

## بررسی شیل ها به عنوان منابع نامتعارف

امینه لطفی یار\*، دانشگاه سمنان • علی چهرازی، شرکت نفت فلات قاره ایران • نادر ثابتی، مدیریت اکتشاف شرکت نفت

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخ ارسال نویسنده: ۹۴/۱۲/۱۳

تاریخ ارسال به داور: ۹۴/۱۲/۲۵

تاریخ پذیرش داور: ۹۵/۴/۳

### واژگان کلیدی:

شیل های نفتی/گازی، منابع نامتعارف، ویژگی های شیمیایی، پتروفیزیکی و مکانیکی

در دهه های گذشته با توجه به افزایش قیمت سوخت های فسیلی، بررسی منابع نامتعارف هیدروکربوری به ویژه شیل های نامتعارف از سوی بسیاری از کشورها از جمله ایالت متحده آمریکا مورد توجه قرار گرفته است. شیل ها<sup>۱</sup> سنگ های رسوبی دانه ریزی هستند که در محیط های آرام رسوب می کنند و تخلخل بالا و نفوذپذیری بسیار پایینی در حد نانودارسی دارند. شیل، بسته به مقدار و نوع مواد آلی و میزان پختگی می تواند هم به عنوان شیل نفتی و هم شیل گازی شناخته شود. در مقاله پیش رو خصوصیات این دسته از منابع نامتعارف مرور گردیده است. از نظر خواص شیمیایی، در مقایسه با نفت خام، نفت شیل سنگین و ویسکوز بوده و به علت وجود مقادیر بالای ترکیبات اکسیژن دار و نیتروژن دار، دارای گراوین و ویژه بالا در حدود ۰/۹-۱ است. خواص مکانیکی شیل نفتی تحت تأثیر درجه حرارت بوده و خصوصیات مکانیکی آن در شرایط دمایی مختلف متغیر است. آنالیزهای پتروفیزیکی نمونه های شیلی شامل محاسبه تخلخل، اشباع آب، چگالی و ... بوده که با داده های حاصل از تجزیه مغزه کالیبره می شوند. تکنیک های چاه پیمایی توسعه یافته برای شیل های نفتی، برای شیل های گازی هم کاربرد دارند. شیل های نفتی با استفاده از حفاری سطحی و یا برجا برداشت می شوند. شیل گازی به عنوان سنگ دانه ریز غنی از مواد آلی دارای ذخیره اقتصادی گازی تعریف می شود. گاز می تواند در شکستگی ها، منافذ و یا به صورت جذب شده در سطح رس یا کروژن حضور داشته باشد. شیل های گازی با برانگیختگی از طریق شکستگی برداشت خواهند شد. پارامترهای بررسی شیل های گازی شامل مقدار کل کربن آلی و میزان بلوغ است. وجود شیل های نفتی و گازی در ایران به اثبات رسیده است.

مقدمه

متراکم گازی<sup>۴</sup>، هیدرات های گازی<sup>۵</sup>، متان موجود در بسترهای زغالی<sup>۶</sup> و شیل گازی<sup>۷</sup> است. منابع نفتی نامتعارف شامل شیل نفتی<sup>۸</sup>، مایعات تولیدی از بیومس و مایعات تولیدی از زغال سنگ است. شیل ها بر اساس مقدار و نوع مواد آلی و میزان بلوغ آنها، می توانند هم منبع نفتی و هم گازی باشند.

شیل ها معمولاً سنگ های رسوبی دانه ریز، لایه دار، و غیر کلاستیک می باشند که معمولاً در محیط های آرام نهشته می شوند. ذرات سازنده آنها اغلب رس، کوارتز و مواد آلی هستند. شیل های غنی از رس، لایه لایه هستند. شیل از لحاظ مقدار مواد آلی، به دو دسته غنی از مواد آلی<sup>۹</sup> (سیاه رنگ) و فقیر از مواد آلی<sup>۱۰</sup> (قهوه ای رنگ) تقسیم می شود. مقدار مواد آلی لازم برای شناسایی شیل به عنوان یک منبع نامتعارف حدود ۵ درصد است. همانطور که در شکل ۱- نشان داده شده است [۱]، شیل می تواند هم نقش شیل نفتی و هم نقش شیل گازی را بسته به خصوصیاتی که دارد ایفا کند.

نفت شیل دارای مقادیر بالای ترکیبات اکسیژن دار و نیتروژن دار است. روش برداشت از این منابع با توجه به خصوصیات آنها متفاوت از روش های برداشت منابع متعارف خواهد بود.

مخازن متعارف<sup>۱</sup>، مخازنی هستند که در آنها نیروهای شناوری، عامل اصلی حفظ و تجمع مواد هیدروکربنی در زیر پوش سنگ (سنگ غیر تراوا) است. در این گونه مخازن، مواد هیدروکربنی در سازندهای زمین شناسی متخلخل و تراوا به نام سنگ مخزن محبوس شده و به آسانی، قابل استحصال هستند. منابع نامتعارف<sup>۲</sup> به مخازنی اطلاق می شود که سنگ مخزن آنها نه تنها دارای تخلخل و تراوایی معمول مخازن متعارف نیست، بلکه بسیار سخت و محکم بوده و منشأ مواد هیدروکربوری آن نیز خود سنگ مخزن می باشد. در مخازن متعارف، نیروی پتانسیل سیال و مکانیزم های طبیعی رانش، عامل تولید اولیه از سنگ مخزن آنهاست؛ در حالی که توسعه و تولید اقتصادی از مخازن نامتعارف، نیازمند نیروهای کمکی و فناوری پیشرفته مانند چاه های افقی یا تحریک مصنوعی و هزینه های نسبتاً بالایی است. ضریب بازیافت مخازن نامتعارف، معمولاً بسیار پایین است. با توجه به کاهش تولید از منابع متعارف نفتی و گازی و افزایش تقاضا و قیمت سوخت های فسیلی، منابع نامتعارف توجه زیادی از صنایع نفتی را به خود جلب کرده است. منابع نامتعارف شامل منابع نامتعارف نفتی و منابع نامتعارف گازی است. چهار نوع منابع نامتعارف گازی در جهان وجود دارد که شامل مخازن

\* نویسنده ی عهده دار مکاتبات (dotfiyara@yahoo.com)

