

تلفیق مطالعات پتروگرافی و رخساره لاگ برای تفسیر کیفیت مخزنی بخش بالایی سازند سورمه در میدان بلال

علی اسعدی، دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی نفت، دانشگاه تهران

حسین رحیم پوربناب، استاد دانشکده زمین‌شناسی، دانشگاه تهران*

علی چهارازی، شرکت نفت فلات قاره

علی کدخدایی، استادیار گروه زمین‌شناسی دانشگاه تبریز

سپیده سهرابی، دانشجوی کارشناسی ارشد زمین‌شناسی نفت، دانشگاه تهران

چکیده

بخش بالایی سازند سورمه (معادل سازند عرب) با سن ژوراسیک بالایی در میدان بلال واقع در خلیج فارس، متشکل از یک توالی کربناته-تبخیری بوده، که در یک رمپ کربناته نهشته شده است. در این مطالعه با هدف درک کیفیت مخزنی این سازند، تلفیق مطالعات پتروگرافی و رخساره‌های لاگ استفاده شده است. لاگ‌های چاه‌پیمایی به دلیل ماهیت پیوسته آنها و در دسترس بودنشان در اکثر چاه‌های یک میدان، می‌توانند به منظور ارزیابی بهتر یک مخزن هیدروکربنی مورد استفاده قرار گیرند. استفاده از مفهوم رخساره لاگ، که عکس‌العمل لاگ‌های گرفته شده از توالی مورد مطالعه بوده و از طریق آن می‌توان توالی مورد بررسی را به واحدهایی با مشخصات مشابه تفکیک نمود، ابزاری کارآمد برای ارزیابی بهتر مخزن می‌باشد. در این تحقیق یک رویکرد دو مرحله‌ای به منظور سرشت‌نمایی و بررسی کیفیت مخزنی در توالی مورد مطالعه، به کار گرفته شد. ابتدا براساس پتروگرافی مقاطع نازک و در نظر گرفتن مشخصات رخساره‌ای-دیاژنزی، هفت گونه‌سنگی عمده شناسایی گردید. هر کدام از این واحدها دارای مشخصات زمین‌شناسی-پتروفیزیکی معین بوده و از نظر کیفیت مخزنی قابل تفسیر می‌باشند. از نظر کیفیت مخزنی، گونه‌های سنگی از خوب به ضعیف به ترتیب شامل دولومیت گرینستونی، دولومیت دانه‌شکری، آهک گرینستونی-پکستونی، دولومیت با رخساره گل غالب، آهک با بافت گل غالب، دولومیت انیدریتی و دولومیت متراکم می‌باشند. سپس با استفاده از روش آنالیز خوشه‌ای سلسله مراتبی (HCA)، پنج رخساره لاگ بهینه در سه چاه مورد مطالعه مشخص گردید. هر کدام از این پنج رخساره نیز براساس لاگ‌های پتروفیزیکی مورد استفاده از هم قابل تفکیک می‌باشند. در نهایت پس از مشخص شدن رخساره لاگ‌ها، توزیع و گسترش آنها در هر کدام از هفت گونه‌سنگی مشخص و براین اساس از دیدگاه مخزنی تفسیر شدند. رخساره‌های چهار و دو در گونه‌های سنگی با کیفیت مخزنی خوب شامل هفت، پنج، دو و سه بیشترین و در واحدهای با کیفیت مخزنی ضعیف شامل یک و چهار کمترین گسترش را دارند. بیشترین گسترش رخساره‌های یک و پنج در واحدهای با کیفیت مخزنی ضعیف شامل گونه‌های سنگی یک و چهار و فراوانی بیشتر رخساره سه در گونه‌سنگی دو دیده می‌شود.

واژه‌های کلیدی: میدان بلال، بخش بالایی سازند سورمه، گونه‌سنگی، رخساره لاگ، کیفیت مخزنی

مقدمه

اهمیت مخزنی سازند عرب در بخش فلات قاره ایران و به ویژه میادین هیدروکربنی عظیمی که این سازند در کشورهای حاشیه خلیج فارس تشکیل می‌دهد، باعث شده تا مطالعات زیادی از جنبه‌های مختلف زمین‌شناسی و مهندسی بر روی آن انجام گیرد (Powers 1962; Alsharhan and Magara 1995; Lindsay et al. 2006; Al-Husseini 1997). توالی کربناته-تبخیری سازند عرب در بخش فلات قاره (Offshore) ایران گسترش داشته و در میادین بلال، سلمان، رشادت و رسالت زون مخزنی اصلی محسوب می‌شود. هدف از مطالعات مخزنی، تعیین توزیع ویژگی‌های پتروفیزیکی به صورت سه بعدی در درون مخزن است (Lucia 2007; Ahr 2008). داده‌های پتروفیزیکی به صورت ذاتی فاقد اطلاعات فضایی بوده و برای تعیین گسترش آنها می‌بایست به یک مدل زمین‌شناسی سه بعدی دقیق مرتبط گردند (Ahr 2008). گسترش و تنوع رخساره‌های مخزنی در سنگ‌های کربناته بسیار زیاد است. فرآیندهای رسوبی، تغییرات دیاژنزی و شکستگی‌ها از عوامل مهم در ایجاد ناهمگنی در مخازن کربناته محسوب می‌شوند (Ahr 2008). برای درک صحیح یک مخزن هیدروکربنی، نیاز به تلفیق و استفاده از تمام داده‌ها می‌باشد. مطالعات محیط رسوبی همراه با بررسی‌های دیاژنزی در کنار مدلسازی داده‌های لاگ و لرزه، نقش مهمی در درک صحیح یک مخزن هیدروکربنی ایفا می‌کند. به دلیل ارتباط پیچیده و مبهم دو پارامتر تخلخل و تراوایی در اکثر مخازن کربناته، استفاده از روش‌های مختلف به منظور تفکیک واحدهای متفاوت از نظر ویژگی‌های پتروفیزیکی در این مخازن کاربردی خواهد بود (Gunter et al. 1997). شناسایی و تعیین واحدهای با مشخصات زمین‌شناسی و مهندسی مشابه که ویژگی‌های سیال و سنگ را در نظر گیرد، ضروری و کارآمد است. مفهوم

واحدهای جریان‌ی و گونه‌های سنگی به منظور سرشت نمایی مخزن به صورت گسترده توسط محققین مختلف استفاده شده است (Ameaful et al. 1993; Abbaszade et al. 1996; Fahad and Holditch 2000; Padalko 2003). برای گونه‌ها یا گروه‌های سنگی تعاریف گوناگون و مختلفی ارائه شده است. یک گونه‌سنگی می‌تواند به صورت مجموعه رخساره‌هایی که در یک یا چند پارامتر مشابه بوده و از سایر بخش‌ها متمایزاند تعریف گردد (Shlumberger 1989). در این مطالعه از این مفهوم به صورت مجموعه رخساره‌های با محدوده مشخص تخلخل و تراوایی استفاده شده است.

اصطلاح رخساره لاگ (Electrofacies) اولین بار توسط سِرا و ابات (Serra and Abbott 1980) به صورت عکس‌العمل مجموعه‌ای از لاگ‌ها که مشخص‌کننده لایه‌های مختلف از هم است، معرفی گردید. عموماً یک رخساره لاگ می‌تواند معرف یک یا چند لیتوفاسیس باشد. استفاده از لاگ‌های پتروفیزیکی به‌عنوان یکی از داده‌های در دسترس در بیشتر چاه‌ها، می‌تواند در کنار سایر داده‌ها شامل اطلاعات مغزه و خرده‌های حفاری، به منظور تفسیر بهتر زمین‌شناسی استفاده شود. در صورتی که رخساره لاگ‌های تعیین شده با استفاده از اطلاعات زمین‌شناسی تفسیر گردد می‌توان از تفسیر آنها در چاه‌های مختلف استفاده نمود. در این مطالعه پس از بررسی مقاطع نازک و توصیف جامع آنها در دو چاه، رخساره‌های مخزنی مشخص و در مرحله بعد از طریق تلفیق آنها هفت گونه‌سنگی مشخص شد. هر کدام از این واحدها براساس توزیع تخلخل و تراوایی از هم متمایز می‌باشند، بنابراین هر واحد جریان‌ی از نظر مشخصات پتروفیزیکی-زمین‌شناسی مشخص و قابل شناسایی است. در مرحله بعد با استفاده از لاگ‌های تخلخل (NPHI)، چگالی (RHOB)، سونیک (DT) و گاما (GR) رخساره لاگ‌ها تعیین و براساس گسترش آنها در

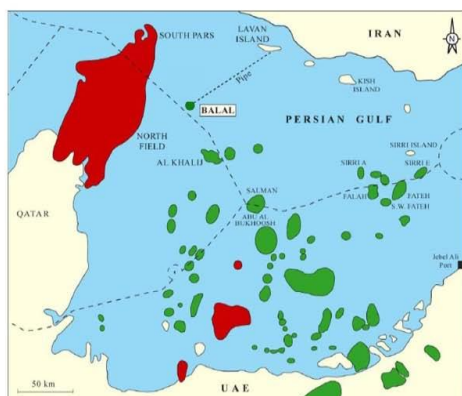
هر کدام از گونه‌های سنگی تفسیر رخساره‌ها انجام گرفت.

