

تعیین پارامترهای پتروفیزیکی سنگ مخزن در میدان سراجه قم

بهمن بهلولی^{۱*}، روح اله حق زاده^۲، علی حسینی^۳

^۱دانشکده زمین‌شناسی، پردیس علوم، دانشگاه تهران، تهران، ایران

^۲گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور واحد شاهیندژ، آذربایجان غربی، ایران

^۳شرکت مهندسی و توسعه نفت ایران تهران، ایران

*مسئول مکاتبات - آدرس الکترونیکی: bohlooli@khayam.ut.ac.ir

(دریافت: ۸۵/۷/۲۴؛ پذیرش: ۸۶/۸/۱۳)

چکیده

این مطالعه به منظور محاسبه خواص پتروفیزیکی سنگ مخزن سازند قم در میدان گازی سراجه و در راستای انجام نخستین پروژه عظیم ذخیره سازی گاز طبیعی کشور انجام شده است. جهت محاسبه حجم شیل، تخلخل مؤثر سنگ مخزن، اشباع شدگی آب و آب کاهش نیافتنی از نمودارهای پتروفیزیکی و برای محاسبه تراوانی از فرمولهای مختلف تجربی استفاده شد. تراوانی افقی مغزه نیز اندازه گیری شد و سپس نتایج لاگ‌ها با مقادیر تراوانی مغزه مقایسه گردید. تراوانی افقی مغزه بین ۰/۱ تا ۱ میلی داری بود و دامنه تغییر تراوانی بدست آمده از لاگ نیز بین ۰/۱ تا ۰/۱ میلی داری بدست آمد. دو رابطه تجربی کرین (Crain) و وایلی - رز (Wyllie & Rose) نزدیکترین اعداد به نتایج مغزه را تولید کرده و می توانند در این میدان مورد استفاده قرار گیرند.

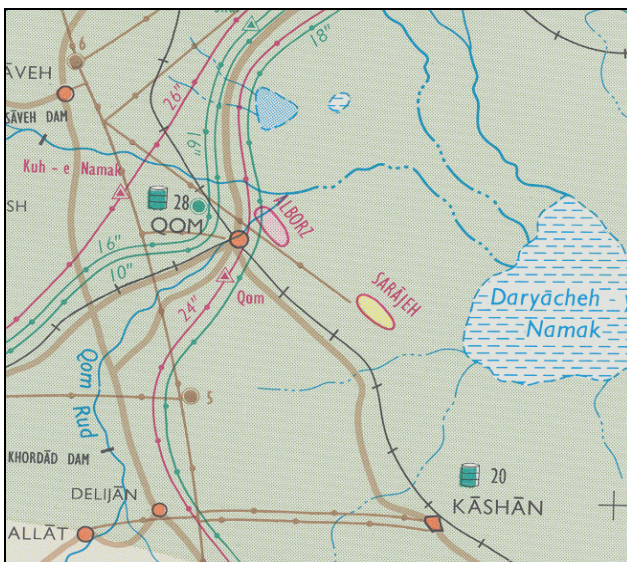
واژه های کلیدی: اشباع گاز، تخلخل مؤثر، تراوانی، ذخیره سازی گاز، سازند قم، میدان سراجه.

مقدمه

نمی‌توان براحتی به کل مخزن تعمیم داد. بنابراین تعیین تخلخل و تراوانی کل مخزن به روشی قابل اعتماد که با داده‌های مغزه همخوانی داشته باشد، امری ضروری است.

ساختمان سراجه تاقدیسی است به ابعاد ۵ × ۲۵ کیلومتر که در ۴۵ کیلومتری جنوب شرقی شهر قم واقع شده است. از لحاظ نوع هیدروکربور، میدان سراجه یک میدان گازی است که دارای مقدار قابل توجهی میعانات گازی نیز می‌باشد. تاقدیس سراجه منظم و با جهت یافتگی شمال غرب- جنوب شرق بوده و محور طولی آن در امتداد N120° است (شکل ۱). مطالعات تخلخل و تراوانی سازند قم علاوه بر نقش مهمی که در توسعه میدان سراجه دارد، جهت پی بردن به قابلیت مخزن گاز خالی شده جهت ذخیره سازی گاز طبیعی (Natural Gas storage) نیز مورد توجه است.

در میدان سراجه جمعا تعداد ۹ حلقه چاه حفر شده که حفاری ۷ حلقه آن در فاصله سال‌های ۱۹۵۸-۱۹۶۱ میلادی انجام شده، یک حلقه چاه در سال ۲۰۰۱ میلادی برای توصیف دقیق بخش e سازند قم (تکمیل نمودن داده های پتروفیزیکی و لیتولوژیکی سازند مزبور) و یک حلقه چاه دیگر نیز در سال ۲۰۰۵ میلادی بر اساس مطالعات اکتشافی لرزه ای برای اثبات فرضیه توسعه مساحتی بیشتر میدان سراجه حفر گردید که متأسفانه این فرضیه محقق نشد. در بین تمام چاهها، چاه شماره ۸ دارای کاملترین داده های پتروفیزیکی و مغزه است. بر روی مغزه‌ها آزمایشات تعیین تخلخل و تراوانی انجام گرفته است ولی با توجه به اینکه آزمایشات مغزه به صورت نقطه‌ای است اطلاعات آن را



شکل ۱: موقعیت جغرافیائی میدان گازی سراجه.

در این مطالعه، از روی داده های لاگ‌های ژئوفیزیکی حجم شیل، آب اشباع شدگی، آب کاهش نیافتنی، تخلخل و تخلخل مؤثر محاسبه

سنگ منشأ، سنگ مخزن و پوش سنگ عمل نماید. به همین دلیل این سازند در نقاط مختلف ایران مرکزی مورد توجه واقع شده است.

خواص پتروفیزیکی بخش e سازند قم

بسیاری از خصوصیات پتروفیزیکی سازند مستقیماً با ابزار نمودار گیری خاصی اندازه گیری می شوند اما تراوایی سازند مستقیماً از روی نمودار خاصی بدست نمی آید و به صورت غیر مستقیم براساس روابط تجربی، لاگ NMR، روش های رگرسیونی چندگانه و روش های هوشمند برآورد می گردد که در این مطالعه از روابط تجربی استفاده شده است. برای این کار محاسبه حجم شیل، تخلخل مؤثر، اشباع شدگی آب و آب کاهش نیافتنی ضروری است.

۱- حجم شیل

حجم شیل، مجموع حجم ذرات رس خشک، سیلت و آب باندی رس ها در سازند است. این کمیت بر روی سایر خصوصیات پتروفیزیکی نظیر تخلخل و اشباع شدگی آب حاصل از آنالیز لاگ ها تأثیر می گذارد لذا باید به دقت محاسبه و اثر آن از روی پارامترها حذف گردد. محاسبه ی شیل با استفاده از لاگ پرتو گاما (Gamma Ray Log, GR) انجام می گیرد. این لاگ پرتوهای گامای طبیعی سازندها را اندازه گیری می کند و مقیاس استاندارد آن API (American Petroleum Institute) است. پرتوهای گاما از عناصر مختلف اورانیوم، توریم و پتاسیم ساطع می گردند. این عناصر سطوح انرژی متفاوتی را دارا هستند. برحسب اندازه گیریهای مختلف رادیو اکتیویته گامای طبیعی، انواع مختلف لاگهای پرتو گاما وجود دارد:

۱. لاگ پرتو گاما معروف به GR که اشعه گامای ساطع شده از سازند را بصورت کامل نمایش می دهد.

