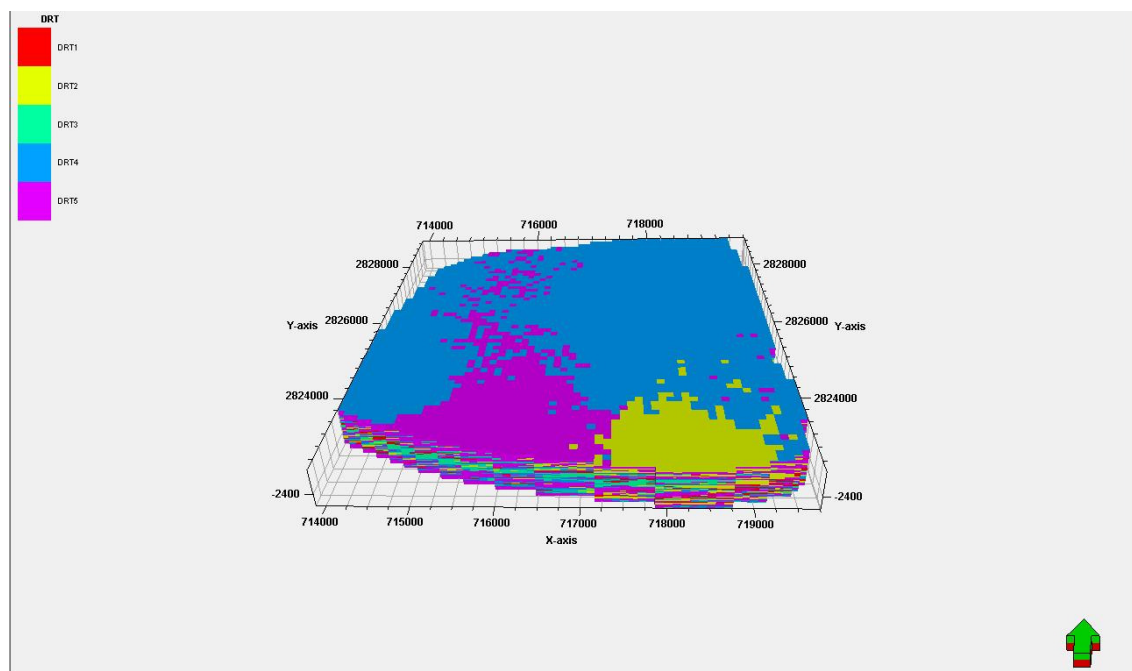
در مدل‌سازی انجام شده مخزن مورد مطالعه به ده زون به شرح زیر تقسیم گردید (جدول ۳):

بعد از انجام تمامی مراحل بالا و میانگین‌گیری از تحقیق‌های^۱ انجام شده برای هر پارامتر در ده زون مخزن مورد مطالعه مدل سه‌بعدی گونه‌های سنگی ناپیوسته تهیه گردید (شکل ۱۰) که می‌توان توزیع این پارامترها را در کل میدان و در مقاطع طولی و عرضی آن مشاهده و بررسی نمود (شکل‌های ۱۰، ۱۱ و ۱۲). درصد هر یک از گونه‌های سنگی ناپیوسته (DRT) به منظور شناسایی

¹ Realization

به طور کلی شناخت چگونگی توزیع گونه‌های سنگی در یک مخزن می‌تواند در تفکیک مخزن به واحدهای متنوع با شرایط مخزنی متفاوت مفید باشد و ناحیه‌ی مخزنی برتر در میدان را تعیین نمود.

مخزن در این مقطع نیز کیفیت مخزنی بهتری مشاهده می‌شود. در مقطع عرضی مخزن مورد مطالعه، در بخش جنوبی و غربی گونه‌های سنگی DRT3 و DRT4 با کیفیت مخزنی بالا گسترش دارند ولی در بخش مرکزی و شرق مخزن در این مقطع گونه‌های سنگی با کیفیت مخزنی پایین‌تری مشاهده می‌گردد.



