

Dor: [۲۰,۱۰۰۱,۱,۲۲۰۱۸۷۳۸,۱۴۰۰,۱۱,۲۲,۲,۲](https://doi.org/10.1001/1.22018738.1400.11.22.22)

بهبود تراوایی محاسبه شده از روش کالیبراسیون FZI استونلی در مخزن کنگان یکی از میادین گازی ایران

حسین رضایی یگانه دوست

دانشجوی کارشناسی ارشد اکتشاف نفت، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران
Hossein.rezaie.yegane@gmail.com

دریافت تیر ۱۴۰۱، پذیرش فروردین ۱۴۰۲

چکیده

تراوایی توانایی جریان سیال برای یک سنگ متخلخل بوده که تخمین درست آن کاری به شدت دشوار است. دو روش معمول و مرسوم محاسبه تراوایی آنالیز مغزه و چاه آزمایی است، اما اندازه گیری تراوایی از طریق مغزه در تمامی چاه های یک میدان در آزمایشگاه، فرآیندی شدیداً زمانبر و هزینه بر بوده و همچنین در بعضی چاه ها منجمله؛ چاه های افقی امکان مغزه گیری وجود ندارد. چاه آزمایی نیز به دلایلی نظیر؛ هزینه های بالا و توقف تولید در بازه انجام تست صرفه اقتصادی ندارد. لذا ارائه و توسعه روش هایی مبتنی بر نگارهای چاه پیمایی معمول و DSI جهت تخمین تراوایی بدلیل هزینه های کم، جامع و در دسترس بودن اهمیت فراوانی دارد. به این منظور در این پژوهش، در مرحله اول تراوایی به کمک روش خوشه بندی چند تفکیکی بر پایه گراف (MRGC) تخمین زده شد و با تراوایی مغزه مقایسه گردید. در مرحله دوم تراوایی به روش کالیبراسیون FZI استونلی محاسبه و در نهایت با تراوایی مغزه مقایسه گردید. در مرحله سوم به جهت بهبود تراوایی محاسبه شده از روش کالیبراسیون FZI استونلی جهت غلبه بر هتروژنی مخزن از روش خوشه بندی چند تفکیکی بر پایه گراف (MRGC) در ابتدا واحدهای جریان مشخص شدند، در ادامه برای هر واحد جریانی بصورت مجزا تراوایی از روش کالیبراسیون FZI استونلی محاسبه گردید و در نهایت با ترکیب کردن تراوایی های محاسبه شده یک نگار دقیق از تراوایی در چاه مورد مطالعه تخمین زده شد. مشاهده شد که ضریب همبستگی تراوایی های تخمین زده شده با تراوایی مغزه در روش خوشه بندی چند تفکیکی بر پایه گراف ($R^2=77$)، کالیبراسیون FZI استونلی ($R^2=47$) و روش بهبود داده شده ($R^2=84$) بدست آمد. روش مذکور توانست ۳۷ درصد تراوایی محاسبه شده در مرحله قبل را بهبود بخشد و به عنوان بهترین روش جهت محاسبه تراوایی در مخزن کنگان چاه مورد مطالعه معرفی می گردد.

کلمات کلیدی: تراوایی، کنگان، خوشه بندی چند تفکیکی بر پایه گراف، کالیبراسیون FZI استونلی.

۱- مقدمه

تولید، توسعه و بهره‌برداری صحیح و اصولی از مخازن هیدروکربنی مستلزم شناخت دقیق، صحیح و درست خواص پایه‌ای مخزن نظیر؛ تراوایی است [۱]. تراوایی آن میزان فضای خالی و آزادی است که سنگ به سیال اجازه حرکت و جابجا شدن می‌دهد [۱] [۸]. در صنعت نفت و گاز اندازه‌گیری و پیشبینی پارامتر تراوایی جهت شناخت ویژگی‌های مخزن، تعیین محل بهینه برای حفاری چاه‌های توسعه‌ای، روش‌های ازدیاد برداشت، پیشبینی میزان تولید و ... بسیار حیاتی است [۱]. با محاسبه و پیشبینی تراوایی می‌توان میزان قابلیت حرکت سیال در محیط متخلخل را تعیین نمود. لذا دانستن و تخمین دقیق پارامتر تراوایی در مدیریت مخازن و نحوه استحصال سیالات هیدروکربنی نقشی غیرقابل انکار و اساسی ایفا می‌نماید [۱] [۸]. نظر به اینکه این پارامتر از پیچیده‌ترین و دشوارترین پارامترهای پتروفیزیکی در ارزیابی خواص سنگ و سیال بوده، لذا غالباً محاسبه و پیشبینی دقیق آن کاری سهل و راحت نیست [۱۱]. جهت محاسبه و پیشبینی تراوایی در مخازن هیدروکربنی روش‌های مختلفی منجمله؛ اندازه‌گیری مستقیم در آزمایشگاه (با آنالیز مغزه‌های حفاری)، چاه‌آزمایی (به کمک تست‌های فشار)، داده‌های لرزه‌نگاری، روابط تجربی، استفاده از مجموعه نگارهای معمولی و ویژه‌ای چون تشدید مغناطیسی هسته (NMR) و صوتی دوقطبی برشی (DSI) یا ترکیب هر یک از روش‌های مذکور با الگوریتم‌های هوشمند و هوش مصنوعی ارائه شده است [۱] [۸]. دو روش معمول و مرسوم محاسبه تراوایی، آنالیز مغزه و چاه‌آزمایی است، اما اندازه‌گیری مستقیم تراوایی از طریق آنالیز مغزه در تمامی چاه‌های یک میدان در آزمایشگاه فرآیندی هزینه‌دار و زمانبر بوده و همچنین در بعضی چاه‌ها مثل؛ چاه‌های افقی امکان مغزه‌گیری وجود ندارد [۱]. روش چاه‌آزمایی نیز بخاطر عواملی منجمله، هزینه‌های بسیار بالا در همگی چاه‌های یک میدان صرفه اقتصادی ندارد. لذا با توجه به اهمیت بسیار بالای تخمین تراوایی در صنعت نفت و گاز، یافتن روش‌های کم هزینه و دقیق برای تخمین این پارامتر حیاتی بنظر می‌رسد. یکی دیگر از روش‌های محاسبه تراوایی از طریق نگار NMR است اما با توجه به هزینه‌های بالای راندن ابزار آن در چاه، لذا در تمامی چاه‌ها، اندازه‌گیری مذکور غیر اقتصادی است. استفاده از روش‌های تجربی نیز یکی از روش‌ها جهت محاسبه تراوایی مخازن بوده اما با توجه به اینکه فقط در آن محدوده قابل اتکا بوده و قابل بسط به نقاط دیگر نیستند فاقد اعتبار و ارزش لازم می‌باشند. با توجه به در دسترس بودن، جامع بودن و همچنین هزینه‌های پایین عملیات چاه‌پیمایی و اینکه غالباً در همگی چاه‌های یک میدان اطلاعات نگارهای معمول در دسترس هستند پس بنابراین توسعه و بکارگیری روش‌هایی با تکیه بر نگارها جهت محاسبه تراوایی معقول و اقتصادی تر بنظر می‌رسد. بهره‌گیری از شبکه عصبی مصنوعی، الگوریتم‌های هوشمند و هوش مصنوعی نیز به عنوان راهکاری که الگو گرفته از ذهن انسان و قادر به یادگیری است، می‌تواند با شناخت رابطه پیچیده بین داده‌های ورودی یا همان نمودارهای چاه جهت تشخیص تراوایی مورد استفاده قرار بگیرد. شبکه‌های عصبی مصنوعی توانایی‌های بسیار بالایی در پیش‌بینی، دسته‌بندی و تطبیق داده‌ها دارند. شبکه‌های مذکور با پیروی از الگوهای مغز انسان و روابط ریاضی سعی در یافتن رابطه پیچیده بین داده‌های ورودی کرده تا بتوانند با خطای بسیار ناچیزی، خروجی را به درستی پیش‌بینی نمایند [۹] [۷]. امواج استونلی حاصل از نگار DSI نیز در طول سالیان ثابت کرده‌اند که ابزارهای مفید، کاربردی و دقیقی جهت تخمین

