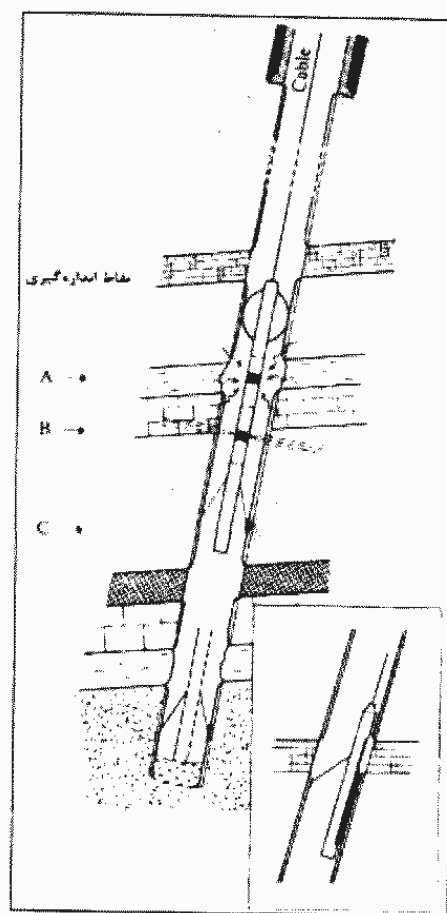
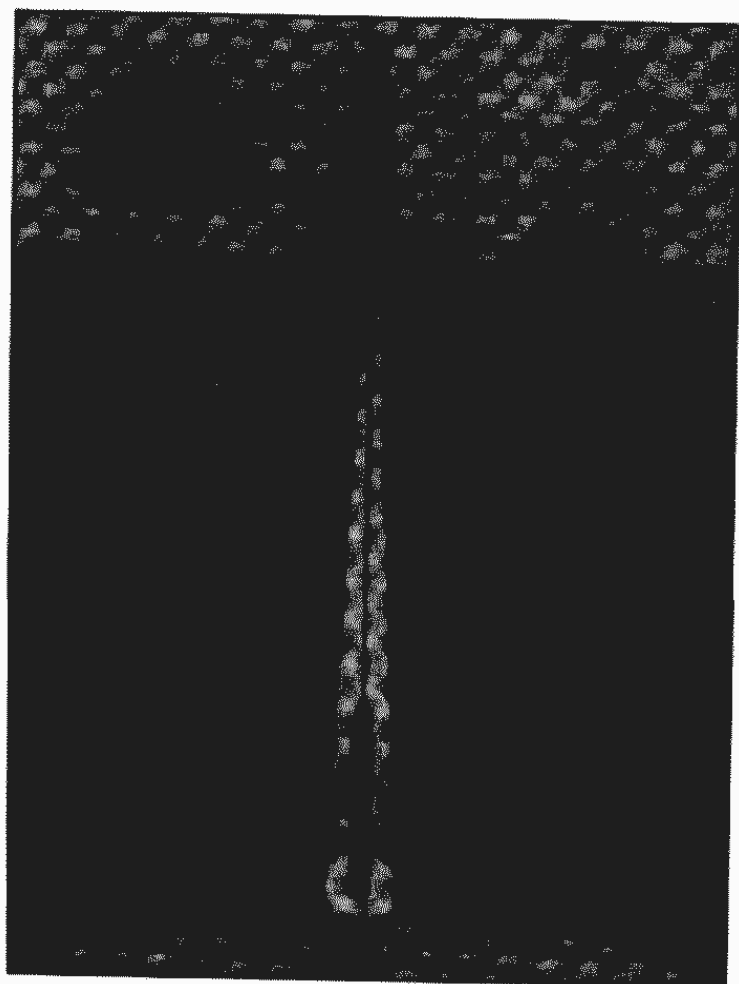


۱۱- مبانی نمودارگیری (Principles of Well Logging)

در طی حفاری گرفتن مغزه از سنگ‌های مورد نظر معمولاً وقت‌گیر و مستلزم مخارج زیادی است. خرده‌های سنگی به دست آمده از حفاری نیز به دلیل کوچک بودن، مخلوط بودن با هم و شستگی به وسیله سیال حفاری، اغلب در تفسیر مورد اطمینان نیستند. به این دلیل اطلاعات کمی از خواص فیزیکی اولیه سازندهایی که از آن مشتق شده‌اند، در اختیار قرار می‌دهند. نمودارهای ژئوفیزیکی کمک بزرگی برای حل این مشکل و کسب اطلاعات بیشتر از فواصل حفاری شده می‌باشد. از اهداف مهم نمودارگیری (well logging) تهیه یک سری اطلاعات درجا از مخزن است. پارامترهای مهم قابل دستیابی از اطلاعات نمودار عبارتند از: تخلخل، نسبت اشباع آب و نفت، ضخامت زون تولید (net pay thickness)، لیتولوژی و تراوایی.

شکل ۱-۱۱ شماتیکی از تجهیزات نمودارگیری یک چاه را نشان می‌دهد. ابزار نمودارگیری، سوند (sonde) نامیده می‌شود که در واقع، محفظه استوانه‌ای فلزی است که توسط یک کابل غلاف‌دار به درون چاه فرستاده می‌شود (شکل ۱-۱۱). شکل ۱-۱۱ نمونه‌های واقعی چند سوند را نشان می‌دهد.



شکل ۱-۱۱ -
تصویر
شماتیک از
یک سوند در
داخل چاه



شکل ۱۱-۳ - تصویر واقعی از چهار سوند که به ترتیب از چپ به راست عبارتند از سوند شیب‌سنج، صوتی، چگالی و شیب‌سنج به همراه یک کفشک اضافی که مقاومت را اندازه‌گیری می‌کند

اطلاعات به دست آمده از نمودارگیری عموماً روی کاغذ یا روی نوار مغناطیسی و به صورت رقومی ثبت می‌گردد. در کارهای صحرایی یک کامیون مخصوص که کابل نمودارگیری شامل منبع انرژی، ثبت کننده‌ها و تجهیزات کمکی را حمل می‌کند، بر سر چاه آورده می‌شود. در سوندها به طور

معمول چندین ابزار نمودارگیری به طور هم‌زمان به درون چاه فرستاده می‌شوند. این سبب می‌گردد که تعداد مراحل انجام نمودارگیری کاهش یابد.

نمودارها را بنا به ابزار و اساس مورد استفاده به انواع مختلفی نظیر الکتریکی (electrical)، رادیواکتیو (nuclear)، صوتی (acoustic) و مکانیکی (mechanical) تقسیم‌بندی می‌کنند. در این بخش به معرفی بسیار مختصر برخی از نمودارها پرداخته می‌شود.

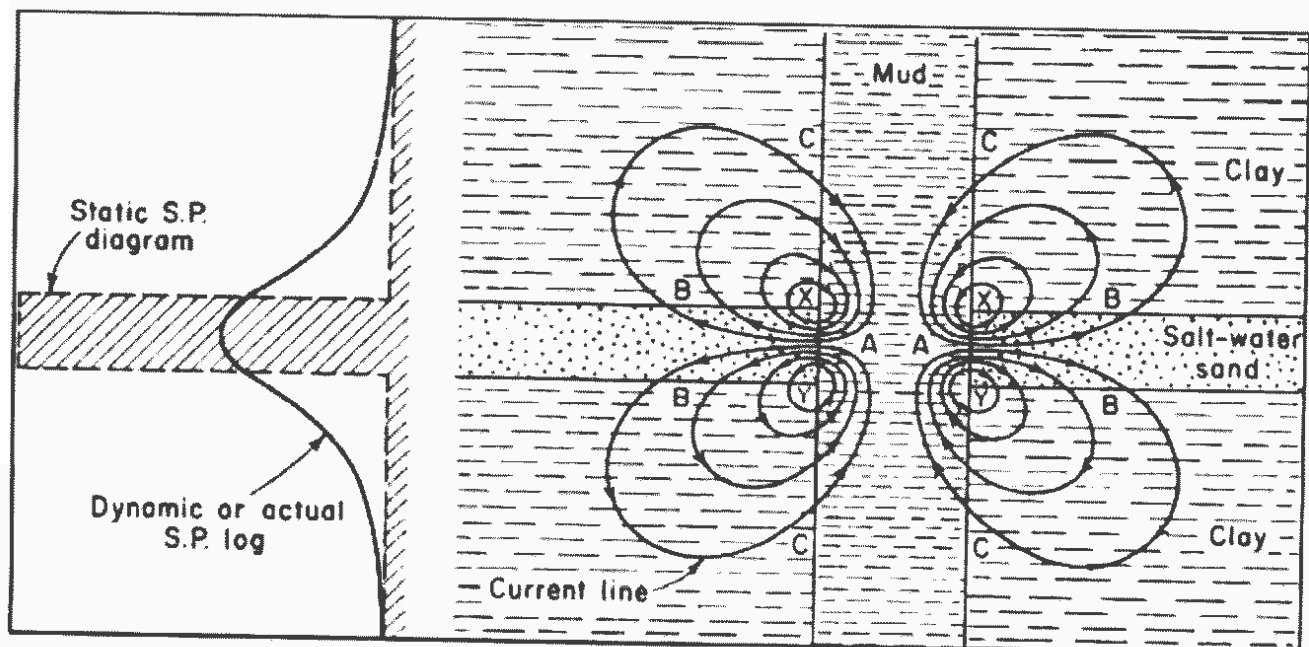
۱-۱۱ بررسی‌های الکتریکی (Electric Survey, ES)

نمودارهای الکتریکی، شامل پتانسیل خودزا (SP) و نمودارهای مقاومت الکتریکی (resistivity logging) می‌باشد. برای انجام نمودارگیری، ابتدا حفاری متوقف شده و رشته حفاری از چاه بیرون کشیده شده و سوند به داخل چاه فرستاده می‌شود. سگنال‌های الکتریکی از سوند به وسیله کابل نمودارگیری به دریافت کننده‌های الکتریکی موجود در کامیون رسیده و در مقابل عمق، ثبت و یا به صورت نمودار ترسیم می‌شود.

۱-۱-۱۱ پتانسیل خودزا (Spontaneous Potential, SP)

نمودار SP ولتاژهای الکتریکی در داخل گل حفاری مقابل سازندها در اعماق مختلف یک چاه را ثبت می‌کند. پتانسیل خودزا (SP) ناشی از فعالیت‌های شیمیایی سیالات در چاه و لایه‌های مجاور است. منبع اصلی پتانسیل خودزا در یک چاه، پتانسیل‌های الکتروشیمیایی (electrochemical potential) و الکتروکینتیک (electrokinetic) می‌باشد. اثرات الکتروشیمیایی منبع اصلی پتانسیل طبیعی در بیشتر چاه‌های حفاری می‌باشد. این اثرات به علت مهاجرت یون‌ها از محلول‌های با غلظت بالا به محلول‌های با غلظت پایین بوجود می‌آید. اندازه‌گیری این اختلاف پتانسیل بین الکتروود موجود در سوند و الکتروود موجود در سطح زمین صورت می‌گیرد. مقادیر پتانسیل خودزا خیلی کوچک است، بنابراین بر حسب یا میلی‌ولت اندازه‌گیری می‌شود.

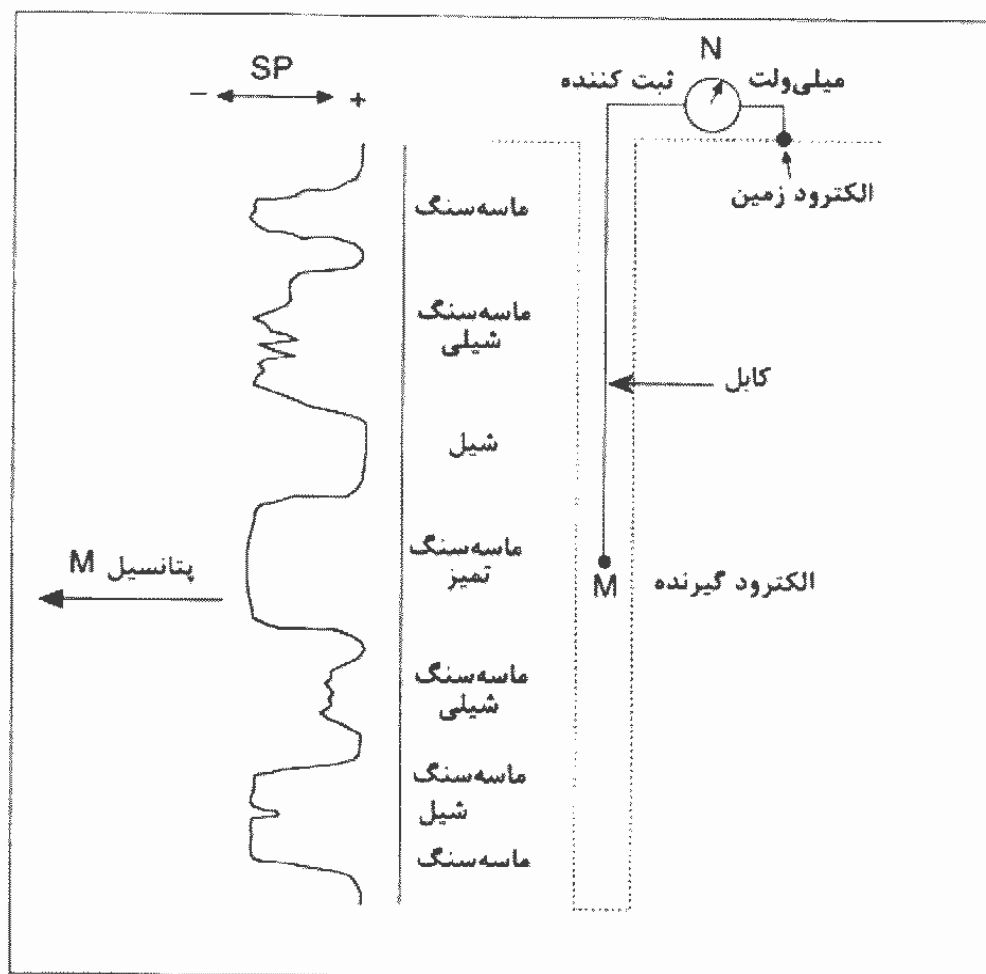
وقتی سیال گل حفاری شیرین‌تر از آب سازندی باشد جریان و نمودار SP به صورت شکل ۴-۱۱ است و اگر سیال گل حفاری از آب درون سازندی شورتر باشد جریان و نمودار بر عکس خواهد شد. بنابراین جهت جریان و پاسخ نمودار عمدتاً عملکردی از شوری نسبی سیالات درون چاه و سازند است. بنابراین تغییرات شوری سیال گل حفاری ویژگی نمودار SP را تغییر خواهد داد.



شکل ۴-۱۱ - نمایش شماتیک پتانسیل خودزا در اطراف یک لایه تراوا

وجود رس و هیدروکربن‌ها در سنگ تحرک‌پذیری یون‌ها و لذا پاسخ نمودار SP را کاهش می‌دهد.

معمولاً در منحنی SP شکل و دامنه پیک‌ها در مقابل سازندهای مختلف متفاوت می‌باشد (شکل ۵-۱۱).



شکل ۱۱-۵ - دیاگرام شماتیک منحنی پتانسیل خودزا برای لیتولوژی‌های مختلف

کاربردهای اصلی منحنی SP عبارتند از:

- ۱- تفکیک لایه‌های تراوا از لایه‌های غیر تراوا
 - ۲- تعیین مرز بین لایه‌ها
 - ۳- تطابق لایه‌های معادل از چاهی به چاه دیگر
 - ۴- به دست آوردن مقادیر مناسب برای مقاومت آب سازندی
 - ۵- محاسبه حجم شیل در مخازن غیر تمیز
- انحراف منحنی SP نسبت به خط پایه شیل (shale line base)، خطی که در منتهی‌الیه طرف مقابل منحنی SP وجود دارد، اندازه‌گیری می‌شود (شکل ۱۱-۶). همچنین، ماکزیمم انحراف SP در طرف منفی نمودار، غالباً در مقابل سازندهای تمیز و تراوا می‌باشد. بنابراین، می‌توان خطی به موازات خط پایه شیل تحت عنوان خط ماسه (sand base line) یا خط تمیز (clean base line) بر روی نمودار ترسیم نمود.

شکل ۱۱-۶ - منحنی پتانسیل خودزا و خط پایه شیل و ماسه

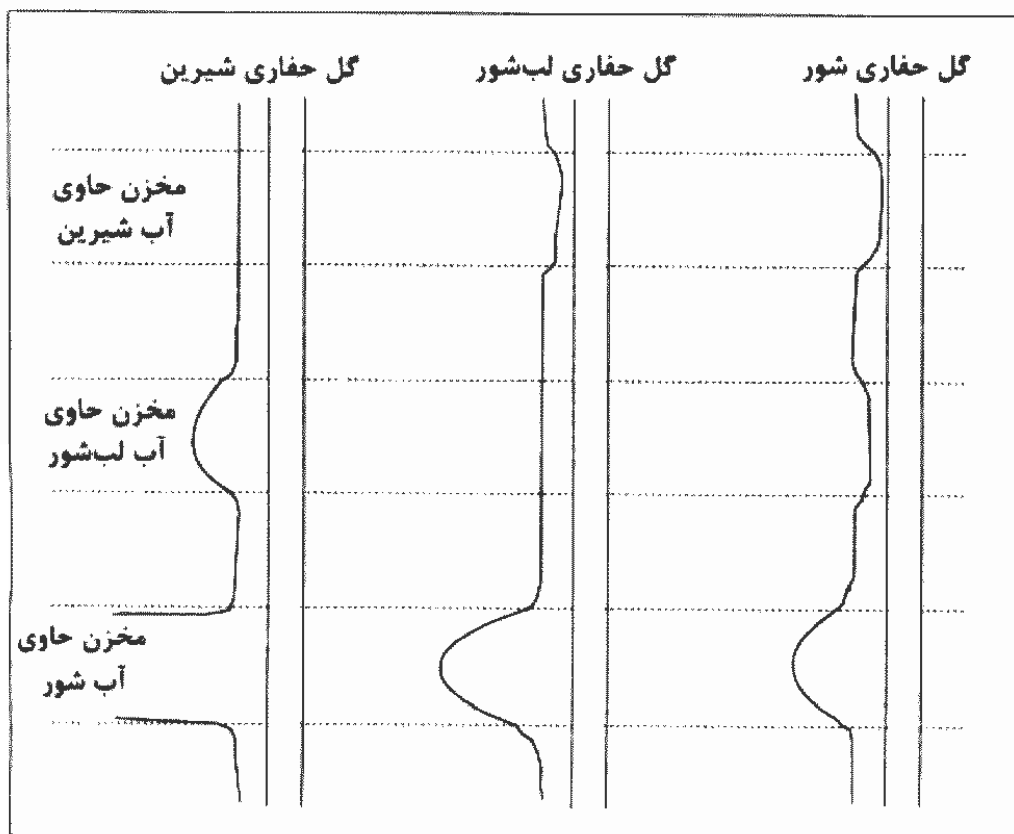
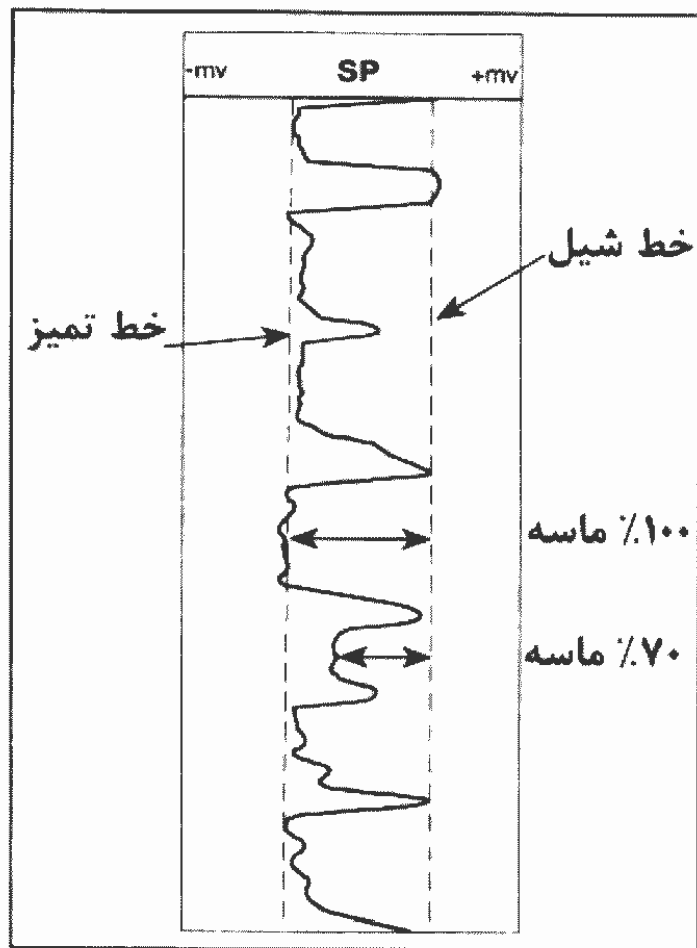
بر این اساس می‌توان حجم شیل را در مخازن با استفاده از نمودار SP به دست آورد:

$$V_{sh} = \frac{SP_{log} - SP_{min}}{SP_{max} - SP_{min}}$$

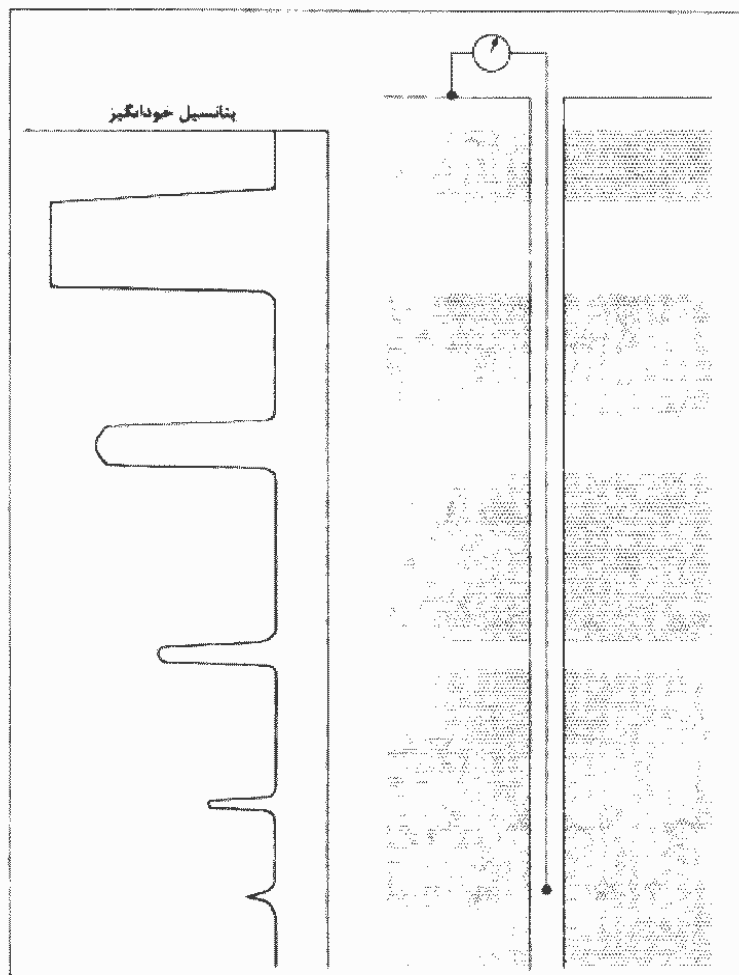
تفاوت شوری یا مقاومت الکتریکی گل حفاری و آب سازندی باعث انحراف نمودار SP می‌شود. شکل ۱۱-۷ نشان می‌دهد که نمودار SP برای ماسه حاوی آب شور هنگامی که چاه دارای گل با آب شیرین باشد، در بیشترین حد است (شکل

چپ). اگر سیال حفاری لب شور (brackish) باشد (شکل وسط)، منحنی SP در ماسه حاوی آب شیرین، به سمت

راست منحرف می‌شود و برای ماسه حاوی آب لب شور، مستقیم و برای ماسه حاوی آب شور نسبت به حالت اول تأثیر کمتری دارد. برای گل حاوی آب شور (شکل راست) نیز این تأثیرات نشان داده شده است.



شکل ۱۱-۷ - تأثیر تفاوت شوری آب سازندی و گل حفاری بر روی منحنی SP



نمودار SP تحت تأثیر ضخامت لایه نیز قرار می‌گیرد. به طور مثال در شکل ۸-۱۱ دیده می‌شود که انحراف SP در یک لایه تراوای نازک، کمتر از لایه ضخیم‌تر است.

شکل ۸-۱۱ - تأثیر ضخامت لایه بر روی منحنی SP

نمودار SP به صورت گسترده‌ای در تعیین مقاومت آب سازندی (R_w) مورد استفاده قرار می‌گیرد. در آب‌های شور حاوی کلرید سدیم معادله زیر برای محاسبه R_w مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$SP = -K \log(R_{mf}/R_w)$$

به طوری که:

SP = مقدار انحنای نمودار در واحد میلی ولت (mV) است و

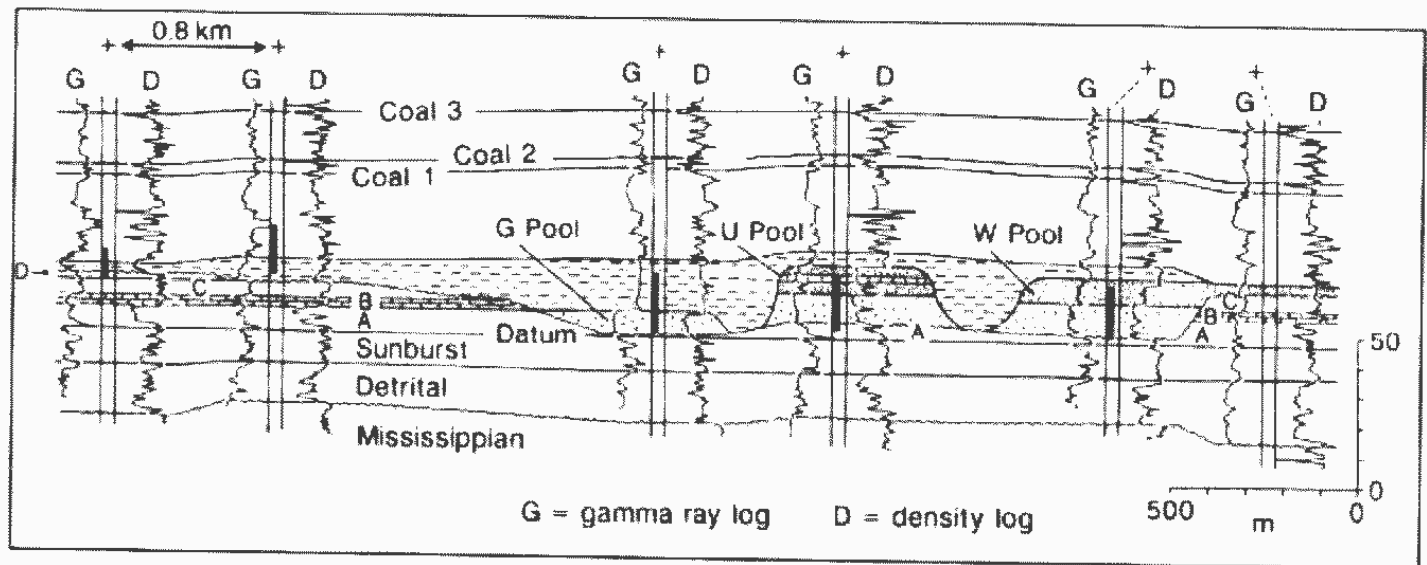
$$K = 61 + (0.133 \times T^{\circ}F)$$

T = دمای چاه در درجه فارنهایت،

R_{mf} = مقاومت فیلتره گل حفاری در واحد ohm-m و

R_w = مقاومت آب سازندی در واحد ohm-m

تطابق زمین‌شناسی یکی از موارد دیگر استفاده منحنی SP است زیرا شکل منحنی‌ها در چاه‌های مختلف برای یک افق زمین‌شناسی خاص، قابل مقایسه است. با مشاهده تغییرات نمودار SP، شناسایی تغییرات لیتولوژیکی مثل عدسی شکل بودن، متقارب بودن، ورقه‌ای بودن و غیره امکان پذیر است (شکل ۸-۱۱).



