



# مدرسان شریف

## فصل اول

### «مبانی نمودارگیری»

#### مقدمه

اولین مطالعات چاه‌پیمایی منسوب به «مارسل و کنراد شلومبرژه» است که در سپتامبر ۱۹۲۷ برای اولین بار در محلی به نام «پشل برن» فرانسه، مقاومت ویژه طبقات را اندازه‌گیری کرده و تحت عنوان نمودارگیری الکتریکی ارائه دادند. در چاه‌پیمایی با توجه به شرایط چاه، تعدادی از پارامترهای فیزیکی مناسب، برای مطالعات زمین‌شناختی طبقات و نیز ارزیابی مشخصات پتروفیزیکی سنگ که به طور معمول روی نمونه‌های آزمایشگاهی نیز به دست می‌آیند، اندازه‌گیری می‌شوند.

به‌طور کلی هرگاه در صنعت نفت صحبت از نمودارگیری (چاه‌پیمایی) می‌شود، منظور ثبت هر خصوصیتی از سازندها نسبت به عمق توسط یک ابزار، درون چاه می‌باشد.

کدام مثال ۱: اولین لاگ رانده شده در دنیا کدام لاگ بوده است؟

- (۱) لاگ مقاومت الکتریکی (۲) لاگ القایی (۳) لاگ هسته‌ای (۴) لاگ صوتی

✓ پاسخ: گزینه «۱» اولین لاگی که در دنیا رانده شده، لاگ مقاومت الکتریکی می‌باشد.

#### روش‌های جمع‌آوری داده‌ها از طریق نمودارگیری

نمودارها به دو طریق متفاوت جمع‌آوری می‌شوند:

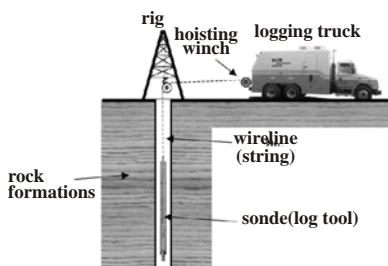
- نمودارگیری کابلی (wireline logging) - نمودارگیری همزمان با حفاری (logging while drilling)

#### نمودارگیری کابلی

سنتی‌ترین روش نمودارگیری، نمودارگیری کابلی است که در آن نمودارها، پس از اتمام عملیات حفاری تا یک عمق خاص، گرفته می‌شوند. معمولاً این نمودارها قبل از گذاشتن لوله‌ی جداری در هر عمق خاص گرفته می‌شوند. به نمودارهایی که قبل از گذاشتن لوله‌ی جداری گرفته می‌شوند، نمودارهای حفره باز (open hole) می‌گویند. البته گاهی ممکن است پس از گذاشتن لوله‌ی جداری، نمودارها گرفته شوند که به این نمودارها cased hole می‌گویند.

نمودارهای کابلی معمولاً به‌وسیله حسگرهایی که بر روی ابزار نصب شده‌اند، اندازه‌گیری‌ها را انجام می‌دهند. این ابزارها به‌وسیله قرقره در پشت کامیون مخصوص، به سطح آورده می‌شوند.

قرائت‌ها هر ۱۵ سانتی‌متر یک بار (نیم فوت) انجام می‌شوند. برای راندن نمودارهای کابلی، چاه تمیزشده و دستگاه پایین آورده می‌شود. معمولاً در انجام عملیات یک نمودار، ابزارهای مختلف نمودارگیری در کنار یکدیگر قرار می‌گیرند تا نمودار حاصل کاملاً ترکیبی از چند نمودار بوده و در وقت و هزینه صرفه‌جویی شود.



ابزار و دستگاه نمودارگیری

#### نمودارگیری همزمان با حفاری (LWD) یا (MWD) (measurement while drilling)

یکی دیگر از روش‌های اندازه‌گیری مشخصات سازند، نمودارگیری همزمان با حفاری است. از مزایای این روش می‌توان به دسترسی به ویژگی‌های سازند قبل از نفوذ عمیق سیال حفاری و نیز استفاده از این روش در چاه‌های انحرافی عمیق اشاره نمود. اما یکی از معایب این روش ریسک بالای آن است.



کدام روش نمودارگیری از چاه‌های افقی، از کدام روش نمودارگیری استفاده می‌شود؟

Slick line logging (۴)

CTL (۳)

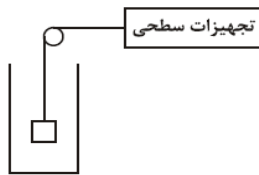
LWD (۲)

WL (۱)

پاسخ: گزینه «۲» ✓

بر اساس نحوه وارد کردن ابزار درون چاه، نمودارگیری را به دو دسته‌ی عمده‌ی Wireline logging و LWD (Logging while drilling) تقسیم‌بندی می‌کنیم.

در Wireline logging ابزار با طنابی به لایه‌ی مورد نظر درون چاه منتقل می‌شود. این نوع نمودارگیری پس از پایان حفاری انجام می‌شود و ابزار به خاطر وزن خود وارد چاه می‌شود.



در روش دوم، هنگام حفاری، ابزار را به همراه لوله‌های حفاری درون چاه می‌فرستند. از این روش علاوه بر نمودارگیری از لایه‌ها، پارامترهای حفاری نیز ثبت می‌شوند. به دلیل انتقال‌پذیری و کنترل‌پذیری آن، می‌توان در چاه‌های افقی از آن استفاده کرد. در CTL یا Coil tubing logging، ابزارها به وسیله‌ی Coil tubing به داخل چاه فرستاده می‌شوند. این لوله‌ها بسیار انعطاف‌پذیر بوده که به دور قرقه‌هایی پیچیده شده‌اند و به جای drill pipe استفاده می‌شوند.

Slick line یک رشته فولادی است که استحکام بیش‌تری دارد و فقط ابزار را نگه می‌دارد و نمی‌تواند اطلاعات را گذردهی کند. از این رشته فولادی در عملیات‌هایی استفاده می‌شود که ابزار، دارای حافظه داخلی باشد.

## اهداف چاه‌نگاری

به دلیل اینکه نمی‌توان به طور مستقیم لایه‌های زیرزمین را مورد بررسی قرار داد، همچنین مغزه‌گیری به طور پیوسته صرفه اقتصادی ندارد، پس تنها راه برای به دست آوردن مجموعه اطلاعات پیوسته درون چاه، لاگ است. همچنین عمق بیشتری را مورد اندازه‌گیری قرار می‌دهد. عمده اطلاعاتی که می‌توان از لاگ‌ها به دست آورد:

- تخلخل

- لیتولوژی (lithology)

- میزان اشباع آب ( $S_w$ )- مقاومت آب و سازند ( $R_p, R_w, \dots$ )

همچنین اطلاعاتی که از روی لاگ‌ها به دست می‌آیند را می‌توان به دو دسته کیفی و کمی تقسیم کرد:

۲- کمی (Quantitative)	۱- کیفی (Qualitative)
- تعیین تخلخل	- تعیین لیتولوژی
- تعیین اشباع آب	- ارتباط چینه‌های لایه‌ها (Stratigraphic Correlation)
- میزان ضخامت کلی مخزن	- تعیین زون‌های شکاف‌دار
- تعیین نفوذپذیری به طور غیرمستقیم از لاگ‌ها	- تعبیر و تفسیر محیط‌های رسوبی

## ترکیب سنگ‌ها

با تفسیر نمودارها، هم نوع کانی‌ها و میزان آن‌ها (قسمت جامد) و هم ماهیت و نسبت (تخلخل و اشباع) سیالات مشخص می‌شود. در چاه‌پیمایی معمولاً برای تمام سنگ‌ها، دو قسمت تشکیل‌دهنده در نظر می‌گیرند، خمیره (ماتریکس) و رس (شیل). این تقسیم‌بندی از یک طرف به دلیل جواب‌های فیزیکی متفاوتی است که از طریق روش‌های چاه‌پیمایی برای این دو به دست می‌آیند و از طرف دیگر تأثیر رس بر خواص فیزیکی سنگ‌های مخازن (نفوذپذیری، اشباع و غیره) است.