زمین‌شناسی و موقعیت جغرافیایی

میدان بلال واقع در بخش دور از ساحل خلیج فارس در نزدیک مرز ایران و قطر قرار دارد. این میدان در حدود ۸۰ کیلومتری جنوب غربی جزیره لاوان و ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی میدان پارس جنوبی واقع است. در این میدان سه توالی سورمه بالایی (عرب زون) با سن کیمبریجین-پورتلندین با لیتولوژی عمده دولومیت-انیدریت-آهک، داریان با سن آپتین و لیتولوژی آهک و نیز بخش بالایی سروک با سن سنومانین و لیتولوژی آهک، مخزن محسوب می‌شوند. زون مخزنی اصلی این میدان بخش عرب زون سازند سورمه می‌باشد. به نظر می‌رسد آهک‌ها و شیل‌های بخش عمیق سازند سورمه سنگ منشأ و انیدریت هیث و انیدریت‌های همراه با لایه‌های دولومیتی پوش سنگ سیستم نفتی ژوراسیک میدان بلال باشد. نفت بخش عرب زون این میدان از نوع بسیار مرغوب (API

۴۲) است. به طور کلی بخش عرب زون سازند سورمه به دو بخش بالایی با لیتولوژی دولومیت و انیدریت شامل شش لایه مخزنی (A1- A6) و پایینی با لیتولوژی آهک و دولومیت شامل یک لایه مخزنی (A7) تقسیم می‌شود (Zohorian 2006). از نظر تکتونیکی، ساختمان بلال یکی از چندین بلندی تشکیل شده در پهلوی شیبدار بخش شرقی کمان فارس- قطر بوده و دارای ساختار تاقدیسی گنبدی شکل که توسط گسل‌های نرمال تحت تأثیر قرار گرفته است می‌باشد.

موقعیت میدان مورد مطالعه نشان داده شده است (Total 2002) (شکل ۱-الف). لیتولوژی این بخش مخزنی و معادل آن سازند عرب در میدان قوار عربستان که بزرگترین میدان نفتی دنیا را تشکیل می‌دهد مقایسه شده است. همان‌گونه که مشخص است نسبت به توالی هم ارز این سازند در میدان قوار، گسترش دولومیت‌ها در توالی مورد مطالعه بسیار بالا بوده و دولومیتی‌شدن گسترده، یکی از مهمترین ویژگی‌های این توالی می‌باشد (شکل ۱-ب).



ب

Zonation Arab Zone Balal Field				Zonation Arab Formation Ghawar Field			
Age	Formation	Member	Lithology	Age	Formation	Member	Lithology
Upper Jurassic	HITH			Upper Jurassic	ARAB		
		A1				A	
		A2				B	
		A3				C	
		A4				D	
		A5					
		A6					
		A7					

الف

شکل ۱- (الف)- نقشه موقعیت جغرافیایی میدان بلال در خلیج فارس (Total 2002). (ب)- مقایسه زون‌بندی مورد استفاده

در سازند عرب، الف- میدان بلال ب- میدان قوار در عربستان (با تغییرات از Vieban et al. ; Cantrell and Huggert 2003

(2000

روش مطالعه

این تحقیق بر روی چهار چاه A، B، C و D میدان بلال صورت گرفته است. تعداد ۴۰۰ مقطع نازک از حدود ۲۵۰ متر مغزه دو چاه B و D از توالی مخزنی سورمه بالایی تهیه و به منظور ارزیابی کیفیت مخزنی، همراه داده‌های لاگ بکار برده شده است. تمام مقاطع نازک در دسترس به منظور تشخیص کلسیت از دولومیت با محلول آلزارین قرمز- فری سیانید پتاسیم، مطابق روش دیکسون (Dickson 1966) رنگ‌آمیزی گردیده‌اند. علاوه بر این با هدف شناسایی بهتر نوع فضای منفذی، تخلخل و مقایسه آنها در گونه‌های سنگی مختلف به تعداد ۱۴۴ نمونه چسب اپوکسی آبی رنگ (Blue-dyed epoxy) تزریق شده است.

به منظور بررسی کیفیت مخزنی در بخش بالایی سازند سورمه، ابتدا هفت گونه‌سنگی (Rock Type) با ویژگی‌های زمین‌شناسی- پتروفیزیکی معین شناسایی و براساس توزیع تخلخل و تراوایی در آنها، کیفیت مخزنی در واحدهای مختلف از هم متمایز گردید. تمام مقاطع نازک در دسترس در این مطالعه دارای داده تخلخل و تراوایی بوده و به منظور درک ارتباط بین هر واحد مخزنی و رخساره لاگ‌های تعیین شده به کار برده شده است. سپس توسط روش آنالیز خوشه‌ای سلسله مراتبی (Hierarchical Cluster Analysis)، پنج رخساره لاگ بهینه در سه چاه مورد مطالعه مشخص و با توجه به میزان گسترش هر کدام از این رخساره‌ها در هفت گونه‌سنگی، تفسیر آنها از نظر کیفیت مخزنی انجام گرفت.

دیاژنز به دلیل تاثیر زیاد بر توالی مورد مطالعه و این که در بیشتر موارد بافت اولیه و ویژگی‌های آنها به سختی قابل شناسایی است، مهمترین عامل کنترل کننده کیفیت مخزنی بوده است. در توالی عرب بالایی با افزایش اندازه بلورهای دولومیت و تشکیل بلورهای خود شکل کیفیت

مخزنی بهبود می‌یابد. انیدریت‌ها به صورت سیمان تنها در بخش‌های دولومیتی دیده شده و می‌توان دولومیتی شدن را به شورابه‌های غنی از سولفات و منیزیم مرتبط، و یکی از مدل‌های محتمل را مدل نشست و بازگشت سیالات (Seepage-Reflux Dolomitization) در نظر گرفت (Alsharhan and G. L. Whittle 1995). به عنوان نمونه نتایج پتروگرافی چاه A که توالی مخزنی سورمه بالایی تقریباً کامل است به عنوان نمونه آورده شده است (شکل ۲).

