

بررسی رخساره‌های الکتریکی مخزنی در قالب واحدهای جریان‌ی هیدرولیکی در میدان ویچرنج مربوط به حوضه پرت واقع در استرالای غربی

رحیم کدخدائی ایلخچی، دانشجوی دکتری گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد*

محمدرضا رضایی، استاد گروه زمین‌شناسی دانشگاه کریتین استرالیا

رضا موسوی حرمی، استاد گروه زمین‌شناسی دانشگاه فردوسی مشهد

علی کدخدائی ایلخچی، استادیار گروه زمین‌شناسی دانشگاه تبریز

چکیده

سرشت‌نمایی مخزن و تشخیص فاکتورهای اصلی کنترل‌کننده کیفیت مخزنی سهم مهمی در ارائه یک تصویر واقعی از ویژگی‌های مخزن دارد. در این مطالعه با بررسی مجموعه‌ای از داده‌های نمودارهای چاه‌پیمایی مخزن و خوشه‌بندی آنها براساس اصول و روش‌های ریاضی و آماری، رخساره‌های الکتریکی مخزن برای ماسه‌های سفت سازند ویلسبی در پنج چاه مربوط به میدان ویچرنج واقع در حوضه پرت در استرالای غربی شناسایی شدند. این خوشه‌ها یا دسته‌های نمودارهای چاه‌پیمایی که دارای ویژگی‌های درون دسته‌ای مشابه و برون دسته‌ای متفاوت از بقیه دسته‌ها هستند در واقع انعکاسی از ویژگی‌های زمین‌شناسی (بافتی و دیاژنزی) و پتروفیزیکی مخزن هستند. در این مطالعه رخساره‌های الکتریکی مخزن با استفاده از خوشه‌بندی نمودارهای چاه‌پیمایی چاه و داده‌های تخلخل و تراوایی به دو روش رسوبی و پتروفیزیکی تعیین شدند. در روش رسوبی سه رخساره الکتریکی شناسایی شده منطبق بر ماسه‌های تمیز، ماسه‌های شیلی و توالی‌های شیلی هستند. این رخساره‌های الکتریکی عمدتاً در ارتباط با ویژگی‌های سنگ‌شناسی و بافت رسوبی بوده و بیانگر نا همگونی بالای مخزن مورد مطالعه هستند. در روش دوم چهار رخساره الکتریکی در ارتباط با ویژگی‌های پتروفیزیکی توالی‌های ماسه‌ای درون مخزن به دست آمد. به منظور برقراری یک رابطه مناسب بین رخساره‌های الکتریکی و زون‌های تولید درون توالی‌های ماسه‌ای پنج واحد جریان‌ی هیدرولیکی مشخص شدند. نتایج مطالعه نشان می‌دهد که واحدهای جریان‌ی با کیفیت مخزنی پایین (A، B و تا حدی C) عمدتاً مرتبط با رخساره‌های - دانه‌ریز ته نشین‌شده در محیط‌های رسوبی کم انرژی هستند. در مقابل واحدهای جریان‌ی با کیفیت مخزنی بالا (D و E) در ارتباط با رخساره‌های دانه متوسط تا درشت و خیلی درشت بوده و ویژگی‌های پتروفیزیکی متفاوتی دارند اگرچه تمامی آنها دارای تراوایی پایین بوده و به صورت سفت در نظر گرفته می‌شوند. از این رو سه نوع ماسه سنگ مخزن براساس ویژگی‌های پتروفیزیکی و شدت فرآیندهای دیاژنزی در آنها به ترتیب در سه تیپ ۱ یا ماسه‌های خیلی سفت، تیپ ۲ یا ماسه‌های سفت و تیپ ۳ یا ماسه‌های نیمه‌سفت تقسیم‌بندی می‌شوند. در یک مقایسه، ماسه‌های تیپ ۳ با داشتن تخلخل و تراوایی بالاتر دارای بهترین کیفیت مخزنی هستند در صورتیکه ماسه‌های با کیفیت مخزنی پایین تیپ ۱ به شدت تحت تأثیر فرآیندهای دیاژنزی (سیمانی‌شدن توسط کانی‌های رسی و سیلیس) قرار گرفته‌اند. نتایج این مطالعه بیانگر انطباق خوبی بین گونه‌های سنگی مشتق‌شده از مغزه و رخساره‌های لاگ است. با استفاده از روش مورد استفاده در این مطالعه امکان پیگیری واحدهای جریان‌ی مخزن از روی پاسخ‌های نمودارهای چاه‌پیمایی وجود دارد.

واژه‌های کلیدی: رخساره الکتریکی، واحدهای جریان‌ی هیدرولیکی، سرشت‌نمایی مخزن، ماسه‌های سفت

مقدمه

درک صحیح و دقیقی از یک مخزن هیدروکربوری نیازمند یک مطالعه جامع از ویژگی‌های رسوبی و دیاژنزی سنگ‌های مخزن است. تلفیق نتایج حاصل از این مطالعات با داده‌های پتروفیزیکی نقش مهمی در شناسایی زون‌های تولید و فاکتورهای اصلی کنترل‌کننده کیفیت مخزنی دارد. از طرفی نتایج به دست آمده از مطالعات مختلف زمین‌شناسی و پتروفیزیکی می‌تواند بسته به روش‌های مورد استفاده تا حدی متفاوت باشد.

امروزه با پیشرفت‌های انجام شده در زمینه‌های مختلف علوم زمین و در جهت تأمین نیازهای صنعت، ارائه روش‌های جدید و کاربردی بر مبنای اصول ریاضی و آماری در سرشت‌نمایی مخزن^۱ از پراکندگی و اعمال سلیقه‌های شخصی در تفسیر نتایج جلوگیری نموده و ضریب اطمینان را افزایش می‌دهد. تعیین گونه‌های سنگی^۲ یکی از راه‌های سرشت‌نمایی مخزن است که مخزن را به لحاظ هیدرولیکی و زمین‌شناسی مدل‌سازی می‌کند (Izadi and Ghalambor 2013).

تعاریف متفاوتی برای گونه سنگی بسته به داده‌های موجود و اهداف مطالعه وجود دارد. در مطالعات اولیه (Davies et al. 1991; Porras et al. 1999)، گونه سنگی براساس مشخصه‌های به دست آمده از مغزه (لیتوفاسیس) و مطالعات پتروگرافی (میکروفاسیس و پتروفاسیس) و عمدتاً در رابطه با مخازن ماسه‌سنگی توصیف می‌شد. سپس گونه‌های سنگی پتروفیزیکی با اضافه شدن پارامترهایی مانند تخلخل، تراوایی و اشباع آب به دست آمده از مغزه، در کنار پارامترهای زمین‌شناسی توصیف شدند (Ali-Nandalal and Gunter 2003; Acosta et al. 2005; Shenawi et al. 2005). در مخارن کربناته، رخساره الکتریکی مفهوم جدیدی از گونه سنگی را بر اساس پاسخ‌های لاگ معرفی نمود (Lee et al. 2001; Mathisen et al. 2005). آرچی (Archie 1950) گونه سنگی را به عنوان واحدهایی از سنگ تعریف می‌کند که تحت شرایط مشابهی تشکیل شده و فرآیندهای دیاژنزی مشابهی را تحمل

نموده‌اند که در نتیجه دارای ویژگی‌های منحصر بفردی به لحاظ روابط تخلخل و تراوایی، فشار مویینگی و اشباع آب برای یک ارتفاع معین بالایی سطح آب آزاد مخزن هستند. گونه‌های سنگی می‌توانند به انواع رسوبی، پتروگرافی و هیدرولیکی تقسیم‌بندی شوند (Rushing 2008). روش رخساره الکتریکی در تعیین گونه سنگی با استفاده از لاگ‌ها به کار می‌رود. تعیین رخساره‌های الکتریکی^۳ برای شناسایی خوشه‌ها یا دسته‌هایی از پاسخ‌های نمودارهای چاه پیمایی^۴ با ویژگی‌های مشابه به کار می‌رود (Lee and Datta-Gupta 1999). در تعریف دیگر، رخساره‌های الکتریکی پاسخ‌های مشابهی از لاگ برای یک گونه سنگی مشخص هستند که بر مبنای آن از دیگر سنگ‌ها قابل تفکیک می‌باشد (Serra 1986; Perez et al. 2005).

این پاسخ‌های نمودارهای چاه پیمایی در مقابل سنگ‌های مخزن در واقع انعکاسی از تغییرپذیری مرتبط با ویژگی‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی مخزن است که به طور پیوسته در طول چاه ثبت می‌شود.

کاربرد و اهمیت رخساره الکتریکی در مطالعه و توصیف مخزن به طور گسترده‌ای شناخته شده است (Bucheib and Evans 1994; Dorfman et al. 1990; Doveton and Prenskey 1992; Kim and Lim 1998; Moline and Bahr 1995; Serra and Abbott, 1982; Perez 2005; Tavakoli and Amini 2006; Sefidari et al. 2012). از این رو تفکیک رخساره‌های مخزن یا گونه‌های سنگی^۵ بر اساس نمودارهای چاه پیمایی موجود تحت عنوان رخساره لاگ یا رخساره الکتریکی به عنوان یک روش مفید، کاربردی و به صرفه در این خصوص در نظر گرفته می‌شود. از طرفی بررسی رخساره‌های الکتریکی شناسایی شده از دیدگاه پتروفیزیکی و در ارتباط با واحدهای جریان هیدرولیکی^۶ درک مناسبی از خصوصیات مخزن و زون‌های تولید را فراهم می‌سازد.

³ Electrofacies⁴ Well Log Responses⁵ Rock Typing⁶ Hydraulic Flow Units¹ Reservoir Characterization² Rock Types

تشکیل تله هیدروکربوری است (Owad-Jones and Ellis 2000). ویچرنج^۴ یکی از مهمترین میادین گازی در حوضه پرت جنوبی است. این میدان درون یک ساختار تاقدیسی بزرگ در تراف بانبری^۵ است که تاکنون پنج چاه در این ساختار حفاری شده است (شکل ۳). ماسه سنگ‌های سازند ویلسپی^۶ با سن پرمین سنگ مخزن اصلی میدان را تشکیل می‌دهند (Crostella and Backhouse 2000; Sharif 2007). این ماسه - سنگ‌ها دارای تخلخل و تراوایی پایین بوده و به صورت سفت^۷ در نظر گرفته می‌شوند. گاز سفت در حالت کلی به عنوان یک مخزن گازی با نفوذپذیری پایین تعریف می‌شود که برای تولید گاز در مقیاس تجاری نیازمند تدابیر ویژه‌ای همچون تکنولوژی حفاری پیشرفته و راهکار مناسب در به کارگیری عملیات تکمیل چاه و برانگیختگی مخزن است (Rezaee et al. 2012).

چنانچه در مقدمه نیز ذکر شد هدف این مطالعه ارزیابی مشخصه‌های مخزنی این ماسه‌سنگ‌ها با استفاده از مفهوم رخساره الکتریکی و واحدهای جریان‌ی است.