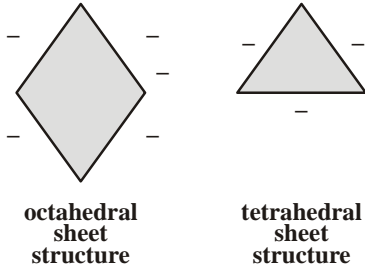
### خمیره (ماتریکس)

در چاه‌پیمایی مجموع قسمت‌های جامد تشکیل‌دهنده سنگ‌ها (دانه‌های اصلی و سیمان) به جز شیل را خمیره (ماتریکس) می‌نامند. هرگاه تمام قسمت‌های تشکیل‌دهنده سنگ از یک کانی تشکیل شده باشد، به آن خمیره ساده (مانند کلسیت و کوارتز) و در صورتی که دانه‌های اصلی و سیمان از کانی‌های متفاوتی باشند، به آن خمیره مرکب (مانند ماسه کوارتزی با سیمان آهکی) می‌گویند. زمانی که در خمیره، رس وجود نداشته باشد، آن را خمیره تمیز (Clean Matrix) می‌نامند.

**شیل، سیلت و رس**

شیل یک نوع سنگ رسوبی دانه ریز است که از تراکم رس و سیلت ایجاد می‌شود. کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها، کانی‌های فیلیتی آلومینوسیلیکاته آبدار هستند.

سیلت‌ها ذرات رسوبی با قطری در محدوده  $\frac{1}{256}$  میلی‌متر تا  $\frac{1}{16}$  میلی‌متر هستند. این ذرات دارای محتوای زیادی کانی رس به همراه مقدار کمی کوارتز، فلدسپار و کانی‌های سنگین مثل میکا می‌باشند.



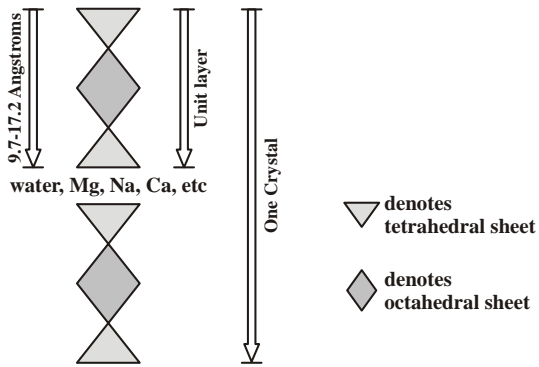
ساختار کانی‌های رسی

رس به ذرات رسوبی با قطر کمتر از  $\frac{1}{256}$  میلی‌متر می‌گویند. (دقت شود که رس (مفهوم اندازه) بایستی متفاوت از کانی رسی (مفهوم جنس) در نظر گرفته شود. این ذرات دارای محتوای زیادی کانی رس (سیلیکات‌های آبدار همراه با آلومینیوم) می‌باشند). کانی‌های رسی معمولاً از واحدهای سازنده‌ایی که به دو شکل (Octahedral) و (Tetrahedral) دیده می‌شوند، تشکیل شده‌اند و در سطح رس‌ها بار منفی وجود دارد که باعث جذب بار مثبت به خود می‌شوند.

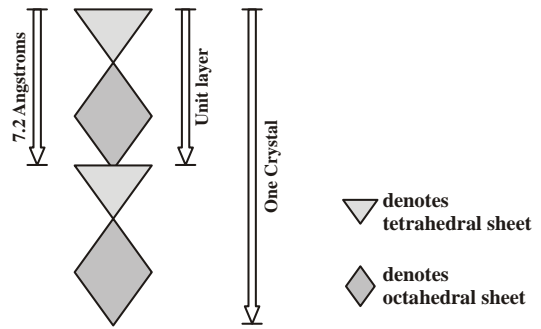
معمولاً این واحدهای سازنده به یکدیگر متصل شده و ساختارهای بزرگ‌تری را تشکیل می‌دهند. ساختارهای بزرگ‌تر در کنار یکدیگر قرار گرفته (متصل نمی‌شوند)، بنابراین فضای خالی در بین آنها ایجاد می‌شود. به این دلیل ساختار رس‌ها حالت لایه‌ای به خود می‌گیرد و به راحتی از این فضاهای خالی، قابل شکستن است. به این خاصیت رس‌ها، **feasility** می‌گویند. با توجه به خاصیت کانی‌های رسی، هر سنگی از کانی‌های رسی تشکیل شده باشد مثل شیل، دارای این خاصیت (تورق پذیری) می‌باشد.

کانی‌های رسی بر اساس نحوه‌ی کنار یکدیگر قرار گرفتن واحدهای سازنده به انواع مختلفی تقسیم می‌شوند که عبارت‌اند از:

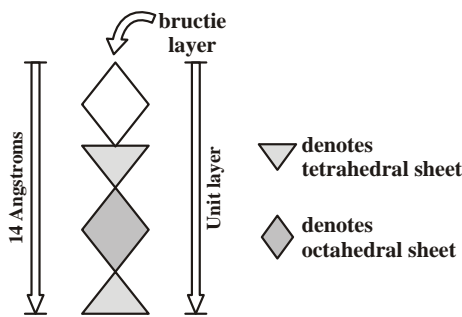
- ۱- کائولینیت ۲- اسمکتیت ۳- ایلیت ۴- کلریت



