تفسیر لیتولوژیکی نمودارهای پتروفیزیکی

سید حسام الدین محمودی

فوق لیسانس زمین شناسی، شرکت ملی نفت ایران، sh.mahmoudi1972@yahoo.com

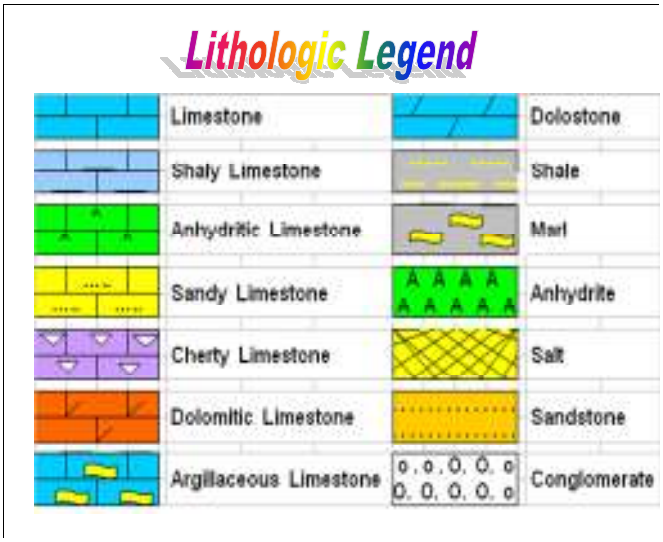
چکیده

با توجه به ماهیت نمودار چگالی (FDC)و با توجه به مقیاس آن در لاگ‌های اخذ شده، در سنگ‌های چگال نمودار به سمت راست و سنگ‌های با چگالی کمتر نمودار به سمت چپ میل می‌کند. در نمودارتخلخل(CNL) مقیاس، از راست به چپ زیاد شده و بر خلاف جهت ازدیاد چگالی حرکت می کند. با توجه به این موضوع در سنگ‌های متراکم، چگالی بالا و در نتیجه تخلل کم می شود و نمودارهای چگالی و تخلخل هردو به سمت راست و در سنگ‌های با چگالی کمتر و در نتیجه تخلخل بیشتر، نمودارها به سمت چپ حرکت می‌کنند. نمودارهای شماتیک ارائه شده با توجه به این موضوع تفسیر شده‌اند. در لاگ تخلخل، اثر گاز با توجه به تراکم کم اتم های هیدروژن، میزان تخلخل را کمتر از آنچه وجود دارد نشان می دهد.

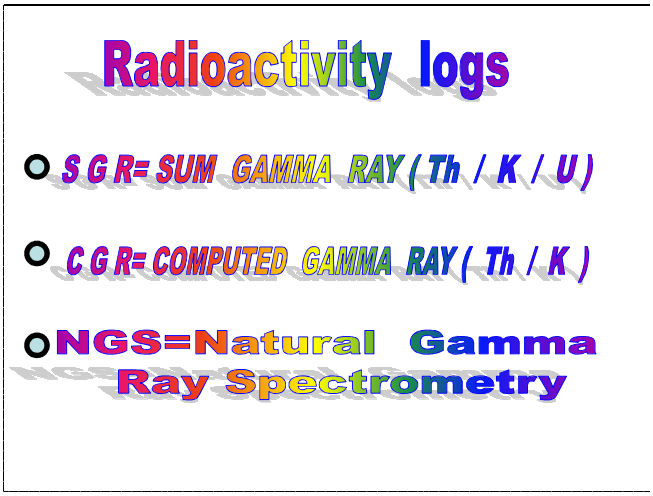
کلمات‌کلیدی: لیتولوژی، لاگ‌تخلخل، نمودارچگالی، نمودارتخلخل، شاخص‌پتروفیزیکی، FDC CNL

مقدمه

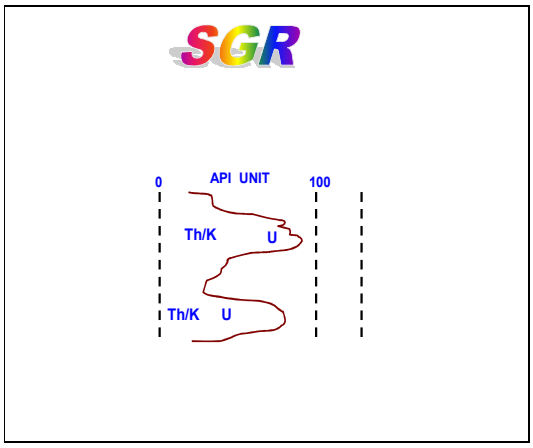
ارزیابی شاخص‌های پتروفیزیکی مانند تخلخل و تراوایی و نیز تفسیر لیتولوژکی و تعیین گونه‌های سنگی از اهداف اصلی و یکی از اولویت‌های مخازن نفتی است. از ارزیابی‌های صورت گرفته در زون بندی مخزن نیز استفاده می‌شود. ارتباط بین اختصاصات پتروفیزیکی و زمین‌شناسی موضوعی است که مطالعات و مقالات زیادی را به خود اختصاص داده است. ترکیب سازند ها به کمک نمودارهای چاه پیمایی(نظیر دانسیته، نوترون و اشعه گاما) می تواند بصورت کانی و یا عناصر شیمیایی بیان شود.