۲. لاگ طیف سنج پرتو گاما معروف به SGR که نموداری مشابه لاگ پرتو گامای کل (GR) تولید می کند.

۳. لاگ پرتو گامای تصحیح شده (CGR)، پرتوهای گامای ساطع شده از اورانیوم را فیلتره می کند. از اینرو گاهی به U-free GR نیز معروف است. مقدار اندازه گیری شده اشعه رادیو اکتیو گامای طبیعی توسط لاگ CGR همیشه کمتر یا مساوی با مقدار لاگ SGR می باشد.

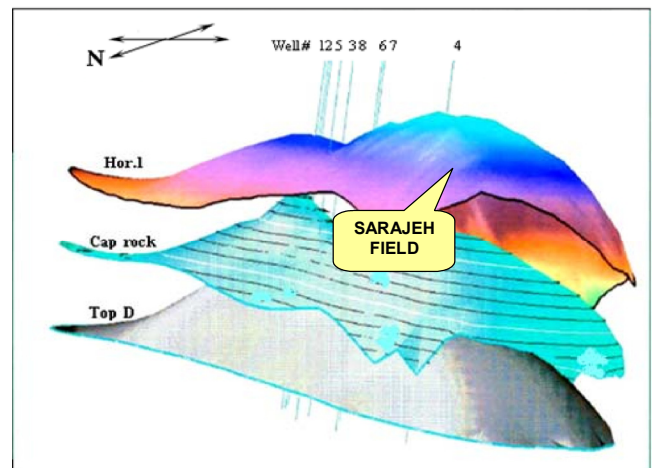
تشعشع گاما از اورانیوم شاخص وجود شیل نیست، زیرا برخلاف پتاسیم و توریم، اورانیوم عموماً در مواد آلی رسوبات تمرکز می یابد. لذا مناسب است که برای اندازه گیری حجم شیل مقداری گامای ساطع شده از پتاسیم و توریم استفاده شود. بنابراین در صورت وجود لاگ CGR، نباید از لاگهای GR و SGR برای تعیین حجم شیل استفاده نمود. طبق رابطه زیر حجم شیل تعیین گردید.

در این مطالعه با تطبیق منحنی دو لاگ CGR و SGR تاثیر فراوان عنصر اورانیوم بر روی لاگ SGR آشکار گردید از اینرو اندازه گیری

گردیده است. برای محاسبه تراوایی نیز از داده های لاگ و فرمول های تجربی مختلف استفاده شده است. در مرحله بعد، تراوایی حاصل از لاگ با تراوایی افقی مغزه براساس آنالیز رگرسیونی مقایسه گردیده تا ارتباط بین آنها مشخص شده و بهترین روابط تجربی تعیین تراوایی جهت کاربرد در این میدان معرفی شوند.

زمین شناسی میدان سراج

تاقدیس سراج در ناحیه البرز- سپر رستم، بین دو گسل قم در جنوب غرب و کوشک نصرت در شمال شرق واقع شده است. براساس تفسیر لرزه ای از میدان گازی سراج از بالا به پایین موقعیت تحت الارضی افق ۱ از سازند قرمز بالایی (Hor.1)، پوش سنگ (Cap Rock) و رأس بخش D سازند قم در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: تفسیر سه بعدی لرزه ای از میدان گازی سراج که از بالا به پایین شامل افق ۱ از سازند قرمز بالایی (Hor. 1) پوش سنگ (Cap rock) و رأس بخش D سازند قم است (Sofregaz 2001a).

واحد چینه ای تشکیل دهنده این تاقدیس سازند قم با لیتولوژی غالب کربناته و سن الیگوسن پسین تا میوسن پیشین است. در این ناحیه سازند قم شامل بخشهای a تا f بوده اما ضخامت آهکهای ریفی زرد رنگ بخش f به سمت جنوب غرب کاهش یافته بطوریکه در مخزن سراج، بخش f وجود ندارد. از طرفی بخش تبخیری قاعده سازند قرمز بالایی در این منطقه گسترش داشته و مستقیماً روی مارن و آهکهای مارنی بخش e قرار گرفته است. به سمت شمال شرق، این افق انیدریتی نازک شده و بالاخره ناپدید می شود. سنگ مخزن و تنها افق تولیدی میدان سراج بخش e سازند قم است. بخش تبخیری قاعده ی سازند قرمز بالایی (متشکل از نمک و انیدریت) نیز پوش سنگ مخازن را تشکیل می دهد (باغبانی و همکاران ۱۳۷۵، درویش زاده ۱۳۷۰). سازند قم به دلیل وجود رخساره های متنوع خود می تواند به عنوان

حجم شیل از روی لاگ CGR طبق رابطه زیر صورت گرفت.

$$V_{Sh} = \frac{CGR - CGR_{Clean}}{CGR_{Sh} - CGR_{Clean}}$$

در رابطه بالا clean به کمترین مقدار خوانده شده در سازندهای غیر شیلی (تمیز) و Sh مقدار خوانده شده در سازند ۱۰۰٪ شیلی است و رابطه بدون اندیس یا واحد می‌باشد.

۲- محاسبه تخلخل در سازندهای شیلی با استفاده از لاگ چگالی

این امر به دو روش تخلخل ظاهری شیل یا نرمالیز کردن شیل امکان پذیر است. هر دو روش صحیح بوده و نتیجه یکسانی را بدست می‌دهد. بنابراین استفاده از یکی از این دو روش مؤثر واقع می‌شود.

- تخلخل ظاهری شیل (apparent shale porosity):

در این روش، ابتدا باید لایه شیلی (Shale point) با استفاده از بیشترین مقدار مربوط به لاگهای CGR یا GR تعیین گردد. سپس تخلخل ظاهری آن لایه شیلی با توجه به لاگهای تخلخل (چگالی، نوترون و سونیک) محاسبه می‌گردد. حجم شیل با استفاده از روش مناسب در این زمینه، مثل روش پرتو گاما (GR) یا (CGR)، نیز محاسبه می‌شود. بعد از آن، محاسبه تخلخل برای هر نقطه اطلاعاتی با استفاده از معادله ساده موجود انجام می‌گیرد و در نهایت با کم کردن حاصلضرب حجم شیل و تخلخل ظاهری شیل، از تخلخل محاسبه شده تخلخل تصحیح شده برای لاگ مورد نظر بدست می‌آید.

محاسبه تخلخل ظاهری لاگ چگالی با استفاده از معادله زیر:

$$\phi_{Da} = \frac{(\rho_{Ma} - \rho_b)}{(\rho_{Ma} - \rho_F)}$$

محاسبه تخلخل ظاهری شیل به این صورت:

$$\phi_{DSha} = \frac{(\rho_{Ma} - \rho_{Sh})}{(\rho_{Ma} - \rho_{Fl})}$$

محاسبه تخلخل لاگ چگالی با تصحیح اثر شیلی:

$$\phi_{DShc} = \phi_{Da} - (V_{sh} \times \phi_{DSha})$$

تخلخل تصحیح شده لاگ چگالی بصورت تقریبی با تخلخل مؤثر برابر است:

$$\phi_e \approx \phi_{DShc}$$

ϕ_{Da} = تخلخل ظاهری محاسبه شده برای هر نقطه از اینتروال مخزنی با استفاده از لاگ چگالی.

$$\phi_{DShc} = \text{تخلخل لایه شیلی با استفاده از لاگ چگالی.}$$

$\rho_b, \rho_{Fl}, \rho_{sh}, \rho_{ma}$ = به ترتیب چگالی ماتریکس، شیل، سیال و چگالی خوانده شده بر روی لاگ می‌باشند.

$$V_{sh} = \text{حجم شیل.}$$

ρ_{bshc} = چگالی خوانده شده بر روی لاگ چگالی که اثر شیل آن

تصحیح شده است.

