

# تفکیک گروه‌های سنگی با استفاده از واحدهای جریان و روش خوشه‌بندی: مطالعه موردی، مخزن بنگستان در میدان منصوری

یاسر نوریان<sup>۱\*</sup>، سیدرضا موسوی حرمی<sup>۲</sup>، اسداله محبوبی<sup>۲</sup>، علی کدخدایی<sup>۳</sup> و سید علی‌اکبر عبدالهی موسوی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۲</sup> استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۴</sup> کارشناسی ارشد، شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۸/۲۵ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۱/۲۷

## چکیده

تفکیک گونه‌های سنگی با روش‌های مختلف یکی از مفیدترین مطالعات به منظور تحلیل کیفیت مخزنی و گاهی زون‌بندی یک مخزن است. به دلیل ارتباط مؤثر بین ویژگی‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی در هر واحد جریانی هیدرولیکی (Hydraulic Flow unit) شناخت چگونگی توزیع واحدهای جریانی در یک مخزن می‌تواند در تفکیک مخزن به واحدهای متنوع با شرایط مخزنی متفاوت مفید باشد. در این مطالعه با استفاده از روش نشانگر زون جریانی (Flow Zone Indicator) شش واحد جریانی بر اساس داده‌های تخلخل و تراوایی در دو چاه A و B مخزن بنگستان در میدان منصوری تعیین شده است. مهم‌ترین پارامترهای آماری داده‌های تخلخل و تراوایی برای هر کدام از واحدهای جریانی (HFU) نشان می‌دهد، HFU1، HFU3، HFU5، HFU6، بهترین کیفیت مخزنی را دارند. به منظور ارزیابی مطالعه واحدهای جریانی، با مقایسه روش‌های خوشه‌بندی سلسله مراتبی (Hierarchical Clustering) و روش k-means با استفاده از روش اعتبارسنجی silhouette روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی به عنوان روش بهینه انتخاب شد و داده‌های تخلخل و تراوایی هر دو چاه در شش خوشه (Rock Type) قرار گرفتند. مقایسه گونه‌های سنگی تعیین شده به روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی با واحدهای جریانی و نیز رخساره‌های میکروسکوپی مخزن نتایج قابل قبول هر دو روش را برای تعیین گونه‌های سنگی نشان می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** واحد جریانی هیدرولیکی (HFU)، نشانگر زون جریانی (FZI)، خوشه‌بندی سلسله مراتبی، گونه سنگی، مخزن بنگستان، روش اعتبارسنجی Silhouette.

E-mail: y.noorian@yahoo.com

\*نویسنده مسئول: یاسر نوریان

## ۱- پیش‌نویس

جریانی سیال اقدام نمایند. Lucia (1995) بر اساس هندسه تخلخل سنگ‌های فاقد حفره (vug) و مطالعه مقاطع نازک و مغزه‌ها، Martin et al. (1997) بر پایه گلوگاه تخلخل و به کارگیری رابطه r35 و پیش از این‌ها Amafule et al. (1993) به طریق برقراری رابطه منطقی میان تخلخل و تراوایی، از جمله کسانی بودند که تلاش‌هایی در این راستا انجام دادند. در این مطالعه سعی شده است با تعیین واحدهای جریانی هیدرولیکی (HFU) به روش نشانگر زون جریانی (Flow Zone Indicator) بتوان تا حدودی مخزن را از دید کیفیت مخزنی به زون‌های قابل تفکیک از یکدیگر تبدیل کرد. در ادامه با روش خوشه‌بندی و بر اساس داده‌های تخلخل و تراوایی گونه‌های سنگی مخزن طبقه‌بندی شد. در نهایت گونه‌های سنگی تعیین شده با روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی و واحدهای جریانی به لحاظ کیفیت مخزنی و بر اساس مقادیر تخلخل و تراوایی بررسی شدند و با رخساره‌های میکروسکوپی شناسایی شده در مخزن مورد ارزیابی قرار گرفتند. این ارزیابی نتایج قابل قبولی را نشان می‌دهد. به همین دلیل بر اساس این نتایج و با توجه به هدف مطالعه می‌توان زون‌های با کیفیت مخزنی بهتر را در میدان تعیین کرد. این ارزیابی می‌تواند در افزایش تولید مخزن مؤثر باشد.

بر مبنای چارچوب پیچیده زمین‌ساختی خاورمیانه، کمر بند چین‌خورده- روراند زاکرس حالت تغییرشکل یافته حوضه رسوبی زاکرس است، حوضه‌ای که در شمال خاوری (مختصات امروزی) حاشیه قاره‌ای عربی- آفریقایی گسترش داشته و با کوهزایی زاکرس از کرتاسه تا عهد حاضر تحت تأثیر قرار گرفته است (Alavi, 2007). به جز ناحیه شیراز که در آن رسوب‌گذاری از ژوراسیک تا کرتاسه پیوسته بوده است، در دیگر نواحی زاکرس، پس از توقف رسوبی ژوراسیک پایانی، گستره‌های وسیعی از زاکرس با دریای پیشرونده کرتاسه پوشیده شده است. بر اساس مطالعات James & Wynd (1965) از آلپین تا کامپانین یک چرخه رسوبی از سازندهای کژدمی، سروک، سورگه و ایلام را می‌توان در زاکرس شناسایی کرد. به مجموعه سازندهای یادشده، گروه بنگستان نام داده شده که نام آن از کوه بنگستان در شمال بهمان گرفته شده است. مخزن مورد مطالعه شامل دو سازند ایلام و سروک است. سن سازند سروک از آلپین تا سنومانین در نظر گرفته می‌شود (James & Wynd, 1965) (شکل ۱- ب). سازند ایلام به صورت دو رخساره ژرف و کم ژرفا دیده می‌شود. رخساره‌های کم ژرفای سازند ایلام در نواحی فارس و خوزستان گسترش دارد که شامل سنگ‌آهک‌های دانه درشت به سن سانتونین تا کامپانین است (آق‌آبانی، ۱۳۸۹). یک توصیف جامع نیازمند بهترین تلفیق داده‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی است تا ویژگی‌های مخزنی یک مخزن به گونه‌ای توصیف شود که بتواند نزدیک‌ترین شباهت را با واقعیت‌های زمین‌شناسی داشته باشد. به دلیل غیر یکنواختی بالای مخازن کربناتی، مشکلاتی در مدل‌سازی رفتار مخزن وجود دارد. در سالهای اخیر، مفهوم واحد جریانی هیدرولیکی (Hydraulic Flow Unit) برای بهبود در پیش‌بینی تراوایی در چاه‌ها و یا فواصل فاقد مغزه استفاده شده است. این مفهوم برای اولین بار توسط Amafule et al. (1993) ارائه شده است. افراد بسیاری تلاش کرده‌اند تا با ارائه شیوه‌های مختلف، به تشخیص و تفکیک واحدهای

## ۲- موقعیت جغرافیایی میدان مورد مطالعه

میدان منصوری در ناحیه دزفول شمالی به فاصله ۴۵ کیلومتری جنوب اهواز و ۵۰ کیلومتری باختر بندر ماهشهر واقع شده است (شکل ۱- الف). روند این ساختمان از روند ساختمان‌های آب تیمور، اهواز و مارون که همان روند زاکرس (شمال باختر- جنوب خاور) است تبعیت می‌کند (قنوتی و حق‌پرست، ۱۳۸۶). براساس نقشه‌های هم‌تراز زیر سطحی موجود، ابعاد مخزن بر روی افق ایلام ۴۳ کیلومتر طول و ۶ کیلومتر عرض و بستگی قائم آن برابر با ۳۰۰ متر است. این میدان در سال ۱۹۷۴ توسط شرکت نفت انگلیس (BP) با اطلاعات سه حلقه چاه مورد

#### ۴-۲. رخساره پشته‌های سدی

– **گرینستون** – **رودستون رودیستی**: خرده فسیلی شاخص در این رخساره رودیست (با میانگین اندازه ۱/۷۵ میلی‌متر و فراوانی ۵۰٪) است. همچنین خرده‌های اسکلتی مانند اوربیتولینا (*Orbitolina*) (با فراوانی ۱۰٪)، دو کفه‌ای، اکتینوئید (با فراوانی ۱۵٪)، بریوزوئر (با فراوانی کمتر از ۱۰٪) و آلوتولینا نیز مشاهده شد (شکل ۲-ت و ث).

**تفسیر**: با توجه به عدم وجود گل آهکی و فراوانی دانه‌هایی مانند خرده‌های رودیست و خارپوست این رخساره در یک محیط پر انرژی سدی یا پشته‌ای نهشته شده است (Flügel, 2010; Wilson, 1975). مانند اکتینوئید نیز نشان‌دهنده شرایط رسوب‌گذاری دریای باز به‌شمار می‌رود (Heckel, 1972). بنابراین با توجه به حضور نسبتاً زیاد قطعات اکتینوئید و دو کفه‌ای می‌توان این رخساره را به بخش رو به دریای سد نسبت داد.