تراوایی مخازن هیدروکربنی هستند [۴] [۱۲]. بری و همکاران در سال ۱۹۹۸ رابطه‌ای را معرفی نمودند که به کمک آن می‌توان کند شدگی موج استونلی را در نواحی ناتراوای مخزن محاسبه و در ادامه با استفاده از مقدار کندشدگی استونلی کل محاسبه شده، مقدار کندشدگی استونلی را که در نتیجه تراوایی بوجود می‌آید را محاسبه نمود [۶]. الاذنی و براتی در سال ۲۰۰۳ اثرات تراوایی را بر کندشدگی موج استونلی را بررسی و نشان دادند که شاخص تراوایی در برگرفته‌ی فاکتور پیچاپیچی مسیرهای جریان و شکل هندسی فضای متخلخل سنگ است و در نتیجه اندازه‌گیری مستقیمی از شاخص زون جریان (FZI) می‌باشد [۴]. انیفوس و همکاران در سال ۲۰۱۳ با استفاده از داده‌های لرزه‌ای، چاه‌پیمایی و با استفاده از تکنیک هوش مصنوعی به تخمین تراوایی پرداختند [۵]. وردیان و همکاران در سال ۲۰۱۶ با استفاده از سیستم نورو- فازی به پیش‌بینی تخلخل و تراوایی سازند خوف^۱ در یک مخزن گازی- میعانی شکافدار در جنوب ایران پرداختند [۱۳]. رافیک و همکاران در سال ۲۰۱۷ به محاسبه و تخمین تراوایی با استفاده از داده‌های پتروفیزیکی از روش آنالیز خوشه‌بندی چند تفکیکی بر پایه گراف پرداختند، آن‌ها به این نتیجه رسیدند که تقسیم‌بندی داده‌ها بر اساس الکتروفاسیس آن‌ها موجب دستیابی به نتایج دقیق‌تری به نسبت بقیه روش‌ها می‌گردد [۱۱]. الکاتانی و همکاران در سال ۲۰۱۷ با توسعه یک مدل شبکه عصبی مصنوعی به کمک نگارهای مرسوم و معمول چاه به پیش‌بینی تراوایی یک مخزن ناهمگن کربناته پرداختند [۷]. سلیمانی و همکاران در سال ۲۰۱۸ جهت تخمین تراوایی و تشخیص انواع رخساره‌های سنگ در مخازن گروه بنگستان از میدان نفتی منصوری از امواج استونلی استفاده کردند. نتایج بررسی‌ها نشان داد که تراوایی پیش‌بینی شده با استفاده از امواج استونلی با تراوایی مغزه همبستگی بالایی دارد [۱۲]. جمالیان و همکاران در سال ۲۰۱۸ به تخمین و محاسبه تراوایی با استفاده از روش شبکه عصبی مصنوعی و ماشین بردار پشتیبان از نگارهای چاه و مغزه در یکی از میداین نفتی ایران پرداختند [۸]. محسنی‌پور و همکاران در سال ۱۴۰۰ به تخمین تراوایی از روش‌های مختلفی چون؛ استفاده از نگار NMR و ترکیب شبکه عصبی مصنوعی با الگوریتم‌های بهینه‌سازی رقابت استعماری و ازدحام ذرات برای مخزن آسماری میدان نفتی اهواز پرداختند [۳]. سلحشور و همکاران در سال ۱۴۰۰ مدل یادگیری ماشین گروهی جدیدی را بر اساس تفکیک لیتولوژی جهت تخمین و محاسبه تراوایی در مخازن گازی و نفتی ارائه نمودند [۲].

با توجه به اینکه تخمین و محاسبه تراوایی در مخازن هیدروکربنی بسیار حیاتی بوده لذا در این مطالعه، در مرحله اول تراوایی از روش خوشه‌بندی چند تفکیکی بر پایه گراف محاسبه و با تراوایی مغزه مقایسه گردید. در مرحله دوم، با توجه به دقت و اهمیت بالای موج استونلی در محاسبه تراوایی به تخمین تراوایی از روش کالیبراسیون FZI استونلی و مقایسه با تراوایی مغزه پرداخته شد. در مرحله سوم به جهت بهبود تراوایی محاسبه شده از روش کالیبراسیون FZI استونلی جهت غلبه بر هتروژنی مخزن از روش خوشه‌بندی چند تفکیکی بر پایه گراف (MRGC) به تخمین تراوایی پرداخته شد. در این بخش جهت غلبه بر هتروژنی مخزن در ابتدا واحدهای جریانی مشخص شدند، در ادامه برای هر واحد جریانی بصورت مجزا روش کالیبراسیون FZI استونلی محاسبه گردید و در نهایت با ترکیب کردن تراوایی‌های محاسبه شده یک نگار دقیق از تراوایی در چاه مورد

^۱ Khuff formation

مطالعه تخمین زده شد. روش بهبود داده شده معرفی شده به عنوان بهترین و دقیق‌ترین روش جهت محاسبه تراوایی در مخزن کنگان چاه مورد مطالعه معرفی می‌گردد.

۲- روش کار

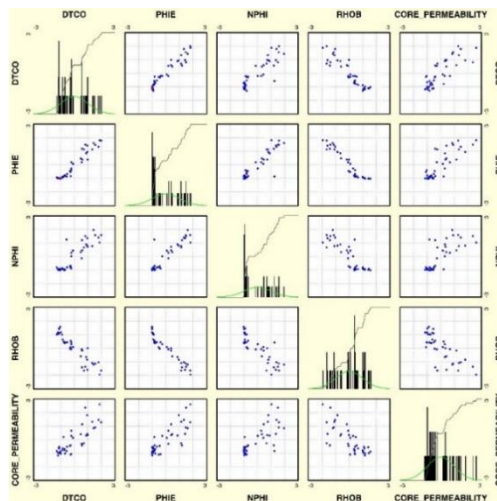
در این پژوهش، تراوایی از ۳ روش محاسبه گردید. در مرحله اول تراوایی از نگارهای چاه‌پیمایی؛ نوترون (NPHI)، صوتی (DTCO)، تخلخل موثر (PHIE) و دانسیته (RHOB) با استفاده از روش خوشه‌بندی چند تفکیکی بر پایه گراف (MRGC) تخمین زده شد. در مرحله دوم با عنایت بر اهمیت و دقت بالای موج استونلی در تخمین تراوایی به تخمین تراوایی از طریق روش کالیبراسیون FZI استونلی پرداخته شد. در مرحله سوم به جهت افزایش دقت کار و بهبود روش کالیبراسیون FZI استونلی برای تخمین تراوایی، واحدهای جریانی مشخص شدند و در ادامه برای هر یک از واحدهای مشخص شده بصورت جدا تراوایی از روش کالیبراسیون FZI استونلی بر مبنای ویژگی‌های خاص هر گروه محاسبه گردید و در نهایت با ترکیب نگار تراوایی بدست آمده برای هر گروه، یک نگار بسیار دقیق و پیوسته از تخمین تراوایی محاسبه گردید.