ϕ_{DShc} = تخلخل محاسبه شده به وسیله لاگ چگالی که تصحیح شیل انجام گرفته است.

۳- محاسبه تخلخل در سازندهای شیلی با استفاده از لاگ نوترون

لاگ نوترون برای حذف اثرات محیطی چاه (فشار، گل حفاری و ...) و تغییرات ماتریکس نسبت به آهک (با توجه به اینکه لاگ نوترون براساس آهک کالیبره شده است)، نیاز به تصحیح دارد:

تخلخل نوترونی که اثرات محیطی و ماتریکسی آن برای هر نقطه ای از اینتروال مخزنی تصحیح شده است:

$$\phi_{Nc} = \phi_{NLst} + \Delta_{Environment} + \Delta_{Matrix}$$

تخلخل نوترونی که اثرات محیطی و ماتریکسی آن برای لایه شیلی تصحیح گردیده است:

$$\phi_{Nc-sh} = \phi_{Nsh} + \Delta_{Environment} + \Delta_{Matrix}$$

تخلخل لاگ نوترون که اثر شیل آن تصحیح شده است:

$$\phi_{Nshc} = \phi_{Nc} - (V_{sh} \times \phi_{Nc-sh})$$

$$\phi_e \approx \phi_{Nshc}$$

اگر $\phi_{Nshc} < 0$ باشد در این صورت $\phi_{Nshc} = 0$ در نظر گرفته می‌شود. ϕ_{Nc} = تخلخل نوترونی که اثرات محیطی و ماتریکسی آن تصحیح شده است.

ϕ_{NLst} = تخلخل لاگ نوترون که براساس آهک کالیبره شده است.

$\Delta_{Environment}$ = اثرات محیطی چاه

Δ_{Matrix} = اختلاف ماتریکس با آهک

ϕ_{Nshc} = تخلخل لاگ نوترون که اثر شیل آن تصحیح شده است.

V_{sh} = حجم شیل

ϕ_{Nc-sh} = تخلخل لایه شیلی در روی لاگ نوترون

ϕ_e = تخلخل مفید

در لاگ نوترون، برای محاسبه تخلخل تصحیح شده، هر دو روش مذکور (تخلخل ظاهری شیل و نرمالیز کردن) یکسان عمل می‌کنند (رضایی ۱۳۸۰).

۴- محاسبه تخلخل در سازندهای غیر تمیز (شیلی) با استفاده از لاگ سونیک (صوتی)

تخلخل ظاهری می‌تواند به وسیله معادله وایلی از روی لاگ سونیک محاسبه شود:

$$\phi_{Sa} = \frac{(DT_{log} - DT_{ma})}{(DT_{Fl} - DT_{ma})}$$

تخلخل ظاهری لایه شیلی از روی لاگ سونیک توسط معادله زیر محاسبه می‌شود:

آمد.

نتایج محاسبات فوق‌الذکر برای هر نقطه از اینتروال مخزنی به کمک نرم افزار Log Plot 2003 در شکل ۳ ترسیم شده است. ستون های شکل ۳ از چپ به راست عبارتند از :

- عمق بر حسب متر از ارتفاع (Kelly Bushing (m/KB)
- لاگ های کالیپر (Caliper) و پرتو گاما (CGR) در مسیر یک و تفکیک زون های دانه افزون از گل افزون با استفاده از حد API 30
- رسم لاگ های چگالی (RHOB) و نوترون (NPHI) در کنار هم و نمایش اثر گاز و شیل در زون های مخزن
- میزان لاگ فتوالکتریک (Pe) در حدود ۵ که نشان دهنده سنگ آهک بودن اینتروال مخزنی است.
- عدم انحراف لاگ DRHO به میزان بیش از دلیل بر صحت لاگ چگالی (RHOB)

- مقدار تخلخل مؤثر (PHIE)، تخلخل ثانویه (PHI_{Sec}) و تخلخل اولیه (PHI_{prim}) اینتروال مخزنی بر حسب درصد در مسیر سوم
- میزان حجم شیل (V_{shale})، ماتریکس (Matrix) و تخلخل مؤثر (PHIE) بر حسب درصد در مسیر چهارم

۶- اشباع شدگی آب

اشباع شدگی از نظر کمی عبارت است از نسبت حجم سیال به حجم منافذ. محاسبه اشباع شدگی آبدر سازندهای عاری از شیل براحتی انجام می‌گیرد، ولی وجود رس‌ها در سازندهای غیر تمیز (شیلی) باعث ازدیاد رسانایی الکتریکی می‌گردد (رضائی ۱۳۸۰). از این رو محاسبه اشباع شدگی آبه سادگی قابل انجام نیست،

۶-۱ محاسبه اشباع شدگی آب در سازندهای شیلی رسانایی الکتریکی در سنگ تمیز اشباع از آب سازندی، براساس معادله آرچی بصورت زیر می‌باشد:

$$C_o = \frac{C_w}{F}$$

وجود کانیهای رسی در سازند، رسانایی الکتریکی اضافی (X) را ایجاد می‌کند.

$$C_o = \frac{C_w}{F} + X$$

دو روش برای تعیین میزان رسانایی الکتریکی اضافه شده کانیهای رسی، در سازندهای شیلی ارائه شده است:

- با استفاده از حجم شیل و آب باندی شیل
- براساس نوع کانیهای رسی

در روش اول، رسانایی الکتریکی اضافه شده توسط حجم شیل و آب باندی شیل تعیین می‌گردد. از معایب این روش اینست که نوع کانی رسی در نظر گرفته نمی‌شود و مزیت آن دستیابی کامل به اطلاعات از

$$\phi_{Ssh-a} = \frac{(DT_{sh} - DT_{ma})}{(DT_{Fl} - DT_{ma})}$$

بدین ترتیب تخلخل تصحیح شده شیل از روی لاگ سونیک، با استفاده از رابطه زیر انجام می‌گیرد:

$$\phi_{Ssh-c} = \phi_{Sa} - (V_{sh} \times \phi_{Ssh-a})$$

$$\phi_e \approx \phi_{Ssh-c}$$

به ترتیب DT_{sh} ، DT_{log} ، DT_{Fl} ، DT_{ma} ، DT_{shc} زمان عبور صوت از شیل، ماتریکس سنگ، سیال سازندی، قرائت شده از روی لاگ، تصحیح شده شیل می‌باشند.