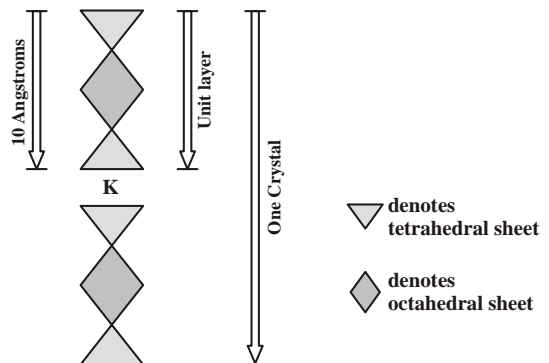
ساختار اسمکتیت



ساختار کائولینیت

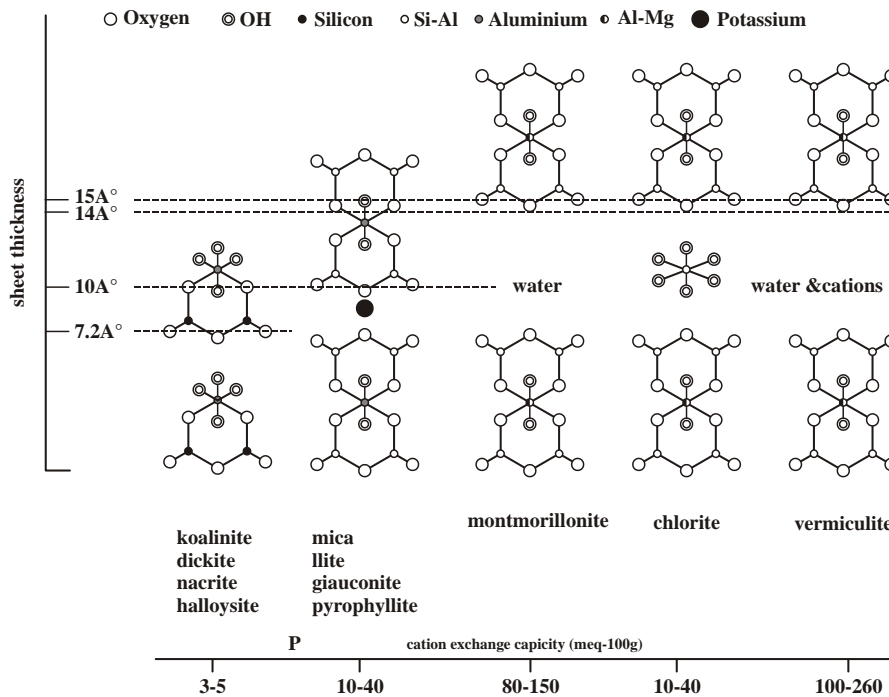


ساختار ایلیت



ساختار ایلیت

شکل زیر به صورت جزئی تر این تقسیم بندی را نشان می دهد.



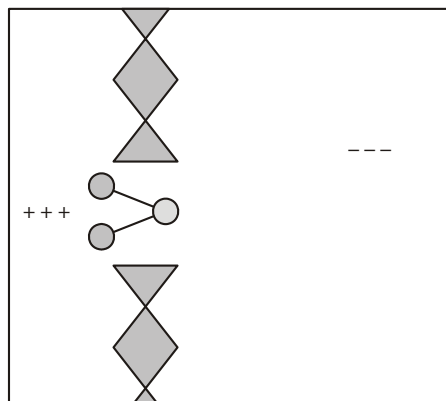
ساختار انواع رس ها

بنابراین از نظر کانی شناسی چندین گروه از کانی های رسی را بر حسب ضخامت ورقه یا فاصله شبکه بلوری آنها می توان مشخص کرد. عملاً در طبیعت کمتر به یک کانی ثابت رسی در سنگ بر می خوریم و معمولاً درصد متغیری از سیلت ها یا کربنات ها همراه این کانی ها هستند.

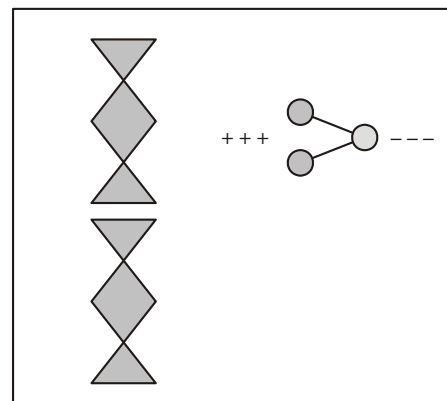
رس ها (لفظ کانی رسی) معمولاً دارای محتوای هیدروژن آبی بالایی هستند که بر نمودارها تأثیر می گذارد. دلایل وجود هیدروژن عبارتند از :

الف) در یون های هیدروکسیل (OH) موجود در واحدهای سازنده ب) در آب موجود جذب شده در بین لایه ها

آب، به دلیل باردار بودن سطح رس می تواند جذب آن شود، همچنین سطح رس ها دارای بار منفی است. اگر آب با pH پایین (شوری بالا) در تماس با رس قرار گیرد، بار مثبت آب تمایل به خنثی نمودن بار منفی بین لایه ها خواهد داشت، اما اگر آب دارای شوری کم (pH بالا) باشد، تعداد کاتیون های موجود آزاد در آب به اندازه ای نیست که جذب بار منفی شود. اگر آب با شوری بالا در بین لایه ها قرار گیرد، به دلیل بزرگتر بودن مولکول آب نسبت به حجم فضای بین لایه ها، باعث منبسط شدن فضا و در نتیجه متورم شدن لایه های رسی می شود.



جذب آب در بین لایه های رسی



مولکول آب و ساختار رس

آرایش دانه های ریز رسی بر حسب درجه تراکم سنگ، موجب بر جای گذاشتن فضاهای خالی کم و بیش فراوان و مهم می شوند. این خلل و فرج به طور معمول از آب پر می شوند، ولی گاهی نیز هیدروکربورهای جامد، مایع یا گازی در آن جا می گیرند. مشخصات چاه پیمایی رس ها، عمدتاً وابسته به ترکیب درجه تخلخل و درجه اشباع آنها از هیدروکربورهاست. به این ترتیب وجود رس در سنگ ها بر حسب درصد و مشخصات آنها، روی دستگاه های اندازه گیری اثر می گذارند.

## سیالات

آرایش دانه‌ها در سنگ، عموماً فضاهای خالی در آن باقی می‌گذارد که توسط سیالات اشغال می‌شوند. درصد این سیالات در سنگ وابسته به درصد فضاهای خالی است که تخلخل نامیده می‌شود.

به جز آب، سیالاتی که در فضای خالی قرار می‌گیرند، یک ویژگی مشترک با ماتریکس (خمیره) سنگ دارند و آن هدایت کم الکتریکی است. اما آب با توجه به نمک‌های حل‌شده در خود، دارای خاصیت هدایت الکتریکی بالایی است. بنابراین، اندازه‌گیری مقاومت ویژه سنگ‌ها و آب سازند، امکان تعیین درصد آب موجود در سنگ را فراهم ساخته و از آنجا با در دست داشتن تخلخل می‌توان درصد هیدروکربورهای موجود در خلل و فرج را به دست آورد. با توجه به توضیحات داده شده نیاز است بعضی از مفاهیم به صورت مجزا بررسی شوند.


## تخلخل

همان‌طور که می‌دانیم تخلخل بخشی از حجم سنگ می‌باشد که توسط ذرات جامد، اشغال نشده است. انواع مهم تخلخل عبارت‌اند از: الف) تخلخل کل (total porosity,  $\phi_t$ ): تخلخل کل شامل تمام فضای خالی اعم از حفره‌ها، کانال‌ها، شکاف‌ها می‌شود.

$$\phi_t = \frac{V_t - V_s}{V_t} = \frac{V_p}{V_t}$$


که در رابطه فوق:  $V_p$  حجم فضای خالی،  $V_s$  حجم قسمت جامد و  $V_t$  کل حجم سنگ است. تخلخل کل، مجموع دو مؤلفه می‌باشد:  $\phi_t = \phi_1 + \phi_2$  که  $\phi_1$  تخلخل اولیه (بین دانه‌ای یا بین بلوری) و تابعی از شکل، اندازه و آرایش ذرات جامد است.  $\phi_2$ ، تخلخل ثانویه بوده که متشکل از حفره‌های ایجادشده در اثر انحلال ماتریس یا شکاف‌های ایجادشده در اثر نیروهای مکانیکی است.  $\phi_2$  اغلب در سنگ‌های شیمیایی مشاهده می‌شود.

ب) تخلخل به هم پیوسته (interconnected porosity,  $\phi_{connect}$ ): این تخلخل به فضاهای خالی اطلاق می‌شود که در ارتباط با یکدیگر می‌باشند. برای درک این موضوع اگر سنگ پا (Pumice) در نظر گرفته شود،  $\phi_t = 50\%$  است در حالی که  $\phi_{connect} = 0$  است و علت آن این است که فضاهای خالی از یکدیگر ایزوله‌اند.