۲-۱ تخمین تراوایی از روش خوشه‌بندی چند تفکیکی بر پایه گراف (MRGC)

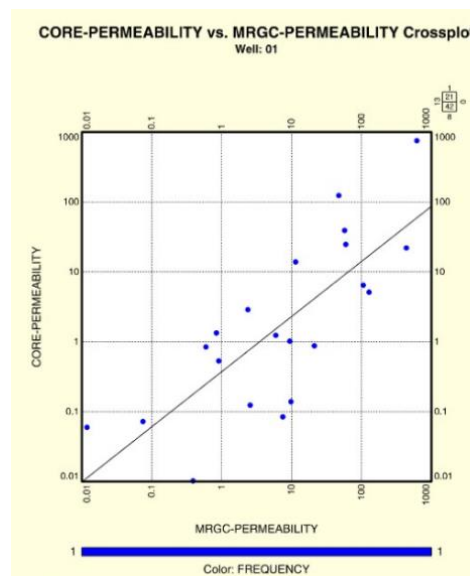
طبقه‌بندی داده‌ها به گروه‌هایی مشخص، به نحوی که داده‌هایی که در یک گروه قرار می‌گیرند دارای بیش‌ترین شباهت با همان گروه و بیش‌ترین تفاوت با گروه‌های دیگر باشد را خوشه‌بندی می‌نامند. در خوشه‌بندی هر خوشه‌ای که به دست می‌آید دارای ویژگی‌های خاصی بوده که آن را از مابقی خوشه‌ها مجزا و تفکیک می‌نماید [۱۰].

خوشه‌بندی یا خوشه‌سازی یک روش آموزش و یادگیری است که هدف آن پیدا کردن خوشه‌هایی از داده‌ها، در بین ورودی‌ها (نگارهای چاه‌پیمایی) است. در واقع می‌توان گفت که در هر خوشه داده‌هایی مخصوص به خود، وجود دارد. نگارهای ورودی که برای خوشه‌بندی بکار می‌روند باید با پارامتر تراوایی که قرار است تخمین زده شود مرتبط باشند. به عبارت بهتر، تراوایی غالباً با نگارهایی نظیر؛ تخلخل ارتباط معنایی دارد، پس باید نگارهایی به عنوان ورودی انتخاب شوند که ارتباط نزدیکی با تراوایی داشته باشند. روش و الگوریتم خوشه‌بندی چند تفکیکی بر پایه گراف برای شناسایی خوشه‌ها از داده‌های ورودی، برای هر گروه اندیس همسایگی را حساب می‌نماید. در ادامه دسته‌های طبیعی کوچکی از نقاط که به آن‌ها دسته‌های جذب گویند، بر اساس استفاده از نزدیک‌ترین همسایه برای هر نقطه تشکیل می‌شوند. به جز تشکیل گروه‌هایی بر اساس اندیس همسایگی، به منظور تعیین جذب طبیعی، تعدادی بهینه خوشه بر مبنای اندیس شاخص کرنل (KRI) محاسبه می‌گردد (اندیس شاخص کرنل تلفیقی از اندیس همسایگی، فاصله و تابع وزن داده‌ها بوده که درجه همسایگی یا عضویت را مشخص می‌نماید) و سپس در ادامه، بر مبنای داده‌هایی که از محل قبل به دست آمده، با ادغام دسته‌های جذب، خوشه‌های نهایی تشکیل می‌شوند. در واقع خوشه بندی بر اساس MRGC یک روش آماری-عصبی است که مشکل بعد را از بین برده و اطلاعات مفیدی در خصوص رخساره‌های زمین شناسی از ساختار خود داده‌ها را به کاربر می‌دهد [۱۴]. روش مذکور از معدود روش‌های غیر پارامتریک، بسیار مناسب و دقیق جهت مطالعه و تحلیل داده‌های به دست آمده از نگارها است. قدرت

شناسایی الگوهای طبیعی موجود در نگارها، بی نیازی از دانش قبلی در خصوص داده‌ها، پیشنهاد بهینه و خودکار تعداد خوشه‌ها و عدم مشکل بعد از مزایای دیگر روش MRGC در نرم افزار ژئولاگ می‌باشد [۱۴]. جهت محاسبه تراوایی از روش MRGC در ابتدا با روش رگرسیون گام به گام ۴ نگاره DTCO، NPHI، RHOB و PHIE به عنوان ورودی‌های مدل MRGC در نرم‌افزار ژئولاگ انتخاب شدند، در ادامه به نرم‌الایز کردن داده‌های ورودی و خروجی شبکه پرداخته شد و سپس مجدد ورودی‌های مدل کنترل گردید و در آخر از روش سعی و خطا پارامترهای بهینه مدل شامل تعداد نوروها و تعداد کلاس‌ها بدست آمدند. در تخمین تراوایی به روش مذکور در مجموع از ۱۸۵۰ داده در دسترس (داده مغزه و ۴ نگاره استفاده شده) ۳۰ درصد به عنوان داده‌های آزمون و صحت‌سنجی و ۷۰ درصد به عنوان داده‌های آموزش در نرم‌افزار ژئولاگ در نظر گرفته شدند. شکل ۱ نمودارهای مقاطع نگارهای ورودی و خروجی مدل نشان داده شده است. شکل ۲ ضریب همبستگی تراوایی محاسبه شده از روش MRGC با تراوایی مغزه نشان داده شده است.



شکل ۱ نمودارهای مقاطع ورودی‌ها و خروجی مدل در تخمین تراوایی به روش MRGC.



شکل ۲ ضریب همبستگی تراوایی تخمین زده شده به روش MRGC در مقابل تراوایی مغزه در چاه مورد مطالعه.

۲-۲ تخمین تراوایی از روش کالیبراسیون FZI استونلی

موج استونلی دارای اطلاعات بسیار ارزشمندی از مخازن هیدروکربنی است. در نمودار صوتی دو قطبی برشی (DSI) از موج استونلی جهت تخمین تراوایی استفاده شده که به نسبت روش‌های دیگر هم در زمان و هم هزینه صرفه‌جویی می‌شود. و می‌توان با ثبت خاصیت ذاتی موج استونلی (که همان تاثیر پذیری از مقدار تراوایی است) و کمی کردن رابطه پارامترهای پتروفیزیکی این موج و تراوایی یک نگار پیوسته و کامل از تغییرات تراوایی در چاه تهیه کرد. تخمین و محاسبه تراوایی بصورت پیوسته و در شرایط مخزن از ویژگی‌های خاص استفاده از موج استونلی است. موج استونلی، خاصیت پراکنده شونده داشته و در سطح تداخل بین سیال و سازند حرکت می‌نماید [۴]. تاثیر کند شدگی و تضعیف موج استونلی به نحوی است که افزایش تراوایی باعث افزایش پراکنش، افزایش تضعیف دامنه و کند شدگی موج استونلی می‌گردد.