#### ۴-۳. رخساره دریای باز

– **پکستون بیوکلتی اکتینوئیدی**: این رخساره از خرده‌های اسکلتی مانند روزن‌برهای کفزی *Textularia* و پلاژیک *Globigerina* (با میانگین اندازه ۰/۲ میلی‌متر و فراوانی ۲۵٪)، اکتینوئید (با میانگین اندازه ۰/۶۵ میلی‌متر و فراوانی ۲۰٪)، دو کفه‌ای (با میانگین اندازه ۰/۵ میلی‌متر و فراوانی ۱۰٪)، خرده‌های رودیست (با میانگین اندازه ۰/۷۵ میلی‌متر و فراوانی ۸٪)، بریوزوئر، براکیوپود با فراوانی کمتر از ۱۲٪ تشکیل شده است. میکرایتی شدن دانه‌ها در این رخساره دیده می‌شود (شکل ۲-ج).

**تفسیر**: شواهدی مانند فراوانی موجودات استنوهالین مانند اکتینودرم و وجود فسیل‌های دریای باز مانند بریوزوئر و نیز حضور گل در نمونه‌های این رخساره می‌تواند نشان‌دهنده شرایط محیطی کم انرژی بخش‌های کم ژرفای دریای باز باشد (Wilson, 1975; Read, 1985; Ghabeishavi et al., 2010).

#### ۵- واحدهای جریانی هیدرولیکی (HFU)

یک واحد جریانی، حجمی از سنگ مخزن است که به طور عمودی و جانبی پیوسته و قابل پیش‌بینی بوده و ویژگی‌های زمین‌شناسی و پتروفیزیکی تأثیرگذار بر روی جریان سیال در درون آن ثابت است و به طور مشخص از دیگر بخش‌های سنگ متفاوت هستند (Abbaszadeh et al., 1996). روش قدیمی تفکیک گونه‌های سنگی بر اساس مشاهدات زمین‌شناسی موضوعی و روابط تجربی بین داده‌های نفوذپذیری در مقابل تخلخل پایه‌گذاری شده است (Amaefule et al., 1993). با این وجود در یک گونه سنگی تعیین شده برای هر تخلخل، تراوایی ممکن است مقادیر متفاوتی را نشان دهد که نشانگر وجود چندین واحد جریانی است (Amaefule et al., 1993). هر واحد جریانی با استفاده از روش نشانگر زون جریانی (FZI) مشخص شده، و نشانگر زون جریانی خود تابعی از پارامتر شاخص کیفیت مخزنی است (Reservoir quality Index). مفهوم واحد جریانی می‌تواند مخزن را به گونه‌های پتروفیزیکی مجزا تقسیم کند، به طوری که هر واحد دارای نشانگر زون جریانی (FZI) خاص باشد (Al-Ajmi & Holditch, 2000). اساس واحدهای جریان سیال بر پایه ارتباط بین تخلخل و تراوایی است که در اصل توسط Kozeny (1927) و Carmen (1937) پیشنهاد شد. تئوری طبقه‌بندی روش واحد جریانی سیال بر این فرض است که ارتباط حفرات را می‌توان توسط مجموعه‌ای از لوله‌های مویینه نشان داد (Abbaszadeh et al., 1996). ترکیبی از قوانین دارسی (Darcy Law) و پویزوله (Poiseuille Law) برای لوله‌های استوانه‌ای مستقیم منتج به این رابطه شد (Abbaszadeh et al., 1996; Svirsky et al., 2004).

$$\phi_r k = \frac{r^2}{8} \quad \text{معادله ۱}$$

که در آن  $k$  نفوذپذیری و  $\phi_r$  تخلخل مؤثر است. (Kozeny (1927) و Carmen (1937) برای یک محیط متخلخل واقعی، دو پارامتر پیچایی ( $\tau$ ) و مساحت سطح واحد حجم ( $S_{gV}$ ) را در رابطه ۱ اعمال کرده و رابطه زیر را ارائه کردند.

مطالعه قرار گرفت که در آن مخزن بنگستان به ۹ زون تقسیم‌بندی شد که زون‌های ۳ تا ۹ سازند ایلام و بقیه شامل سازند سروک هستند (قناتی و حق‌پرست، ۱۳۸۶).

#### ۳- روش مطالعه

در این مطالعه در ابتدا پس از بررسی ۶۸ مقطع نازک موجود از مغزه‌های چاه A پنج رخساره رسوبی شناسایی شد. محیط ته‌نشست این رخساره‌ها شامل سه محیط لاگون، سد و دریای باز است. نامگذاری رخساره‌های میکروسکوپی بر اساس تقسیم‌بندی Dunham (1962) و Embry & Klovan (1971) انجام شد. واحدهای جریانی مخزن به وسیله روش نشانگر زون جریانی (FZI) و بر اساس داده‌های تخلخل و تراوایی مربوط به دو چاه A و B میدان تعیین شده است. در این روش با رسم نمودار احتمال نرمال نشانگر زون جریانی تعداد شش واحد جریانی (HFU) برای مخزن تعیین شد. به منظور شناسایی گروه‌های سنگی با کیفیت مخزنی بهتر و ایجاد ارتباط بین واحدهای جریانی و این گروه‌های سنگی، داده‌های تخلخل و تراوایی دو چاه به وسیله روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی و با استفاده از نرم‌افزار مطلب در شش گروه مجزا قرار گرفتند. در ادامه هر کدام از این روش‌ها بحث خواهد شد.

#### ۴- رخساره‌های رسوبی

بر اساس مطالعه ۶۸ مقطع نازک موجود از مغزه‌های چاه A در این میدان، ابتدا نوع دانه‌ها، درصد فراوانی دانه‌ها، محیط رسوب‌گذاری هر کدام از مقاطع مشخص شدند که در ادامه هر کدام از این رخساره‌ها به ترتیب از لاگون به سمت دریای باز مورد بررسی قرار می‌گیرند.

#### ۴-۱. رخساره‌های لاگون

– **وکتون بیوکلتی میلیوئیدی**: زمینه گلی بخش بیشتر این رخساره را تشکیل می‌دهد. از جمله قطعات اسکلتی غالب در این رخساره، روزن‌برهای کفزی به‌ویژه میلیوئید (با میانگین اندازه ۰/۸ میلی‌متر و فراوانی ۲۴٪)، گاستروپود (۰/۸۴ میلی‌متر و فراوانی ۱۲٪) و در برخی از نمونه‌ها روزن‌بر نوع اوربیتولینا (*Orbitolina*) (با فراوانی حدود ۵٪) است (شکل ۲-الف). دانه‌ها اغلب سالم و بدون شکستگی هستند. برخی از خرده‌های فسیلی مانند گاستروپود دچار انحلال شده و بعداً توسط کلسیت پر شده‌اند.

– **وکتون-پکستون بیوکلتی دولومیتی**: این رخساره بیشتر ریزدانه و از خرده‌های روزن‌بر کفزی (با میانگین اندازه ۰/۶ میلی‌متر و فراوانی ۲۰٪)، گاستروپود (۰/۷۴ میلی‌متر و فراوانی ۶٪)، دو کفه‌ای (با فراوانی ۵٪ و میانگین اندازه ۱ میلی‌متر) و مقداری اکتینوئید تشکیل شده است. بلورهای لوزی شکل دولومیت نیز در این مقاطع قابل مشاهده است (شکل ۲-ب).

– **پکستون-گرینستون بیوکلتی پلوییدی**: از اجزای اصلی این رخساره می‌توان به روزن‌برهای کفزی نوع *Textularia* و *Nezzazata* (با میانگین اندازه ۰/۱ میلی‌متر و فراوانی ۲۰٪)، خرده‌های خارپوست و دو کفه‌ای اشاره کرد. از مهم‌ترین خرده‌های غیر اسکلتی پلویید با میانگین اندازه ۰/۰۹ میلی‌متر و فراوانی ۳۰٪ است. در بیشتر بخش‌ها بین دانه‌ها را سیمان دریایی پر کرده است (شکل ۲-ب) و در برخی بخش‌ها نیز بین دانه‌ها را گل آهکی پر کرده است.

**تفسیر**: زمینه گلی این مجموعه نشان‌دهنده یک محیط با انرژی پایین است. وجود میلیوئید به عنوان شاخص آب‌های آرام و کم‌ژرفا، نیمه‌شور تا فوق‌العاده شور از عوامل تأییدکننده محیط کربناتی لاگونی است (Bachmann & Hirsch, 2006). پلویید در ژرفای بیشتر از ۱۰۰ متر یافت نمی‌شوند، از این رو محل تشکیل این رخساره با پلویید فراوان را می‌توان به لاگون نسبت داد (Tucker & Wright, 1990). از طرفی حضور سیمان در برخی از رخساره‌های این محیط که سیما گریستونی به رخساره داده است، محیط رسوب‌گذاری این رخساره‌ها می‌تواند یک لاگون نیمه محدود به سمت دریای باز یا سد باشد (Raspini, 1998).