ج) تخلخل پتانسیل (potential porosity,  $\phi_{pot}$ ): این تخلخل آن قسمتی از تخلخل به هم پیوسته ( $\phi_{connect}$ ) است که قطر کانال‌های وصل‌کننده فضاهای خالی و حفره‌ها به اندازه‌ای بزرگ می‌باشد که به سیال اجازه عبور می‌دهد. (بزرگتر از  $50 \mu m$  برای نفت و  $5 \mu m$  برای گاز)  نکته ۱:  $\phi_{pot}$  ممکن است بسیار از  $\phi_{connect}$  کوچکتر باشد. برای مثال رس یا شیل دارای تخلخل به هم پیوسته بالایی هستند. (حدود  $50\%$  درصد زمانی که فشرده شده‌اند و حدود  $90\%$  درصد برای رسوبات تازه نهشته‌شده و غیرمتراکم) اما به دلیل کانال‌ها و حفره‌های کوچک، چرخش سیال انجام نمی‌شود.

د) تخلخل مؤثر ( $\phi_e$ , effective porosity):

این تخلخل به طور خاص در تحلیل‌های نمودارگیری به کار برده می‌شود و به تخلخلی گفته می‌شود که در اختیار سیالات آزاد (free fluids) قرار دارد. بنابراین تخلخل به هم ناپیوسته (ایزوله) و حجمی که توسط آب موجود در رس‌ها اشغال شده است (Clay bound water)، از این نوع تخلخل نیستند.

 مثال ۳: کدام گزینه صحیح است؟

$$\phi_{eff} \leq \phi_{pot} \leq \phi_{conn} \leq \phi_{tot} \quad (2)$$

$$\phi_{pot} \leq \phi_{eff} \leq \phi_{conn} \leq \phi_{tot} \quad (1)$$

$$\phi_{eff} \leq \phi_{conn} \leq \phi_{pot} \leq \phi_{tot} \quad (4)$$

$$\phi_{pot} \leq \phi_{conn} \leq \phi_{eff} \leq \phi_{tot} \quad (3)$$

پاسخ: گزینه «۲» ابتدا به تعریف انواع تخلخل می‌پردازیم:

۱- Total porosity (تخلخل کل) ( $\phi_{tot}$ )

$$\phi_{tot} = \frac{V_{tot} - V_{solid}}{V_{tot}} = \frac{V_p}{V_{tot}}$$

به نسبت فضای خالی موجود در سنگ به کل حجم سنگ، تخلخل کل می‌گویند.

۲- Interconnected porosity (تخلخل به هم پیوسته) ( $\phi_{conn}$ )

$$\phi_{conn} = \frac{V_{p,connect}}{V_{tot}}$$

به نسبت حجم متخلخل به هم پیوسته (مرتبط) به کل حجم سنگ، تخلخل به هم پیوسته گویند.



# مدرس‌ان شریف

## فصل دوم

### «پتانسیل خودزا (SP) Spontaneous Potential»

#### مقدمه

گفته شد یکی از ویژگی‌های مهم اندازه‌گیری شده در نمودارگیری، خاصیت الکتریکی است. این اندازه‌گیری‌ها مربوط به مقاومت ویژه الکتریکی (در فصل مقاومت توضیح داده خواهد شد) و ولتاژهای خودزای ایجاد شده است. این ولتاژها نتیجه‌ی واکنش سیال درون چاه و سازند دارای آب سازند می‌باشد. بنابراین برای بیان این نمودارها نیاز به توضیحات مقدماتی پیرامون مقاومت ویژه است که ابتدا این توضیحات ارائه می‌شوند.

#### مفهوم مقاومت ویژه الکتریکی کل (Bulk resistivity)

مقاومت ویژه الکتریکی، خاصیتی از مواد است که برخلاف مقاومت الکتریکی که به هندسه ماده بستگی دارد، تنها به ماهیت ماده بستگی دارد.

$$V = rI$$

قانون اهم:

رابطه فوق نشان می‌دهد که جریان عبوری  $I$  از یک ماده دارای مقاومت  $r$  متناسب با اختلاف پتانسیل دو سر جریان است. قانون کلی‌تر ماکسول

$$\bar{J} = \sigma \bar{E}$$

به صورت مقابل است:

که در آن  $\bar{J}$  چگالی جریان (برداری)،  $\bar{E}$  میدان الکتریکی برداری و ثابت تناسب  $\sigma$  رسانندگی ماده است. مقاومت ویژه، عکس رسانندگی تعریف می‌شود و

$$R = \frac{1}{\sigma} = \text{مقاومت ویژه}$$

یک خاصیت ذاتی ماده است.

مطابق آزمایشات الکتریکی زمانی که به دو سر یک قطعه با جنس خاص که دارای خاصیت هدایت الکتریکی است، اختلاف پتانسیل اعمال می‌شود، مقاومتی در برابر جریان عبوری از آن ایجاد می‌شود که طبق آزمایشات، این مقاومت با طول نمونه ( $r \propto L$ ) و با عکس سطح مقطع عبوری نمونه

( $r \propto \frac{1}{A}$ ) متناسب است، بنابراین، برای تبدیل این تناسب به تساوی، از ثابت استفاده می‌شود که این ثابت همان عکس ثابت رابطه‌ی ماکسول است.

$$r = R \frac{L}{A}$$

$R$ ، مقاومت ویژه الکتریکی  $T$  نامیده شده، اگر  $L(m)$ ،  $A(m^2)$  و  $r$  اهم ( $\Omega$ ) باشد، واحد  $R$ ، اهم متر مربع بر متر ( $\frac{\Omega m^2}{m}$ ) یا اهم متر ( $\Omega \cdot m$ ) می‌باشد.

همان‌طور که قبلاً نیز اشاره شد خاصیت رسانندگی به دو صورت الکترولیت و الکترونیک است. رسانندگی الکترولیتی به سبب وجود نمک‌های محلول در مایع مثل آب است و رسانندگی الکترونیکی در فلزات مشاهده می‌شود.

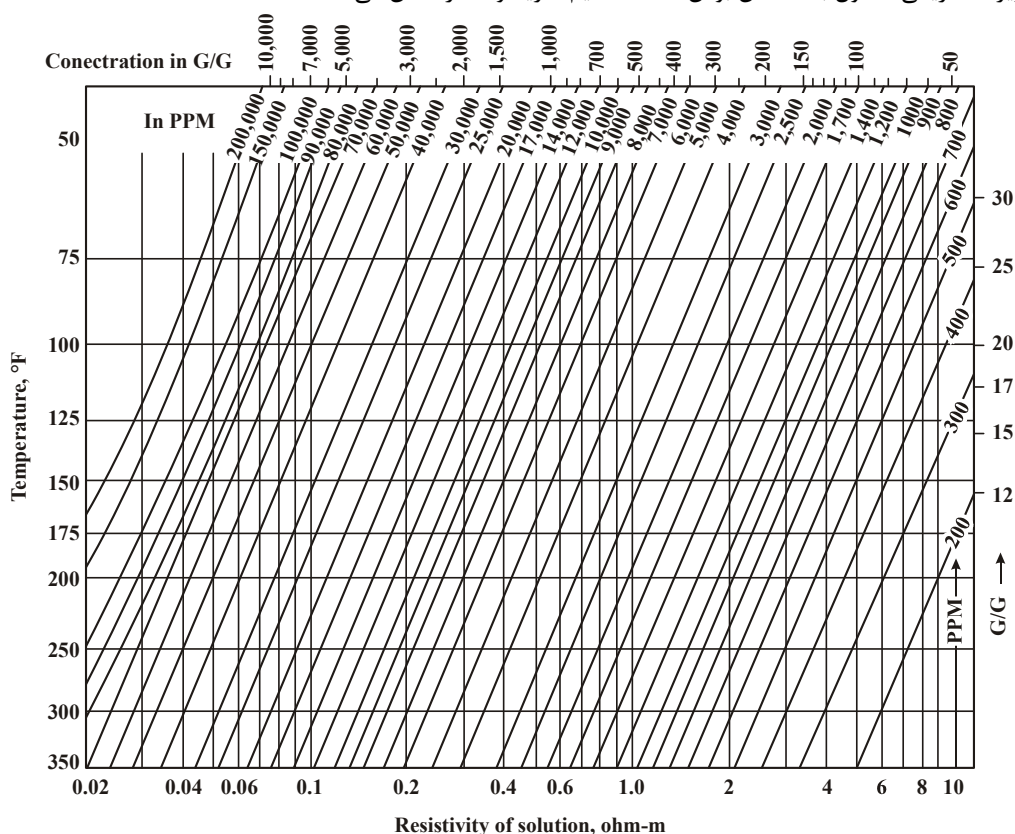


جدول زیر مقاومت ویژه الکتریکی را برای چند ماده نشان می‌دهد.