شکل ۱۰. مدل سه بعدی گونه‌های سنگی ناپیوسته در مخزن مورد مطالعه

جدول ۳. تفکیک زون‌ها در مخزن مورد مطالعه

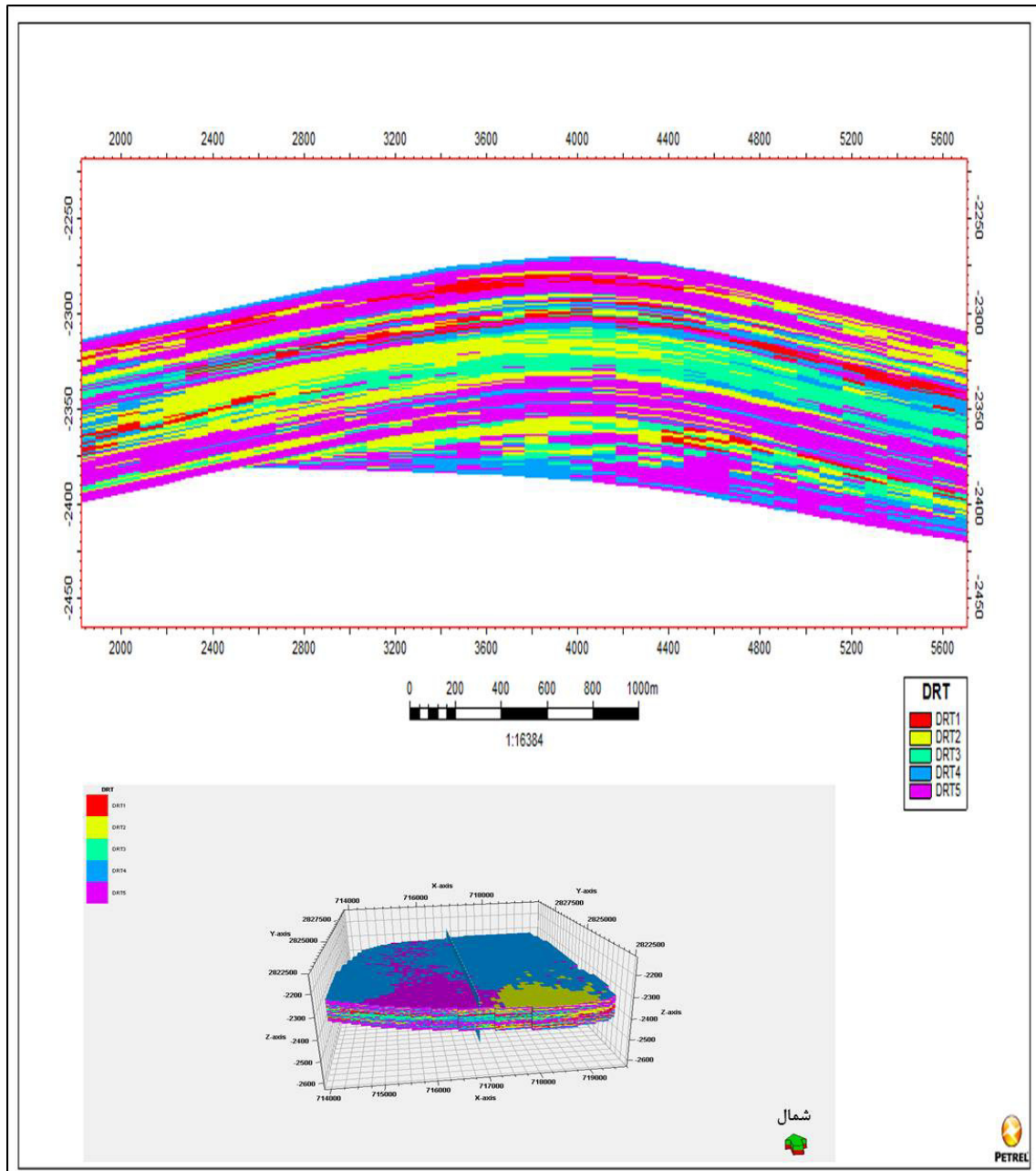
Zone	Formation
Zone1	Upper Arab – U1
Zone2	U1 – U2
Zone3	U2 - U2A
Zone4	U2A – U3
Zone5	U3 – U4
Zone6	U4 – U5
Zone7	U5 – U6
Zone8	U6 – U7
Zone9	U7 – U8
Zone10	U8 – Lower Arab