مختلف با استفاده از درخت خوشه‌ای است، به بیان دیگر، تولید یک سلسله خوشه از خوشه‌های کوچک‌تر با محتوای داده‌ای خیلی شبیه به هم برای تولید خوشه‌های بزرگ‌تر که حاوی محتوای داده‌ای با بیشترین اختلاف هستند از وظایف خوشه‌سازی سلسله‌ای است (Holland, 2006). برای خوشه‌بندی به روش سلسله مراتبی مراحل زیر به ترتیب در محیط نرم‌افزار مطلب (Matlab R2009) صورت گرفته است.

#### ۶-۱. محاسبه فاصله بین داده‌های ورودی

یک مرحله مهم در هر خوشه‌بندی انتخاب یک روش محاسبه‌کننده فاصله است، زیرا چگونگی محاسبه شباهت دو جزء را تعیین می‌کند. توابع مختلفی برای محاسبه این فاصله وجود دارد. در این مطالعه روش اقلیدسی (Euclidean) به منظور محاسبه فاصله بین داده‌های ورودی انتخاب شد. در واقع روش اقلیدسی فاصله بین تمام زوج داده‌های ورودی را محاسبه می‌کند (Matlab user's Guide, 2009). اگر دو زوج داده  $(x_1, y_1)$  و  $(x_2, y_2)$  موجود باشند، فاصله اقلیدسی این دو زوج داده بر اساس معادله ۷ به دست می‌آید.

$$Euclidean = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2} \quad (7)$$

#### ۶-۲. برقراری ارتباط بین داده‌های فواصل

در این مرحله، با استفاده از معادلات پیوستگی بین زوج داده‌های ورودی که در مجاورت یکدیگر هستند ارتباط برقرار می‌شود (Matlab user's Guide, 2009). توابع مختلفی برای برقراری ارتباط بین داده‌ها و گروه‌بندی آنها وجود دارد، به طوری که بیشترین فاصله بین اجزاء، حداقل فاصله، میانگین فواصل و فاصله بین مرکز ثقل همه اجزای بردار می‌توانند در این تابع قرار گیرند. در این مطالعه از روش مجموع مربعات افزایشی (ward's linkage) در خوشه‌ها به منظور تولید خوشه‌های جدیدتر و بزرگ‌تر استفاده شد. این روش تلاش می‌کند واریانس خوشه‌های ادغام شده را به حداقل برساند. برای نمونه اگر دو خوشه با نام‌های  $T$  و  $S$  موجود باشد محاسبه فاصله به روش مجموع مربعات افزایشی با استفاده از معادله ۸ انجام می‌شود.

$$d^2(r, s) = n_r n_s \frac{|x_r - x_s|_2^2}{(n_r + n_s)} \quad (8)$$

که در آن  $|x_r - x_s|_2^2$  فاصله اقلیدسی و  $x_r$ ،  $x_s$  مراکز خوشه‌های  $T$  و  $S$  است.

#### ۶-۳. تشکیل درخت خوشه (Dendrogram)

یک نمودار درختی (Dendrogram) از تعدادی خطوط  $u$  شکل تشکیل شده است، که مربوط به اتصال خوشه‌ها در درخت سلسله مراتبی است. در این نوع درخت، محور افقی شامل تعداد داده‌ها و محور عمودی مقادیری را نشان می‌دهد که خوشه‌های مختلف برای تشکیل خوشه‌های جدیدتر به یکدیگر می‌پیوندند (آقازاده و همکاران، ۱۳۸۸). برای تشکیل درخت خوشه‌ای در این مطالعه روش خوشه‌سازی سلسله‌ای متراکم یا به هم پیوسته مورد استفاده قرار گرفته است (Agglomerative Hierarchical Clustering). این روش خوشه‌سازی به مجموعه‌ای از روش‌های خوشه‌سازی با روابط نزدیک به هم اشاره دارد که در آن، هر نقطه به عنوان یک خوشه مجزا در نظر گرفته شده و سپس دو خوشه نزدیک به هم را (بر اساس میزان فاصله) با یکدیگر ترکیب می‌کند، عمل ترکیب کردن خوشه‌ها تا جایی ادامه پیدا می‌کند که در نهایت یک خوشه بزرگ‌تر همه خوشه‌های زیرین را احاطه می‌کند (آقازاده و همکاران، ۱۳۸۸). در ادامه برای ایجاد خوشه‌های مورد نیاز از روش تعیین خوشه دلخواه (specifying arbitrary cluster) استفاده شد. در این روش با توجه به هدف مطالعه، بر اساس درخت خوشه تولید شده یک حد برش (cut off) برای ایجاد تعداد خوشه‌ها تعیین می‌شود. با توجه به اینکه هدف اصلی این مطالعه بررسی واحدهای جریانی و طبقه‌بندی گروه‌های سنگی است، به دلیل اینکه در مخزن ۶ واحد جریانی شناسایی شده است، برای ایجاد انطباق بهتر بین واحدهای جریانی و گروه‌های سنگی، حد برش شش (cut off=6) برای خوشه‌بندی

$$k = \frac{\varphi_e^3}{(1 - \varphi_e)^2} \times \frac{1}{Fst^2 S_{gv}^2} \quad (2)$$

که در آن  $Fs$  فاکتور شکل،  $K$  تراوایی بر حسب میکرومتر مربع و  $\varphi_e$  به صورت کسری بیان می‌شود. در معادله ۲ عبارت  $Fst^2$  به عنوان ثابت کوزنی شناخته شد. Amaefule et al. (1993) با تقسیم معادله ۲ بر  $\varphi_e$  تغییرات ثابت کوزنی را مورد مطالعه قرار دادند و رابطه زیر را ارائه کردند:

$$0.0314 \times \sqrt{k / \varphi_e} = \frac{\varphi_e}{(1 - \varphi_e)} \times \frac{1}{\sqrt{Fst^2 S_{gv}^2}} \quad (3)$$

ثابت 0.0314 برای تبدیل میکرومتر مربع به میلی داری است. تعریف عبارت‌های نشانگر زون جریانی (FZI)، شاخص کیفیت مخزنی (RQI) و تخلخل نرمال ( $\varphi_p$ ) به صورت زیر است.

$$FZI = \frac{1}{\sqrt{Fst^2 S_{gv}^2}} \quad (4)$$

$$RQI = 0.0314 \sqrt{\frac{k}{\varphi_e}} \quad (5)$$

$$\varphi_z = \frac{\varphi_e}{1 - \varphi_e} \quad (6)$$

با توجه به معادله ۴ تا ۶، معادله ۳ به صورت  $RQI = \varphi_z \times FZI$  تبدیل خواهد شد و با گرفتن لگاریتم از طرفین معادله زیر به دست می‌آید:

$$LOGRQI = \log \varphi_z + \log FZI$$

RQI به عنوان شاخص کیفیت مخزنی شناخته می‌شود و تقریبی از میانگین شعاع هیدرولیکی در سنگ مخزن است. شاخص کیفیت مخزنی کلیدی برای واحدهای هیدرولیکی بوده، تخلخل، تراوایی و فشار موینگی را به هم مرتبط می‌سازد (Abbaszadeh et al., 1996; Amaefule et al., 1993). داده‌های موجود در این مطالعه برای تعیین واحدهای جریانی به روش نشانگر زون جریانی (FZI) شامل ۶۲۹ داده تخلخل و تراوایی در چاه‌های A و B است. به منظور تفکیک و تعیین واحدهای جریانی هیدرولیکی با استفاده از نشانگر زون جریانی روش‌های متنوعی وجود دارد. در این مطالعه واحدهای جریانی هیدرولیکی با استفاده از نمودار احتمال نرمال (Normal probability) لگاریتم نشانگر زون جریانی (Log FZI) محاسبه شده برای داده‌های تخلخل و تراوایی در دو حلقه چاه مخزن بنگستان به دست آمد (شکل ۳).

در ادامه با رسم نمودار تراوایی در برابر تخلخل برای واحدهای جریانی تعیین شده، این واحدها از دید کیفیت مخزنی مورد بررسی قرار گرفتند (شکل ۴). هر واحد جریانی هیدرولیکی (HFU) دارای مقدار معینی از FZI است (جدول ۱). برای شناخت بهترین واحدهای جریانی و در نتیجه تفکیک زون‌های با کیفیت مخزنی بهتر در مخزن، مقدار میانگین مربوط به داده‌های تخلخل و تراوایی برای هر کدام از واحدهای جریانی هیدرولیکی (HFU) تعیین شده است (جدول ۱ و شکل ۵).