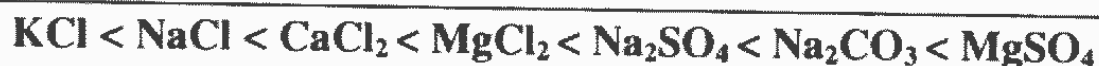
شکل ۱۱-۹ - تطابق لایه ها از چاهی به چاه دیگر با استفاده از منحنی SP

۱۱-۱-۲ مقاومت الکتریکی سازند

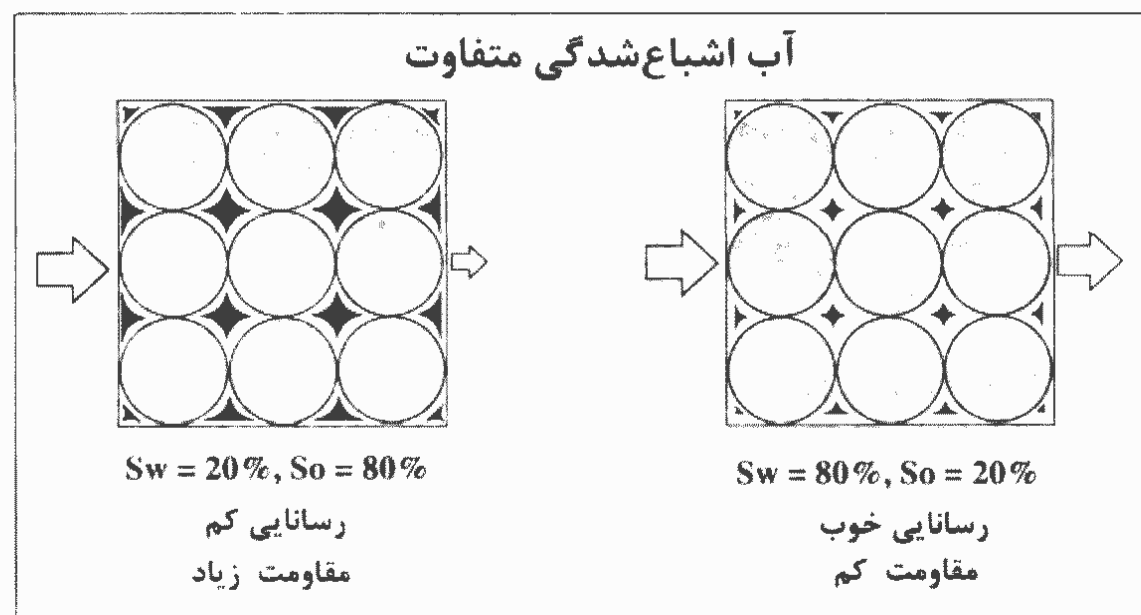
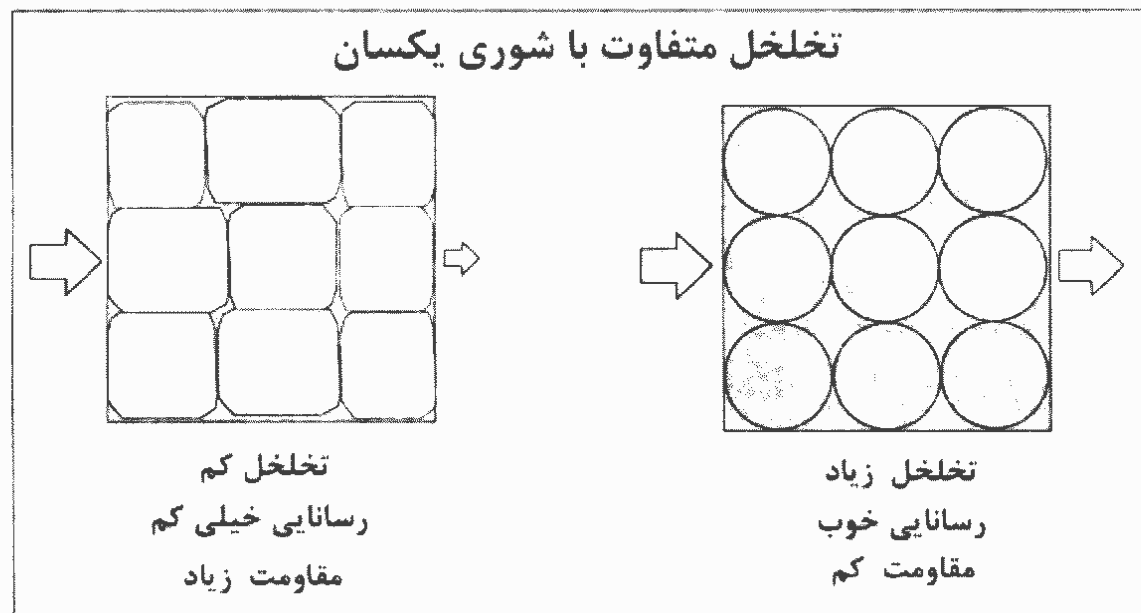
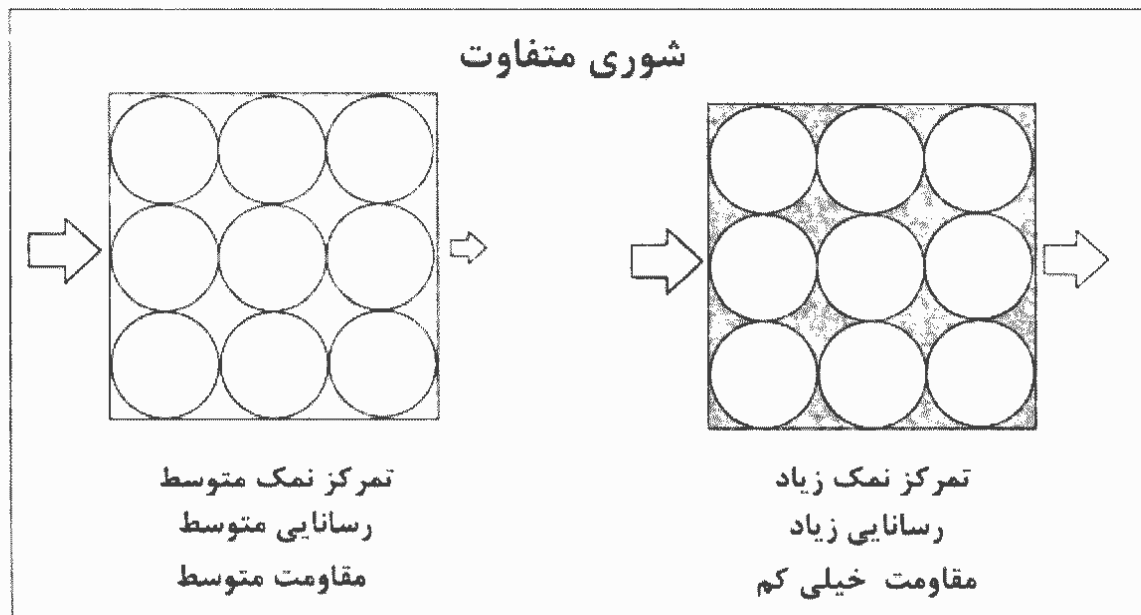
به طور کلی مقاومت الکتریکی یک سنگ مخزن تمیز به مقاومت الکتریکی آب سازندی (R_w)، فاکتور مقاومت سازند (F ، formation factor) و مقدار آب و نفت موجود در آن سازند (سیال اشباع‌شدگی) وابسته می‌باشد. شکل ۱۱-۱۰ به خوبی تأثیر این پارامترها را نشان می‌دهد.

۱۱-۲-۱-۱ مقاومت الکتریکی آب سازندی (R_w)

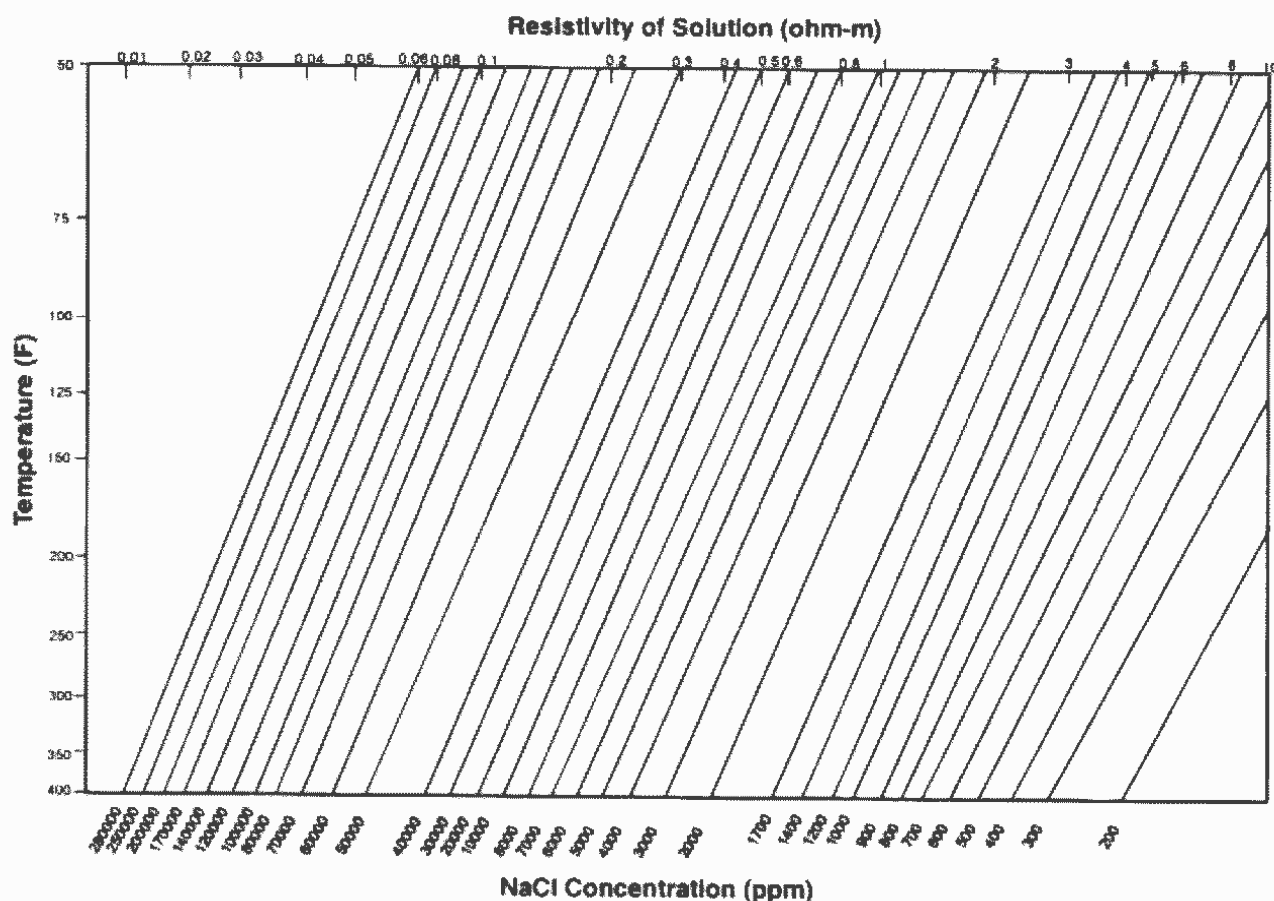
آب‌های سازندی به طور قابل توجهی از نظر شوری و دما متغیرند. این تغییرات بر مقاومت آن‌ها تأثیر می‌گذارد. برای مثال، مقاومت آب یک سازند با افزایش شوری و دما کاهش می‌یابد. مقاومت یک الکترولیت بستگی به مقدار و نوع نمک حل شده در آن دارد. ترکیبات نمکی متداول در زیر بر اساس افزایش مقاومت نشان داده شده است:



مقاومت یک الکترولیت حاوی نمک طعام را می‌توان با استفاده از چارت‌های مخصوص (شکل ۱۱-۱۱) به دست آورد.



شکل ۱۰-۱۱ - کنترل کننده‌های مقاومت الکتریکی یک سازند. همان‌طوری که در شکل دیده می‌شود با کاهش شوری، تخلخل و آب اشباع شدگی، مقاومت افزایش می‌یابد



شکل ۱۱-۱۱ - چارت اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی الکترولیت حاوی نمک طعام با استفاده از مقدار نمک حل شده و درجه حرارت

در کنار مقاومت سازندی، عوامل دیگری در نمودارگیری الکتریکی مؤثر هستند که شامل سیال حفاری (drilling mud) و سیال فیلترشده (mud filtrate) است.

۱۱-۲-۱-۲ فاکتور مقاومت سازند (Formation Factor, F)

فاکتور مقاومت سازند اولین بار توسط آرچی در سال ۱۹۴۲ معرفی شد. این فاکتور برابر نسبت رسانایی الکترولیت به رسانایی سنگ حاوی الکترولیت است:

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

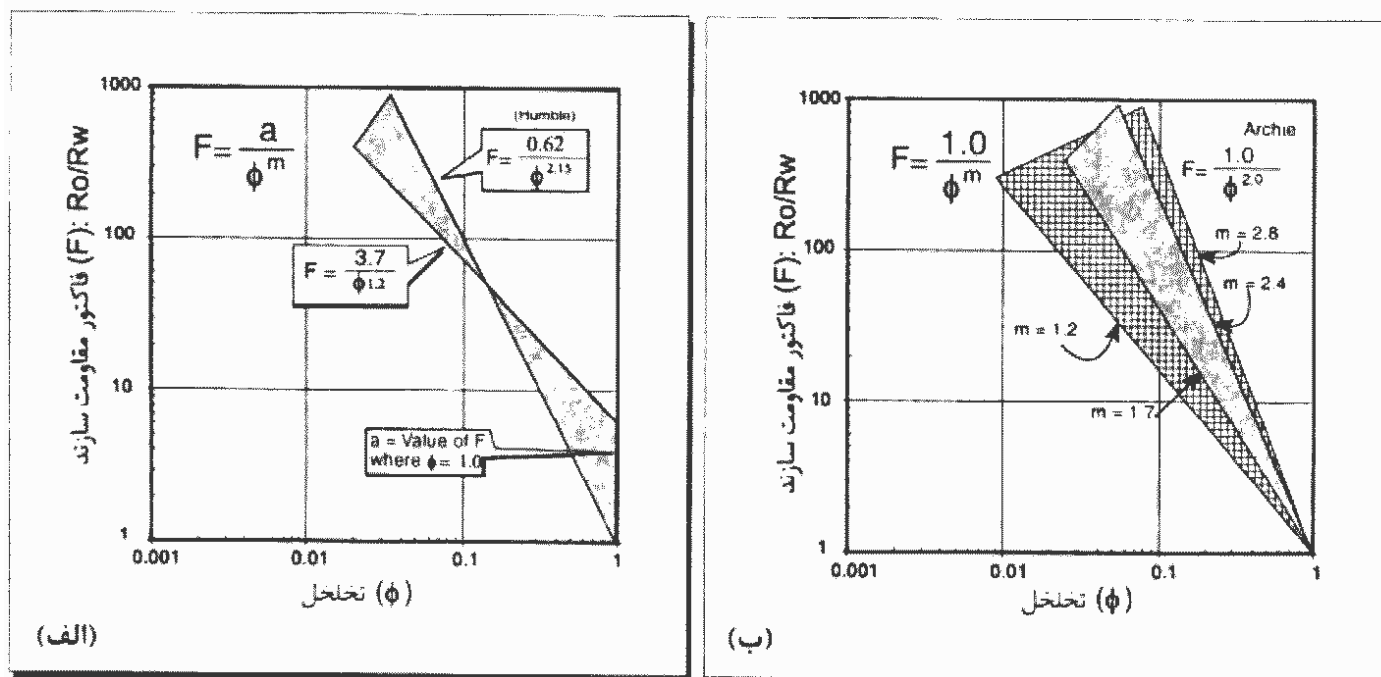
C_w رسانایی آب سازندی، C_o رسانایی سنگ حاوی آب سازندی، R_w مقاومت آب سازندی، R_o مقاومت سنگ حاوی آب سازندی است.

آرچی مشخص نمود که ارتباطی بین فاکتور مقاومت سازند (F) و تخلخل (ϕ) وجود دارد:

$$F = \frac{a}{\phi^m}$$

a فاکتور پیچاپیچی (tortuosity factor) و m فاکتور سیمانی شدن (cementation exponent) است.

مقادیر a و m می‌تواند بسیار متغیر باشد (شکل ۱۱-۱۲)، ولی معمولاً برای کربنات‌ها به ترتیب ۱ و ۲ در نظر گرفته می‌شوند.



شکل ۱۱-۱۲ - دامنه تغییرات a (الف) و m (ب)

۱۱-۲-۱-۳ سیال اشباع‌شدگی (Fluid Saturation)

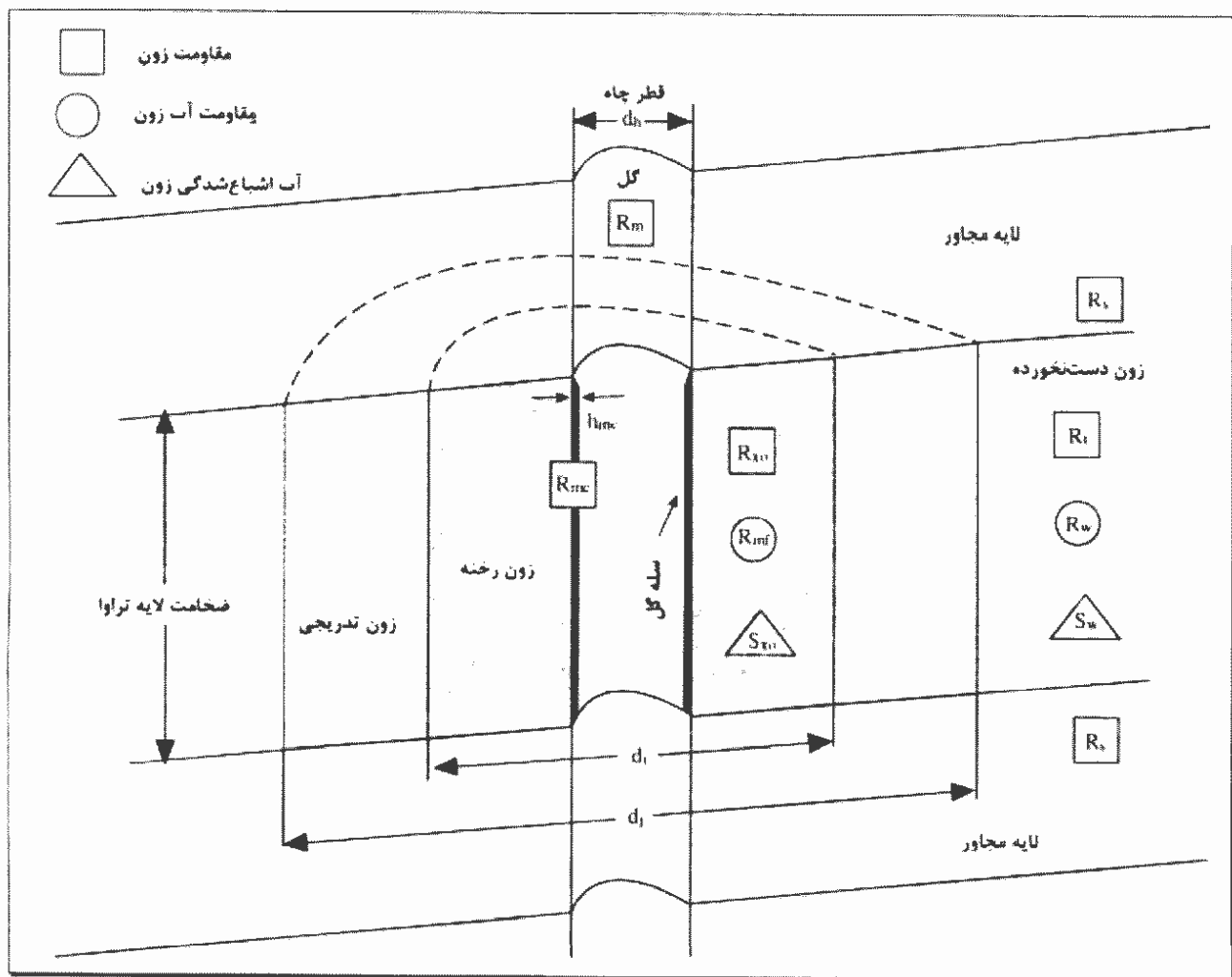
سیال اشباع‌شدگی میزان آب و هیدروکربن موجود در خلل و فرج سنگ را بیان می‌کند و شامل آب اشباع‌شدگی (S_w , water saturation)، نفت اشباع‌شدگی (S_o , oil saturation) و گاز اشباع‌شدگی (S_g , gas saturation) است. سیال اشباع‌شدگی بدون واحد است و معمولاً به صورت درصد بیان می‌شود. به طور مثال اگر خلل و فرج سنگی تماماً با آب پر شده باشد، آب اشباع‌شدگی آن ۱۰۰٪ است و اگر هیدروکربن جایگزین آب شود میزان آب اشباع‌شدگی در داخل خلل و فرج سنگ کمتر از ۱۰۰٪ خواهد شد. در هر صورت مجموع اشباع‌شدگی آب، نفت و گاز برابر ۱ یا ۱۰۰٪ است:

$$S_w + S_o + S_g = 1$$

۱۱-۲-۱-۴ تأثیر گل حفاری بر چاه

در حین حفاری، به دلیل فشار هیدروستاتیک گل حفاری، بعضی از لایه‌های تراوا تحت نفوذ سیال گل حفاری قرار می‌گیرند. این پدیده نفوذ (invasion) نامیده می‌شود. چون ذرات جامد گل حفاری معمولاً بزرگتر از قطر گلوگاه منافذ لایه‌های حفاری شده است، آن‌ها به صورت سله گل (mud filtrate) بر روی دیواره چاه انباشته می‌شوند، ولی سیال گل حفاری که فیلتره گل (mud filtrate) نامیده می‌شود، به داخل سازند تراوا نفوذ می‌کند و سبب عقب‌نشینی

سیالات مخزن می‌شود. عقب‌نشینی سیالات مخزن در نزدیکی چاه تقریباً به صورت کامل صورت می‌گیرد و ایجاد زون رخنه (flushed zone) می‌نماید. بعد از زون رخنه، زون تدریجی (transition zone) وجود دارد که در آن نفوذ سیال گل حفاری کمتر است و بعد از آن زون دست نخورده (uninvaded zone) است که تحت نفوذ سیال گل حفاری قرار نگرفته است و سازند دارای سیالات طبیعی خود است. شکل ۱۱-۱۳ نیمرخ رخنه در یک لایه تراوا را که توسط دو لایه غیرتراوا دربر گرفته شده است نشان می‌دهد.



شکل ۱۱-۱۳ - نیمرخ رخنه در یک لایه تراوا که توسط دو لایه غیرتراوا دربر گرفته شده است

d_h قطر چاه

R_m مقاومت گل حفاری

R_{mc} مقاومت سله گل

h_{mc} ضخامت سله گل

زون رخنه

d_i قطر زون رخنه

R_{so} مقاومت زون رخنه

R_{mf} مقاومت فیلتره گل

S_{so} آب اشباع‌شدگی زون رخنه

زون دست نخورده

R_i مقاومت واقعی سازند

R_w مقاومت آب سازندی

S_w آب اشباع‌شدگی زون دست نخورده

چون هدف نمودارگیری، تخمین پارامترهای بخش دست نخورده مخزن است، لذا در نظر گرفتن تأثیر پدیده رخنه بر روی ابزارهای نمودارگیری از اهمیت زیادی برخوردار است. به طور مثال، مقاومت الکتریکی بخش مورد نفوذ سیال فیلترشده متفاوت از مقاومت الکتریکی واقعی سازند می شود و این مقاومت ها در نتایج یک نمودار الکتریکی تأثیر می گذارند.

۱۱-۱-۳ نمودارهای مقاومت الکتریکی (Resistivity Logging)

اندازه گیری مقاومت الکتریکی سازند یکی از مهم ترین روش های نمودارگیری است، چون با این روش، فواصل هیدروکربن دار مشخص و میزان آب اشباع شدگی آن ها تخمین زده می شود. مقاومت الکتریکی یک جسم، توانایی آن در جلوگیری از عبور جریان الکتریکی از درون خود است. مقاومت (R , resistivity) با اهم-متر نمایش داده می شود. وقتی جریانی به شدت یک آمپر (I)، از میان جسمی با ابعاد یک متر، با اختلاف پتانسیل (ΔP) یک ولت جریان یابد، گفته می شود که آن جسم دارای مقاومت یک اهم است. با این اطلاعات با استفاده از قانون اهم می توان مقاومت الکتریکی سازند را مشخص کرد.