Material	Resistivity (ohm-m)
Marble	$5 \times 10^7 - 10^9$
Quartz	$10^{12} - 3 \times 10^{14}$
Petroleum	$2 \times 10^{14}$
Distilled water	$2 \times 10^{14}$
Saltwater (15°C):	
2kppm	3.4
10	0.72
20	0.38
100	0.09
200	0.06
Typical formations	
Clay/shale	2-10
Salt water sand	0.5-10
Oil sand	$5 - 10^3$
"Tight" limestone	$10^3$

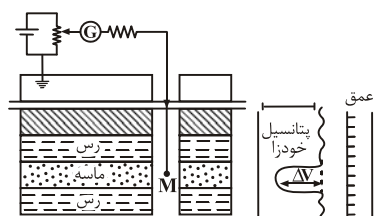
#### مقاومت ویژه الکتریکی برای مواد مختلف

شکل زیر، مقاومت ویژه الکتریکی محلول با مشخص بودن غلظت سدیم کلرید و دما را نشان می‌دهد.



تعیین مقاومت ویژه الکتریکی محلول با مشخص بودن غلظت نمک و دما

### تعریف پتانسیل خودزا و عوامل ایجاد آن



نمودار پتانسیل خودزا

برای اولین بار در سال ۱۹۲۸، شلمبرژه پدیده پتانسیل خودزا را در داخل چاه‌ها کشف کرد. منحنی نمودار پتانسیل خودزا (SP)، ثبت اختلاف پتانسیل بین یک الکتروود متحرک در چاه و یک الکتروود مستقر در سطح زمین در مقابل عمق بوده و واحد مورد استفاده نیز میلی‌ولت است. به عبارت دیگر این پتانسیل در اثر عدم تقارن بارهای موجود در نقاط مختلف زمین ایجاد می‌شود.

دلایل ایجاد پتانسیل خودزا را می‌توان پدیده‌های زیر دانست:

الف) الکتروسینتیک یا الکتروفیلتراسیون ( $E_k$ ): هنگامی که الکترولیت به محیط متخلخل غیرفلزی نفوذ می‌کند.

ب) پتانسیل الکتروشیمیایی ( $E_c$ ): زمانی که دو سیال دارای شوری‌های متفاوت در تماس مستقیم با یکدیگر قرار می‌گیرند یا به وسیله‌ی یک غشای شبه‌تراوا (Semi-permeable) مثل شیل جدا می‌شوند.

حال هر کدام از این موارد به‌صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرند.

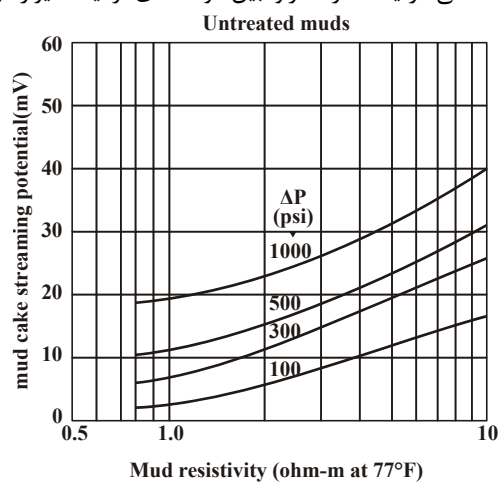
### الف) پتانسیل الکتروسینتیک

پتانسیل الکتروسینتیک زمانی ایجاد می‌شود که تراویده‌ی (فیلتره‌ی) گل به دلیل اختلاف فشار بین ستون گل و سازند، وارد سازند می‌شود. پس از نفوذ فیلتره، پتانسیل الکتروسینتیک در این حالت‌ها ایجاد می‌شود: (۱) در برابر اندود گل به‌جامانده در مقابل لایه‌ی تراویده (۲) در برابر لایه‌ی تراویده که مورد نفوذ قرار گرفته (۳) در برابر لایه‌های شیلی.

پتانسیل الکتروسینتیک در برابر اندود گل عبارت است از:

$$E_{k_{mc}} = k_1 (\Delta P)^y \quad \text{بر حسب (mv)}$$

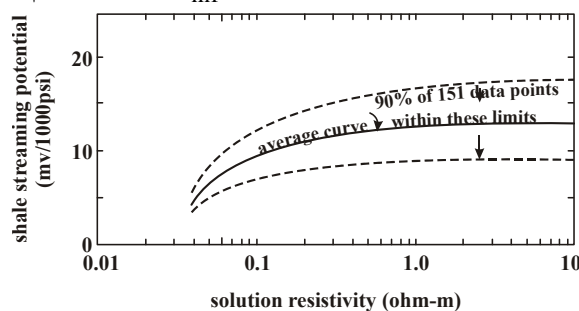
که  $0.9 \leq y \leq 0.57$  بوده و  $\Delta P$ ، اختلاف فشار اعمالی در یک سازند تراوا بین دو نقطه‌ی نزدیک دیواره و حوالی آن است.



پتانسیل الکتروسینتیک در برابر اندود گل

در سازندهای شیلی هم که دارای تراوایی کافی باشند، به طوری که اجازه‌ی عبور گل حفاری را بدهند، پتانسیل الکتروسینتیک به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$E_{k_{sh}} = k_2 \Delta P \quad \text{بر حسب (mv)} ; k_2 = -0.018 (R_{mf})^{1/3}$$

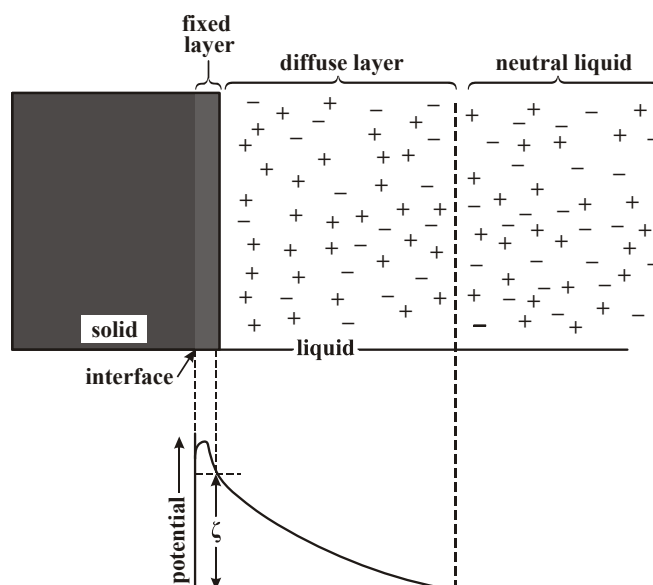


پتانسیل الکتروسینتیک در برابر لایه‌ی شیلی

**نکته:** با توجه به تراوایی بسیار پایین اندود گل که در برابر لایه‌های تراوا تشکیل می‌شود، بیش‌تر افت‌فشار بین ستون گل و سازند به‌خاطر اندود گل است، بنابراین پتانسیل الکتروسینتیک در برابر لایه‌های تراوا؛ برابر با همان پتانسیل الکتروسینتیک اندود گل می‌باشد.