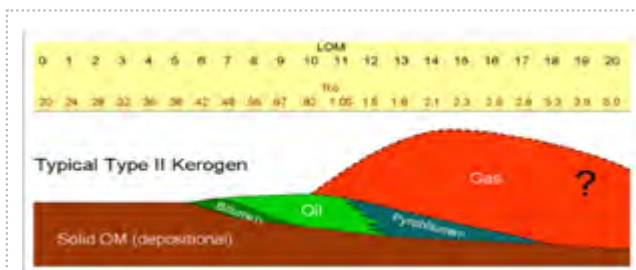
جامد که شامل مخلوطی از ترکیبات کربنی است به مواد هیدروکربنی و باقیمانده کربنی تبدیل می‌شود که پس از سرد شدن، هیدروکربن‌ها به مایعی به نام نفت‌شیل تبدیل می‌شوند. شرایط خاصی برای رسوب و تجمع مواد آلی و غیر آلی که پس از تدفین و دیاژنز تبدیل به شیل نفتی می‌شود، نیاز است. شیل نفتی از رسوب هم‌زمان بقایای کانی‌های دانه‌ریز و مواد ارگانیک حاصل از تجزیه موجودات زنده منتج می‌شود. بنابراین، شرایط لازم برای تشکیل شیل نفتی عبارتند از: وجود مواد آلی فراوان، توسعه سریع شرایط بی‌هوازی و فقدان ارگانسیم‌های مخرب. احتمالاً شیل نفتی در محیط‌های آرام دریایی و آب‌های شیرین مانند حوضه‌های دریایی، دریاچه‌ای و مرداب‌های دلتایی نهشته می‌شود. آب و هوای غالب در شرایط رسوبگذاری شیل‌های نفتی مشابه شرایط آب و هوایی مناسب برای زغال است.

پارامترهای مهم جهت شناسایی و ارزیابی شیل‌ها عبارتند از: میزان تخلخل، نفوذپذیری، مقدار اشباع آب، کانی‌شناسی، مقدار کل کربن آلی و ویژگی‌های ژئومکانیکی و ژئوشیمیایی که با استفاده از داده‌های چاه‌پیمایی و آنالیز مغزه قابل ارزیابی هستند. این ویژگی‌ها به اختصار در جدول ۱- نشان داده شده است [۳].

#### ۱-۱- شیمی شیل نفتی

در مقایسه با نفت خام، نفت‌شیل سنگین و ویسکوز بوده و به علت وجود مقادیر بالای ترکیبات اکسیژن‌دار و نیتروژن‌دار دارای گراویده ویژه بالا در حدود ۱۰/۹ می‌باشد. نفت‌شیل به علت وجود ترکیبات نیتروژن‌دار بوی خاصی داشته که این ترکیبات اثرات مضر در فرآیندهای تجزیه و تخلیص نفت‌شیل به‌جا گذاشته است. دیگر ویژگی‌های نفت‌شیل عبارتند از: ۱- وجود مقادیر بالای اولفین و دی‌اولفین که در نفت خام یافت نشده و این ترکیبات تمایل به پلیمری شدن و تشکیل صمغ دارند، ۲- وجود مقادیر بالای ترکیبات آروماتیکی، ۳- دارای نسبت C/H بالا ۴- دارای سطح سولفور پایین در مقایسه با نفت خام‌های نقاط دنیا، ۵- دارای جامدات معلق و ۶- وجود مقادیر متوسطی از فلزات، که این خصوصیات باعث ایجاد مشکل در شرایط تقطیر شیل نفتی می‌شود.

در واقع ترکیب نفت‌شیل به روشی که تولید می‌شود، بستگی دارد. بیشترین تفاوت که در نفت‌شیل ایجاد می‌شود، به توزیع نقطه جوش مربوط می‌گردد. میزان حرارت و مدت‌زمان آن (نرخ حرارت) نوع تولیدات و مقدار آن را تحت تأثیر قرار می‌دهد. ترکیبات هیدروکربن نفت‌شیل شامل ۲۰٪ آلکان، ۲۰٪ آروماتیک، ۲۵٪ رزین آروماتیکی، ۳۵٪ اولفین و نفتن است [۴]. در مقابل یک نمونه نفت خام شامل ۱۵٪ آلکان، ۵۰٪ آروماتیک‌ها، ۳۵٪ نفتن همراه با مقادیری رزین و اولفین است. اکثراً مقادیر آسفالتین و رزین موجود در نفت‌شیل کم بوده و نمی‌تواند پاسخگوی دلیل تیرگی آن باشد. در مقابل، مقدار نیتروژن بالا بوده و به همان نسبت هم خاکسترش بالاست. نحوه توزیع آلکان‌ها، آروماتیک‌ها و هیدروکربن‌های اشباع در دماهای جوش مختلف، متفاوت است. با افزایش دمای جوش، آلکان‌ها کاهش می‌یابند و



شیل‌های نفتی و گازی. اگر مقدار درصد (سطح دگرگونی آلی)  $Ro=0.2-0.4$  و  $LOM=0-5/7$  باشد، نابالغ است و اگر  $Ro=5.7-10.9$  و  $LOM=5/7-10/9$  باشد در پنجره نفت‌زایی بوده و در صورتی که  $LOM=10/9-20$  و  $Ro=1/2-5$  باشد در پنجره گاززایی خواهد بود، در اینجا  $Ro$  مقدار انعکاس ویتربینایت و  $LOM$  میزان بلوغ مواد آلی می‌باشد و واحد آنها درصد است.

#### ۱- شیل نفتی

شیل نفتی سنگ رسوبی بسیار دانه‌ریز با تخلخل غیرمفید بالا و تراوایی کم بوده که دارای مقداری مواد آلی (کروژن) است. گاوین (۱۹۷۶) شیل نفتی را یک سنگ فشرده دارای لایه‌بندی از منشا رسوبی دانسته که بیش از ۳۳ درصد خاکستر دارد و حاوی مواد آلی نیز می‌باشد که در اثر تقطیر نفت تولید خواهد کرد اما زمانی که با محلول‌های معمولی خارج می‌شود مقدار آن قابل توجه نخواهد بود. در تمایز بین شیل نفتی و زغال چنین به نظر می‌رسد که ترکیبی که کمتر از ۳۳ درصد خاکستر را تولید کند زغال<sup>۱۱</sup> در نظر گرفته می‌شود. شیل نفتی از لحاظ ترکیب شامل مواد آلی قابل حل (بیتومن<sup>۱۲</sup>) و غیرقابل حل (کروژن<sup>۱۳</sup>) و مواد غیر آلی است که به‌ندرت نسبت مواد آلی به مواد غیر آلی به یک چهارم می‌رسد [۲]. مواد غیر آلی شیل، ذرات در اندازه سیلت هستند که عمدتاً از کوارتز و رس تشکیل شده‌اند و برخی از شیل‌های نفتی در واقع سیلتستون‌ها و گل‌های غنی از مواد آلی می‌باشند. بیشتر مواد آلی موجود در شیل‌های نفتی بقایای جلبک و اسپورهای جلبکی است. شیل‌های نفتی عمدتاً دارای کروژن I می‌باشد که عموماً از مواد جلبکی با لیپید بالا تشکیل شده است و در برخی از آنها کروژن II و از خرده‌های گیاهان آوندی تشکیل شده است.