جدول ۴. درصد گونه‌های سنگی ناپیوسته در هر زون

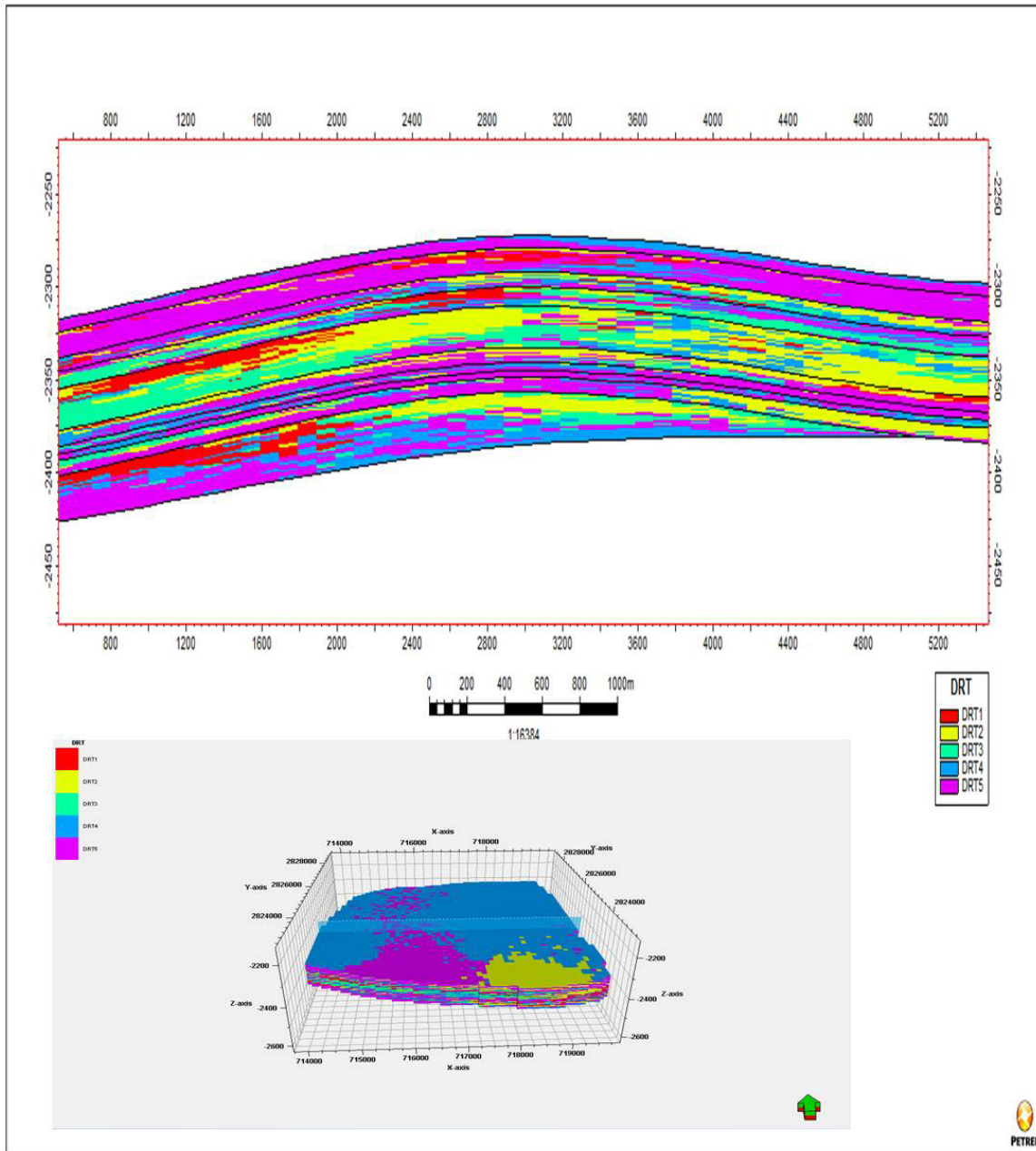
Zone	DRT				
	DRT1	DRT2	DRT3	DRT4	DRT5
Zone1	0.0%	1.58%	0.01%	21.21%	77.20%
Zone2	5.77%	11.98%	5.12%	5.68%	71.44%
Zone3	5.86%	25.70%	14.25%	21.04%	33.15%
Zone4	6.21%	8.68%	20.12%	25.78%	39.2%
Zone5	18.92%	42.05%	21.99%	11.87%	5.18%
Zone6	12.09%	20.72%	4.83%	11.58%	50.78%
Zone7	2.68%	13.40%	6.47%	13.87%	63.58%
Zone8	0.0%	7.47%	12.97%	12.26%	67.30%
Zone9	1.96%	28.43%	14.81%	11.96%	42.85%
Zone10	14.85%	9.85%	13.8%	23.11%	39.01%