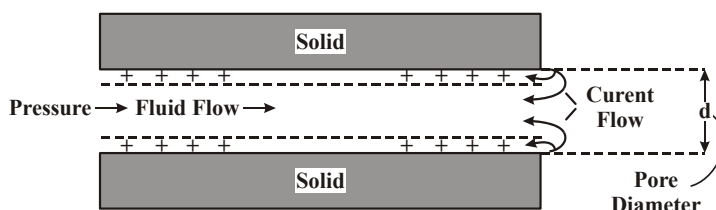
یکی دیگر از دلایل توجیه پتانسیل الکتروسینتیک (علاوه بر اختلاف فشار مورد نیاز برای نفوذ) بحث بارهای پخش‌شده در سطح جامد و مایع است. بارهای سطح جامد، با بارهای موجود در مایع خنثی می‌شوند. مثلاً در رس‌ها بار مثبت مایع جذب بار منفی سطح می‌شود. در این صورت در محل تماس جامد و مایع یک سطح ثابت غیرمتحرک (Fixed layer) ایجاد می‌شود. درست بعد از این سطح، لایه‌ی دیگری از مایع وجود دارد که بارهای مثبت در آن قسمت (نسبت به قسمتی از مایع که از سطح جامد دورتر است) به صورت نسبی بیشتر است. از طرفی این لایه متحرک است و در نهایت قسمتی از مایع وجود دارد که از نظر الکتریکی خنثی می‌باشد. شکل زیر، این لایه‌ها و مقدار پتانسیل ایجادشده را نشان می‌دهد. مقدار پتانسیل در لبه‌ی داخلی لایه‌ی متحرک باردار (diffuse layer)،  $\zeta$  (zeta potential) نامیده می‌شود.





توزیع بارها و پتانسیل در سطح تماس جامد - مایع

شکل زیر، پتانسیل ایجادشده در یک استوانه را نشان می‌دهد. اعمال یک افت فشار در دو سر استوانه باعث ایجاد جریان در آن می‌شود. از طرفی مایع، درون diffuse layer (دارای بار مثبت اضافی) حرکت می‌کند. بنابراین با ایجاد این بار، پتانسیل در طول لوله ایجاد می‌شود که در نتیجه جریان به داخل لوله برگشته و باعث افت فشار می‌شود.



جریان برگشتی به داخل محیط باعث تلاطم و افت فشار بیشتر محیط شده که بایستی اختلاف فشار بیشتر در دو سر لوله برای جریان سیال فراهم شود.

**نکته ۲:** در حالت کلی اگر اختلاف فشار زیاد باشد، (گل‌های دارای وزن مخصوص بالا) پتانسیل الکتروسینتیک اهمیت می‌یابد، ولی در حالت عادی در مقایسه با پتانسیل الکتروشیمیایی قابل اغماض است.

**مثال ۱:** از مؤلفه الکتروسینتیک SP در کدام موارد نمی‌توان صرف نظر کرد؟

- (۱) سازند تمیز و متخلخل - گل حفاری سنگین  
 (۲) سازند غیرمتخلخل - گل حفاری سبک  
 (۳) سازند غیرمتخلخل - گل حفاری سنگین  
 (۴) سازند تمیز و غیرمتخلخل - گل حفاری سبک

**پاسخ:** گزینه «۱» SP دارای منشأ الکتروسینتیک است که ناشی از اختلاف فشاری است که گل حفاری در اثر تراویده شدن در دیواره بوجود می‌آورد که در اکثر موارد از آن چشم‌پوشی می‌شود. ولی در مواردی که گل حفاری مورد استفاده سنگین باشد و سازند تمیز و متخلخل باشد، قابل اغماض نیست.

### (ب) پتانسیل الکتروشیمیایی

همان‌طور که اشاره شد به سبب تفاوت شوری در دو سیال در مجاورت یکدیگر یا جداسدن سیالات به‌وسیله‌ی غشای شبه‌تراوا (شیل) ایجاد می‌شود. (دو سیال مثل گل حفاری و آب سازند). پتانسیل الکتروشیمیایی به عوامل زیر بستگی دارد:

- لیتولوژی، که اغلب به عنوان یک عامل فرعی در نظر گرفته می‌شود.
- وجود رس به صورت طبقات در برگزیده سنگ مخزن و یا پراکنده در آن.
- تخلخل و درجه تراکم (تراوایی) سنگ.
- درجه شوری مایعات موجود در سازند و چاه

**نکته ۳:** عموماً پدیده قوی‌تر دارای منشأ الکتروشیمیایی بوده و آن را به عنوان عامل اصلی پتانسیل خودزا می‌پذیرند.



# مدرس‌ان شریف

## فصل سوم

### «نمودارهای الکتریکی - مقاومت ویژه»

#### رسانندگی الکتریکی

رسانندگی الکتریکی، خاصیتی از اجسام است که امکان عبور جریان الکتریسیته را در آن فراهم می‌کند. رسانایی الکتریکی در سنگ دو منشأ دارد:

۱- ویژگی سنگ که کانی رسنا داشته باشد. ۲- رسانایی کترولیت که به مقاومت سیال سازند و سیال حفاری مرتبط است.

عوامل مؤثر بر رسانایی (یا مقاومت) سنگ عبارتند از:

- ۱- درصد رس‌های رسنا و کانی‌های رسنای الکتریکی ۲- مقدار و شکل هندسی خلل و فرج (تخلخل بیشتر رسانایی را افزایش می‌دهد، زیرا تخلخل را سیال پر می‌کند). ۳- میزان اشباع آب (هرچه میزان اشباع آب ( $S_w$ ) بیشتر باشد، مقاومت کمتر می‌شود). ۴- هرچه سیال شورتر باشد، رسانایی آن بیشتر است.
- ۵- افزایش دما باعث می‌شود مقاومت سنگ کاهش یابد.

سنگ‌های زیر دارای مقاومت بالایی هستند:

- ۱- سنگ‌های غیرمتخلخل مثل سنگ آذرین، دگرگون و تخییری.
- ۲- سنگ متخلخل که حاوی آب شیرین است.
- ۳- سنگ متخلخل که اشباع از هیدروکربن است.

#### مقاومت ویژه

مقاومت ویژه که تعیین آن مبنای محاسبه درجه اشباع است، با استفاده از روش‌های مختلف به دست می‌آید. اما از هر دستگاهی برای این کار استفاده می‌شود، مبنای کار یکسان دارد.

یک فرستنده سیگنالی را به داخل سازند می‌فرستد. گیرنده‌ای که در فاصله مشخص از چشمه انتشار سیگنال واقع شده عکس‌العمل سازند روی سیگنال فرستاده شده را ثبت می‌کند.

**نکته ۱:** در این دستگاه‌ها هر چقدر فاصله گیرنده و فرستنده و یا بازه دستگاه بزرگتر باشد، شعاع بررسی افزایش یافته و برعکس جداسازی قائم کاهش می‌یابد.