#### ۶-۴. طبقه‌بندی گونه‌های سنگی با استفاده از خوشه‌بندی سلسله مراتبی

با توجه به هدف مطالعه، روش‌های مختلفی برای طبقه‌بندی گروه‌های سنگی وجود دارد. به دلیل اینکه در روش‌های معمولی مانند رسم نمودار تراوایی-تخلخل داده‌های گروه‌های سنگی همپوشانی دارند، بنابراین در این مطالعه از روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی برای طبقه‌بندی گونه‌های سنگی استفاده شده است. هدف از خوشه‌بندی قرار دادن یک مجموعه از داده‌ها در گروه‌هایی (که خوشه نامیده می‌شود) است، به طوری که داده‌ها در درون هر یک از گروه‌ها اختلاف چندانی با یکدیگر نداشته و همگن بوده و نسبت به گروه‌های دیگر ناهمگن باشند (Holland, 2006). بیشترین شباهت (همگن بودن) در یک گروه و بیشترین اختلاف بین گروه‌ها نشان‌دهنده بهترین حالت خوشه‌سازی است (Loo et al., 2001). خوشه‌سازی سلسله‌ای روشی برای گروه‌بندی داده‌ها به طور همزمان در مقیاس‌های

جریانی سه (HFU3) در این گروه‌های سنگی بهترین کیفیت مخزنی را دارا هستند. RT4 و RT3 نیز با توجه به اینکه نسبت به بقیه دارای بیشترین درصد فراوانی HFU5 و HFU6 است، بدترین کیفیت مخزنی را دارند. با در نظر گرفتن میانگین تراوایی برای هر کدام از گونه‌های سنگی (RT) طبقه‌بندی شده به وسیله روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی که نشان می‌دهد گونه سنگی پنج و دو (RT5, RT2) بهترین و گونه‌های سنگی چهار و شش (RT4, RT6) بدترین کیفیت مخزنی را دارند (شکل‌های ۸ و ۹)، می‌توان گفت هر دو روش مجزاکننده گونه‌های سنگی با دقت خوبی توانسته‌اند گروه‌های سنگی را از یکدیگر تفکیک کنند. درصد گونه‌های سنگی (RT) و واحدهای جریانی (HFU) برای چاه‌های مطالعه شده نیز تعیین شدند (شکل ۱۳). از طرفی به عنوان یک مطالعه تکمیلی، انطباق ژرفایی نسبتاً خوب واحدهای جریانی با کیفیت مخزنی بهتر با رخساره‌های محیط‌های پر انرژی مانند گریستون-رودستون رودیستی و واحدهای جریانی با کیفیت پایین‌تر با رخساره‌های محیط‌های کم انرژی مانند محیط لاگون (وکستون بیوکستی میلیویدی و وکستون-پکستون بیوکستی دولومیتی) می‌توان گفت تا حدودی شرایط محیطی در تفکیک گونه‌های سنگی نیز مؤثر است. البته نباید فراموش کرد، الزاماً رخساره‌های محیطی تعیین کننده نوع واحدهای جریانی نیست. در روشی مانند خوشه‌بندی سلسله مراتبی و یا تعیین واحدهای جریانی بر اساس داده‌های تخلخل و تراوایی، نوع رخساره اهمیت ندارد بلکه پتانسیل مخزنی سازند بر اساس تخلخل و تراوایی مورد توجه قرار می‌گیرد، چرا که فرایندهای دیاژنزی گاه چنان تأثیری بر مخازن به‌ویژه کربناتی، می‌گذارند که هر رخساره می‌تواند هر نوع تخلخل و تراوایی را از خود نشان دهد (Kadkhodaie-Ikchi & Amini, 2009).

#### ۱۰- نتیجه‌گیری

با استفاده از روش نشانگر زون جریانی (FZI) و با رسم نمودار احتمال نرمال برای لگاریتم FZI تعداد شش واحد جریانی هیدرولیکی (HFU) برای مخزن شناسایی شد. برای مطالعه تکمیلی با استفاده از روش اعتبارسنجی silhouette دو روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی و k-means با هم مقایسه شدند و روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی به عنوان روش بهینه انتخاب شد و گونه‌های سنگی بر اساس داده‌های تخلخل و تراوایی به شش گونه سنگی (RT) تفکیک شد. با توجه به اینکه مطالعه رخساره‌های رسوبی مخزن بنگستان در میدان منصوری منجر به شناسایی ۵ رخساره رسوبی شده است، ارتباط این رخساره‌ها با واحدهای جریانی و گونه‌های سنگی تفکیک شده نشان می‌دهد، برخی رخساره‌ها دارای چندین واحد جریانی یا گونه سنگی است. به همین دلیل می‌توان گفت واحدهای جریانی و گونه‌های سنگی تفکیک شده با این روش‌ها بیش از اینکه به رخساره رسوبی وابسته باشند به پتانسیل مخزنی بر اساس داده‌های تخلخل و تراوایی وابسته‌اند. با تعیین مقدار میانگین تراوایی برای هر کدام از واحدهای جریانی، مشخص شد HFU1، HFU3، HFU5، HFU6 پایین‌ترین کیفیت مخزنی را دارند. مقدار میانگین تراوایی برای گونه‌های سنگی (RT) نیز نشان می‌دهد، RT5، RT2 بالاترین و RT4، RT6 پایین‌ترین کیفیت را دارند. تعیین درصد فراوانی واحدهای جریانی در هر کدام از گونه‌های سنگی نیز تا حدودی تأییدکننده همین روند در مخزن است. این واحدها با نمودارهای پتروفیزیکی چاه نیز مورد ارزیابی قرار گرفتند و روند قابل قبولی را نشان می‌دهند. در نهایت از این مطالعه می‌توان در زون‌بندی مخزن به لحاظ کیفیت مخزنی استفاده کرد.

#### سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند تا از حمایت‌های بی‌دریغ شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب برای انجام این پژوهش سپاسگزاری نمایند.

تعیین شد (شکل ۷). بنابراین داده‌های تخلخل-تراوایی مخزن در شش گروه مختلف (Rock Type) قرار گرفتند.

#### ۷- روش خوشه‌بندی k-means

روش k-means جزو روش‌هایی است که ناظر قادر است داده‌ها را در هر تعداد دسته موردنظر بخش‌بندی کند. این روش مجموع داده‌ها را در تعداد k خوشه قرار می‌دهد به طوری که فاصله کلی تمام داده‌ها با مراکز خوشه آنها حداقل است. روش اقلیدسی برای محاسبه فاصله بین داده‌ها انتخاب شد. با این روش داده‌های مغزه در شش گروه مجزا قرار گرفت و به منظور انتخاب روش بهینه نتایج این روش با روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی با استفاده از روش اعتبارسنجی silhouette مقایسه شد (شکل ۶).

#### ۸- روش اعتبارسنجی silhouette

میانگین مقدار silhouette برای ارزیابی اعتبار خوشه‌بندی و همچنین برای تصمیم‌گیری در مورد انتخاب تعداد کلاس‌های بهینه مورد استفاده قرار می‌گیرد که این میزان بر اساس دوری و نزدیکی مشاهدات و خوشه‌ها به یکدیگر محاسبه می‌شود (سفیداری و همکاران، ۱۳۹۲). مقدار si با استفاده از فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$s(i) = \frac{b(i) - a(i)}{\max\{a(i), b(i)\}}$$

