نشریه علمی–پژوهشی زمین شناسی نفت ایران
Iranian Journal of Petroleum Geology

سال یازدهم، شماره ۲۱، بهار و تابستان ۱۴۰۰ ص۱–۱۵
No. ۲۱, Spring & Summer, ۲۰۲۱, pp. ۱-۱۵

Dor: ۲۰,۱۰۰۱,۱,۲۲۵۱۸۷۳۸,۱۴۰۰,۱۱,۲۲,۱,۱

مدل‌سازی سه بعدی گونه‌های سنگی با استفاده از ادغام داده‌های مغزه، نگار و لرزه‌ای، مطالعه موردی یکی ازمخازن کربناته جنوب ایران

مهدی خیرالهی[۱]، گلناز جوزانی کهن[۲]، رضا محبیان[۳]*، علی مرادزاده[۴]

۱– کارشناسی ارشد مهندسی اکتشاف نفت، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه تهران، تهران، ایران

۲، ۳، ٤– استادیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشکدگان فنی دانشگاه تهران، دانشگاه تهران، تهران، ایران

*mohebian@ut.ac.ir

دریافت تیر ۱۴۰۱، پذیرش آبان ۱۴۰۱

چکیده

تعیین گونه‌های سنگی[۱]، فرآیند اختصاص خواص مخزن به رخساره‌های زمین‌شناسی است و یک گونه سنگی تعیین شده دارای خواص زمین‌شناسی و مخزنی مشابه و حدوداً یکسان است. امروزه روش‌های بسیار مختلفی برای تعیین گونه‌های سنگی پیشنهاد شده و توسعه یافته است. برخی از این روش‌ها عمدتاً بر جنبه‌های زمین‌شناسی (پتروگرافی) تأکید دارد که از آن جمله می‌توان به روش رخساره حفرات[۲] و روش لوسیا اشاره کرد که از ویژگی‌های سنگ‌شناسی در کنار تخلخل و تراوایی استفاده می‌کند. روش‌های پتروفیزیکی تعیین گونه‌های سنگی غالباً بر اساس داده‌های تخلخل و تراوایی (K/Ø) و فشار موئینگی (P_C) است. از ساده‌ترین این روش‌ها، نمودار تخلخل در مقابل تراوایی و تعیین حد برش[۳] است. از مهمترین و کاربردی‌ترین این روش‌ها، تعیین گونه‌های سنگی به روش شاخص منطقه جریان[٤] می‌باشد. همچنین معادلات مختلفی مانند وینلند–پیتمن ($R_{۳۵}$) و تابع جی–لورت در این زمینه وجود دارد که از روش‌های بسیار معتبر در تعیین گونه‌های سنگی می‌باشد. در این مطالعه، با استفاده از مهم‌ترین و کاراترین روش‌های تعیین گونه‌های سنگی اعم از روش‌های مبتنی بر تخلخل، شاخص منطقه جریان، شاخص تغییر یافته منطقه جریان، شاخص وینلند–پیتمن و لگاریتم‌های آنها و اعمال روش‌های مذکور بر روی داده‌های مغزه، نگار چاه و لرزه‌ای، به تعیین گونه‌های سنگی در سه بعد در کل میدان مورد بررسی پرداخته‌ایم و با مقایسه ضرایب همبستگی پی بردیم که روش شاخص منطقه جریان دارای بیشترین دقت و کارایی می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: تعیین گونه‌های سنگی، خواص مخزنی، شاخص منطقه جریان، داده‌های مغزه

---

[۱] Rock Typing
[۲] Pore Facies
[۳] Cut Off
[٤] Flow Zone Indicator(FZI)

۱- مقدمه

مخازن هیدروکربوری در محیط‌های رسوبی متفاوتی تشکیل شده و تحت فرآیندهای دیاژنزی متفاوتی قرار گرفته‌اند. همچنین به دلیل عواملی مانند ناهمگونی مخازن و فرآیندهای دیاژنتیکی متفاوت، تعیین پارامترهای مخزنی و یافتن رابطه بین تخلخل و تراوایی، امری دشوار می‌باشد [۱]. لذا، با استفاده از روش‌های گوناگون که در ادامه به بررسی و بیان هر کدام پرداخته خواهد شد، سعی بر دسته‌بندی این خواص پتروفیزیکی در گروه‌هایی مشابه، تحت عنوان گونه‌های سنگی، می‌گردد تا بتوان رفتار مخزن را مورد تحلیل و بررسی قرار داد. معیارهایی برای تعیین گونه‌های سنگی وجود دارد که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان، محیط رسوبی و دیاژنزی مشابه، توزیع یکسان اندازه دهانه حفرات[۵]، تراوایی نسبی و فشار موئینگی یکسان در یک نوع ترشوندگی و رابطه تخلخل-تراوایی مشابه را نام برد.

تعیین گونه‌های سنگی مخزنی فرآیندی است که به واسطه آن، رخساره‌های زمین‌شناسی بر اساس رفتارهای دینامیکی، بررسی و دسته‌بندی می‌شوند. گونه‌های سنگی مخزنی از عوامل مهم در تعیین خصوصیات مخزن بوده و تعیین آن‌ها یکی از چالش برانگیزترین امور در مخازن کربناته می‌باشد. عواملی همچون فرآیندهای دیاژنتیکی و رفتارهای بین سنگ و سیال باعث پیچیدگی ارتباط میان رخساره‌های زمین‌شناسی و گونه‌های سنگی مخزنی می‌گردد. لذا شناخت درست محیط رسوبی، فرآیندهای دیاژنزی و رفتار سنگ-سیال با استفاده از بررسی‌های آنالیز ویژه مغزه[۶]، می‌تواند بسیار کمک‌کننده باشد [۲]. در نتیجه، پژوهشگران زیادی به انجام این فرآیند و تعیین گونه‌های سنگی در مخازن مختلف پرداخته‌اند. به عنوان مثال، برای تعیین یکپارچه گونه‌های سنگی مخزنی، باید روندهایی جهت استخراج خصوصیات دینامیکی مخزن از داده‌های زیرسطحی مثل زمین‌شناسی، لرزه‌ای و در نتیجه داده‌های پتروفیزیکی به درستی طی شوند. لذا، کلرک و همکاران در سال ۲۰۰۹، برای بالابردن دقت مسیر کار، از یک مجموعه داده چندرشته‌ای[۷] در مخزن گازی خوفc در عربستان سعودی استفاده نمودند [۳]. مخرجی و همکاران نیز در سال ۲۰۱۸، با ترکیب و ادغام داده‌های مختلف از جمله واحدهای سنگ‌چینه‌شناسی[۸] حاصل از نگار، آنالیزهای رسوب‌شناسی[۹] بر روی مغزه، بررسی‌های کمی داده‌های نگار و به‌دست آوردن کانی‌شناسی، محتوای سیال و اشباع نمونه‌ها، تعیین رخساره‌های الکتریکی حاصل شده از داده‌های نگار و مغزه و در نهایت، آنالیزهای ویژه مغزه، به تعیین گونه‌های سنگی موجود در یک مخزن کربناته ژوراسیک در غرب کویت پرداختند [٤]. همچنین در سال ۲۰۲۰، الجواد و همکاران نیز با استفاده و ادغام روش‌های موجود، به تعیین گونه‌های سنگی و بررسی کیفیت مخزنی آن‌ها در یکی از مخازن کربناته جنوب عراق پرداختند [۵].

در سال ۲۰۱٤، اسکالینسکی و کنتر با تعیین گونه‌های سنگی ترکیبی و بر اساس روش‌های متداول موجود، نتایج مطلوبی را در دو میدان کربناته بزرگ مورد مطالعه به‌دست آوردند. تفاوت کار آن‌ها، چگونگی ادغام داده‌ها و روش‌ها با یکدیگر بود و در نهایت با اعتبارسنجی نتایج به وسیله مدل سه‌بعدی زمین‌شناسی، به صحت کار انجام شده پی برده شد [٦]. در ادامه، ساپوتلی و همکاران در سال ۲۰۱۹ با استفاده از نقشه‌های خودسازمانده[۱۰] و شبکه‌های عصبی مصنوعی[۱۱] یک روند انجام

---

[۵] Pore Throat Distribution
[۶] SCAL
[۷] multi-disciplinary dataset
[۸] Lithostratigraphical Units
[۹] Sedimentological Analysis
[۱۰] Self-Organized Maps (SOM)
[۱۱] Artificial Neural Networks (ANN)

کار بهینه جهت ادغام داده‌های مغزه و نگار برای به‌دست آوردن تراوایی و تعیین گونه‌های سنگی مخزنی در نظر گرفتند که توانایی پیش‌بینی خواص پتروفیزیکی مخزن به وسیله مدل مخزنی به‌دست آمده را به خوبی افزایش داد [۷].