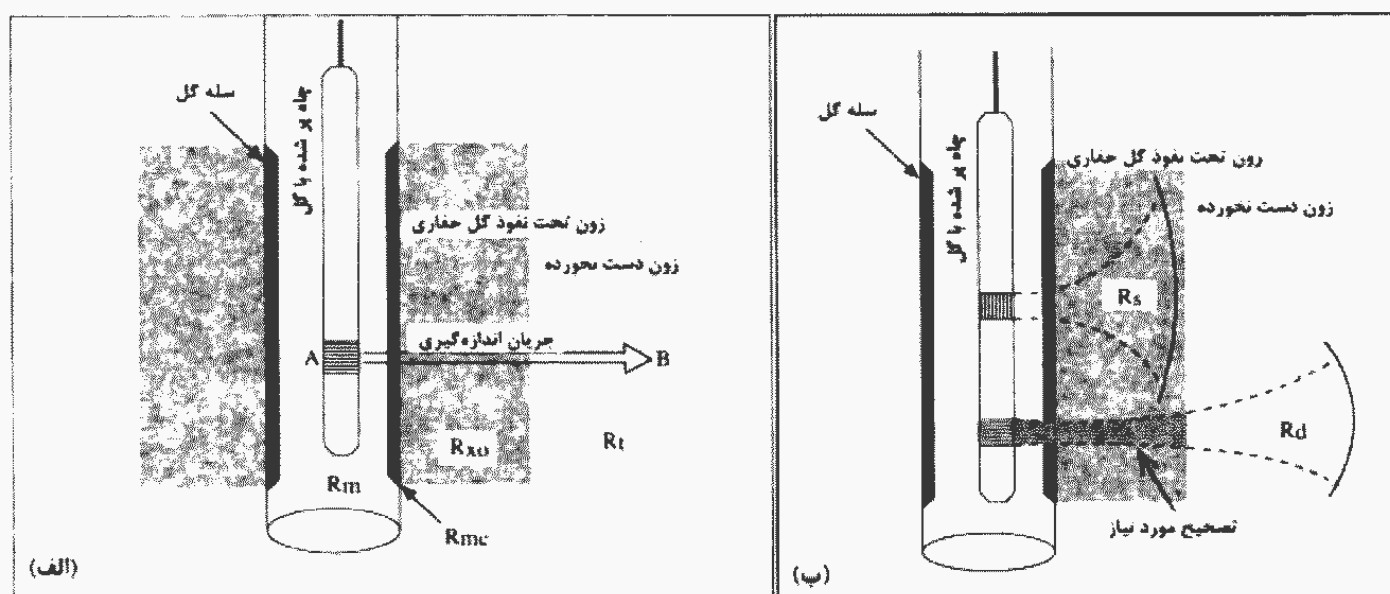
در عمل، اندازه گیری مقاومت یک سازند بسیار ساده است. یک جریان I توسط الکترود جریان (current electrode) به داخل سازند فرستاده شده و افت پتانسیل (ΔP) در الکترود گیرنده (measuring electrode) اندازه گیری می شود.

رسانایی الکتریکی (C , electrical conductivity) یک جسم، توانایی آن جسم است در عبور دادن جریان الکتریکی از میان خود و نسبت معکوس دارد با مقاومت الکتریکی. دو نوع رسانایی الکتریکی وجود دارد: رسانایی الکترونیکی (electronic conductivity) که خاص جامدات نظیر فلزات است و رسانایی الکترولیتی (electrolytic conductivity) که خاص آب های شور است. رسانایی الکتریکی سنگ های رسوبی از نوع الکترولیتی است که مربوط به آب هایی است که در خلل و فرج آن ها وجود دارد. سنگ های فاقد تخلخل و فاقد کانی های رسانا دارای مقاومت الکتریکی بی نهایت هستند. مقاومت الکتریکی سنگ ها بستگی دارد به:

- مقاومت آب هایی که در خلل و فرج آن ها است که خود بستگی به میزان شوری آب دارد
- میزان آب اشباع شدگی
- مقدار و شکل هندسی خلل و فرج
- درصد رس های رسانا و کانی های رسانای الکترونیکی
- درجه حرارت

۱۱-۳-۱ اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی در داخل چاه

ابزارهای متعددی برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سازندهای حفاری شده وجود دارد. در عمل اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به دلیل وجود زون رخنه عمل پیچیده‌ای است. افت پتانسیل بین الکترودها ناشی از اثر مقاومت گل حفاری، سله گل، زون رخنه و مقاومت واقعی سازند است (شکل ۱۱-۱۴). ولی از میان همه این‌ها فقط مقاومت واقعی سازند (R_t) مورد نیاز است. ترکیبی از ابزارها ما را قادر می‌سازد که مقاومت واقعی سازند را اندازه بگیریم. بعضی از ابزارها عمق بررسی کمی داشته و قادرند R_{xo} را اندازه گرفته و برخی دیگر عمق بررسی زیادی دارند. مجمع این دو می‌تواند در اندازه‌گیری مقاومت واقعی سازند بکار برده شود.



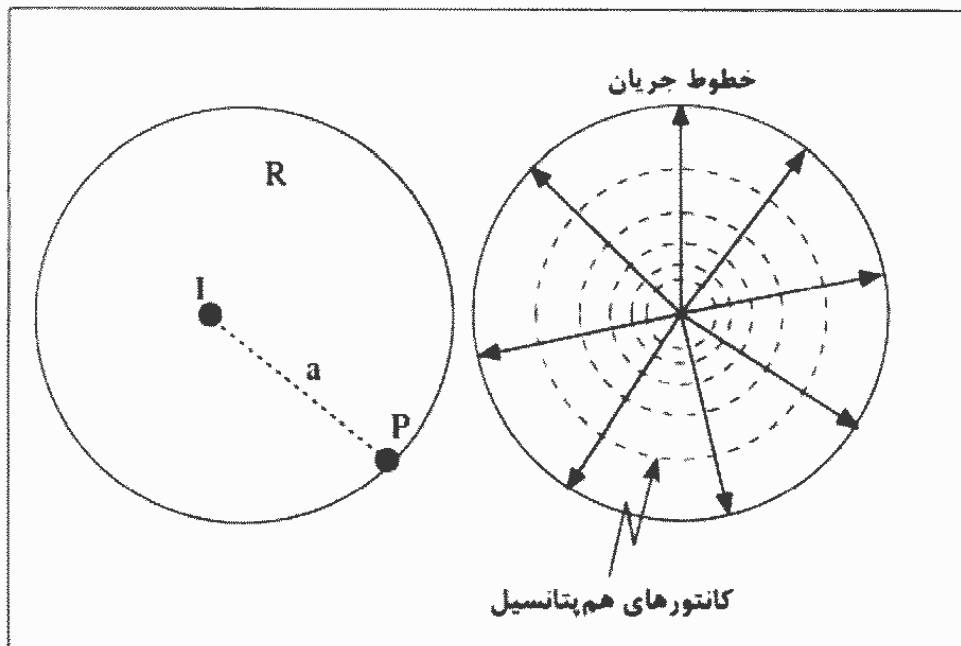
شکل ۱۴-۱۱ - اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی در چاه (الف) و مقایسه بین عمق بررسی توسط ابزارهایی با عمق نفوذ مختلف (ب)

۱۱-۳-۲ نمودارهای الکتریکی غیرمتمرکز (Unfocused Current Resistivity Logging)

اگر الکترودی یک جریان ثابت (I) از میانجی با مقاومت R ارسال نماید، پتانسیل در نقطه‌ای (P) به فاصله a از الکتروود برابر است با:

$$V_p = \frac{RI}{4\pi a}$$

در یک میانجی همگن از نظر الکتریکی، الگوی جریان و کانتورهای هم پتانسیل (equipotential contours) به شکل کروی خواهد بود (شکل ۱۱-۱۵).



شکل ۱۱-۱۵ - الگوی جریان
و سطوح هم پتانسیل در یک
میانجی همگن

در نمودارهای الکتریکی استاندارد، معمولاً ۳ نوع منحنی مقاومت غیرمتمرکز (unfocused) وجود دارد که عبارتند از :

(۱) منحنی نمودار نرمال کوتاه (AM=16 inch)

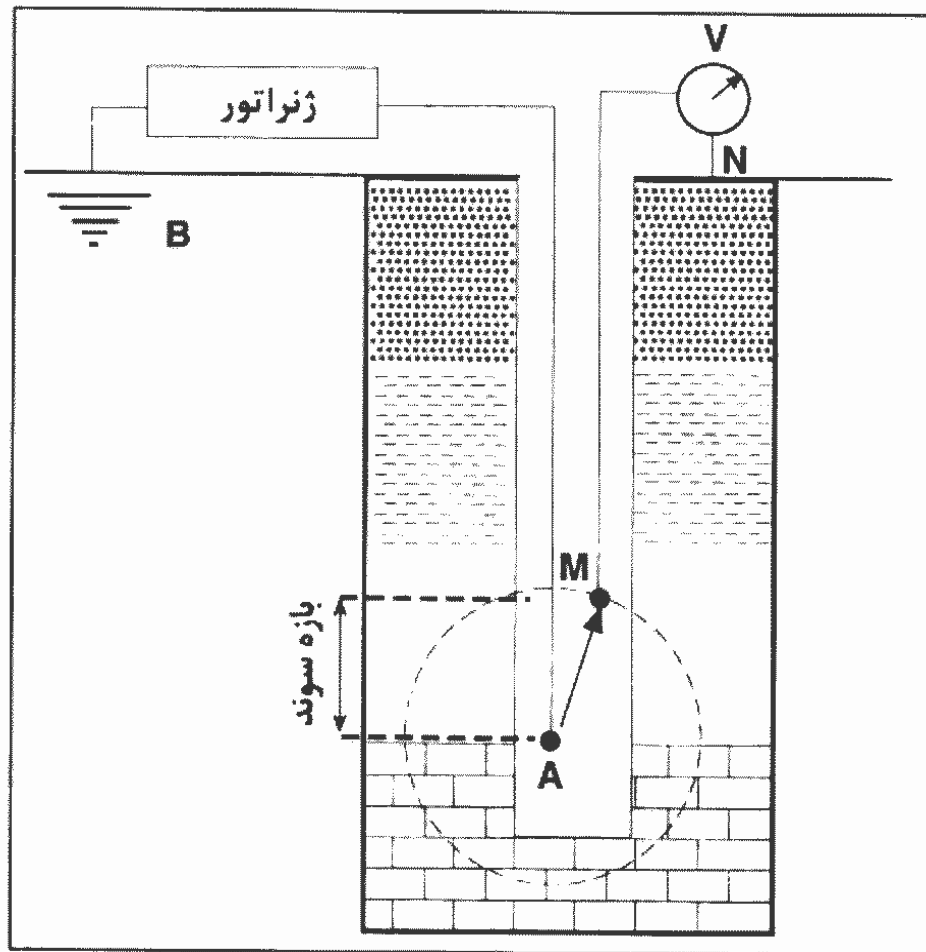
(۲) منحنی نمودار نرمال متوسط (AM=64 inch)

(۳) منحنی نمودار جانبی استاندارد (AO=18 feet, 8 inch)

شکل ۱۱-۱۶ به صورت ترسیمی، عملکرد یک ابزار مقاومت نرمال (normal logging) را نشان می‌دهد. در ابزارهای نرمال یک الکتروود جریان (A) و یک الکتروود گیرنده (M) وجود دارد. بین دو الکتروود A و B یک جریان با شدت معین فرستاده می‌شود. الکتروود A در داخل سوند واقع است در صورتی که الکتروود B می‌تواند در داخل سوند و یا در سطح قرار گیرد. اختلاف پتانسیل بین دو الکتروود A و B توسط دو الکتروود M و N اندازه‌گیری می‌گردد. مقاومت ظاهری سازند با اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده متناسب است. ولتاژ اندازه‌گیری شده تقریباً میزان پتانسیلی است که نقطه M دریافت می‌دارد، در صورتی که در سوندهای نرمال فاصله AM در مقایسه با MN، MB و MN کم است.

$$V_M = \frac{RI}{4\pi AM}$$

فاصله AM را بازه سوند (spacing) می‌نامند و دو اندازه متداول آن ۱۶ (short normal) و ۶۴ اینچی (long normal) است.



شکل ۱۱-۱۶ - تصویر شماتیک از عملکرد یک ابزار مقاومت نرمال

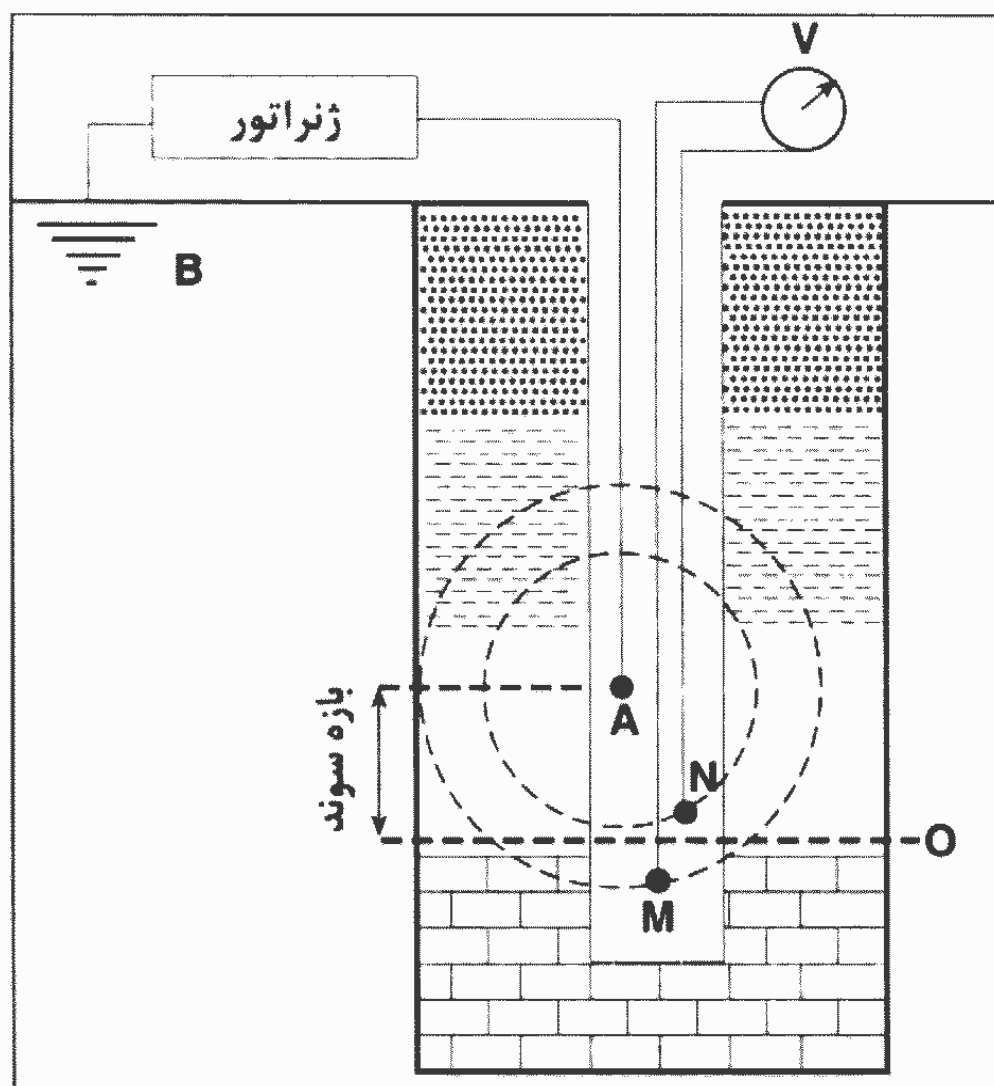
در شکل ۱۱-۱۷ طرح یک سوند نمودارهای جانبی (lateral logging) نشان داده شده است. الکترودهای M و N (دریافت کننده) نزدیک به هم قرار دارند و در چند فوتی در زیر الکترودهای A واقع‌اند. الکترودهای B در فاصله زیادی در بالای الکترودهای A، معمولاً در سطح زمین واقع است. ولتاژ ثبت شده تقریباً میزان اختلاف پتانسیلی است که نقطه O با A دارد، یعنی نقطه O در فاصله بین M و N واقع است.

$$V_M = \frac{RI}{4\pi AM} \quad \text{و} \quad V_N = \frac{RI}{4\pi AN}$$

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{RI}{4\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} \right)$$

در این ابزارها چون جریان ثابت است، مقاومت متناسب است با افت ولتاژ (ΔV) که توسط ابزار ثبت می‌گردد.

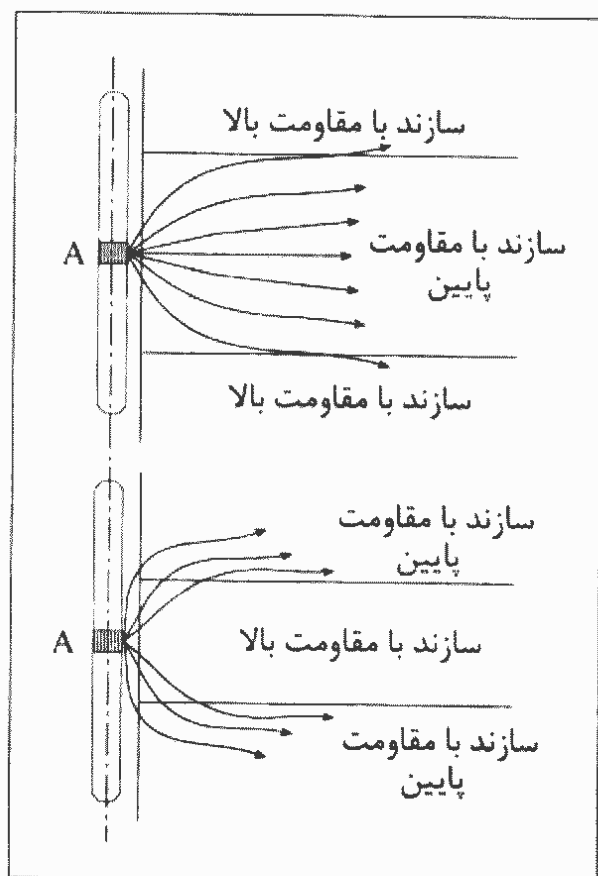
فاصله AO بازه سوند نمودارهای جانبی است و برابر $18'8''$ است. در نمودارهای الکتریکی هر قدر مقدار بازه سوند بیشتر باشد، عمق بررسی سوند افزایش می‌یابد. برای مثال یک بازه سوند بسیار کوچک ممکن است تنها گل موجود در چاه را بررسی کند.



شکل ۱۱-۱۷ - تصویر شماتیک از عملکرد یک ابزار مقاومت جانبی

همان‌طوری که گفته شد نفوذ سیال گل حفاری باعث ایجاد زون رخنه در سازندهای تراوا می‌شود. این زون از هیدروکربن‌های باقیمانده سازند (residual hydrocarbon) (در صورت وجود) و فیلتره گل حفاری اشباع است. برای اینکه بتوانیم به مقاومت حقیقی سازند پی ببریم و با توجه به اینکه منطقه مخلوط بر سر راه آن واقع است، بایستی تفسیر نمودارها بر اساس نمودارهایی که از فواصل دورتری از چاه به دست می‌آید قرار گیرد.

نمودارهای نرمال کوتاه، به خوبی برای تطبیق لایه‌ها، تشخیص مرزها و ارتباط سازندهایی که دارای مقاومت کم یا متوسط‌اند بکار برده می‌شوند. دقت منحنی‌های نرمال و جانبی برای معین کردن لایه‌ها در سازندهای مقاوم محدود است و موقعی که از گل حفاری با آب شور استفاده می‌کنیم از دقت آن‌ها کاملاً کاسته می‌شود (شکل ۱۱-۱۸). در چنین حالت‌هایی از نمودارهای الکتریکی متمرکز که حداقل خطا را در این مورد دارند استفاده می‌شود.



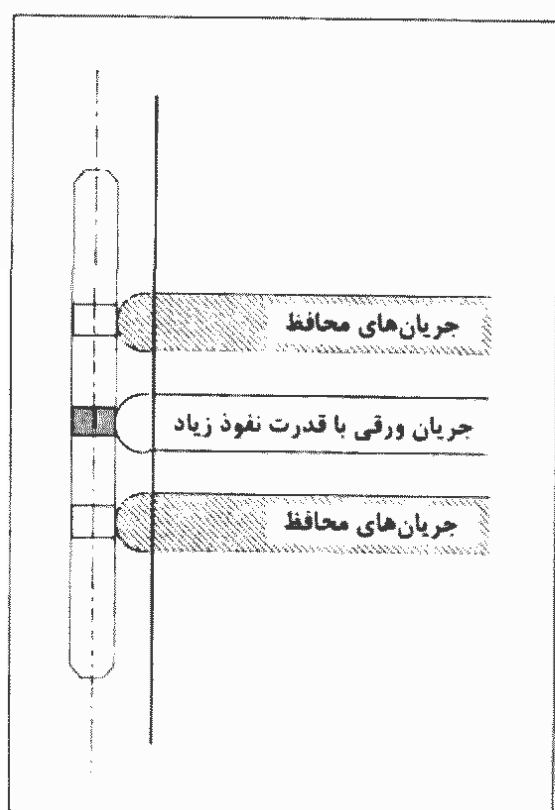
شکل ۱۱-۱۸ - تصویر شماتیک که نشان می‌دهد ابزارهای غیرمتمرکز قادر به اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی لایه‌های مقاوم نیستند

۱۱-۳-۳ نمودارهای الکتریکی متمرکز (Focused Current Resistivity Logging)

سیستم‌های مقاومت متمرکز شامل نمودارهای لטרولاگ (laterolog) و نمودارهای القایی (induction log) است. در نمودارهای لטרولاگ جریان به صورت یک صفحه با ضخامت کم و در نمودارهای القایی به صورت حلقه ایجاد می‌گردد. سیستم‌های مقاومت متمرکز برای اندازه‌گیری مقاومت لایه‌های نازک یا سنگ‌های

با مقاومت بالا در چاه‌های حاوی سیالات با رسانایی بالا (با گل شور حفاری) طراحی شده‌اند. بنابراین تأثیر ستون گل و سازندهای بالا و پایین این صفحه (صفحه جریان) به حداقل می‌رسد و یا حتی کاملاً از بین می‌رود.

ابزارهای مقاومت متمرکز با ایجاد جریان‌های محافظ (bucking currents) در بالا و پایین

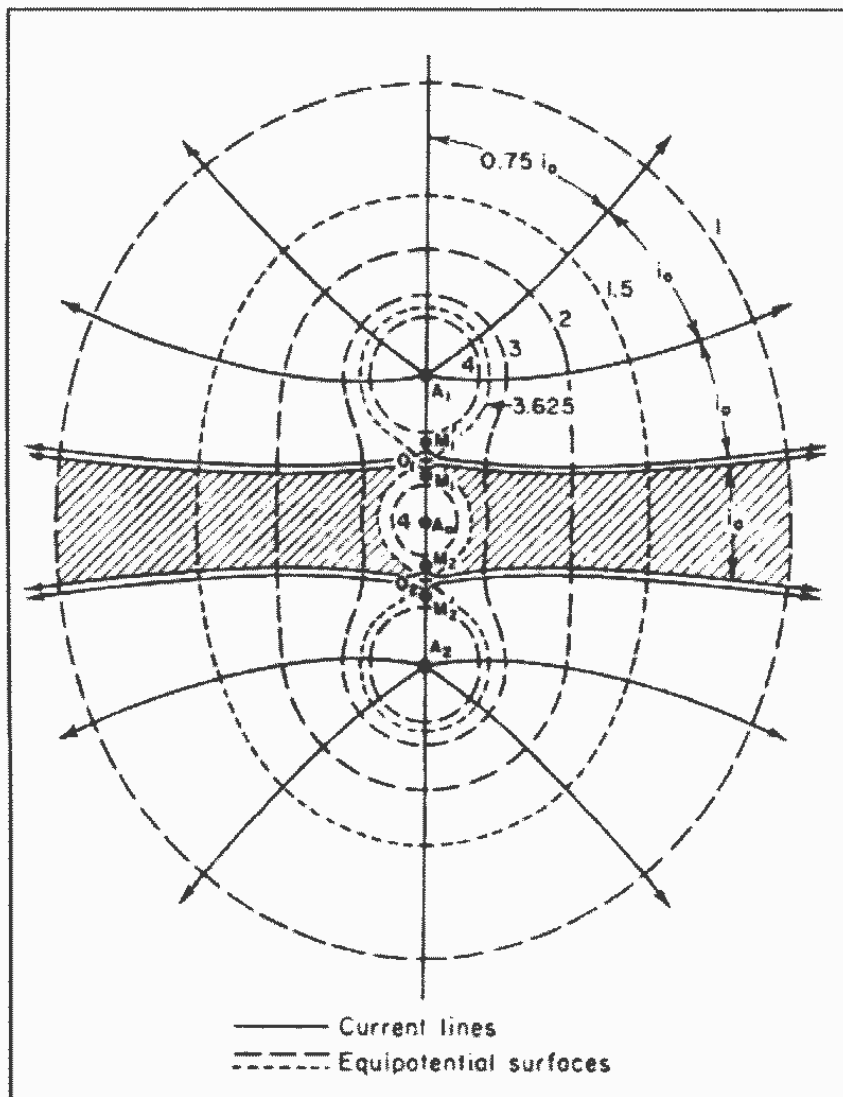


الکتروود جریانی برای تقویت جریان در سنگ‌های اطراف چاه استفاده می‌کنند (شکل ۱۱-۱۹). عمق جستجو و نفوذ در حدود ۳ برابر طول یک محافظ در نظر گرفته می‌شود. بنابراین یک محافظ ۶ فوتی در حدود ۱۸ فوت از سنگ‌های اطراف چاه را کاوش کرده و در آن‌ها نفوذ می‌کند. الگوی جریان ورقی (Sheetlike) ابزارهای متمرکز در مقایسه با ابزارهای نرمال کیفیت نتایج حاصله را افزایش داده و اثرات لایه‌های مجاور را کاهش می‌دهد.