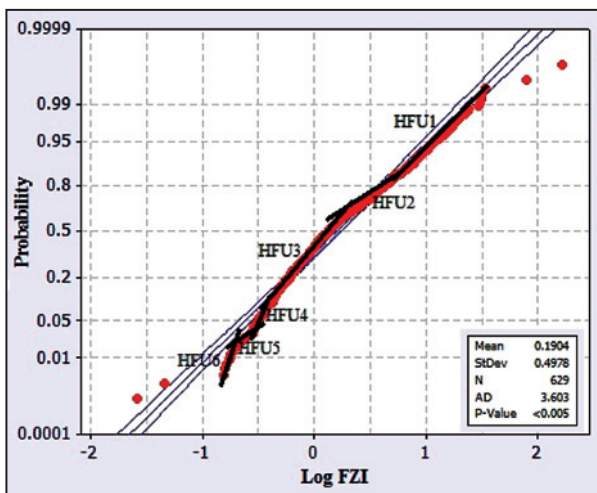
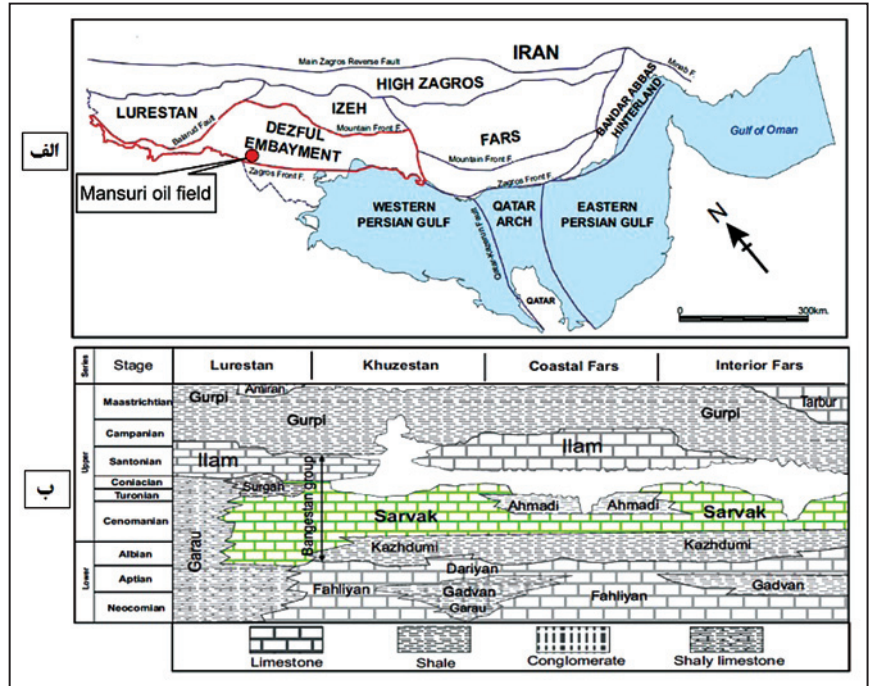
(i) میانگین فاصله بین مشاهده i با دیگر مشاهدات در یک خوشه مشابه و (ii) میانگین فاصله مشاهده i به تمام مشاهدات در خوشه‌های دیگر است. بر این اساس مقدار si بین -۱ و +۱ متغیر است. هر مقدار si به +۱ نزدیک‌تر باشد به این منظور است که خوشه‌بندی داده‌ها خوب انجام شده است و اگر این مقدار به -۱ نزدیک‌تر باشد خوشه‌بندی خوب انجام نشده است. این روش برای مقایسه روش‌های خوشه‌بندی سلسله مراتبی و k-means به منظور انتخاب روش مفیدتر برای خوشه‌بندی انجام شد و با توجه به اینکه مقدار میانگین silhouette برای روش k-means و خوشه‌بندی سلسله مراتبی به ترتیب برابر ۰/۶۱۵۸ و ۰/۶۶۶۲ به‌دست آمد، بنابراین روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی به عنوان روش بهینه انتخاب شد (شکل ۶).

#### ۹- بحث

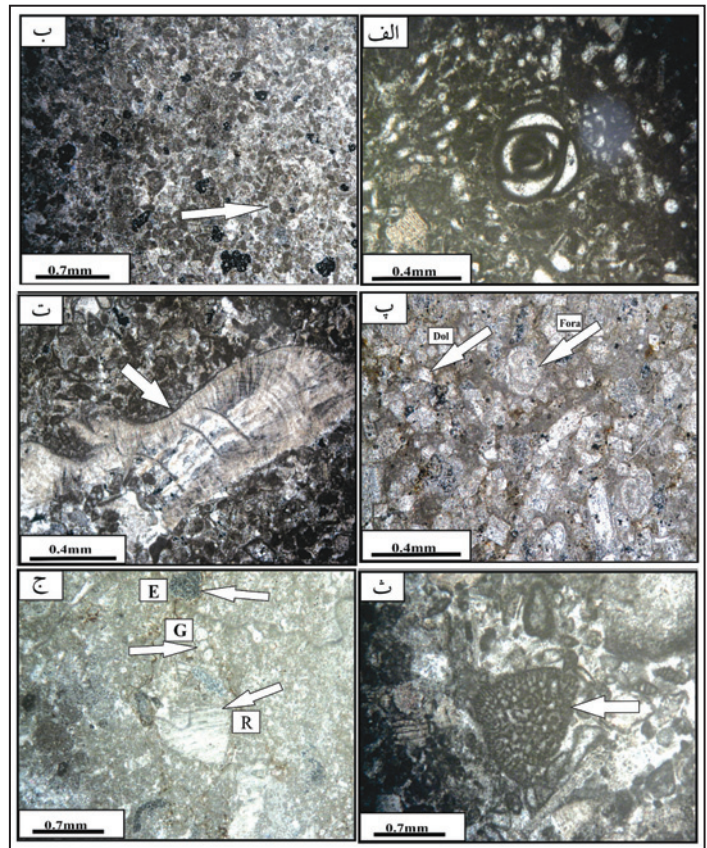
مطالعه واحدهای جریانی هیدرولیکی (HFU) با استفاده از روش نشانگر زون جریانی (FZI) منجر به تفکیک شش واحد جریانی در مخزن بنگستان در میدان منصوری شده است (شکل ۳). با توجه به مقدار میانگین تراوایی به‌دست آمده برای هر کدام از واحدهای جریانی، می‌توان گفت HFU3، HFU1، HFU6، HFU5 بدترین کیفیت مخزنی را دارند (جدول ۱). برای ارزیابی واحدهای جریانی تعیین شده، داده‌های تخلخل و تراوایی مربوط به هر دو چاه به وسیله روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی در شش گروه مجزا (RT) طبقه‌بندی شدند (شکل‌های ۷ و ۸).

رسم نمودار تراوایی-تخلخل برای گونه‌های سنگی (RT) تفکیک شده با روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی نشان می‌دهد، گروه‌های RT5، RT2 دارای بهترین و RT6، RT4 دارای بدترین کیفیت مخزنی هستند (شکل ۸). محاسبه مهم‌ترین پارامترهای آماری نیز بر این نتیجه‌گیری تأکید می‌کنند (شکل ۹). برای درک روابط موجود بین گونه‌های سنگی (RT) و واحدهای جریانی (HFU) درصد فراوانی واحدهای جریانی در هر یک از گونه‌های سنگی (RT) محاسبه شد (شکل ۱۰). ستون‌های واحدهای جریانی (HFU) و گونه‌های سنگی (RT) طبقه‌بندی شده برای مخزن، در چاه‌های A و B میدان در محیط نرم‌افزار Matlab R2009 رسم شد و در چاه A با رخساره‌های رسوبی شناسایی شده برای مخزن مورد ارزیابی قرار گرفتند (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). فراوانی واحدهای جریانی (HFU) در هر یک از گونه‌های سنگی تفکیک شده (RT) نشان می‌دهد که RT2 و RT5 با توجه به بالا بودن درصد فراوانی واحد

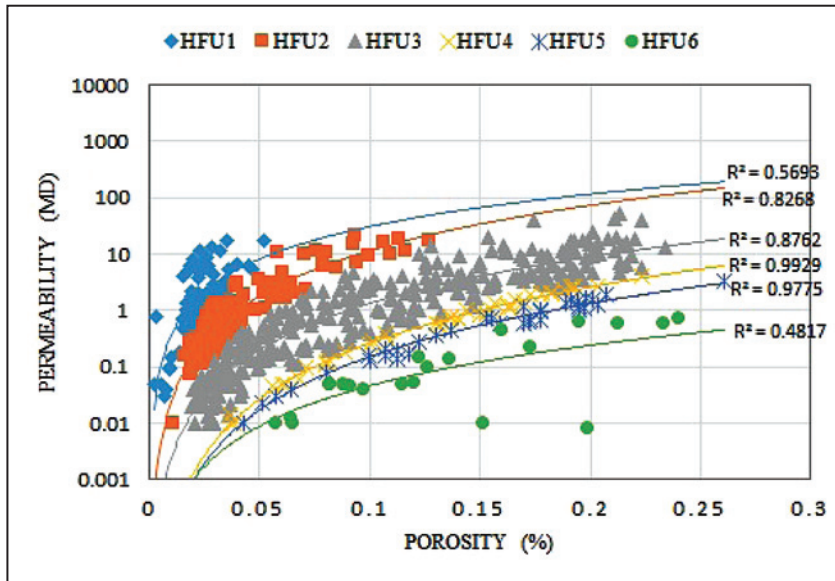
شکل ۱- الف) موقعیت میدان منصوری در فروافتادگی دزفول (با تغییرات از Hynes & Mc Quillan, 1974؛ ب) تطابق سنگ چینه‌ای کرتاسه در زاگرس (James & Wynd, 1965).



شکل ۳- نمودار احتمال نرمال برای لگاریتم نشانگر زون جریانی و تفکیک واحدهای جریانی.