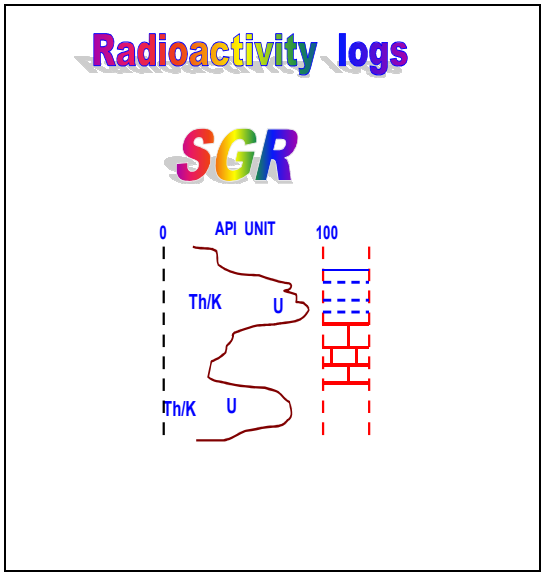
شکل۱) راهنمای سنگ‌شناسی تفسیر داده‌های پتروفیزیکی



شکل۲) انواع لاگ‌های رادیواکتیویته

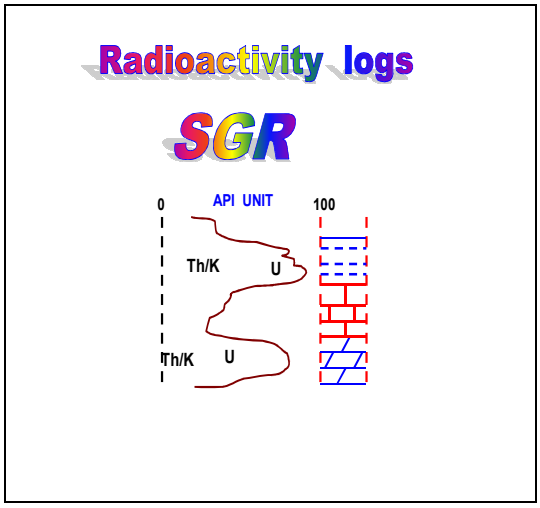


شکل۳) استخراج نوع سنگ از روی لاگ SGR

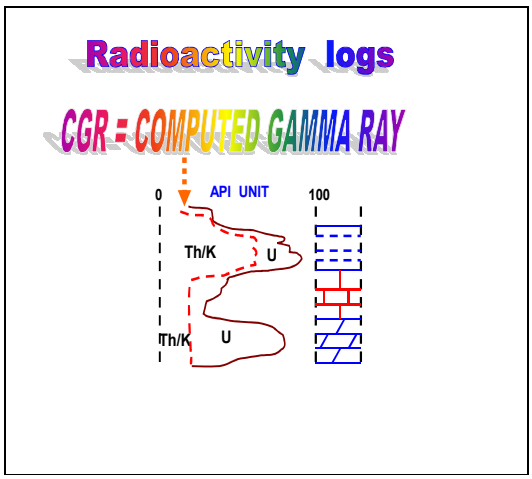


شکل۴) استخراج نوع سنگ از روی لاگ SGR

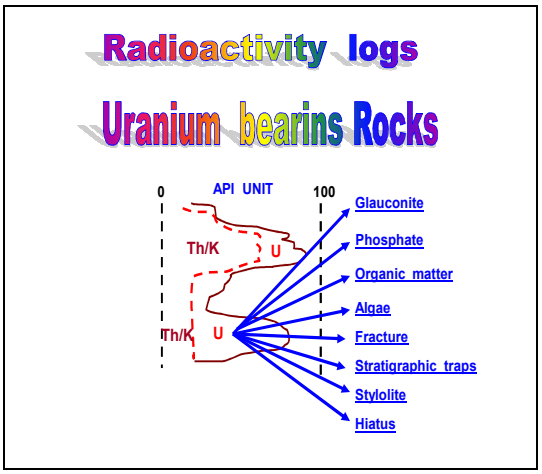
در شکل ۴ به نظر می رسد که پس از لایه آهکی یک لایه شیلی- مارنی داریم در حالی که با در نظر گرفتن لاگ‌های SGR و CGR با هم، می توان دولومیت و شیل - مارن را از هم تفکیک کرد. در شکل های ۵ و ۶ این تفسیر را مشاهده می کنید. میزان عنصر اورانیم در دولومیت‌ها و شیل- مارن‌ها می‌تواند بالا باشد ولی تفاوت این دو گروه سنگی در میزان توریوم - پتاسیم آن‌ها می‌باشد. لاگ CGR مقدار عناصر توریوم و پتاسیم را نشان می‌دهد و می‌توان با این لاگ این دو دسته سنگ را از هم تفکیک نمود.



شکل۵) ادامه استخراج نوع سنگ از روی لاگ SGR

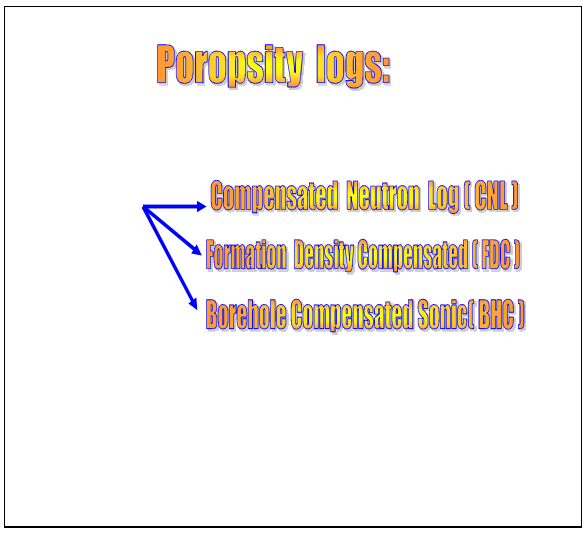


شکل۶) ادامه استخراج نوع سنگ از روی لاگ SGR و CGR (تفاوت دولومیت و شیل و جدایش آنها با استفاده از لاگ‌های SGR و CGR)



شکل۷) منشا تفاوت مقادیرلاگ‌های SGR و CGR

میزان اورانیوم موجود در سنگ‌ها می‌تواند از منشاهای متفاوتی باشد. در شکل ۷ برخی از این موارد ذکر گردیده‌اند.



شکل۸) انواع لاگ‌های تخلخل

قبل از این که تفسیر لیتولوژیکی بر اساس لاگ‌های دانسیته و نوترون را بررسی کنیم، به تشریح مختصری از مراحل اندازه‌گیری و ارتباط آن‌ها با سنگ‌شناسی می‌پردازیم.