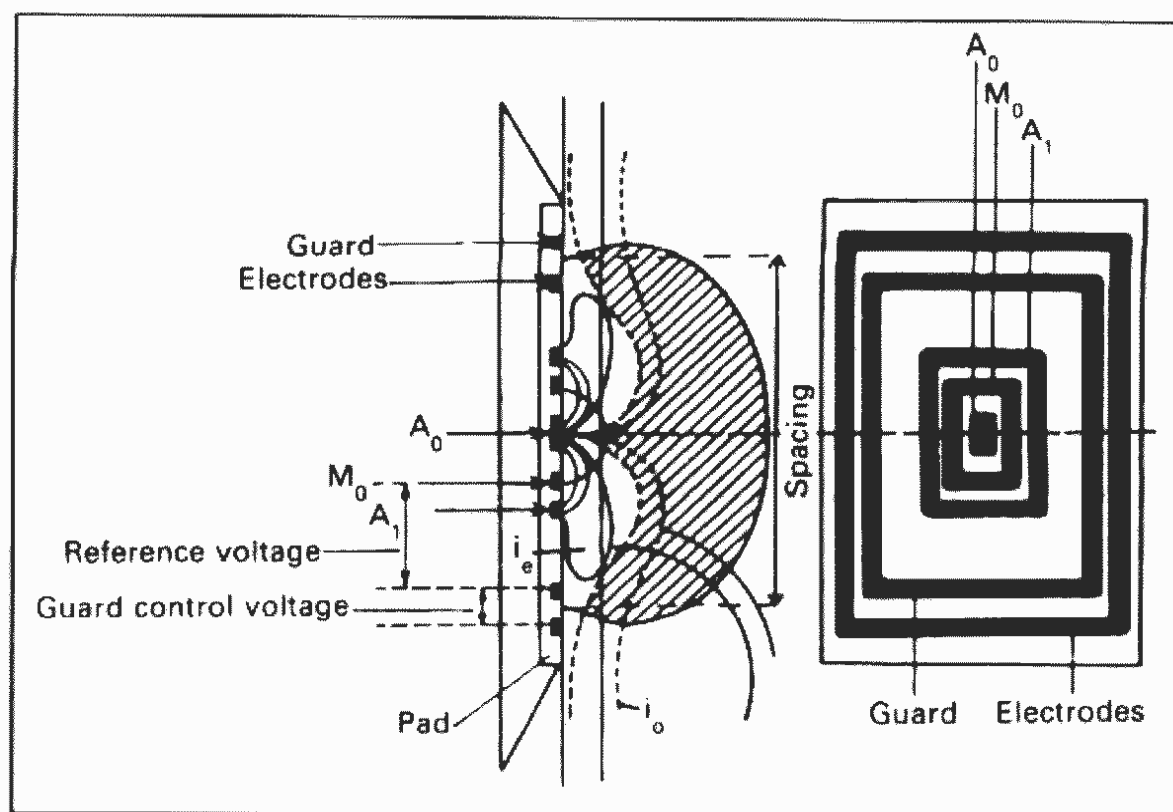
شکل ۱۱-۱۹ - جریان‌های محافظ در بالا و پایین جریانی ورقی

ابزارهای لیترولاگ دوتایی (dual laterolog) قادرند مقاومت عمق کم (R_{LLS}) و زیاد (R_{LLD}) سازند را اندازه‌گیری کنند (شکل ۱۱-۲۰). عمق بررسی R_{LLD} چندین فوت است در صورتی که برای R_{LLS} در حدود یک فوت می‌باشد.

شکل ۱۱-۲۰ - تصویر شماتیک از ابزارهای لیترولاگ



ابزارهای ریزمقاومت (micro-resistivity tools) چون دارای بازه سوند خیلی کوتاهی است، می‌تواند مستقیماً R_{xo} را جهت تصحیح مقاومت‌های عمیق‌تر برای به دست آوردن R_t اندازه‌گیری کند. در ابزار این نمودارها از الکترودهای تکمه مانند استفاده شده است که فاصله آن‌ها ۲۵ تا ۵۰ میلیمتر است و بر روی بالشتکی عایق نصب شده‌اند (شکل ۱۱-۲۱). این بالشتک، برای اندازه‌گیری دقیق، به وسیله یک فنر به سنگ‌های دیواره چاه فشرده می‌شود. عمق نفوذ در حدود یکصد میلیمتر می‌باشد. این ابزار قدرت تفکیک عمودی (vertical resolution) بالایی دارد. این ابزارها اصولاً شبیه به لیترولاگ بوده و دارای انواعی نظیر میکرولاترولاگ (microlaterolog)، پروکسیمیتی لاگ ($\log$ proximity)، و micro-spherical focused log یا MSFL است.



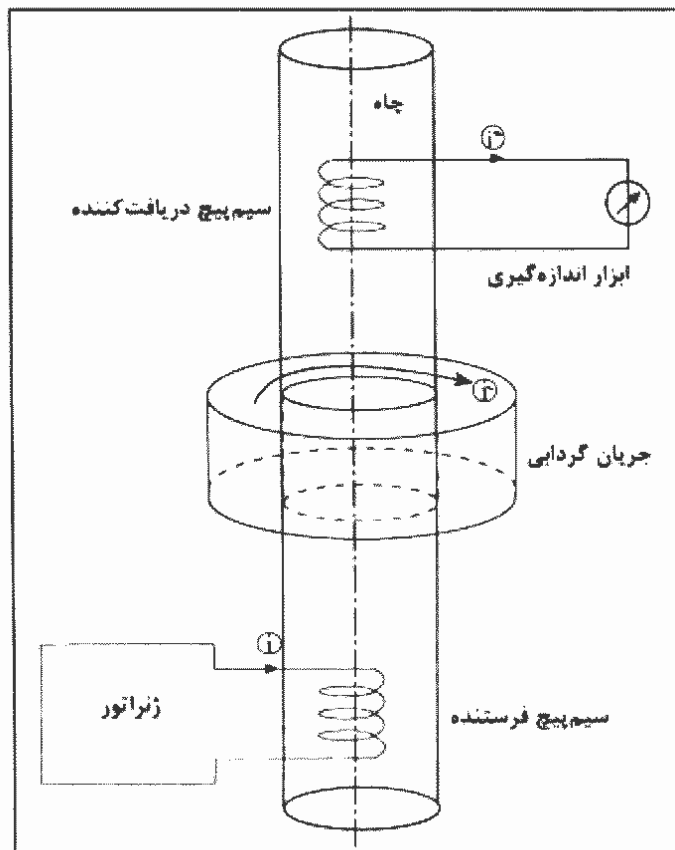
شکل ۱۱-۲۱ - تصویر شماتیک از یک MSFL (کفشک و مسیر عبور جریان)

در این ابزار چون بازه سوند الکتروود کوتاه است، تأثیر قطر چاه، مایع حفاری و لایه‌های مجاور ناچیز است و می‌توان لایه‌های خیلی نازک را ثبت کرد. کاربرد اصلی این نمودارها در اندازه‌گیری مقاومت سله گل و زون رخنه است.

۱۱-۳-۴ نمودارهای القائی (Induction Logs)

در این دسته از نمودارها با استفاده از جریانات القائی، رسانائی الکتریکی سازندها اندازه‌گیری می‌شود.

شکل ۱۱-۲۲ شمای کلی سوند نمودار القائی را نشان می‌دهد. این سوند دارای یک سیم‌پیچ فرستنده (transmitter coil)، که توسط یک جریان متناوب ثابت تغذیه می‌شود، و یک سیم‌پیچ دریافت کننده (receiving coil) است که به یک تقویت کننده متصل شده است. مقدار جریان رسیده شده به سیم‌پیچ دریافت کننده در سطح زمین توسط یک گالوانومتر اندازه‌گیری می‌شود. در این سوند، یک میدان مغناطیسی توسط سیم‌پیچ فرستنده، ایجاد می‌گردد و به صورت یک میدان مغناطیسی، بنام جریان گردابی (eddy current)، به داخل سازند انتقال می‌یابد. این جریان مغناطیسی در سیم‌پیچ دریافت کننده ولتاژی را القا می‌کند که مقدار آن متناسب با رسانایی سازند است. لذا بر حسب ولتاژ ایجاد شده در سیم‌پیچ دریافت کننده، وثبت آن توسط گالوانومتر، میزان رسانایی سازند مورد نظر مشخص می‌شود.



شکل ۱۱-۲۲ - شمای کلی سوند نمودار القائی

نمودارهای القائی معمولاً می‌تواند مقاومت واقعی و اطلاعات با ارزشی در مورد مخازن نفت و گاز به دست دهد. نمودارهای القائی در چاه‌های حفاری شده با گل‌های پایه روغنی و چاه‌های فاقد گل و حتی چاه‌های جداره گذاری شده قابل استفاده است، در صورتی که دیگر نمودارهای الکتریکی لزوماً باید در یک میانجی رسانا قرار داشته باشند.

به طور کلی بهترین نمودار الکتریکی زمانی گرفته می‌شود که در چاه از گل کم رسانا استفاده شود و یا هنگامیکه سازندها دارای مقاومت متوسط باشند و یا هنگامی که لایه‌ها به خوبی ضخیم باشند. تحت این شرایط، تأثیر نامطلوب گل در چاه و تأثیر لایه‌های مجاور سازند مورد نظر به حداقل می‌رسد.

ابزارهای القایی نیز قادرند مقاومت عمق کم (R_{ILS}) و زیاد (R_{ILD}) سازند را اندازه‌گیری کنند.

۱۱-۳-۵ محاسبه مقاومت واقعی سازند (R_t)

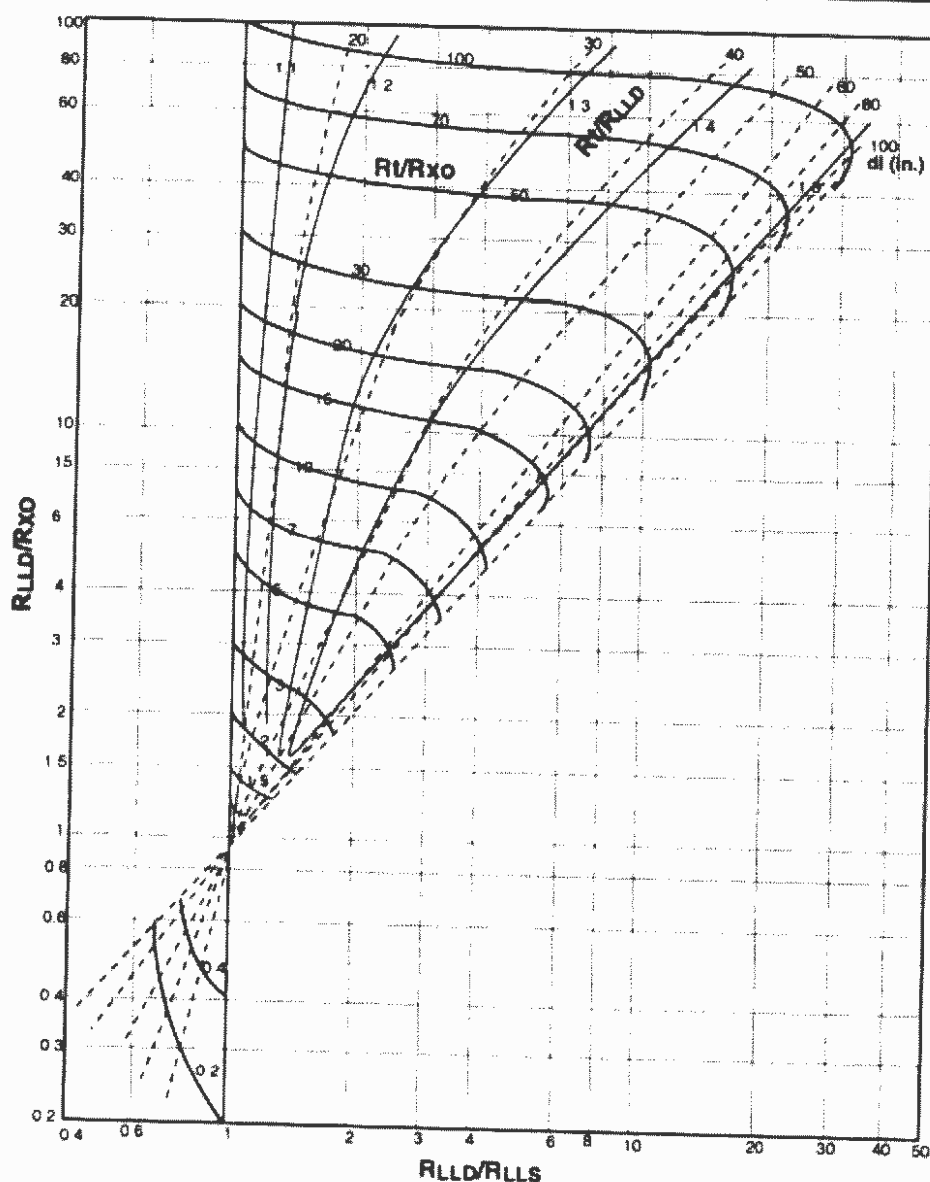
با داشتن مقاومت‌های اندازه‌گیری شده از اعماق مختلف سازند که شامل R_{xo} (مقاومت زون رخنه)، R_{LLS} (مجموع مقاومت زون رخنه و تدریجی) و R_{LLD} (مجموع مقاومت زون رخنه و تدریجی و زون دست نخورده) است، روش‌های متعددی وجود دارد که می‌توان R_t را به دست آورد. یکی از روش‌ها، استفاده از دیاگرام‌های خاصی به نام تورنادو (turnado) است که نه تنها R_t را به دست می‌دهد، بلکه عمق نفوذ فیلتره گل را نیز مشخص می‌کند (شکل ۱۱-۲۱). روش دوم استفاده از فرمول‌های تجربی زیر است:

$$R_t = 1.7R_{LLD} - 0.7R_{LLS}$$

وقتی که $R_{mf} < R_w$

$$R_t = 2.4R_{LLD} - 1.4R_{LLS}$$

وقتی که $R_{mf} > R_w$



شکل ۱۱-۲۳ - چارت تورنادو برای کسب مقاومت واقعی سازند

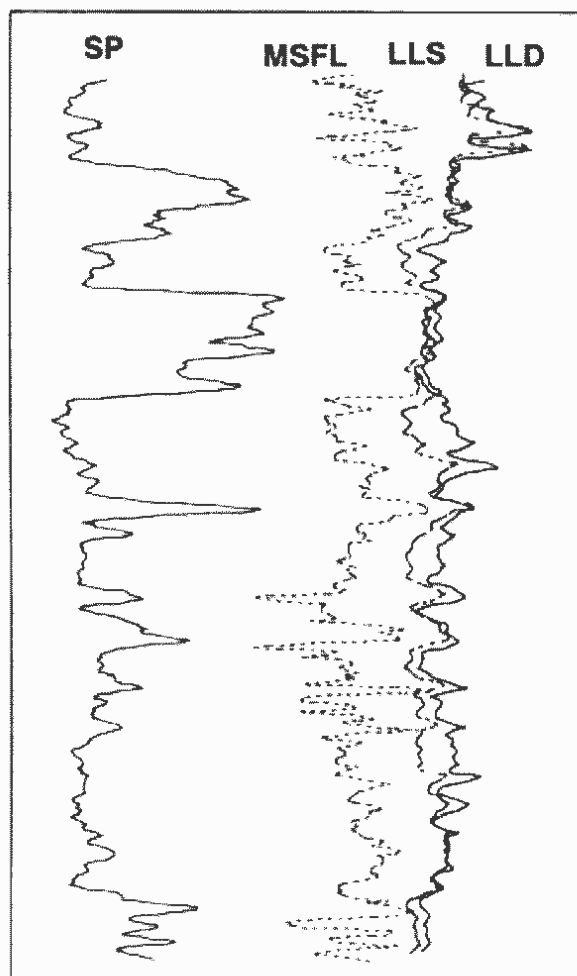
۱۱-۱-۳-۶ مقاومت مخازن هیدروکربن (Resistivity of Reservoir Rocks)

به طور کلی سنگ‌ها را می‌توان از این دیدگاه به دو دسته تقسیم نمود:

- سنگ‌های غیرمخزنی بدون تخلخل مفید، نظیر سنگ‌های آذرین، دگرگونی و تبخیری‌ها که مقاومت الکتریکی بالایی را نشان می‌دهند.
- سنگ‌های مخزنی با تخلخل مفید. این نوع سنگ‌ها در صورت اشباع بودن با آب شیرین و یا هیدروکربن دارای مقاومت زیاد، و در صورت اشباع بودن با آب شور و یا داشتن کانی‌های رسی دارای مقاومت الکتریکی کمی خواهند بود.

چگونگی قرارگیری سه نمودار مقاومت نسبت به یکدیگر می‌تواند در بردارنده برخی اطلاعات مفید باشد (شکل ۱۱-۲۴). اگر سه نمودار بر روی یکدیگر بیافتند و به عبارتی هر سه یک مقاومت را نشان بدهند، بیانگر این است که سازند، فاقد هرگونه نفوذ سیال گل حفاری است. این حالت، زمانی صورت می‌گیرد که سازند غیرتراوا باشد. وجود جدایش درسه نمودار

مقاومت، مبین این است سیال گل حفاری به داخل نفوذ کرده است. این حالت زمانی صورت



می‌پذیرد که سازند تراوا باشد. مقدار جدایش بین نمودارهای مقاومت بستگی به اختلاف شوری بین آب سازندی و فیلتره گل حفاری دارد. هر چه این اختلاف بیشتر باشد، تفکیک نمودارها از یکدیگر بیشتر خواهد شد. در ضمن اگر جدایش در سه نمودار مقاومت وجود داشته باشد و نمودار LLS بیشتر به LLD نزدیک باشد بیانگر عمق نفوذ کم فیلتره گل حفاری به داخل سازند است و اگر نمودار LLS بیشتر به MSFL نزدیک باشد بیانگر عمق نفوذ زیاد فیلتره گل حفاری به داخل سازند است. میزان نفوذ فیلتره گل حفاری به داخل سازند بستگی به پارامترهای متعددی از جمله تخلخل و تراوایی مخزن و قابلیت تحرک هیدروکربن دارد.

شکل ۱۱-۲۴ - جابجایی نمودارهای مقاومت نسبت به یکدیگر

۱۱-۳-۱-۱ محاسبه آب اشباع‌شدگی

شکل ۱۱-۲۵ الف عبور جریان الکتریکی را از یک ظرف آب نشان می‌دهد. مقاومت الکتریکی این ظرف ارتباط مستقیم با مقاومت مخصوص آب (R_w) دارد.

$$R_o \sim R_w$$

شکل ۱۱-۲۵ ب عبور جریان از همان ظرف را نشان می‌دهد، وقتی که دانه‌های ماسه، که خود عایق هستند، به آن اضافه شود. در این حالت نه تنها میزان آب کاهش یافته بلکه مسیر عبور الکترون‌ها تنگ‌تر شده و لذا مقاومت کل ظرف افزایش می‌یابد. اگر تراکم ماسه در ظرف بیشتر شود، آب بیشتری جابجا شده و نیز مسیر عبور الکترون‌ها بیشتر تنگ شده و مقاومت به میزان بیشتری افزایش می‌یابد. بنابراین یک سازند با تخلخل کمتر و در نتیجه آب کمتر، دارای مقاومت بیشتری نسبت به یک سازند با تخلخل بالاتر می‌باشد. در این حالت، مقاومت ظرف پر شده از آب و ماسه (R_o) نه تنها به R_w بستگی دارد بلکه به پارامترهای بافتی ماسه‌ها، که آن را به عنوان فاکتور مقاومت سازند (F) می‌شناسیم، نیز وابسته است:

$$R_o = FR_w$$

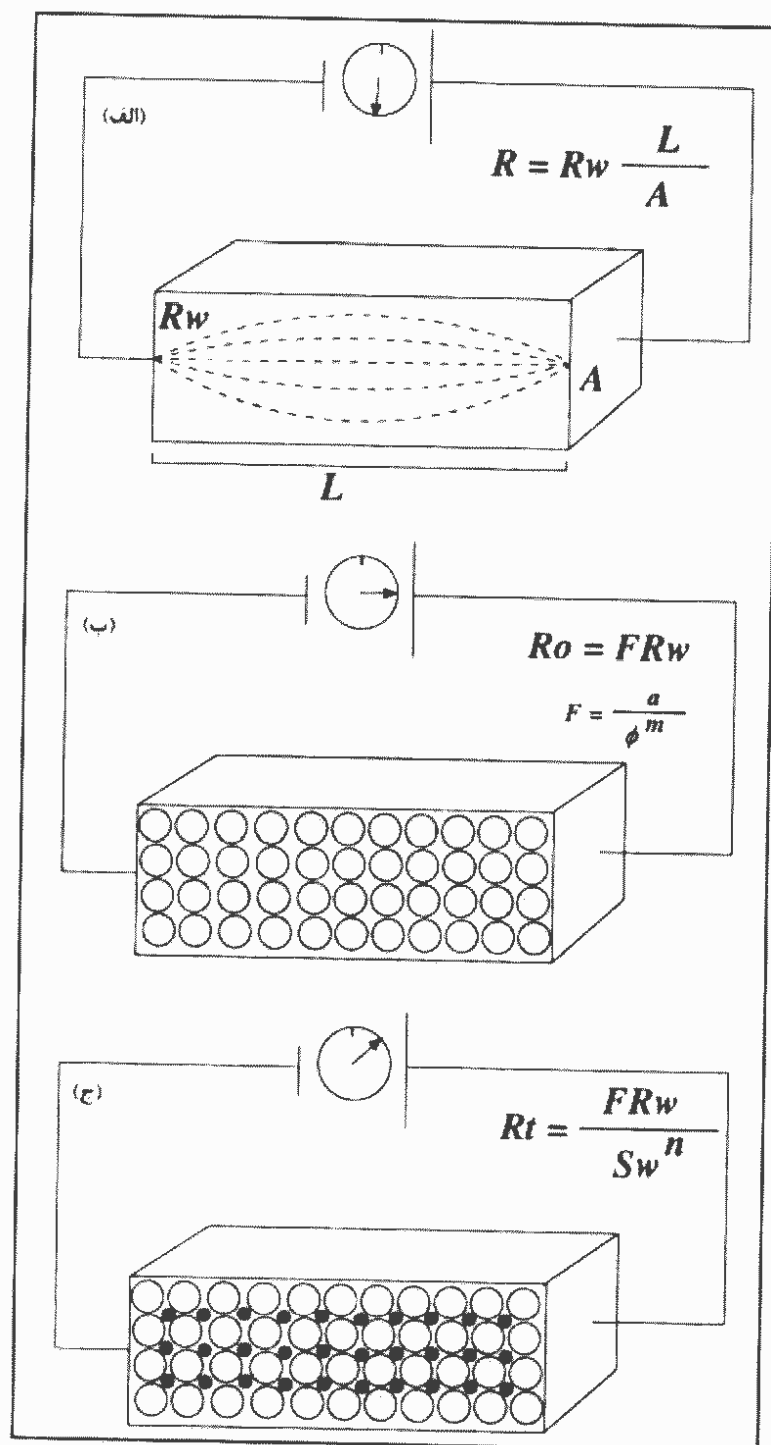
چون نفت مثل دانه‌های ماسه در مقابل جریان الکتریکی نارسناست، اضافه کردن نفت به ظرف، باعث جایگزین شدن آب و در نتیجه افزایش مقاومت کل ظرف خواهد شد (شکل ۱۱-۲۵ ج). در این حالت مقاومت ظرف حاوی آب شور و نفت (R_t) نه تنها وابسته به R_w و F است، بلکه به میزان نفت (S_o) موجود در ظرف بستگی دارد:

$$R_t \sim S_o FR_w$$

یا

$$R_t \sim FR_w / S_w$$

شکل ۱۱-۲۵ - فاکتورهای کنترل کننده مقاومت الکتریکی



پس مقاومت الکتریکی یک سازند (R_t) به R_w ، F و S_w وابسته است. با داشتن سه عامل می‌توان چهارمی را به دست آورد. R_t که از نمودارهای مقاومت به دست می‌آید، یا به طور مستقیم از آنالیز نمونه‌های آب سازندی حاصل از آزمایش ساق مته (DST) به دست می‌آید و یا به طور غیرمستقیم از طریق نمودارهای دیگر نظیر SP و مقاومت قابل محاسبه است. F نیز با داشتن تخلخل، m و a قابل محاسبه است. حال با داشتن این سه عامل می‌توان S_w را با استفاده از معادله آرچی محاسبه نمود:

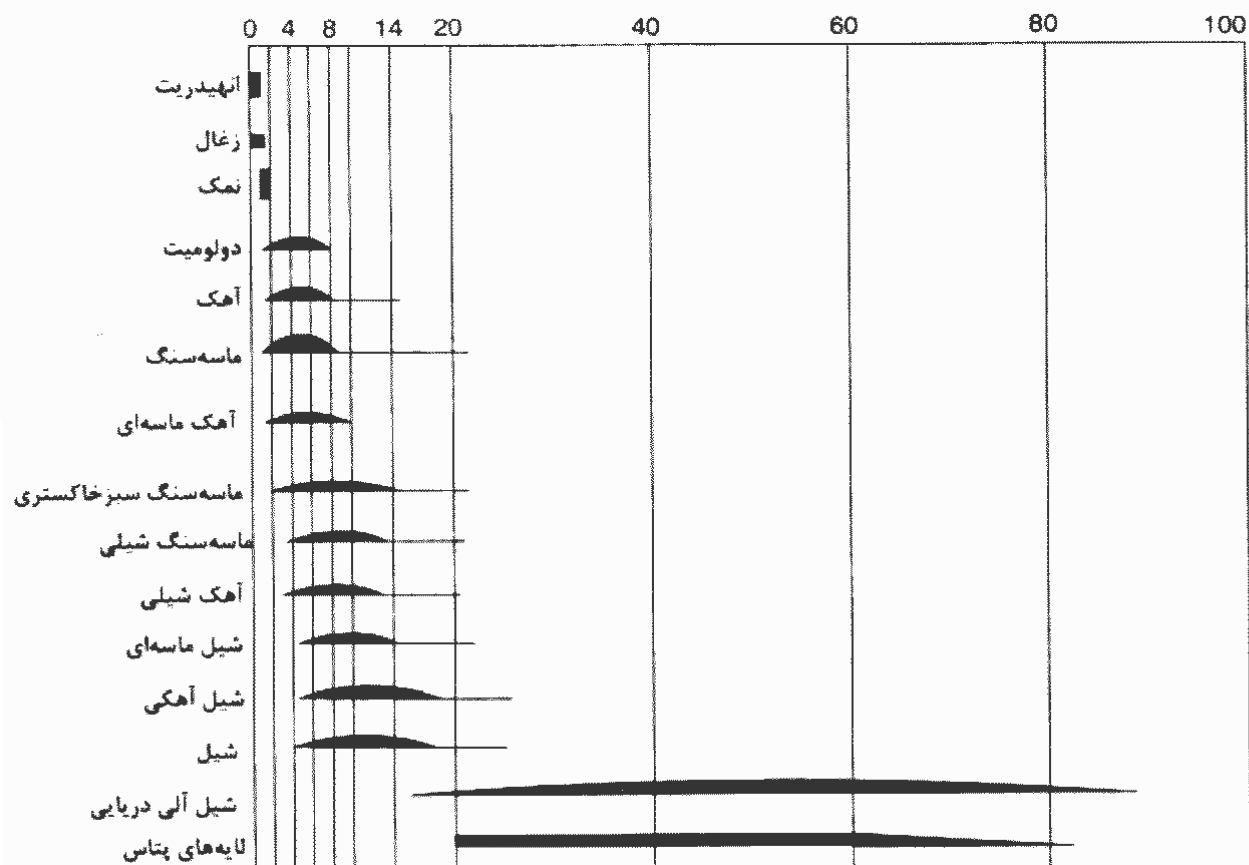
$$S_w = \sqrt[n]{\frac{FR_w}{R_t}}$$

n ضریب اشباع‌شدگی (saturation exponent) است که معمولاً برابر ۲ در نظر گرفته می‌شود. با داشتن مقدار آب اشباع‌شدگی با توجه به اینکه $S_o = 1 - S_w$ است، نفت اشباع‌شدگی به دست می‌آید.