داده‌ها و روش کار

در این مطالعه به منظور تعیین و تفکیک انواع مختلف رخساره‌های الکتریکی در مخزن، نمودارهای چاه‌پیمایی مربوط به چهار چاه حفاری شده در میدان به نام‌های WR1، WR2، WR3 و WR4 مورد استفاده قرار گرفت. نمودارهای چاه‌پیمایی مورد استفاده شامل نمودار اشعه گاما، چگالی، نوترون و صوتی هستند. همچنین، از داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه در تعیین واحدهای جریان‌ی استفاده گردید. در تعیین انواع رخساره‌های مخزن و فرآیندهای دیاژنزی حاکم بر آنها نیز از گزارشات مغزه و مطالعات میکروسکوپی انجام شده برای چاه‌های میدان استفاده گردید. در نهایت انواع رخساره‌های الکتریکی شناسایی شده در قالب واحدهای جریان‌ی ارزیابی و با رخساره‌های میدان تطبیق داده شدند.

در این مطالعه ما نشان دادیم که تفکیک گونه‌های سنگی در ماسه‌های گازی سفت^۱ به عنوان نوعی از مخازن غیرمتداول^۲، با استفاده از مجموعه‌ای از نمودارهای چاه‌پیمایی یا روش رخساره الکتریکی یک روش مفید و کاربردی است که وقتی با ویژگی‌های جریان‌ی سنگ‌های مخزن تلفیق می‌شود می‌تواند یک تصویر واقعی از ناهمگونی مخزن را در ارتباط با فرآیندهای غالب رسوبی و پس از رسوب‌گذاری کنترل‌کننده خصوصیات منافذ و رفتار تولید فراهم نماید. به عبارت دیگر تلفیق دو روش تفکیک گونه‌سنگی (روش رخساره الکتریکی و روش واحد جریان‌ی) به طور موثری هر دو جنبه زمین‌شناسی و پتروفیزیکی ماسه‌های گازی سفت را در میدان ترکیب می‌نماید که در نهایت می‌تواند به زمین‌شناسان و مهندسين مخزن در درک و تفسیر صحیحی از رفتار تولید مخزن کمک نماید.

موقعیت زمین‌شناسی و چینه‌شناسی حوضه پرت

حوضه پرت^۳ یک حوضه ریفتی نامتقارن، باریک و طولیل با روند شمالی- جنوبی است (شکل ۱) که در جنوب غرب استرالیا واقع شده است (Cadman et al. 1994). حرکات تکتونیکی نقش مهمی در تشکیل و وضعیت ساختاری حوضه داشته است. هر دو بخش شمالی و جنوبی حوضه به لحاظ ساختاری به زیرحوضه‌های متفاوتی تقسیم‌بندی شده‌اند (Song and Cawood 2000).

توالی ضخیمی از رسوبات دریایی تا غیردریایی مربوط به اواخر پرمین تا کرتاسه در این حوضه ته‌نشین شده است. این رسوبات اساساً از ماسه‌سنگ، سیلتستون و مادستون همراه با مقادیر کمتری کنگلومرا، کربنات و زغال تشکیل می‌شوند (Playford et al. 1976; Crostella 1995). در شکل ۲ ستون چینه‌شناسی کلی حوضه پرت جنوبی نشان داده شده است.

مطالعه سیستم نفتی حوضه پرت بیانگر سنگ‌های منشاء بالغ و گسترده، مخازن فراوان و ساختارهای مناسب برای

⁴ Whicher Range

⁵ Bunbury Trough

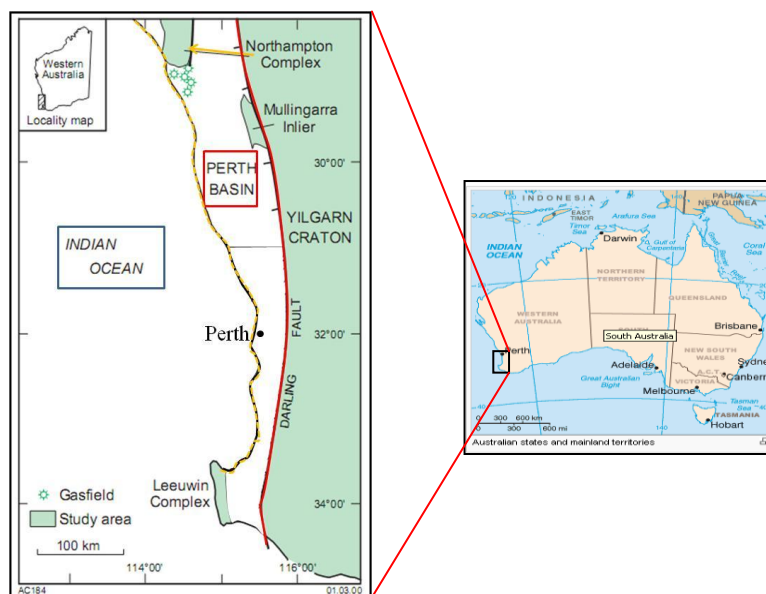
⁶ Willespie Formation

⁷ Tight

¹ Tight Gas Sands

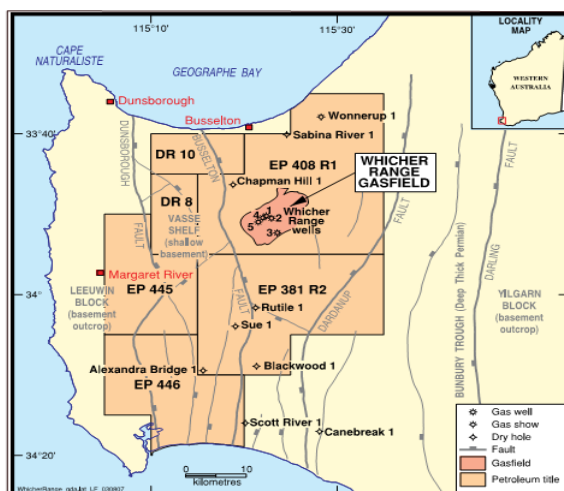
² Unconventional Rservoirs

³ Perth Basin



شکل ۱- نقشه موقعیت حوضه پرت با روند شمالی - جنوبی در جنوب غرب استرالیا (Modified from Crostella and Backhouse 2000)

AGE			Stratigraphic Units		
Ma					
100	CRETACEOUS	LATE	CENOMANIAN	Coolyena Group	Caborne Formation
			ALBIAN		
		EARLY	APTIAN	Warbro Group	Leederville Formation
			BARREMIAN		
			HAUTERIVIAN		
			VALANGINIAN		
			BERRIASIAN		
			TITHONIAN		
			KIMMERIDGEAN		
			OXFORDIAN		
160	JURASSIC	MIDDLE	CALLOVIAN	Yarragadee Formation	
			BATHONIAN		
			BAJOCIAN		
			AALENIAN		
			TOARCIC		
			PLEINSBACHIAN		
		EARLY	SINEMURIAN	Cattamarra Coal Measures	
			BETTANIAN		
			RHAETIAN		
			NORIAN		
220	TRIASSIC	LATE	CARNIAN	Lesueur Sandstone	Myalup Member
			LADINIAN		
			ANISIAN		
			SCYTHIAN		
		EARLY	CHANGHSINGIAN	Sue Group	Sabina Sandstone
			DZHELEZIAN		
			MIDIAN		
			KAZANIAN		
			UFIMIAN		
			KUNGURIAN		
280	PERMIAN	LATE	ARTINSKIAN	Sue Group	Willespie Formation
			SAKMARIAN		
			ASSELIAN		
			ARTINSKIAN		
		EARLY	SAKMARIAN	Sue Group	Rosabrook Coal Measures
			ASSELIAN		
			ARTINSKIAN		
			SAKMARIAN		
			ASSELIAN		
			ARTINSKIAN		
340	PRECAMBERIAN	LATE	SAKMARIAN	Mosswood Formation	
			ASSELIAN		
		EARLY	ARTINSKIAN	Basement	
			SAKMARIAN		
			ASSELIAN		
			ARTINSKIAN		
			SAKMARIAN		
			ASSELIAN		
			ARTINSKIAN		
			SAKMARIAN		



شکل ۳ - نقشه موقعیت میدان ویچرنج با پنج چاه حفاری شده در آن در حوضه پرت جنوبی (Sharif 2007)

طرفی پاسخ‌های نمودار مربوط به فواصل ریزشی چاه و نیز مقادیر ناخونا حذف گردیدند. در این مطالعه شناسایی و تفکیک رخساره‌های الکتریکی بر اساس روش آنالیز خوشه‌ای^۱ انجام می‌گیرد.

آنالیز خوشه‌ای در واقع طبقه‌بندی داده‌ها به گروه‌های مختلف یا به طور دقیق‌تر به زیرگروه‌هایی است به طوری‌که داده‌های موجود در هر زیرگروه براساس معیار فاصله تعریف شده برای آنها دارای ویژگی‌های مشابهی هستند (Jain et al. 1999; Kumar and Kishor 2006).

در اولین مرحله این مطالعه، گونه‌های سنگی رسوبی^۲ براساس تلفیقی از نتایج حاصل از مطالعات مغزه، توصیفات پتروگرافی و آنالیز خوشه‌ای نمودارهای چاه‌پیمایی برای کل توالی مخزن شامل توالی‌های ماسه‌ای و لایه‌ها و میان لایه‌های شیلی شناسایی و تفکیک می‌شوند. در مرحله بعد گونه‌های سنگی پتروفیزیکی^۳ برای توالی‌های ماسه‌ای براساس تلفیق واحدهای جریان‌ی و آنالیز خوشه‌ای نمودارهای چاه‌پیمایی به دست می‌آیند. در نهایت کیفیت توالی‌های ماسه‌ای موجود در

ماسه‌های گازی سفت در این میدان متأثر از عوارض رسوبی و دیانزنی حاکم بر مخزن درجاتی از نا همگونی را نشان می‌دهند که توصیف و تفسیر ویژگی‌های مخزنی آنها را پیچیده می‌سازد. از طرفی تفکیک گونه‌های سنگی با به‌کارگیری روش‌های متداول و صرفاً بر اساس شواهد رسوب‌شناسی و چینه‌شناسی و روابط ساده تخلخل و تراوایی اگر چه در مخازن نسبتاً همگون جوابگو است اما به‌کارگیری این روش‌ها در مخازن ناهمگون همچون مخازن ماسه‌ای سفت در میدان مورد مطالعه دقیق نیست. این مطالعه با استفاده از نمودارهای چاه‌پیمایی موجود در چاه‌های میدان که به عنوان ابزاری قدرتمند و به صرفه محسوب می‌شوند به طور موثری این ناهمگونی را مشخص نموده و بر اساس آن انواع گونه‌های سنگی را مشخص می‌نماید. طبقه‌بندی رخساره‌ها بر اساس نمودارهای چاه‌پیمایی موجود و مفهوم رخساره الکتریکی در واقع تصویر غیرمستقیم اما واقعی و با ارزشی از مشخصه‌های سنگ‌شناسی و پتروفیزیکی سنگ‌های مخزن را فراهم می‌سازد. اما در اولین مرحله این داده‌ها به‌صورت خام بوده و باید پردازش شوند. بنابراین در این مطالعه تصحیحاتی همچون حذف اثرات کشش لاگ به منظور انطباق عمق آنها با داده‌های مغزه بر روی آنها انجام شد. از

¹ Cluster Analysis

² Sedimentary Rock Types

³ Petrophysical Rock Types

مرتبط می‌سازد. این یک مرحله مهم در خوشه‌بندی داده‌ها است که دسته‌بندی اولیه داده‌ها را مشخص می‌کند و داده‌های ورودی را برای ایجاد درخت خوشه‌ای یا دندروگرام^۴ در مرحله بعد آماده می‌سازد.