زمانی یک شیل را شیل نفتی می‌نامیم که مقدار مواد آلی و میزان پختگی آن در حد قابل قبولی باشد. میزان پختگی بر اساس داده‌ها، حاصل از تجزیه‌ها و پیرولیزهای ژئوشیمیایی بررسی می‌شود که مهمترین آنها مقدار  $T_{max}$  (حداکثر دمایی که در آن حداکثر تولید را در طول پیرولیز راک-اول داریم) و مقدار  $Ro$  می‌باشد. شیل نفتی دارای  $Ro$  در حدود  $0.2-0.4$  درصد و مقدار  $LOM$  (مقدار مواد آلی) آن در حدود  $5/7-10/5$  درصد است [۱]. شیل نفتی در واقع حاوی نفت نبوده بلکه از مواد هیدروکربنی قابل حل و یا غیر قابل حل (بیتومن) در حلال‌های آلی (کروژن) تشکیل شده است که معمولاً با عملیات شیمیایی پیرولیز به مواد نفتی تبدیل می‌شوند. بیتومن قابل حل حدود ۲۰ درصد از این مواد آلی را تشکیل داده و مابقی از کروژن تشکیل می‌شود. هنگامی که دما به ۴۷۰ درجه سانتی‌گراد برسد این کمپلکس

### ۱-۳- ارزیابی شیل‌های نفتی با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی

بررسی‌های پتروفیزیکی نمونه‌های شیلی شامل تفسیر نگارهای چاه‌پیمایی و پارامترهای سیال بوده که با داده‌های حاصل از تجزیه مغزه کالیبره شده است. طبق مطالعات انجام شده، تکنیک‌های چاه‌پیمایی توسعه یافته برای شیل‌های نفتی برای شیل‌های گازی هم کاربرد دارد. نگارهای چاه‌پیمایی مختلفی برای ارزیابی رسوبات شیل نفتی مانند تغییرات لیتولوژی، ضخامت وجود دارد که در ادامه به طور مختصر به برخی از آنها اشاره می‌شود.

۱- نگار قطرسنجی<sup>۴</sup>: تغییرات قطر چاه را به صورت تغییر ولتاژ نشان می‌دهد. اغلب در محل شیل در ابتدا به دلیل جذب آب توسط رس موجود در آن و متورم شدن آن کاهش قطر را خواهیم داشت و سپس در اثر ریزش در محل شیل افزایش قطر را داریم.

۲- نگار اشعه گاما<sup>۵</sup>: نگار گاما به‌عنوان نگار لیتولوژی در اینجا به کار می‌رود و برای شناسایی لایه‌های شیلی و یا کانی‌های سنگین رادیو اکتیو استفاده می‌شود. در واقع شدت اشعه گامای طبیعی ساطع شده توسط سازند را اندازه‌گیری می‌کند.

۳- نگار چگالی<sup>۶</sup>: چگالی الکترون را اندازه‌گیری می‌کند. چگالی الکترون به‌دست آمده، به‌طور مستقیم در ارتباط با چگالی کل بوده و تابعی از ترکیب کانی‌شناسی، ماتریکس سنگ، تخلخل سازند و چگالی سیال یا محتوی گاز منافذ می‌باشد. از مقادیر به‌دست آمده برای تخمین تخلخل استفاده می‌شود.

۴- نگار نوترون: هدف اساسی نگار نوترون، اندازه‌گیری میزان فراوانی اتم‌های هیدروژن در سازندها یا فراوانی نسبی نوترون‌های اپی-ترمال رسیده به آشکارگر بوده و آنچه به‌دست می‌دهد، نگار تخلخل است.

۵- سنجش با غشای داغ<sup>۷</sup>: این تکنیک توسط دفتر ایالت متحده ثابت شده است که ابزار مناسبی برای ارزیابی مقدار شیل برجا و آزمایش‌های استخراج از معادن زیرزمینی است. با استفاده از این روش می‌توان محل شکستگی‌های شیل نفتی را مشخص و ارزیابی نمود. به‌علاوه با استفاده از این روش می‌توان ویژگی‌های جریان راقبل و بعد از تحریک مصنوعی و نیز بعد از تقطیر تعیین کرد.

۶- نگار رسانایی-القایی<sup>۸</sup>: میزان هدایت سازند را اندازه‌گیری می‌کند. از آنها جهت اندازه‌گیری مقاومت واقعی سازند استفاده می‌شود.

۷- سونیک و مقاومت<sup>۹</sup>: استفاده هم‌زمان از این دو برای محاسبه مقدار مواد آلی با استفاده از DlogR می‌باشد. هرچه میزان جدایی این دو نگار از هم بیشتر باشد، مقدار مواد آلی بیشتر خواهد بود.

۸- نگار رزونانس مغناطیسی و چگالی<sup>۱۰</sup>: که برای محاسبه مقدار تخلخل کروژن استفاده می‌شود.

۹- مجموعه ژئوشیمیایی، کانی‌شناسی و سونیک برای ارزیابی ویژگی‌های ژئومکانیکی بر جای سنگ استفاده می‌شوند.

### ۱-۴- روش‌های پیش‌بینی مقدار کل کربن آلی

در جدول ۲، به‌صورت خلاصه تکنیک‌هایی که برای پیش‌بینی درصد

آروماتیک‌ها (که شامل آروماتیک‌های ۱، ۲ و ۳ حلقه‌ای است) به آرامی افزایش می‌یابند. مقدار اکسیژن موجود در نفت شیل معمولاً در دماهای مختلف شکست حرارتی، متفاوت بوده و عموماً با افزایش دمای جوش مقدار آن افزایش پیدا می‌کند. ترکیبات نیتروژن‌دار نفت شیل را می‌توان به سه دسته، ترکیبات نیتروژن‌دار بنیادی (شامل پیریدین، اکینولین، آکریدین، آمین و مشتقات)، بنیادی ضعیف (پیرول، ایندول، کربازول و مشتقات آن) و غیر بنیادی (نیتریل و هومولوگ‌های آمید) تقسیم کرد. ترکیبات نیتروژن‌دار در پایداری شیل موثر بوده و اثرات مضر در فرآیندهای تولید دارند که البته نحوه‌ی ایجاد این اثرات شناسایی شده است.<sup>[۴]</sup>