شعبان‌نژاد و همکاران در سال ۲۰۱۱ با استفاده از روش‌های معمول تعیین گونه‌های سنگی مثل روش وینلند و تعیین واحدهای جریان با استفاده از نشانگرهای مناطق جریان، به بررسی یکی از مخازن کربناته گازی در ایران پرداختند [۸]. همچنین، علی‌اکبردوست و همکاران در سال ۲۰۱۳ با به‌کارگیری روش‌های مختلفی همچون استفاده از داده‌های SCAL (منحنی‌های فشار موئینگی و تراوایی نسبی)، خواص زمین‌شناسی (ساخت رسوبی، نوع تخلخل و محتوای سیمان) و برخی پارامترهای پتروفیزیکی مخزن مثل تخلخل و تراوایی، به تعیین گونه‌های سنگی مخزن کربناته مورد مطالعه پرداختند [۹]. حسین‌زاده و همکاران نیز در سال ۲۰۱۹ از نگار NMR و منحنی‌های تراوایی نسبی و فشار موئینگی به‌دست آمده از آن برای تعیین گونه‌های سنگی مخازن کربناته استفاده نمودند [۱۰].

محبیان و همکاران در سال ۲۰۱۷ توانستند با به‌کارگیری الگوریتم‌هایی مثل ANFIS و FCM در یک روند فازی[۱۲] جدید در کنار داده‌های چاه و نشانگرهای لرزه‌ای، تعیین مشخصات و دسته‌بندی مناسبی برای واحدهای جریان هیدرولیکی و گونه‌های سنگی در یکی از مخازن هیدروکربوری کربناته ایران انجام دهند [۱۱]. سپس، فرشی و همکاران در سال ۲۰۱۸ به تعیین گونه‌های سنگی مخزنی با استفاده از ترکیب مطالعات میکروسکوپی (ریزرخساره ها و فرآیندهای دیاژنزی) و پتروفیزیکی (رخساره‌های الکتریکی و وحدهای جریان هیدرولیکی) پرداختند [۱۲].

در سال ۲۰۱۸، میرزایی و همکاران دست به ابداع روشی جدید برای تعیین گونه‌های سنگی پتروفیزیکی در مخازن کربناته زدند. آن‌ها تعیین گونه‌های سنگی را به دو دسته کلی تعیین گونه‌های سنگی پتروفیزیکی استاتیک و دینامیک تقسیم نمودند [۱۳]. همچنین در سال ۲۰۱۹، میرزایی و همکاران به ادامه مطالعه در این زمینه پرداخته و پارامترهای معرفی شده را بهبود و توسعه دادند [۱٤]. در سال ۲۰۲۰ نیز، خادم و همکاران با ترکیب فیزیک سنگ و وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای در قالب یک روند انجام کار مدون، سعی بر تعیین گونه‌های سنگی و واحدهای جریان در یک میدان نفتی ماسه‌سنگی در حوضه خلیج فارس نمودند [۱۵].

با توجه به موضوع ذکر شده و مطالعات پیشین صورت گرفته در این زمینه، به عدم کارایی مشخصه‌های حاصله از هر بخش در سایر بخش‌های مطالعات مخزن پی می‌بریم. به عنوان مثال، نتایج حاصل از تعیین گونه‌های سنگی بر اساس داده‌های زمین‌شناسی در بسیاری از مطالعات تطابق و همخوانی مناسبی با نتایج مطالعات مخزنی ندارد چرا که روش‌های مورد استفاده هیچ همبستگی خاصی با یکدیگر ندارند. لذا در این پژوهش با طراحی گام به گام مراحل مطالعه به صورت زیر، سعی بر رفع ابهامات موجود و تعیین گونه‌های سنگی مخزن به صورتی که مورد اطمینان و قابل قبول در همه‌ی حوزه‌های مطالعاتی باشد، می‌نماییم. در ابتدا و با به کار گیری داده‌های مغزه و اعمال روش‌های مورد نظر، گونه‌های سنگی را در مخزن مورد مطالعه مشخص می‌نماییم. سپس روش‌ها را برای داده‌های نگار چاه نیز اعمال نموده و گونه‌های سنگی را تفکیک می‌کنیم. در ادامه، با وارد کردن نتایج و داده‌های لرزه‌ای در فرآیند ادغام و اعمال حد تفکیک گونه‌های سنگی به‌دست آمده از مراحل قبل، مدل سه بعدی گونه‌های سنگی را برای کل میدان مورد بررسی به دست می آوریم.

[۱۲] Fuzzy

۲- زمین‌شناسی میدان

میدان نفتی مورد مطالعه در بخش جنوبی ایران و شمال غربی خلیج فارس واقع شده است. این میدان در سال ۱۳۳۹ به وسیله شرکت سابق سیریپ[۱۳] با حفر چاه شماره‌ی یک کشف گردید. تعداد پنج مخزن هیدروکربنی شامل بخش ماسه سنگ اهواز (غار)، آسماری کربناته، سروک، کژدمی و فهلیان در این میدان دیده می‌شود. چاه شماره‌ی ده عمیق‌ترین چاه این میدان با عمق ٤٢٥٣ متر (١٣٩٥٤ پا) در یال غربی تا سازند گوتینا حفر گردید. تعداد ۱۰ حلقه چاه در این میدان حفاری گردیده است. ردیف‌های رسوبی موجود در میدان نفتی مورد مطالعه از بالا به پائین به قرار زیر می‌باشد:

رسوبات عهد حاضر، سازندهای بختیاری و آغاجاری، سازند میشان، سازند گچساران، بخش ماسه سنگی اهواز، سازند آسماری، سازند جهرم، سازند پابده، سازند گورپی، سازند ایلام، بخش لافان، سازند سروک، سازند کژدمی، سازند داریان، سازند گدون، سازند فهلیان (یاماما)، سازند گرو و سازند گوتنیا

۲-۱- زمین شناسی مخزن

میدان نفتی مورد مطالعه مشتمل بر پنج مخزن هیدروکربنی بوده که به ترتیب، ازدیاد عمق شامل مخزن آسماری (دو بخش ماسه سنگی (غار) و کربناته)، سروک، کژدمی (نهر امر) و فهلیان (یاماما) می‌باشد. تولید نفت از مخازن آسماری و سروک صورت می‌گیرد. تولید نفت از مخزن فهلیان برای مدت محدودی انجام گرفته، ولی بدلیل افت شدید فشار تولید از این مخزن ادامه نیافته است.

۲-۲- مشخصات سنگهای مخازن

سنگ‌های مخازن بخش ماسه سنگ اهواز (غار) و کژدمی (نهر امر)، عمدتا از جنس ماسه سنگ و بقیه مخازن از جنس سنگ‌های کربناته (دولومیت و آهک) می‌باشد. سنگ مخزن آسماری کربناته و سروک بیشتر از جنس دولومیت بوده و تخلخل زمینه[١٤] و حفره‌ای میکروسکوپی[١٥] نقش اساسی را در تولید ایفا می‌کند.

بیش‌ترین تخلخل براساس تفاسیر پتروفیزیکی در ماسه سنگ اهواز (غار) دیده می‌شود و کربنات‌های مخزن فهلیان (یاماما) دارای کمترین تخلخل می‌باشد. مطالعه نتایج آزمایشات بر روی مغزه‌ها و نتایج تفاسیر پتروفیزیکی نشان می‌دهد که مقادیر تخلخل و درصد اشباع آب در سنگ‌های مخازن بسیار متغیر است.

مساحت میدان تحت بررسی ۳۵ کیلومتر مربع می‌باشد (به عرض ۵ و به طول ۷ کیلومتر). این میدان مانند بیشتر میادین حوزه خلیج فارس ازیک تاقدیس نامتقارن که احتمالا از روند ساختمان‌های زاگرس تبعیت می‌کند تشکیل شده است . در این میدان جمعا ۱۰ حلقه چاه حفر شده است که اکثرا از مخزن آسماری بهره‌برداری می‌شود. چاه شماره‌ی ۱۰ این میدان به دلیل تولید گاز زیاد، متروک گردیده است. این میدان در دو افق دارای نفت اقتصادی می‌باشد. یکی مخزن غار-آسماری و دیگری مخزن سروک. بر خلاف نواحی خشکی در حوضه زاگرس طبق مطالعات انجام شده، سازند آسماری در این حوضه از تراوائی و تخلخل اولیه نسبتا خوبی برخوردار است.