البته لازم بذکر است که معادله آرچی برای سازندهای تمیز (clean formations) یا فاقد رس صحت دارد. وجود رس در مخازن یک اضافه رسانایی در سنگ ایجاد می‌کند که برای تصحیح آن و محاسبه آب اشباع‌شدگی، روش‌های بسیار متنوعی وجود دارد که بیان آنها از حوصله این کتاب خارج است.

۱۱-۲ نمودارهای رادیواکتیویته (Nuclear Logging)

تجزیه هسته‌ای عناصر ویژه‌ای به صورت تشعشعات ذرات آلفا، بتا و گاما ظاهر می‌شود. دو ذره آلفا و بتا دارای قدرت نفوذ پایین هستند و ممکن است توسط جداره چاه متوقف شوند، در صورتی که پرتو گاما (Gamma-ray, GR) مشابه پرتو ایکس بوده و توانایی نفوذ تا چندین اینچ در سنگ یا فولاد را دارد. همه سنگ‌هایی که دارای کانی‌های رادیواکتیو هستند تشعشع قابل اندازه‌گیری را منتشر می‌کنند. شکل ۱۱-۲۶ شدت نسبی تشعشع گاما در سنگ‌های رسوبی تیپیک را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱-۲۶ - میزان پرتو گاما در سنگ‌های مختلف

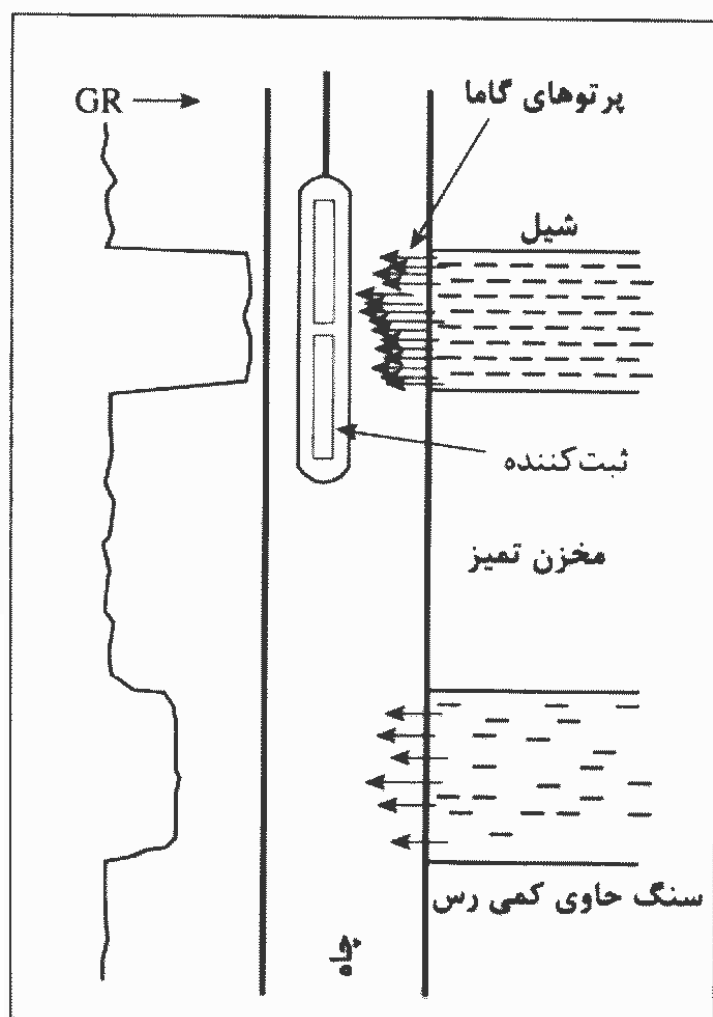
نوع دیگر، تشعشع نامرئی نوترون است که از هیچ فرآیند رادیواکتیویته طبیعی منتشر نمی‌شود و توسط تجزیه هسته‌ای ایجاد می‌گردد. این تشعشع می‌تواند تا چندین فوت در سرب نفوذ کند و مشاهده مستقیم آن مشکل است، به همین دلیل مدت‌ها پس از شناخت پرتوهای آلفا، بتا و گاما هنوز ناشناخته بود. نوترون‌ها در نمودارگیری کاربرد دارند زیرا عکس العمل آن‌ها با ماده سنگی اثراتی تولید می‌کند که می‌تواند در چاه آشکار شود.

نمودارهای رادیواکتیویته هم در چاه جداره‌دار (cased hole) و هم در چاه باز (open hole) یا فاقد جداره، عمل می‌کنند.

۱۱-۲-۱ نمودار پرتو گاما (Gamma Ray Log, GR)

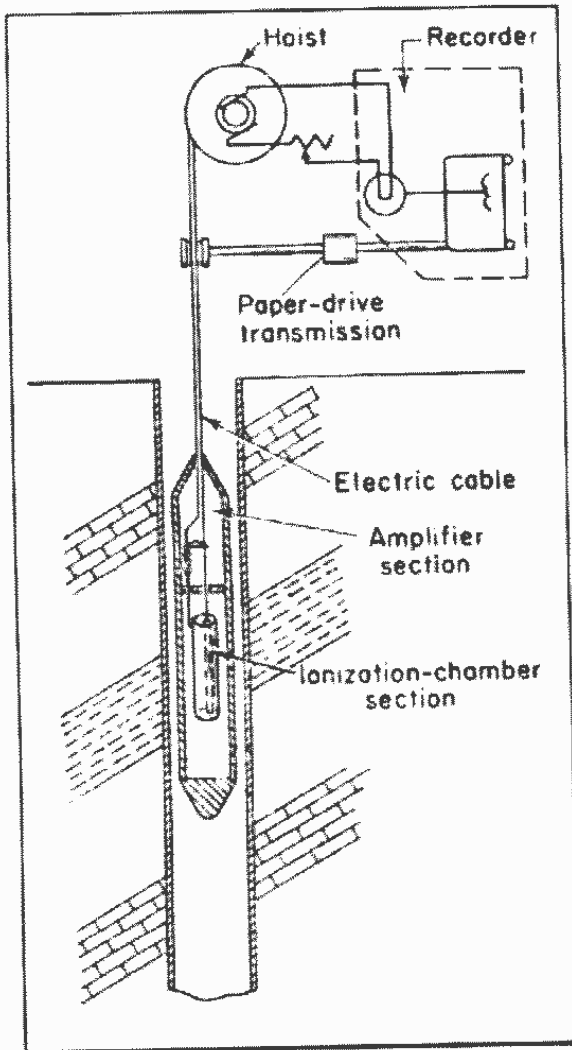
ابزار نمودار پرتو گاما، رادیواکتیویته طبیعی سازندها را اندازه‌گیری می‌کند (شکل ۱۱-۲۷). شکل ۱۱-۲۸، سوند نمودارگیری GR را نشان می‌دهد. در داخل این سوند محفظه‌ای وجود دارد که حاوی گاز بی اثر با فشار بالاست. پرتوهای گامای منتشره از سازند، با اتم‌های گاز

موجود در محفظه برخورد کرده و در نتیجه الکترون گازها آزاد می‌شود. وقتی الکترون‌ها آزاد می‌شوند، گاز به طور الکتریکی شارژ یا یونیزه می‌شود. جریان الکتریکی ناشی از یونیزه شدن گاز به طور خودکار تقویت و در سطح ثبت می‌شود. بزرگی اندازه جریان به شدت پرتو گاما در هر عمقی بستگی دارد. پرتو گاما با یک سرعت ثابت منتشر نمی‌شود، اما سرعت نمودارگیری می‌تواند برای به دست آوردن یک تصویر آماری حقیقی از تشعشع در محل‌های متفاوت تعدیل شود. API مقیاس استاندارد برای نمودارهای گاما است.

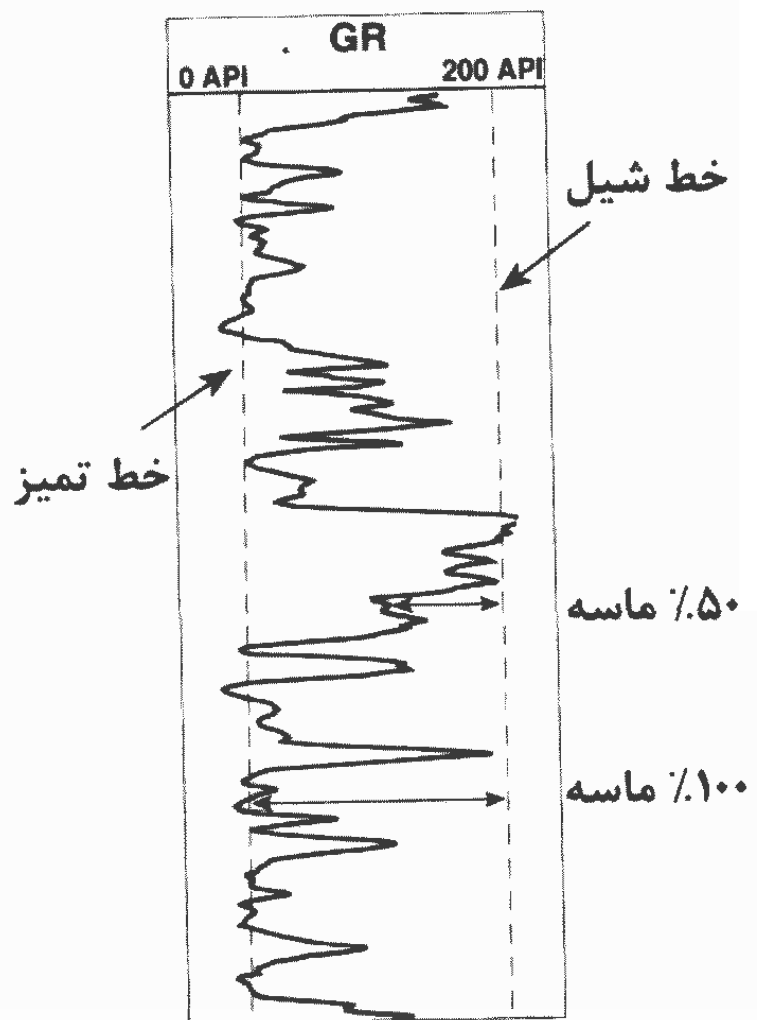


شکل ۱۱-۲۷ - شمایی از نمودارگیری پرتو گاما

شکل ۱۱-۲۸ - سوند نمودارگیری پرتو گاما



در سنگ‌های رسوبی نمودار پرتو گاما اساساً تاحدی بیانگر حجم رس سازند است، چون عناصر رادیواکتیو نظیر پتاسیم عمدتاً در رس‌ها متمرکزند. سازندهای تمیز معمولاً یک سطح بسیار پایین از رادیواکتیو دارند مگر اینکه دارای ناخالصی‌هایی مانند خاکستر آتشفشانی یا گرانیت هوازده باشند، یا هنگامی که آب سازندها حاوی نمک‌های پتاسیم حل شده باشد. شکل ۱۱-۲۹ یک نمودار پرتو گاما را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱-۲۹ - مثالی از یک منحنی پرتو گاما که در آن خط شیل و خط ماسه یا خط تمیز مشخص شده است. با استفاده از این خطوط می‌توان میزان شیل را در فواصل مخزنی حاوی شیل مشخص نمود

۱۱-۲-۲ اسپکترومتری پرتوهای گاما

پیشرفت در ابزارهای آشکارسازی سبب شده است که بتوانیم پرتوهای گاما را که از عناصر مختلف ساطع می‌گردند و دارای انرژی متفاوتی هستند، از یکدیگر تفکیک کنیم. پرتوهای گاما از عناصر اورانیم، توریم و پتاسیم ساطع می‌گردند. ابزار اندازه‌گیری پرتوهای طیف گاما سطوح مختلف انرژی را در هر عنصر از یکدیگر جدا می‌کند، به‌طوری‌که می‌توان هر کدام از این پرتوها را به طور جداگانه تشخیص داد و لذا نوع عنصر ساطع کننده آن را مشخص نمود.

سه نوع ایزوتوپ مختلف در طبیعت برای پتاسیم وجود دارد. ^{41}K ، ^{40}K ، ^{39}K که فقط پتاسیم ^{40}K دارای خواص رادیواکتیوی در میان این سه نوع می‌باشد. میکا و فلدسپات‌ها به طور عمده‌ای در اثر آلتراسیون به کانی‌های رسی مانند ایلیت، مونت‌موریلونیت، کلریت و کائولینیت تبدیل می‌شوند. در اثر این آلتراسیون قسمت کوچکی از کل مقدار پتاسیم وارد ساختمان مولکولی این کانی‌ها می‌گردد. مونت‌موریلونیت توسط فرایند ایلیتی شدن و کلریتی شدن به تدریج ناپدید می‌گردد. در طول این انتقال مقدار پتاسیم در داخل رس افزایش می‌یابد.

توریم فقط یک ایزوتوپ با طول عمر زیاد دارد. توریم ^{232}Th دارای تمرکز میانگینی حدود ۱۲ppm در پوسته زمین است. سنگ‌های اصلی که حاوی توریم هستند شامل سنگ‌های آذرین اسیدی است. کانی‌های حاوی این عنصر، کلریت، هوتنیت و توریت می‌باشند. کانی‌های سنگین (heavy minerals) نیز حاوی مقادیر متنابهی از توریم می‌باشند. تمایل به تمرکز توریم در کانی‌هایی مانند رس و بوکسیت زیاد است.

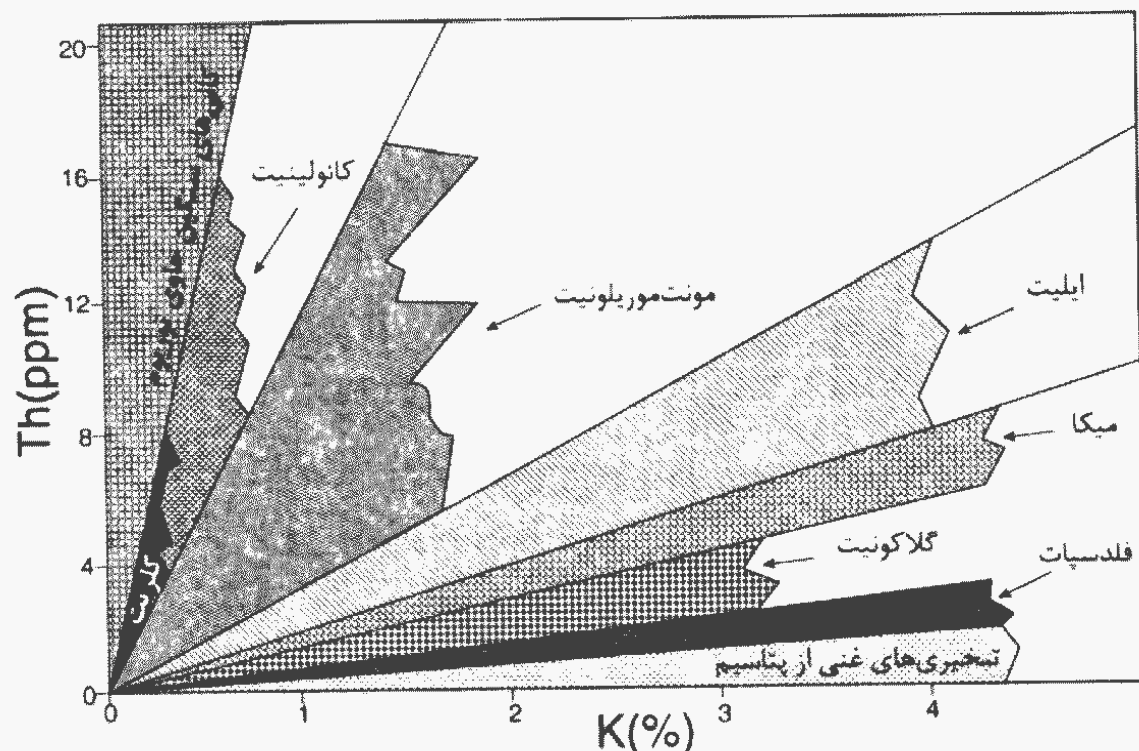
اورانیوم به طور عمده‌ای در محلول‌ها منتقل می‌شود. گاهی اوقات اورانیم به وسیله تمرکز در نمک فلزات سنگین منتقل می‌شود. اورانیوم می‌تواند به وسیله کمپلکس‌های کربناتی، فسفاتی و آلی رسوب داده شود و نیز می‌تواند به وسیله سیلیس آمورف، آلومینیوم، ذغال و لیگنیت جذب شود. اورانیوم به وسیله مواد آلی جذب می‌شود ولی هیدروکربن‌ها فاقد این خاصیت هستند.

اندازه‌گیری حجم شیل توسط رابطه زیر صورت می‌گیرد:

$$V_{sh} = \frac{GR - GR_{clean}}{GR_{sh} - GR_{clean}}$$

در این رابطه، $clean$ به کمترین مقدار خوانده شده در سازندهای غیرشیلی (تمیز) و sh مقدار خوانده شده در سازند ۱۰۰٪ شیلی است و مقدار بدون اندیس مقدار خوانده شده روی سازند مورد نظر است.

تشعشع گاما از اورانیوم شاخص وجود شیل نمی‌باشد، زیرا برخلاف پتاسیم و توریوم، اورانیوم عموماً در مواد آلی رسوبات تمرکز می‌یابد. لذا مناسب است که برای اندازه‌گیری حجم شیل، مقدار گامای ساطع شده از پتاسیم و توریوم در رابطه بالا استفاده شود. با توجه به اینکه کانی‌های رسی توزیع متفاوتی از توریوم و پتاسیم دارند، می‌توان با استفاده از کراس پلات آن‌ها، انواع کانی‌های رسی را تا حدی از یکدیگر تفکیک نمود (شکل ۱۱-۳۰).

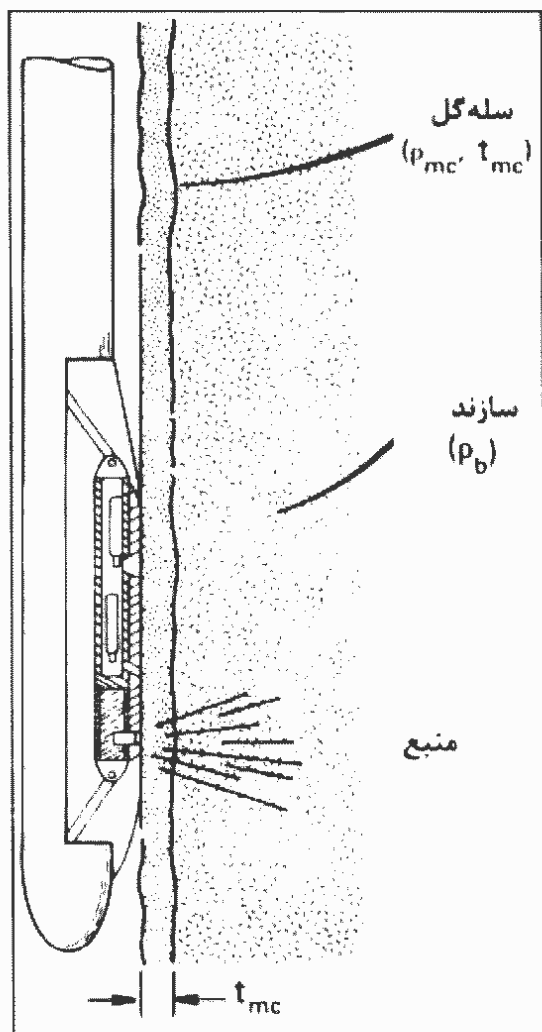


شکل ۱۱-۳۰ - شناسایی کانی‌های رسی با استفاده از کراس پلات توریوم و پتاسیم

۱۱-۲-۳ نمودار چگالی (Density Log)

نوع ویژه‌ای از نمودارهای رادیواکتیویته هستند که چگالی سازندها را ثبت می‌کنند. در ابزار نمودارگیری چگالی، منبع پرتو گاما و ثبت‌کننده روی یک کفشک فلزی سوار هستند که آن نیز به یک بازوی جمع شونده متصل است. به کمک فنرها این صفحات در روی دیواره چاه نگه داشته می‌شوند. برای این نمودار زمانی تصحیح لازم است که تماس بین کفشک و سازند به دلیل ناهمواری دیواره چاه به طور کامل انجام نشود. مقدار این اصلاح ممکن است زیاد باشد اما به طور خودکار توسط اغلب لوازم نمودارگیری چگالی انجام می‌شود.

شکل ۱۱-۳۱ اساس نمودارگیری چگالی را شرح می‌دهد. در این روش پرتو گاما از منبع به سازند ساطع شده و توسط ثبت‌کننده دریافت می‌شود. چون جذب و پراکندگی پرتو گاما در سازند تا درجه زیادی به تراکم مواد، به عبارت دیگر به مقدار الکترون‌های موجود در مسیرش



بستگی دارد، بنابراین توسط این نمودار چگالی کل (bulk density) و لذا تخلخل سنگ اندازه‌گیری می‌شود.

شکل ۱۱-۳۱ - ابزار نمودارگیری چگالی

نمودار چگالی فقط در چاه‌های باز عمل می‌کند، چون حضور جداره و سیمان از تماس آن با سنگ‌ها جلوگیری می‌کند.

تخلخل با چگالی ارتباط دارد، هر چه تخلخل بیشتر شود چگالی کاهش می‌یابد. انحرافات نمودار چگالی درون یک توده یکنواخت ماسه‌سنگی یا سنگ آهکی، افزایش‌ها و

کاهش‌های تخلخل آن‌ها را نشان می‌دهد. باید به عواملی که روی نمودار چگالی تأثیر می‌گذارند توجه شود. مثلاً کانی‌های رسی موجود در ماسه‌سنگ، تقریباً چگالی مشابه دانه‌های ماسه را در سنگ دارند، بنابراین چگالی کلی مشاهده شده به چگالی حقیقی نمونه نزدیک خواهد شد. همچنین، سیالات پرکننده فضاهای خالی تأثیر در چگالی کلی سنگ دارد و لذا چگالی دانه‌ها و مایعات در محاسبه تخلخل بایستی در نظر گرفته شود.

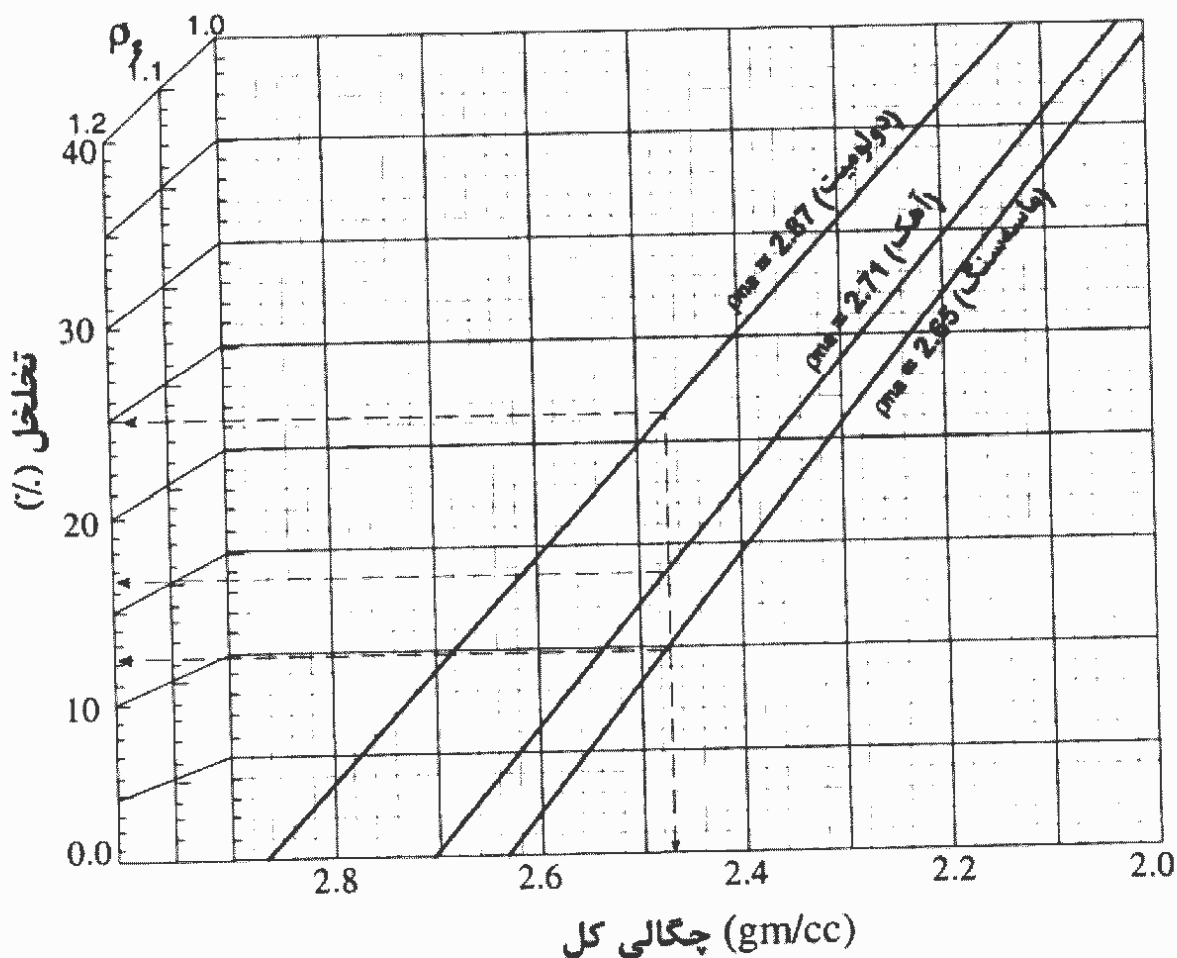
در سنگ‌های متخلخل و تمیز، چگالی اندازه‌گیری شده شامل چگالی مایع در فضاهای خلل و فرج به علاوه چگالی دانه‌های سنگ است که به آن چگالی کل (bulk density) می‌گویند:

$$\rho_b = \rho_f(\phi) + \rho_{ma}(1 - \phi)$$

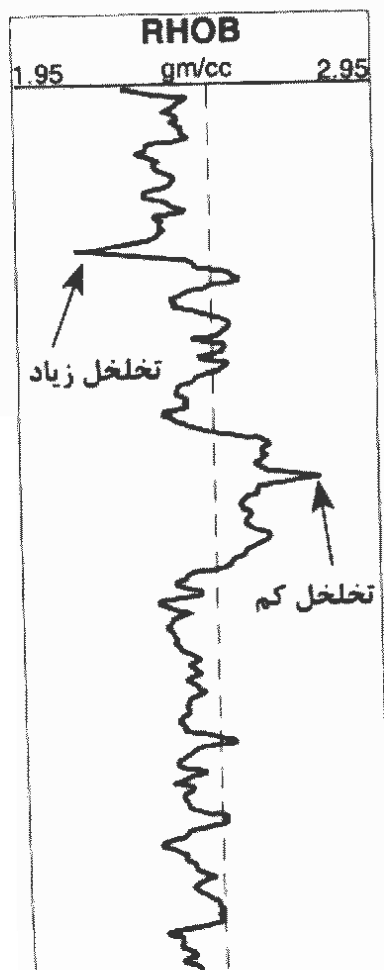
که در آن ρ_b چگالی کل، ρ_f چگالی سیال، ρ_m چگالی ماتریکس و ϕ تخلخل است. معادله فوق به صورت زیر مرتب می‌شود تا بتوان از اطلاعات چگالی تخلخل را محاسبه نمود.

$$\phi = \frac{\rho_{ma} - \rho_b}{\rho_{ma} - \rho_f}$$

از چارت‌های خاص (شکل ۱۱-۳۲) نیز برای تبدیل اطلاعات چگالی به تخلخل می‌توان استفاده کرد.