فاکتورهای موثر بر روی کندی موج استونلی به شرح زیر می‌باشند:

- ۱- کبره گل: این فاکتور معمولاً در طول چاه با در نظر گرفتن ضخامت آن و همچنین یکسان بودن آن شیفت ثابتی را ایجاد می‌نماید.
- ۲- لیتولوژی: لیتولوژی سازند یکی از اساسی‌ترین فاکتورهای تاثیر گذار بوده به نحوی که اگر لیتولوژی از کلسیت خالص به دولومیت تغییر کند آنگاه اثر کندی نیز تغییر می‌نماید.
- ۳- سیال: موج استونلی به واسطه مدول سیال نیز تحت تاثیر قرار می‌گیرد. یعنی اگر سیال از مایع به گاز تغییر کند تراوایی پیش بینی شده شدیداً افزایش می‌یابد [۴].

برای تخمین تراوایی از روش کالیبراسیون FZI استونلی موارد زیر مورد نیاز و مورد محاسبه است:

- ۱- کندی موج برشی
- ۲- کندی موج استونلی (DTST)
- ۳- کندی موج استونلی در زون ناتراوا (DTSTE) یا زون الاستیک
- ۴- تراوایی و تخلخل ناشی از مغزه
- ۵- تخلخل موثر
- ۶- حجم کانی‌ها
- ۷- چگالی و فاکتور شاخص تطابق برای کانی‌های سازنده لیتولوژی

از آنجا که موج استونلی توسط مدول بالک سیال محیط متخلخل و نیز مدول برشی در فرکانس‌های کم تحت تاثیر است، کندی آن در زون‌های ناتراوا که خواص مدل الاستیک را دارا است، بصورت ذیل مدلسازی می‌شود:

$$\frac{1}{V_{st}} = \sqrt{\rho_f \left(\frac{1}{G} + \frac{1}{K_f} \right)} \quad (1)$$

که در آن سرعت موج استونلی، G مدول برشی سنگ، K_f مدول بالک سیال و ρ_f چگالی سیال است. این معادله در سازند با تراوایی صفر صحیح بوده که سرعت موج استونلی تنها تحت تاثیر خواص الاستیکی چاه و سازند می باشد. از آنجا که ابزار DSI زون آغشته را بررسی می نمایند، این ناحیه تحت تاثیر گل حفاری بوده و منظور از سیال در اینجا همان پالایه گل است.

رابطه ی بالا با اندکی تغییر به صورت رابطه کاربردی زیر در خواهد آمد.

$$DTST^2 = \frac{DTSM^2 \cdot RHOM}{RHOB} + DTF^2 \quad (2)$$

$$RHOB = \sum(RHO_i V_i) \quad (3)$$

که در آن $DTST$ کندی موج استونلی، $DTSM$ کندی موج برشی، DTF کندی ظاهری پالایه گل، $RHOM$ چگالی ظاهری پالایه گل و $RHOB$ چگالی بالک، RHO چگالی، V حجم احتمالی و i سیال یا کانی می باشد. اگر نمودار متقاطع $DTST^2$ در مقابل $\frac{DTST^2}{RHOB}$ را بصورت خطی در زون ناتراوا رسم شود شیب منحنی عبوری از داده ها گواه چگالی ظاهری پالایه گل است [۴].

نظر بر اینکه فضای متخلخل بر روی موج استونلی اثر می گذارد می توان شاخص تراوایی را محاسبه نمود. این شاخص از نسبت کندی استونلی اندازه گیری شده به کندی مدلسازی شده (یا کندی محاسبه شده در زون ناتراوا) بدست می آید:

$$KIST = \frac{DTST}{DTSTE} \quad (4)$$

در این رابطه $KIST$ شاخص تراوایی استونلی، $DTST$ کندی موج استونلی در تمام سازند و $DTSTE$ کندی موج استونلی در زون ناتراوا است.

به کمک این رابطه می توان شاخص تراوایی را برای سازند مورد مطالعه حساب نمود. لازم به ذکر است که این شاخص معیاری از تحرک پذیری و تراوایی نیست و در حقیقت گواه حرکت سیال در اطراف چاه است. از آنجا که حرکت سیال تابع مواردی چون؛ اندازه، شکل و نحوه توزیع گلوگاه حفرات سازند بوده لذا می توان شاخص تراوایی را بعنوان شاخصی از پیچاپیچی دانست.

با توجه به رابطه پیچاپیچی و اندیس زون جریانی، در نهایت شاخص زون جریان استونلی بصورت زیر با FZI متناسب می شود.

$$FZI \propto KIST \quad (5)$$

با توجه به اینکه در زون ناتراوا KIST به سمت یک میل می‌کند فاکتور FZI باید به سمت صفر میل کرده و بالعکس. در تراوایی بی‌نهایت باید فاکتورهای شاخص تراوایی و FZI به سمت بی‌نهایت میل کنند، بنابراین تناسب گفته شده به شکل زیر برقرار می‌شود:

$$FZI \propto (KIST - 1) \quad (6)$$

حال جهت تبدیل این تناسب به تساوی، فاکتوری به نام شاخص تطابق به صورت ذیل تعریف می‌شود:

$$FZI = IMF (KIST - 1) \quad (7)$$

این فاکتور تنها عامل ارتباط بین شاخص تراوایی استونلی، FZI و تراوایی حقیقی جهت کالیبراسیون بوده و به واسطه رابطه زیر و حجم کانی‌های تشکیل دهنده سازند مورد مطالعه مشخص می‌گردد.

$$IMF = \sum(IMF_i V_i) \quad (8)$$

در این رابطه IMF فاکتور شاخص تطابق، V_i حجم هر کانی، i معرف هر کانی است. در آخر پس از محاسبه مقادیر FZI، تراوایی استونلی از رابطه ذیل محاسبه می‌گردد:

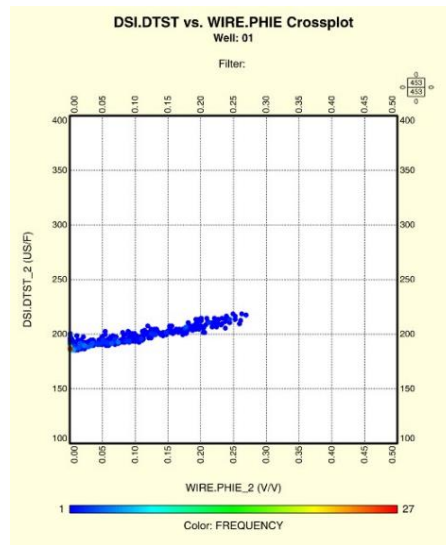
$$K = 1.014 FZI^2 \left[\frac{\phi^*}{(1-\phi)^2} \right] \quad (9)$$

در این رابطه K تراوایی استونلی، ϕ تخلخل موثر و FZI اندیس زون جریانی می‌باشد [۶].