### ۱-۲- خواص مکانیکی شیل‌های نفتی

بررسی‌های انجام شده نشان دهنده این امر است که محتوای مواد آلی و شیل نفتی با نسبت پواسون رابطه مستقیم دارد، در حالی که مقاومت کششی و فشارشی با مدول الاستیسیته رابطه منفی را نشان می‌دهد. این خواص تحت تأثیر درجه حرارت هستند. افزایش درجه حرارت، به‌صورت کاهش مدول یانگ و مقاومت (به‌صورت لگاریتمی) دیده می‌شود. غالباً در شرایط افزایش حرارت، خزش هم مشاهده می‌شود. کرنش حجمی به تخلخل اولیه، محتوای مواد آلی و کانی‌شناسی بستگی دارد. بررسی خصوصیات مکانیکی با شرایط دمایی، برای بهره‌برداری برجا و مدل‌سازی حوضه مورد نیاز است. بهره‌برداری با تقطیر زیرزمینی از طریق اندازه‌گیری ویژگی‌های مکانیکی در دماهای بالا ایجاد شده که داده‌های مربوط به دماهای بالا به‌دلیل پیچیدگی رفتار شیل‌ها در این دماها و نیز محدودیت فناوری‌های مربوط به آزمایش‌های دماهای بالا دارای فراوانی کمی است. در شیل‌های نفتی منافذ یا توسط گاز و یا رطوبت پر شده است که در اثر افزایش دما، آب‌های مختلف (مرزی یا آزاد) و نیز هیدروکربن‌های سبک تبخیر شده و در دماهای بالاتر کروژن شروع به تغییر شکل کرده و در نهایت تجزیه می‌شود که تغییر شکل کروژن بیشتر از دیگر کانی‌هاست. بیتومن حاصل از کروژن با توجه به نحوه‌ی توزیع کروژن و محل قرارگیری آن نسبت به منافذ، شروع به جریان کرده و باعث کاهش بخشی از فاز قابل حمل خواهد شد که این کاهش فاز قابل حمل با کاهش نیروی کششی، فشارشی و مدول الاستیسیته همراه خواهد بود. در شیل نفتی ترکیباتی مانند فاکولیت و لائوسونیت وجود دارد که در دمای کمتر از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد تجزیه شده و منجر به تغییر در مقدار تخلخل کل و فشار منفذی می‌شود. پیچیدگی‌های زیادی برای ارزیابی خصوصیات مکانیکی وجود دارد، با این وجود چند روند کلی مشاهده می‌شود:

۱- مدول الاستیکی، مقاومت و سرعت‌های صوتی با افزایش درجه حرارت کاهش پیدا می‌کند و کروژن بسیار نرم‌تر از دیگر کانی‌های سازند شده که در نهایت، در دماهای بالاتر به هیدروکربن و مواد باقی‌مانده تجزیه می‌شود. ۲- مقاومت و سرعت‌های صوتی با افزایش فشار محصور کننده افزایش پیدا می‌کند.<sup>[۵]</sup>

هستند):

$$A/\rho_{\text{core}} - B = \text{TOC}(\% \text{wt})$$

۳- روش رگرسیون: از رابطه مستقیم کراس پلات مقدار وزنی TOC مغزه از طریق جای گذاری فرمول مربوط به پیش‌بینی کل کربن آلی استفاده می‌شود. بر اساس رابطه موجود در رگرسیون خطی داده‌ها، فرمول زیر را برای چگالی کل خواهیم داشت:

$$\text{TOC}(\% \text{wt}) = -13.24_{\text{pb-log}} + 35.39$$

روش رگرسیون و اشموکر (برای چگالی استفاده می‌شوند) به علت اینکه هم مقدار چگالی هم کل کربن آلی با وضوح یکسانی از داده‌های مغزه به دست می‌آید، دارای کیفیت بالاتری خواهد بود. در شکل-۲، این سه روش باهم نشان داده شده‌اند [۷].

#### ۱-۵- روش‌های برداشت از شیل نفتی

باتوجه به خصوصیات متمایزی که منابع نامتعارف نسبت به متعارف‌ها دارند، روش برداشت از آنها نیز متفاوت خواهد بود. روش‌های برداشت از منابع نامتعارف عبارتند از: حفاری سطحی و حفاری برجا.

**الف- حفاری سطحی:** در این روش، شیل نفتی را به روش سنتی استخراج کرده و پس از انتقال به ساختمان‌های ویژه‌ی فرآیند، تا دمای ۴۵۰-۵۰۰ درجه سانتی‌گراد حرارت می‌دهند. در این

وزنی کل کربن آلی با استفاده از چاه‌پیمایی وجود دارد، اشاره شده است [۶] که در ادامه، به‌طور خلاصه به بررسی سه روش اصلی آنها خواهیم پرداخت.

۱- روش اصلاح شده‌ی پاسی و همکارانش (۱۹۹۰): در این روش یک ضریب (C) بزرگتر از یک به معادله تجربی اصلی پاسی جهت جبران محدودیت آن اضافه می‌شود که مقدار آن تابعی از بلوغ می‌باشد:

$$\text{TOC} = \Delta \log R * 10^{(2.297 - 0.1688 * \text{LOM}) * C}$$

در اینجا  $\Delta \log R$  میزان جدایی نمودار سونیک و نمودار مقاومت است. LOM سطح دگرسانی مواد آلی و C ضریب بزرگتر از ۱ می‌باشد که این ضریب، تابعی از ضریب انعکاس ویتروینایت است.

۲- روش اشموکر (۱۹۸۳): این روش از رابطه بین مقدار کل کربن آلی (TOC) و عکس چگالی کل ( $\rho_{\text{core}}$ ) به صورت فرمول زیر استفاده می‌کند. این روش چگالی کل، برای مخازنی که دارای فاز سیال مشابه و کانی‌شناسی ثابت هستند، مناسب است. به‌عنوان مثال اگر از این روش در مخزنی که دو قسمت آن دارای کانی‌شناسی متفاوتی هستند، استفاده شود، مقدار TOC تخمین زده شده در آنها با استفاده از این روش متفاوت خواهد بود. این روش از رابطه بین مقدار TOC و عکس چگالی کل به صورت زیر استفاده می‌کند (A و B ثابت‌های وابسته به کانی‌شناسی