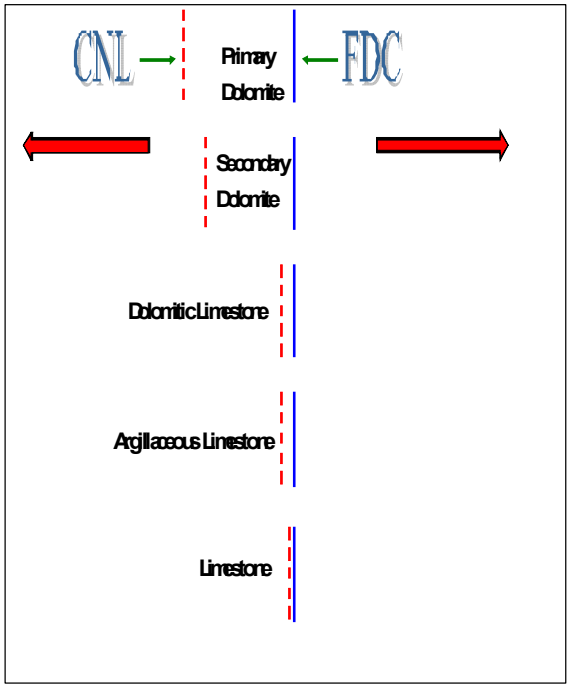
لاگ نوترون(CNL): لاگ نوترون یا Compensated Neoutron Log را با استفاده از یک دستگاه ارسال نوترون‌های سریع به داخل سازند و سپس شمارش نوترون‌های کند شده برگشت خورده، تهیه می‌کنند. نوترون‌های سریع ساطع شده در برخورد با اتم‌های هیدروژن انرژی خود را از دست می‌دهند و بر این اساس

با شمارش نوترون‌های کند شده و با توجه به این که اتم‌های هیدروژن بیشتر در آب و هیدروکربور تجمع دارند بنابراین تعداد نوترون‌های کند شده در ارتباط با تخلخل خواهد بود.

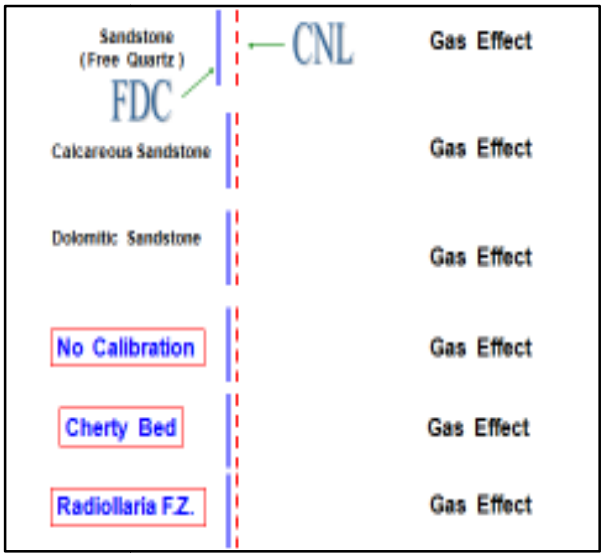
لاگ دانسیته(FDC): لاگ دانسیته یا Formation Density Compensated .مقیاس این لاگ از چپ به راست 1.95تا 2.95 زیاد می شود. بر اساس خاصیت پراش کامپتون و تراکم الکترون‌ها در سازند و میزان اشعه گامای ضعیف شده در اثر برخورد با الکترون‌ها دانسیته سازند محاسبه می‌گردد. دانسیته کانی‌های معمول سنگ‌های رسوبی و سیالات درون سنگ‌ها در جدول زیر ارائه شده است.

جدول۱) چگالی کانی‌های مختلف و سیالات موجود در خلل و فرج

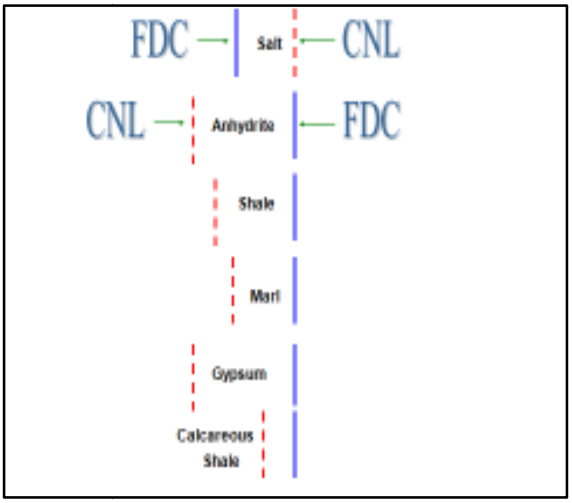
Mineral	Density(gr/cc)	Fluid	Denssity(gr/cc)
Quartz	2.65	Fresh Water	1
Calcite	2.71	Salt Water	1.15
Dolomite	2.87	Oil	0.85
Anhydrite	2.96		



شکل۹) تفسیر لاگ‌های تخلخل و دانسیته و استخراج انواع سنگ‌ها (فلش‌های قرمز جهت ازدیاد پارامتر را نشان می‌دهند)