جدول ۵. میانگین تراوایی و تخلخل در هریک از گونه‌های سنگی ناپیوسته

DRT	DRT	Perm (mD)	Porosity (%)
DRT1	DRT<= 9	1.417	14.474
DRT2	10<=DRT<=11	6.733	11.983
DRT3	12<=DRT<=13	30.117	9.631
DRT4	14<=DRT<=15	84.890	7.147
DRT5	DRT>=16	30.032	1.275



شکل ۱۱. مقطع طولی از مدل سه‌بعدی گونه‌های سنگی ناپیوسته در مخزن مورد مطالعه



شکل ۱۲. مقطع عرضی از مدل سه‌بعدی گونه‌های سنگی ناپیوسته در مخزن مورد مطالعه

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، مدل‌سازی سه‌بعدی گونه‌های سنگی با استفاده از روش زمین‌آمار، روش کارآمدی برای توصیف گونه‌های سنگی پتروفیزیکی، صورت گرفت و به عنوان یک ابزار قدرتمند برای جداسازی بخش‌های مخزنی از غیر مخزنی در عمق‌های مختلف استفاده شد و در پی آن گونه‌های سنگی با استفاده از روش نشانگر زون جریان (FZI) با دو روش آنالیز هیستوگرام و نمودار احتمال

نرمال $\text{Log}(FZI)$ تعیین گردید مدل ساخته شده با روش‌های شبیه‌سازی متوالی، با دقت بالا، توزیع گونه‌های سنگی مختلف را در مخزن نشان می‌دهد. بر اساس نتایج حاصل از این پژوهش:

- ۱- در مخزن مورد مطالعه پنج گونه سنگی ناپیوسته بر اساس واحدهای هیدرولیکی جریان شناسایی گردید.
- ۲- با توجه به مقدار میانگین تراوایی و تخلخل بدست آمده برای هر کدام از گونه‌های سنگی ناپیوسته،