---

[١٣] SIRIP

[١٤] matrix porosity

[١٥] microvugular porosity

۳- مواد و روش‌ها

در این مطالعه، علاوه بر داده‌های حاصل از آنالیزهای معمول و ویژه مغزه، از داده‌های نگار چاه‌ها نیز در عمق مخزنی میدان مورد مطالعه جهت تعیین و تفکیک گونه‌های سنگی استفاده شده است. علاوه بر داده‌های مذکور، داده‌های حاصل از برداشت لرزه‌ای در این میدان در دسترس بوده و جهت پیش‌بینی گونه‌های سنگی مختلف در سه بعد مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین از روش‌های رایج و کارآمد تعیین گونه‌های سنگی از جمله تفکیک بر اساس تخلخل، شاخص منطقه جریان و شاخص وینلند-پیتمن، شاخص تغییر یافته منطقه جریان، لگاریتم شاخص منطقه جریان و لگاریتم شاخص تغییر یافته منطقه جریان در این پژوهش استفاده شده است. پس از به کار گیری روش‌های ذکر شده و تعیین گونه‌های سنگی در محل چاه‌ها، با اعمال وارون‌سازی و ادغام، نتایج را در سه بعد و در کل میدان تخمین می‌زنیم. این مسیر و روند کار پیشنهادی در این مطالعه همان گونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، نتایجی حاصل می‌نماید که در بررسی‌های زمین‌شناسی، پتروفیزیکی و مخزنی میدان، مورد قبول و دارای همخوانی مناسب می‌باشد.

۳-۱- روش تفکیک بر اساس تخلخل

جهت اعمال روش مبتنی بر داده‌های تخلخل، چه بر اساس داده‌های حاصل از آنالیز مغزه و چه داده‌های نگار چاه، ابتدا به ترسیم نمودار تجمعی داده‌ها می‌پردازیم. سپس با مشخص نمودن نقاط شکستگی و تغییر شیب در این نمودار، به حدود برش میان گونه‌های سنگی مختلف پی خواهیم برد. لازم به ذکر است که روش آماری تعیین حدود برش بر اساس تغییر شیب نمودار تجمعی برای تمامی پارامترها در روش‌های مورد استفاده به کار گرفته می‌شود.

۳-۲- شاخص منطقه جریان

شاخص منطقه جریان معیاری جهت توصیف واحدهای جریان هیدرولیکی در مخزن می‌باشد که با توجه به شاخص کیفیت مخزنی[۱۶] و تخلخل موثر[۱۷] و به صورت زیر محاسبه می‌شود:

رابطه۱:
$$FZI = \frac{RQI}{\emptyset z}$$

تخلخل موثر و شاخص کیفیت مخزنی نیز خود از روابط زیر به‌دست می‌آیند:

رابطه۲:
$$\emptyset z = \frac{\emptyset}{۱ - \emptyset}$$

رابطه۳:
$$RQI = ۰.۰۳۱٤\sqrt{\frac{K}{\emptyset}}$$

که در آن‌ها، K تراوایی بر اساس میلی دارسی و Ø نشان‌دهنده تخلخل کسری است. در واحد با محاسبه شاخص منطقه جریان در این پژوهش و اعمال روش آماری مذکور، به تعیین گونه‌های سنگی بر اساس این پارامتر پرداخته شده است.

[۱۶] Rock Quality Index(RQI)
[۱۷] $\emptyset z$

۳-۳- شاخص وینلند-پیتمن

وینلند یک رابطه تجربی بر اساس آزمایشی که طراحی کرده بود بین تخلخل و تراوایی و اندازه دهانه حفرات در اشباع‌های متفاوت جیوه برای یک مجموعه ترکیبی از ماسه سنگ و کربناته به‌دست آورد که با بررسی رگرسیون، بهترین همبستگی برای اشباع ۳۵ درصدی جیوه تعیین شد. معادله وینلند به شرح زیر است:

رابطه٤: $$Log(R_{۳۵}) = ۰.۷۳۲ + ۰.۵۸۸ \times Log(K) - ۰.۸٦٤ \times Log(\emptyset)$$

در ادامه، پیتمن به ادامه بررسی و بهبود معادله‌ی تجربی وینلند پرداخت و معادلات دیگری نیز ارائه نمود که در مخازن ماسه سنگی کاربرد و کارایی بیشتری دارند. پس از تعیین مقادیر شاخص وینلند-پیتمن بر اساس داده‌های مختلف در دسترس، تعیین گونه‌های سنگی دارای مقادیر مشابه و نزدیک به هم این شاخص انجام شده است.

۳-٤- شاخص تغییر یافته‌ی منطقه جریان

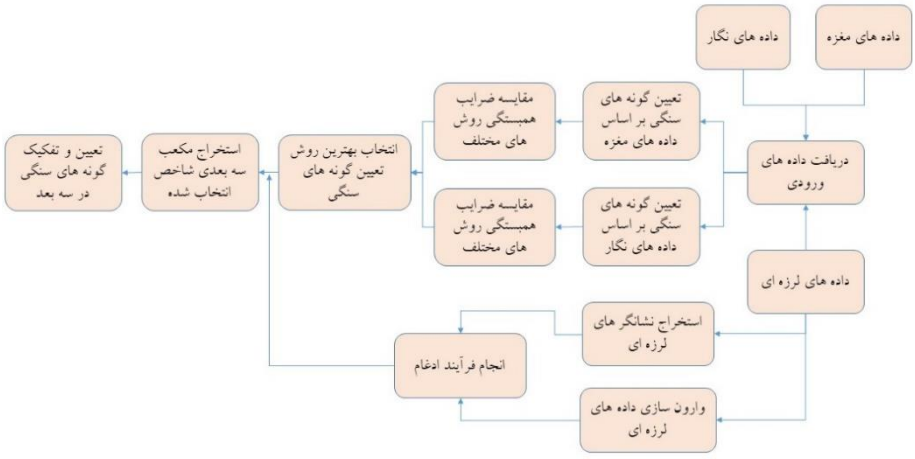
نتایج حاصل از مطالعات میرزایی پیامان و همکاران (۲۰۱۸) به تعریف پارامتری جدید برای تعیین گونه‌های سنگی انجامید که شاخص تغییر یافته منطقه جریان نامیده شده و از طریق رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

رابطه۵: $$FZI^* = ۰.۰۳۱٤\sqrt{\frac{K}{\emptyset}}$$

که K تراوایی در واحد میلی دارسی و Ø تخلخل کسری است. برای اعمال این روش، ابتدا مقادیر این شاخص را با استفاده از داده‌های موجود محاسبه کرده و با در نظر گرفتن نمودار تجمعی و تعیین حدود برش، گونه‌های سنگی موجود در میدان مورد مطالعه را تفکیک می‌نماییم.

۳-۵- روش‌های لگاریتم شاخص منطقه جریان و شاخص تغییر یافته‌ی منطقه جریان

در بررسی و به کار گیری این روش‌ها، پس از محاسبه مقادیر شاخص منطقه جریان و شاخص تغییر یافته‌ی منطقه جریان، عملگر لگاریتم را بر این مقادیر اعمال نموده تا پارامترهای جدید جهت به کار گیری در فرآیند تفکیک گونه‌های سنگی حاصل شود. در نتیجه، روش آماری مورد استفاده را برای این پارامترها نیز اعمال نموده و به تعیین و تفکیک گونه‌های سنگی موجود در میدان تحت بررسی می‌پردازیم.



شکل۱- مراحل انجام پژوهش

٤- نتایج و بحث

تعیین گونه‌های سنگی در لایه‌های دارای هیدروکربن، به ویژه مخازن کربناته، همیشه یک مسئله چالش برانگیز بوده است زیرا هیچ رویکرد جهانی دقیقی برای تعیین گونه‌های سنگی در مخزن وجود ندارد، و محدودیت داده‌ها در هر میدان هیدروکربنی دشواری‌هایی در استفاده از روش‌های استاندارد تعیین گونه‌های سنگی به وجود می‌آورد اما بدیهی است که با ادغام داده‌های مغزه، نگار چاه و لرزه‌ای می‌توان به نتایج بسیار مطلوبی دست یافت. لذا، با استفاده از روش‌های گوناگون که در ادامه به بررسی و بیان هر کدام پرداخته خواهد شد، سعی بر دسته‌بندی خواص پتروفیزیکی در گروه‌هایی مشابه، تحت عنوان گونه‌های سنگی، می‌گردد تا بتوان رفتار مخزن را مورد تحلیل و بررسی قرار داد. در ادامه، مهم‌ترین و کاراترین روش‌ها جهت تعیین گونه‌های سنگی در این پژوهش مورد استفاده و تحلیل قرار گرفته است. از میان چاه‌های مورد مطالعه در این پژوهش، دو چاه شماره یک و پنج دارای داده‌های حاصل از آنالیز معمول و ویژه مغزه می‌باشند. لذا با به کار گیری روش‌های رایج مطرح شده در بخش پیشین، به بررسی و تعیین گونه‌های سنگی مختلف در این چاه‌ها خواهیم پرداخت.