شکل۱۰) تفسیر لاگ‌های تخلخل و استخراج انواع سنگ‌ها همراه با اثر گاز

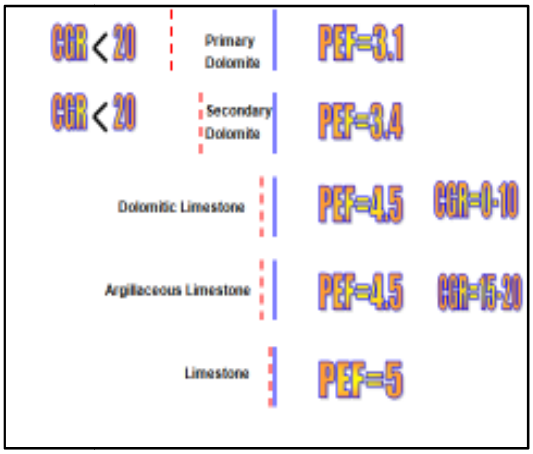


شکل۱۱) تفسیر لاگ‌های تخلخل و دانسیته و استخراج انواع سنگ‌ها

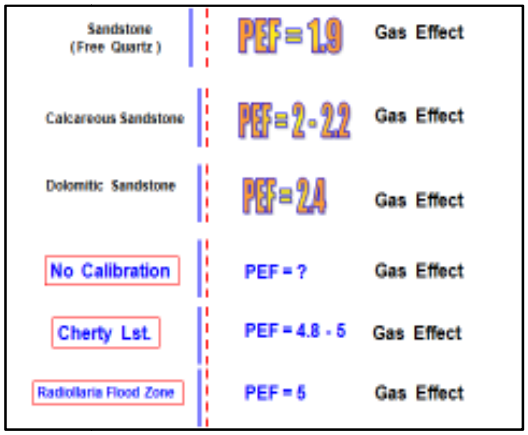
شکل۱۲) تفسیر لاگ‌های تخلخل و CGR و استخراج انواع سنگ‌ها

توجه : CGR بالای ۲۰ = شیل یا مارن	
کوارتز آرنایت و یا Free Qz	PEF = 1.9
ماسه سنگ با سیمان آهکی	PEF = 2
ماسه سنگ با سیمان دولومیتی	PEF = 2.3
دولومیت اولیه	PEF = 3.1
دولومیت ثانویه	PEF = 3.5
سنگ آهک	PEF = 5.08
انیدریت	PEF = 5.05
ژیپس	PEF = 3.5-4
آهک دولومیتی	PEF = 4.8
آهک رسی یا مارن	PEF = 4.8
گلوکونیت/کلریت	PEF = 6

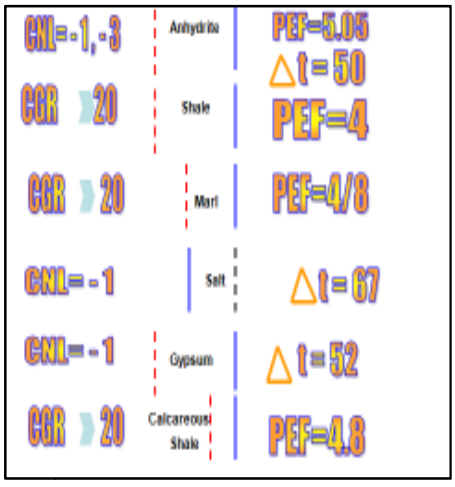
شکل۱۳) مقدار PEF در سنگ‌های مختلف



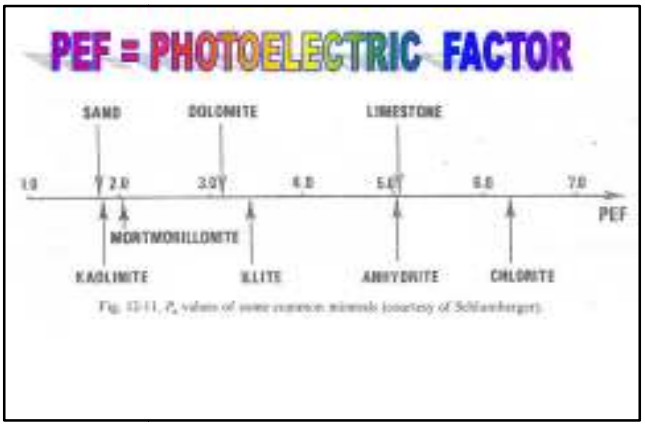
شکل۱۴) تفسیر لاگ‌های تخلخل و دانسیته به همراه PEF آن‌ها



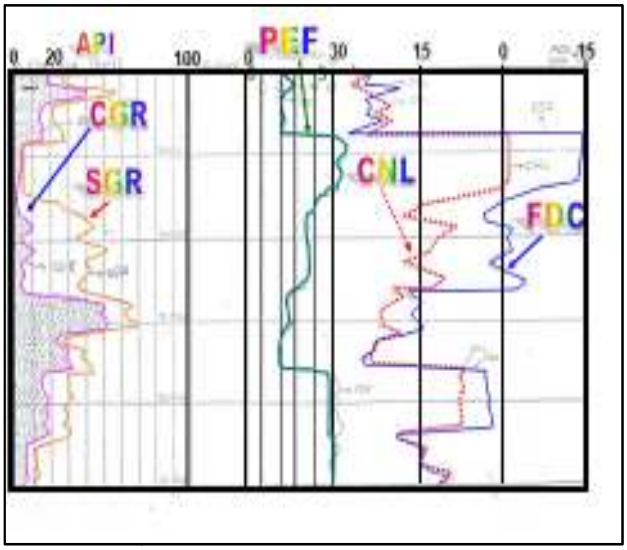
شکل۱۵) تفسیر لاگ‌های تخلخل و دانسیته به همراه PEF آن‌ها



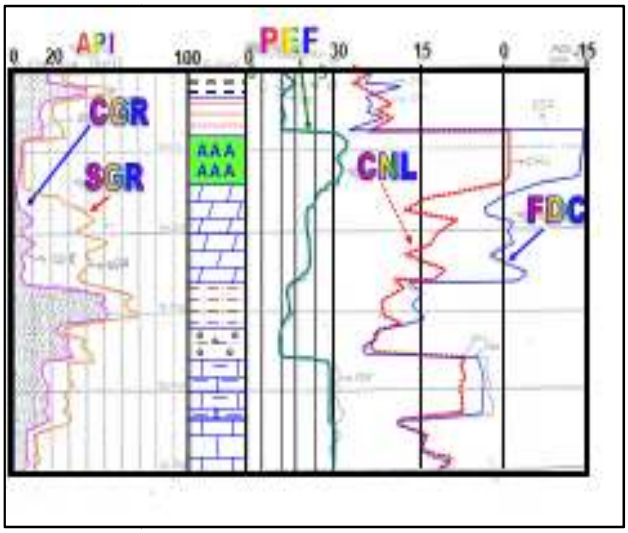
شکل۱۶) تفسیر لاگ‌های تخلخل و دانسیته به همراه PEF و مقدار عددی لاگ سونیک آن‌ها