خلاصه روش‌های تخمین کل کربن آلی با استفاده از نگارها



Method	Description	Reference
Spectra GR-Uranium Enrichment	Linear relationship of Uranium (ppm) to organic carbon content for Appalachian Devonian black Shale	Fertl and Rieke, 1980., Fertl and Chilinger, 1988., Guidry and Walsh, 1993.
GR Intensity	Derivation of TOC volume from total GR intensity	Fertl and Chilinger, 1988.
Bulk Density	Empirical relationship of Bulk Density to TOC weight percent	Schmoker, 1979., Schmoker and Hester, 1983.
Gamma Ray Intensity-Formation Density	Derivation of a TOC volume from the relationship of GR intensity and formation in a Devonian black Shale of the Appalachian basin	Schmoker, 1981.
Delta Log R Passey's Modification	Scaled porosity log – resistivity overlay method A multiplier greater than 1 was introduced to original Passey empirical equation to compensate for its limitation.	Passey et al., 1990. Sondergeld et al., 2010.
Neural Networks	Usage of conventional well logs to predict TOC	Rezaee et al., 2007.
Rezaee et al., 2007.	Pulsed – Neutron mineralogy and Spectral Gamma Ray methodology used to discriminate excess carbon	Pulsed – Neutron mineralogy and Spectral Gamma Ray methodology used to discriminate excess carbon

می شود، تا دمای آن به ۶۵۰-۷۰۰ درجه فارنهایت برسد. در این درجه حرارت نفت از شیل جدا می شود. محصولات آزاد شده در چاه های گردآوری که در نزدیک محل حرارت دهی است، جمع آوری می شود. شرکت نفتی شیل<sup>۲۳</sup> تکنیکی جدید موسوم به طرح پژوهشی ماهوگانی<sup>۲۴</sup> را ارائه داده است که در آن، یک دیوار یخی در اطراف محیط حفاری ایجاد می شود. این دیوار یخی از ورود آب های زیرزمینی به منطقه حفاری ممانعت کرده و هیدروکربن ها و سایر محصولات که توسط این فرآیند تولید می شود، باقی می ماند. روش شیل هنوز در مقیاس تجاری استفاده نشده اما به عنوان یک روش خوش آتیه در نظر گرفته شده است. روش جایگزینی که فورسبرگ<sup>۲۵</sup> برای حرارت دهی پیشنهاد می کند، استفاده از رآکتور اتمی به جای حرارت دهنده الکتریکی است که باعث کمتر شدن هزینه ها و کمتر شدن تولید گازهای گلخانه ای می شود. در این صورت، نیاز به تولید الکتریسیته از سوخت فسیلی از سوخت های فسیلی از بین رفته و دی اکسید کربن کمتری تولید می شود. روش دیگری که اخیراً معرفی شده است، روش In-Capsule technology می باشد. این روش ترکیبی از دو روش استخراج برجا و روش حفاری برجاست که در آن، سنگ به روش سنتی به داخل یک کپسول رسی حفاری می شود. سپس، گاز طبیعی به یک مدار لوله لوپ پمپ می شود. برای استخراج کروژن، سنگ موجود در کپسول تا دمای ۴۵۰ درجه سانتی گراد گرم می شود. این روش چنین ادعا می کند که از هیچ پردازش آبی استفاده نکرده و از آب های زیرزمینی و پوشش های گیاهی محافظت می کند. همه مراحل این فرآیند حدود ۹۰ روز به طول می انجامد [۹].

#### ۱-۶- معایب و محاسن شیل نفتی

از محاسن شیل نفتی که باعث جذابیت آنها می شود، می توان به موارد زیر اشاره کرد:

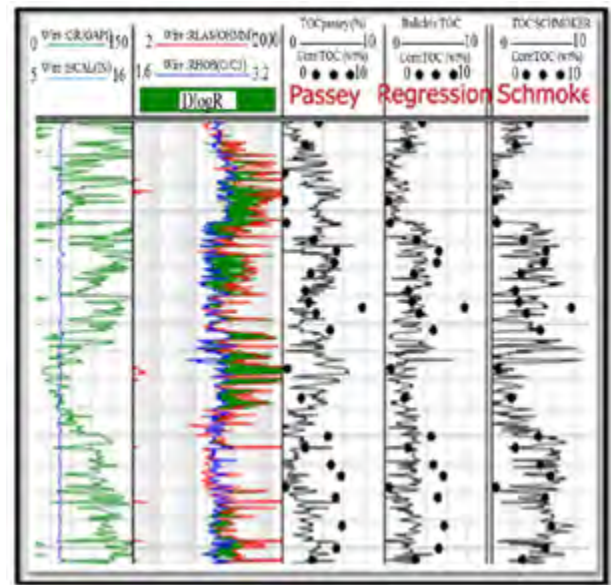
۱- منابع آن گسترده است که بیشترشان شناسایی شده اند. ۲- بیشتر شیل های نفتی در عمق کمی قرار دارند (کمتر از ۲ کیلومتر) و بنابراین برای بهره برداری از آنها به ماشین آلات پیچیده نیاز نیست.

و از معایب آن هم می توان موارد زیر را نام برد:

۱- پالایش نفت شیل با توجه به سنگین بودن آن سخت تر و پرهزینه تر است و میزان بازدهی آن کمتر از شرایط متعارف خواهد بود. ۲- فراوانی نفت خام نسبت به نفت شیل باعث ارجحیت نفت خام می شود. ۳- ارزش حرارتی کم نفت شیل در مقایسه با نفت خام.

#### ۱-۷- شیل نفتی در ایران

شیل های نفتی در مناطق مختلف جهان توزیع شده و بیشترین آنها در ایالت متحده وجود دارد. تا سال ۲۰۰۷ کشورهای برزیل، استونی و چین اقدام به استخراج شیل نفتی کرده اند. براساس اعلام مدیریت اکتشاف،



شکل ۲ | مقایسه روش های پیش بینی کل کربن آلی با استفاده از نگارهای چاه پیمایی. نمودارهای پیوسته نتایج حاصل از پیش بینی بوده و نقاط مشکی نتایج مغزه است

روش، نفت شیل با هیدروژن غنی می شود و نفت حاصل از آن را از مواد زائد جدا می کنند. در فناوری جدید که به کمک کریستال های قیر انجام می شود، شیل نفتی را کمتر حرارت می دهند. از کربن غنی موجود در مواد زائد، در طرح های تولید الکتریسیته استفاده می شود. هر چه هیدروژن سبکتر و غنی تر باشد، مقدار کروژن پالایشی بیشتری پس از کامل شدن فرآیند کاتالیستی حاصل می گردد. پس از پالایش، شیل باقی مانده به محل اولیه برده و در آنجا رها می گردد. پیشرفت ها و آزمایش های بیشتری در این زمینه لازم است تا در مقیاس اقتصادی به کار گرفته شود. بر اساس تنوع اندازه ذرات، این روش به دو دسته تحت عنوان فرآیند شیل کلوخه ای<sup>۲۱</sup> و فرآیند شیل دانه ای تقسیم بندی می شود. پس از مقایسه این فناوری ها این نتیجه حاصل شده است که فرآیند شیل دانه ای<sup>۲۲</sup> با محیط سازگارتر بوده و دارای هزینه کم تر و بازدهی بیشتر می باشد [۸].