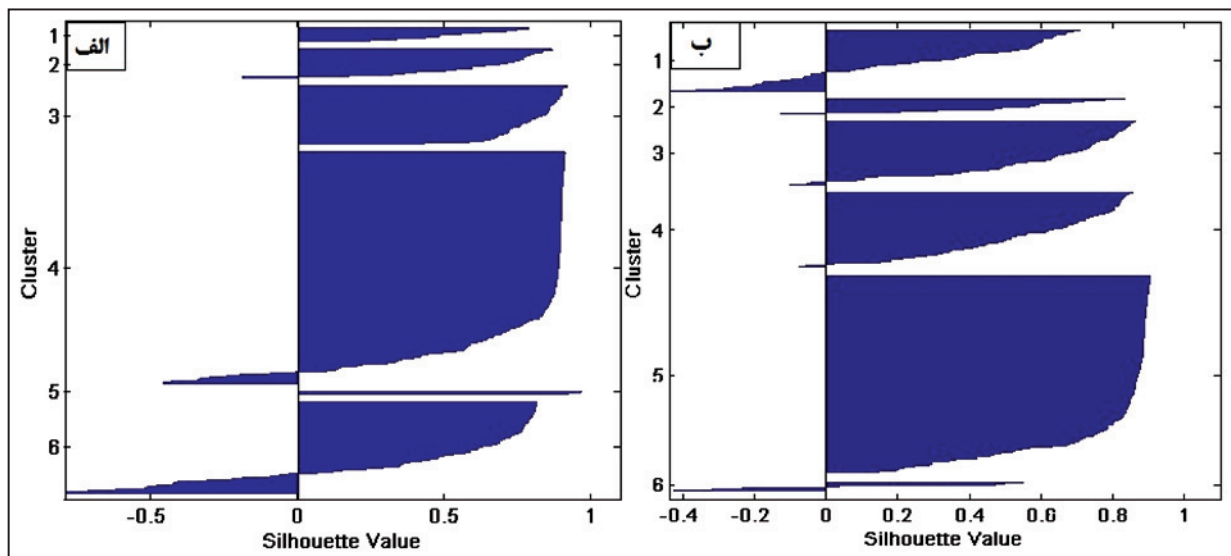
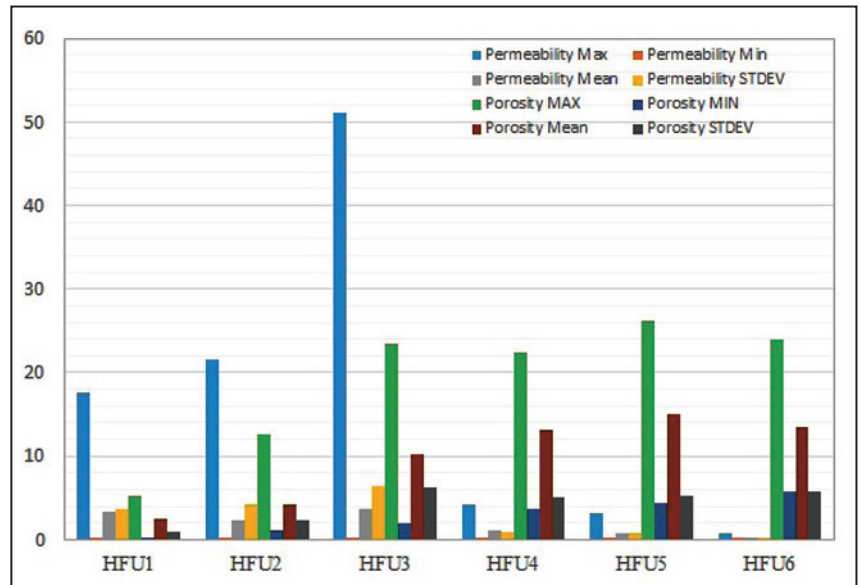


شکل ۲- الف) رخساره و کستون بیوکستی میلیویدی چاه A ژرفای ۳۵۱۸ متر؛ ب) رخساره پکستون-گرینستون بیوکستی پلوییدی خرده پلویید مشخص شده است، چاه A ژرفای ۳۵۵۲/۳۴ متر؛ پ) رخساره و کستون-پکستون دولومیتی، بلور دولومیت (Dol) و روزنبر (Fora) در شکل مشخص شده است، چاه A ژرفای ۳۵۸۶/۵ متر؛ ت) رخساره گرینستون-رودستون رودستی، خرده رودیست با فلش نشان داده شده است، چاه A ژرفای ۳۷۲۱/۵ متر؛ ث) خرده اوریتولینا در رخساره گرینستون-رودستون رودستی چاه A ژرفای ۳۷۲۱/۵ متر؛ ج) رخساره پکستون بیوکستی اکتیویدی، خرده رودیست (R)، Globigerina (G)، خرده خارپوست (E) نشان داده شده است، چاه A ژرفای ۳۵۶۲ متر.

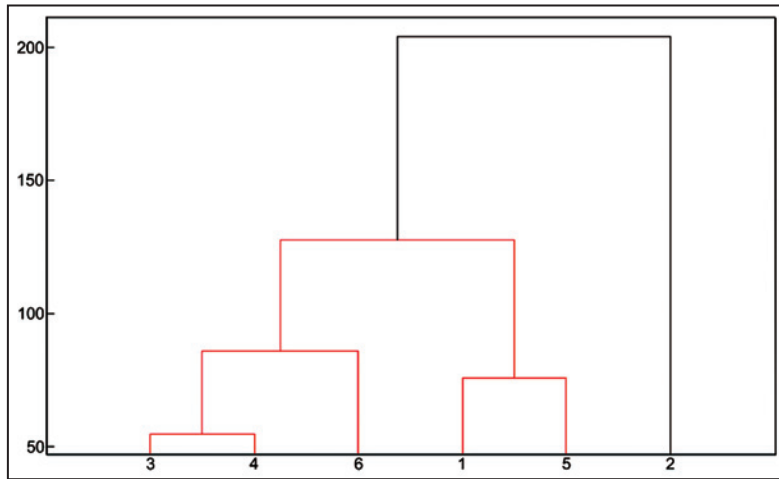


شکل ۴- نمودار توزیع تراوایی- تخلخل برای شش واحد جریانی مربوط به مخزن بنگستان در میدان منصوری.

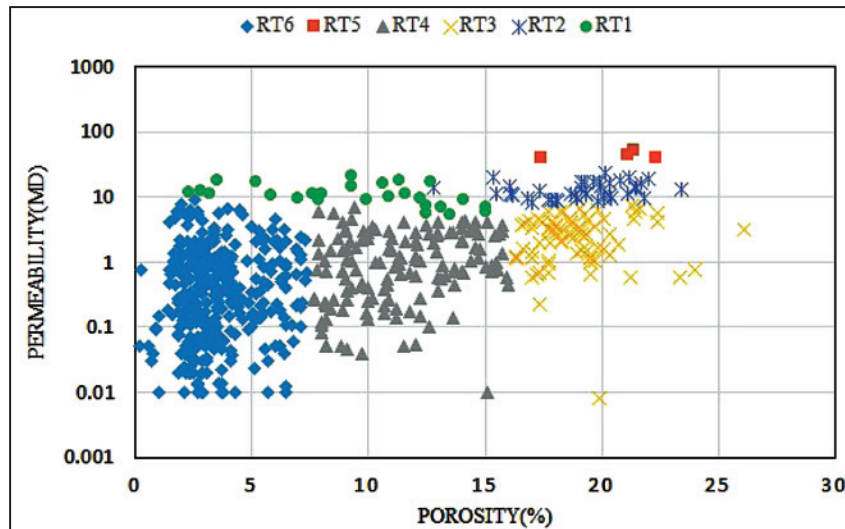
شکل ۵- نمودار فراوانی مهم‌ترین پارامترهای آماری محاسبه شده برای تراوایی و تخلخل واحدهای جریانی شناسایی شده.



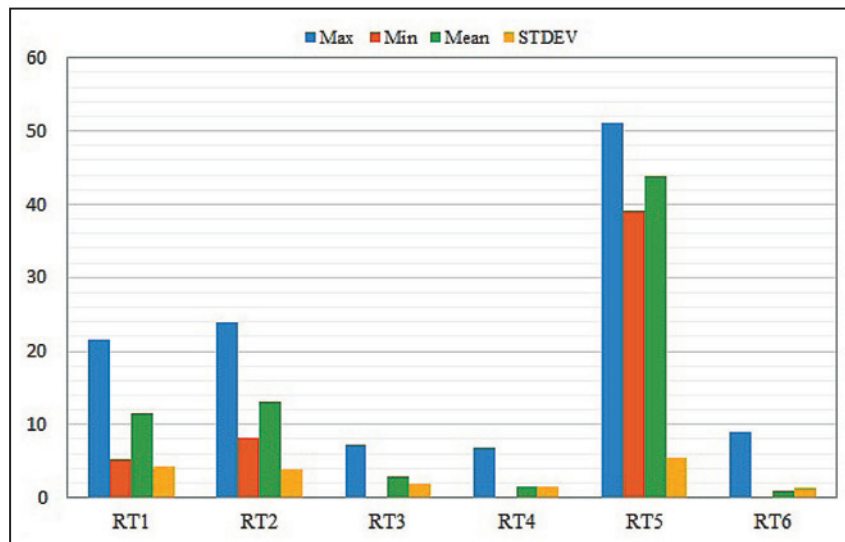
شکل ۶- نمودار silhouette به‌دست آمده بر اساس روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی؛ (ب) نمودار silhouette به‌دست آمده بر اساس روش خوشه‌بندی k-means.