منابع

- اصغری، ا. نصرت، ا (۱۳۹۱) زمین‌آمار و زمین‌شناسی نفت. انتشارات پژوهشگاه صنعت نفت. تهران.
- امیدوار، آ. کمالی، م. ر.، کاظم‌زاده ع. ا (۱۳۹۲) شبیه‌سازی سه بعدی استاتیکی و تخمین پارامترهای مخزنی با به کارگیری روش‌های زمین‌آماری در یکی از مخازن ایران، پژوهش نفت، ۷۵، ۴۹-۵۷.
- امیرکافی، م (۱۳۹۳) تعیین واحدهای جریان‌ی هیدرولیکی با استفاده از روش‌های زمین‌آماری هوشمند در میدان نفتی سلمان. پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد دانشگاه سمنان، ۱۴۷ ص.
- امین‌زاده، ع. میرجدوی، ن. نوری طالقانی، م (۱۳۹۲) مدل‌سازی استاتیکی مخازن نفت و گاز و تفسیر سائیزمیک با استفاده از نرم‌افزار Petrel. آزاده، ۳۰۴ ص.
- ایگدر، م (۱۳۹۴) تعیین گروه‌های سنگی با استفاده از مفهوم واحدهای جریان هیدرولیکی. چهارمین همایش علمی مخازن هیدروکربوری و صنایع بالادستی علوم و صنایع وابسته.
- جدیری‌آقایی، ر. رحیم‌پوریناب، ح.، توکلی، و.، کدخدایی ایلیچی، ر.، یوسف‌پور، م. ر (۱۳۹۶) بررسی واحدهای جریان‌ی و رخساره‌های الکتریکی در سازند میشریف (بخش بالایی سازند سروک) و برآورد ستبرای زون مخزنی در میدان نفتی سیری (خلیج فارس)، رسوب‌شناسی کاربردی، ۹ (۹)، ۸۶-۹۸.
- حسینی پاک، ع. ا (۱۳۸۹) زمین‌آمار، دانشگاه تهران، ۳۱۴ ص.
- خداویسی، م (۱۳۹۱) تجزیه و تحلیل الکتروفاسیس‌های مخزنی سازند سورمه (برمینای واحدهای جریان‌ی) و ارتباط آن با کیفیت مخزنی در یکی از میادین نفتی در خلیج فارس، پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد دانشگاه فردوسی مشهد ۶۹ ص.
- دوستی‌ایرانی، ر.، کدخدایی، ع.، پیروی، م.، کریمی، م. ر.، دوستی‌ایرانی، م (۱۳۹۴) مدل‌سازی سه‌بعدی زمین‌شناسی دو زون در بخش شرقی میدان نفتی اهواز، ۹، ۲۲-۳۳.
- ربانی، ا. ر (۱۳۹۲) زمین‌شناسی و ژئوشیمی نفت خلیج‌فارس، دانشگاه تفرش، ۵۷۶ ص.
- سلیمانی، ب.، مرادی، م.، غبیشاوی، ع (۱۳۹۵) بررسی کیفیت مخزن بنگستان با استفاده از رخساره‌های الکتریکی و واحدهای جریان‌ی در میدان منصور، جنوب غرب ایران، زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، ۲۲، ۲۲-۳۴.
- غلامی، ر.، سلیمانی، ب.، خواجه‌وی، س (۱۳۹۵) تعیین واحدهای جریان هیدرولیکی با استفاده از روش‌های

- گونه‌های سنگی DRT3 و DRT4 بهترین کیفیت مخزنی و گونه‌های سنگی DRT1 و DRT2 و DRT5 پایین‌ترین کیفیت مخزنی را دارا هستند.
- ۳- با بررسی‌های پتروگرافی بر روی مقاطع نازک نمونه‌های مغزه مخزن مورد مطالعه، پنج رخساره رسوبی شناسایی گردید.
- ۴- با اجرای مدل سه‌بعدی، پراکندگی گونه‌های سنگی ناپیوسته در کل مخزن مورد مطالعه نشان داده شد.
- ۵- در برش طولی مخزن در مدل، در بخش میانی گونه‌های سنگی DRT3 گسترش بیش‌تری دارد که معادل زون 5 Zone (واحدهای U3 تا U4) است.
- ۶- از بخش غرب به شرق مخزن مورد مطالعه در برش طولی، گونه‌های سنگی ناپیوسته با کیفیت مخزنی خوب مشاهده می‌گردد.
- ۷- در برش عرضی مخزن و در بخش جنوبی و غربی آن گونه‌های سنگی DRT3 و DRT4 گسترش بیش‌تری دارند.
- ۸- در برش عرضی مخزن، توزیع گونه‌های سنگی ناپیوسته با کیفیت مخزنی کمتر در بخش مرکزی و شرقی پراکنده است.
- و همچنین به طور کلی: از بین روش‌های آماری ارزیابی واحدهای جریان‌ی، آنالیز احتمال نرمال به دلیل مشخص بودن نقاط عطف در منحنی مربوطه نسبت به روش هیستوگرام از عملکرد مفیدتری برخوردار است.
- ۹- می‌توان با مدل‌سازی گونه‌های سنگی ناپیوسته توزیع DRTها را در مخزن نشان داد.
- ۱۰- همچنین می‌توان به تخمینی از خواص مخزنی، در مناطقی که داده‌های کافی وجود ندارد، دست یافت.
- ۱۱- می‌توان به درک بهتر و دقیق‌تری از ساختار، عمق و گسترش لایه‌های مخزنی دست یافت.
- ۱۲- با درک عمیق از نحوه توزیع و گسترش گونه‌های سنگی، می‌توان پایه مناسبی را برای ساخت مدل پویا، برای منطقه‌بندی مخزن از نظر کیفیت و پتانسیل مخزن، ایجاد کرد.
- ۱۳- می‌توان به زون‌بندی مناسب مخزن از نظر پتانسیل و کیفیت مخزنی دست یافت.