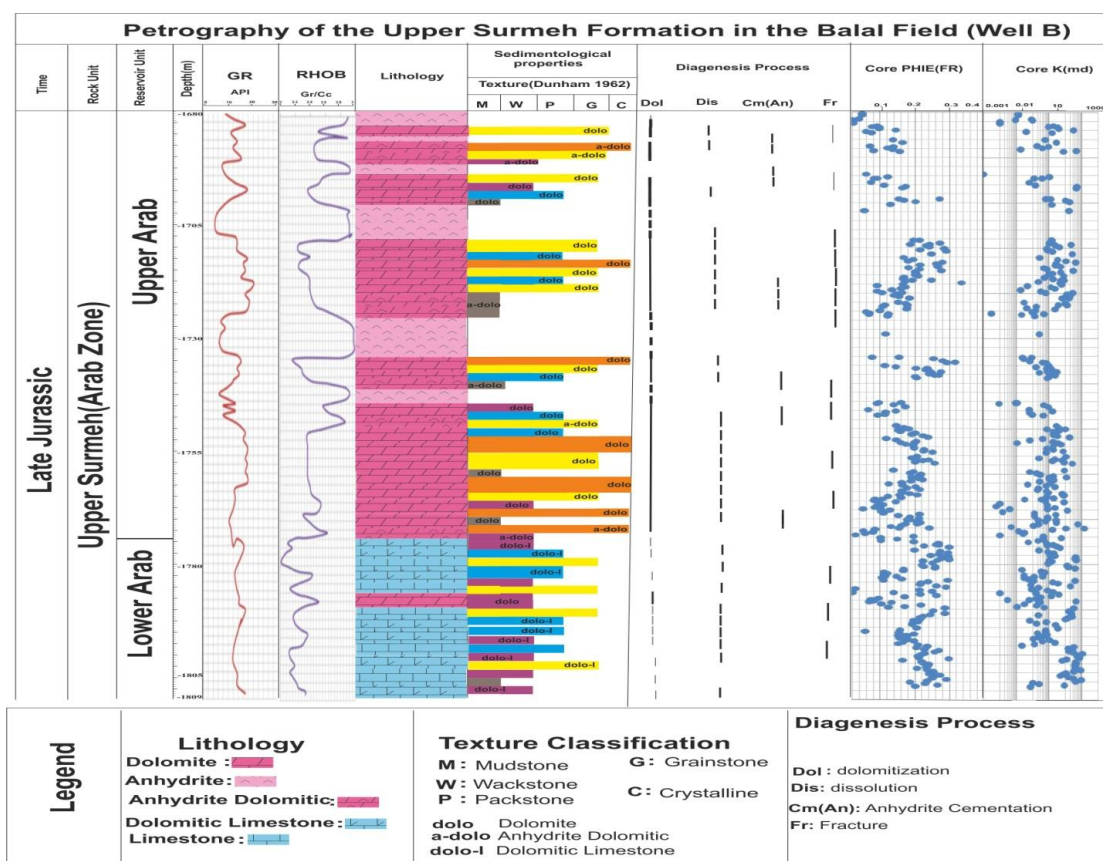
در توصیف رسوبی بافت با استفاده از روش دانهام (Dunham 1962) در توالی دولومیتی- انیدریتی عرب بالایی که هیچ اثری از آهک دیده نمی‌شود و لیتولوژی به طور کامل دولومیت است در بخش‌هایی که بافت اولیه بر اساس اجزای مختلف دولومیتی شده، و نیز شیب اجزاء اسکلتی و غیر اسکلتی قابل تشخیص بوده بافت ذکر گردیده است (M-W-P-G) و در بخش‌هایی که بافت دولومیت غیرقابل تشخیص بوده و به صورت کاملاً کرسیتالیزه شده است از واژه کریستالین (C) استفاده شده است. بنابراین در واقع بافت سنگ در دولومیت‌های بخش بالایی سازند به صورت دولوگرینستون- دولوپکستون- دولووکستون و دولومادستون و نیز دولومیت کریستالین می‌باشد.

گونه‌های سنگی

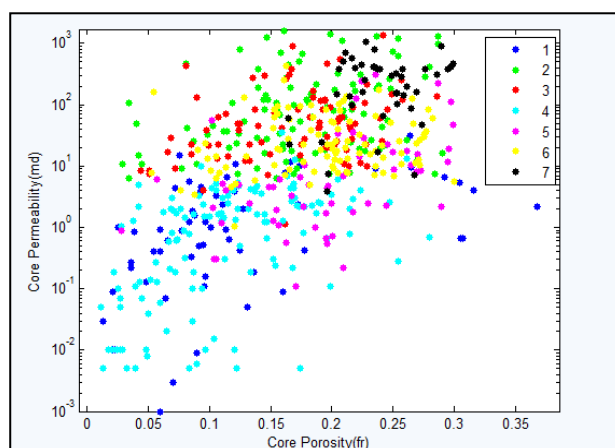
زون‌بندی مخزن و شناسایی بخش‌های با کیفیت مخزنی مختلف به عنوان یکی از بخش‌های ضروری در گسترش و توسعه یک مخزن هیدروکربنی می‌باشد. تعیین واحدهای جریان (Flow Units) و گونه‌های سنگی یکی از اساسی‌ترین بخش‌های سرشت نمایی مخزن است. به منظور ساخت یک مدل کارآمد و صحیح از یک مخزن هیدروکربنی، شناسایی گونه‌های سنگی، یکی از پارامترهای ضروری در مدلسازی مخزن بوده و می‌توان

پتروفیزیکی و زایش در هفت گونه‌سنگی دارای ویژگی‌های پتروفیزیکی و پتروگرافی مشخص قرار گرفتند. انجام مطالعات پتروگرافی و اعمال آن در شناسایی گونه‌های سنگی به دلیل آگاهی و در نظر گرفتن شرایط زایش هر واحد، صورت گرفته است. توزیع تخلخل و تراوایی در هر کدام از این هفت واحد نشان داده شده است. همانگونه که دیده می‌شود، واحدهای مخزنی هفت، دو و سه بهترین کیفیت مخزنی و چهار و یک ضعیف‌ترین شرایط مخزنی را دارا می‌باشند (شکل ۳).

گفت که هزینه‌های فراوانی که برای کسب اطلاعات و داده‌ها صرف می‌شود، نتایج آن در شناسایی واحدهای جریان‌ی نمود پیدا می‌کند (Gholami 2009). یک بررسی جامع به منظور تعیین گونه‌های سنگی با استفاده از داده‌های پتروگرافی - پتروفیزیکی، می‌تواند به صورت ساده و کاربردی برای کاهش ناهمگنی مخزنی و تقسیم یک مخزن کربناته به گونه‌های سنگی با ویژگی‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی مشخص می‌تواند به کار برده شود. پس از مطالعات پتروگرافی مقاطع نازک و مشخص شدن میکروفاسیس‌ها، فرآیندهای دیاژنزی و رخساره‌های مخزنی مختلف، این رخساره‌ها براساس مشخصات



شکل ۲- توزیع سنگ‌شناسی سازند سورمه بالایی در چاه شماره B میدان بلال. در شکل توزیع رخساره‌ها، اثر فرآیندهای دیاژنزی و نیز توزیع پارامترهای پتروفیزیکی به همراه نگارهای گاما و چگالی نشان داده شده است. در توالی‌های دولومیتی شده بافت اولیه سنگ براساس تغییرات لیتولوژیکی نشان داده شده است.