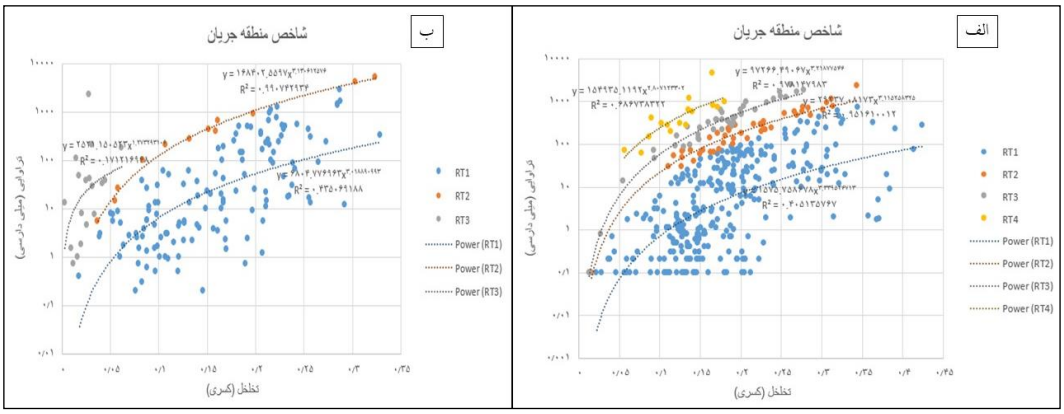
٤-١- تعیین گونه‌های سنگی بر اساس داده‌های حاصل از آنالیزهای مغزه در چاه‌های شماره یک و پنج

ابتدا با توجه به داده‌های موجود از آنالیز مغزه در چاه شماره یک و پنج، از روش‌های تعیین تخلخل، شاخص منطقه جریان، روش وینلند-پیتمن، شاخص تغییر یافته منطقه جریان (FZI*)، لگاریتم شاخص منطقه جریان و لگاریتم شاخص تغییر یافته منطقه جریان استفاده نموده تا گونه‌های سنگی موجود در چاه‌ها را تعیین و تفکیک نماییم. روش آماری مورد استفاده در این بخش، رایج‌ترین روش در تعیین گونه‌های سنگی یعنی تغییر در شیب نمودار تجمعی پارامتر مورد بررسی می‌باشد. پس در ابتدای بررسی هر پارامتر، نمودار تجمعی آن پارامتر را رسم نموده و نقاط تغییر شیب را مشخص می‌نماییم. این نقاط به‌دست آمده، نشان دهنده مقادیر حد واسط بین گونه‌های سنگی مختلف می‌باشد. در نتیجه، بر اساس این حد برش‌ها، نمودارهای تخلخل در مقابل تراوایی را برای روش‌های مختلف مورد استفاده رسم نموده و گونه‌های سنگی متمایز از هم را نمایش می‌دهیم. پس از انجام تمامی مراحل مورد نیاز جهت تعیین و تفکیک گونه‌های سنگی بر اساس داده‌های حاصل از آنالیز مغزه، ضرایب همبستگی هر روش که نشان دهنده‌ی دقت و صحت گونه‌های سنگی تفکیک شده می‌باشد، در جدول زیر نشان داده شده است.

جدول ١- مقادیر ضرایب همبستگی مربوط به هر روش تعیین گونه‌های سنگی بر اساس داده‌های مغزه برای چاه‌های شماره یک و پنج

روش مورد استفاده	ضریب همبستگی در چاه شماره یک (٪)	ضریب همبستگی در چاه شماره پنج (٪)
شاخص منطقه جریان	٧٥/٥٤	٦٣/٢٣
شاخص وینلند-پیتمن	٥٧/٠٥	٦١/٢٧
شاخص تغییر یافته منطقه جریان	٣٣/٤٦	٤٣/٢٨
لگاریتم شاخص منطقه جریان	٦٨/٦٠	٥٩/٠١
لگاریتم شاخص تغییر یافته منطقه جریان	٤٣/٤١	٥٥/٤٦

با مقایسه مقادیر ضرایب همبستگی مربوط به هر روش متوجه می‌شویم که کاراترین روش جهت تعیین گونه‌های سنگی بر اساس داده‌های حاصل از آنالیز مغزه، روش شاخص منطقه جریان می‌باشد. از این رو، نتایج چگونگی تفکیک گونه‌های سنگی در چاه‌های شماره یک و پنج در شکل ۲ نشان داده شده است.



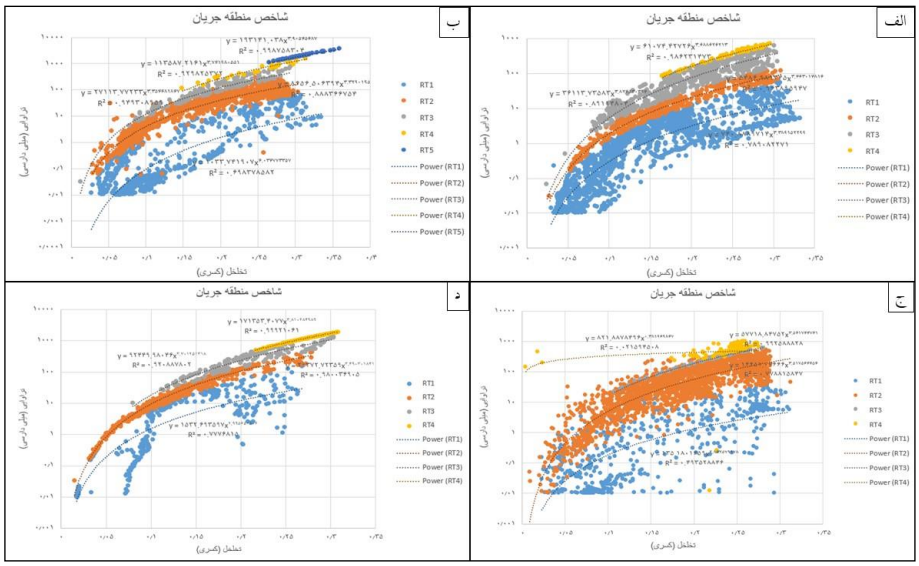
شکل۲-الف) شاخص منطقه جریان در چاه شماره یک، ب) شاخص منطقه جریان در چاه شماره پنج

٤-۲- تعیین گونه‌های سنگی بر اساس داده‌های نگار در چاه‌های شماره یک، پنج، شش و ده

حال که تعیین گونه‌های سنگی بر اساس داده‌های حاصل از آنالیز مغزه‌های موجود از چاه‌های شماره یک و پنج صورت پذیرفت، می‌توان روش‌های موجود و مورد استفاده جهت تعیین گونه‌های سنگی در این مطالعه را بر روی داده‌های حاصل از نگار چاه‌های موجود در میدان مورد پژوهش، اعمال نمود. با توجه به مقادیر ضرایب همبستگی به‌دست آمده، در می‌یابیم که بهترین و بادقت‌ترین روش جهت تعیین گونه‌های سنگی در این میدان و بر اساس داده‌های مغزه، روش شاخص منطقه جریان است. در ادامه و در جدول زیر، نتایج به کار گیری روش‌های ذکر شده بر روی داده‌های نگار چاه‌های مختلف به صورت ضرایب همبستگی هر کدام از روش‌ها ذکر شده است. با توجه به این که با استفاده از داده‌های نگار چاه‌ها نیز روش شاخص منطقه جریان بهترین عملکرد را از خود نشان می‌دهد، شکل ۳ نتایج استفاده از این روش را برای چاه‌های مختلف و چگونگی تعیین و تفکیک گونه‌های سنگی را نشان می‌دهد.