با تغییر بازه می‌توان مقاومت ویژه زون مورد نظر را اندازه‌گیری کرد. بر اساس بازه و در نتیجه شعاع بررسی، سوندها به صورت زیر تقسیم می‌شوند.

۱- **دستگاه بزرگ بازه (Long-Spacing Device):** که به دلیل بازه بزرگتر و در نتیجه شعاع بررسی بیشتر، کمتر تحت تأثیر گل حفاری و زون‌های تراویده و انتقالی قرار می‌گیرد. این دستگاه‌ها مقاومت ویژه‌هایی کم و بیش نزدیک به مقدار  $R_t$  را می‌دهند. بعضی از دستگاه‌های بزرگ بازه عبارتند از:

- ES (Electrical survey): روش پیمایش الکتریکی چه در حالت آرایش نرمال و چه در حالت آرایش جانبی الکترودها

- IL (Induction log): لاگ القایی

- LL (Laterologs): لترفلاگ

- SFL (Spherically focused log): لاگ متمرکز کروی

۲- **دستگاه کوچک بازه (Short Spacing Devices):** که در آن الکترودها بر روی بالشتک قرار گرفته و روی دیواره می‌چسبند، به این ترتیب عملاً اثر چاه بر اندازه‌گیری حذف می‌شود. ولی کبره گل می‌تواند بر مقادیر خوانده‌شده، تأثیر بگذارد. مقاومت ویژه خوانده‌شده توسط این دستگاه‌ها در سنگ‌های متخلخل، بازتاب زون تراویده (invaded) است که مقاومت ویژه‌ای نزدیک به  $R_{XO}$  را نشان می‌دهند.

بعضی از دستگاه‌های کوچک بازه عبارتند از:

- ML (Micro log): میکرو لاگ، چه در حالت نرمال و چه در حالت جانبی
- MLL (Micro latero log): میکرولاترولاگ نبایستی با میکرو لاگ ML اشتباه گرفته شود.
- PL (Micro proximity log)
- MSFL (Micro spherically focused log)
- HDT (high resolution dipmeter tool)

**نکته ۲:** برای اصلاح جداسازی قائم و به خصوص کاهش اثر چاه و پدیده رخنه بر اندازه‌گیری، دستگاه‌های متمرکزکننده ابداع شدند که شعاع بررسی را نیز افزایش می‌دهند.

### دستگاه‌های غیرمتمرکز بزرگ بازه

مهمترین دستگاه‌های غیرمتمرکز بزرگ بازه عبارتند از:

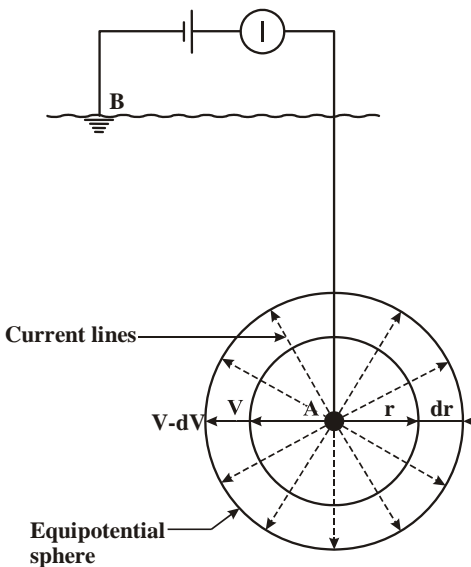
- مقاومت نرمال، - مقاومت جانبی

اساس اندازه‌گیری روش الکتریکی در ادامه توضیح داده می‌شود:

در شکل مقابل، در یک سازند همگون الکتروود نقطه‌ای A، جریان‌ها را به اطراف می‌فرستند و گیرنده B این امواج ارسالی را دریافت می‌کند.

جریان به صورت یکنواخت در تمام جهات انتشار می‌یابد و سطوح هم‌پتانسیل (Equipotential surfaces) به صورت کره‌های هم مرکز (که مرکز آنها فرستنده‌ی A می‌باشد)، ایجاد می‌شوند (سطوح هم‌پتانسیل سطوحی‌اند که پتانسیل الکتریکی روی آن‌ها ثابت می‌باشد، بنابراین جریانی وجود ندارد). اگر پتانسیل الکتریکی در فاصله‌ی r از الکتروود A،  $V(r)$  باشد، آنگاه:

$$-dV = \frac{RI}{4\pi r^2} dr$$



ارسال امواج الکتریکی و ثبت آن‌ها

که در آن، I شدت جریان، R مقاومت ویژه محیط و  $\frac{RI}{4\pi r^2}$  مقاومت بین دو سطح هم‌پتانسیل می‌باشد. بنابراین اختلاف پتانسیل بین r و بی‌نهایت (پتانسیل صفر) داریم:

$$V = \int_r^\infty \frac{RI}{4\pi r^2} dr = \frac{RI}{4\pi r^2} \left[ -\frac{1}{r} \right]_r^\infty = \frac{RI}{4\pi} \left[ \frac{1}{r} - \frac{1}{\infty} \right] = \frac{RI}{4\pi r} \Rightarrow R = \frac{V4\pi r}{I}$$

با توجه به فاصله‌ی بسیار دور گیرنده B تا فرستنده A، عملاً می‌توان این فاصله‌ی بسیار زیاد را برابر با بی‌نهایت در نظر گرفت.

$$E = -\frac{dV}{dr} = \frac{RI}{4\pi r^2} \Rightarrow R = \frac{E4\pi r^2}{I}$$

از طرفی میدان الکتریکی که باعث ایجاد این پتانسیل شده، عبارت است از:

$$R = \frac{E4\pi r^2}{I} \text{ و } R = \frac{V4\pi r}{I}$$

### مقاومت نرمال

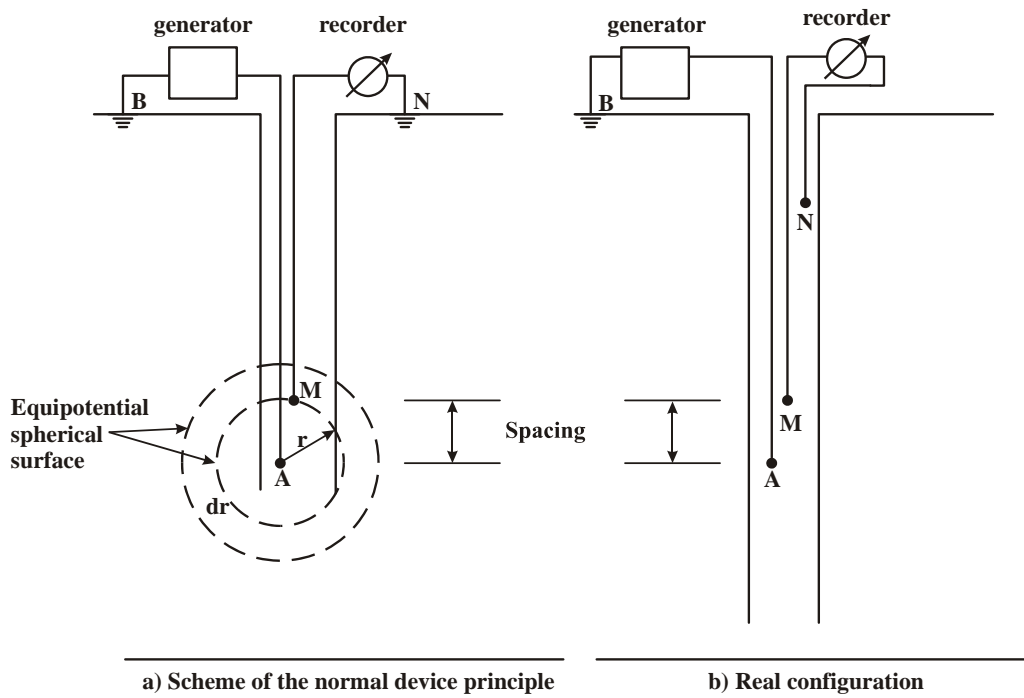
این دستگاه از الکتروود فرستنده (A) و الکتروود گیرنده (M) تشکیل شده است. با فرض وجود فرستنده در محیط همگن با ضخامت زیاد، پتانسیل V بر روی کره‌ای به شعاع AM را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد:

$$V_M = \frac{RI}{4\pi AM} \text{ یا } R = k_N \frac{\Delta V}{I}$$

$k_N = 4\pi AM$ ، ثابت روش نرمال نامیده می‌شود.