ب- حفاری درجا: شامل حرارت دادن شیل نفتی در زیر زمین با استفاده از حرارت دهنده های الکتریکی است که به طور متوسط در هر ۴۰۰۰ متر مربع ۱۵-۲۰ حرارت دهنده الکتریکی در داخل چاه های عمیق در داخل زمین قرار می گیرد. این روش به حفاری تعداد زیادی چاه نیاز داشته و نیز مستلزم وجود انرژی ورودی زیادی نیز برای تبدیل کروژن به سیال قابل انتقال است. این روش تلاش دارد که در عین حفظ بالا بودن مقدار خروجی انرژی، میزان خسارت زیست محیطی را نیز کاهش دهد. حجمی از شیل نفتی در یک دوره ۲-۳ ساله حرارت داده

اصلاحات، برای مخازن شیل گازی که بلوغ حرارتی بالایی را نشان می‌دهند، نیز به کار می‌روند ( $Ro=1.1-4$ ).

گاز می‌تواند در شکستگی‌ها، منافذ و یا به صورت جذب شده در روی سطح رس یا کروژن حضور داشته باشد. هرچه منافذ بزرگ‌تر باشد میزان گاز آزاد بیشتر از گاز جذب شده خواهد بود. کوچک بودن ذرات شیل به مفهوم کوچک بودن منافذ خواهد بود. منافذ در شیل‌ها به صورت مسطح و یا شیار مانند می‌باشد. با استفاده از فرمول‌های زیر می‌توان مقادیر گاز بر جا و جذب شده را محاسبه نمود.

$$GIP=C*Ah\Phi*(1-Sw)/Bg$$

-مقدار گاز در جا<sup>۲۸</sup>:

در اینجا C ضریب واحد است و  $Bg, Sw, \Phi, h, A$  به ترتیب مساحت (مترمربع)، ارتفاع (متر)، تخلخل (درصد)، اشباع شدگی آب (درصد)، و فاکتور حجم سازندی می‌باشند. هر چه فشار، تخلخل و  $Sg$  و مساحت بیشتر باشد، مقدار گاز در جا نیز بیشتر خواهد بود [۳].  
-حجم گاز جذبی: جهت محاسبه حجم در جای گاز ذخیره شده به صورت جذبی از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$G=1359.7 V_B * V_B * G_C$$

که در آن، G مقدار گاز در جای اولیه بر حسب  $V_B, scf$  حجم بالک سنگ مخزن بر حسب Acre-ft، چگالی متوسط بالک سنگ مخزن بر حسب گرم بر سانتی متر مکعب و  $G_C$  محتوای گاز جذب شده است:

$$G_C=V_L * P / (P+P_L)$$

مقدار گاز جذب شده:

در این فرمول:  $G_C$  محتوای گاز جذب شده است  $P, P_L, V_L$  و به ترتیب حجم لانگ مور ( $m^3/tonne$ )، فشار لانگ مور (کیلو پاسکال) و فشار مخزن (کیلو پاسکال) می‌باشند [۱۱]. جذب شدن گاز یک فاکتور سطحی است. مقدار گاز جذب شده تابعی غیرخطی از فشار بوده و به دما و رطوبت نیز وابسته است [۱۲]. کروژن دارای جذب بالایی است، رس مرطوب جذب متوسط بوده و کوارتز، کلسیت و دولومیت جذبشان صفر است. کروژن همچنین یک محیط قلیایی را ایجاد می‌کند که باعث جذب اورانیوم در آن هم می‌شود و در نتیجه، در محل آن گاما افزایش نشان می‌دهد.

از نظر ژئوشیمیایی لایه‌هایی را می‌توان به عنوان شیل گازی در نظر گرفت که دارای ویژگی‌های زیر باشد:

- ۱- دارای مقدار TOC ۰/۵ تا ۲ درصد وزنی را به عنوان شیل گازی می‌شناسند.
- ۲- از نظر پختگی وارد مرحله گاززایی شده باشد و  $Ro < 1.3$  را تجربه کرده باشد که این معادل  $T_{max} 457$  درجه است.
- ۳- مقدار پارامتر شاخص تبدیل<sup>۲۹</sup> در این لایه‌ها بین ۸۰-۸۵ درصد باشد [۱۳].

## ۱-۲- پارامترهای کلیدی ارزیابی شیل گازی

از جمله پارامترهایی که برای ارزیابی شیل‌های گازی به کار برده می‌شود، می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

- کل کربن آلی ( $w_t\%$ ): با استفاده از نگارهای چاه‌پیمایی مختلف و یا

برای اکتشاف نفت نامتعارف بررسی‌های زمین‌شناسی در سال ۱۳۳۴ در منطقه البرز جنوبی و در سال ۱۳۵۴ در قالیکوه و زردکوه لرستان انجام گرفته است. با آزمایش‌های به عمل آمده از شیل نفتی در این منطقه مشخص شده است که عیار نفت منابع مذکور بیش از متوسط جهانی بوده اما به علت صعب‌العبور بودن مناطق فوق و هزینه‌های بالای تولید، استخراج و تولید از این منابع در حال حاضر در اولویت نمی‌باشد. در زمینه برآورد حجم این ذخایر، طبق برآورد اولیه انجام شده در سال ۱۳۳۴ توسط شرکت آمریکایی TOSCO، حجم ذخیره قابل استحصال مقدار قابل توجهی اعلام شده است. هم‌اکنون پروژه‌هایی برای برآورد حجم برجای این ذخایر در مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت، تعریف شده است [۱۰].