دو روش به شرح ذیل جهت محاسبه کندی موج استونلی در زون ناتراوا وجود دارد:

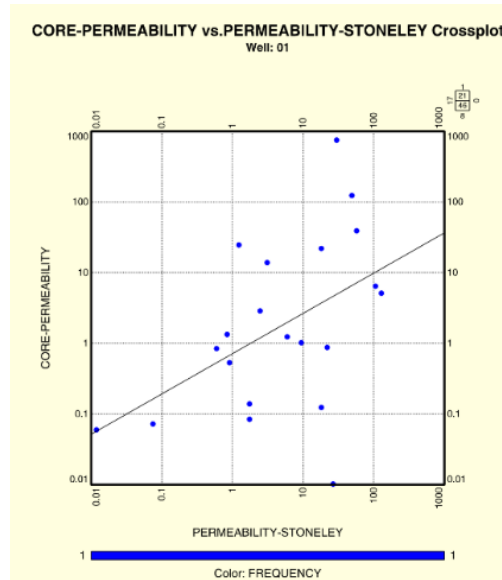
۱- محاسبه میانگین کندی این موج در زون‌های ناتراوا: که در این پژوهش ۱۸۶ به دست آمد.

۲- استفاده از نمودار متقاطع کندی موج استونلی در مقابل تخلخل موثر: که ۱۸۴ به دست آمد. که در این مطالعه با عنایت به دقت این روش نسبت به روش اول، ملاک قرار گرفت (شکل ۳).



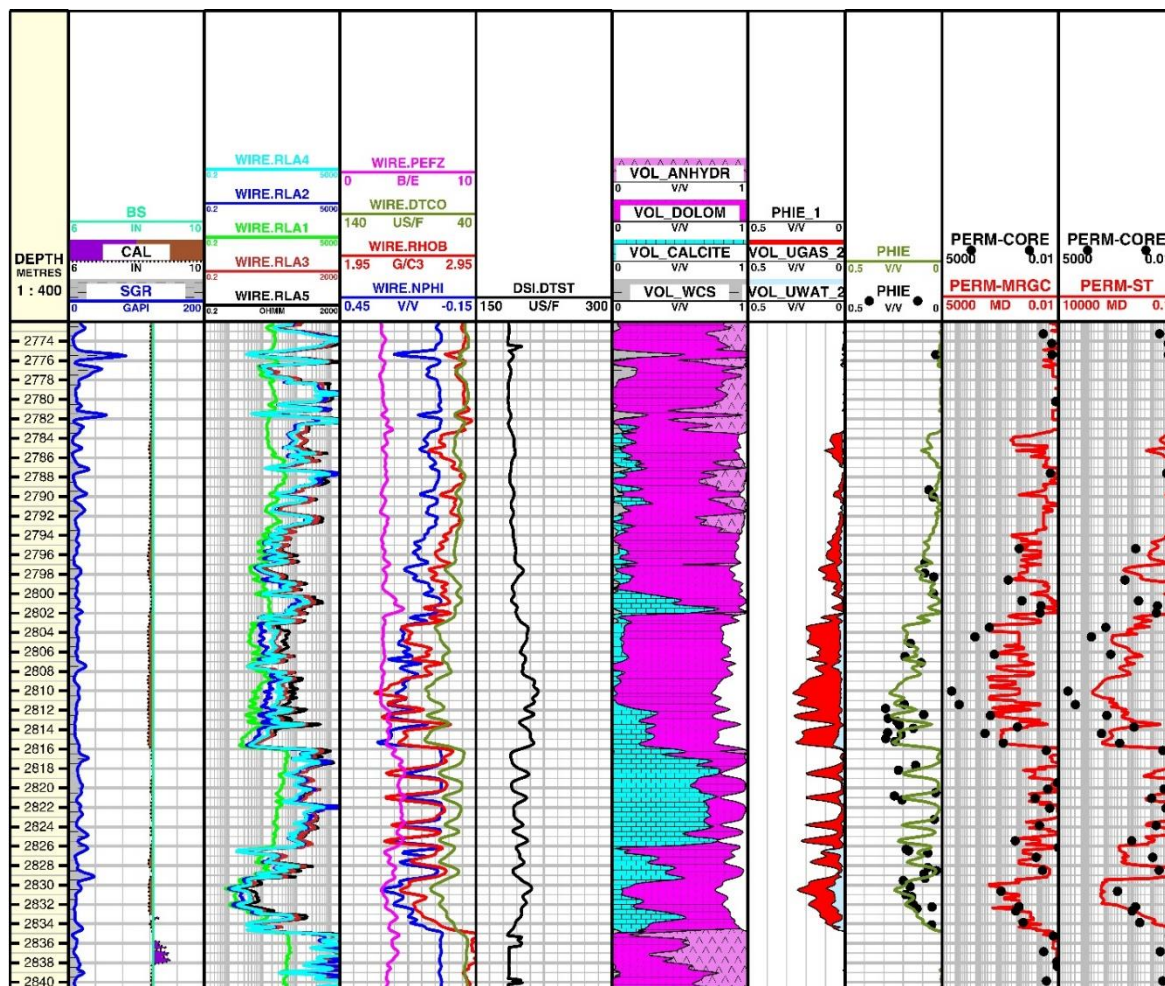
شکل ۳ نمودار متقاطع کندی موج استونلی در مقابل تخلخل موثر در چاه مورد مطالعه.

بعد از محاسبه شاخص تراوایی استونلی از رابطه ۴، به کمک روابط (۷) و (۸) و (۹) فاکتور شاخص تطابق یا همان IMF برای کانی‌های تشکیل دهنده‌ی سازند کنگان (دولومیت ۲۱ و کلسیت ۴/۱۶) تعیین گردید. به این صورت که با قرار دادن تراوایی‌های حاصل از مغزه در رابطه مقادیر اندیس زون جریان (FZI) محاسبه می‌شوند. سپس به کمک رابطه فاکتور شاخص تطابق کل برای عمق‌های مختلف محاسبه می‌گردند. بطوریکه بهترین تطابق بین تراوایی و شاخص تراوایی برقرار شود. شکل ۴ ضریب همبستگی تراوایی تخمین زده شده با روش کالیبراسیون FZI استونلی را با تراوایی حاصل از آنالیز مغزه ($R^2=0.47$) نشان می‌دهد.



استونلی در مقابل تراوایی مغزه در چاه مورد مطالعه. FZI شکل ۴ ضریب همبستگی تراوایی تخمین زده شده به روش کالیبراسیون

در شکل ۵ تراوایی تخمین زده شده با روش کالیبراسیون FZI استونلی با نگار پیوسته قرمز رنگ در مقابل تراوایی حاصل از آنالیز مغزه با نقاط مشکی در ترک اول از سمت راست و تراوایی تخمین زده شده با روش MRGC با نگار پیوسته قرمز رنگ در مقابل تراوایی حاصل از آنالیز مغزه با نقاط مشکی در ترک دوم از سمت راست نشان داده شده است.