به ترتیب ϕ_{Ssh-c} ، ϕ_{Ssh-a} ، ϕ_{Sa} = تخلخل تصحیح شده شیل با استفاده از لاگ سونیک می‌باشند.

$$\phi_e = \text{تخلخل مؤثر } V_{sh} = \text{حجم شیل}$$

۵- تخلخل مؤثر (Effective Porosity)

تخلخل مؤثر یا فضای خالی مرتبط، به عنوان نسبت حجم فضای خالی مرتبط به حجم کل توده سنگ تعریف می‌شود. اگر $\phi_{Nc} < \phi_{Dc}$ باشد، رابطه مورد استفاده برای حذف اثر گاز و محاسبه تخلخل مؤثر به صورت زیر خواهد بود:

$$\phi_e = \sqrt{\frac{\phi_{Nc}^2 + \phi_{Dc}^2}{2}}$$

ولی اگر $\phi_{Nc} \geq \phi_{Dc}$ یعنی سازند محتوی آب یا نفت باشد، می‌توان تخلخل مؤثر را از رابطه زیر بدست آورد:

$$\phi_e = \frac{\phi_{Nc} + \phi_{Dc}}{2}$$

بطور کلی اثر هیدروکربن بر روی لاگ سونیک کم می‌باشد و قابل چشم پوشی است. با این حال می‌توان از روابط زیر برای تصحیح هیدروکربن استفاده کرد (رضایی ۱۳۸۰).

اگر هیدروکربن نفت باشد:

$$\phi_e = \phi_{Sc} \times 0.9$$

اگر هیدروکربن گاز باشد:

$$\phi_e = \phi_{Sc} \times 0.7$$

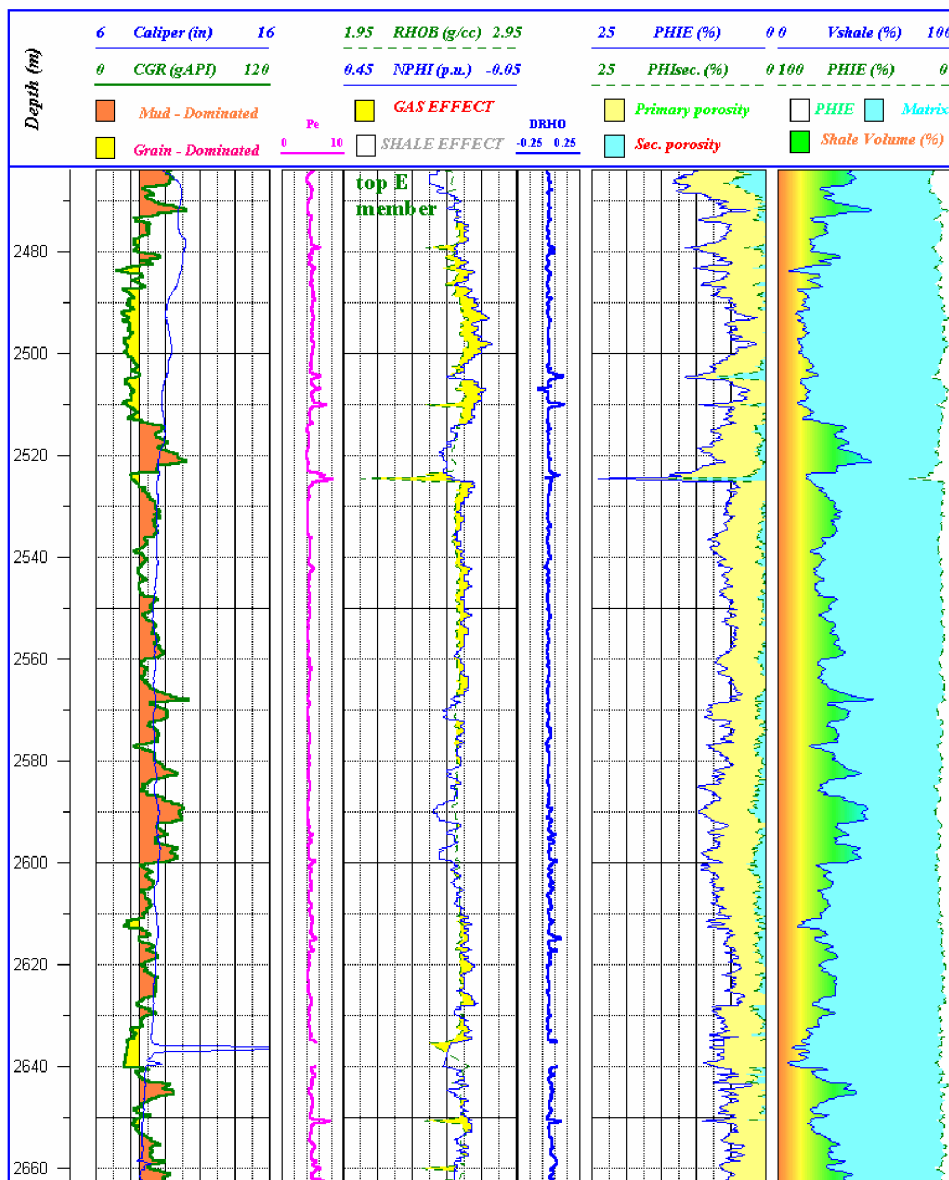
ϕ_e = تخلخل تصحیح شده هیدروکربن (گاز یا نفت)

ϕ_{Nc} = تخلخل نوترون تصحیح شده نسبت به شیل

ϕ_{Dc} = تخلخل چگالی تصحیح شده نسبت به شیل

ϕ_{Sc} = تخلخل سونیک تصحیح شده نسبت به شیل

بدین ترتیب تخلخل مؤثر با استفاده از آنالیز لاگ های ژئوفیزیکی (نوترون، چگالی و صوتی) محاسبه گردید. از لاگ های چگالی و نوترون تخلخل کل سنگ (که شامل تخلخل اولیه و ثانویه است) محاسبه می‌شود. در صورتی که لاگ صوتی فقط تخلخل اولیه سنگ را اندازه گیری می‌کند. از تفاوت بین این دو میزان تخلخل ثانویه نیز بدست



شکل ۳: نمایش نتایج محاسبات پتروفیزیکی چاه شماره ۸ به صورت نمودار.

سیماندوکس (Simandoux 1963) براساس کارهای آزمایشگاهی بر روی مخلوطی از دانه های ماسه و کانی رسی مونت موریلونیت پیشنهاد کرد که رسانایی الکتریکی اضافی شیل وابسته به حجم شیل و رسانایی اجزاء شیل می باشد، و رابطه زیر را برای زون های هیدروکربن دار سازند ارائه نمود:

$$S_w = n \sqrt{\frac{C_t - (V_{sh} \times C_{sh})}{C_w / F}}$$

برای تخمین میزان اشباع شدگی آبدر زون رخنه (Flushed zone)، نیز از فرمول سیماندوکس استفاده گردید:

$$S_{Xo} = \sqrt{\frac{C_{Xo} - (V_{sh} \times C_{sh})}{C_{mf} / F}}$$

طریق لاگهای ژئوفیزیکی است (Simandoux 1963).

در روش دوم، رسانایی الکتریکی اضافه شده براساس نوع کانیهای رسی، بدون توجه به حجم شیل تعیین می گردد. حسن این روش دستیابی علمی به مسأله می باشد و بایستی برخی از پارامترها در آزمایشگاه محاسبه شود (Waxman & Smits 1968; Clavier et al., 1986).