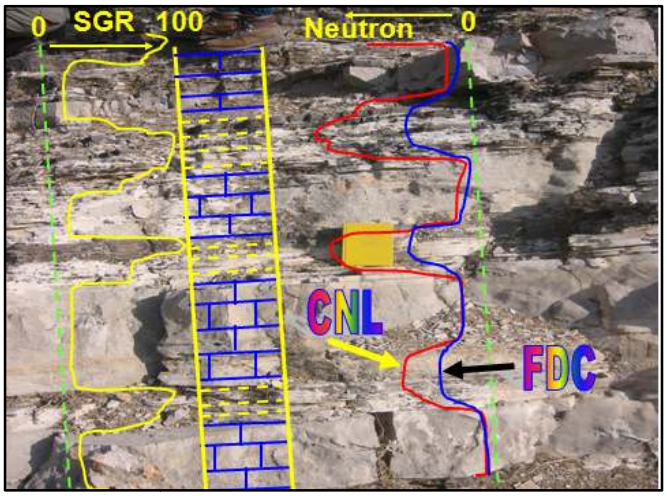
شکل۱۷) جدول عددی PEF و جایگاه لیتولوژی‌های مختلف



شکل۱۸) تفسیر یک لاگ واقعی با توجه به تخلخل، دانسیته، PEF، CGR و SGR و استخراج انواع سنگ‌ها همراه با اثر گاز



شکل۱۹) تفسیر یک لاگ واقعی با توجه به تخلخل، دانسیته، PEF، CGR و SGR و استخراج انواع سنگ‌ها



شکل۲۰) نمونه‌ای واقعی از سازند و تفسیر آن با کمک لاگ‌های مورد نظر

تشریح دستگاه نمودارگیر NGT (طیف سنجی اشعه گامای طبیعی)

دستگاه طیف نگار پرتو گامای طبیعی یا NGT پرتو گاماهای طبیعی منتشر شده سازندها را با انـرژی هـای متفاوت جذب و ثبت می کند. عناصر رادیواکتیو قابل ثبت در این نمودار شامل پتاسیم، توریم و اورانیوم می باشند. این ابزار قادر به جذب اشعه‌هایA (بار مثبت)، B (بار منفی) نیست لذا منحصراً اشعه گاما (بارخنثی) را جذب و اندازه‌گیری می‌کند. پتاسیم دارای ایزوتوپ‌های K 39، K 41، K 40 بوده و منحصراً K40 نوع رادیواکتیو پتاسیم محسوب می‌گردد.

توریوم ایزوتوپ‌های Th 232، Th 230 و Th 234 دارد و نوع Th 232 نیمه عمر طولانی‌تری دارد. اورانیوم سه ایزوتوپ رادیواکتیو۲۳۴، ۲۳۵ و ۲۳۸ دارد. نوع U 235 فراوان‌ترین نوع بوده که در کربنات کلسیم تثبیت می شود و نوع U234 بیشتر در آب دریا وجود دارد. دستگاه NGT انرژی گامای طبیعی کمتر از ۰/۵ و بیش از۲/۵ میلیون الکترون ولت را برای هر سه عنصرK وTh وU اندازه‌گیری می‌کند. قطر دستگاه ۳ و ۵/۸ اینچ و طول آن ۳ متر بوده و همراه با نمودارهای FDC/CNL رانده می‌شوند و در فشار ۲۰۰۰۰ پوند برفوت مکعب و درجه حرارت ۳۰۰ درجه فارنهایت مقاوم است. شعاع بررسی دستگاه بین ۵ تا ۲۵ سانتی متر است و این شعاع بستگی به عوامل زیر دارد. ۱- قطر چاه ۲- وزن مخصوص سنگهای حفاری شده ۳- وزن مخصوص گل حفاری ۴-مقدار انرژی پرتو گاما. هرچه چگالی سازند بیشتر باشد پرتو گامای کمتری ثبت می‌شوند لذا مبنائی برای تفکیک زون‌های مخزنی و گونه‌های سنگی سازند می‌باشند و هر چه انرژی پرتو گاما بیشتر باشد شعاع بررسی نیز بیشتر است.

سرعت نمودارگیری

این ابزار در مقابل سرعت رانده شدن در چاه بسیار حساس است چون مبنای کار آن بر اساس شمارش آماری پرتوهای ساطع شده از سازند بوده و تغییرات سرعت بر مقدار شمارش تأثیر بسیار زیادی دارد لذا می‌بایست با کمترین سرعت لازم یعنی حدود ۱۰ متر در هر دقیقه عملیات نمودارگیری صورت پذیرد.

عوامل مؤثر بر میزان قرائت پرتوهای گامای حاصل از عناصر رادیو اکتیو

۱- بنتونیت در گل حفاری حضور دارد که خود پرتوزا است.

۲- سیلویت یا KCL موجود در گل حفاری میزان قرائت را با اشکال مواجه می‌سازد.

۳- تمامی انواع فولادها مقادیر پرتو گاما را کاهش می‌دهند لذا قرائت پشت لوله جداری اندک است.

۴- جنس سیمان پشت لوله جداری، ضخامت و چگالی آن در میزان قرائت مؤثر است.

موارد کاربرد نمودار NGS

۱- انجام تطابق‌های چینه‌ای در مقیاس ناحیه‌ای

۲- عامل مهم در تشخیص و تفکیک زون بندی مخازن

۳- تشخیص سنگ‌های منشاء (Source Rocks)

۴- تشخیص سنگ شناسی

۵- تشخیص کانی‌های رسی

۶- تشخیص محیط‌های رسوبی دیرینه

۷- تخمین و برآورد حجم شیل

۸- تشخیص شکستگی‌ها بویژه در کربناتها

۹- تشخیص گسستگی‌های لیتولوژیک و ناپیوستگی‌ها

۱۰- برآورد میزان Lithification (سنگ شدگی) و دیاژنز در سنگها

تشخیص ناپیوستگی‌ها و گسستگی‌های لیتولوژیک با استفاده از نمودار طیف نگار گامای طبیعی

در محل ناپیوستگی رسوبی، نسبت Th/K بطور ناگهانی بالا می‌باشد که ممکن است بدلیل حضور کانی‌های گلوکونیت و یا فسفات نیز باشد. مقدار U نیز افزایش می‌یابد. البته افزایش ناگهانی پیک U نیز ممکن است بدلیل حضور شکستگی باشد. زیرا گاهی اوقات گردش آبهای زیرزمینی و یا هیدروترمال در شکستگی‌ها و در شرایط احیائی ممکن است سبب رسوب نمک‌های اورانیوم شود که بیانگر شکستگی است همچنین در نواحی استیلولایتی میزان اورانیوم بالا می‌رود .