## ۲- شیل گازی

شیل‌ها همانگونه که در شکل ۱- نشان داده شده بر مبنای میزان پختگی می‌توانند هم به عنوان شیل نفتی و هم گازی عمل کنند. شیل گازی را می‌توان به عنوان سنگ دانه‌ریز غنی از مواد آلی که دارای ذخیره اقتصادی گازی باشد، تعریف نمود. سازندهای شیل گازی معمولاً نازک و دارای گسترش زیادی هستند که دارای تخلخل پایین بوده و برای داشتن تولید اقتصادی از آن ایجاد شکستگی ضروری است. در حال حاضر بیشتر تولیدات مخازن شیل گازی از سنگ منشأهای فوق بالغ حاوی کروژن نوع I و II است. مخازن شیل گازی دارای حداقل کل کربن آلی ۰.۵-۲ درصد می‌باشد. مخازن شیل گازی دارای دوره تولید طولانی با افت کم است که حدود ۲۵-۸۰ سال به طول می‌انجامد. پارامترها و خصوصیات کلیدی برای بررسی کیفیت شیل گازی شامل کل کربن آلی<sup>۲۶</sup>، سطح بلوغ ( $Ro$ )، کانی‌شناسی (رس و کوارتز<sup>۲۷</sup>)، ضخامت و گسترش محیطی، تخلخل و میزان اشباع گاز (فاز آزاد و جذب شده)، نوع مواد آلی (OMT) است. مطالعات اخیر نشان می‌دهد که اغلب سازندهای شیل گازی غنی از مواد آلی دارای ضخامت ناخالص در حدود صدها متر است که تنوع عمودی آنها از نظر غنای مواد آلی و کانی‌شناسی حتی در لایه‌های عمودی کوچک هم می‌تواند تغییر کند. ناهمگنی‌های عمودی مشاهده شده را می‌توان به شرایط زمین‌شناسی و حیاتی زمان رسوب‌گذاری آنها ارتباط داد. [۱] عنوان کرده‌اند که تجمع سنگ‌های غنی از مواد آلی تابع فرایندهای زیادی است که می‌توان آنها را در سه فرایند کنترل‌کننده مهم که شامل نرخ تولید، میزان انحلال پذیری و نرخ تخریب مواد آلی است، خلاصه کرد. معمولاً سنگ‌های غنی از مواد آلی در سه بخش فیزیوگرافی قلمرو دریایی که عبارتند از حاشیه قاره، فلات قاره و شیب قاره، تجمع حاصل می‌کنند. بسیاری از تکنیک‌های ژئوشیمیایی و پتروفیزیکی برای توصیف سنگ منشأ در پنجره نفتی ( $Ro=0.5-1$ ) توسعه یافته‌اند و گاهی با انجام برخی

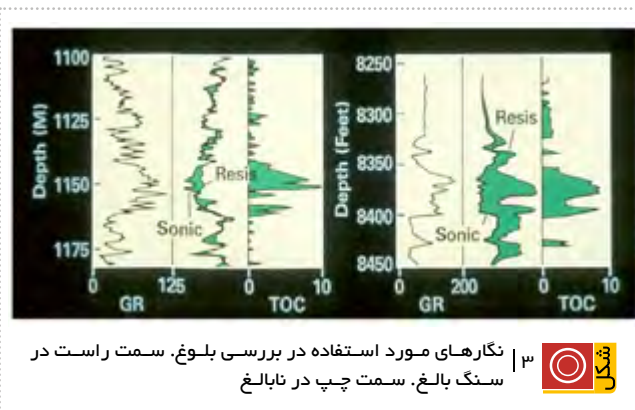
- حجم گاز جذب شده و گاز آزاد: حجم گاز جذب شده تابعی از محتوای کروژن، فشار منفذی و حرارت است.  
 - تراوایی (استفاده از جریان پایدار پیشنهاد می‌شود).  
 - لیتولوژی و مینرالوژی: استفاده از تجزیه‌های XRF/XRD و مقاطع نازک، برای بررسی آن قابل استفاده است. همچنین FTIR برای شناسایی ۱۶ نوع کانی موجود در سنگ‌های رسوبی مناسب می‌باشد. مهمترین کانی مورد توجه در ارزیابی شیل‌های گازی محتوای رس آن است. کانی رسی بر مبنای نوع آن می‌تواند تأثیرات متفاوتی بر ویژگی‌های پتروفیزیکی شیل از جمله تخلخل نوترون، سرعت امواج سونیک و اشعه گاما داشته باشد.  
 - ویژگی‌های ژئو مکانیکی (مدول یانگ و ضریب پواسون)

## ۲-۲- شیل گازی در ایران

در سال ۱۳۹۰، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران پی‌جویی‌های مقدماتی منابع شیل گازی را در حوضه‌های رسوبی زاگرس، کپه داغ و ایران مرکزی به اتمام رسانده است. این مطالعات سازندهای گرو و سرگلو در بخش مرکزی ناحیه زمین‌شناسی لرستان را به‌عنوان مناطق پیشنهادی برای بررسی‌های تفصیلی پیشنهاد کرده است. سازند گرو دارای مقدار TOC خوبی بوده و توان هیدروکربورزایی نسبتاً خوبی را بر اساس نمونه‌های چاه نشان می‌دهد و دارای کروژن نوع III و II/III می‌باشد. از نظر Tmax در تولید میعانات گازی قرار دارد. سازند سرگلو نیز دارای مقدار TOC خوبی بوده و دارای کروژن نوع III می‌باشد و از نظر Ro وارد مرحله گاززایی شده است. همچنین سازند کژدمی در دزفول شمالی دارای توان هیدروکربورزایی خوبی می‌باشد.

## نتیجه‌گیری

با توجه به تخلخل و تراوایی پایین، مقدار بازدهی کم و هزینه بالای شیل‌های نفتی و گازی، در کشورهای دارای منابع متعارف کمتر به این منبع توجه می‌شود. البته در دهه‌های اخیر، در ایالات متحده آمریکا با توجه به افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی اقدام به برداشت از آن شده است. بنابراین، در واقع برداشت از منابع نامتعارف شیل‌ها به قیمت سوخت و وجود فناوری وابسته است. وجود ترکیبات نیتروژن‌دار و اکسیژن‌دار باعث ایجاد ویژگی‌های خاص از جمله گراوایته و بوی خاص در نفت شیل می‌شود. حرارت هم می‌تواند بر روی مقدار گاز جذب شده در شیل‌های گازی و هم بر روی خواص مکانیکی موثر باشد. در شیل‌های نفتی برداشت برجا دارای مزایای بیشتری نسبت به برداشت سطحی می‌باشد. نوع شیل بر مبنای نوع رس آن و نوع کروژن بر روی میزان گاز جذب شده در شیل گازی موثر خواهد بود. امروزه وجود شیل نفتی در دزفول شمالی و غرب ایران به اثبات رسیده است. ■



از طریق تجزیه‌های آزمایشگاهی مقدار آن ارزیابی می‌شود.  
 - بلوغ: بلوغ یکی از پارامترهای مهم ارزیابی شیل‌های نفتی است که می‌توان آن را طریق داده‌های ژئوشیمیایی و نگاربرداری مورد بررسی قرار داد. همانطور که در شکل ۳- مشاهده می‌شود [۱۴]، در سنگ نابالغ ( $Ro < 0.5$ ) نگار گاما دارای نامنظمی بالایی بوده در حالی که در سنگ بالغ ( $Ro = 1$ ) این نامنظمی خیلی کم است و نیز میزان جدایی ( $\Delta \log R$ ) نگار مقاومت و سونیک در سنگ بالغ بالا بوده و در نتیجه TOC بیشتری را نشان خواهد داد، در حالی که این دو نگار در سنگ نابالغ کاملاً نامنظم بوده و جدایی کمی را از خود نشان می‌دهند. از جمله پارامترهای ژئوشیمیایی می‌توان به پارامترهایی از جمله ضریب انعکاس و یترنایت، بیومارکرهای شاخص بلوغ، ایزوتوپ‌های کربنی مرتبط با بلوغ، اشاره نمود.