استونلی (نگار قرمز رنگ) در مقابل تراوایی مغزه (نقاط مشکی) در ترک اول از سمت راست و تراوایی FZI شکل ۵ تراوایی محاسبه شده از روش کالیبراسیون (نگار قرمز) در مقابل تراوایی مغزه (نقاط مشکی) در ترک دوم از سمت راست. MRGC محاسبه شده از روش

۲-۳ بهبود تراوایی محاسبه شده از روش کالیبراسیون FZI استونلی

در مرحله قبل تراوایی با استفاده از روش استونلی محاسبه گردید. در این بخش برای غلبه بر هتروژنی مخزن ابتدا واحدهای جریانی مشخص شدند، در ادامه برای هر واحد جریانی روش کالیبراسیون FZI استونلی به صورت جدا محاسبه گردید و در آخر با ترکیب کردن تراوایی‌های محاسبه شده یک نگار دقیق از تراوایی در چاه مورد مطالعه تخمین زده شد. با عنایت به این که هدف در این بخش بهبود تراوایی به دست آمده از روش کالیبراسیون FZI استونلی بود بدین منظور به گروه‌بندی و تعیین گونه‌های سنگ مخزن پرداخته شد تا تراوایی دقیق‌تر محاسبه گردد. چرا که ممکن است در یک زون یا ناحیه تخلخل‌ها به هم مرتبط باشند ولی در چند متر پایین تر تخلخل‌ها به هم وصل نباشند و تراوایی در آنجا مقداری پایین داشته باشد. بنابراین

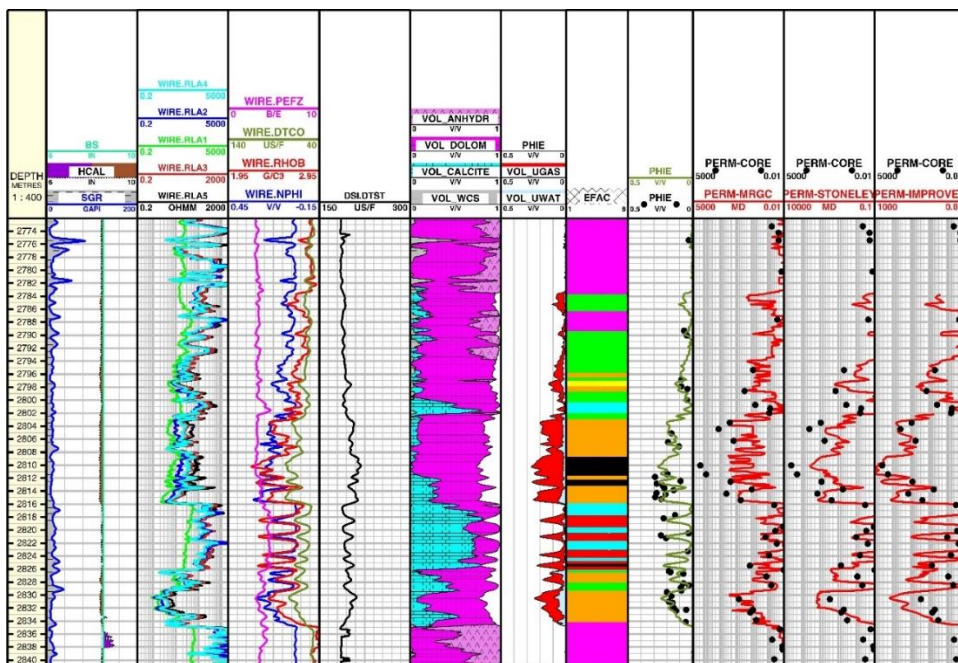
در این قسمت کار بخش‌هایی از مخزن با وجود لیتولوژی یکسان ثابت در نظر گرفته نشده و به بخش‌های متفاوتی از لحاظ ویژگی‌های خاص خود تفکیک گردیده است. چون مخزن کنگان در چاه مورد مطالعه، مخزنی پیچیده از لحاظ لیتولوژی و دیانز است، پس بنابراین نباید برای هر کانی فقط یک شاخص فاکتور تطابق تعیین نمود. چرا که ممکن است بافت کانی (اندازه دانه، شکل دانه، جور شدگی و نحوه قرار گیری ذرات کنار یکدیگر) در اعماق مختلف تغییر کند. لذا در این مطالعه برای طبقه بندی انواع سنگ‌ها نسبت به خواص جریانی بر پایه واحدهای جریان هیدرولیکی از رخساره‌های الکتریکی استفاده گردید تا نواحی با تراوایی بالا شناسایی شوند و بتوان به مشکل هتروژنی و عوامل مؤثر دیانز در تراوایی غلبه نمود. بدین صورت که ابتدا به کمک نگارهای DTCO، RHOB، NPHI و PHIE با روش خوشه‌بندی چند تفکیکی بر پایه گراف (MRGC) تعداد رخساره‌های الکتریکی محاسبه شدند (در این روش ۱۸۱۲ نقطه جهت ساخت مدل و خوشه‌بندی استفاده گردید). و بعد برای هر یک از گروه‌ها به صورت جدا تراوایی تخمین زده شد و در نهایت تراوایی محاسبه شده برای هر یک از گروه‌ها با هم ترکیب شدند و تراوایی خیلی دقیقی در مخزن محاسبه گردید. در نهایت مخزن کرناته کنگان به ۷ گروه تقسیم و تفکیک شد که در شکل ۶ (ترک پنجم از سمت راست) نشان داده شده است. بعد از اینکه گروه‌ها مشخص شدند حال بصورت جداگانه برای هر گروه تراوایی جداگانه از روش کالیبراسیون FZI استونلی که در مرحله قبل کاملاً توضیح داده شد محاسبه گردید. یعنی در ابتدا KIST محاسبه، سپس به کمک داده‌های مغزه FZI بدست آمد و در نهایت جداگانه برای هر یک از گروه‌ها IMF محاسبه شد. در جدول ۱ مشخصات و مقادیر شاخص تطابق برای کانی‌های تشکیل دهنده سازند کنگان چاه مورد مطالعه آمده است.

جدول ۱ تعیین شاخص فاکتور تطابق برای کانی‌های تشکیل دهنده سازند در هر گروه

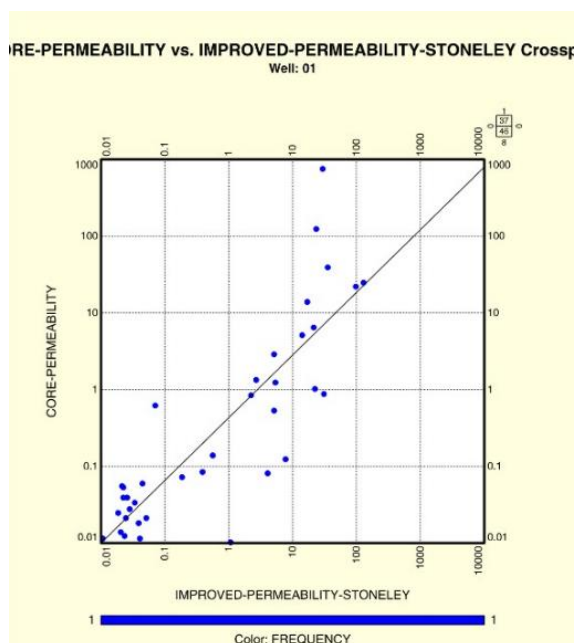
گروه و رنگ	IMF کلسیت	IMF دولومیت
گروه ۱ ارغوانی
گروه ۲ سبز
گروه ۳ نارنجی	۱۶	۲/۸
گروه ۴ زرد	۱۵	۲/۷
گروه ۵ فیروزه‌ای	۳۱	۷/۳
گروه ۶ مشکی	۳۱	۲/۹
گروه ۷ قرمز	۳۲	۹/۵

برای گروه‌های ۱ و ۲ بدلیل غیرمخزنی بودن و وجود انیدریت فاکتور شاخص تطابق محاسبه نشد. در نهایت برای ۵ گروه مابقی تراوایی جداگانه از روش کالیبراسیون FZI استونلی محاسبه گردید و سپس آنان را با هم ترکیب کرده و یک نگار بسیار

دقیق از تراوایی در چاه مورد مطالعه بدست آمد. شکل ۷ ضریب همبستگی تراوایی بهبود داده شده از روش استونلی با تراوایی حاصل از آنالیز مغزه ($R^2=۸۴$) را نشان می‌دهد.