از بین روابط متعدد موجود در روش حجم شیل، برای تعیین آب اشباع شدگی سازند، در ایران بیشتر از روش Poupon & Leveaux 1971 معروف به روش Indonesia استفاده می گردد. معادله سیماندوکس نیز نتیجه مشابه با روش Indonesia تولید می کند لذا در این پروژه، از آن استفاده شده است.

کرد: که در آن: $S_w =$ اشباع شدگی آب در سازندهای شیلی، $S_{Xo} =$ اشباع

۱. در فاصله تقریبی ۷۰ متری بالای مخزن رابطه $S_{Xo} > S_w$ برقرار می‌باشد زیرا سازند در این فاصله تراوایی بیشتری داشته و نفوذ فیلتره گل حفاری در دیواره سازند منجر به جابه جایی هیدروکربن شده است.

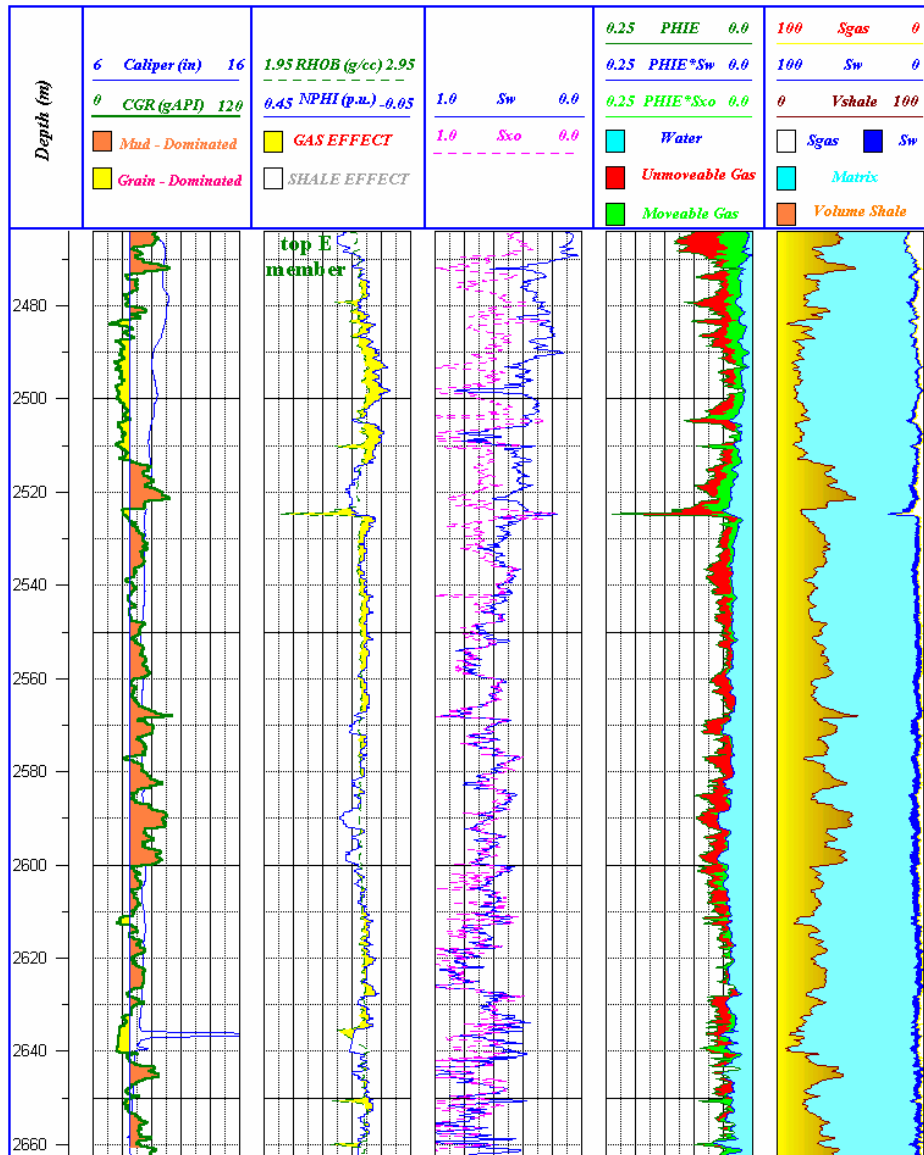
شدگی آب در زون رخنه، $n =$ ضریب اشباع شدگی، $C_i =$ رسانایی الکتریکی واقعی سازند، $V_{sh} =$ حجم شیل، $C_{sh} =$ رسانایی الکتریکی در لایه شیل (Shale Point)، $F =$ فاکتور مقاومت سازند، $C_w =$ رسانایی الکتریکی آب سازند، $C_{Xo} =$ رسانایی الکتریکی در زون رخنه، $C_{mf} =$ رسانایی الکتریکی فیلتره گل حفاری.

نتایج محاسبات پتروفیزیکی مربوط به اشباع شدگی سیالات در شکل ۴ به صورت نمودار نشان داده شده است.

نتیجه نهایی محاسبات برخی پارامترهای پتروفیزیکی از روی داده های پتروفیزیکی برای چاه S-8 میدان گازی سراج به شرح زیر می‌باشد (جدول ۱). احتمالاً تخلخل و تراوایی پایین ماتریکس مخزن باعث افزایش فشار موئین و متعاقباً افزایش اشباع شدگی آب گردیده است. با دقت در نتایج محاسبات انجام شده می‌توان به موارد زیر اشاره

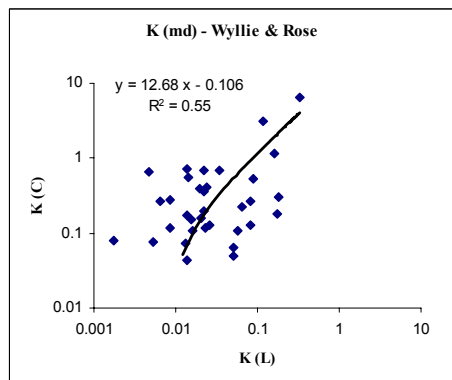
جدول ۱: مقادیر محاسبه شده پارامترهای پتروفیزیکی.

پارامترهای پتروفیزیکی	میانگین (%)	دامنه تغییرات (%)
حجم شیل	۲۸	۳۵-۲۰
تخلخل مؤثر	۶/۳	۸-۶
اشباع شدگی آب	۵۵	۶۰-۳۵
اشباع شدگی گاز	۴۵	۶۰-۳۰
حجم کل آب	۳/۳	۵-۲



شکل ۴: نتایج محاسبات پتروفیزیکی اشباع شدگی آب چاه شماره ۸ که به صورت نمودار نشان داده شده است.

شدگی آبکاهش نیافتنی بصورت کسری از یک می‌باشد. C یک ثابت است که برای نفت ۲۵۰ و برای گاز ۷۹ در نظر گرفته می‌شود. نتایج تراوایی بدست آمده از لاگ در برابر تراوایی مغزه در شکل ۶ ترسیم شده است.



شکل ۶: تراوایی بدست آمده از رابطه وایلی و رز (K_L) در مقابل تراوایی مغزه (K_C).

ضریب همبستگی $R^2 = 0.55$ نشان دهنده ارتباط قابل قبول بین این دو پارامتر می‌باشد و رابطه زیر بین آنها برقرار است:

$$K_C = 12.68K_L - 0.106$$

که K_C تراوایی افقی مغزه و K_L تراوایی حاصل از رابطه وایلی و رز است.