- Analysis, Diagenesis and Sequence Stratigraphy of the Carbonate-Evaporite Succession of the Upper Jurassic Surmeh Formation: Impacts on Reservoir Quality (Salman Oil Field, Persian Gulf, Iran), *Journal of African Earth Science*, 129: 179-194.
- Beiranvand, B., Kamali, M. R (2004) Petrophysical Evaluation and Determination of Rock Types in a Carbonate Reservoir in SW Iran with Interpretation of Petrography and Geophysical Well Logs, *Iranian Int. J. Sci*, 5(2): 203-221.
- Davies, O. K., Vessell, R. K., David K., Davies & Associates (1996) Identification and Distribution of Hydraulic Flow Units in a Heterogeneous Carbonate Reservoir: North Robertson Unit, West Texas, SPE, 35183.
- Ebanks, W. J (1987) Flow Unit Concepts: Integrated Approach to Reservoir Description for Engineering Projects, *AAPG Bulletin*, 71(5).
- Gharechelou, S., Amini, A., Kadkhodaie, A., Hosseini, Z., Honarmand, J (2018) Rock Typing and Reservoir Zonation Based on the NMR Logging and Geological Attributes in the Mixed Carbonate-Siliciclastic Asmari Reservoir, *Geopersia*, 8 (1): 77-98.
- Gomes, J. S., Ribeiro, M. T., Strohmenger, C. J., Negahban, S., Kalam, M. Z (2008) Carbonate Reservoir Rock Typing – The Link between Geology and SCAL, SPE, 118284.
- Gunter G. W., Finneran, J. M., Hartmann, D. J. and Miller, J. D (1997) Early Determination of Reservoir Flow Units Using an Integrated Petrophysical Method, SPE, 38679.
- Kadkhodaie, A., Amini, A (2009) A Fuzzy Logic Approach to Estimating Hydraulic Flow Units from Well Log Data: A Case Study from the Ahwaz Oilfield, South Iran, *Petroleum Geology*, 32(1): 67-78.
- Kadkhodaie, A., Kadkhodaie, R (2018) A Review of Reservoir Rock Typing Methods in Carbonate Reservoirs: Relation between Geological, Seismic, and Reservoir Rock Types, *Journal of Oil & Gas Science and Technology*, 7(4): 13-35.
- Mirzaei-Paiaman, A., Ostadhassan, M., Rezaee, R., Saboorian-Jooybari, H., Chen, Z (2018) A New Approach in Petrophysical Rock Typing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 166: 445-464.
- Osario, P. O (2009) Rock Types and Flow Units in Static and Dynamic Reservoir Modeling: Application to Mature Fields, SPE, 122227.
- Porras, J. C., Barbato, R., Khazen, L (1999) Reservoir Flow Units: A Comparison Between Three Different Models in the Santa Barbara and Pirital Fields, North Monagas Area, Eastern Venezuela Basin, SPE, 53671.
- مختلف در سازند کربناتی ایلام واقع در یکی از میادین نفتی جنوب غربی ایران، اکتشاف و تولید نفت و گاز، ۱۴۲، ۶۵-۶۰.
- کدخدایی ایلخچی، ر.، نوری، ب (۱۳۹۵) سامانه روزنه‌ها در ارتباط با ویژگی‌های مخزنی سازندهای دالان بالایی و کنگان در میدان لاوان واقع در جنوب خاوری خلیج فارس، رسوب‌شناسی کاربردی، ۴ (۸)، ۱۰-۱.
- کدخدایی، ع (۱۳۹۷) ارزیابی سازندهای نفت‌دار، تهران، دایره دانش، ۵۵۲ ص.
- مصدق، ح.، فتاحی، ا.، هنرمند، ج (۱۳۹۵) استفاده از روش‌های نشانگر زون جریانی و وینلند در ارزیابی مخزن آسماری در یکی از میادین نفتی، بخش شمالی فرفرافتادگی دزفول، سی و پنجمین گردهمایی ملی علوم زمین.
- Abbaszadeh, M., Fujii, H., Fujimoto, F (1996) Permeability Prediction by Hydraulic Flow Units - Theory and Applications, SPE Formation Evaluation. 11(4).
- Abedini, A (2011) Statistical Evaluation of Reservoir Rock Type in a Carbonate Reservoir, SPE, 152359.
- Acosta, L (2005) Reservoir Study V9 of El Furril Field, Venezuela, SPE, 95047.
- Al-Ajmi, A. and Holditch, S. A (2000) Permeability Estimation Using Hydraulic Flow Units in a Central Arabia Reservoir, SPE, 63254.
- Al-Barwani, H. H., Al-Lawatia, M., Balakrishnan, E. and Purnama, A (2000) Modeling Flow and Transport in Unsaturated Porous Media: A Review, Science and Technology, Sultan Qaboos University, Special Review: 265-280.
- Ali-Nandalal, J. and Gunter, G (2003) Characterizing Reservoir Performance for the Mahogany 20 Gas Sand Based on Petrophysical and Rock Typing Methods, SPE, 81048.
- Amaefule, J. O., Altunbay, M., Tiab, D., Kersey, D. G., Keelan, D. K (1993) Enhanced Reservoir Description: Using Core and Log Data to Identify Hydraulic (Flow) Units and Predict Permeability in Uncored Intervals/Wells, SPE, 26436.
- Aplin, G. F (2002) New Insights from Old Data: Identification of Rock Types and Permeability Prediction within a Heterogeneous Carbonate Reservoir Using Diplog and Openhole Log Data, SPE, 78501.
- Archi, G. E (1950) Introduction to Petrophysics of Reservoir Rocks, AAPG Bulletin, 34(5).
- Bagheripour, M., Shabaninejad, M. and Afsari, Kh (2011) A Permeability Predictive Model Based on Hydraulic Flow Unit for one of Iranian Carbonate Tight Gas Reservoir. SPE, 142183.
- Beigi, M., Jafarian, A., Javanbakht, M., Wanas, H. A., Mattern, F., Tabatabaie, A (2017) Facies