۳- ایجاد دندروگرام یا درخت خوشه‌ای

در این مرحله دندروگرام داده‌ها براساس داده‌های حاصل از تابع رابطه استخراج می‌گردد. یک دندروگرام یا درخت خوشه‌ای شامل بسیاری از خطوط U شکل است که داده‌ها را در یک درخت سلسله مراتبی^۵ بهم مرتبط می‌سازد. بلندی هر U بیانگر فاصله بین دو جزء بهم مرتبط است. دندروگرام حاصل برای مخزن ویلسپی در این مرحله در شکل ۴ نشان داده شده است. محور افقی نمودار انواع خوشه‌های شناسایی شده و محور عمودی فاصله یا درجه تشابه بین آنها را نشان می‌دهد. خوشه‌های مختلف نمودار به صورت سلسله مراتبی از خوشه‌های کوچک با درجه تشابه بالاتر تا خوشه‌های بزرگ با درجه تشابه کمتر بهم مرتبط‌اند و در نهایت کل داده‌ها در یک خوشه بزرگ شامل همه خوشه‌ها قرار دارند.

۴- تعیین سطح برش^۶ و استخراج خوشه‌ها

در مرحله آخر، خوشه‌های داده‌ها با استفاده از یک مقدار سطح برش معین که به صورت خط افقی بر روی نمودار شکل ۴ نشان داده شده است استخراج شدند. سپس تابع تولید خوشه برقرار شد و سه خوشه که بیانگر سه رخساره الکتریکی برای مخزن مورد مطالعه است به دست آمد. در این خصوص یک بررسی بر اساس روش آزمون و خطا^۷ نشان می‌دهد که استخراج سه خوشه، با مشخصه‌های سنگ‌های مخزن و ناهمگونی آن سازگارتر است. هر یک از این رخساره‌های الکتریکی دارای مقادیر مشخصی از قرائتها یا

مخزن در چارچوب گونه‌های سنگی پتروفیزیکی تفسیر می‌شود.

گونه‌های سنگی رسوبی

در این بخش واحدهای مخزنی از غیرمخزنی براساس خوشه‌بندی داده‌های نمودارهای چاه‌پیمایی چاه و انطباق با نتایج حاصل از مطالعات پتروگرافی شناسایی و تفکیک شدند. مراحل کار به صورت زیر است:

۱- پیدا کردن فاصله بین داده‌ها

یک مرحله مهم در هر خوشه‌سازی انتخاب یک تابع فاصله است که بر اساس آن مشخص می‌شود که چه طور شباهت دو جزء در یک مجموعه داده محاسبه می‌شود. شکل خوشه‌ها متأثر از این تابع است. چنانچه برخی اجزاء براساس یک تابع نزدیک بهم و درون یک دسته و براساس تابع دیگر دور از هم و درون دسته‌های متفاوت قرار می‌گیرند.

نمودارهای پردازش شده به صورت یک ماتریس ورودی (x) در محیط نرم افزار متلب^۱ بارگذاری شدند و تابع فاصله اقلیدوسی^۲ طبق معادله ۱ برای محاسبه فاصله داده‌ها به کار گرفته شد:

$$d_{rs} = (x_r - x_s) (x_r - x_s)' \quad (\text{معادله ۱})$$

در این معادله d برای دو خوشه r و s، فواصل مختلف بین بردارهای x_r و x_s برای یک ماتریکس x شامل m در n داده است.

۲- برقراری ارتباط بین داده‌های فاصله

در این مرحله یک تابع رابطه یا پیوند^۳ به منظور برقراری ارتباط بین داده‌های فاصله ایجاد می‌گردد. این تابع رابطه با استفاده از اطلاعات فاصله تولید شده در مرحله قبل داده‌های فاصله را به صورت خوشه‌هایی از کوچک تا بزرگ بهم

⁴ Dendrogram

⁵ Hierarchical Tree

⁶ Cut off

⁷ Trial and Error

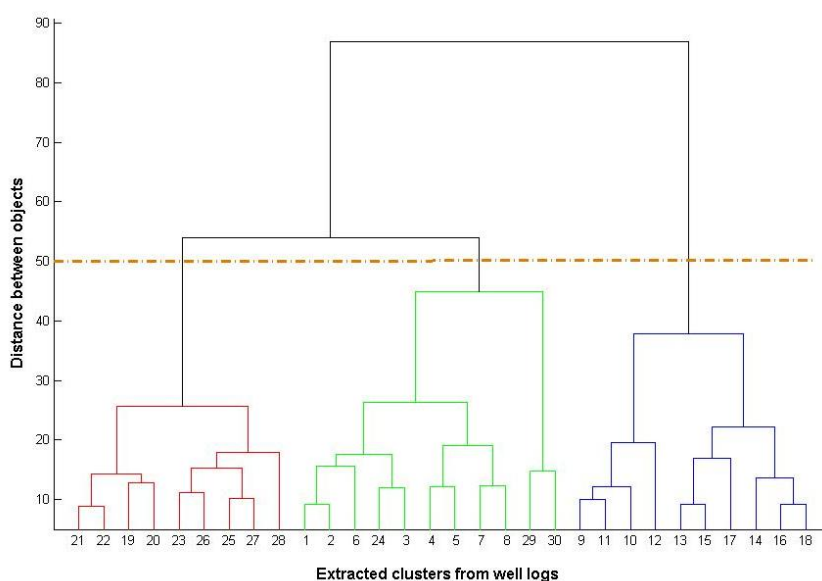
¹ Matlab Software

² Euclidean Distance

³ Linkage Function

رو در طبقه‌بندی و تفکیک سنگ‌های مخزن مورد مطالعه و نشان دادن ناهمگونی آن این لاگ می‌تواند شاخص خوبی باشد. سه رخساره الکتریکی شناسایی شده عمدتاً بر اساس پاسخ‌های نمودار اشعه گاما دارای مشخصات زیر هستند:

پاسخ‌های هر نمودار مورد استفاده است که در واقع بیانگر مشخصه‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی سنگ‌های مخزن است. همچنین، مشخص شد که پاسخ‌های نمودار گاما نسبت به بقیه نمودارهای چاه‌پیمایی در سه خوشه یا رخساره الکتریکی استخراج شده مشخص‌تر و برجسته‌تر است از این



شکل ۴- دندروگرام یا درخت خوشه‌ای استخراج شده برای سازند ویلسپی بر اساس داده‌های لاگ (NPHI, RHOB, DT, GR) چهار چاه میدان ویچرنج. خط افقی نشان داده شده بر روی نمودار بیانگر مقدار سطح برش (Cut off) است که بر اساس آن سه خوشه به دست آمده با رنگ‌های مختلف بر روی نمودار نشان داده شده‌اند.

شیل‌های لامینه‌ای سیلتی و کربن‌دار و ماسه سنگ‌های آرژیلیتی خیلی ریز با مقدار شیل و پاسخ نمودار اشعه گامای بالا (>۱۳۰). این رخساره اساساً در سیستم‌های با انرژی پایین همچون محیط‌های دریاچه‌ای ته‌نشین شده است.

بنابراین در اولین مرحله رخساره‌های مخزن عمدتاً بر اساس مشخصه‌های سنگ‌شناسی آنها و پاسخ‌های نمودار اشعه گاما تفکیک شدند. سه رخساره الکتریکی شناسایی شده بر اساس پاسخ‌های نمودار گاما (پایین، متوسط و بالا) در مقابل لیتولوژی برای چاه‌های میدان در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

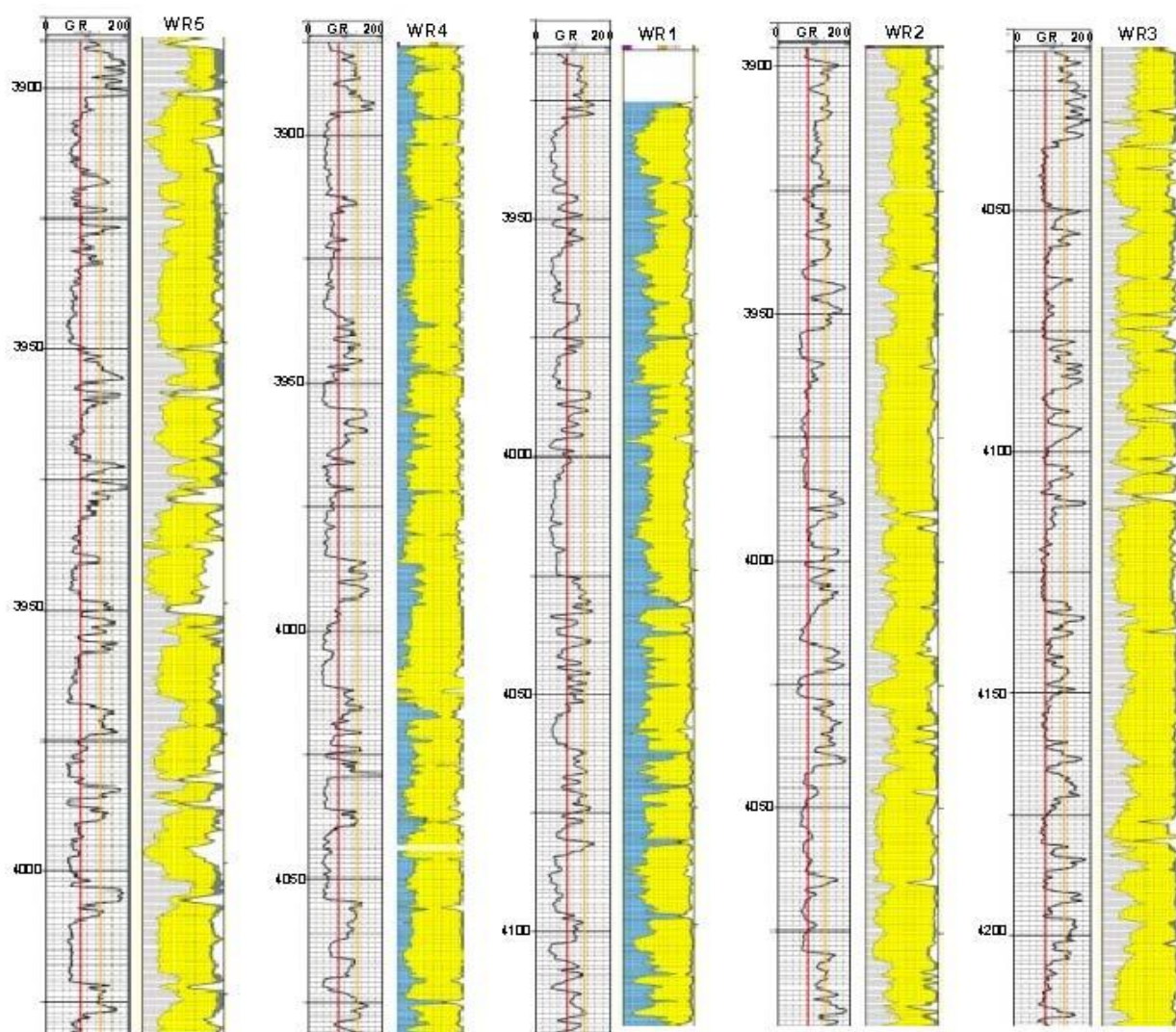
رخساره الکتریکی ۱ (EF-1) ماسه سنگ‌های تمیز^۱ ریز تا درشت و خیلی درشت با مقدار شیل و گامای پایین (<۸۰). این ماسه سنگ‌ها عمدتاً درون کانال‌های رودخانه‌ای ته‌نشست کرده‌اند.