۸-۲ محاسبه تراوایی با استفاده از فاکتور مقاومت سازندی کرین این رابطه توسط کرین (Crain 2004) پیشنهاد شده و در اینتروالهای مخزنی که دارای تخلخل پایینی هستند کاربرد دارد. طبق روابط زیر با داشتن فاکتور مقاومت سازندی (F) می‌توان تراوایی (K) را محاسبه کرد:

$$F = \frac{a}{\phi^m} \quad \text{و} \quad K = \frac{C}{F^b}$$

a = فاکتور پیچاپیچی (tortuosity factor)، m = ضریب سیمانی شدن (Cementation Exponent)، مقدار C برای ماسه سنگها و کربناتها به ترتیب 7×10^6 و 4×10^6 می‌باشد، b یک ثابت که در ماسه سنگها $4/5$ و در کربناتها $3/5$ در نظر گرفته می‌شود. تراوایی محاسبه شده از رابطه کرین نیز در مقابل تراوایی افقی مغزه در شکل ۷ رسم شده است.

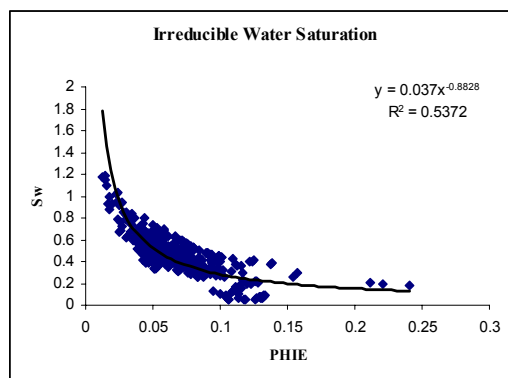
اهمیت رابطه کرین در این است که نیازی به احتساب میزان آب کاهش نیافتنی ندارد. همچنین مقادیر بدست آمده از این رابطه به نتایج حاصل از فرمول وایلی و رز نزدیک می‌باشد. براساس شکل ۷ بین دو پارامتر تراوایی لاگ و تراوایی افقی مغزه رابطه زیر برقرار است:

$$K_C = 15.4K_L - 0.03$$

۲. براساس تغییرات حجم گاز قابل جابجایی (Moveable Gas) در مسیر چهارم شکل ۴، بیشترین جابجایی گاز تقریباً در فاصله ۷۰ متری بالای مخزن صورت گرفته است که این امر نشان دهنده تراوایی بیشتر نسبت به سایر بخش‌های مخزن است.

۷- اشباع شدگی آب کاهش نیافتنی (Sw_{ir})

بیشتر محاسباتی که برای تعیین عددی تراوایی انجام می‌شوند به آب کاهش نیافتنی نیاز دارند. یکی از راههای خیلی مفید برای اندازه گیری آب کاهش نیافتنی استفاده از ثابت بوکلس (Buckles) است. برای استفاده از این روش، مقادیر تخلخل مؤثر در برابر اشباع شدگی آبرسم شد و منحنی هذلولی مناسب منطبق بر اطلاعات حاصل شد (شکل ۵). میزان آب کاهش نیافتنی در جائیکه منحنی هذلولی به موازات محور X قرار می‌گیرد، از روی محور Y قرائت می‌گردد که در اینجا ۱۲٪ بدست آمد.



شکل ۵: ترسیم تخلخل مؤثر در برابر اشباع شدگی آب برای بدست آوردن میزان آب کاهش نیافتنی.

۸- تراوایی

تراوایی یا هدایت هیدرولیکی، توانایی یک محیط متخلخل برای عبور سیال است. در این مطالعه، تراوایی با استفاده از روابط مختلف تجربی از جمله (Tixier 1949, Wyllie & Rose 1950, Timur 1968, Crain 2004) محاسبه گردیده است که در بین آنها، دو رابطه انطباق بیشتری با تراوایی افقی مغزه نشان دادند که در زیر توضیح داده می‌شوند.

۸-۱ رابطه وایلی و رز برای محاسبه تراوایی

وایلی و رز (Wyllie & Rose 1950) تأثیر تخلخل مؤثر و اشباع شدگی آبکاهش نیافتنی بر تراوایی را مطالعه کردند و رابطه ای به صورت زیر ارائه دادند.

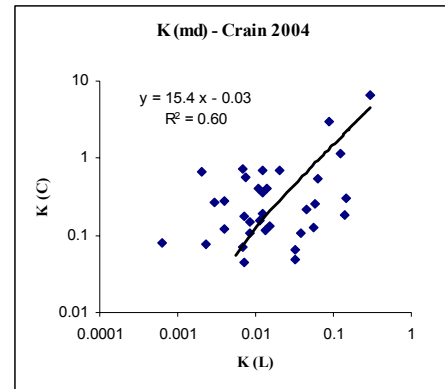
$$K = \left(C \frac{\phi^3}{Sw_{ir}} \right)^2$$

که تراوایی بر حسب میلی داریسی، ϕ تخلخل مؤثر و Sw_{ir} اشباع

قسمتهای سنگ مخزن به دلیل وجود شکستگیها، میزان تراوایی به مقدار قابل ملاحظه ای افزایش می یابد.