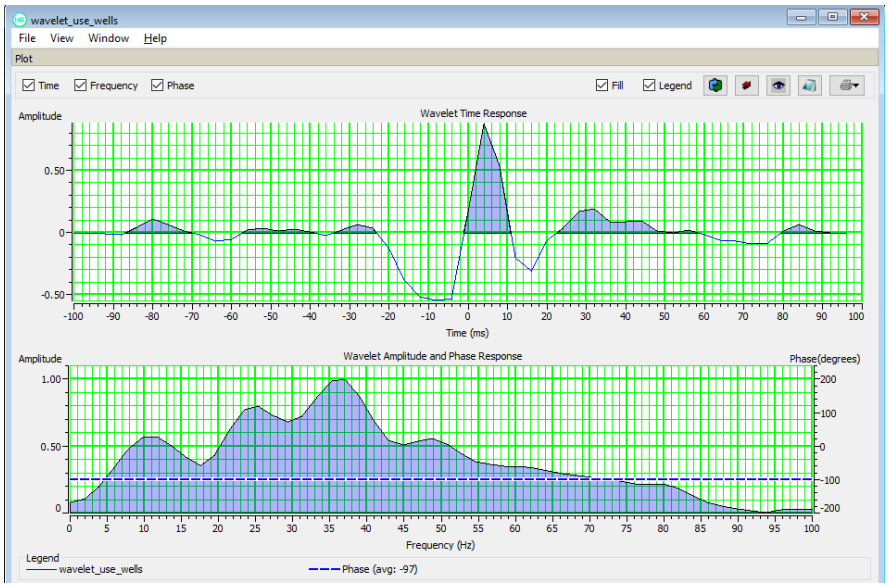
جدول۲- ضرایب همبستگی مربوط به هر روش تعیین گونه‌های سنگی بر اساس داده‌های نگار برای چاه‌های شماره یک، پنج، شش و ده

روش مورد استفاده	ضریب همبستگی در چاه شماره یک (٪)	ضریب همبستگی در چاه شماره پنج (٪)	ضریب همبستگی در چاه شماره شش (٪)	ضریب همبستگی در چاه شماره ده (٪)
شاخص منطقه جریان	۹۰/۷۵	۸۹/۲۹	۸۷/۱٦	۹۱/۹٤
شاخص وینلند-پیتمن	۵۷/۱۲	۷٦/۱۵	٤۰/۷۲	۷۹/۵٦
شاخص تغییر یافته منطقه جریان	۳۹/٦۰	۵٦/۱۰	۳۱/۵۰	٦٦/۰۹
لگاریتم شاخص منطقه جریان	۸۸/۸٤	۸۵/۲۸	۸۹/۰٦	۹۰/۲۱
لگاریتم شاخص تغییر یافته منطقه جریان	۳۳/۵۱	۵۰/۳۱	۳۲/۵۷	٦۵/۷۷



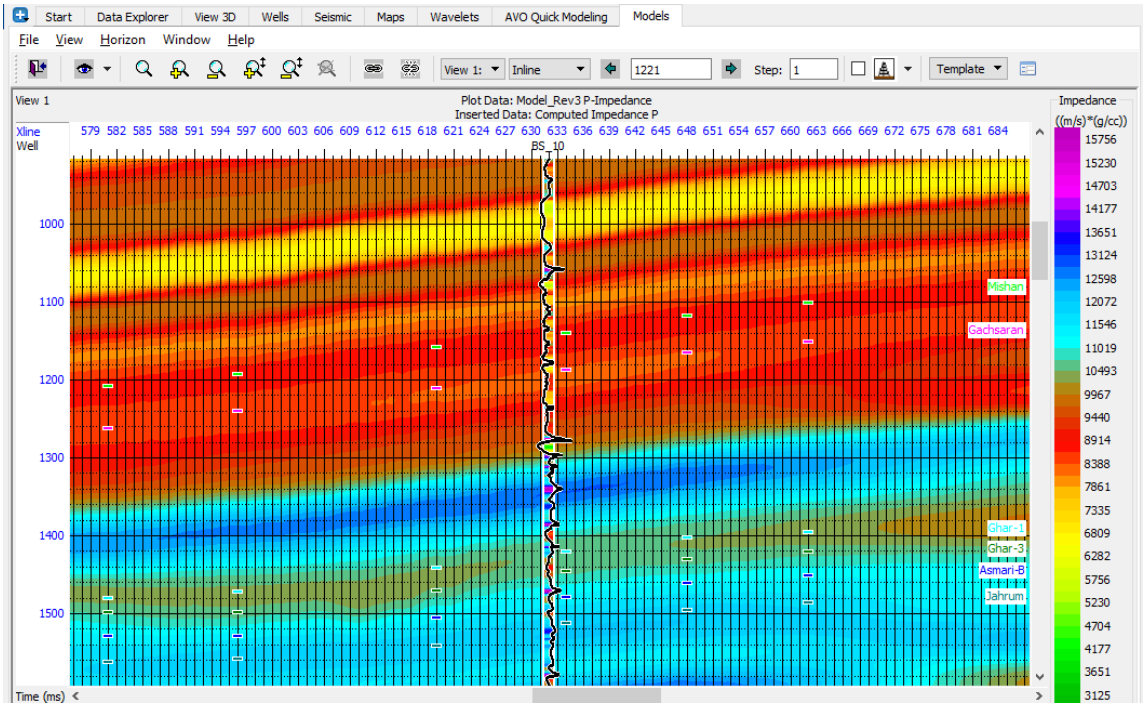
شکل۳- الف) چهار گونه سنگی موجود در چاه شماره یک، ب) پنج گونه سنگی موجود در چاه شماره پنج، ج) چهار گونه سنگی موجود در چاه شماره شش، د) چهار گونه سنگی موجود در چاه شماره ده بر اساس روش شاخص منطقه جریان

پس از تعیین گونه‌های سنگی بر اساس داده‌های مغزه و نگار چاه‌ها، و در اولین گام به منظور تعیین گونه‌های سنگی موجود در کل میدان و در سه بعد، داده‌هایی از قبیل نگارهای چاه‌ها، داده‌ی لرزه‌ای و افق‌های تفسیر شده موجود در میدان را به کار گرفته تا فرآیند وارون سازی پس از بر انبارش را انجام داده و مکعب سه بعدی امپدانس صوتی را برای میدان مورد مطالعه به‌دست آوریم. هنگام ساخت مدل اولیه برای وارون سازی، از افق‌ها برای درون‌یابی بین چاه‌ها استفاده می‌کنیم و در ادامه نیز به یک موجک استخراج شده‌ی میانگین از چاه‌ها نیاز داریم لذا موجک را استخراج کرده که فاز متوسط ۹۷- درجه را نشان می‌دهد و در شکل زیر نشان داده شده است. پس از استفاده از این موجک میانگین استخراج شده، همبستگی متقاطع بین لرزه نگاشت مصنوعی و نگار مرکب به مقدار ۷۱٪ می‌رسد.



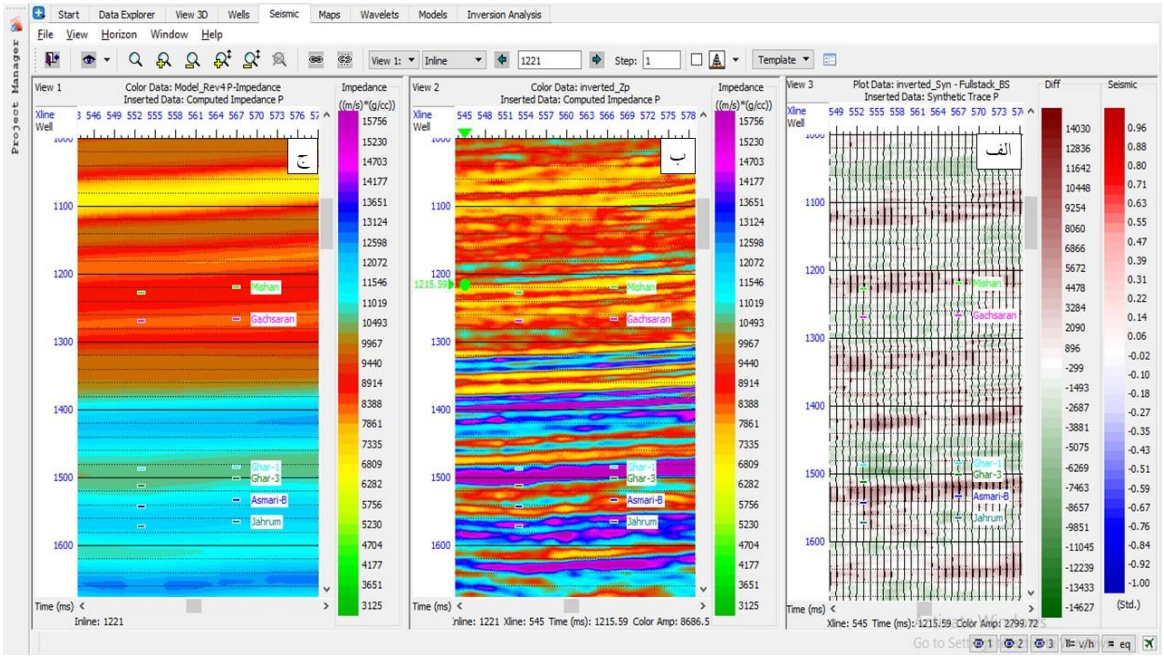
شکل ٤- موجک میانگین استخراج شده از چاه‌ها

با استفاده از موجک میانگین استخراج شده و پس از درون‌یابی منحنی‌های نگار چاه، یک فیلتر فرکانس پایین‌گذر اعمال می‌شود که به طور پیش فرض تمام فرکانس‌ها را تا ۱۰ هرتز عبور داده، تمام فرکانس‌های بالای ۱۵ هرتز را فیلتر کرده و فیلتر را بین این محدوده‌ها درون‌یابی می‌کند. در نتیجه، مدل اولیه محاسبه شده به صورت شکل زیر نمایش داده می‌شود.