رخساره الکتریکی ۲ (EF-2) ماسه سنگ‌های شیلی^۲، سیلتستون‌ها و ماسه سنگ‌های خیلی ریز همراه با بخش‌های شیلی و رسی. در مقایسه با دو رخساره دیگر، این رخساره دارای مقدار شیل و گامای متوسط (<۱۳۰) است.

رخساره الکتریکی ۳ (EF-3) واحدهای شیلی شامل

^۱ Clean Sandstones

^۲ Dirty Sandstones



شکل ۵- ستون سنگ‌شناسی به دست آمده از ارزیابی پتروفیزیکی و انطباق‌یافته با داده‌های مغزه در مقابل پاسخ لاگ گاما برای پنج چاه میدان ویچرنج. خطوط قائم زرد و قرمز به روی ستون نمودار اشعه گاما محدوده سه رخساره الکتریکی به دست آمده از تفکیک گونه‌سنگی رسوبی با استفاده از آنالیز خوشه‌ای را نشان می‌دهد (EF1, GR<80; EF2, GR<130; EF3, GR>130)

روی واحدهای ماسه‌ای متمرکز می‌شود.

شناسایی واحدهای جریان‌ی هیدرولیکی

تخلخل و تراوایی به عنوان دو فاکتور مهم در سرشت نمایی مخزن محسوب می‌شوند. ویژگی‌های منافذ تخلخل^۱ و ارتباط آنها با یکدیگر اساساً تحت تأثیر فرآیندهای زمین‌شناسی (بافت

تفکیک گونه‌های سنگی پتروفیزیکی در واحدهای ماسه‌ای

در مرحله دوم رخساره‌های پتروفیزیکی برای واحدهای ماسه‌ای توالی مخزن شناسایی شدند و واحدهای جریان‌ی مطالعه و تفکیک شدند. واحدهای ماسه‌ای، زون‌های تولید اصلی به صورت بالقوه در میدان بوده و عمده‌تاً منطبق بر رخساره الکتریکی^۱ در مخزن مورد مطالعه هستند. لذا مطالعات دقیق‌تر برای شناسایی رخساره‌های پتروفیزیکی بر

¹ Pore Spaces

حجم قسمت جامدسنگ است طبق معادله ۳ محاسبه می‌شود:

(معادله ۳)

در نهایت شاخص زون جریانی^۳ با استفاده از دو عبارت قبلی از رابطه ۴ به دست می‌آید:

$$FZI = \frac{RQI}{PMR} \quad (\text{معادله ۴})$$

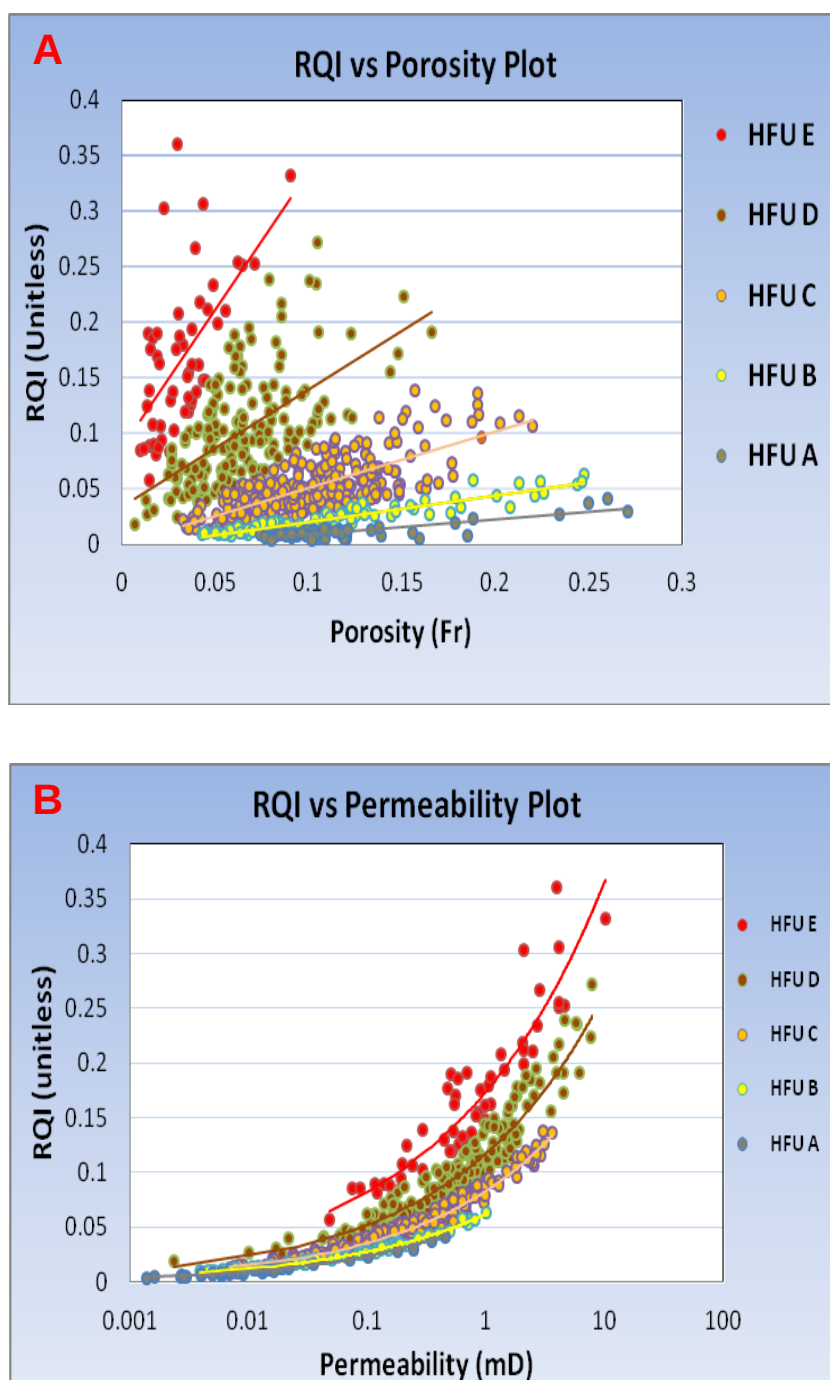
رسوبی و دیاژنز) بوده که نقش مهمی در حرکت سیال درون واحدهای مخزن دارد. واحدهای جریانی هیدرولیکی به عنوان شاخصی از واحدهای مخزنی هستند که درون آنها ویژگی‌های جریان به دلیل خصوصیات گلوگاه‌های منافذ^۱ یکنواخت است. به عبارت دیگر زون‌بندی مخزن بر مبنای واحد جریانی، مخزن را به زون‌ها یا لایه‌هایی بر مبنای ویژگی‌های جریان تقسیم‌بندی می‌کند که با اهداف مطالعات شبیه‌سازی مخزن بیشتر سازگار است (Bhattacharya et al. 2008). تفکیک گونه‌های سنگی بر اساس مفهوم واحدهای جریانی روشی است که توسط بسیاری از محققین به کار گرفته شده است (Ahr 1991; Amaefule et al. 1993; Ebanks 1987; Gunter et al. 1997; Kadkhodaie-Ilkhchi and Amini 2009; Larue and Legarre 2004; Perez et al. 2005; Ti et al. 1995). روش‌های معمول در تعیین واحدهای جریانی روش آمافوله یا FZI است که در این مطالعه نیز استفاده می‌شود. در این مطالعه از داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه به منظور شناسایی واحدهای جریانی مخزن استفاده شد. مراحل کار در شناسایی و تفکیک واحدهای جریانی به صورت زیر است: در ابتدا شاخص کیفیت مخزنی^۲ بر طبق روش آمافوله (Amaefule et al. 1993) طبق معادله ۲ محاسبه می‌شود:

$$RQI = 0.0314 \sqrt{\frac{k}{\phi}} \quad (\text{معادله ۲})$$

در این رابطه RQI شاخص کیفیت مخزنی بر حسب μm k تراوایی (mD) و ϕ تخلخل به صورت کسری است. شکل ۶ رابطه بین تخلخل و تراوایی با RQI برای واحدهای جریانی مختلف را در مخزن مورد مطالعه نشان می‌دهد. چنانچه از این شکل مشخص است تراوایی رابطه مشخص‌تری با RQI دارد. این موضوع نشان می‌دهد که تراوایی فاکتور اصلی کنترل‌کننده کیفیت مخزنی بوده و در ارتباط با ویژگی‌های گلوگاه‌های تخلخل در مخزن می‌باشد. در مرحله بعد پارامتر PMR که نسبت حجم منافذ تخلخل به

¹ Pore Throats ϕ
² Reservoir Quality Index $1 - \phi$

³ Reservoir Zone Indicator



شکل ۶ - رابطه بین شاخص کیفیت مخزنی (RQI) با تخلخل و تراوایی برای واحدهای جریان‌ی مختلف مخزن که به ترتیب در نمودارهای A و B نشان داده شده است

مرحله شامل نمودارهای چاه پیمایی مرتبط با سنگ‌شناسی و تخلخل مخزن (DT، RHOB و NPHI) مربوط به چهار چاه میدان (WR1، WR2، WR3 و WR4) هستند. روش کار در این مرحله نیز مانند تفکیک گونه‌های سنگی رسوبی است. از روش اقلیدوسی (معادله ۱) به منظور ایجاد داده‌های فاصله استفاده شد. سپس تابع Ward که سازگاری بیشتری با داده‌ها را نشان می‌دهد برای برقراری ارتباط بین داده‌های فاصله طبق رابطه ۵ بکار گرفته شد:

(معادله ۵)

$$d^2(r,s) = \frac{n_r n_s}{n_r + n_s} \frac{|\bar{x}_r - \bar{x}_s|^2}{2}$$

در این رابطه n_r تعداد اجزاء درون خوشه، x_{ri} جزء i ام در خوشه r ، $\bar{x}_r$ و $\bar{x}_s$ مرکز خوشه‌های r و s هستند. درخت خوشه‌ای استخراج شده برای این مرحله در شکل ۱۱ نشان داده شده است و بر روی آن خط افقی، مشخص‌کننده مقدار سطح برش، بیانگر تفکیک چهار خوشه یا رخساره الکتریکی برای نمودارهای پتروفیزیکی است. توضیحات بیشتر در مورد این خوشه‌ها و ارتباط آنها با کیفیت مخزنی در بخش بعدی توضیح داده می‌شود.