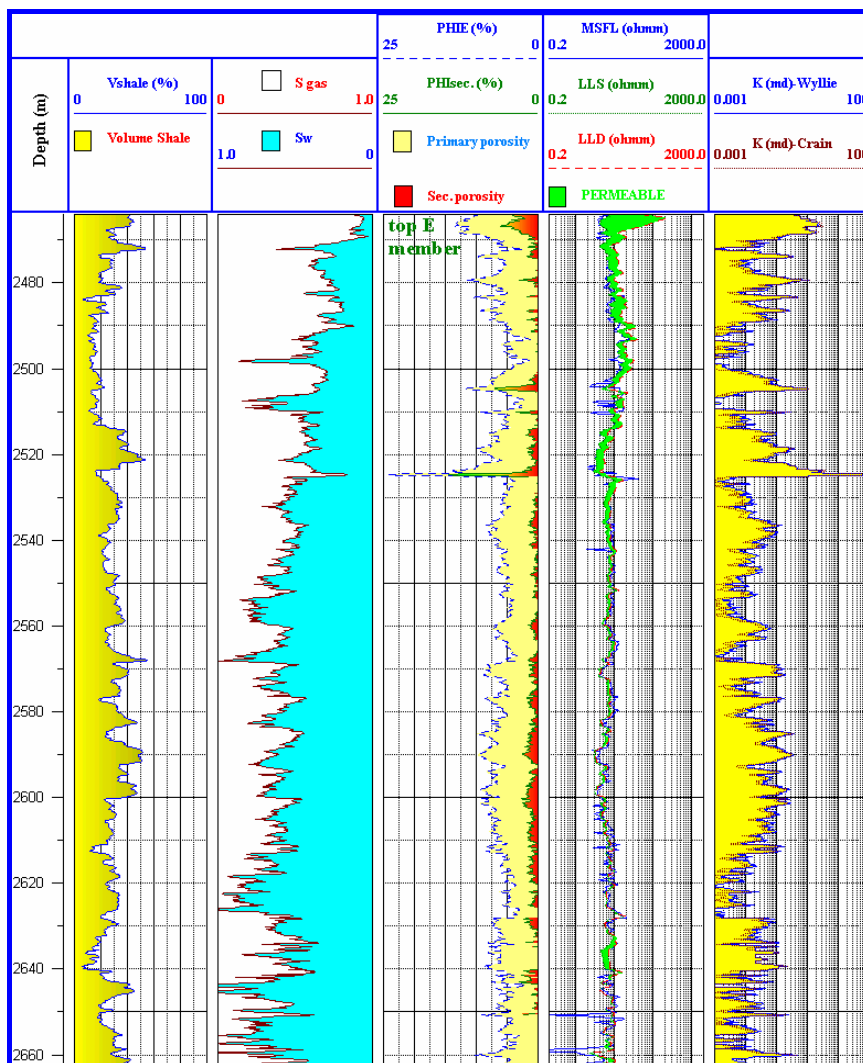
مطالعات مغزه

تخلخل و تراوایی ۴۰ نمونه مغزه در فواصل مختلف چاه شماره S-8 اندازه گیری شده است. این مغزه ها متعلق به بخش e سازند قم (سنگ مخزن گازی) از عمق حدود ۲۴۶۴ تا ۲۶۳۴ متر هستند. براساس توصیف مغزه ها، بخش e سازند قم شامل شش رخساره سنگی از F1 تا F6 است که از نظر لیتولوژی شامل سنگ آهک رسی تا مارن به رنگ روشن تا خاکستری تیره است. تخلخل درشت در آنها دیده نمی شود و شکستگی ها بیشتر در قسمت بالایی اینتروال مخزنی قرار گرفته اند. انواع تخلخل شامل بین بلوری ریز، حفره ای و حاصل از شکستگی می باشد. ستون چینه شناسی سنگ مخزن به همراه تخلخل، تراوایی افقی و عمودی مغزه و تراکم شکستگی ها در شکل ۹ نشان داده شده است.



شکل ۷: تراوایی بدست آمده از رابطه کرین (K_L) در مقابل تراوایی مغزه (K_C).

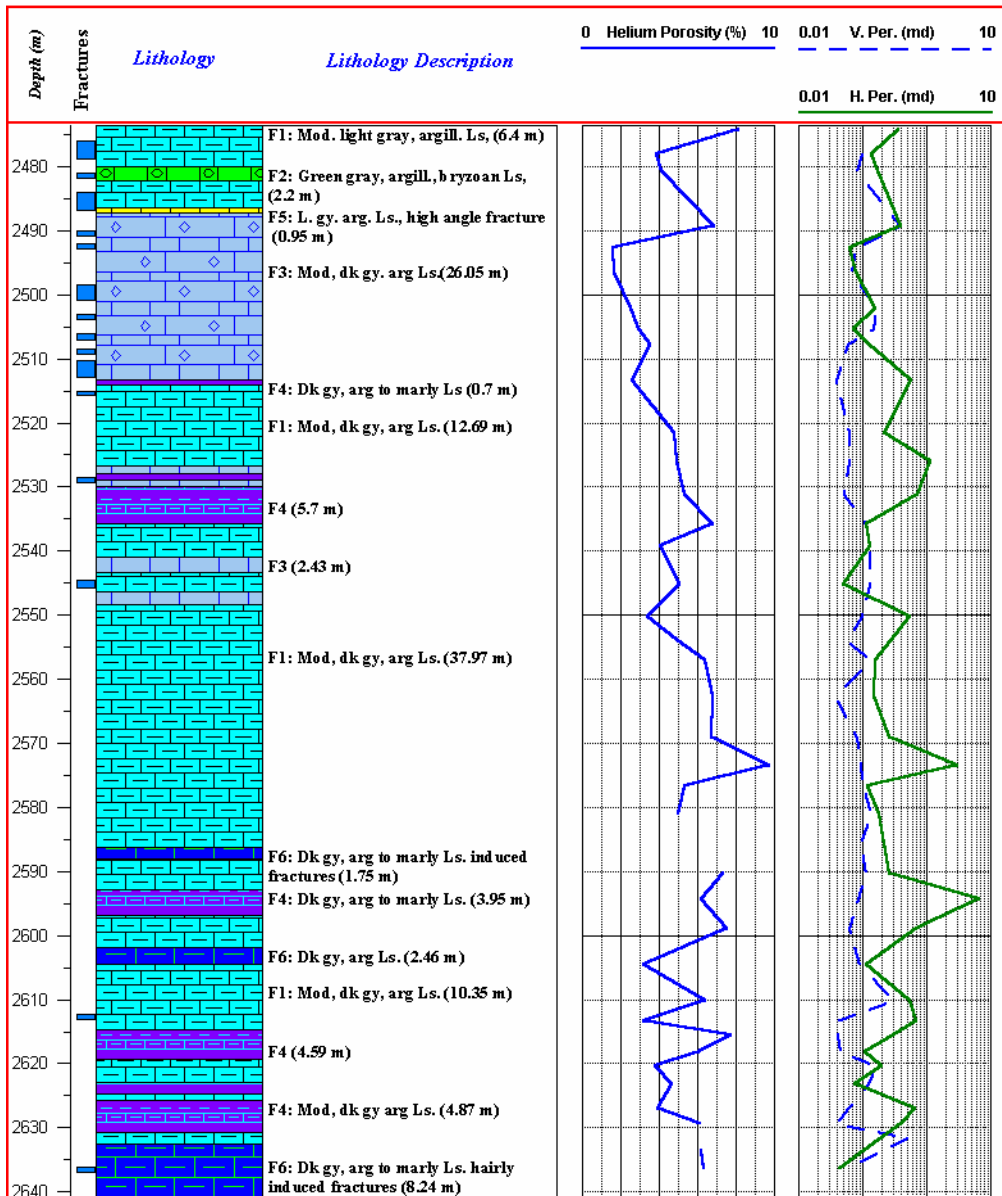
نتایج محاسبات در شکل ۸ ترسیم شده اند. همانطور که در شکل دیده می شود دو نمودار تراوایی حاصل از رابطه کرین و رابطه وایلی و رز در مسیر پنجم تقریباً بر هم منطبق هستند. تراوایی در بیشتر بخش های سنگ مخزن بین ۰/۱ تا ۰/۱ میلی دارسی است. البته در بعضی



شکل ۸: نتایج محاسبات حجم شیل، اشباع شدگی آب، تخلخل و تراوایی چاه شماره ۸ که بصورت نمودار نشان داده شده است.

از نظر ابعاد، حداکثر طول شکستگی ها در روی دیواره چاه حدود یک متر می باشد. شکل شکستگی ها بصورت خط مستقیم یا منحنی بوده و عرض بازشدگی آن ها بین ۰/۲ تا ۲۰ میلی متر تغییر می کند. در شکل ۱۰ تصاویر شکستگی های عمده قابل مشاهده در این مغزه ها نشان داده شده است: (A) یک شکستگی عریض با پر شدگی تقریباً کامل از سیمان کلسیتی ثانویه، (B) شکستگی هایی با پر شدگی بخشی از سیمان کلسیتی ثانویه، (C) یک شکستگی باز مستقیم با زاویه نزدیک به قائم، (D) استیلولیت های مورب و عمودی به همراه شکستگی های کاملاً پر شده از سیمان کلسیتی، (E) شکستگی های برشی پر شده از سیمان کلسیتی، (F) شکستگی های بسیار باریک پر شده از سیمان کلسیتی (Sofregaz 2001b, Sofregaz 2001c).