شکل ۱۱-۳۲ - چارت تبدیل اطلاعات چگالی به تخلخل با سیالات با چگالی متفاوت



اغلب وسایل نمودارگیری چگالی به طور همزمان با یک نمودار پرتو گاما و یک کالیپر همراه است. یک نمودار چگالی در شکل ۱۱-۳۳ نشان داده شده است. معمولاً همراه نمودار چگالی منحنی دیگری به نام منحنی تغییرات چگالی ($\Delta\rho$, DRHO) آورده می‌شود که مقدار تصحیح انجام شده این نمودار را نشان می‌دهد.

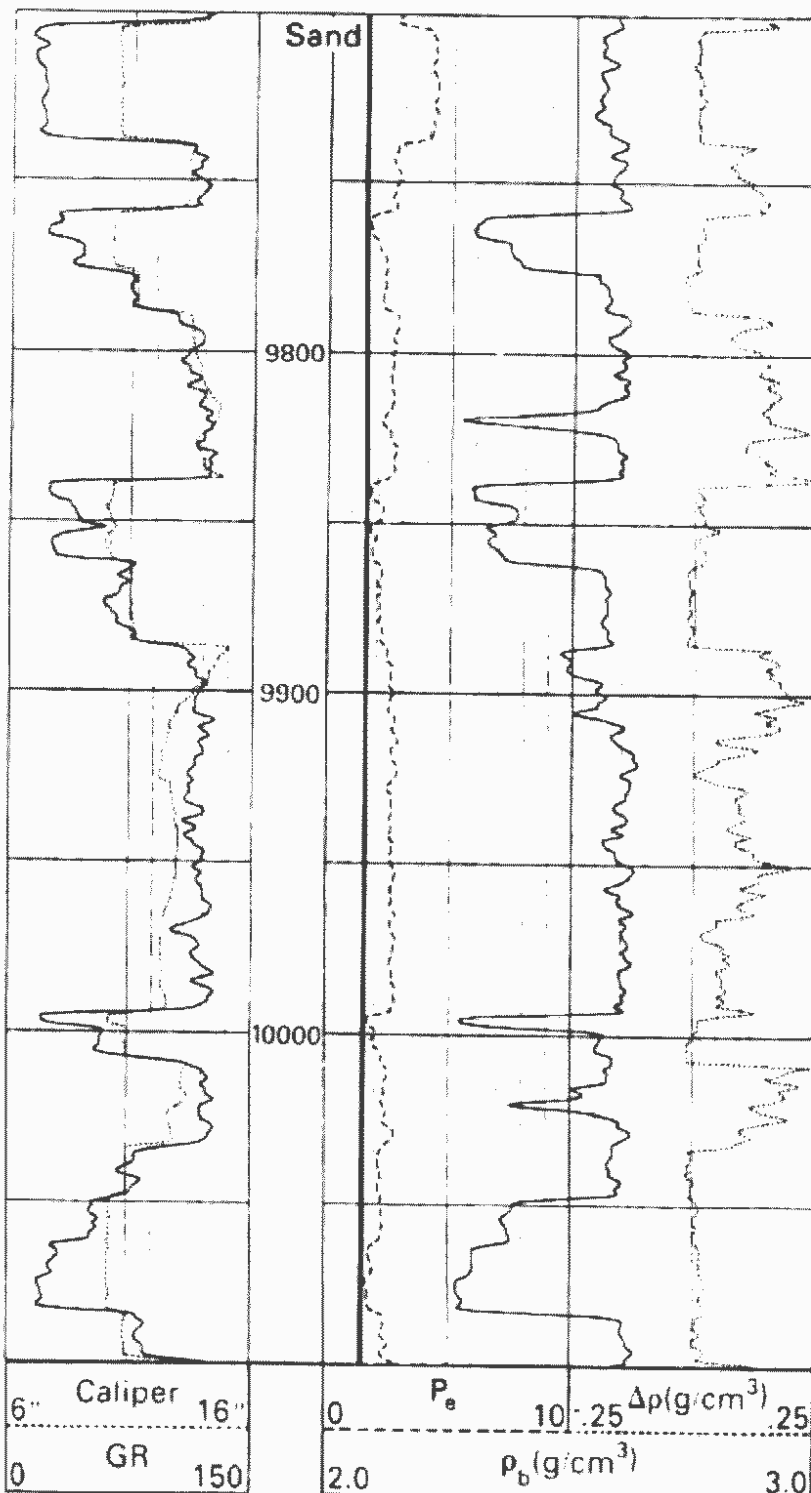
شکل ۱۱-۳۳ - مثالی از یک نمودار چگالی

به نمودار چگالی، نمودار گاما - گاما دانسیته، نمودار دانسی‌لاگ و FDC (formation density compensated) نیز اطلاق می‌شود.

در ابزارهای جدید چگالی، پرتوهای گامای برگشتی کم‌انرژی نیز اندازه‌گیری می‌شود. پرتوهای برگشتی کم‌انرژی گاما وابسته به پارامترهای جذب فتوالکتریک

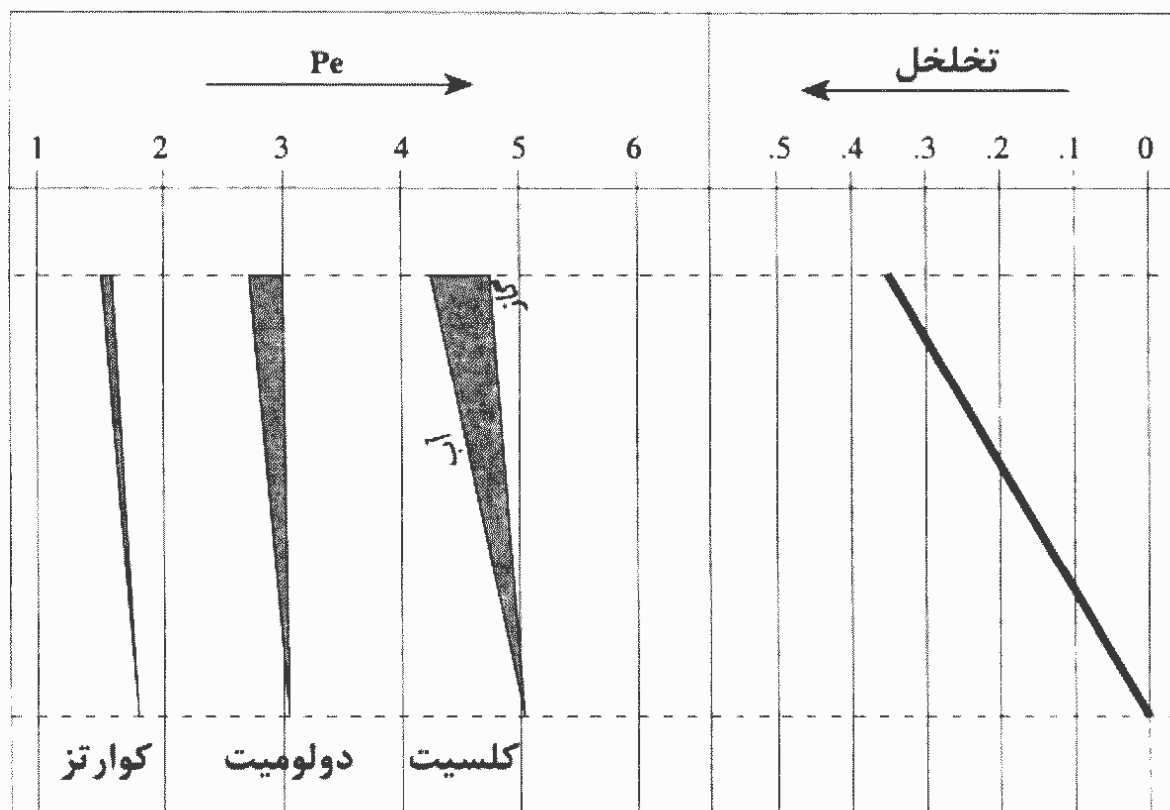
(photoelectric absorption)

سازند است و لذا قادر است کانی‌شناسی سازند را مشخص کند. این ابزار تحت عنوان نمودار فتوالکتریک یا Pe و یا لیتودنسیتی (lithodensity) معروف است. در شرایط معمولی نمودارگیری، مقدار Pe بین ۱ تا ۶ در تغییر است و سه کانی اصلی سنگ‌های رسوبی یعنی کوارتز، دولومیت و کلسیت دارای Pe به ترتیب ۱,۸، ۳,۱ و ۵,۱ است. شکل ۱۱-۳۴ نمودار Pe را به همراه نمودارهای GR، کالیپر، چگالی و $\Delta\rho$ نشان می‌دهد. در این شکل دیده می‌شود که در فواصل کاملاً تمیز (بر اساس GR)، مقدار Pe کاملاً بر خط ماسه (۱,۸) تکیه دارد و در فواصل شیلی مقداری بیشتر می‌گردد.



شکل ۱۱-۳۴ - نمودار Pe در یک نوالی ماسه‌سنگی و ماسه‌سنگ‌شیلی. در قسمت فوقانی مقدار Pe حدود ۳,۱ است که بیانگر یک لایه دولومیتی است

شکل ۱۱-۳۵ نشان می‌دهد که چگونه Pe قادر به تفکیک سه کانی مهم در سنگ‌های رسوبی است و مقدار تخلخل و نوع سیال تأثیر بسیار کمی بر این نمودار دارد.



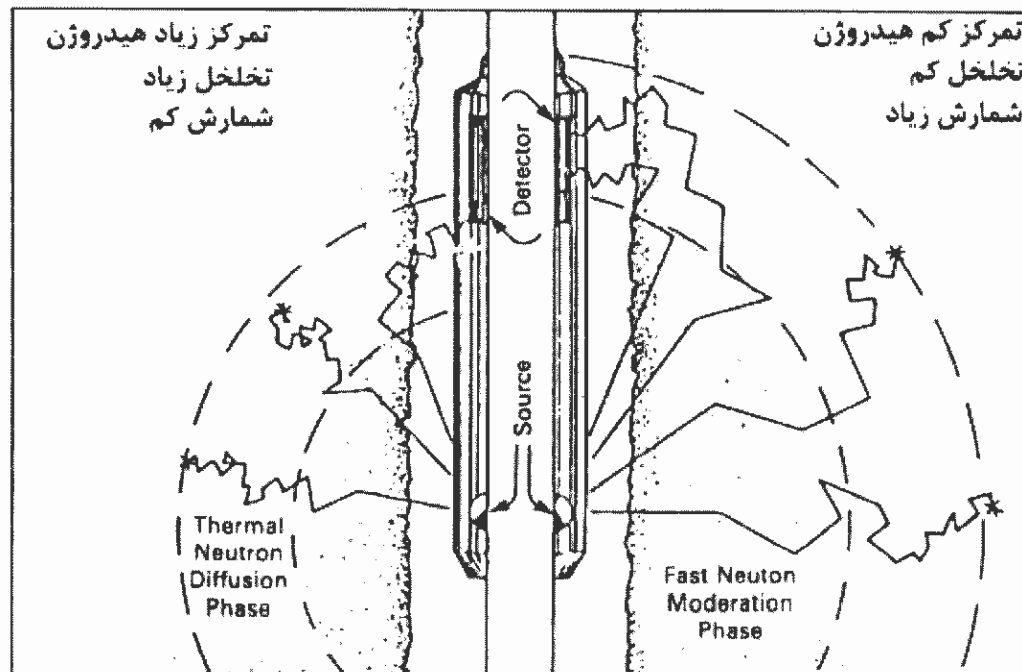
شکل ۱۱-۳۵ - تغییرات Pe برای سه کانی مهم در سنگ‌های رسوبی

۱۱-۲-۴ نمودار نوترون (Neutron log)

نوترون‌ها در هسته همه عناصر غیر از هیدروژن وجود دارند. ترکیب آن‌ها تقریباً مشابه اتم هیدروژن است اما الکترون ندارند. وقتی نوترون‌ها از مواد رادیواکتیو منتشر می‌شوند دارای سرعت‌های بسیار زیادی هستند که در اثر برخورد با اتم‌های دیگر از سرعت‌شان کاسته می‌شود. اتم‌های دارای جرم مشابه نوترون، باعث کاهش سریع سرعت نوترون می‌شوند. بنابراین، سرعت نوترون‌ها در اثر برخورد با اتم‌های هیدروژن بسیار آهسته می‌شود و در نتیجه محتوای هیدروژن سازند می‌تواند به وسیله نمودارگیری نوترون تعیین شود.

یک سوند نمودارگیری نوترون دارای یک منبع بسیار رادیواکتیو از نوترون‌ها است که به طور مناسب از محفظه هدایت ساز حمایت می‌شود. شکل ۱۱-۳۶ یک نمودار شماتیک از وسایل نمودارگیری نوترون را نشان می‌دهد. نوترون‌ها از منبع رادیواکتیو به سازندهای مجاور نفوذ کرده و با هسته‌های اتمی متفاوت در سازندها برخورد می‌کنند. اگر سنگ‌ها دارای حجم کم هیدروژن باشند یا اصلاً هیدروژن نداشته باشند، نوترون‌های منتشرشده از منشأ بلافاصله سرعتشان کم نمی‌شود و حرکت خود را در سنگ ادامه می‌دهند و لذا شمارش آن‌ها در ثبت کننده دستگاه زیاد خواهد بود. اگر منبع نوترون رادیواکتیو مقابل سنگ‌های هیدروژن دار باشد، نوترون‌های منتشرشده در اثر برخورد با هسته هیدروژن به سرعت آهسته شده و جذب دیگر عناصر موجود در سنگ می‌گردند و لذا ثبت کننده ابزار نمودارگیری، کاهشی را در شدت

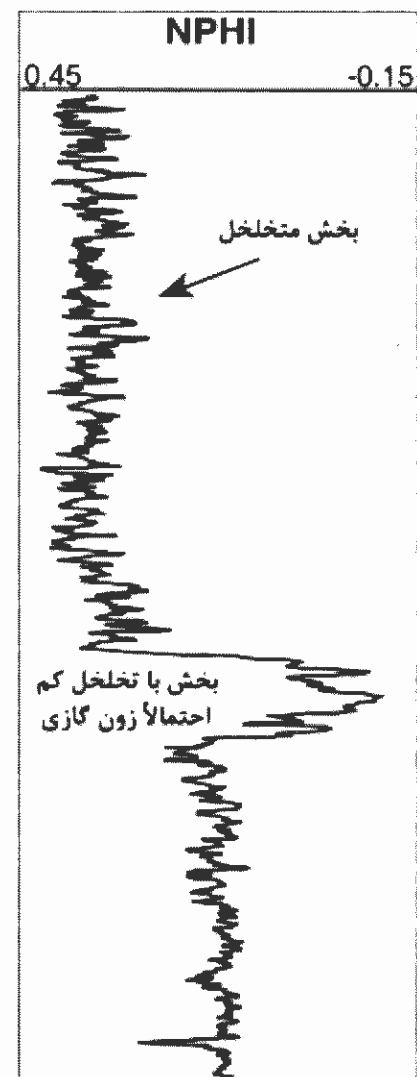
تشعشع نوترون برگشته از سازند نشان می‌دهد. شکل ۱۱-۳۷ نمونه‌ای از نمودار نوترون را نشان داده می‌شود.



شکل ۱۱-۳۶ - وسیله نمودارگیری نوترون (شماتیک)

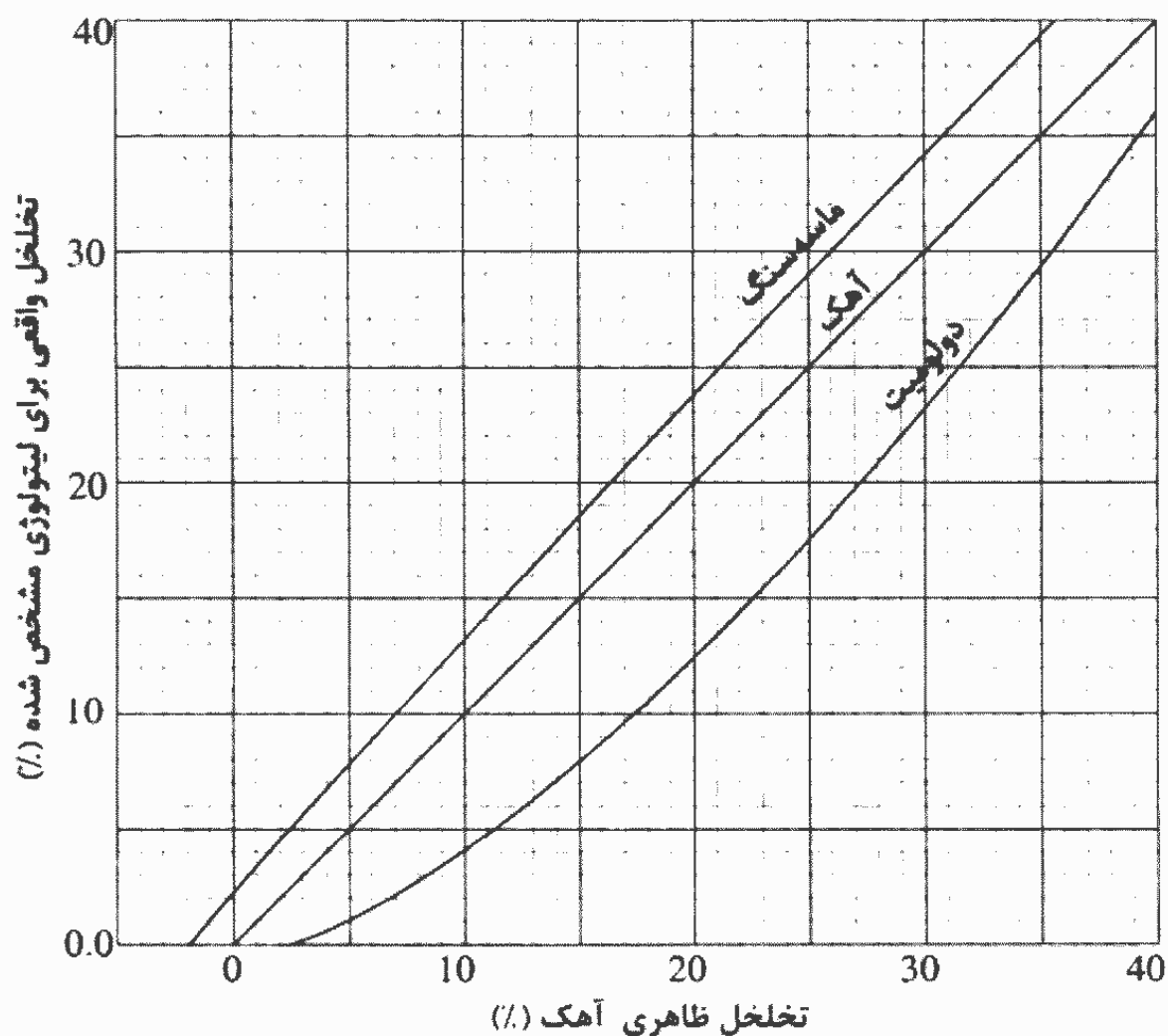
شکل ۱۱-۳۷ - نمونه ای از منحنی نمودار نوترون

محتوای هیدروژن سنگ‌ها به ماهیت سیال موجود در فضای خالی و مقدار رس آن بستگی دارد. آب، نفت و گاز موجود در خلل و فرج سنگ‌ها حاوی هیدروژن بوده و در نتیجه روی منحنی نوترون تأثیر می‌گذارند. مادامی‌که منافذ با مایع پر شده‌اند، وجود هیدروژن بیشتر نشانه تخلخل زیاد بوده و بر عکس، مایع کمتر مصادف با هیدروژن کمتر و نشانه تخلخل کمتر است. لازم به ذکر است که وجود گاز در خلل و فرج سنگ سبب می‌شود که ابزار نوترون نتواند تخلخل دقیق سنگ را اندازه‌گیری کند، که این به دلیل تمرکز کم هیدروژن در گازها در مقایسه با آب و نفت است. کانی‌های رسی چون دارای آب و در شبکه داخلی‌شان دارای هیدروژن می‌باشند، وجود آن‌ها در



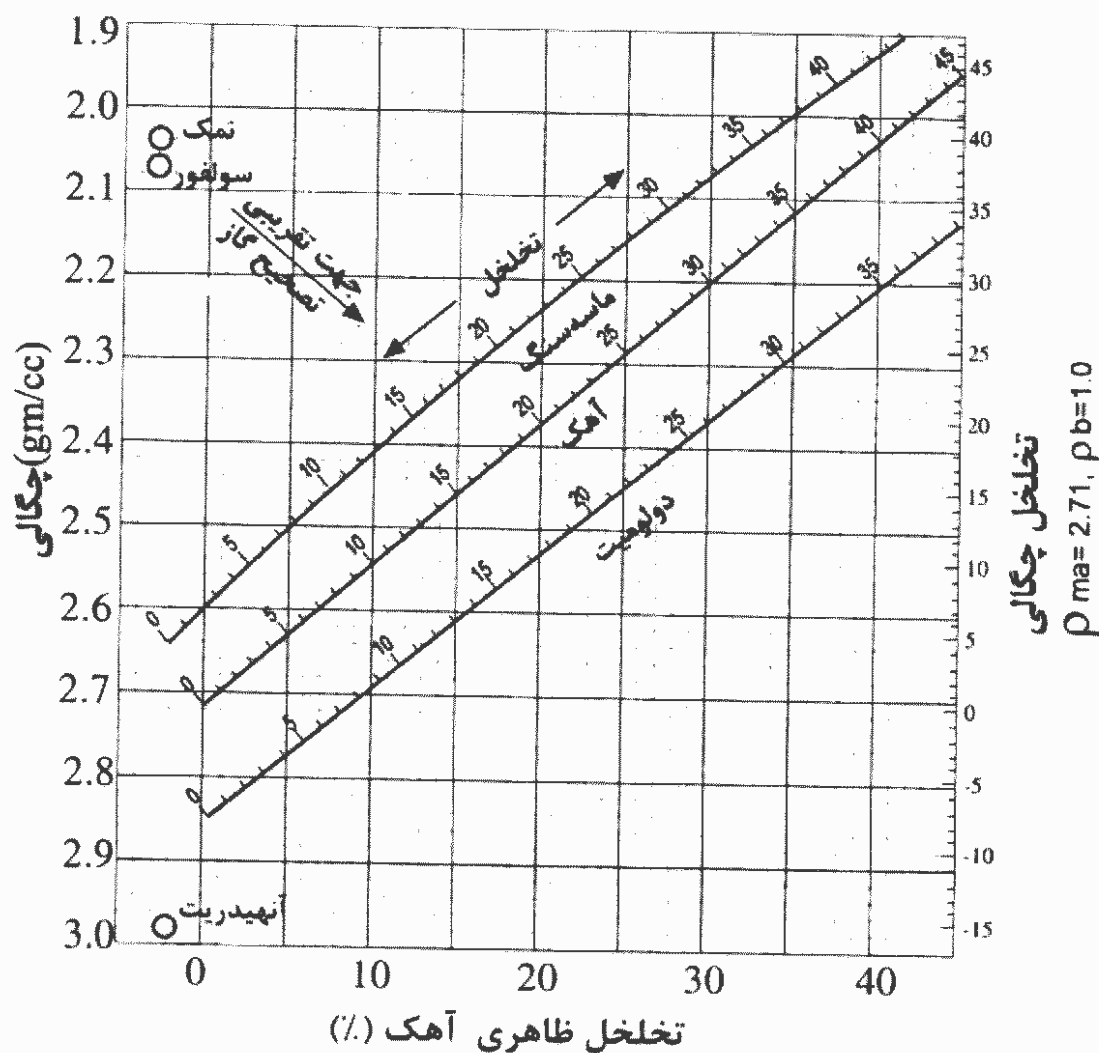
سنگ‌ها نیز سبب خطا در اندازه‌گیری تخلخل توسط ابزار نوترون می‌شود که بایستی مورد تصحیح قرار گیرد.

ابزار نمودار نوترون اصولاً برای آهک‌ها کالیبره شده و مستقیماً تخلخل صحیح لایه‌های آهکی را نشان می‌دهد و برای لیتولوژی‌های دیگر مقدار تخلخل حاصله با استفاده از چارت‌های خاص (شکل ۱۱-۳۸) تصحیح می‌شود.



شکل ۱۱-۳۸ - دیاگرام تصحیح تخلخل نوترون برای لیتولوژی‌های مختلف

چون نمودار نوترون برای لایه‌های آهکی کالیبره شده است، با تلفیق این نمودار با نمودارهای دیگر می‌توان تا حدی برای تعیین لیتولوژی استفاده کرد. کراس پلات نوترون-چگالی یکی از روش‌هایی است که با آن می‌توان لیتولوژی‌ها را شناسایی کرد (شکل ۱۱-۳۹).