شکل۵- مدل اولیه محاسبه شده با استفاده از موجک میانگین استخراج شده از تمامی چاه‌های موجود

شکل زیر نیز داده‌ی امپدانس صوتی را در کنار مدل اولیه‌ی محاسبه شده و داده‌ی لرزه‌ای برداشت شده در میدان مورد مطالعه نشان می‌دهد.

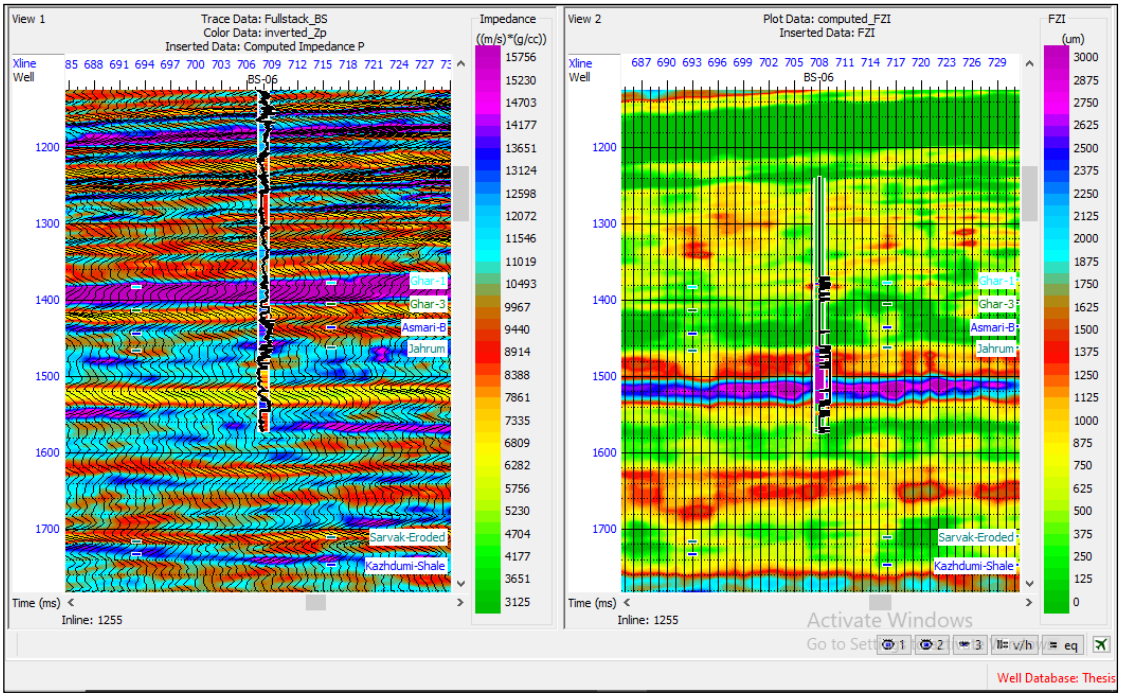


شکل٦- الف) داده‌ی لرزه‌ای میدان تحت بررسی، ب) امپدانس صوتی به‌دست آمده، ج) مدل اولیه محاسبه شده

با توجه به همخوانی خوب و قابل قبول نتایج وارون‌سازی با داده‌های لرزه‌ای موجود در محل چاه‌ها که در شکل‌های فوق نشان داده شده است، به صحت و درستی فرآیند وارون سازی انجام شده پی می‌بریم. در نتیجه و پس از اتمام فرآیند وارون سازی، اکنون می‌توانیم به انجام فرآیند ادغام جهت ایجاد و پیش‌بینی نگار ویژگی‌های مورد نظر و در نهایت ایجاد آن‌ها در سه بعد بپردازیم.

٤-٣- انجام فرآیند ادغام[١٨]

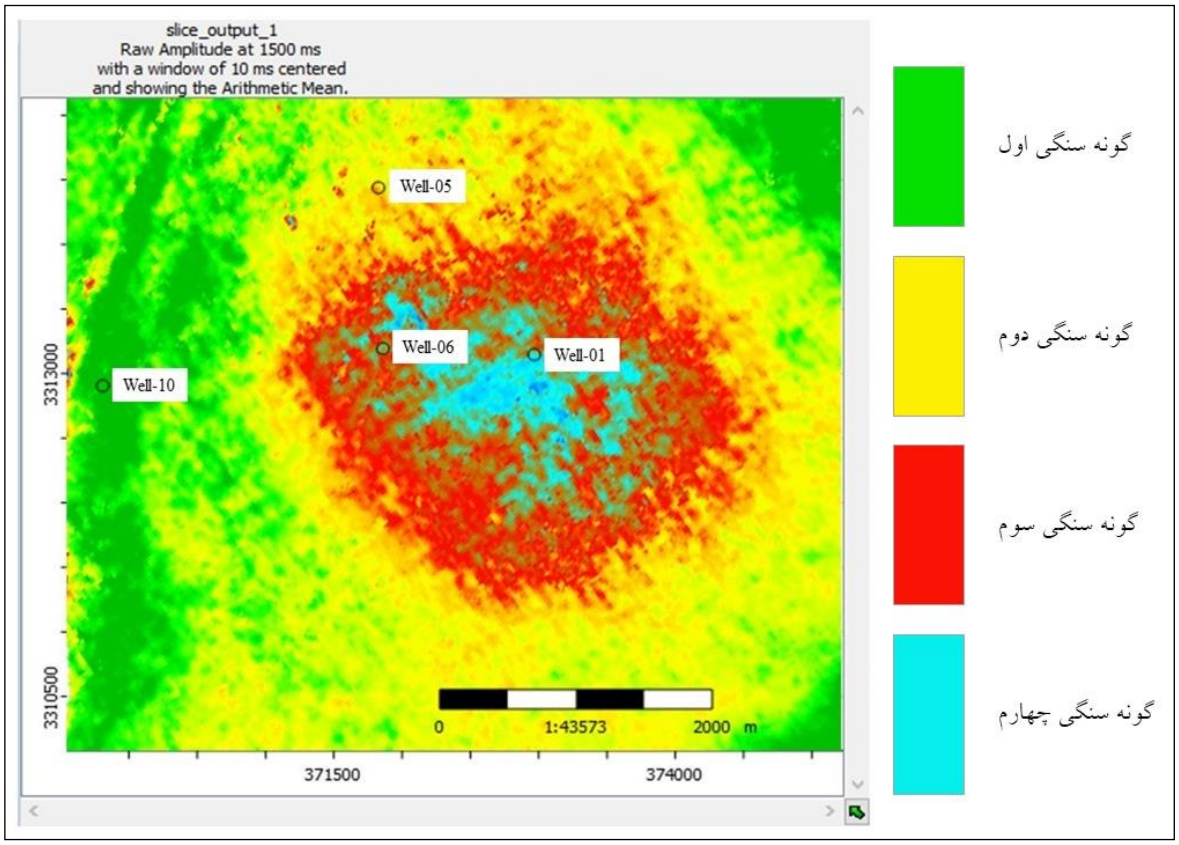
ادغام فرآیندی است که هدف آن ادغام نگارهای چاه و داده‌های لرزه‌ای است. هدف کلی این است که یک ویژگی نمودار چاه را با استفاده از نشان‌گرهای داده‌های لرزه‌ای پیش‌بینی کنیم. این ویژگی ممکن است هر نوع نگار اندازه‌گیری شده مانند سرعت یا تخلخل بوده، یا حتی ممکن است یک ویژگی سنگ‌شناسی مشتق شده مانند حجم شیل و یا واحدهای جریان باشد. پس از بارگذاری داده‌های مورد نیاز از جمله داده لرزه‌ای، نتیجه وارون‌سازی (مکعب امپدانس صوتی)، چاه‌ها و ...، برای انجام فرآیند ادغام آماده هستیم. این تحلیل در دو مرحله انجام می‌شود. در مرحله اول، مرحله آموزش[١٩]، نگار هدف و داده‌های لرزه‌ای را در مکان‌های چاه تجزیه و تحلیل می‌شود تا یک رابطه آماری بین آنها بدست بیاید. در مرحله دوم، که همان مرحله کاربرد است، رابطه مشتق شده را به کل حجم اعمال می‌کنیم تا مقادیر نگار را در سراسر آن حجم ایجاد نماییم. در این پژوهش و با توجه به پارامترهای موردنظر جهت تعیین گونه‌های سنگی، به استخراج مکعب تخلخل، شاخص منطقه جریان، شاخص وینلند-پیتمن، شاخص تغییر یافته منطقه جریان، لگاریتم شاخص منطقه جریان و لگاریتم شاخص تغییر یافته منطقه جریان می‌پردازیم. با توجه به این که روش مبتنی بر شاخص منطقه جریان در بخش‌های قبل نتایج بهتری از خود نشان داد، در ادامه، نتیجه‌ی پیش‌بینی این شاخص در سه بعد به صورت شکل زیر نشان داده می‌شود.