مطالعه مغزه ها نشان می دهد که اکثر شکستگی ها در قسمت فوقانی مخزن از عمق ۲۴۷۶ تا ۲۵۴۵ متری قرار گرفته اند. همچنین دو سطح شکستگی در عمق های ۲۶۱۴ و ۲۶۳۴ متری قابل مشاهده است. بنابراین فاصله بین عمق های ۲۵۴۵ تا ۲۶۱۴ متری به ضخامت حدود ۶۰ متر کاملاً متراکم و فاقد شکستگی می باشد (شکل ۹). ستون سمت راست شکل ۹ نشان می دهد که تراوایی عمودی ماتریکس سنگ بسیار کمتر از تراوایی افقی آن است. دلیل این امر بخاطر وجود سد های تراوایی و لایه های شیلی به موازات لایه بندی است. تخلخل مغزه نیز در بیشتر بخش های سنگ مخزن ۴ تا ۶٪، که حداقل آن ۱/۸٪ و حداکثر ۱۰٪ می باشد. تخلخل و تراوایی اندازه گیری شده در جدول ۲ آورده شده است.



شکل ۹: نمودار تخلخل، تراوایی افقی و عمودی به همراه ستون چینه شناسی براساس مطالعه مغزه.

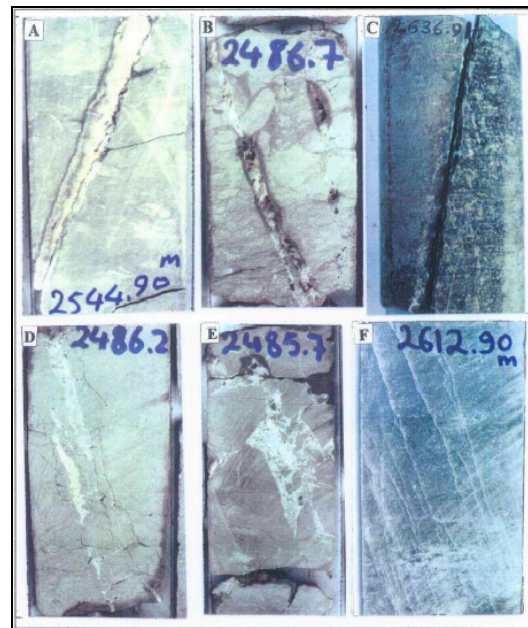
خواص پتروفیزیکی مخزن گازی سراجیه با استفاده از نمودارهای پتروفیزیکی و مقایسه آنها با اطلاعات حاصل از مغزه تعیین گردید. در بیشتر فواصل مخزنی اشباع شدگی آبین ۳۵ تا ۶۰ درصد می باشد. براساس مطالعات لاگ و مغزه کیفیت سنگ مخزن از لحاظ تخلخل، ضعیف ارزیابی می شود. همچنین نوع تخلخل بین بلوری ریز، حفره ای و حاصل از شکستگی می باشد. تراوایی بدست آمده از لاگ و مغزه در اکثر فواصل مخزنی بین ۰/۰۱ تا ۱ میلی داری در تغییر است. بنابراین سنگ مخزن از لحاظ تراوایی نیز کیفیت ضعیفی دارد. در این میدان استفاده از دو رابطه تجربی کرین و وایلی-رز جهت محاسبه تراوایی از روی لاگهای پتروفیزیکی نتایج قابل قبولی دربر دارد. مطالعه لاگ های مختلف پتروفیزیکی و نتایج تراوایی محاسبه شده از روابط تجربی، تراوایی زیاد را در ۷۰ متر فوقانی مخزن نشان می دهد. مطالعه شکستگی های مغزه نیز نشان از تمرکز شکستگی ها در این قسمت از سنگ مخزن دارد. پتانسیل تولیدی مخزن گازی سراجیه به شدت در ارتباط با توزیع این شکستگی ها است.

تشکر و قدردانی

این مطالعه با حمایت مالی و تخصصی شرکت مهندسی و توسعه نفت ایران انجام شده است که بدینوسیله مولفین مراتب تشکر و سپاسگزاری خود را از این شرکت اعلام می دارند.

جدول ۲: تخلخل، تراوایی افقی و تراوایی عمودی مغزه.

خصوصیات پتروفیزیکی مغزه	میانگین	دامنه تغییرات
تخلخل مغزه (%)	۵/۱۵	۶-۴
تراوایی افقی (md)	۰/۵	۱-۰/۱
تراوایی عمودی (md)	۰/۱	۰/۱-۰/۰۱



شکل ۱۰: تصویر شکستگی ها در تعدادی از نمونه های مغزه چاه شماره ۸.

نتیجه گیری

منابع:

- باغبانی د، الهیاری م، شاکری ع. ۱۳۷۵: بررسی حوضه رسوبی قم و ارزیابی توان هیدروکربوری آن، شرکت ملی نفت ایران، گزارش زمین شناسی شماره ۱۸۳۸، ۱۰۴ صفحه. درویش زاده ع. ۱۳۷۰: زمین شناسی ایران، انتشارات امیر کبیر، ۹۰۱ صفحه.
- رضایی م. ۱۳۸۰: زمین شناسی نفت، انتشارات علوی، ۴۶۱ صفحه.
- Clavier C., Coates G., Dumanoir J. 1986: The theoretical and experimental basis for the "dual-water" model for the interpretation of shaly sands. In Schmidt, A. (Ed.), *Openhole Well Logging. Soc. Pet. Eng., SPE Repr. Ser.* **21**: 357-372.
- Crain E.R. 2004: *Crain's Petrophysical Handbook; Permeability, Productivity, Reservoir Volume, and Cash Flow.* Rocky Mountain House. Alberta Canada. 530 p.
- Poupon A., Leveaux J. 1971: Evaluation of water saturation in shaley formations. 12th Annual Society of Professional Well Log Analysts Logging Symposium Transactions. 1-2.
- Simandoux P. 1963: Mesures dielectriques en milieu poreux, application a mesure des saturation eau: Institute Francais du Petrole, Supplementary Issue.
- Sofregaz 2001a: Reservoir characterization of Qom formation in Sarajeh field, well S8, 2, Task Report 5. Part C. 112 p.
- Sofregaz 2001b: 2D Seismic data interpretation, 2, Task Report 4. Field Seismic. 35p.
- Sofregaz 2001c: Data Collection and Review (Data Book) 1. Task Report 1. 34 p.
- Timur A. 1968: An investigation of permeability, porosity and residual water saturation relations for sandstone reservoirs. *The Log Analyst.* **9**: 8-17.
- Tixier M.P. 1949: Evaluation of Permeability from Electric-log Resistivity Gradient. *Oil and Gas J.* **48**: 113-122.
- Waxman M.H., Smits L.J.M. 1968: Electrical conduction in oil-bearing sands. *Society of Petroleum Engineers Journal.* **8**: 107-122.
- Wyllie M.R. Rose W.D. 1950: Some theoretical considerations related to the quantitative evaluation of the physical characteristics of reservoir rock from electrical log data. *Trans. AIME.* **189**: 105-118.