به منظور به‌دست آوردن تعداد بهینه واحدهای جریان‌ی با استفاده از مفهوم FZI از نمودار تجمعی چگالی^۱ به صورتی که در شکل ۷ نشان داده شده استفاده گردید. چنانچه از این نمودار مشخص است نقاط شکستگی موجود بر روی نمودار در واقع هریک منطبق بر یک واحد جریان‌ی معین است و طبق نمودار Log FZI نشان داده شده در شکل ۸، پنج واحد جریان‌ی هیدرولیکی به نام‌های A، B، C، D و E شناسایی شدند. مقادیر سطح برش برای تفکیک این واحدهای جریان‌ی به صورت زیر می‌باشد:

HFU A: Log FZI < -0.9

HFU B: -0.9 < Log FZI < -0.6

HFU C: -0.6 < Log FZI < -0.1

HFU D: -0.1 < Log FZI < 0.5

HFU E: Log FZI > 0.5

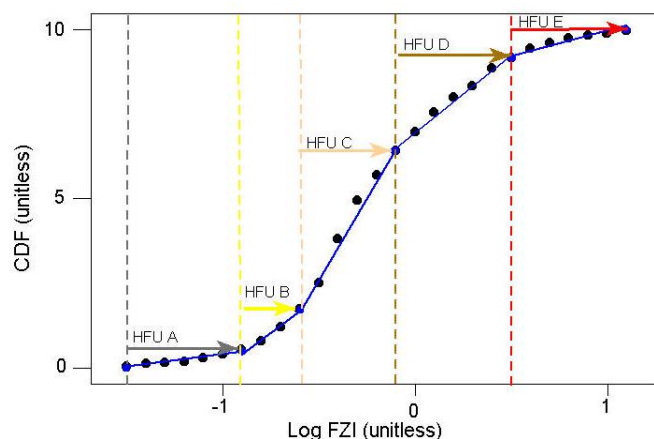
مطالعات مغزه رخساره‌های مخزن بیانگر این است که واحدهای جریان‌ی A و B منطبق بر ماسه سنگ‌های آرژیلیتی ریز و خیلی ریز و سیلتستون‌ها هستند. رخساره‌های مرتبط با واحد جریان‌ی C از ماسه سنگ‌های ریز تا متوسط و درشت متغیرند و واحدهای جریان‌ی D و E عمدتاً منطبق بر ماسه سنگ‌های متوسط تا درشت و خیلی درشت هستند.

نمودار روابط تخلخل و تراوایی نشان می‌دهد که هر واحد جریان‌ی هیدرولیکی دارای یک محدوده مشخص بر روی آن می‌باشد (شکل ۹). این موضوع اساساً مرتبط با سیستم گلوگاه‌های تخلخل درون هر واحد جریان‌ی است که تحت تأثیر فرآیندهای بافتی و دیاژنزی حاکم بر آن است. در شکل ۱۰، نمونه‌ای از رخساره‌های میکروسکوپی منطبق بر هر واحد جریان‌ی هیدرولیکی در سازند ویلسپی نشان داده شده است.

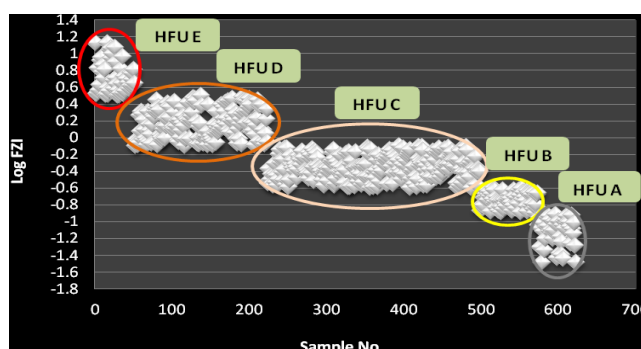
شناسایی رخساره الکتریکی در واحدهای ماسه‌ای مخزن

به منظور برقراری یک رابطه منطقی و واقعی بین واحدهای جریان‌ی و ماسه‌های گازی سفت، پاسخ‌های لاگ واحدهای ماسه‌ای طبق روش آنالیز خوشه‌ای دسته‌بندی شدند. داده‌های ورودی لاگ برای فرآیند خوشه‌سازی در این

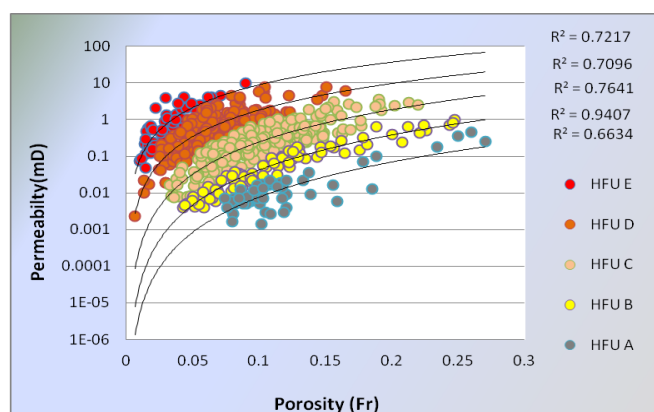
¹ Cumulative Density Plot



شکل ۷ - نمودار تجمعی چگالی Log FZI برای به دست آوردن تعداد بهینه واحدهای جریان در مخزن. بر روی این نمودار هر خط شکستگی منطبق بر یک واحد جریان مشخص است که با رنگ جداگانه‌ای نشان داده شده است.



شکل ۸ - نمودار Log FZI در مقابل تعداد کل نمونه‌ها. چنانچه مشخص است نمونه‌ها در پنج دسته مجزا منطبق بر پنج واحد جریان دسته‌بندی می‌شوند.



شکل ۹ - واحدهای جریان هیدرولیکی بر روی نمودار تخلخل و تراوایی. چنانچه مشخص است هر واحد جریانی دارای یک محدوده مشخص بر روی نمودار است.

تفسیر کیفیت مخزنی واحدهای ماسه‌ای در رابطه با واحدهای جریان‌ی و رخساره الکتریکی

در این بخش ما مشخصه‌های کلی رخساره‌های الکتریکی و رابطه آنها را با واحدهای جریان‌ی و کیفیت مخزنی توصیف می‌کنیم.

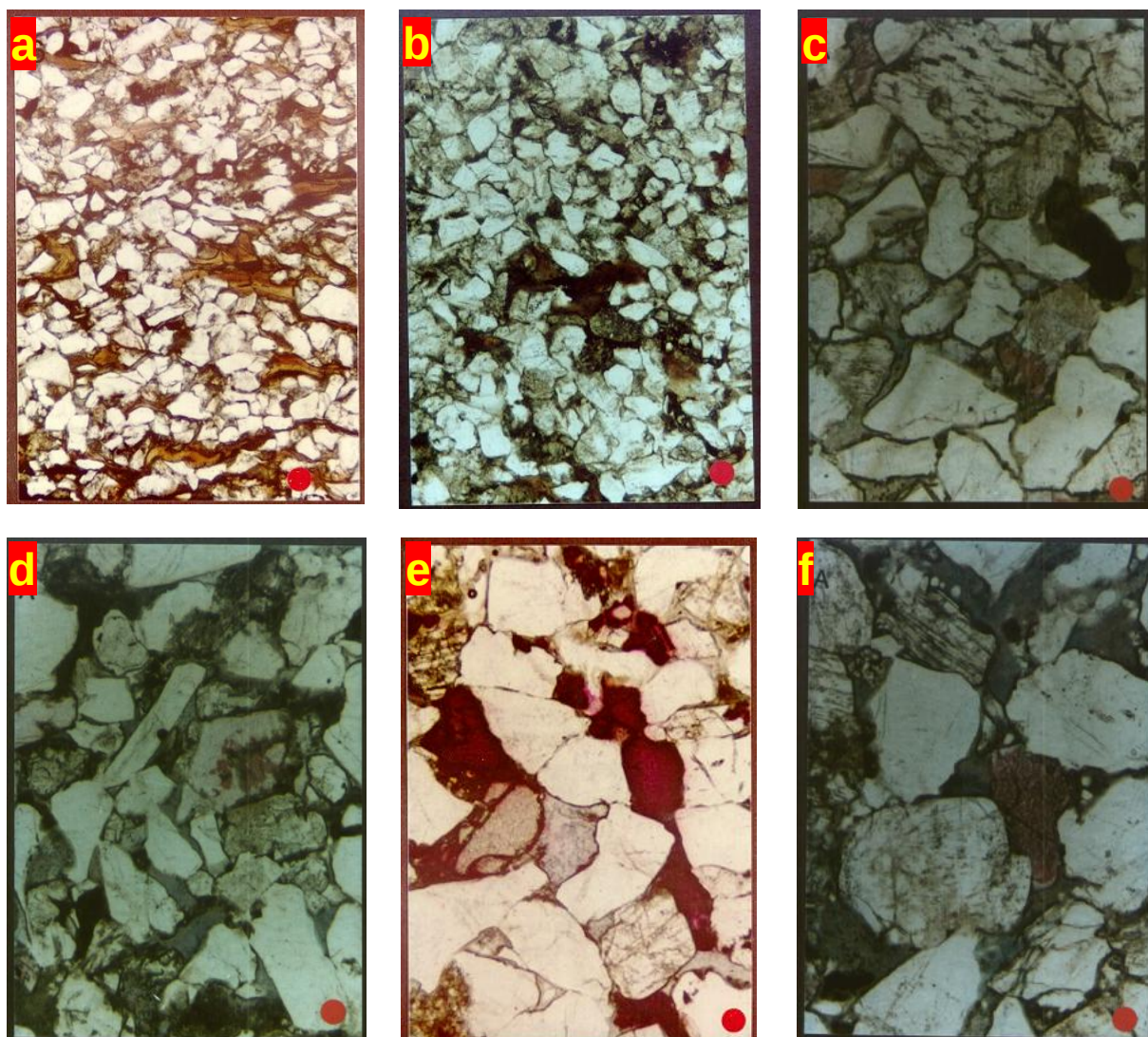
رخساره الکتریکی ۱ (EF1) عمدتاً از ماسه‌های متوسط تا درشت و خیلی درشت تشکیل می‌شود که منطبق بر واحدهای جریان‌ی D و E است. ماسه سنگ‌های ریز و خیلی ریز آرژیلیتی - سیلتی سهم کوچکی را در این رخساره الکتریکی دارند و منطبق بر واحد جریان‌ی C و تا حدی واحد جریان‌ی D هستند.

رخساره الکتریکی ۲ (EF2) تغییرات زیادی را در اندازه دانه رخساره‌ها نشان می‌دهد و از ماسه‌سنگ‌های دانه‌ریز تا درشت و خیلی درشت تشکیل می‌شود. تمام واحدهای جریان‌ی در این رخساره الکتریکی وجود دارند. در این رخساره الکتریکی ماسه‌سنگ‌های دانه‌ریز و خیلی ریز و سیلتستون‌ها منطبق بر واحدهای جریان‌ی A و B هستند. واحد جریان‌ی C عمدتاً منطبق بر ماسه سنگ‌های دانه ریز تا متوسط

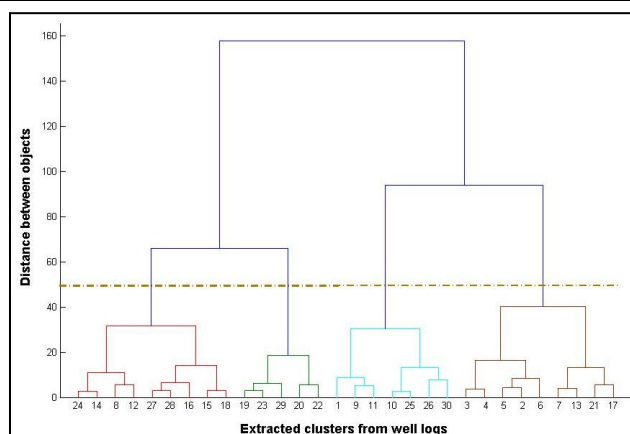
و در مواردی ماسه سنگ‌های دانه‌درشت است. ماسه‌سنگ‌های دانه‌متوسط تا درشت و خیلی درشت در این رخساره الکتریکی منطبق بر واحد جریان‌ی D و E هستند.