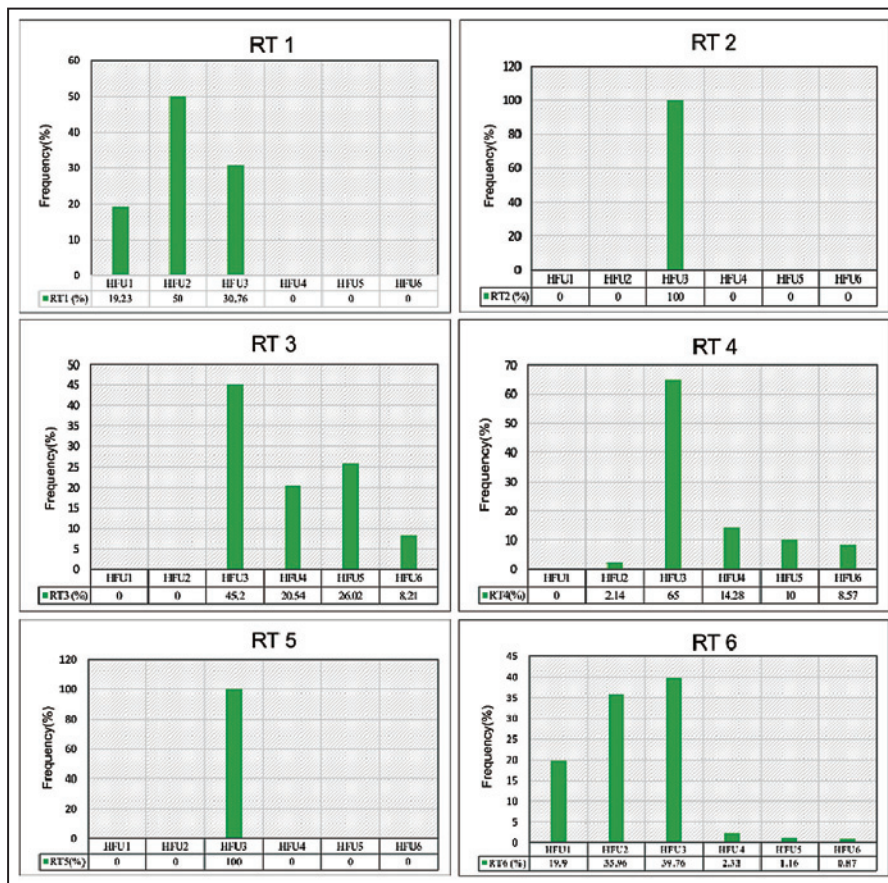
شکل ۷- نمودار درختی به دست آمده با حد برش ۶ (cut off= 6) برای داده‌های تخلخل و تراوایی چاه A و B مخزن بنگستان در میدان منصوری.



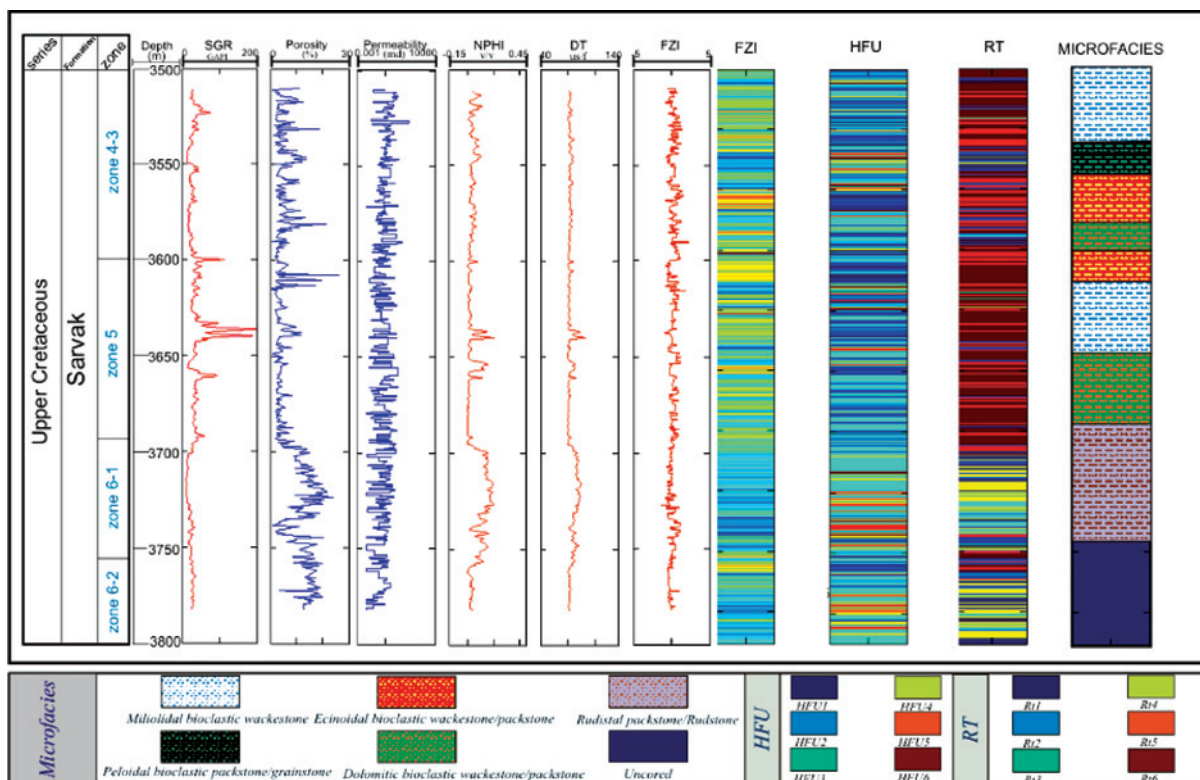
شکل ۸- نمودار تراوایی- تخلخل شش گونه سنگی طبقه‌بندی شده به روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی.



شکل ۹- محاسبه مهم‌ترین پارامترهای آماری برای شش گونه (RT) سنگی تفکیک شده.

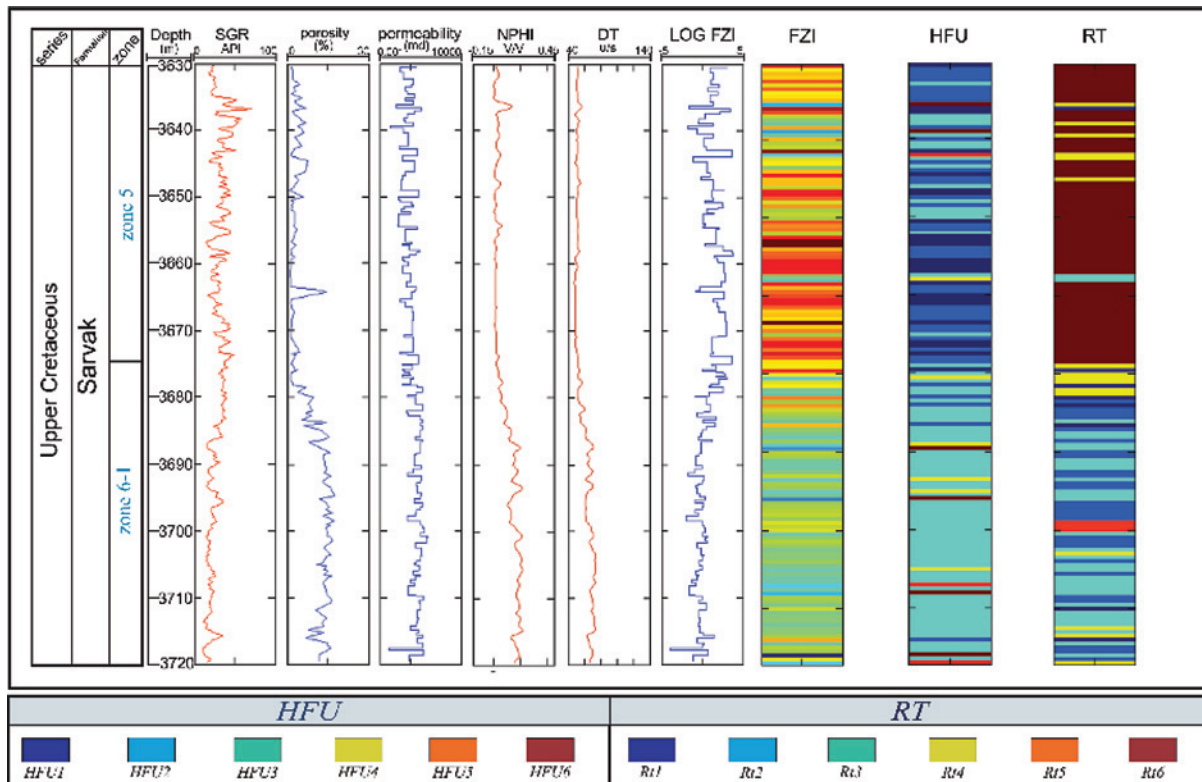


شکل ۱۰- درصد فراوانی واحدهای جریان‌ی (HFU) در هر یک از گونه‌های سنگی (RT) تفکیک شده به روش خوشه‌بندی سلسله مراتبی.