شکل ٧- شاخص منطقه جریان به‌دست آمده در سه بعد در کنار داده‌ی لرزه‌ای و نتیجه‌ی وارون سازی

[١٨] Emerge
[١٩] training

نمایش نهایی که با این داده‌ها ایجاد خواهیم کرد، یک برش داده از زمان[۲۰] مورد علاقه است. برش داده را در یک زمان ۱۵۰۰ میلی‌ثانیه که نزدیک به منطقه هدف است اعمال می‌کنیم. در حوالی آن زمان، نمونه‌ها را در یک پنجره ۱۰ میلی‌ثانیه به طور میانگین می‌گیریم. پس از تکمیل مراحل، برش داده‌ی ایجاد شده به صورت زیر نمایان می‌شود:

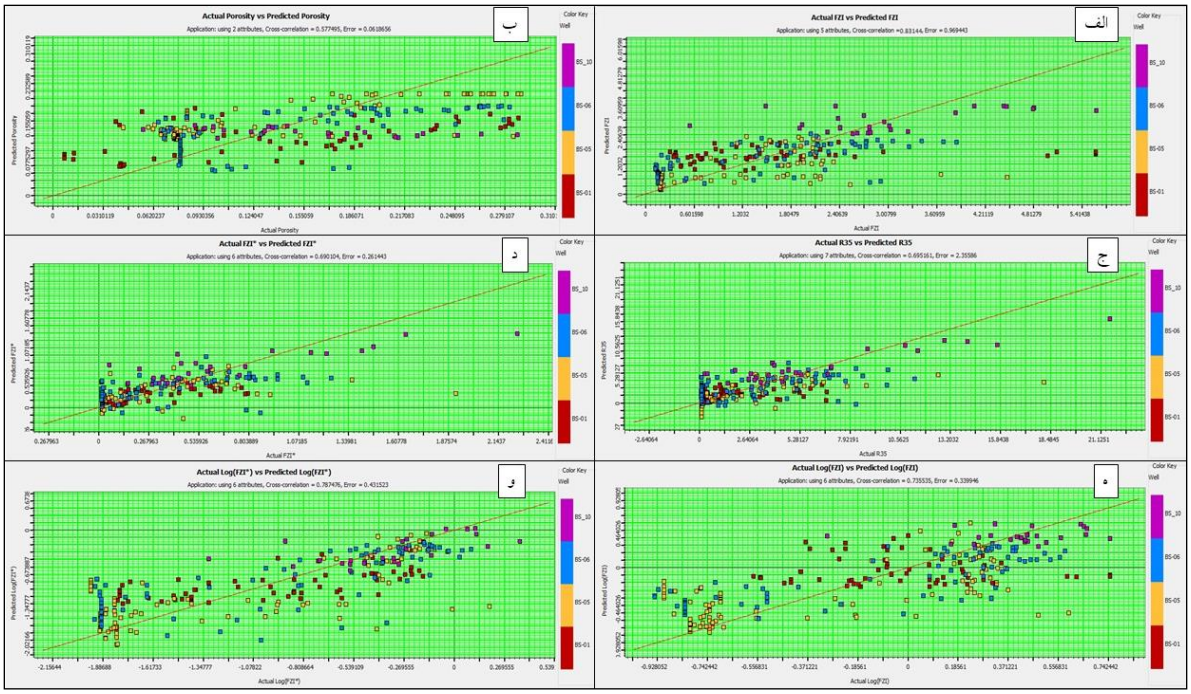


شکل ۸- برش زمانی در زمان ۱۵۰۰ میلی‌ثانیه از نتیجه‌ی شاخص منطقه جریان محاسبه شده در سه بعد و گونه‌های سنگی تفکیک شده

با توجه به شکل فوق که نشان دهنده پراکندگی شاخص منطقه جریان می‌باشد، می‌توان دریافت که گونه‌های سنگی در کل مخزن و با استفاده از روش مبتنی بر شاخص منطقه جریان، به خوبی و به وسیله‌ی رنگ‌های مختلف، از هم تفکیک شده‌اند به این صورت که رنگ‌های مشابه نشان دهنده شاخص‌های منطقه جریان مربوط به یک گونه سنگی می‌باشند.

تمامی مراحل فوق برای سایر روش‌های تعیین گونه سنگی مورد استفاده در این پژوهش انجام گردیده است و اعتبار سنجی نتایج هر کدام از روش‌ها به صورت نمودار متقاطع در شکل‌های زیر نمایش داده شده است.

[۲۰] time slice



شکل ۹-نمودارهای متقاطع و مقادیر ضرایب همبستگی برای الف) روش‌های شاخص منطقه جریان، ب) تفکیک تخلخل، ج) شاخص وینلند-پیتمن، د) شاخص تغییر یافته منطقه جریان، ه) لگاریتم شاخص منطقه جریان و و) لگاریتم شاخص تغییر یافته منطقه جریان

با توجه به نمودارهای متقاطع به‌دست آمده برای هر روش که مقدار پیش‌بینی شده را در مقابل مقدار داده‌ی واقعی نشان می‌دهد، مقادیر ضرایب همبستگی برای روش‌های شاخص منطقه جریان، تفکیک تخلخل، شاخص وینلند-پیتمن، شاخص تغییر یافته منطقه جریان، لگاریتم شاخص منطقه جریان و لگاریتم شاخص تغییر یافته منطقه جریان به ترتیب بیش از ۸۳٪، ۵۷٪، ۷۰٪، ۷۰٪، ۷۳٪ و ۷۸٪ می‌باشد. در نتیجه درمی‌یابیم که دقیق‌ترین روش برای تعیین گونه‌های سنگی در سه بعد و در کل میدان مورد مطالعه، روش شاخص منطقه جریان می‌باشد.

۵- نتیجه‌گیری

با توجه به نتایج به‌دست آمده از اعمال روش‌های گوناگون مطرح شده در این پژوهش جهت تعیین گونه‌های سنگی در میدان مورد مطالعه، نتایج زیر حاصل می‌شود:

-بهترین و کاراترین روش تعیین گونه‌های سنگی در میدان مورد مطالعه، روش شاخص منطقه جریان می‌باشد. این مسئله با توجه به میزان ضرایب همبستگی این روش در چاه‌های مختلف و با در نظر گرفتن داده‌های مختلف مانند داده‌های حاصل از آنالیز مغزه‌ها و داده‌های نگار چاه مشخص می‌گردد.

-به کار گیری روش‌های پیچیده‌تر مانند شاخص تغییر یافته منطقه جریان و همچنین اعمال عمل‌گرهایی همچون لگاریتم جهت بالا بردن دقت و کیفیت تفکیک گونه‌های سنگی در این میدان موثر نبوده و میزان ضرایب همبستگی را نسبت به روش شاخص منطقه جریان افزایش نداد.

-پس از انجام فرآیند ادغام و به‌دست آوردن مکعب پارامترهای مد نظر در سه بعد و در کل میدان مورد مطالعه همچون تخلخل، شاخص منطقه جریان، شاخص وینلند-پیتمن، شاخص تغییر یافته منطقه جریان و لگاریتم‌های آن‌ها، جهت مقایسه و بررسی دقت پیش‌بینی، نمودارهای متقاطع مقادیر تخمین زده شده هر پارامتر را در مقابل داده‌ی واقعی رسم نموده و در این سطح نیز به کارا بودن و داشتن بیشترین دقت روش شاخص منطقه جریان پی بردیم.