شکل ۶ تراوایی بهبود داده شده از روش کالیبراسیون FZI استونلی (نگار قرمز رنگ) در مقابل تراوایی مغزه (نقاط مشکی) در ترک اول از راست، تراوایی محاسبه شده از روش کالیبراسیون FZI استونلی (نگار قرمز رنگ) در مقابل تراوایی مغزه (نقاط مشکی) در ترک دوم از راست، تراوایی محاسبه شده از روش MRGC (نگار قرمز) در مقابل تراوایی مغزه (نقاط مشکی) در ترک سوم از سمت راست و رخصاره‌های بدست آمده از روش MRGC در ترک پنجم از سمت راست.



استونلی در مقابل تراوایی مغزه در چاه مورد مطالعه. شکل ۷ ضریب همبستگی تراوایی بهبود داده شده از روش کالیبراسیون

۳- بحث و نتایج

در شکل ۶ نگارهای خام چاه مورد مطالعه به همراه ارزیابی انجام شده، رخساره‌های بدست آمده و انواع روش‌های تخمین تراوایی بکار برده شده، نشان داده شده است. ستون اول از چپ اعماق مورد مطالعه است. ستون دوم نشان‌دهنده نگارهای قطر مته، قطر چاه و گاما است. ستون سوم نشان‌دهنده انواع نگارهای مقاومت الکتریکی، ستون چهارم نگارهای دانسیته، نوترون، صوتی و فتوالکتریک، ستون پنجم نگار کندی موج استونلی، ستون ششم لیتولوژی و ستون هفتم حجم آب، گاز و نفت است. ستون هشتم رخساره‌های بدست آمده از روش MRGC را نشان می‌دهد. ستون نهم مربوط به نگار تخلخل موثر به همراه تخلخل حاصل از آنالیز مغزه است. در ستون‌های دهم، یازدهم و دوازدهم بترتیب تراوایی‌های محاسبه شده از روش‌های MRGC، کالیبراسیون FZI استونلی و بهبود داده شده FZI استونلی نشان داده شده است. در قسمت اول از این مطالعه، تراوایی به روش MRGC محاسبه و با تراوایی حاصل از آنالیز مغزه در چاه مورد نظر مقایسه گردید که ضریب همبستگی $R^2=77$ درصد گواه عملکرد نسبتاً خوب این روش در تخمین تراوایی گردید. اما مشکل روش مذکور در تخمین تراوایی در مخزن کنگان چاه مورد مطالعه با وجود ضریب همبستگی بالا، بدست آوردن تراوایی در نواحی و اینتروال‌های غیر مخزنی است. در نواحی غیرمخزنی باید نگار تراوایی مقداری را نشان نمی‌داد اما روش مذکور برای این نواحی نیز تراوایی محاسبه نموده که عملکرد روش مذکور را زیر سوال خواهد برد. در قسمت دوم کار تراوایی به روش کالیبراسیون FZI استونلی محاسبه و با تراوایی حاصل از آنالیز مغزه در چاه مورد نظر مقایسه گردید که ضریب همبستگی $R^2=47$ درصد بدست آمد روش مذکور تراوایی را در نقاط غیر مخزنی به درستی تشخیص و نشان داده است اما در نواحی مخزنی با تراوایی بالا عملکرد مناسبی از خود نشان نداد که در مرحله سوم کار به جهت ارتقا و بهبود تراوایی بدست آمده از روش کالیبراسیون FZI استونلی به گروه‌بندی و تعیین گونه‌های سنگ مخزن پرداخته شد تا تراوایی دقیق‌تر محاسبه گردد. بنابراین در این قسمت کار بخش‌هایی از مخزن با وجود لیتولوژی یکسان ثابت در نظر گرفته نشده و به بخش‌های متفاوتی از لحاظ ویژگی‌های خاص خود تفکیک گردیده است. چون مخزن کنگان در چاه مورد مطالعه، مخزنی پیچیده از لحاظ لیتولوژی و دیازنز است، پس بنابراین نباید برای هر کانی فقط یک شاخص فاکتور تطابق تعیین نمود. چرا که ممکن است بافت کانی (اندازه دانه، شکل دانه، جور شدگی و نحوه قرار گیری ذرات کنار یکدیگر) در اعماق مختلف تغییر کند. لذا در این قسمت برای طبقه بندی انواع سنگ‌ها نسبت به خواص جریانی بر پایه واحدهای جریان هیدرولیکی از رخساره‌های الکتریکی استفاده گردید تا نواحی با تراوایی بالا شناسایی شوند و بتوان به مشکل هتروژنی و عوامل مؤثر دیازنز در تراوایی غلبه نمود و بعد برای هر یک از گروه‌ها به صورت جدا تراوایی تخمین زده شد و در نهایت تراوایی محاسبه شده برای هر یک از گروه‌ها با هم ترکیب شدند و تراوایی خیلی دقیقی در مخزن محاسبه گردید. در نهایت مخزن کربناته کنگان به ۷ گروه تقسیم و تفکیک شد. در ادامه بعد از اینکه گروه‌ها مشخص شدند حال بصورت جداگانه برای هر گروه تراوایی جداگانه از روش کالیبراسیون FZI استونلی محاسبه و در نهایت با هم ترکیب شدند. ضریب همبستگی تراوایی محاسبه شده از این روش با تراوایی مغزه ۸۴

درصد بدست آمد همانگونه که از شکل ۶ مشخص است در این روش مدل هم در نواحی مخزنی و هم در نواحی غیر مخزنی تشخیص و عملکرد بسیار خوبی داشته است. بنابراین روش معرفی شده در این مطالعه به عنوان بهترین روش جهت محاسبه تراوایی در مخزن کنگان چاه مورد مطالعه معرفی می گردد.

نتیجه گیری

در این پژوهش، با استفاده از روش کالیبراسیون FZI استونلی و بکارگیری واحدهای جریان هیدرولیکی بدست آمده از روش MRGC دقیق ترین و بهترین تخمین از تراوایی حاصل گردید. در این روش مناطق با تراوایی بالا و پایین با هدف غلبه بر هتروژنی مخزن مشخص شدند که در نهایت روش مذکور دارای ضریب همبستگی ۸۴ با تراوایی مغزه به عنوان بهترین مدل در تخمین تراوایی معرفی می گردد. مقدار ضریب همبستگی بین تراوایی مغزه و تراوایی محاسبه شده از روش MRGC با ۷۷ درصد و روش کالیبراسیون FZI استونلی ۴۷ درصد محاسبه گردید. روش MRGC برای تخمین تراوایی در نواحی غیرمخزنی عملکرد مناسبی نداشته و روش کالیبراسیون FZI استونلی در نواحی مخزنی، اما روش بهبود داده شده که بر مبنای واحدهای جریان هیدرولیکی به بهبود تراوایی پرداخته تقریباً در تمامی نقاط دارای همبستگی و انطباق بسیار بالایی با تراوایی حاصل از آنالیز مغزه می باشد. روش مذکور حتی از مغزه هم دقت و عملکرد بالاتری داشته زیرا که در نواحی غیرمخزنی مغزه دارای مقدار بوده که باید عدد ۰ را نشان می داد که روش معرفی شده بصورت ۱۰۰ درصد این نواحی را تشخیص داده است. نتایج گروه بندی و کلاس بندی مخزن نشان دهنده این است که گروه ۱ دارای کمترین تراوایی و گروه ۶ دارای بیشترین مقدار تراوایی است.