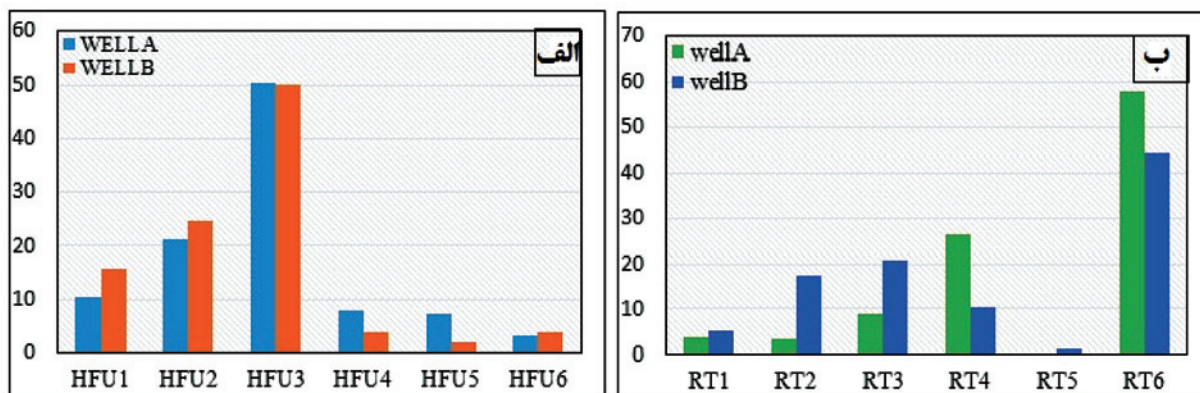


شکل ۱۱- ستون چینه‌شناسی بخش سروک مخزن بنگستان به همراه نمودارهای پتروفیزیکی در چاه A میدان منصوری. ارتباط رخساره‌های رسوبی، واحدهای جریان‌ی و گونه‌های سنگی مخزن نشان داده شده است.





شکل ۱۲- واحدهای جریان HFU، گونه‌های سنگی (RT) و نمودارهای پتروفیزیکی در چاه B مخزن بنگستان در میدان منصور.



شکل ۱۳- الف) درصد فراوانی واحدهای جریان HFU؛ ب) درصد فراوانی گونه‌های سنگی (RT) در چاه‌های مطالعه شده.

جدول ۱- مقدار لگاریتم FZI، میانگین تراوایی و تخلخل برای شش واحد جریان تعیین شده.

HFU	Log FZI	permeability (md) (mean)	Porosity (%) (mean)
HFU1	LogFZI>0.8385	3.341	2.38
HFU2	0.8385>FZI>0.3591	2.245	4.11
HFU3	0.3591>FZI>-0.2964	3.71	10.2
HFU4	-0.2964>FZI>-0.3968	1.05	13.06
HFU5	-0.3968>FZI>-0.5596	0.811	15
HFU6	LogFZI<0.5596	0.205	13.5

## کتابنگاری

- آقازاده، ن.، رحیم‌پور، ح.، کدخدایی-ایلخچی، ع. و اسدی، ا.، ۱۳۸۸- تعیین گروه‌های سنگی با استفاده از مفهوم واحدهای جریانی و روش تحلیل خوشه‌ای: مطالعه موردی از سازند داریان، میدان پارس جنوبی، خلیج فارس، مجله علوم دانشگاه تهران، جلد ۳۵، شماره ۴، ۹۷-۱۰۹.
- آقانیاتی، ع.، ۱۳۸۹- زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۵۶۸.
- سفیداری، ا.، کدخدایی، ع. و شریفی، م.، ۱۳۹۲- مقایسه روش‌های شبکه عصبی خود سازنده و آنالیز خوشه‌ای برای ارزیابی مقدار کربن آلی در سازندهای محتوی هیدروکربن با استفاده از سیستم‌های هوشمند، مجله پژوهش نفت، شماره ۷۵، ۱۱۷-۱۳۰.
- قنوتی، ک. و حق‌پرست، ق.، ۱۳۸۶- مطالعه جامع مخزن بنگستان میدان منصوری- فاز تعیین مشخصات مخزن، گزارش شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، شماره ۶۰۳۵.

## References

- Abbaszadeh, M., Fujii, H. & Fujimoto, F., 1996- Permeability prediction by hydrolic flow units theory and applications. SPE Formation Evaluate, v.11, p. 263-271.
- Al-Ajmi, F. A. & Holditch, S. A., 2000- Permeability estimation using hydraulic flow units in a central Arabia reservoir. SPE paper no. 63254.
- Alavi, M., 2007- Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. American Journal of Science, v. 307, p. 1064-1095.
- Amaefule, J. O., Altunbay, M., Tiab, D., Kersey, D. G. & Keeland, D. K., 1993 -Enhanced reservoir description: using core and log data to identify hydraulic (flow) units and predict permeability in uncored intervals/wells. SPE Paper no. 26436, p. 1-16.
- Bachmann, M. & Hirsch, F., 2006- Lower Cretaceous carbonate platform of the eastern Levant (Galilee and the Golan Heights): stratigraphy and second-order sea-level change, Cretaceous Research, v. 27, p. 487-512.
- Carmen, P. C., 1937- Fluid flow through granular beds. Trans. AIChE, v. 15, p. 150-166.
- Dunham, R. J., 1962- Classification of carbonate rocks according to depositional texture. In: Ham, W. E. (Ed), Classification of carbonate rocks: American Association of Petroleum Geologists Memoir1, p. 108-121.
- Embry, A. F. & Klovan, J. E., 1971- A Late Devonian reef tract on northeastern Banks Island, Northwest Territories. Bulletin Canadian Petroleum Geology, v. 19, p. 730-781.
- Flugel, E., 2010- Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application. Springer Verlag, New York, 996 p.
- Ghabeishavi, A., Vaziri-Moghadam, H., Taheri, A. & Taati, F., 2010- Microfacies and depositional environment of the Cenomanian of the Bangestan anticline, SW Iran. Journal of Asian Earth Sciences, v. 37, p. 275-285.
- Heckel, P. H., 1972- Recognition of ancient shallow marine environment, In: Rigby, J. K. & Hemblin, K. (Eds.) Recognition Ancient Sedimentary Environments, SEPM, Special publication, v. 16, p. 226-286.
- Holland, M. S., 2006- Cluster analysis, Department of Geology, University of Georgia, Athens, GA 30602-2501 January.
- Hynes, J. D. & Mc Quillan, H., 1974- Evolution of the Zagros suture zone, southern Iran. Geological Society of American, Bulletin. v. 84, p. 739-744.
- James, G. A. & Wynd, G. G., 1965- Stratigraphic nomenclature of Iranian oil consortium agreement area. American Association Petroleum Geologists Bulletin, v. 49, No.12, p. 2182-2245.
- Kadkhodaie-Ilkhchi, A. & Amini, A., 2009- A Fuzzy logic approach to estimating hydraulic flow units from well log data: A case study from the Ahwaz oil field, South Iran. Journal of Petroleum Geology, v. 32, p. 67-78.
- Kozeny, J., 1927- UberkapillareLeitung des wassersimboden, stizurgsberichte, Royal Academy of Science, Vienna, Proc. Class 1, v. 136, p. 271-306.
- Loo, B. H. A., Tan, H. T. W., Kumar, P. P. & Saw, L. G., 2001- Intraspecific variation in licuala glabra griff. (Palmae) in Peninsular Malaysia—a morphometric analysis. Biological Journal of the Linnean Society, v. 72, p. 115-128.
- Lucia, F. J., 1995- Rock-fabric/petrophysical classification of carbonate pore space for reservoir characterization: American Association Petroleum Geologists Bulletin, v. 79, No.9, p. 1275 – 1300.
- Martin, A. J., Solomon, S. T. & Hartmam, D. J., 1997- Characterization of petrophysical flow units in carbonate reservoir. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, v. 81, p. 734-759.
- Matlab user's Guide, 2009- Statistical toolbox, Matlab CD-ROM. Mathworks, Inc.
- Rasplini, A., 1998- Microfacies analysis of shallow water carbonates and evidence of hierarchically: Aptian of Monte Tobenna, Southern Apennines, Italy. Cretaceous Research, v. 19, p. 197-223.
- Read, J. F., 1985- Carbonate platform facies models, American Association Petroleum Geologists Bulletin, v. 69, p. 1-21.
- Svirsky, D., Ryazanov, A., Pankov, M. & Poseysoev, A., 2004- Hydraulic flow units resolve reservoir description challenges in a Siberian oilfield. Presented at Asia Pacific Conf, Kuala Lumpur, Malaysia. Society of Peroleum Engineers, SPE 87056.
- Tucker, M. E. & Wright, V. P., 1990- Carbonate Sedimentology. Blackwell, Oxford, 482 p.
- Wilson, J. L., 1975- Carbonate Facies in Geologic History. Springer-Verlag, New York, N.Y., 471 p.