رخساره الکتریکی ۳ (EF3) درصد کمتری از رخساره‌ها را در مخزن شامل می‌شود. ماسه‌سنگ‌های دانه‌ریز در این رخساره الکتریکی منطبق بر واحدهای جریان‌ی A و B هستند. در مقابل واحد جریان‌ی C در ارتباط با ماسه سنگ‌های دانه متوسط تا درشت می‌باشد. به لحاظ پتروفیزیکی رخساره‌های دانه درشت در این رخساره الکتریکی مشابه رخساره الکتریکی ۴ هستند و بنابراین در یک گروه (ماسه سنگ‌های تیپ ۳) مورد بحث قرار می‌گیرند.

رخساره الکتریکی ۴ (EF4) دارای رخساره‌های منطبق بر واحدهای جریان‌ی A تا D است. در این رخساره الکتریکی ماسه‌سنگ‌های دانه ریز و آرژیلیتی و سیلتستون‌ها منطبق بر واحدهای جریان‌ی A و B می‌باشند. ماسه‌سنگ‌های دانه متوسط تا درشت منطبق بر واحد جریان‌ی D و بخش مهمی از واحد جریان‌ی C هستند.



شکل ۱۰ - نمونه‌ای از تصاویر مقاطع میکروسکوپی رخساره‌های رسوبی سازند ویلسپی که هر یک منطبق بر یک واحد جریانی شناسایی شده در مخزن است. نقطه قرمز رنگ در پایین هر تصویر به عنوان مقیاس بوده و برابر ۱۲/ میلی متر است. به منظور تفکیک کلسیت از دولومیت هر مقطع میکروسکوپی با آلزارین قرمز رنگ‌آمیزی شده است. (a) این نمونه که منطبق بر واحد جریانی A است یک نمونه ماسه سنگ میکادار است که در آن دانه‌های بیوتیت (دانه‌های قهوه‌ای) در نتیجه تراکم تغییر شکل داده‌اند و تخلخل در آن کاهش یافته است. (b) این نمونه که منطبق بر واحد جریانی B است یک ماسه سنگ دانه‌ریز با جورشدگی ضعیف و متشکل از ذرات زاویه‌دار کوارتز (بدون رنگ)، خرده سنگ‌های دگرگونی (قهوه‌ای) و چرت. نمونه به شدت توسط کانی‌های رسی (کائولینیت) سیمانی شده است. (c) این نمونه که منطبق بر واحد جریانی C است یک ماسه سنگ با دانه‌های عمدتاً کوارتز است که برخی منافذ تخلخل اولیه (آبی رنگ) در آن حفظ شده‌اند و با آستری از رس دیاژنزی (حواشی تیره رنگ) پوشیده شده‌اند. (d) این نمونه با جورشدگی ضعیف و عمدتاً متشکل از دانه‌های کوارتز منطبق بر واحد جریانی D است. فلدسپار در آن به صورت بخشی به کلسیت دگرسان شده است. چرت و خرده سنگ‌های دگرگونی نیز وجود دارند. منافذ تخلخل ثانویه (آبی کمرنگ) نیز وجود دارند که با کائولینیت پر شده‌اند. همچنین رس‌های دیاژنزی حاشیه‌ای نیز وجود معمول هستند. (e) نمونه دیگر ماسه سنگ با دانه کوارتز غالب (بدون رنگ) و سیمان کلسیت (قرمز رنگ) فراوان که منطبق بر واحد جریانی D است. نواحی آبی روشن تصویر منافذ تخلخل ثانویه هستند که با رس پوشیده شده و به‌طور بخشی با کائولینیت پر شده‌اند. (f) در این نمونه ماسه سنگی دانه درشت نیز که منطبق بر واحد جریانی E است منافذ تخلخل با رس پوشیده شده و به‌طور بخشی با کائولینیت پر شده‌اند.



شکل ۱۱- درخت خوشه‌ای یا دندورگرام حاصل از مرحله دوم آنالیز خوشه‌ای بر اساس نمودارهای پتروفیزیکی (NPHI, RHOB, DT) چهار چاه میدان (WR1, WR2, WR3 و WR4). بر اساس مقدار سطح برش انتخاب شده (خط افقی نشان داده شده بر روی نمودار) چهار خوشه یا رخساره الکتریکی مشخص شده است.

دیاژنزی مانند سیمانی‌شدن توسط سیلیس، کلسیت و کانی‌های رسی (کائولینیت) کیفیت مخزنی آنها به شدت از بین رفته است. بر اساس مطالعات مغزه مقدار تخلخل در آنها خیلی پایین گزارش شده است. متوسط تخلخل و تراوایی این رخساره‌ها به ترتیب ۳ درصد و ۰/۵ میلی داری است.

(ب) تیپ ۲ (ماسه سنگ‌های سفت^۲): این تیپ، از ماسه‌سنگ‌های دانه متوسط تا درشت و در مواردی خیلی درشت و گرانولی تشکیل می‌شود و مرتبط با واحدهای جریان D و E و تا حدودی واحد جریان C است. رخساره الکتریکی ۲ تطابق خوبی با ماسه سنگ‌های تیپ ۲ نشان می‌دهد. اثرات دیاژنزی بر روی این ماسه‌سنگ‌ها به صورت سیمانی‌شدن کائولینیت و هم‌رشدی‌های سیمان کوارتز عمل نموده‌اند. اما در مقایسه با ماسه سنگ‌های تیپ ۱، منافذ تخلخل در این نوع به‌ویژه به‌صورت بین دانه‌ای نسبتاً خوب حفظ شده‌اند. براساس مطالعات مغزه این رخساره‌ها، مقدار تخلخل در آنها کم تا متوسط است. متوسط تخلخل و تراوایی در این ماسه سنگ‌ها به ترتیب ۶-۷ درصد و ۰/۸۷ میلی داری است.

(ج) تیپ ۳ (ماسه‌سنگ‌های نیمه‌سفت^۳): این تیپ، از ماسه‌سنگ‌های دانه متوسط تا درشت و گرانولی تشکیل

شکل ۱۲ به طور خلاصه چهار رخساره الکتریکی مرتبط با رخساره‌های رسوبی و واحدهای جریان شناسایی شده در مخزن را نشان می‌دهد. بررسی مشخصه‌های تخلخل و تراوایی سنگ‌های مخزن نشان می‌دهد که در تمام رخساره‌های الکتریکی شناسایی شده یک روند افزایشی در مقدار تراوایی از واحدهای جریان با کیفیت مخزنی پایین به سمت واحدهای جریان با کیفیت مخزنی بالا وجود دارد. اما مقدار تخلخل توزیع یکنواختی را درون هر رخساره الکتریکی نشان می‌دهد.

در تمام رخساره‌های الکتریکی، واحدهای جریان با کیفیت مخزنی پایین (واحد جریان A، B و بخشی از واحد جریان C) منطبق بر رخساره‌های دانه‌ریز تشکیل شده در یک محیط کم‌انرژی هستند. اما در مورد ماسه‌سنگ‌های دانه متوسط تا درشت و خیلی درشت با توجه به شدت فرآیندهای دیاژنزی سه تیپ ماسه سنگ به صورت زیر مشخص می‌شوند:

(الف) تیپ ۱ (ماسه سنگ‌های خیلی سفت^۱): این تیپ منطبق بر رخساره الکتریکی ۱ بوده و واحدهای جریان D و E در آن غالبند. ماسه‌سنگ‌های دانه متوسط تا درشت و خیلی درشت در این رخساره الکتریکی تحت تأثیر فرآیندهای

² Tight Sandstones

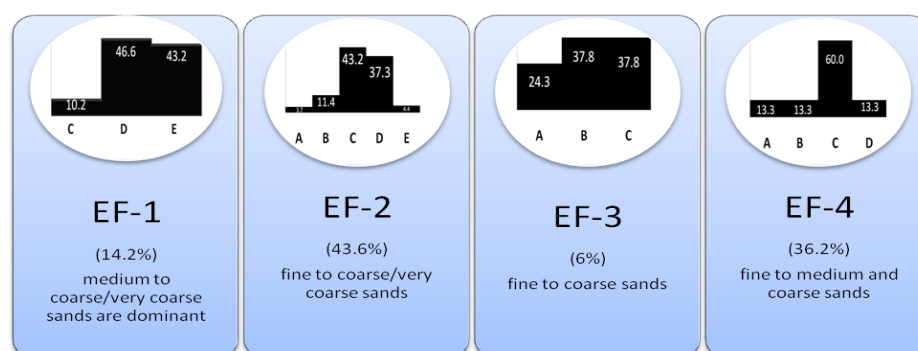
³ Sub-Tight Sandstones

¹ Very Tight Sandstones

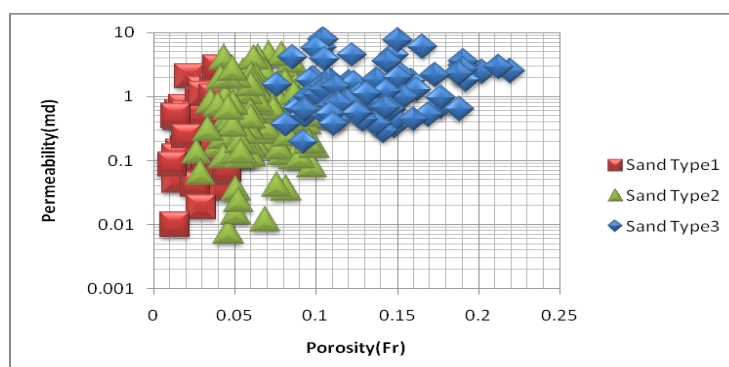
تخلخل از هم تفکیک شده‌اند. رابطه بین سه تیپ ماسه‌سنگ شناسایی شده در مخزن با نمودارهای پتروفیزیکی و واحدهای جریان برای چاه‌های میدان در شکل‌های ۱۵ الف تا د نشان داده شده است.

در جدول ۱ پارامترهای آماری داده‌های مغزه و نمودار چاه‌پیمایی برای سه تیپ ماسه و همچنین ماسه سنگ‌های آرژیلیتی دانه ریز مشخص شده است. در یک مقایسه بین چاه‌های میدان ویچرنج چنانچه در هیستوگرام شکل ۱۶ و نیز شکل ۱۵ نشان داده شده است مشخص می‌شود که چاه‌های WR1 و WR4 درصد بالایی از ماسه‌سنگ‌های تیپ ۳ با کیفیت مخزنی بالا را شامل می‌شوند.