- پارامترهای ژئوشیمیایی (نوع هیدروکربن و کیفیت آن): از طریق نمودارهای  $HI/OI$  و یا نسبت اتمی اکسیژن به هیدروژن می‌توان نوع کروژن را تعیین کرد. از Tmax و دیگر پارامترها نیز برای ارزیابی‌های دیگری چون میزان بلوغ می‌توان بهره برد.  
 - تخلخل کل: با استفاده از روش خرد کردن نمونه سنگی و نیز بر مبنای داده‌های نگارهای نوترون، سونیک و چگالی می‌توان برای ارزیابی تخلخل استفاده نمود.

- آب اشباع شدگی<sup>۳۲</sup>: در ارزیابی سازندهای شیلی فرمول‌های مختلفی به کار برده می‌شود که ممکن است نتایج آنها هیچ شباهتی به هم نداشته باشد. ورتینگتن معادلات و مدل‌های مختلف در مورد اشباع شدگی سازندهای شیلی را به دو گروه اساسی تقسیم کرد: ۱- مدل‌هایی که بر اساس درصد حجم شیل بنا شده‌اند. این مدل‌ها از لحاظ علمی دقیق نیستند و مزیت آنها این است که تمام پارامترهای لازم را می‌توان از داده‌های نگار به دست آورد. ۲- مدل‌هایی که بر اساس پدیده‌های دو لایه‌ای یونی بنا شده‌اند از لحاظ علمی قابل قبول‌ترند. برای استفاده از این مدل‌ها لازم است که پارامترهای وابسته به شیل توسط مغزه در مقابل بعضی کمیت‌های پتروفیزیکی قابل حصول در نگارها، کالیبره شود [۱۵].

1. shale	12. bitomen	22. Particulate Shale Process
2. Conventional reservoir	13. kerogen	23. Shell
3. Unconventional reservoir	14. Caliper	24. Mahogany Research Project
4. Tight gas	15. Gamma Ray	25. Forsberg
5. Hydrate Gas	16. Density Log	26. Total organic carbon
6. Coal Bed Methan	17. Hot-Film Anemometry	27. Clay & Quartz
7. Gas shale	18. Conduction-Induction Logs	28. Gas in place
8. Oil shale	19. Sonic and Resistivity Cross-Plot	29. Gas storage capacity
9. Organic rich	20. Density and Magnetic Resonance	30. Transformation Rate
10. Organic lean	Logs	31. Hydrogen Index versus Oxygen Index
11. coal	21. LumpShaleProcess	32. Water saturation

- [1] Passey, Q.R., Bohacs, K.M., Esch, W.N., Klimentidis, R., Sinha, S., Geologic and petophysical characterization of shale gas reservoir", Adapted from 2011-2012 AAPG Distinguished Lecture for AAPG European Region.
- [2] Yen, T.F., Chilingrarian, G.V., 1976, Development Of Petroleum Science- OIL SHALE, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam-Oxford-NewYork, pp.1-12, 81-99, 149-155.
- [3] Cluff, B., How To Assess Shale From Well Logs, A Petrophysicists Perspective, 2012, The Discovery Group Inc. Denver Colorado. IOGA 66th Annual meeting Evansville.
- [4] Gua, S.H., The chemistry of shale oil and its refining, university of petroleum, 2012, China.
- [5] Eswm, E., Urai, J.L., Krooss, B.M., Littke, R., Review Of Mechanical Properties Of Oil Shales: Implication For Exploitation And Basin Modeling, ISSN 0208-189X, 2007 Esstional Academy Publisher, 2006, No2. Pp.159-174.
- [6] Sondergeld, C.H., Newsham, K.E., Comisky, J.T., Rice, M.C., Rai, C.S., Petrophysical Consideration In Evaluating And Producing Shale Gas resources, SPE Unconventional Gas Conference in Pettsburgh, 2006, Pensilvania, USA, pp1-34.
- [7] Raphael, A., Log-Core Calibration In Unconventional Reservoir, A Thesis Submitted To The Graduated Faculty In Partial Fulfillment Of The Requirement For Degree Master Of Science, 2012, University Of Oklahoma-Graduate College, Chapter 2.
- [8] Pan, Y., Zhang, X., Shouhuiliu, Yang, S.H., Ren, N., Areview On Technology For Oil Shale Surface Retort, Liaoning Shihua University, Liaoning Fushun 113001, 2012, Chaina, J.Chem.Soc. Pak.No6.
- [9] Lew-on, M., and Lew-on, P., Converting Oil Shale To Liquid Fuels: Findings On Energy And GHG Impacts, The LEVON Group, LLC, California, USA. Research Affiliates, The Samuel and Neaman Institute. 2012 Thechnions Haifa, Israel.
- [10] گروه مدیریت انرژی، مؤسسه بین المللی مطالعات انرژی. ترازنامه هیدروکربوری کشور سال ۱۳۸۷، نشر: تهران، مؤسسه بین المللی مطالعات انرژی، ۱۳۸۸، بخش هیدروکربوری، ۴۰-۱۵.
- [11] Marcus Philip, L., Geological Characterisation And Natural Gas Potential Of The Non-marine Roseneath And Murteree Shales, Cooper Basin, central Australia, Project Submitted In Partial Fulfilment Of The Requirements For The Degree Of M.Sc., 2013, Energy And Resources Management UCL Australia.
- [12] Gasparik, M. Ghanizadeh, A. Bertier, P.Y. Gensterblum, Y. Bouw, S., and Krooss, B. M., High-Pressure Methane Sorption Isotherms of Black Shales From The Netherlands, Energy Fuels 26 (8), 2012, pp 4995-5004.
- [13] علایی، س.، ضیایی، م.، نعمتی، م.، مقاله سازندهای گرو و سرگلو، تشکیلات شاخص شیل گازی درحوضه لرستان-در سی و یکمین گردهمایی علوم زمین، ۱۳۹۱، دانشگاه شاهرود.
- [14] Passey, Q. R., Creaney, S., Kulla, J. B., Moretti, F. J., and Stroud, J. D., , A Practical Model For Organic Richness from Porosity and Resistivity Logs, AAPG Bulletin, 1990, v74(12), p. 1777-1794.
- [15] رضایی، م.ر. چهرآزی، ع.، اصول برداشت و تفسیرنگارهای چاهپیمایی. انتشارات دانشگاه تهران، ۱۳۸۵، چاپ دوم، ۷۵۰ص.