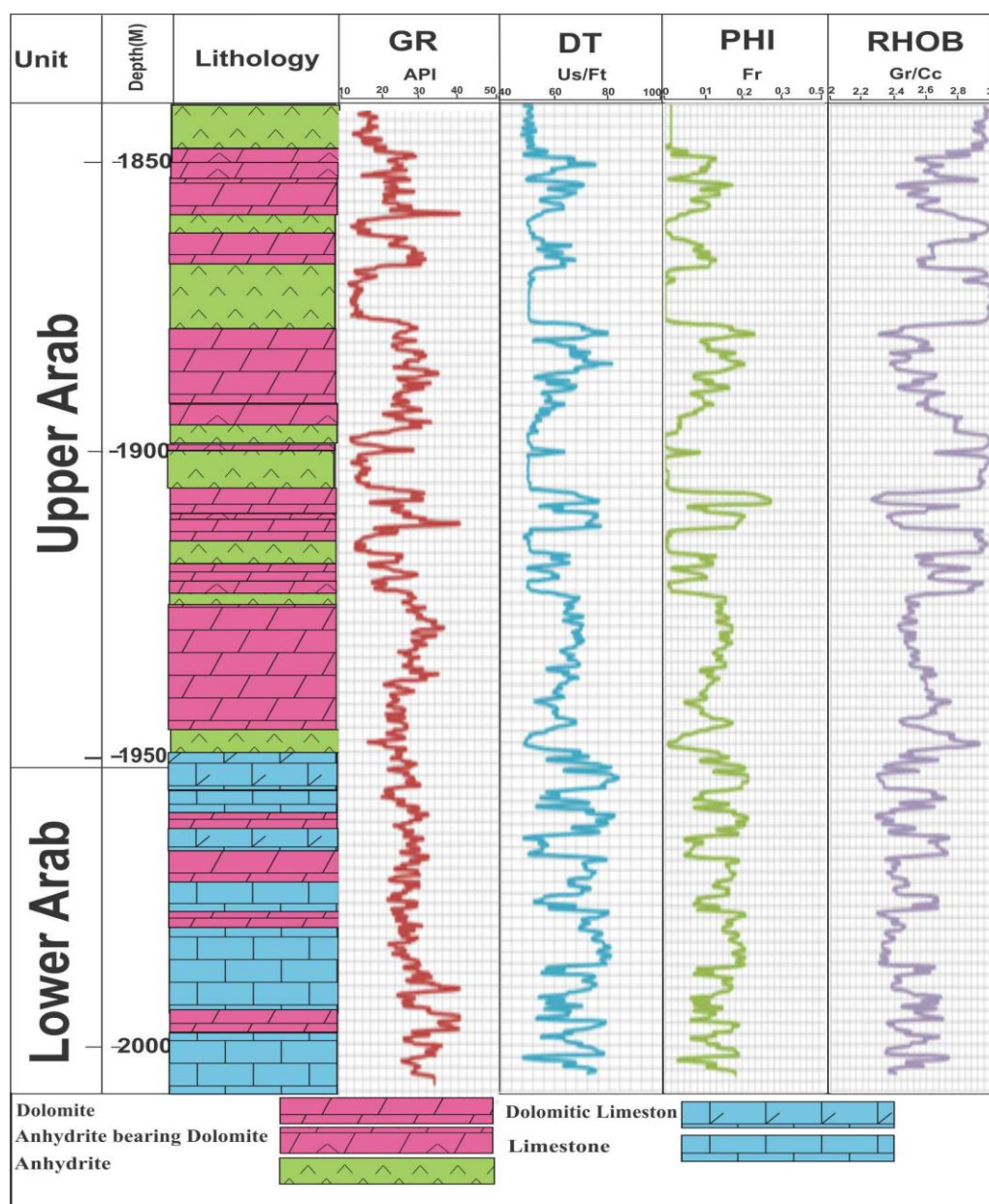


شکل ۳- هر کدام از واحدهای مشخص شده براساس توزیع تخلخل و تراوایی در دو چاه مورد مطالعه نشان داده شده است. واحد هفت بهترین شرایط مخزنی را از لحاظ توزیع ویژگی‌های مخزنی و واحدهای چهار و یک ضعیف‌ترین شرایط را از این نظر دارند.

در حالت کلی توالی بالایی سازند که تناوبی از دولومیت و انیدریت می‌باشد بیشتر نفت ده و توالی پایینی سازند که آهکی- دولومیتی است بیشتر آب می‌باشد. بنابراین در طرح توسعه میدان تأکید بیشتر بر بخش بالایی سازند بوده است. واحدهای متعلق به بخش پایینی سازند عرب شامل واحدهای پنج و هفت دارای نسبت حجم بالای آب به هیدروکربن می‌باشند و هرچند که واحد هفت بهترین شرایط را از نظر توزیع تخلخل و تراوایی داشته ولی بیشتر آبدار است و بهترین واحدهای تولیدی، دولومیت گرینستونی (واحد دو) و دولومیت دانه شکری (واحد سه) می‌باشند. نگارهای چاه پیمایی اصلی شامل گاما (GR)، سونیک (DT)، تخلخل (PHI) و چگالی (RHOB) که در تعیین رخساره لاگ به کار گرفته شده است نشان داده شده است. (شکل ۴). تغییرات نگارها با تغییرات لیتولوژی هماهنگی خوبی دارد و در لایه‌های انیدریتی نگارهای گاما، سونیک و تخلخل کاهش و نگار چگالی افزایش نشان می‌دهد.

در زیر هر کدام از گونه‌های سنگی (RT) از نظر مشخصات و ویژگی‌های زمین‌شناسی مقایسه شده‌اند. RT 1: این واحد جربانی، به‌طور کلی دولومیت انیدریتی

با کیفیت مخزنی اندک می‌باشد. بافت اولیه آن محدوده گسترده‌ای از مادستون تا گرینستون را در بر می‌گیرد و در زیرمحیط‌های مختلف شامل بالای جزر و مدی، لاگون و شول نهشته شده است. میزان محتوای انیدریت از ۱۵ تا ۵۰ درصد تغییر می‌یابد. لیتولوژی غالب این واحد دولومیت و انیدریت می‌باشد. سیمان انیدریتی عموماً یکی از مهمترین مکانیسم‌های کاهش تخلخل و تراوایی در مخازن کربناته می‌باشد. (Southwood and Hill 1995) مهمترین عاملی که کیفیت مخزنی اندک این واحد را سبب می‌شود، حجم بالای انیدریت و سیمانی‌شدن انیدریتی است. این گونه‌سنگی، چندین رخساره مخزنی از قبیل دولومیت با بافت توری قفس مرغ (chicken wire)، گرینستون، پکستون و مادستون انیدریتی را در بر می‌گیرد. البته میزان انیدریت عموماً بیش از ۳۰ درصد بوده و به صورت پلاگینگ عمل نموده است. نوع تخلخل غالب در این واحد عموماً قالبی- بین‌بلوری‌اند و در گرینستون‌های با تخلخل قالبی به فراوانی دیده می‌شود. میانگین تخلخل و تراوایی آن به ترتیب برابر ۱۱٫۹۷ و ۳٫۰۹۱ میلی‌داری می‌باشد.



شکل ۴- چهار نگار اصلی مورد استفاده در تعیین رخساره لاگها نشان داده شده است. تغییرات این نگارها به عنوان نمونه در یکی از چاهها (D) همراه با ستون لیتولوژی نشان داده شده است.

بلورهای دولومیت، همراه با انحلال مؤثر و تشکیل شبکه تخلخل‌های به هم مرتبط بهبود یافته است. عمده تخلخل غالب از نوع بین‌دانه‌ای و بین‌بلوری و تخلخل‌های کانالی و حفره‌ای هم می‌تواند دیده شود. بیشتر دولومیت‌های سازنده این واحد جریانی به صورت انتخاب کننده فابریک (Fabric Retentive) هستند. در این واحد

RT 2: این واحد جریانی دارای بهترین کیفیت مخزنی بوده و می‌توان آن را دولومیت گریستونی نامید. زیرمحیط اصلی آن شول (Shoal) و رخساره‌های پراثری نزدیک به آن می‌باشد. بنابراین بافت اولیه آن گریستون و لیتولوژی غالب آن دولومیت است. در این گونه‌سنگی کیفیت مخزنی از طریق افزایش اندازه و خودشکل شدن

رخساره اولیه نقش مهمی در وجود کیفیت مخزنی داشته است. میانگین تخلخل و تراوایی این واحد به ترتیب ۱۷,۴۹۷ و ۲۱۵,۳۶ میلی‌داری است.

RT 3: این واحد متعلق به عرب زون بالایی و دارای کیفیت مخزنی خوب است. چون دولومیتی‌شدن طوری رخ داده که بافت اولیه تقریباً به‌طور کامل از بین رفته و قابل شناسایی نمی‌باشد، می‌توان نتیجه گرفت که دیاژنز کیفیت مخزنی را در این واحد کنترل می‌کند. در این واحد به این دلیل که رخساره اولیه به‌طور کامل از بین رفته و تبلور مجدد رخ داده است، نمی‌توان بافت اولیه و زیرمحیط تشکیل آن را شناسایی نمود. لیتولوژی غالب این رخساره دولومیت است. غالب دولومیت‌های سازنده به صورت تخریب‌کننده فابریک (Fabric Destructive) می‌باشند. در این گونه‌سنگی با افزایش اندازه و تشکیل بلورهای خود شکل کیفیت مخزنی افزایش می‌یابد. در بهترین حالت با درشت‌شدن و تشکیل شبکه سه بعدی از بلورهای خود شکل، دولومیت‌های دانه شکری تشکیل می‌شود که مشابه آنها در میدان قوار در عربستان یکی از بهترین واحدهای مخزنی با میزان تراوایی خیلی بالا در حد داری را تشکیل داده، که به آنها لایه‌های با تراوایی بالا (Supper K layer) می‌گویند (Cantrell et al. 2001). نوع تخلخل غالب به صورت تخلخل بین‌بلوری و واگی می‌باشد. میانگین تخلخل و تراوایی در آن ۱۶,۹۴ و ۱۰۷,۶۳۶۳ میلی‌داری است.

RT 4: این واحد سنگی عموماً در عرب زون بالایی دیده می‌شود و ضعیف‌ترین کیفیت مخزنی را در توالی مورد مطالعه داشته و می‌توان آن را گونه‌سنگی بیش از حد دولومیتی‌شده یا متراکم نامید. رخساره اولیه آن در برخی موارد قابل شناسایی و در سایر موارد کریستالیزه و

غیرقابل تشخیص است. این گونه‌سنگی می‌تواند در زیرمحیط‌های گوناگونی از قبیل بالای جزر و مدی، بین جزر و مدی و شول نهشته شده باشد. در این واحد نیز عموماً دیاژنز شرایط مخزنی را تعیین و کنترل می‌کند. به دلیل دولومیتی‌شدن بیش از حد (Overdolomitization) کیفیت مخزنی از بین رفته و فضای خالی اندکی باقی مانده است. بنابراین میزان دولومیتی‌شدن اگر از آستانه مشخص آن بیشتر گردد می‌تواند کیفیت مخزنی را کاهش دهد (Lucia 2004). انحلال گسترده تنها عاملی بوده که می‌تواند کیفیت مخزنی این واحد را افزایش دهد و با توجه به پایداری نسبتاً بالای دولومیت این پدیده به صورت گسترده رخ نداده است. میزان اندک تخلخل در این گونه‌سنگی از نوع بین‌بلوری است. میانگین تخلخل و تراوایی به ترتیب ۱۱٪ و ۲,۱۱ میلی‌داری است.