تشخیص سنگهای منشاء

سنگهای غنی از مواد آلی حاوی رادیواکتیویته بیشتری در مقایسه با شیل‌های معمولی و آهکها بوده لذا میزان قرائت پرتوگامای طبیعی و تمرکز اورانیوم در مقابل این لایه‌ها به مراتب بیشتر از دیگر لایه‌ها است. علت تجمع اورانیوم درسنگهای منشاء بواسطه جذب یون‌های اورانیوم توسط پلانکتون‌های دریائی است. در حالیکه سنگهای منشاء دریاچه‌ای فاقد یون‌های اورانیوم می‌باشند.

مشبک کاری

برای انجام مشبک‌کاری می‌توان با استفاده از نمودار NGS بهتر عمل نمود زیرا محیط های متخلخل غالباً سرشار از اورانیوم است و با افق‌های کم تراوای دیگر کاملاً قابل تفکیک می‌باشند.

تقسیم بندی رس ها بر مبنای تعداد لایه‌های اکتائدری و ترائدری

۱- گروه رس‌های دو لایه:

الف ـ با ابعاد برابر : نظیر گروه کائولینیت

ب ـ طویل : نظیر گروه هالویزیت

۲- گروه رس‌های سه لایه:

الف ـ شکبه آماس‌پذیر

۱- با ابعاد برابر

A)گروه مونت موریلونیت - آماس کامل

B)ورمیکیولیت -آماس محدود

۲- طویل نانترونیت - ساپونیت - هکتوریت

ب- شبکه آماس ناپذیر، نظیر گروه ایلیت

۳-گروه رس‌های چهار لایه‌ای : - گروه کلریت

۴-گروه رس‌های با ساختمان زنجیره‌ای : -گروه اتاپولژیت

رس‌ها گروهی از کانی‌های آلومینوسیلیکاته آبدار می‌باشند و بخش بزرگی از خانواده فیلوسیلیکاتها را تشکیل می‌دهند. آنها در گل‌های دریائی عمیق، مادستون‌ها، آرژیلیت‌ها،رس سنگها، شیل‌ها و لجن‌های رسی دریائی یافت می‌شوند. کانی‌های رسی عموماً در لایه‌های شیلی و مارنی وجود دارند و بسته به محیط رسوب تشکیل رس مذکور، انواع خاصی دارند. برخی از آنها نظیر ایلیت، رنگ سبز متمایل به خاکستری دارند و بیانگر نواحی نسبتاً عمیق دریائی می‌باشند و برخی نظیر کائولینیت با رنگ متمایل به سفید بیانگر شرایط اپیروژنی (خشکی‌زائی) و خروج از آب است. برخی از رس‌ها در اثر دما، ویژگیهای سختی، نفوذپذیری و رنگهای زیبا بدست می‌آورند که آنها را در ساخت سرامیک ارزشمند می‌نماید.

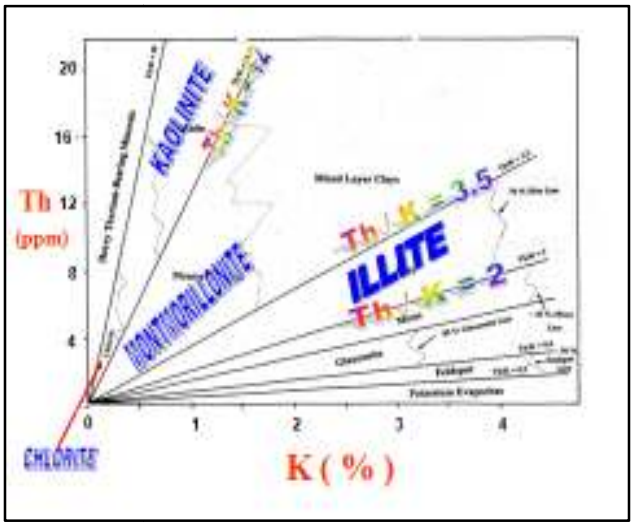
۱- اولین تعریف بر اساس ابعاد دانه‌ها استوار است و شامل هر دانه‌ای با اندازه کوچکتر از ۴ میکرون نظیر کانی‌های کوارتز، کلسیت، پیریت و یا سایر مواد می‌باشد. این تعریف از رس که بر اساس آنالیز اندازه ذرات است، اساس کار رسوب‌شناسان محسوب می‌گردد. غالباً اندازه رس‌ها کمتر از ۲ میکرون می‌باشد ولی ممکن است به حدود ۲۰ میکرون نیز برسد.

۲- دومین تعریف بر اساس ترکیب استوار است و به عنوان سیلیکات آلومینیوم آبدار مربوط به یکی از سه گروه اصلی کائولینیت، مونت موریلونیت و ایلیت و همچنین شامل ورمیکولیت و کلریت ریزدانه می‌باشد.