شکل ۱۱-۳۹ - کراس پلات نوترون چگالی برای تشخیص لیتولوژی و تصحیح تخلخل

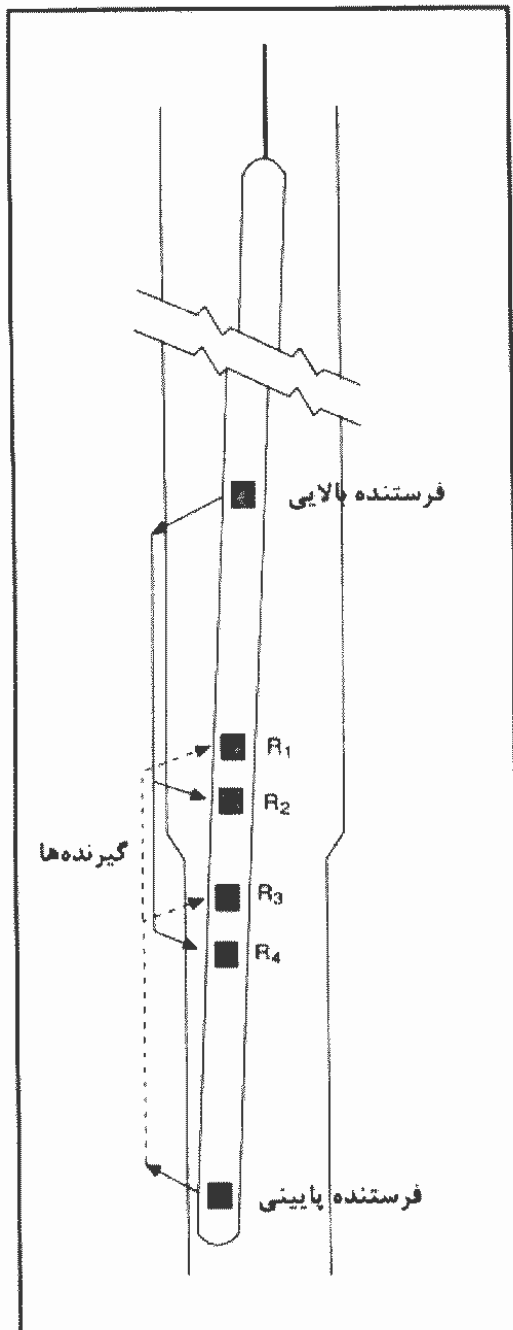
۱۱-۳ نمودار صوتی (Sonic Log)

نمودار اکوستیک یا صوتی اولین بار در سال ۱۹۵۴ به عنوان ابزار اندازه‌گیری تخلخل شناخته شد. این نمودار ابتدا به عنوان وسیله‌ای برای تفسیر اطلاعات اکتشافات لرزه‌ای استفاده می‌شد. این نمودار، عمق را در مقابل زمان اندازه‌گیری می‌کند و آن، مدت زمانی است که یک ضربه صوتی (acoustic pulse) طول معینی از یک سنگ (یک فوت) را طی می‌کند که بدان زمان عبور (transit time) گفته می‌شود و واحد آن میکروثانیه در فوت است. به طور کلی، سرعت عبور امواج فشارشی (compressional waves) از داخل یک سنگ، به ترکیب سازند و مایعات موجود در آن و مقدار تخلخل آن بستگی دارد.

در ابزار نمودارگیری صوتی، ابتدا یک پالس توسط تولیدکننده صوت منتشر می‌شود. سپس این ضربه صوتی از گل و سله گل حفاری عبور کرده و وارد سازند می‌شود و از میان ماتریکس و فضاهای خالی عبور می‌کند. پالسی که در سازند از نزدیکی دیواره چاه عبور می‌کند، در برخورد با سازند، سله گل حفاری و گل منکسر شده و ابتدا گیرنده بالایی سپس گیرنده

پایینی را تحریک کرده و علائمی تولید می‌شوند. ضربه صوتی از داخل گل آهسته‌تر از داخل سازند عبور می‌کند و بعد از مدت زمان کوتاهی که ممکن است ده‌ها یا صدها میکروثانیه باشد،

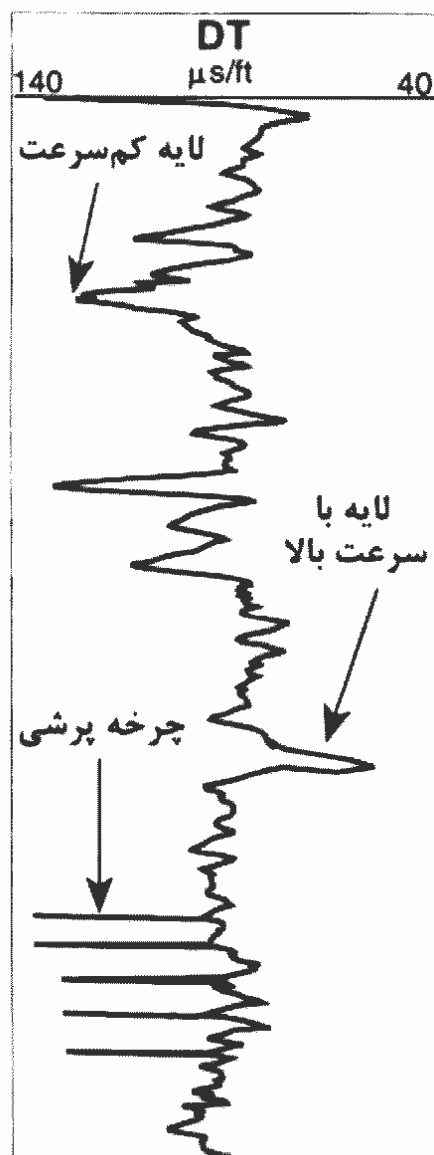
ضربه صوتی که از داخل گل و بدنه سوند عبور کرده است به گیرنده‌ها می‌رسد. در این زمان گیرنده‌ها توسط سیم‌پیچ‌های الکتریکی ویژه‌ای که در بین گیرنده‌ها و تولیدکننده در بدن سوند قرار دارند غیرحساس می‌گردند، در نتیجه این پالس‌ها ثبت نمی‌شوند. معمولاً گیرنده‌ها در فاصله یک فوتی از هم قرار می‌گیرند و عملاً اختلاف زمان بین دریافت انرژی ضربه توسط دو گیرنده ثبت می‌شود. زمان عبور از گل و سله گل خود به خود تصحیح می‌شود به شرطی که دیواره چاه در بین دو گیرنده یکنواخت باشد و مشروط بر اینکه سوند موازی دیواره چاه قرار گیرد. شکل ۱۱-۴۰ یک نوع وسیله نمودارگیری صوتی را نشان می‌دهد. این وسیله از دو تولیدکننده صدا و چهار گیرنده تشکیل شده که با فاصله کمی نسبت به هم قرار دارند. بدنه سوند میان تولیدکننده و گیرنده‌ها از موادی ساخته شده است که عبور صوت در آن آهسته‌تر از داخل سازند صورت می‌گیرد. شکل ۱۱-۴۱ نمونه‌ای از نمودار صوتی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۱-۴۰ - سوند نمودارگیری صوتی دارای چهار گیرنده

از آنجا که نوع سازند توسط نمودارهای دیگر مشخص می‌گردد و با توجه به اینکه زمان عبور صوت با نوع ترکیب سنگ و مایع تغییر می‌کند، می‌توان تخلخل را با استفاده از این نوع نمودار به خوبی تعیین کرد. برای سنگ‌های با تخلخل بین دانه‌ای با توزیع یکنواخت، تخلخل عموماً از معادله وایلی به دست می‌آید:

$$\Delta t = (\Delta t_f \times \phi) + \Delta t_{ma}(1 - \phi)$$



$$\phi = \frac{\Delta t - \Delta t_{ma}}{\Delta t_{fl} - \Delta t_{ma}}$$

که در آن Δt زمان عبور امواج صوتی در سنگ (ثبت شده توسط سوند)، بر حسب میکروثانیه بر فوت، Δt_{ma} زمان عبور امواج صوتی در ماتریکس سنگ (بخش جامد) و Δt_{fl} زمان عبور امواج صوتی در سیال سنگ است.

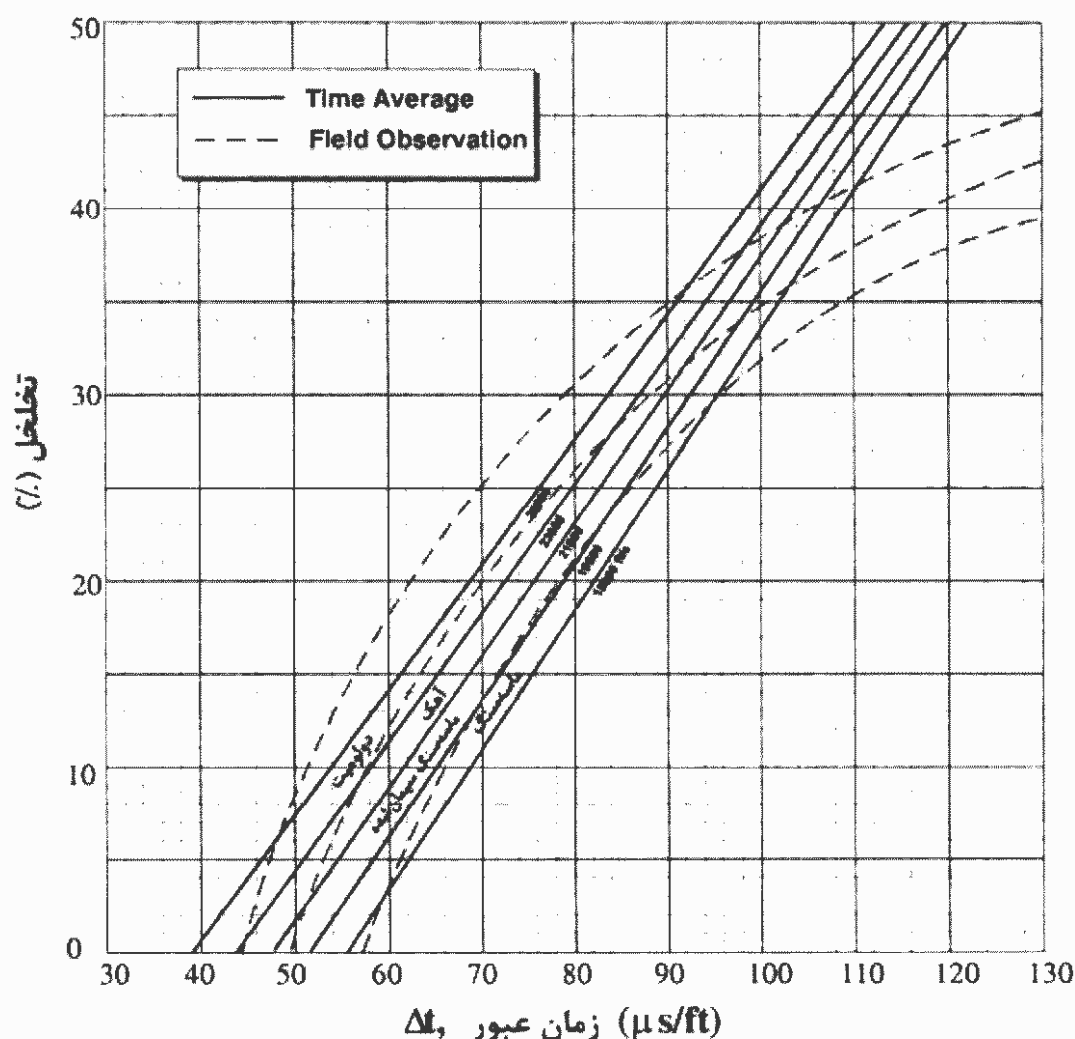
شکل ۱۱-۴۱ - مثالی از یک نمودار صوتی

جدول ۱-۱۱ سرعت صوت و زمان عبور صوت را برای مایعات و جامدات گوناگون نشان می‌دهد.

جدول ۱-۱۱ - سرعت و زمان عبور صوت در مایعات و جامدات گوناگون

زمان طی مسیر t (میکروثانیه بر فوت)	سرعت صوت (فوت در ثانیه)	مواد
۹۱۹	۱۰۸۸	هوا (فشار و حرارت استاندارد)
۷۰۶	۱۴۱۷	متان
۲۳۲	۴۳۰۰	نفت
۲۰۰	۵۰۰۰-۵۳۰۰	آب یا گِل
۱۶۷-۶۲۱/۵	۶۰۰۰-۱۶۰۰۰	شیل‌ها
۶۶/۷	۱۵۰۰۰	سنگ نمک
۵۵/۵	بالای ۱۸۰۰۰	ماسه‌سنگ
۵۰	۲۰۰۰۰	انیدریت
۴۸	بالای ۲۳۰۰۰	آهک
۴۳	۲۴۵۰۰	دولومیت

با استفاده از چارت‌های خاص (شکل ۱۱-۴۲) نیز می‌توان مقادیر DT را به تخلخل در لیتولوژی‌های مختلف تبدیل کرد.



شکل ۱۱-۴۲ - چارت تبدیل مقادیر DT به تخلخل در لیتولوژی‌های مختلف

وجود گاز در زون رخنه موج صوتی را ضعیف کرده باعث ایجاد یک چرخه پرشی (cycle skipping) می‌شود (شکل ۱۱-۴۱). چرخه پرشی هنگامی رخ می‌دهد که علامت به قدر کافی قوی نیست که روی گیرنده پایین تأثیر بگذارد و فقط روی گیرنده بالا مؤثر است. چرخه پرشی در صورت وجود شکستگی‌های باز نیز در نمودار صوتی ایجاد می‌شود.

در صورتی که سیال موجود در فضای تخلخل از هیدروکربن پر شده باشد، مقدار تخلخل به دست آمده زیاده‌تر از اندازه حقیقی است و بایستی به صورت زیر تصحیح گردد:

$$\text{تخلخل} = \text{تخلخل حاصل از نمودار صوتی} \times 0.7 \quad \text{اگر سیال گاز باشد}$$

$$\text{تخلخل} = \text{تخلخل حاصل از نمودار صوتی} \times 0.9 \quad \text{اگر سیال نفت باشد}$$

نمودار صوتی فقط تخلخل زمینه را اندازه‌گیری می‌کند و نمی‌تواند اکثر تخلخل‌های ثانویه را آشکار کند در صورتی که نمودارهای نوترون و چگالی تخلخل کل سنگ (که شامل تخلخل اولیه

و ثانویه) را محاسبه می‌کند. بنابراین از تفاوت بین این دو می‌توان پی به مقدار تخلخل ثانویه برد.

تخلخل نمودار صوتی - تخلخل نمودار نوترون یا چگالی = مقدار تخلخل ثانویه

وسیله نمودارگیری صوتی در یک چاه باز (بدون جداره) پر شده از مایع عمل می‌کند. حضور گل در حفره برای ایجاد اتصال صوتی بین وسیله و سازند لازم است. یک گل حاوی گاز اتصال را کاهش می‌دهد بنابراین نمودارگیری صوتی در یک حفره پر شده از هوا یا گاز غیرممکن است.

در کل از منحنی نمودار صوتی می‌توان به اهداف زیر رسید:

۱- تعیین مقدار تخلخل

۲- تشخیص وجود شکستگی در سنگ‌ها

۳- تشخیص لیتولوژی در صورت تلفیق با نمودارهای دیگر

۴- تطابق لایه‌ها

۱۱-۴ نمودارهای تصویری چاه (Bore Hole- Imaging Logs)

دو نوع نمودار به صورت عمومی وجود دارد که برای تهیه تصاویر از دیواره چاه استفاده می‌شود:

۱- میکرواسکنر سازندی (Formation Microscanner, FMS)

۲- نظاره‌گر صوتی (Acoustic Televiwer, ATV)

این دو نمودار با گل حفاری بایستی به داخل چاه رانده شوند و قادرند جزئیات تصویری دیواره چاه را بر اساس تغییرات مقاومت و انعکاس صوت تهیه کنند.

۱- میکرواسکنر سازندی

ابزار میکرواسکنر سازندی در واقع از تکنولوژی شیب‌سنج (dipmeter) استفاده کرده و دارای چهار بازوی اندازه‌گیری ریزمقاومت (microresistivity) با حد تفکیک بالا (high resolution) است. این ابزار قادر است تصویر خاکستری یا رنگی از دیواره چاه حاصل کند. این تصاویر ویژگی‌های مختلف نظیر لایه بندی، ساخت‌های رسوبی، شکستگی و استیلولیت و تغییر شکل‌های بعد از رسوبگذاری نظیر گسل و چین خوردگی و فروریزش (slumping) را نشان می‌دهند. در این ابزار، دریابگرهای ریزمقاومت (microresistivity sensors) در انتهای چهار بازوی عمود بر هم نصب گردیده است. این دریابگرها قادرند تغییرات مقاومت را با حد تفکیک بالا در لایه‌های حفاری شده ثبت نمایند. این تغییر مقاومت‌ها که به عواملی نظیر لایه بندی، شکستگی‌های پر شده از گل حفاری، تخلخل‌های حفره‌ای، تغییر بافت سنگ و غیره بستگی

دارد، به صورت تباین رنگی (contrast) نشان داده می شود. این تباین رنگی به صورت یک تصویر مجازی، می تواند ویژگی های مخزن را به صورت کیفی به نمایش بگذارد.

از کاربردهای این ابزار می توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ❖ تشخیص شکستگی ها و تجزیه و تحلیل آن ها (باز یا بسته بودن، شیب و امتداد و طول آن ها در چاه) (شکل ۱۱-۴۳).

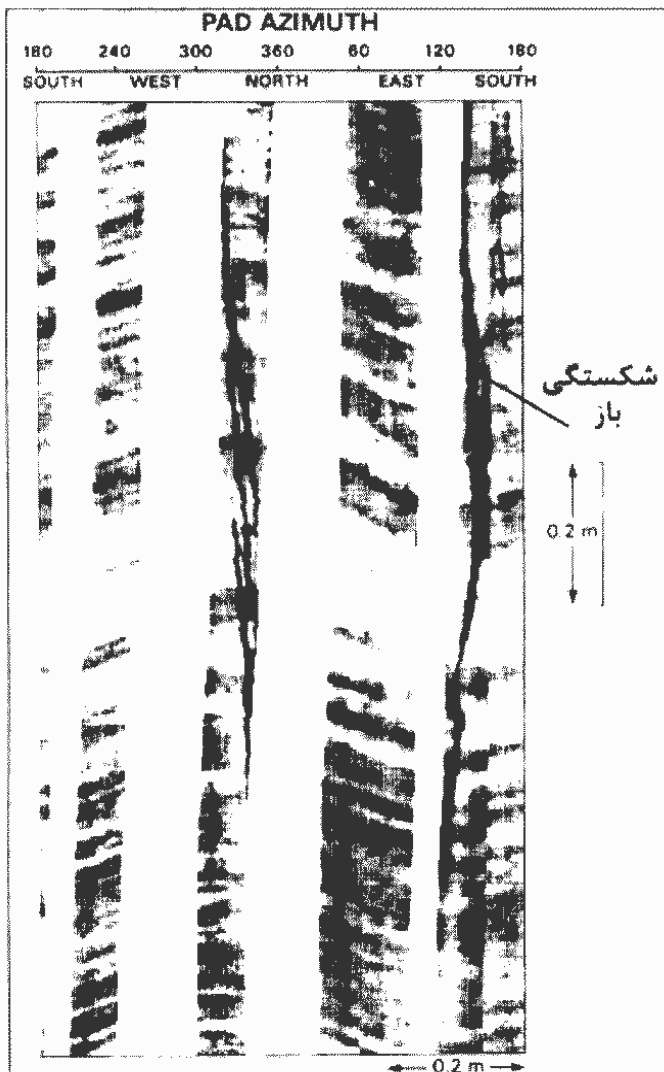
- ❖ تشخیص تخلخل های حفره ای (شکل ۱۱-۴۴)،

- ❖ تشخیص فواصل سمته شده و یا متخلخل (شکل ۱۱-۴۵)،

- ❖ تشخیص لایه بندی و ساخت های رسوبی

- ❖ کمک در توصیف مغزه ها

- ❖ تطبیق عمق مغزه و نمودار



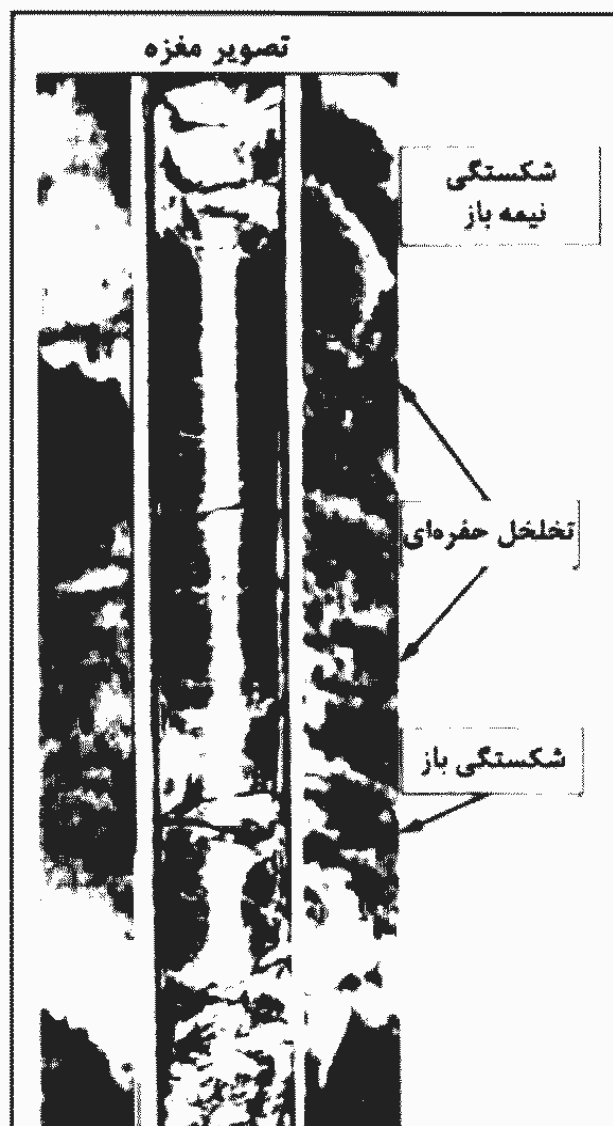
شکل ۱۱-۴۳ - شکستگی ها بخوبی در تصاویر FMS

مشخص می شوند

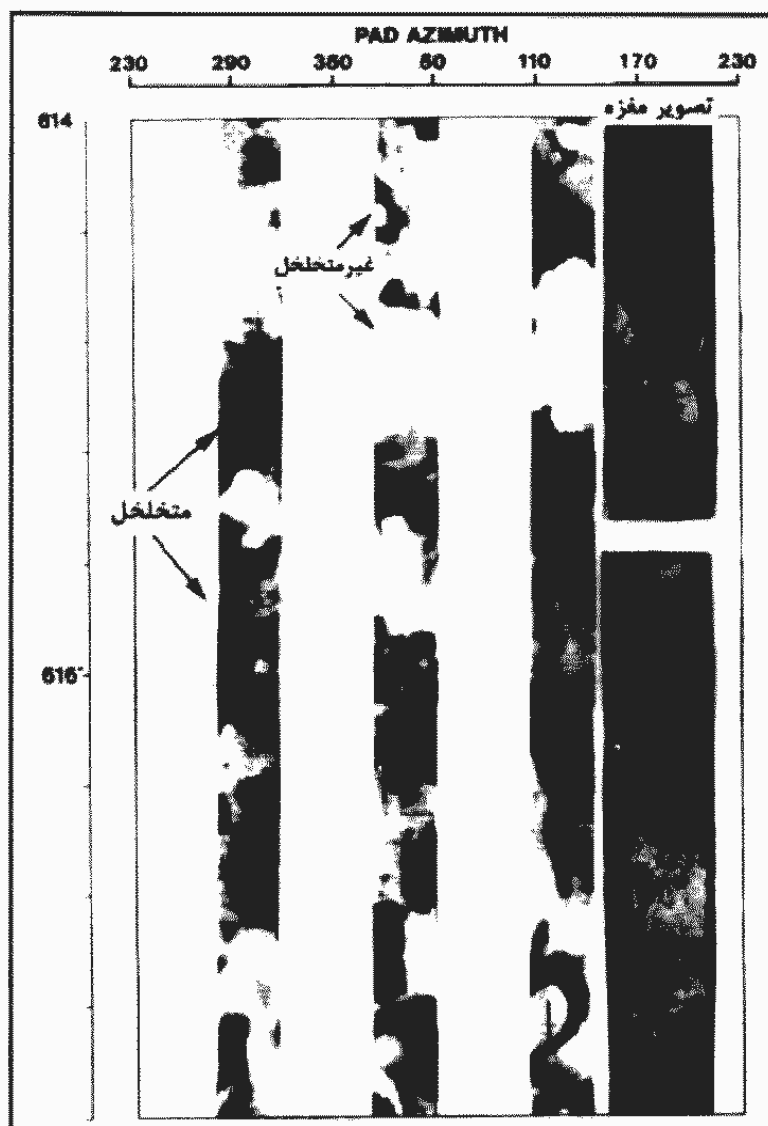
این ابزار در چاه های حاوی گل حفاری رسانا رانده می شود و معمولاً با GR و NGS همراه است. در لایه های مورد بررسی سرعت نمودارگیری ۵۰۰ متر در ساعت و برای دیگر فواصل، سرعت نمودارگیری می تواند به ۱۰۰۰ متر در ساعت افزایش یابد، که در این صورت، ابزار فقط اطلاعات شیب سنجی را برداشت می نماید.

۲ - نظاره گر صوتی

این ابزار که هم چنین Borehole televiewer نامیده می شود، همانند FMS یک نمودار تفسیری است که می تواند اطلاعاتی در زمینه موقعیت و ویژگی تخلخل های ثانویه از قبیل شکستگی ها و شیب و امتداد آن ها در اختیار بگذارد. بر خلاف FMS، این ابزار بر اساس تباین صوتی (acoustic contrast) دیواره چاه تصویر فراهم می کند.