RT 5: این گونه‌سنگی یکی از واحدهای شناسایی شده در بخش پایینی عرب زون است. از نظر کیفیت مخزنی متوسط و رخساره اولیه آن از مادستون تا پکستون گل غالب متغیر بوده و بیشتر به زیرمحیط‌های لاگون تعلق دارد. در این رخساره دولومیتی‌شدن نیز تا حدودی رخ داده ولی به دلیل دور بودن از شورابه و ضعیف‌شدن آن به میزان اندکی دولومیتی شده است. دولومیتی‌شدن نقش عمده‌ای به دلیل وجود رخساره تقریباً گل غالب اولیه نداشته و نتوانسته کیفیت مخزنی را بهبود بخشد. به‌طور کلی با کاهش میزان گل آهکی و افزایش انحلال، کیفیت مخزنی بهبود می‌یابد. نوع تخلخل غالب در این واحد از نوع درون‌دانه‌ای و ریزتخلخل است، علاوه‌براین تخلخل حفره‌ای نیز مشاهده می‌شود. با وجود تخلخل نسبتاً بالا، از تراوایی بالایی برخوردار نمی‌باشد. میانگین تخلخل و تراوایی آن به ترتیب ۱۹٪ و ۲۳,۳ میلی‌داری است.

و تراوایی به ترتیب $23,97\%$ و $294,65$ میلی داریسی است.

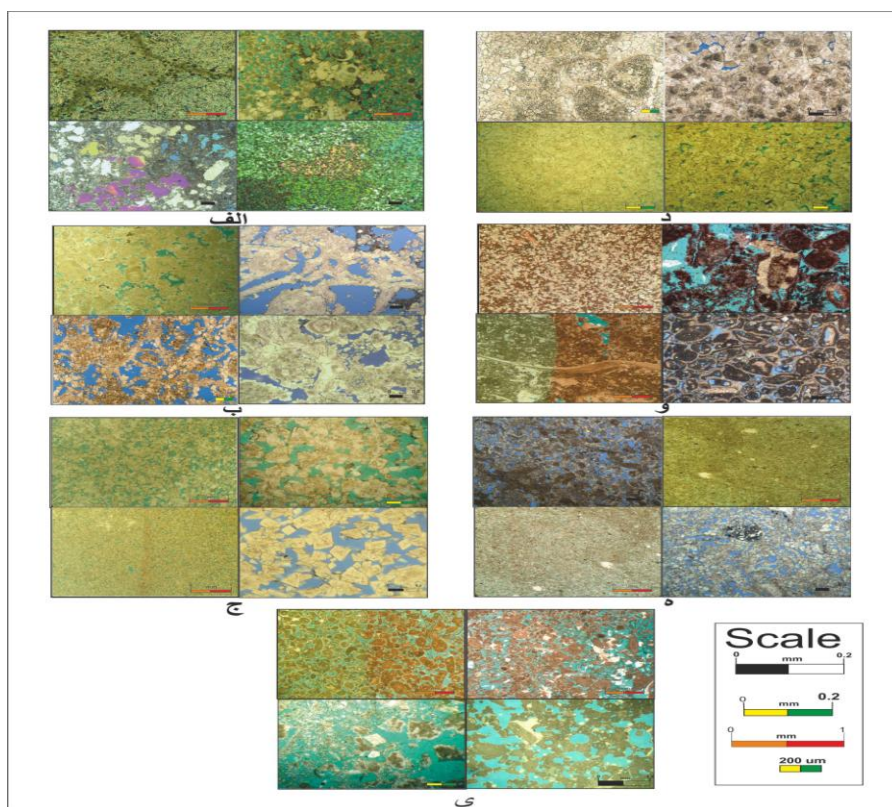
هر کدام از گونه‌های سنگی براساس مشخصات پتروگرافی نشان داده شده است (شکل ۵). هر گونه سنگی می‌تواند شامل چندین رخساره مخزنی باشد.

با این وجود از نظر تولید هیدروکربن عموماً توالی‌های عرب بالایی، زون‌های تولیدی اصلی را تشکیل داده و بخش پایینی با وجود شرایط مخزنی بهتر، نسبت آب به هیدروکربن بالایی دارد. همانگونه که مشخص است گونه‌های سنگی دو، سه و هفت بهترین کیفیت مخزنی و چهار و یک ضعیف‌ترین کیفیت مخزنی را دارند. گونه سنگی شش و پنج نیز از نظر مخزنی مناسب می‌باشند.

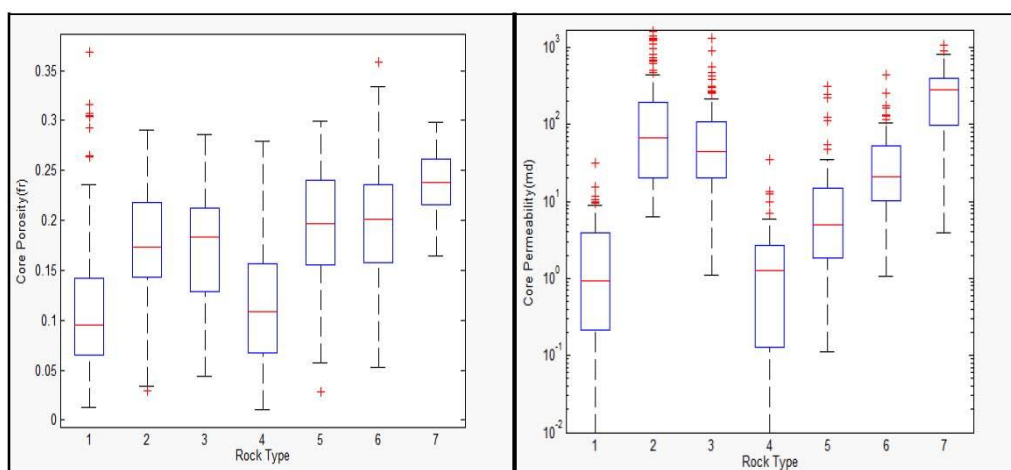
محدوده تخلخل و تراوایی هرکدام از گونه‌های سنگی مشخص شده براساس تلفیق مطالعات پتروگرافی - پتروفیزیکی، توسط نمودار جعبه‌ای نشان داده شده است (شکل ۶). براین اساس گونه‌های سنگی دو و سه دارای بیشترین تراوایی و محدوده تخلخل خوب و در مقابل گونه‌های سنگی یک و چهار کمترین تخلخل و تراوایی و ضعیف‌ترین کیفیت مخزنی را دارا می‌باشند. گونه سنگی شش و سپس پنج نیز کیفیت مخزنی خوب تا متوسطی دارند.

RT 6: این واحد جریان‌ی کیفیت مخزنی متوسط تا خوب داشته و می‌توان آن را دولومیت با بافت مادستون - وکستون تا پکستون نامید. لیتولوژی غالب آن دولومیت و رخساره اولیه آن مادستون - وکستون و پکستون گل غالب بوده و در شرایط کم انرژی تر نهشته شده است. در این رخساره فرآیند دولومیتی شدن و انحلال باعث بهبود کیفیت مخزنی گردیده است. در این واحد تخلخل نسبتاً بالا و تراوایی نیز به دلیل دولومیتی شدن به صورت مؤثر بهبود یافته است. نوع تخلخل غالب از نوع بین‌بلوری و واگی است. میانگین تخلخل و تراوایی آن به ترتیب $19,6$ و $42,37$ میلی داریسی است.