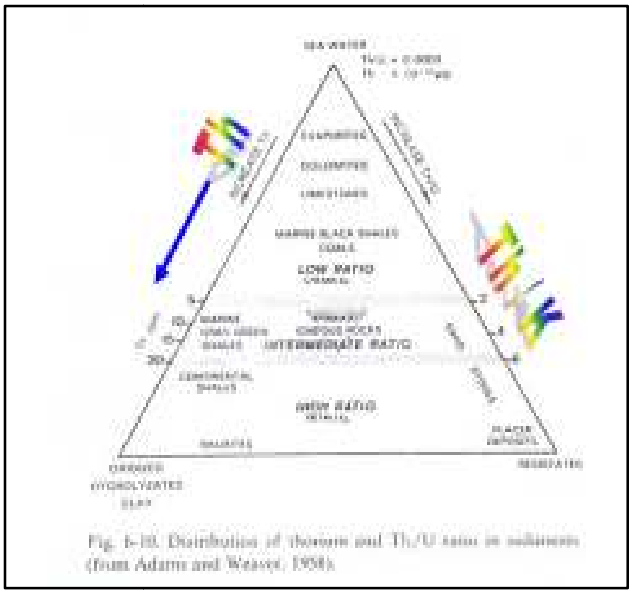
۳- سومین تعریف که نوعی تعریف پتروگرافی است، تحت عنوان عمومی رس، شامل کانی‌های رسی موجود در تعریف دوم است. بعلاوه سریسیت و مسکویت ریزدانه، بیوتیت و کلریت‌های کوچکتر از ۲۰ میکرون و حتی انواع اکسیدهای آلومینیوم آبدار نظیر بوکسیت و گیبست را در بر می‌گیرد.

آماس‌پذیری و انقباض (Expandation & shrinkag)

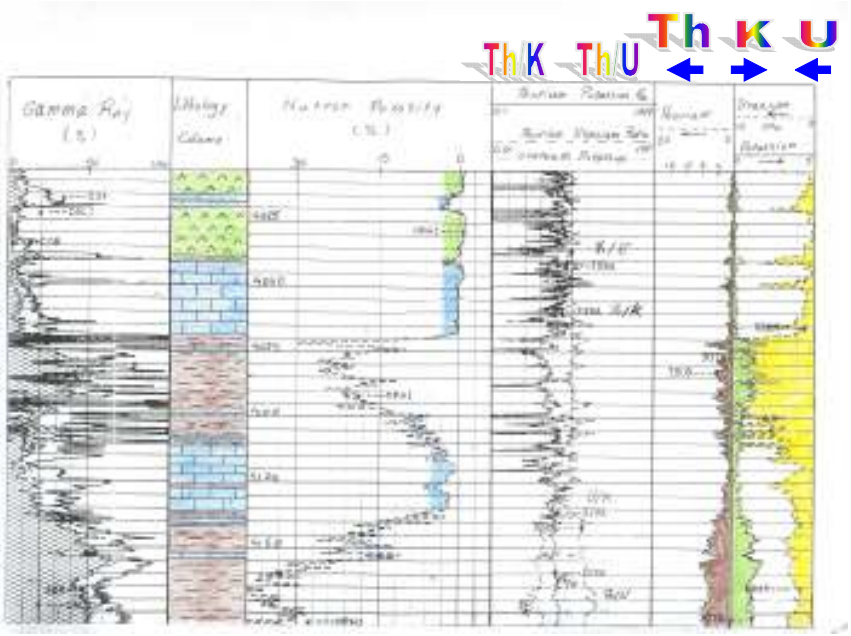
از ویژگیهای مهم رس‌های گروه مونت موریلونیت آماس پذیری آنها در اثر جذب آب و نفت وانقباض آنها به علت خشکی است. در این گونه رسها آب در میان ورقه‌های یونی سازنده بلور باقی می‌ماند و موجب افزایش حجم رس می‌گردد. عواملی که در میزان گسترش شبکه رس یا آماس آن دخالت دارند ، در مواردی نظیر : نوع رس ، اندازه ذرات رس، اندازه و ظرفیت کاتیونهای تبادلی می‌باشند. بهمین دلیل رس‌های سدیم‌دار بسیار بیشتر از رس‌های کلسیم‌دار دچار آماس و انقباض می‌شوند. سایر گروههای رس اندکی و یا هیچ تغییری از خود در این زمینه نشان نمی‌دهند.



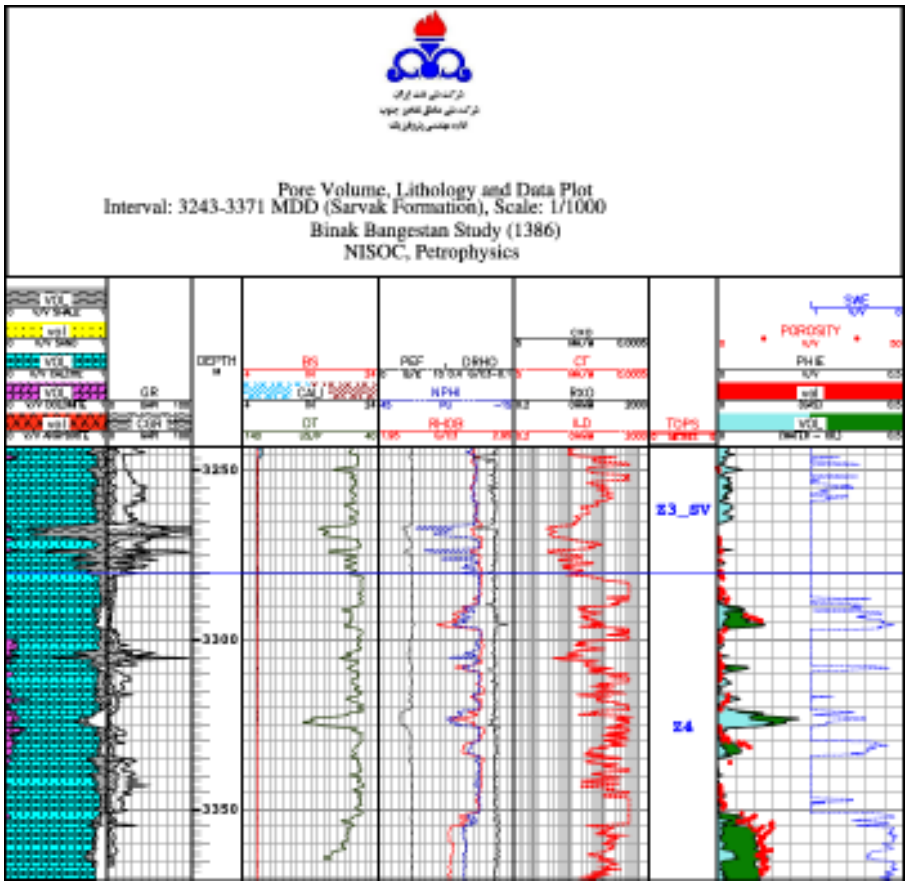
شکل۲۱) موقعیت انواع رس ها در نمودار تخلخل- مقدار توریم