- Rahimpour-Bonab¹, H., Mehrabi, H., Navidtalab, A., Izadi-Mazidi, E (2012) Flow Unit Distribution and Reservoir Modeling in Cretaceous Carbonates of the Sarvak Formation, Abteymour Oilfield, Dezful Embayment, SW Iran, Journal of Petroleum Geology, 35(3): 213-236.
- Rushing, J. A., Newsham, K. E., Blasingame T. A (2008) Rock Typing - Keys to Understanding Productivity in Tight Gas Sands, SPE, 114164.
- Schlumberger (2008) Petrel Introduction Course, Petrel, 555pp.
- Skalinski, M. and Kenter, J. A. M (2014) Carbonate Petrophysical Rock Typing: Integrating Geological Attributes and Petrophysical Properties while linking with Dynamic Behavior, Geological Society, London, Special Publications Online First.
- Sokhal, A (2016) Rock Type and Permeability Prediction using Flow Zone Indicator with an application to Berkine Basin (Algerian Sahara), SEG International Exposition and 86th Annual Meeting, 3068- 3072.
- Taghavi, A. A., Mørk, A., Kazemzadeh, E (2007) Flow Unit Classification for Geological modeling of a Heterogeneous Carbonate Reservoir: Cretaceous Sarvak Formation, Dehluran Field, SW Iran, Petroleum Geology, 30(2): 129-146.
- Tavakoli, V (2018) Geological Core Analysis, Springer Briefs in Petroleum Geoscience & Engineering, 85-99.
- Tiab, D., Donaldson, E (2012) Petrophysics, Third edition. Gulf Professional Publishing, Pp. 120-128.