RT7: این واحد جریان‌ی کیفیت مخزنی خوبی دارد. لیتولوژی غالب آن آهک بوده و میزان دولومیتی شدن ناچیز می‌باشد. این واحد منحصراً در بخش پایینی سازند عرب دیده شده و زیرمحیط اصلی آن شول یا رخساره - های نزدیک به آن بوده و رخساره نقش مهم‌تری نسبت به دیاژنز در شرایط مخزنی ایفا می‌کند. دیاژنز عموماً به صورت سیمان کلسیتی دریایی اولیه و دوردانه‌ای دیده شده و باعث پایداری در طی تدفین گردیده است. این واحد از نظر ویژگی‌های پتروفیزیکی بهترین گونه سنگی در بین واحدهای شناسایی شده می‌باشد، اما به دلیل بیشتر آبد بودن توالی‌های پایینی، تصور براین است که دولومیت‌ها تولید کننده اصلی هیدروکربن باشند. تخلخل غالب از نوع بین‌دانه‌ای و واگی می‌باشد. میانگین تخلخل



شکل ۵- در این شکل گونه‌های سنگی تعیین شده از نظر پتروگرافی نشان داده شده است. (الف): گونه‌سنگی یک، (ب): گونه‌سنگی دو، (ج): گونه‌سنگی سه، (د) گونه‌سنگی چهار، (و): گونه‌سنگی پنج، (ه): گونه‌سنگی شش، (ی): گونه‌سنگی هفت



ب

الف

شکل ۶- محدوده تخلخل و تراوایی هر کدام از گونه‌های سنگی تعیین شده در توالی مورد مطالعه توسط نمودار جعبه‌ای نشان داده شده است.

رخساره لاگ

لاگ‌های پتروفیزیکی یکی از اصلی‌ترین منابع اطلاعاتی زیر سطحی می‌باشند. آنها اطلاعات مهمی در زمینه ترکیب کانی‌شناسی، بافت، ساختارهای رسوبی و همچنین خصوصیات پتروفیزیکی از قبیل تخلخل و تراوایی و نوع سیال را فراهم می‌کنند. با داشتن داده‌های لاگ از چاه‌های حفاری شده، می‌توان واحدهای رسوبی مختلف را با مقایسه خصوصیات لاگ‌ها از یکدیگر مجزا نمود. واحدهای رسوبی که به این شیوه و بر اساس لاگ‌های موجود از چاه‌های حفاری شده بدون مغزه تشخیص داده می‌شوند در نوشته‌ها و اصطلاحات به الکتروفاسیس یا رخساره لاگ تعبیر می‌شوند. در این رابطه رخساره لاگ به مجموعه‌ای از عکس‌العمل لاگ‌ها گفته می‌شود که به وسیله آن می‌توان یک لایه یا چینه را از دیگری تشخیص داد (Serra O 1986). خوشه‌بندی روشی برای ارزیابی شباهت و عدم شباهت بین داده‌ها می‌باشد. این روش که تحت عنوان آنالیزهای رده‌بندی نیز شناخته می‌شود، گروه‌ها و یا خوشه‌هایی (Clusters) که اغلب به طور طبیعی در مجموعه داده‌ها وجود دارند را استخراج می‌کند. به طوری‌که داده‌های داخل یک خوشه بیشترین شباهت را با یکدیگر داشته و با داده‌های موجود در خوشه‌های دیگر بیشترین تفاوت ممکن را دارند. تعیین رخساره لاگ‌ها بر مبنای شناسایی گروه داده‌هایی با خصوصیات یکسان، براساس عکس‌العمل لاگ‌ها می‌باشد. در این مطالعه از روش آنالیز خوشه‌ای سلسله مراتبی به منظور شناسایی رخساره لاگ‌ها استفاده شده است. هدف از آنالیز خوشه‌ای تقسیم‌بندی مجموعه داده‌ها به گروه‌های مشخص براساس اندازه‌گیری میزان شباهت یا تفاوت بین آنها است. در مرحله نخست فاصله (شباهت) بین تمام جفت مشاهدات محاسبه می‌شود. الگوریتم‌های مختلفی برای محاسبه فاصله بین دو داده برداری وجود دارد (Wardjer 1963). اگر دو مجموعه داده مشخص با محتوای اندازه‌گیری‌های چندگانه در یک مشاهده یکسان باشند، می‌توانند به وسیله بردارهای چند

بعدی زیر تعریف شوند.

$$X1 = (x11 \ x12 \ ... \ x1p)$$

$$X2 = (x21 \ x22 \ ... \ x2p)$$

رایج‌ترین روش اندازه‌گیری فاصله بین دو نمونه بردار، روش فاصله اقلیدوسی و فاصله اقلیدوسی استاندارد می‌باشد که در زیر ارائه گردیده است.

$$d^2_{rs} = (x_r - x_s)(x_r - x_s)'$$

$$d^2_{rs} = (x_r - x_s)D^{-1}(x_r - x_s)'$$

آنالیز خوشه‌ای سلسله مراتبی شامل سه مرحله به شرح زیر می‌باشد:

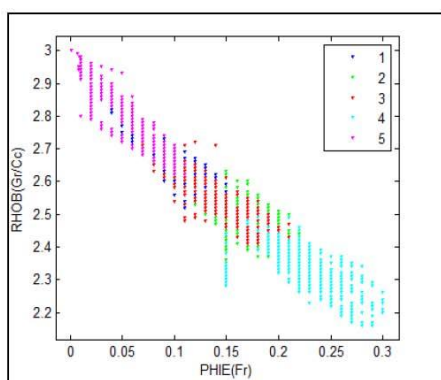
۱- پیدا کردن شباهت یا اختلاف بین هر جفت از مشاهدات موجود در مجموعه داده‌ها

۲- گروه‌بندی مشاهدات به صورت درخت خوشه‌ای پایکانی

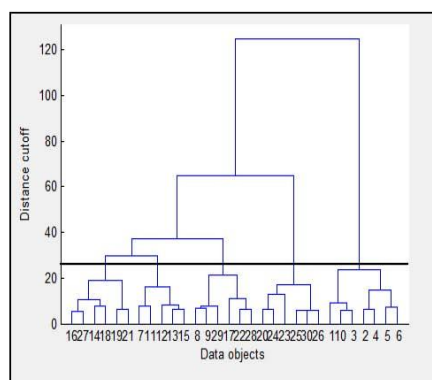
۳- مشخص کردن محل برش بر روی درخت پایکانی با هدف استفاده از مفهوم رخساره لاگ به منظور تفسیر هرگونه سنگی، سعی شده تا ارتباط هر رخساره با هر واحد مشخص گردد. بدیهی است که این ارتباط کامل نبوده و رخساره لاگ‌ها فقط می‌توانند به صورت کلی روند تغییرات کیفیت مخزنی را نشان دهند. در این مطالعه داده‌های ورودی اصلی آنالیز خوشه‌ای شامل لاگ‌های تخلخل، چگالی، صوتی و گاما است. معمولاً ناهمگنی زمین‌شناسی مخزن، کنترل‌کننده تعداد رخساره لاگ‌های استخراج شده می‌باشد. افزایش میزان ناهمگنی منجر به افزایش تعداد خوشه‌ها و برعکس می‌شود. براساس درخت خوشه‌ای (Dendrogram) تعداد پنج رخساره لاگ بهینه در سه چاه مورد مطالعه شناسایی گردید. تمام مراحل تعیین و شناسایی تعداد بهینه رخساره لاگ‌ها در نرم افزار متلب و با استفاده از جعبه ابزارهای (Toolboxes) آن صورت گرفته است. نتایج خروجی آنالیز خوشه‌ای براساس پلات لاگ‌های مختلف مورد استفاده در هرکلاس نشان داده شده است (شکل ۶).

رخساره لاگ پنج با چگالی بالا، تخلخل کم، زمان عبور اندک و نیز محدوده لاگ گامای اندک عموماً متعلق به لایه‌های انیدریتی می‌باشد. در بین رخساره‌های تعیین شده بیشترین تخلخل، کمترین میزان چگالی، بیشترین زمان عبور و میزان اشعه گاما به واحد چهار تعلق دارد.

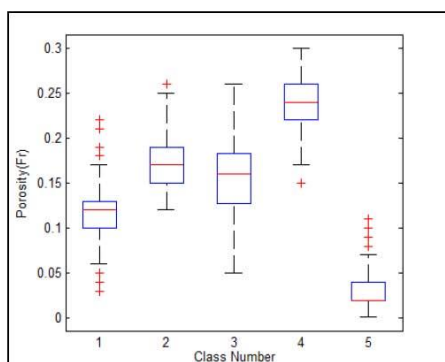
رخساره دو نیز تا حدودی دارای ویژگی‌های مشابه رخساره چهار است. رخساره یک با تخلخل کم، چگالی نسبتاً بالا و میزان لاگ گامای اندک و نیز رخساره سه با میزان لاگ گاما، تخلخل، چگالی و زمان عبور متوسط قابل شناسایی می‌باشند.