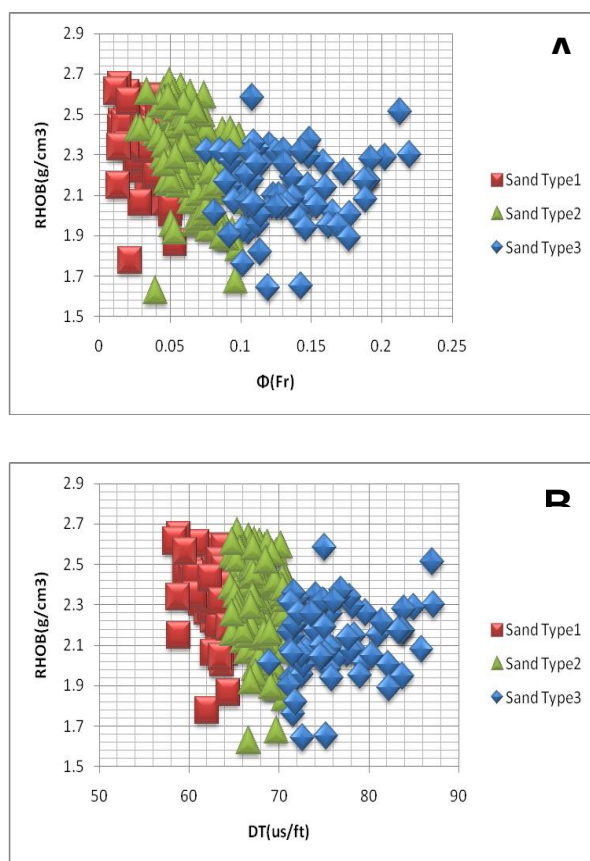
می‌شود و منطبق با واحد جریان C (به طور غالب در رخساره الکتریکی ۴) و واحد جریان D و بخش قابل توجهی از واحد جریان C (بطور غالب در رخساره الکتریکی ۴) است. ماسه سنگ‌های تیپ ۳ در مقایسه با دو تیپ دیگر دارای کیفیت مخزنی بهتری هستند. تخلخل در این نوع مشابه تیپ ۲ و از نوع بین دانه‌ای بوده و براساس توصیفات مغزه کم تا متوسط است. متوسط تخلخل و تراوایی در این ماسه‌سنگ‌ها به ترتیب ۱۳ درصد و ۱/۶۵ میلی داری است. شکل ۱۳ نمودار تخلخل و تراوایی را برای سه تیپ ماسه‌سنگ نشان می‌دهد. در شکل ۱۴ الف و ب نیز این ماسه سنگ‌ها بر روی نمودار چگالی در مقابل لاگ صوتی و



شکل ۱۲ - رخساره الکتریکی در رابطه با رخساره‌های رسوبی و واحدهای جریان هیدرولیکی مخزن. واحدهای جریان A و B در ارتباط با رخساره‌های دانه ریز در رخساره الکتریکی ۳ و ۴ غالب‌اند. واحدهای جریان D و E در ارتباط با رخساره‌های دانه درشت و خیلی درشت در رخساره الکتریکی ۱ و ۲ معمول هستند. واحد جریان C در ارتباط با رخساره‌های دانه ریز تا دانه درشت مخزن دارای توزیع متفاوتی در تمام رخساره‌های الکتریکی است.



شکل ۱۳- نمودار تخلخل - تراوایی برای سه تیپ ماسه سنگ میدان ویچرنج. همان‌طور که مشخص است ماسه‌سنگ‌های تیپ ۳ در محدوده بالاتری از تخلخل و تراوایی نسبت دو تیپ ماسه‌سنگ دیگر قرار دارند.

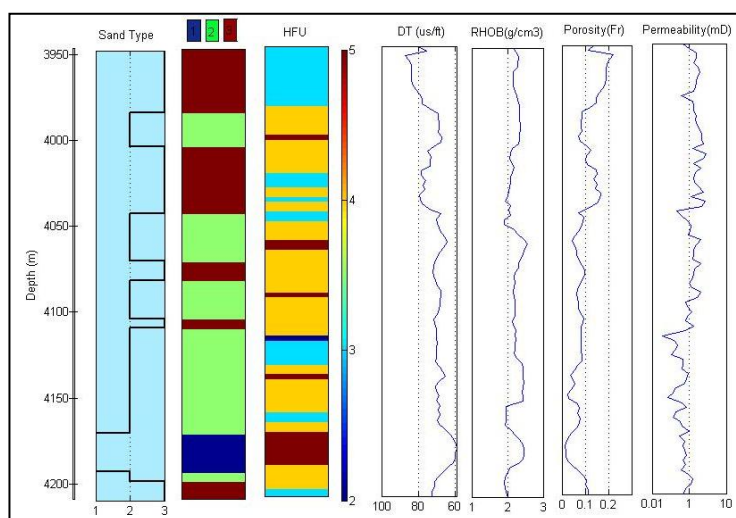


شکل ۱۴- تفکیک سه تیپ ماسه‌سنگ میدان ویچرنج بر اساس نمودار چگالی در مقابل تخلخل (A) و چگالی در مقابل لاگ صوتی (B). همان‌طور که مشخص است ماسه‌سنگ‌های تیپ ۳ با داشتن مقدار لاگ صوتی و تخلخل بالاتر و چگالی کمتر کیفیت مخزنی بهتری را نسبت به دو تیپ ماسه‌سنگ دیگر نشان می‌دهند.

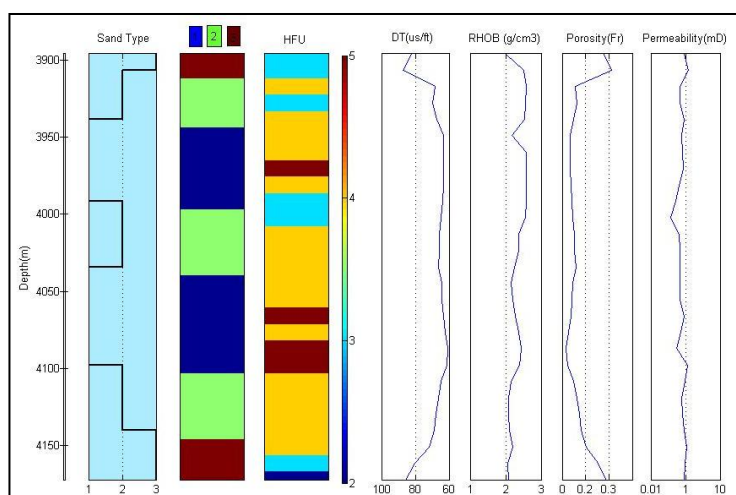
نتیجه‌گیری

شیلی تغییر می‌کنند. مطالعه بیشتر بخش‌های ماسه‌ای در رابطه با نمودارهای پتروفیزیکی و ارتباط آنها با واحدهای جریان‌ی هیدرولیکی منجر به تفکیک سه تیپ اصلی ماسه سنگ (تیپ ۱ تا ۳) در مخزن گردید. این واحدهای ماسه‌ای اساساً سفت بوده و براساس شدت اثرات دیاژنزی در آنها ویژگی‌های تخلخل و تراوایی متفاوتی دارند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که ماسه‌های تیپ ۳ با داشتن بهترین کیفیت مخزنی عمدتاً در چاه‌های WR1 و WR4 میدان گسترش دارند.

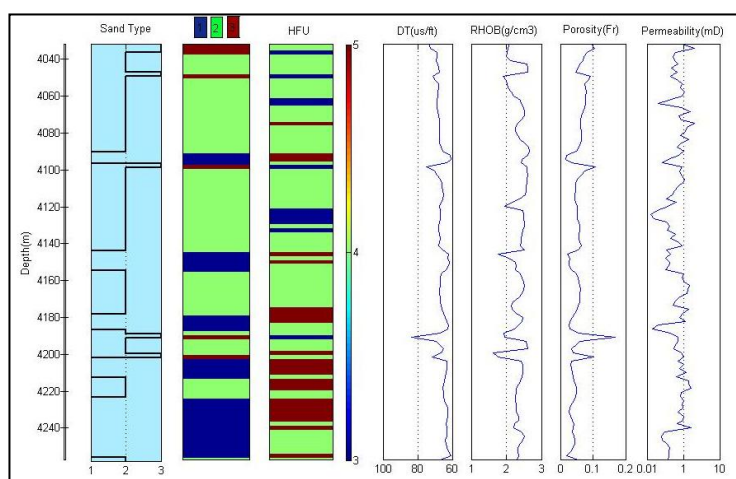
نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که بررسی رخساره‌های مخزن توسط یک مجموعه مناسبی از نمودارهای چاه‌پیمایی (گاما، نوترون، صوتی و چگالی) همراه با داده‌های تخلخل و تراوایی مغزه یک روش کاربردی و مفید برای شناسایی و طبقه‌بندی سنگ‌های مخزن بر اساس مشخصه‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی آنهاست. از طرفی بررسی رخساره‌های الکتریکی مخزن در چارچوب واحدهای جریان‌ی هیدرولیکی نقش مهمی در مشخص کردن زون‌های تولید دارد. رخساره‌های الکتریکی مشتق‌شده از داده‌های نمودار چاه‌پیمایی چهار چاه میدان ویچرنج بیانگر ناهمگونی بالای سنگ‌های مخزن است که رخساره‌های آن از بخش‌های ماسه‌ای تمیز تا واحدهای



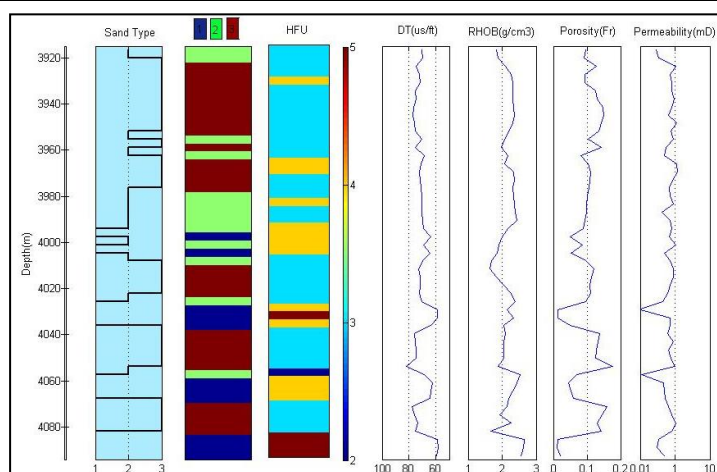
شکل ۱۵- الف



شکل ۱۵- ب

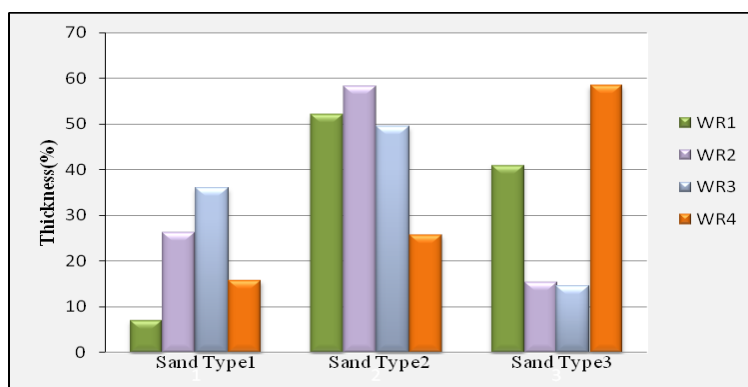


شکل ۱۵- ج



شکل ۱۵- د

شکل ۱۵- ارتباط لاگ‌ها و واحدهای جریان‌ی در سه تیپ ماسه‌سنگ مخزن میدان ویچرنج برای چاه‌های WR1 (الف)، WR2 (ب)، WR3 (ج) و WR4 (د). سه تیپ ماسه‌سنگ و واحدهای جریان‌ی با ستون‌های رنگی و کدبندی شده در طرف چپ و نمودارهای چاه (صوتی و چگالی) و تخلخل و تراوایی به صورت منحنی در طرف راست نمایش داده شده‌اند. مطابق شکل الف واحد جریان‌ی D (کد ۴) و ماسه‌های تیپ ۲ و ۳ در چاه WR1 غالب هستند. در چاه WR2 و WR3 به ترتیب در شکل‌های ب و ج واحد جریان‌ی D (کد ۴) و ماسه‌های تیپ ۱ و ۲ غالب‌اند. در چاه WR4 در شکل د نیز ماسه‌های تیپ ۳ و واحد جریان‌ی C (کد ۳) غالب هستند.