تشکر و قدردانی

از داوران این مقاله آقایان دکتر بهمن سلیمانی و دکتر علی کدخدایی و دکتر ایمان زحمت کش تشکر می گردد.

منابع

- [۱] رضایی، م. ر.، چهارزی، ع.، ۱۳۸۹، اصول برداشت و تفسیر نگارهای چاه پیمایی، انتشارات دانشگاه تهران، چاپ دوم، ۷۲۲ صفحه.
- [۲] سلحشور، ع.، گائینی، ا.، شاهین، ع.، کمری، م.، ۱۴۰۰، طراحی مدل گروهی تخمین تراوایی مخزن هیدروکربوری با استفاده از نگاره های پتروفیزیکی بر اساس تفکیک لیتولوژیکی، مجله زمین شناسی نفت ایران، شماره ۲۰ دوره ۱۰.
- [۳] محسنی پور، ا.، سلیمانی، ب.، زحمتکش، ا.، ویسی، ا.، ۱۴۰۰، تخمین تراوایی با بکارگیری لاگ های پتروفیزیکی و روش های هوش مصنوعی: مطالعه موردی در مخزن آسماری میدان نفتی اهواز، مجله زمین شناسی نفت ایران، شماره ۲۰ دوره ۱۰.

[۴] AL-ADANI, N., and BARATI, A., ۲۰۰۳, New hydraulic unit permeability approach with DSI. In: *SPWLA 9th formation evaluation symposium, Japan*, pp. ۲۵-۲۶.

- [۵] ANIFOWOSE, F.A., ABDULRAHEEM, A., AL-SHUHAIL, A.A. and SCHMITT, D.P., ۲۰۱۳, March. Improved permeability prediction from seismic and log data using artificial intelligence techniques. In SPE Middle East Oil and Gas Show and Conference. *Society of Petroleum Engineers*.
- [۶] BRIE, A., ENDO, T., JOHNSON, D.L. and PAMPURI, F., ۱۹۹۸, Quantitative formation permeability evaluation from Stoneley waves. In: SPE annual technical conference and exhibition, *Society of Petroleum Engineers*.
- [۷] ELKATATNY, S., MAHMOUD, M., TARIQ, Z., and ABDULRAHEEM, A., ۲۰۱۸, New insights into the prediction of heterogeneous carbonate reservoir permeability from well logs using artificial intelligence network. *Neural Comput Appl*, ۳۰(۹), ۲۶۷۳-۲۶۸۳.
- [۸] JAMALIAN, M., SAFARI, H. and GOODARZI, M., ۲۰۱۸, June. Permeability Prediction Using Artificial Neural Network and Least Square Support Vector Machine Methods. In *80th EAGE Conference and Exhibition 2018*.
- [۹] MOHAGHEGH, S., BALAN, B., and AMERI, S., ۱۹۹۷, Permeability determination from well log data. *SPE Form Eval*, ۱۲(۰۳), ۱۷۰-۱۷۴.
- [۱۰] PEREZ, H.H., DATTA-GUPTA, A., and MISHRA, S., ۲۰۰۵, The role of electrofacies, lithofacies, and hydraulic flow units in permeability predictions from well logs: a comparative analysis using classification trees. *SPE Reserv Eval Eng*, ۸(۰۲), ۱۴۳-۱۵۵.
- [۱۱] RAFIK, B., and KAMEL, B., ۲۰۱۷, Prediction of permeability and porosity from well log data using the nonparametric regression with multivariate analysis and neural network, Hassi R'Mel Field, Algeria. *Egypt Journal of Petroleum*, ۲۶(۳), ۷۶۳-۷۷۸.
- [۱۲] SOLEIMANI, B., MORADI, M., and GHABEISHAVI, A., ۲۰۱۸, Stoneley wave predicted permeability and electrofacies correlation in the Bangestan Reservoir, Mansouri Oilfield. SW Iran, *Geofísica Internacional*, ۵۷(۲), ۱۰۷-۱۲۰.
- [۱۳] VARDIAN, M., NASRIANI, H.R., FAGHIHI, R., VARDIAN, A. and JOWKAR, S., ۲۰۱۶, Porosity and permeability prediction from well logs using an adaptive neuro-fuzzy inference system in a naturally fractured gas-condensate reservoir. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, ۳۸(۳), ۴۳۵-۴۴۱.
- [۱۴] YE, S.J. and RABILLER, P., ۲۰۰۰, A new tool for electro-facies analysis: multi-resolution graph-based clustering. In: SPWLA ۴۱st annual logging symposium. *Society of Petrophysicists and Well-Log Analysts*.

Permeability improvement calculated from Stoneley-FZI method in Kangan reservoir, one of Iran's gas fields

Hossein Rezaie Yegane Dost

Master's student in petroleum exploration, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: July ۲۰۲۲, Accepted: April ۲۰۲۳

Abstract

Permeability originates from porous rock and is regarded as a serious obstacle in the fluid flow. The core analysis and well testing are two most commonly used methods of permeability measurement, but in-vitro measurement of permeability by applying core analysis on all wells in a specific field is very time consuming and costly and even impossible when dealing with Horizontal wells. Wells testing, on the other hand, is not cost-effective due to the reasons such as; High costs and zero production during the testing process. Therefore, according to their low cost, comprehensiveness and availability, permeability estimation methods developed according to conventional logs and DSI diagrams are of critical importance. Taking this into account, in the present study, permeability was first estimated using multi-resolution graph-based clustering (MRGC) and the results were compared with permeability rates obtained from core analysis. In the second stage, permeability was measured by ST-FZI method and the results were compared with permeability rates obtained from core analysis. In the third stage, the multi-resolution graph-based clustering (MRGC) method was used to improve the permeability calculated by the ST-FZI method and overcome the reservoir heterogeneity. First, the flow units were identified, and then the ST-FZI method was applied on each flow unit to calculate permeability and finally the calculated permeabilities were combined to obtain an accurate permeability graph of the studied well. The correlation coefficients of permeability rates estimated via core analysis in the multi-resolution graph-based clustering method ($R^2 = ۷۷$), ST-FZI method ($R^2 = ۴۷$) and improved method ($R^2 = ۸۴$) were measured. The afore-mentioned method was able to improve the permeability calculated in the previous step by ۳۷% and was recognized as the best permeability measurement method in the Kangan reservoir of the well subjected to study.

Keywords: Permeability, Kangan, multi-resolution graph-based clustering (MRGC), ST-FZI method