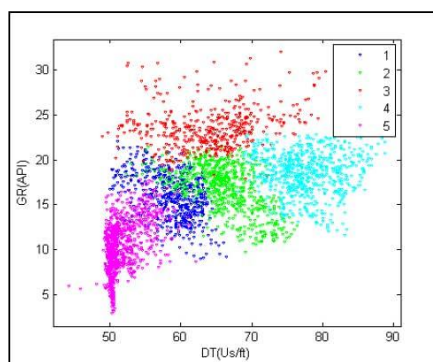
ب



الف



د



ج

شکل ۷- (الف) - درخت خوشه‌ای که در آن آستانه برش برای انتخاب بهترین شماره کلاس نشان داده شده است. براین اساس تعداد پنج رخساره لاگ بهینه شناسایی گردید. (ب) لاگ تخلخل در برابر چگالی، (ج) لاگ صوتی در برابر گاما، (د) کلاس‌های رخساره لاگ در برابر تخلخل

ارتباط، تعیین رخساره لاگ به تنهایی نمی‌تواند زیاد ارزشمند باشد. با این هدف و به منظور شناسایی ارتباط و تفسیر درست، سعی شده تا با استفاده از گسترش هر رخساره لاگ در هر کدام از هفت گونه‌سنگی تعیین شده،

به‌منظور تفسیر درست و کارآمد رخساره لاگ‌های تعیین شده نیاز است تا ارتباط آنها با پارامترهایی زمین‌شناسی، مانند گونه‌های سنگی و رخساره‌های رسوبی مشخص گردد. در صورت عدم دریافت این

کیفیت مخزنی ضعیف شامل گونه‌سنگی یک و چهار بیشترین فراوانی را دارند. بنابراین رخساره لاگ‌های پنج و یک می‌تواند برای تفسیر گونه‌های سنگی یک و چهار استفاده شود. گسترش رخساره لاگ سه بیشترین هم‌خوانی را با گونه‌سنگی دو دارد و می‌تواند نشانگر گسترش آن باشد. بنابراین در بخش‌هایی که ما گسترش رخساره لاگ‌های دو و چهار را داریم انتظار براین است که کیفیت مخزنی بهتر و در توالی‌هایی که رخساره پنج و یک گسترش بیشتری دارد کیفیت مخزنی ضعیف‌تر است. تفسیر رخساره لاگ‌ها می‌تواند در کنار اطلاعات و سایر داده‌ها به منظور تفسیر بهتر و ارزیابی مخزن مورد استفاده قرار گیرد.

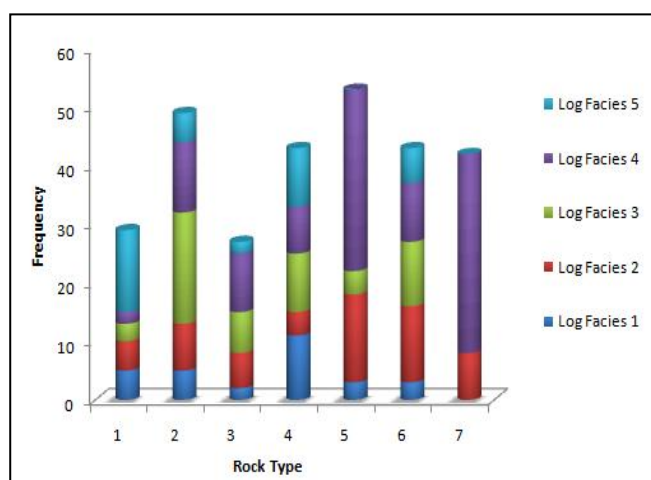
توزیع پنج رخساره لاگ بهینه در سه چاه A، B و C مورد نشان داده شده است (شکل ۹). هر رنگ نشان‌دهنده یک رخساره لاگ مشخص می‌باشد. رخساره پنج با رنگ قرمز و رخساره یک با رنگ آبی پر رنگ عموماً متعلق به بخش‌هایی با میزان انیدریت بالا و دولومیت‌های متراکم می‌باشند. در بین سه چاه مورد مطالعه انطباق نسبتاً خوبی براساس توزیع رخساره لاگ‌ها دیده می‌شود. ذکر این نکته ضروری می‌باشد که با توجه به شباهت برخی رخساره لاگ‌ها با هم مانند رخساره چهار و دو در برخی از چاه‌ها تکرار آنها را به جای یکدیگر مشاهده می‌کنیم. بر اساس شکل در هر سه چاه مورد مطالعه عموماً به دلیل مطبق بودن مخزن به ویژه در زون عرب بالایی که توالی انیدریت و دولومیت است تغییرات رخساره لاگ‌ها همگن‌تر بوده و لایه‌های انیدریتی و دولومیت‌های متراکم می‌توانند معادل رخساره لاگ پنج و یک که با رنگ قرمز و آبی تیره مشخص‌اند باشد. لایه‌های دولومیتی با کیفیت مخزنی خوب که شامل دولومیت‌های دانه شکری و دولوگرنیستون هستند می‌توانند معادل رخساره لاگ دو و چهار باشند. در توالی عرب زیرین به دلیل عدم وجود لایه‌های انیدریتی بین

این ارتباط دریافت و تفسیر رخساره لاگ‌ها صورت پذیرد. گسترش هر پنج رخساره لاگ شناسایی شده در گونه‌های سنگی نشان داده شده است (شکل ۸). به این دلیل که در تعیین رخساره لاگ‌ها از لاگ‌های مرسوم چگالی، صوتی، نوترون و گاما استفاده شده و این لاگ‌ها ارتباط بسیار مشخصی با تخلخل مغزه دارند انتظار می‌رود که گسترش رخساره لاگ‌ها با تخلخل ارتباط تقریباً روشنی داشته باشد. درک ارتباط بین تراوایی و لاگ‌های پتروفیزیکی پیچیده و دشوارتر است. بر خلاف ماسه سنگ‌ها که ارتباط تخلخل و تراوایی تقریباً خطی و قاعده‌تاً استفاده از رخساره لاگ و تفسیر آنها در این مخازن ساده‌تر است، توالی‌های کربناته به دلیل ناهمگنی بالا و ارتباط پیچیده تخلخل و تراوایی ارتباط رخساره لاگ‌ها با گونه‌های سنگی پیچیده‌تر و این ارتباط کاملاً مشخص و کامل نمی‌باشد.

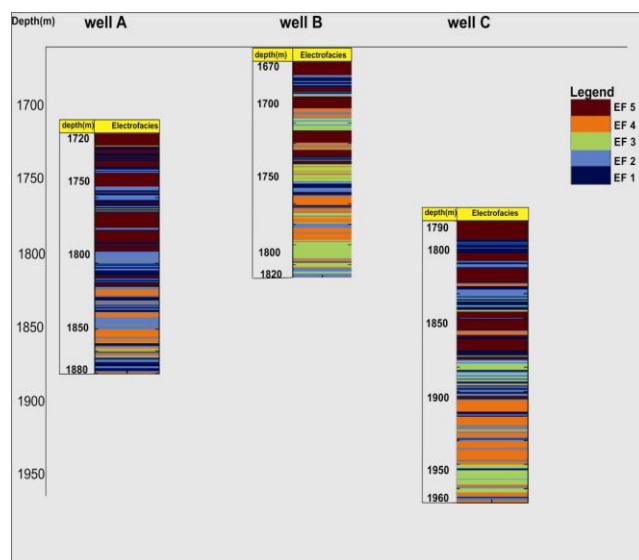
همانگونه که دیده می‌شود بیشترین فراوانی رخساره لاگ‌های چهار و دو که دارای تخلخل بالا، میزان لاگ گامای متوسط و زمان عبور بالایی هستند، در واحدهای هفت، پنج، دو و سه بوده و در واحدهای یک و چهار کمترین گسترش را دارند. واحد جریان‌ی پنج که مربوط به توالی‌های آهکی بخش پایینی سازند عرب می‌باشد و عموماً تخلخل بالا و تراوایی متوسطی دارد در رخساره لاگ چهار که بیشترین تخلخل را دارا می‌باشد، گسترش بالایی نشان می‌دهد. این پدیده به این علت است که ما در تعیین رخساره لاگ‌ها از لاگ‌هایی استفاده نموده‌ایم که به تخلخل حساس می‌باشند. بنابراین می‌توان به صورت نسبی نتیجه گرفت که عموماً گسترش رخساره لاگ دو و چهار بیشتر مرتبط با واحدهای با کیفیت مخزنی مناسب است. از طرف دیگر گسترش رخساره لاگ‌های پنج و یک که عموماً مربوط به لایه‌های انیدریتی یا توالی‌های با دولومیت‌های متراکم است و دارای چگالی بالا و زمان عبور اندک می‌باشند در واحدهای با

گونه‌های سنگی با کیفیت بالا شامل دولومیت گرینستونی، دولومیت دانه‌شکری، آهک گرینستونی-پکستونی باشد. رخساره لاگ سه می‌تواند تا حدودی نماینده یا معادل با رخساره‌های با کیفیت مخزنی متوسط شامل دولومیت با رخساره گل غالب، آهک با بافت گل غالب در چاه‌های مختلف مورد مطالعه باشد.