-با توجه به نتایج حاصل از اعمال روش‌های تعیین گونه‌های سنگی در میدان مورد مطالعه و با استفاده از داده‌های مغزه و نگار چاه در چاه‌های مختلف به این نتیجه رسیدیم که به طور معمول چهار الی پنج گونه‌ی سنگی قابل تفکیک در این میدان وجود دارد.

-با توجه به شکل مکعب نهایی حاصل شده در کل میدان مورد مطالعه و بر اساس روش شاخص منطقه جریان می‌توان به وجود حدودی چهار الی پنج گونه‌ی سنگی مختلف که هر کدام با یک طیف رنگی منحصر به فرد در شکل نهایی نشان داده شده است، پی برد.

-نتایج حاصل از فرآیند ادغام که نشان دهنده‌ی مکعب تخمین زده شده برای هر پارامتر مورد نظر و بر اساس روش‌های گوناگون مورد استفاده در این مطالعه است، تطابق بسیار خوبی با نتایج حاصل از اعمال روش‌های تعیین گونه‌های سنگی بر داده‌های مغزه و نگار چاه دارد که نشان دهنده‌ی درستی و دقت بالای نتایج حاصل از این پژوهش در سه بعد و در مقیاس بزرگ دارد.

سپاس و قدردانی

از داوران مقاله آقایان دکتر علی رضا بشری (هیئت علمی بازنشسته دانشگاه تهران) و دکتر محمد مختاری (دانشیار پژوهشکده زلزله شناسی) تشکر و قدردانی می‌گردد.

منابع

[۱] KADKHODAIE, A., and KADKHODAIE, R., ۲۰۱۸, A Review of Reservoir Rock Typing Methods in Carbonate Reservoirs: Relation between Geological, Seismic, and Reservoir Rock Types, Pet. Eng. Iran. *J. Oil Gas Sci. Technol.*, **۷(٤)**, ۱۳–۳۵.

[۲] BIZE-FOREST, N., BAINES, V., BOYD, A., MOSS, A., and OLIVEIRA, R., ۲۰۱٤, Carbonate Reservoir Rock Typing and the Link between Routine Core Analysis and Special Core Analysis, *International Symposium of the Society of Core Analysts*, Avignon, France, ۸-۱۱.

[۳] CLERKE, E. A., and ARAMCO, S., ۲۰۰۹, Electrofacies and Geological Facies for Petrophysical Rock Typing: Khuff C, *SPE Saudi Arabia Section Technical Symposium*, SPE ۱۲٦۰۸٦, ۹–۱۱.

[٤] MUKHERJEE, P., SINGHARAY, D., MATAR, S., and MESHARI, D. M. A., ۲۰۱۸, Rock-Typing: *An Integrated Reservoir Characterization Tool for Tight Jurassic Carbonates, West Kuwait*, ۷۰۳۷۲.

[۵] AL-JAWAD, S. N. A., AHMED, M. A., and SALEH, A. H., ۲۰۲۰, Integrated reservoir characterization and quality analysis of the carbonate rock types, case study, southern Iraq, *J. Pet. Explor. Prod. Technol.*, **۱۰(۸)**, ۳۱۵۷–۳۱۷۷.

[٦] SKALINSKI, M., and KENTER, J. A. M., ۲۰۱٤, Carbonate petrophysical rock typing: Integrating geological attributes and petrophysical properties while linking with dynamic behaviour, *Geological Society London Special Publications*, **٤۰٦ (۱)**, ۲۲۹-۲۵۹.

[۷] SAPUTELLI, L., CELMA, R., BOYD, D., SHEBL, H., GOMES, J., and BAHRINI, F., ۲۰۱۹, Deriving Permeability and Reservoir Rock Typing Supported with Self-Organized Maps SOM and Artificial Neural Networks ANN - Optimal Workflow for Enabling Core-Log Integration, predictive data analytics (PDA) and machine learning (ML), In SPE Reservoir Characterisation and Simulation Conference and Exhibition. OnePetro.

[۸] SHABANINEJAD, M., BAGHERIPOUR, M., ۲۰۱۱, Rock Typing and Generalization of Permeability- Porosity Relationship for an Iranian Carbonate Gas Reservoir, *The Nigeria Annual International Conference and Exhibition, Abuja, Nigeria*, SPE ۱۵۰۸۱۹.

[۹] ALIAKBARDOUST, E., ۲۰۱۳, Integration of rock typing methods for carbonate reservoir characterization, *Journal of Geophysics and Engineering*, **۱۰(۵)**, ۱-۱۱.

[۱۰] HOSSEINZADEH, S., KADKHODAIE, A., and YARMOHAMMADI, S., ۲۰۱۹, NMR derived capillary pressure and relative permeability curves as an aid in rock typing of carbonate reservoirs, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, ۱۸٤, ۱۰٦۵۹۳.

[۱۱] MOHEBIAN, R., RIAHI, M., A., and KADKHODAIE, A., ۲۰۱۹, Characterization of hydraulic flow units from seismic attributes and well data based on a new fuzzy procedure using ANFIS and FCM algorithms, example from an Iranian carbonate reservoir, *Carbonates and Evaporites*, **۳٤(۲)**, ۳٤۹–۳۵۸.

[۱۲] FARSHI, M., MOUSSAVI-HARAMI, R., MAHBOUBI, A., KHANEHBAD, M., and GOLAFSHANI, T., ۲۰۱۸, Reservoir rock typing using integrating geological and petrophysical properties for the Asmari Formation in the Gachsaran oil field, Zagros basin, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, ۱۷٦, ۱٦۱–۱۷۱.

[۱۳] MIRZAEI-PAIAMAN, A., OSTADHASSAN, M., REZAEE, R., SABOORIAN-JOOYBARI, H., and CHEN, Z., ۲۰۱۸, A New Approach in Petrophysical Rock Typing. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **۱٦٦**, ٤٤۵–٤٦٤.

[۱٤] MIRZAEI-PAIAMAN, A., SABBAGH, M., OSTADHASSAN, M., SHAFIEI, A., REZAEE, R., SABORIAN-JOOYBARI and CHEN, Z., H., ۲۰۱۹, A further verification of FZI* and PSRTI: Newly developed petrophysical rock typing indices, *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **۱۷۵**, ٦۹۳–۷۰۵.

[۱۵] KHADEM, B., SABERI, M. R., ESLAHATI, M., and ARBAB, B., ۲۰۲۰, Integration of rock physics and seismic inversion for rock typing and flow unit analysis: A case study, *Geophys. Prospect.* **٦۸(۵)**, ۱٦۱۳–۱٦۳۲.

نشریه علمی– پژوهشی زمین شناسی نفت ایران
Iranian Journal of Petroleum Geology

سال یازدهم، شماره ۲۱، بهار و تابستان ۱۴۰۰ص۱–۱۵
No. ۲۱, Spring & Summer, ۲۰۲۱, pp. ۱-۱۵

Modeling of rock types using combination of core, well logs and seismic data: in a carbonate hydrocarbon reservoir in south west of Iran

Mahdi Kheirollahi[۱], Golnaz Jozanikohan[۲], Reza Mohebian[۳*], Ali Moradzadeh[٤]

۱–Masters in petroleum exploration engineering، School of Mining Engineering، College of Engineering، University of Tehran, Tehran, Iran

۲، ۳، ٤–Assistant Professor، School of Mining Engineering، College of Engineering، University of Tehran، Tehran, Iran

* mohebian@ut.ac.ir

Received: July ۲۰۲۲, Accepted: October ۲۰۲۲

Abstract

Rock typing is the process of assigning reservoir properties to geological facies, and an identified rock type has similar geological and reservoir properties. Due to the importance of identifying and separating rock types in hydrocarbon reservoirs, various methods have been proposed and developed today for the determination of rock types. One of the simplest methods is the porosity chart against permeability and cut-off determination, and one of the most important and practical of these methods is to determine rock types by flow zone indicator. In this study, we examine one of the most important hydrocarbon fields in the south of Iran where core, well and seismic data are available for the field studied so that by designing a new workflow and with use of the most important and efficient methods of rock typing, including FZI, porosity, Winland-Pitman index, FZI*, and logarithms of FZI and FZI* we have identified rock types in three dimensions and through the whole field. The partial comparison of the validation results after each method employment also confirms the highest accuracy belongs to the FZI method. As a result, by integrating this method with seismic attributes, the rock types have been separated in four different groups throughout the field in three dimensions.

Keywords: Rock typing, Hydrocarbon reservoirs, Reservoir properties, Seismic attributes, Flow zone indicator