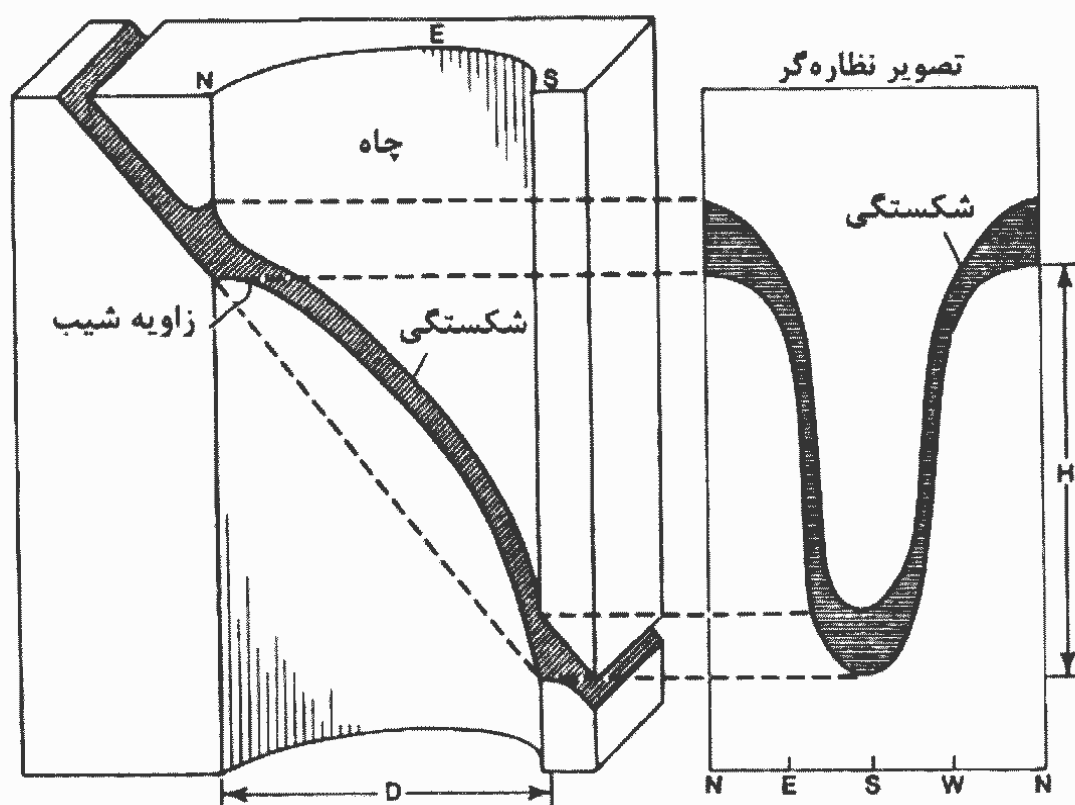
شکل ۱۱-۴۴ - تخلخل حفره‌ای در تصویر FMS



شکل ۱۱-۴۵ - تباین رنگی در فواصل سمتی شده و متخلخل در تصاویر FMS

یک ATV دارای یک فرستنده امواج صوتی (transducer) چرخنده است که امواج با فرکانس بالا تولید می‌کند. این فرستنده نقش گیرنده امواج صوتی را نیز بازی می‌کند. امواج صوتی با فرکانس بالا از دیواره چاه، بدون اینکه در آن دیواره رخنه کند، منعکس می‌شود و دیواره چاه را به صورت یک تباین صوتی ثبت می‌کند.

نمودار ATV استوانه‌ای است که در طول جهت شمالی باز و پهن گردیده است (شکل ۱۱-۴۶). در این شکل شیب یک شکستگی باز به طرف جنوب نشان داده شده است. تصویر سمت چپ به صورت سه بعدی وضعیت این شکستگی را در داخل چاه نشان می‌دهد.

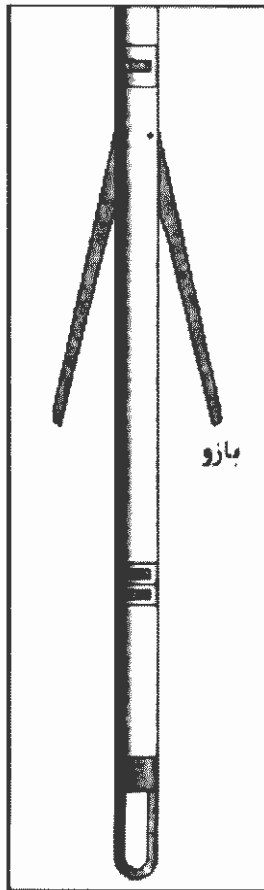


شکل ۱۱-۴۶ - نمای سه بعدی از یک شکستگی و تصویر آن توسط ATV. قطر چاه و H طول بخشی از شکستگی است که چاه را قطع نموده است

۱۱-۵ نمودار کالیپر (Caliper Log)

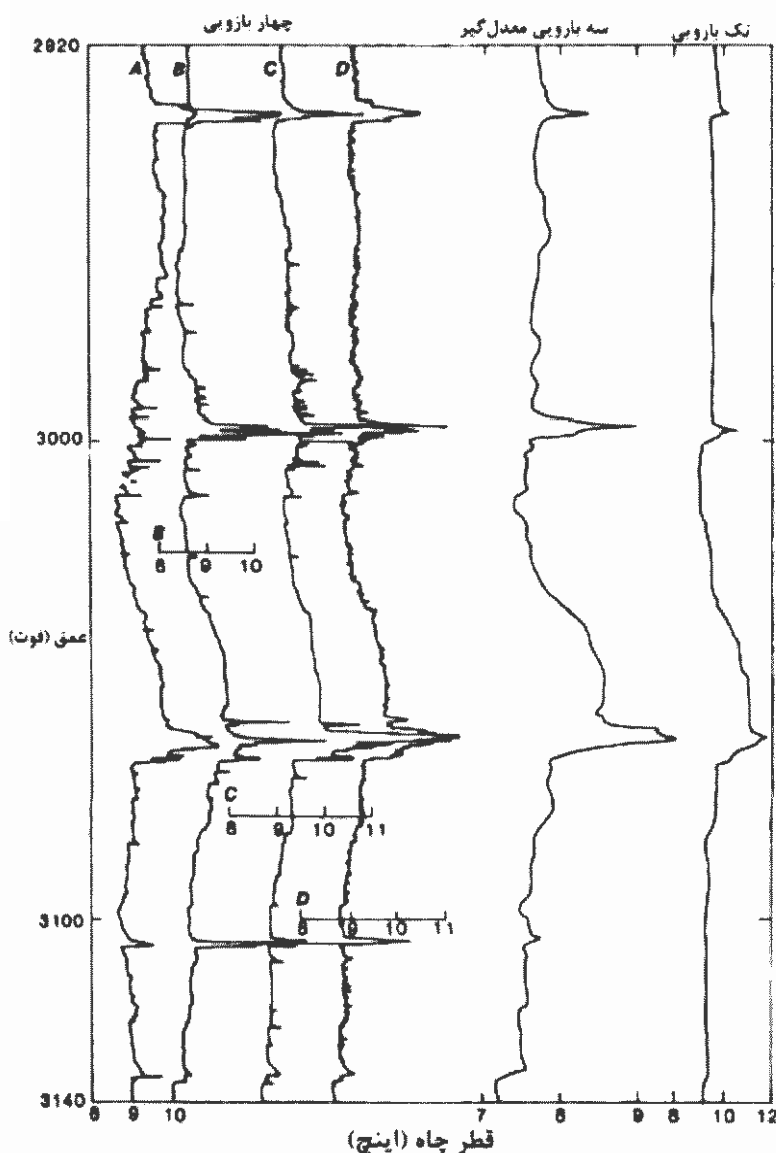
نمودار کالیپر، قطر چاه را اندازه می‌گیرد. به طور کلی نمودارهای کالیپر، بیشتر به منظور تصحیح نمودارهایی که از تغییرات قطر چاه متأثر می‌شوند و همچنین جهت فراهم نمودن اطلاعات درباره لیتولوژی سنگ‌های دیواره چاه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

چندین نوع نمودار کالیپر امروزه مورد استفاده هستند. یک نوع، مرکب از سه یا چهار بازوی متحرک فنی است. این ابزار در عمق چاه کاملاً پایین می‌آید سپس فنرها به طور خودکار یا الکتریکی آزاد شده و باعث تمرکز ابزار در چاه می‌شوند. با تغییر قطر چاه، بازوها باز و بسته می‌شوند. بازوهای متحرک به یک رئوسات متصلند که این رئوسات با تغییر قطر چاه، مقاومت مدار الکتریکی را تغییر می‌دهد و با اندازه‌گیری ولتاژ این مقاومت، نمودار کالیپر ثبت می‌شود. انواع دیگر ابزار کالیپر دارای سه فنر انعطاف‌پذیر است که به یک میله آهنربایی متصل می‌شوند. با باز و بسته شدن فنرها، میله آهنربایی در میان سیم‌پیچ حرکت کرده و تولید جریان الکتریکی می‌کند. شکل ۱۱-۴۷ این نوع ابزار و نمودار تولید شده را نشان می‌دهد. نوع سوم میکروکالیپر است. در این وسیله دو کابل کمکی به جای بازوها یا فنرهای قوسی شکل استفاده می‌شود. قطر چاه توسط حرکت این کابل‌ها تعیین می‌شود.



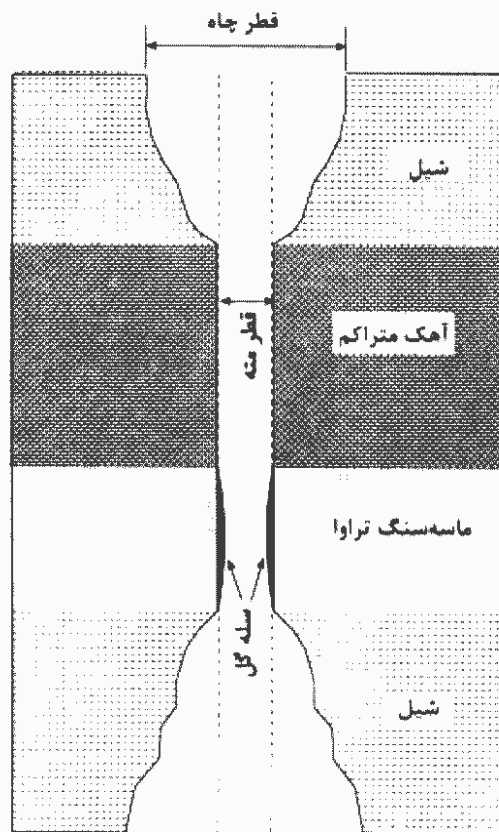
شکل ۱۱-۴۷ - تصویر یک ابزار کالیپر دو بازویی

انواع نمودار کالیپر، بر اساس چگونگی اندازه‌گیری، در شکل ۱۱-۴۸ نشان داده شده است. نوع چهار بازوی مستقل (four independent arms)، چهار اندازه‌گیری متفاوت را نشان می‌دهد و لذا قادر است تغییرات نامتجانس قطر چاه را نشان دهد. نوع سه بازویی که معدل قطر چاه را نشان می‌دهد و نوع تک بازویی که قطر چاه را صرفاً با یک بازو اندازه می‌گیرد.



شکل ۱۱-۴۸ - نمودارهای کالیپر چهار بازوی مستقل، کالیپر با سه بازوی معدل گیر قطر و تک بازو

شکل ۱۱-۴۹ تغییرات دیواره چاه را که توسط نمودار کالیپر ثبت می‌شود، نشان می‌دهد. بعضی سازندها سست بوده و سبب ریزش در چاه و افزایش قطر آن می‌شوند، در صورتی که قطر چاه در بعضی سازندها مانند سنگ آهک متراکم تغییر نمی‌کند. در سازندهای تراوا، سله گل تشکیل شده در نتیجه قطر چاه از قطر مته حفاری کمتر می‌شود.

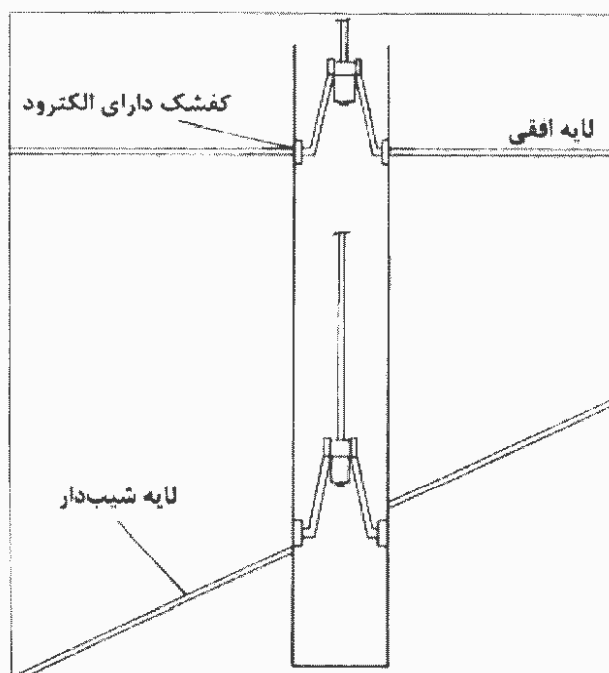


- استفاده‌های اولیه از نمودار کالپر عبارتند از:
- ۱ - محاسبه حجم سیمان مورد نیاز برای جداره‌گذاری
 - ۲ - تعیین دقیق قطر چاه برای تصحیح سایر نمودارها
 - ۳ - تعیین مکان مناطق نفوذپذیر که توسط سله گل مشخص شده‌اند

شکل ۱۱-۴۹ - شکل چاه در سازندهای متفاوت

۱۱-۶ شیب‌سنج (Dipmeter)

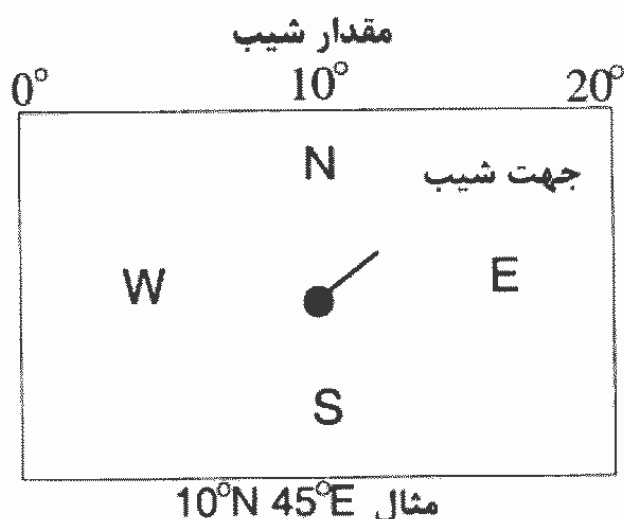
این ابزار برای تعیین امتداد و شیب لایه‌های حفر شده در چاه استفاده می‌شود. این موضوع در مطالعه چینه‌شناسی و عوارض ساختمانی مهم است. شیب‌سنج اطلاعاتی درباره مقدار و جهت شیب سازند ثبت می‌کند. چون زاویه شیب چاه از حالت عمود بررسی می‌شود، مقدار و امتداد انحراف چاه نیز مشخص می‌شود. وسیله‌ای که برای اندازه‌گیری شیب استفاده می‌شود دارای ۳



یا ۴ الکتروود ریزمقاومت تماسی است که در یک سطح عمود نسبت به دیوار چاه با فواصل مساوی هم قرار گرفته‌اند. هر مجموعه الکتروود یک نمودار الکتریکی جداگانه را ثبت می‌کند. توسط این منحنی‌ها می‌توان عمل تطابق نقاط یعنی نقاط دارای خصوصیات مشترک را انجام داد. اگر سطح طبقه‌بندی مشابه سطح سه الکتروود نباشد منحنی‌های جابجا شده و نسبت به هم در سطوح گوناگونی قرار می‌گیرند. شکل ۱۱-۵۰ این اصول را شرح می‌دهد.

شکل ۱۱-۵۰ - اساس ابزار نمودار شیب‌سنج

مقدار و چگونگی جابجایی نمودارها به راحتی با استفاده از نرم‌افزارهای خاصی تبدیل به اطلاعات مقدار و جهت شیب می‌شود. اشکال فلش مانند برای نمایش نمودار شیب‌سنجی بکار برده می‌شود. انتهای فلش مقدار شیب و خط فلش جهت شیب را نشان می‌دهد (شکل ۱۱-۵۱).

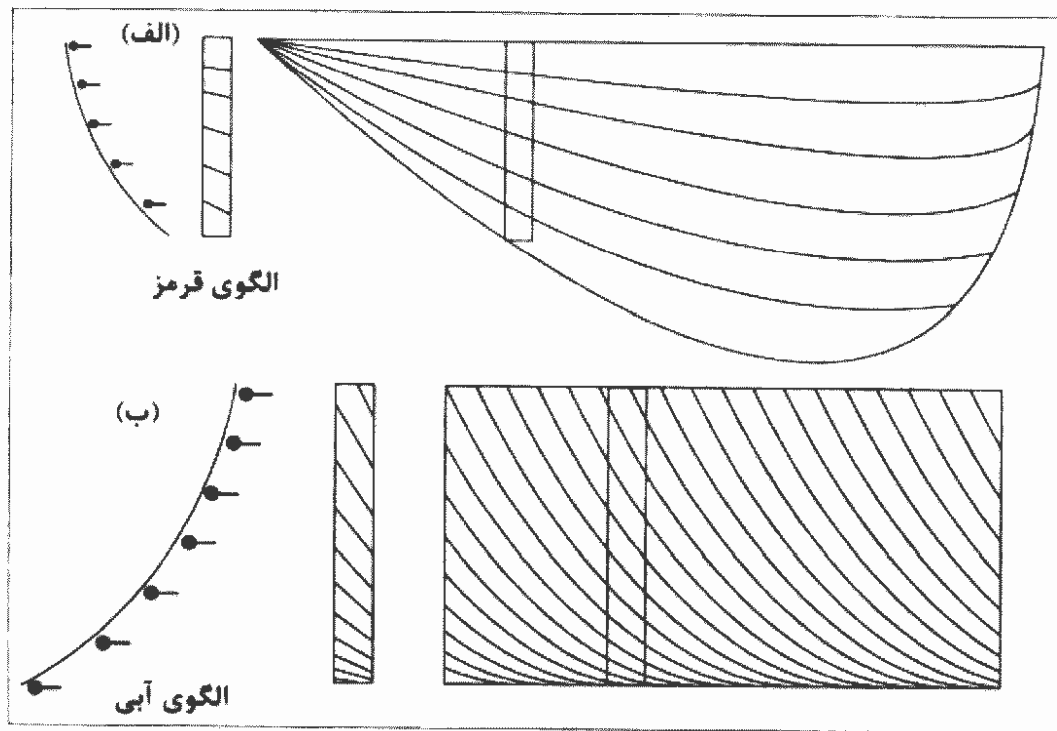


شکل ۱۱-۵۱ - چگونگی نمایش نتایج یک شیب‌سنج

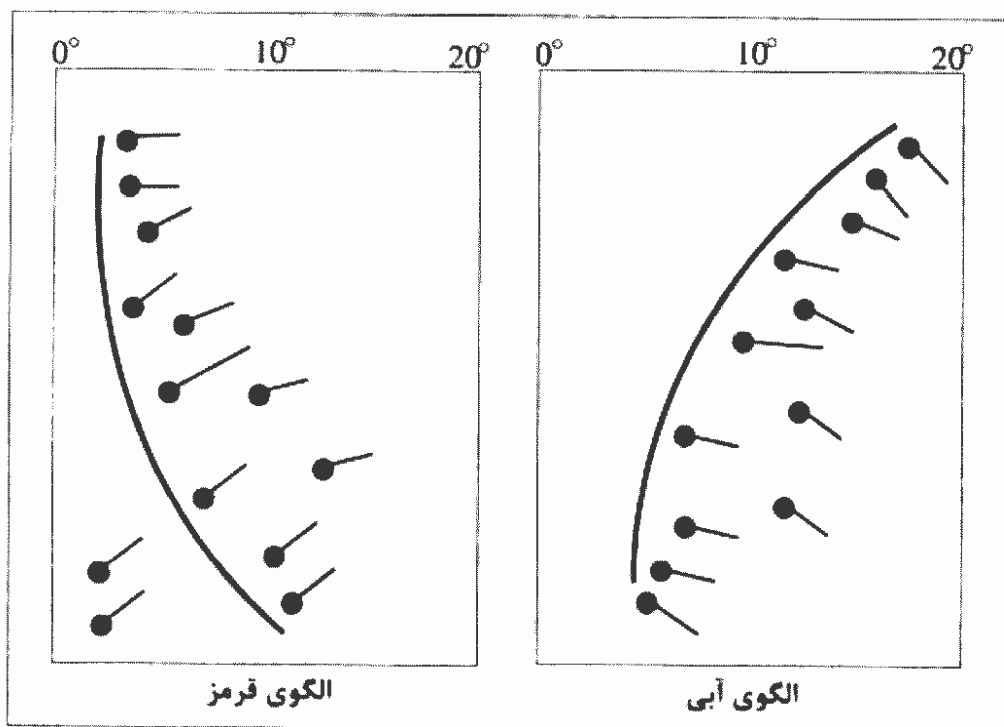
یکی از استفاده‌های بسیار مهم نمودار شیب‌سنج به دست آوردن یک تصویر عمومی از ساختمان زمین‌شناسی یک چاه اکتشافی است. اگر یک چاه اکتشافی از نظر اقتصادی غیر سودمند باشد بررسی شیب‌سنجی ممکن است چاه دیگری را نشان دهد که می‌تواند در یک مکان مقرون به صرفه ساختمان زمین‌شناسی حفر شود.

ابزارهای شیب‌سنج نه تنها شیب‌های تکتونیکی را مشخص می‌سازد، بلکه نوع با حدتفکیک بالا قادر است ساخت‌های رسوبی نظیر طبقه‌بندی مورب که در آن‌ها تغییر شیب در لایه‌ها وجود دارد را نیز مشخص کند (شکل ۱۱-۵۲). امروزه این نوع نمودارها به خوبی در تعبیر و تفسیر محیط‌های رسوبی بکار برده می‌شود.

در نمودارهای شیب‌سنجی، تغییرات شیب در چهار الگو، که با اسامی رنگ‌ها نامگذاری می‌شوند، مشخص می‌شوند. الگوی آبی نشانگر کاهش شیب به سمت پایین است (شکل ۱۱-۵۳)، الگوی قرمز نشانگر افزایش شیب به سمت پایین است، الگوی سبز زمانی است که تغییرات شیب با عمق وجود نداشته باشد و الگوی زرد نشانگر تغییرات بی‌قاعده شیب است.

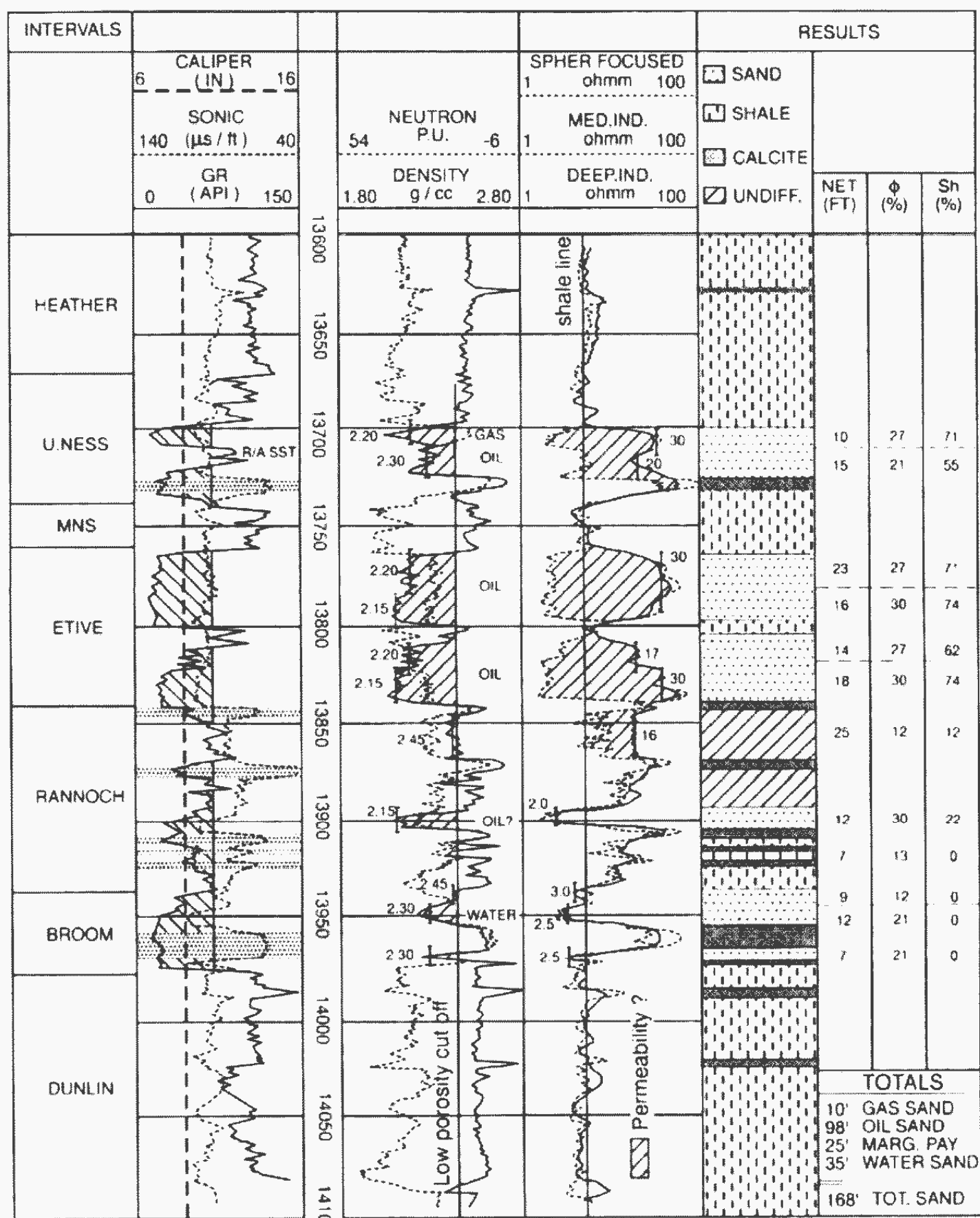


شکل ۱۱-۵۲ مثالی از تغییر شیب در داخل رسوبات، رسوبات پرکننده کانال (الف) و طبقه‌بندی مورب (ب)



شکل ۱۱-۵۳ - الگوی شیب در نمودارهای شیب‌سنج

در پایان، یک نمودار مرکب که در آن عمده نمودارهای بیان شده در فوق و نتایج ارزیابی آن‌ها نظیر لیتولوژی، ضخامت تولید، تخلخل و اشباع شدگی هیدروکربن آمده است، در شکل ۱۱-۵۴ نشان داده می‌شود. امروزه، تفسیر نمودارها با استفاده از کامپیوترهای سریع و نرم افزارهای پیشرفته بسیار سریع و مطمئن شده است.



شکل ۱۱-۵۴ - یک نمودار مرکب با نتایج ارزیابی شده نظیر لیتولوژی، ضخامت تولید، تخلخل و اشباع شدگی هیدروکربن