لایه‌ای ناهمگنی بالاتر و گسترش رخساره‌های چهار، دو و به میزان کمتر رخساره سه بیشتر می‌باشد. بنابراین اکنون که رخساره لاگ‌ها با گونه‌های سنگی منطبق گردید می‌توان نتیجه گرفت که رخساره لاگ پنج و یک می‌تواند نماینده گونه‌های سنگی ضعیف شامل دولومیت انیدریتی و دولومیت متراکم، رخساره لاگ چهار و دو نماینده



شکل ۸- فراوانی هر کدام از رخساره لاگ‌های شناسایی شده در هفت گونه‌سنگی، نشان داده شده است.



شکل ۹- توزیع رخساره لاگ‌ها در سه چاه مورد مطالعه نشان داده شده است. انطباق نسبتاً خوبی بین چاه‌های مختلف دیده می‌شود.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه پس از تعیین گونه‌های سنگی براساس تلفیق داده‌های زمین‌شناسی- پتروفیزیکی و نیز شناسایی رخساره لاگ‌ها و تفسیر آنها بر روی توالی کربناته- تبخیری سازند عرب در میدان بلال نتایج زیر حاصل گردید.

۱- در این مطالعه هفت گونه‌سنگی با ویژگی‌های زمین‌شناسی- پتروفیزیکی معین، براساس داده‌های پتروفیزیکی و مقاطع نازک در دسترس از دو چاه A و D شناسایی گردید. از بین این واحدهای مشخص شده، دو واحد آهک گرینستونی- پکستونی و آهک با بافت گل غالب به بخش پایینی سازند و دولومیت گرینستونی، دولومیت دانه شکری، دولومیت با رخساره گل غالب، دولومیت انیدریتی و دولومیت متراکم به بخش بالایی سازند تعلق دارند.

۲- در این هفت گونه‌سنگی شناسایی شده، کیفیت مخزنی از خوب به ضعیف به ترتیب شامل دولومیت گرینستونی، دولومیت دانه شکری، آهک گرینستونی- پکستونی، دولومیت با رخساره گل غالب، آهک با بافت گل غالب، دولومیت انیدریتی و دولومیت متراکم است. توالی سازند عرب در بخش پایینی بیشتر آبدیده بوده و بخش مهم تولید میدان از دولومیت‌های بخش بالایی صورت می‌گیرد.

۳- هدف از آنالیز خوشه‌ای تقسیم‌بندی مجموعه داده‌ها به گروه‌های مشخص براساس اندازه‌گیری شباهت یا تفاوت بین آنها است. در این مطالعه با استفاده از روش آنالیز خوشه‌ای سلسله مراتبی پنج رخساره لاگ بهینه در سه چاه مورد مطالعه مشخص گردید. هرکدام از این پنج رخساره براساس لاگ‌های پتروفیزیکی مورد استفاده از هم قابل تفکیک می‌باشند. بیشترین گسترش رخساره‌های چهار و دو عموماً همراه با گونه‌های سنگی با کیفیت مخزنی خوب و رخساره‌های یک و پنج در واحدهای

بدون کیفیت مخزنی یعنی گونه‌های سنگی چهار و یک به فراوانی مشاهده می‌شود. رخساره لاگ شماره سه پراکندگی بیشتری نشان داده ولی بیشترین گسترش آن در واحد مخزنی دو که کیفیت مخزنی خیلی خوبی دارد مشاهده می‌شود.

۴- در صورتی که بتوان رخساره لاگ‌ها را به واحدهای مخزنی یا رخساره‌های زمین‌شناسی مرتبط نمود، می‌توان اطلاعات ارزشمندی در زمینه تفسیر آنها بدست آورد.

منابع

- Abbaszadeh, M., H. Fujii, F. Fujimoto, 1996, Permeability prediction by hydraulic flow units theory and applications: SPE Format. Evaluate, v. 11, p. 263-271.
- Ahad, A. and S. Holditch, 2000, Permeability estimation using hydraulic flow units in a Central Arabia reservoir. Soc. Petrol. Engin. aime, spe 63254.
- Ahr, W.M., 2008, Geology of carbonate reservoirs. John Wiley & Sons, Inc., Publication, 296 p.
- Al-Husseini, M.I. 1997, Jurassic sequence stratigraphy of the western and southern Arabian Gulf. GeoArabia, v. 2, no. 4, p. 361-382.
- Alsharhan, A.S. and K. Magara 1995, The Jurassic of the Arabian Gulf Basin: facies, depositional setting and hydrocarbon habitat. In, Pangea: Global Environments and Resources. Canadian Society of Petroleum Geologists, Memoir, v. 17, p. 397-412.
- Alsharhan A. S., and G. L. Whittle, 1995, Carbonate-Evaporite Sequences of the Late Jurassic Southern and Southwestern Arabian Gulf, The American Association of Petroleum Geologists.
- Amaefule, J.O., M. Altunbay, D. Tiab, D.G.

- Lucia, F.J. 2004, Origin and Petrophysics of dolostone pore space, Geological Society, London, Special Publications January 1, 235, p. 141-155.
- Padalko, D.V., 2003, Application of neural networks for hydraulic flow units prediction in uncored wells. M.Sc thesis, Heriot-Watt University.
- Powers, R.W. 1962, Arabian Upper Jurassic Carbonate Reservoir Rocks. In W.E. Ham (Ed.), Classification of Carbonate Rocks. American Association of Petroleum Geologists Memoir 1, p. 122-192.
- Schlumberger, 1989, Log Interpretation: Principles/applications, Eight printing, Feb, 1999.
- Serra, O., 1986, Fundamentals of Well Log Interpretation: Volume The Interpretation of Logging Data: Amsterdam (Elsevier).
- Serra, O. and H. T. Abbott 1980, The contribution of logging data to sedimentology and stratigraphic, SPE 9270, 55 Annual Fall Technical Conference and Exhibition, Dallas, Texas, 19p.
- Southwood, D.A. & W.O.R. Hill, 1995, The origin and distribution of porosity in the Zechsteinkalk (Upper Permian) of Hewett Field, southern North Sea. Petroleum Geoscience, v. 2, 289-302.
- Vieban, F., P. Massi, and C. Maza, 2000, Balal, Arab Reservoir core study. Elf ep.
- Ward Jr., J.H., 1963, Hierarchical grouping to optimize an objective function. J. Am. Stat. Assoc. v. 48, p. 236-244.
- Zohorian, S., 2006, Application of geological and petrophysical data characterization reservoir modeling at Balal oil field in Persian Gulf, M.S. thesis, University of Tehran.
- 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 Paper 26436, 1-16.
- Cantrell, D. P.K. Swart, R.C. Handford, C.G. Kendall, H. Westphal, 2001, Geology and Production. Significance of Dolomite, Arab-D Reservoir, Ghawar Field, Saudi Arabia, GeoArabia, v. 6, No.1.
- Cantrell, D. and R.M. Hagert, 2003, Reservoir rock classification, Arab-D reservoir, Ghawar field, Saudi Arabia, GeoArabia, v. 8.
- Dunham, R., 1962, Classification of carbonate rocks according to their depositional texture. Tulsa, OK, AAPG Memoir.
- Gunter, G. W., J. M. Finneran, D. J. Hartmann, J. D. Miller, 1997, Early determination of reservoir flow units using an integrated petrophysical method. SPE 38679, P 373-380.
- Kohut, D. Lacroix, P.C. Van De Beuque, L. Legorjus, 2002, Balal -2P(BL-2P), geological well report (Oxford University Press).
- Lindsay, R.F., D.L. G.W. Cantrell, T.H. Hughes, H.W. Keith, Mueller III and S.D. Russell 2006, Ghawar Arab-D reservoir: Widespread porosity in shoaling-upward carbonate cycles, Saudi Arabia. In, P.M. Harris and L.J. Weber (Eds.), Giant Hydrocarbon Reservoirs of the World: From Rocks to Reservoir Characterization and Modeling. American Association of Petroleum Geologists, Memoir 88/SEPM Miscellaneous Publication, no. 8, p. 97-13.
- Lucia, F.J. 2007, Carbonate reservoir characterization. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 341p.