شکل۲۲) توزیع توریوم و پتاسیم در انواع رسوبات



شکل۲۳) تفسیر لیتولوژیکی بر اساس داده‌های مقادیر نسبت توریوم/ اورانیم، اورانیم/پتاسیم و مقادیر جداگانه این عناصر همراه لاگ‌های نوترون و گاماری



شکل۲۴) نمونه واقعی از تفسیر یک لاگ پتروفیزیکی (به لاگ‌های نوترون و دانسیته و گاماری دقت شود)

پتروفیزیک

تفسیر نمودارهای چاه پیمائی بستگی به شخص مفسر دارد. پارامترهای اولیه و مهم که از ابتـدا مـی‌بایسـت توسط یک مفسر مورد ارزیابی قرار گیرند شامل موارد ذیل می‌باشند:

- تخلخل

- اشباع آب، نوع سیال (آب، نفت و گاز)

- سنگ شناسی

- تراوائی

با تلفیق داده‌های فوق می‌توان مقادیر هیدروکربور درجا و قابل استحصال را محاسبه نمود و با ترسیم نقشه‌های خواص پتروفیزیکی قادر به شناخت دقیق زون‌های مخزنی خواهیم بود.

مفسرین زمین‌شناسی و پتروفیزیکی علاقمند به تفسیر نمودارها برای منظورهای زیر می‌باشند:

- انجام تطابق یک چاه با چاه دیگر
- تفسیر رخساره‌های سنگی
- تاریخچه رسوب‌شناسی و بررسی دیاژنز سنگ‌های مخزن
- تحلیل زمین‌شناسی ساختمانی ناحیه‌ای
- تهیه ارزیابی کمی پتروفیزیکی برای هر چاه
- تهیه مدل لرزه‌ای مصنوعی از طریق نمودارها

در تحلیل کمی نمودارها، هدف اصلی تعیین موارد ذیل است:

- شناخت نوع سنگ مخزن (لیتولوژی)
- ظرفیت ذخیزه‌سازی (تخلخل)
- نوع هیدروکربور و محتویات آن (اشباع)
- لایه‌های تولیدی نفوذ پذیر (تراوائی)

تخلخل

نسبت فضای خالی موجود در سنگ به حجم کل سنگ تخلخل نام دارد. در این مورد دو حجم وجود دارد یکی حجم دانه‌ها VG و دیگری حجم تخلخل‌ها VP که مجموع دو حجم فوق، حجم کل سنگ را تشکیل می‌دهد.

$$VB = VG + VP$$

لذا تخلخل بصورت زیر محاسبه می‌گردد :

$$PHI= Vp/Vt$$

میزان تخلخل را می‌توان از روش‌های دیگر محاسبه نمود:

$$PHI=(Vb-Vg)/Vb \quad , \quad PHI= Vp/(Vg+Vp)$$

اشباع آب

نسبت حجم آب موجود در فضای تخلخل به حجم کل تخلخل موجود است. لذا اشباع آب یک سیستم متخلخل به سادگی با فرمول زیر قابل محاسبه است:

$$SW = V_w / V_p$$

تراوائی

توانایی یک سیستم متخلخل در عبور دادن یک سیال از درون خود را تراوائی می‌گویند که از فرمول زیر قابل محاسبه می‌باشد :

$$K = Q \times \mu \times L / \Delta P * A$$

K : تراوائی (میلی‌دارسی)

Q : سرعت جریان (میلی‌لیتر بر ثانیه)

μ : گرانروی سیال (سانتی‌پوز)

L : طول (سانتی‌متر)

ΔP : اختلاف فشار (فشار اتمسفری)

A : سطح (سانتی‌مترمربع)

اندازه‌گیری تراوائی

روش‌های اندازه‌گیری میزان تراوائی مخزن بشرح ذیل معرفی می‌گردند:

آزمایش ساق مته (DST)

لایه آزمایی مکرر (RFT) شامل (build up Drawdown)

تفسیر نمودارها

آنالیز مغزه‌ها

برای محاسبه ستون هیدروکربوری مفید فرمول زیر پیشنهاد می شود :

$$Net H.C. = PHI \langle 1 - SW \rangle$$

برای محاسبه تخلخل مفید فرمول زیر پیشنهاد می شود :

$$NetPHI = \frac{\Sigma PHI.h}{\Sigma h}$$

برای محاسبه اشباع آب مفید فرمول زیر پیشنهاد می شود :

$$SW = \frac{\sum PHI.h.SW}{\Sigma PHI.h}$$

نتیجه‌گیری

بدون تردید تفسیر لاگ‌های پتروفیزیکی با کنار هم قرار دادن تمامی داده‌ها و لاگ‌های متنوع نتیجه بهتری خواهد داشت. تبحر و تجربه شخص مفسر نیز از پارامترهای تعیین کننده در ارائه نتیجه با کیفیت بالاتر می‌باشد. ابهام موجود در تفسیر و یا عدم تفکیک مناسب لیتولوژی‌های مختلف ناشی از یکسان بودن واکنش سازندهای متفاوت به یک پارامتر فیزیکی را می توان با استفاده از داده ها و لاگ های متنوع دیگر برطرف نمود.

منابع

1 - Schlumberger, Log Interpretation Chaarts, Houston,TX , 1995

2 - SPE Textbook Series, vol. 4, 1994, Theory, measurement and Interpretation Of Well Logs.

3- Toby Daarling, 2005,Well logging And Formation Evaluation.

۴- موحد بهرام، ۱۳۶۴ ، طیف نگار اشعه گامای طبیعی (NGT) و کاربرد آن در مطالعات مهندسی مخازن و زمین شناسی