شکل ۱۶ - هیستوگرام توزیع ضخامت سه تیپ ماسه سنگ در چهار چاه میدان ویچرنج. ماسه‌سنگ‌های تیپ ۳ (نیمه‌سفت) با کیفیت مخزنی بهتر درصد بالایی را در چاه‌های WR1 و WR4 تشکیل می‌دهند.

جدول ۱- مشخصه‌های کمی انواع مختلف ماسه‌سنگ‌های شناسایی شده در مخزن برای چهار چاه میدان ویچرنج (WR1, WR2, WR3, WR4) و ارتباط آنها با رخساره‌های رسوبی، رخساره الکتریکی و واحدهای جریان هیدرولیکی. برای هر نوع ماسه‌سنگ پارامترهای آماری مقادیر نمودار چاه، تخلخل و تراوایی مشخص شده‌اند.

Tight Sand Rock Typing in the Whicher Range Field

Rock Type		DT	RHO B	GR	Φ (FR)	K (MD)	E F	HF U	Depositional Facies
Very Tight Sandstone	MIN	58.4	1.8	40.1	0.01	0.01	1	D& E	Medium/coarse to very coarse sand, tightly cemented by calcite, silica and clay cements
	AVG	62.4	2.3	69.5	0.03	0.53			
	MAX	64.3	2.6	91.2	0.06	3.93			
	STDEV	1.6	0.17	15.5	0.01	0.66			
Tight Sandstone	MIN	64.6	1.6	40.3	0.03	0.007	2	D& E	Medium to coarse sand, cemented by silica, calcite and clay, poor to fair intergranular porosity
	AVG	67.9	2.3	79.7	0.06	0.87			
	MAX	70.9	2.7	131.4	0.10	4.62			
	STDEV	1.7	0.21	23.8	0.02	0.96			
Sub-Tight Sandstone	MIN	71.1	1.6	37.4	0.06	0.19	3 & 4	C& D	Medium to coarse sand, affected by silica, calcite and clay cements, poor to fair intergranular porosity
	AVG	75.8	2.1	62.0	0.13	1.65			
	MAX	87.2	2.6	124.9	0.22	7.87			
	STDEV	4.2	0.18	22.4	0.03	1.66			
Fine grained and silty sandstone	MIN	64.6	1.5	40.6	0.04	0.001	1 to 4	A& B	Very fine/fine and argillaceous sand
	AVG	74.5	2.2	87.9	0.12	0.09			
	MAX	97.4	2.6	131.3	0.27	0.8			
	STDEV	6.9	0.29	25.87	0.05	0.16			

References

- Acosta, L., et al. 2005, Reservoir Study V9 of El Furrial Field, Venezuela: paper SPE 95047 presented at the SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Rio de Janeiro, Brazil, June 20-23.
- Ahr, W. M., 1991, Pore characteristics as surrogates for permeability in mapping reservoir flow units: Vacuum San Andreas field, Lea County, New Mexico (abs.): AAPG Bull. v. 75(3), p. 532-533.
- Ali-Nandalal, J. and G. Gunter, 2003, Characterizing Reservoir Performance for the Mahogany 20 Gas Sand Based on Petrophysical and Rock Typing Methods: paper SPE 81048 presented at the SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Port-of-Spain, Trinidad, West Indies, Apr. 27-30.
- Amaefule, J.O., M. Altunbay, D. Tiab, D.G. Kersey, and D.K. Keelan, 1993, Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells: SPE. 26436, p. 1-16.
- Archie, G.E., 1950, Introduction to Petrophysics of Reservoir Rocks: AAPG Bulletin, v. 34, p.943-961.
- Bhattacharya, S., A. P. Byrnes, W. L. Watney, and J. H. Doveton, 2008, Flow unit modeling and fine-scale predicted permeability validation in Atokan sandstones: Norcan East field, Kansas: AAPG Bulletin, v. 92, no. 6, p.709-732.
- Bucheb, J.A., and H.B. Evans, 1994, Some applications of method used in electrofacies identification: The Log Analyst, v.35, p.14-26.

- Cadman, S.J., L. Pain, and V. Vuckovic, 1994, Perth Basin, W.A., Australian Petroleum Accumulations Report 10, Bureau of Resource Sciences, Canberra, 103 p.
- Crostella, A., 1995, An evaluation of the hydrocarbon potential of the onshore northern Perth Basin: Western Australia Geological Survey, Report 43, 67 p.
- Crostella, A., and J. Backhouse, 2000, Geology and petroleum exploration of the central and southern Perth Basin, Western Australia: Western Australian Geological Survey, Report 57, p. 1-73.
- Dorfman, M.H., J.J. Newey, and G.R. Coates, 1990, New techniques in lithofacies determination and permeability prediction in carbonate using well logs, Geological applications of wireline logs, Geological Society Special Publication. v. 48, p.113-120.
- Davies, K.K., B.P.J. Williams, and R.K. Vessell, 1991, Reservoir Geometry and Internal Permeability Distribution in Fluvial, Tight Gas Sandstones, Travis Peak Formation, Texas: paper SPE 21850 presented at the Rocky Mountain Regional Meeting and Low Permeability Reservoirs Symposium, Denver, CO, April 15-17.
- Doveton, J.H., and S.E. Pinsky, 1992, Geological applications of wireline logs-A synopsis of developments and trends: The Log Analyst, v. 33, p. 286-303.
- Ebanks, W. J., 1987, Flow unit concept: Integrated approach to reservoir description for engineering projects (abs.): AAPG Bull. v. 71, 551-552.
- Gunter, G.W., J. M., Finneran, D. J. Hartmen, and J.D. Miller, 1997a, Early determination of reservoir flow units using an integrated petrophysical method: SPE Paper 38679, Proceedings, Society of Petroleum Engineers Annual Technical Conference and Exhibition, p. 373-380.
- Izadi, M., A. Ghalambor, 2013, A new approach in permeability and hydraulic flow unit determination: SPE Reservoir Evaluation & Engineering v. 16, No. 3, p. 257-264.
- Jain A.K., M.N. Murty and P.J. Flynn, 1999, Data clustering: A review. ACM Computing Surveys, v. 31(3), p. 264-323.
- Kim, J.W., and J.S. Lim, 1998, Automated Electrofacies Determination using Multivariate Statistical Analysis, Proceeding of the 1998 Conference for The Korean Society of Petroleum Geology, p.10-14.
- Kadkhodaie-Ilkhchi, A., and A. Amini, 2009, A fuzzy logic approach to estimating hydraulic flow units from well log data: A case study from the Ahwaz Oilfield, south Iran: J. Pet. Geol. v. 32, p. 67-78.
- Kumar, B., M. Kishore, 2006, Electrofacies classification- a critical approach: 6th International Conference and Exposition on Petroleum Geophysics, Kolkata, 822-825.
- Larue, D.K., H. Legarre, 2004, Flow units, connectivity, and reservoir characterization in a wave-dominated deltaic reservoir: Meren reservoir, Nigeria: AAPG Bulletin, v. 88, No. 3, p. 303-324.
- Lee, S.H., and A. Datta-Gupta, 1999, Electrofacies characterization and permeability predictions in carbonate reservoirs: Role of multivariate analysis and nonparametric regression: SPE Annual Technical Conference and Exhibition OMEGA, Houston, Texas, p. 409-421.
- Lee, S.H., A. Kharghoria, and A. Datta-Gupta, 2002, Electrofacies Characterization and Permeability Predictions in Complex Reservoirs: SPE Reservoir Evaluation & Engineering, 237-248.
- Mathisen, T., S.H. Lee, and A. Datta-Gupta, 2001, Improved Permeability Estimates in Carbonate Reservoirs Using Electrofacies Characterization: A Case Study of the North Robertson Unit, West Texas: paper SPE 70034 presented at the SPE Permian Basin Oil and Gas Recovery Conference, Midland, TX, May 15-16.
- Moline, R.G., and J.M. Bahr, 1995, Estimating spatial distributions of heterogeneous subsurface characteristics by regionalized classification of electrofacies: Mathematical Geology, v. 27(1), p. 3-22.
- Owad-Jones, D.L., and G.K. Ellis, 2000, Western Australia atlas of petroleum fields, Onshore Perth Basin: Petroleum Division, DMEWA. v.1, 122 p.
- Perez, H.H., A. Datta-Gupta, S. Mishra, 2003, The role of electrofacies, lithofacies and hydraulic flow units in permeability prediction from well logs: A comparative analysis using classification trees: Society of Petroleum Engineers Annual Conference and Exhibition, Denver, Colorado, October 5-8, SPE Paper 84301, 11 p., doi: 10.2118/84301-MS.
- Perez, H.H., A. Datta-Gupta, S. Mishra, 2005, The role of electrofacies, lithofacies and hydraulic flow units in permeability prediction from well logs: A comparative analysis using classification trees: SPE Reservoir Evaluation & Engineering, v. 8, p. 143-155.
- Playford, P.E., A.E. Cockbain, and G.H. Low, 1976, Geology of the Perth Basin: Western Australia Geological Survey, Bulletin 124, 311p.
- Porras, J.C., R. Barbato, and L. Khazen, 1999,

- Reservoir Flow Units: A comparison between three different models in the Santa Barbara and Pirital fields, north Monagas area, eastern Venezuela Basin: paper SPE 53671 presented at the SPE Latin American and Caribbean Petroleum Engineering Conference, Caracas, Venezuela, April 21-23.
- Sefidari, E., A. Kadjhodaie-Ilkhchi, S. Najjari, 2012, Comparison of intelligent and statistical clustering approaches to predicting total organic carbon using intelligent systems: *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 86-87, p. 190-205.
- Rezaee, R., A. Saeedi, B. Clennell, 2012, Tight gas sands permeability estimation from mercury injection capillary pressure and nuclear magnetic resonance data, v. 88-89, p. 92-99.
- Rushing, J.A., 2008, Rock Typing - Keys to Understanding Productivity in Tight Gas Sands: Unconventional Reservoirs Conference, Keystone, Colorado, U.S.A.
- Serra, O., 1986, Fundamentals of well log interpretation, the interpretation of logging data: *Developments in Petroleum Science* 15B, Elsevier, Amsterdam, 684p.
- Serra, O., and H.T. Abbot, 1982, The contribution of logging data to sedimentology and stratigraphy: *Society Petroleum Engineers Journal*, v. 22, p. 117-135.
- Song, T., and P.A. Cawood, 2000, Structural styles in the Perth Basin associated with the Mesozoic break-up of Greater India and Australia: *Tectonics Special Research Centre, School of Applied Geology*, 317, p. 55-72.
- Sharif, A., 2007, Tight-gas resources in Western Australia, PWA, p. 28-31
- Shenawi, S.H., et al. 2005, Permeability and water saturation distribution by lithologic facies and hydraulic units: A reservoir simulation study: paper SPE 105273 presented at the 15th SPE Middle East Oil & Gas Show and Conference, Kingdom of Bahrain, March 11-14.
- Tavakoli, V., A. Amini, Application of Multivariate Cluster Analysis in Logfacies Determination and Reservoir Zonation, Case Study of Marun Field, South of Iran: *JUST*, v. 32(2), p.69-75.
- Ti, G., D.O. Ogbe, W. Munly, and D. G. Hatzignatiou, 1995, Use of flow units as a tool for reservoir description: A case study: *Society of Petroleum Engineers Formation Evaluation*, v. 10, p. 122-128.