اگر  $N$  متصل به زمین نباشد و به خاطر تأثیر القایی درون چاه قرار گیرد؛ باید فاصله‌ی زیادی تا  $M$  داشته باشد. معمولاً از دو بازه‌ی سوئند ( $AM$ ) استفاده می‌شود:

- نرمال کوتاه: اینچ  $AM = 16$ ؛ - نرمال متوسط: اینچ  $AM = 64$



a) Scheme of the normal device principle

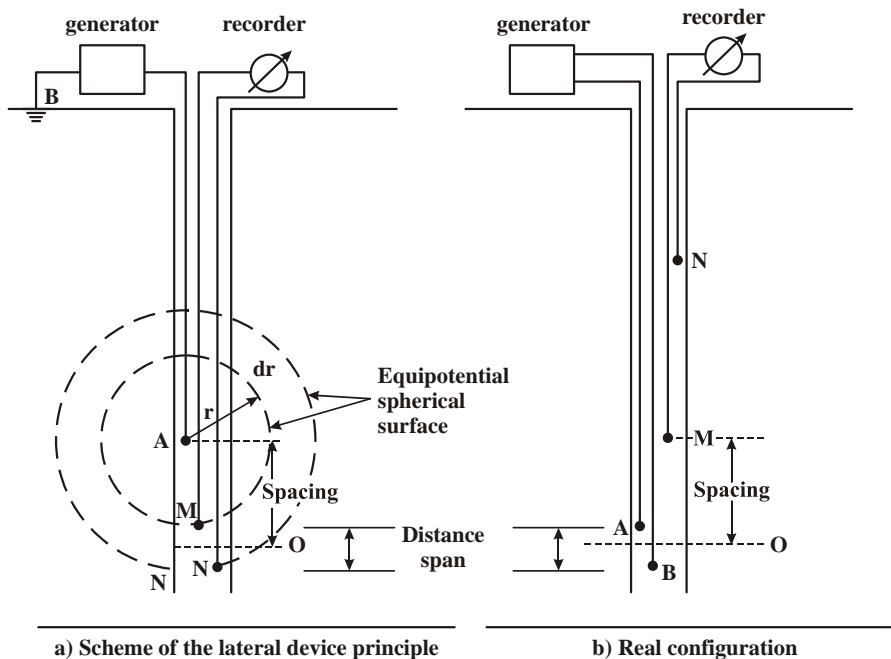
b) Real configuration

آرایش الکترودها به هنگام اندازه‌گیری مقاومت به روش نرمال

نکته ۳: اگر گل بسیار رسانا باشد، باعث می‌شود جریان به صورت کروی پخش نشود و جریان از درون گل از  $A$  به  $B$  برسد. در نتیجه مقاومتی که ثبت می‌شود مقاومت واقعی نیست. برای حل این مشکل بازه را زیاد می‌کنند.

مقاومت جانبی (Lateral)

در این آرایش دو الکتروده  $M$  و  $N$  بسیار نزدیک هم و هر یک روی یک سطح هم پتانسیل کروی به مرکز الکتروده  $A$  قرار دارند. وجود دو الکتروده سبب می‌شود تا حدودی مشکل حل شود ولی اگر گل خیلی شور و سازند مقاوم باشد، جریان از درون گل عبور می‌کند.



a) Scheme of the lateral device principle

b) Real configuration

آرایش الکترودها به هنگام اندازه‌گیری مقاومت به روش جانبی

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

$$V_N = \frac{RI}{4\pi AN}$$

در این روش طریقه‌ی محاسبه به شکل زیر است:

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

$$R = k_L \frac{\Delta V}{I}$$

با توجه به ثابت بودن  $AM$  و  $AN$  داریم:

$$k_L = \frac{4\pi(AM)(AN)}{MN}$$

نکته ۴: یکی از معایب این لاگ این است که اگر سازندگی دارای مقاومت پایین باشد، همه جریان از آن عبور می‌کند و یا لایه‌های پایین و بالای آن مشخص نمی‌شود. همچنین ممکن است به دلیل وجود نفت در سازند که باعث مقاومت بالا می‌شود، مقاومت لایه‌های مجاور آن اندازه‌گیری شود.

### مسیر جریان

با توجه به اندازه‌گیری حجمی در روش مقاومت (نرمال و جانبی) تأثیر قسمت‌های مختلف در اندازه‌گیری‌ها مشاهده می‌شود، مثل تأثیر سیال درون چاه، قسمت‌های تراویده سازند، لایه‌های مجاور. بنابراین با تأثیرگذاری این پارامترها، دیگر سطوح هم‌پتانسیل (جبهه‌های انتشار امواج) کروی نخواهند بود. اما به

طور کلی رابطه‌ی  $R_a = k \left( \frac{V'}{I} \right)$  برقرار است که در آن  $R_a$  مقاومت ظاهری یا مقاومت اندازه‌گیری شده می‌باشد.

$V'$  برابر با  $V$  برای روش نرمال،  $dV$  برای روش لترال می‌باشد و  $I$  شدت جریان اندازه‌گیری شده و  $k$  ضریب هندسی که بیانگر بازه سوند و آرایش الکترودها می‌باشد. به منظور تقریب صحیح  $R_t$  در روش مقاومت، از ضریب شبه‌هندسی **pseudo geometrical factor (J)** با لحاظ کردن مقاومت ناحیه‌ی تراویده و دست‌نخورده، استفاده می‌شود. (در بخش نمودار القایی ضریب شبه‌هندسی توضیح داده خواهد شد). به عبارت دیگر:

$$(R_a)_c = J_i R_{xo} + (1 - J_i) R_t$$

که در آن  $(R_a)_c$  مقاومت اندازه‌گیری شده پس از اعمال تصحیحات (بعداً توضیح داده می‌شوند) می‌باشد. البته این رابطه زمانی صادق است که تنها نواحی تراویده و دست‌نخورده مورد بررسی قرار گیرند و از مقاومت سیال درون چاه و اندود گل صرف‌نظر شده است.

### نقاط اندازه‌گیری (عمق صفر)

#### الف) روش نرمال

نقطه‌ی مرجع در این روش، وسط بازه‌ی سوند (Spacing) در نظر گرفته می‌شود. به عبارت دیگر نقطه‌ی وسط  $AM$ ، مرجع اندازه‌گیری می‌باشد که به عنوان نقطه اثر سوند شناخته می‌شود.

#### ب) روش جانبی

در روش لترال، نقطه‌ی  $O$  وسط  $MN$  نقطه اثر سوند است و فاصله‌ی  $OA$  برابر بازه‌ی سوند می‌باشد.

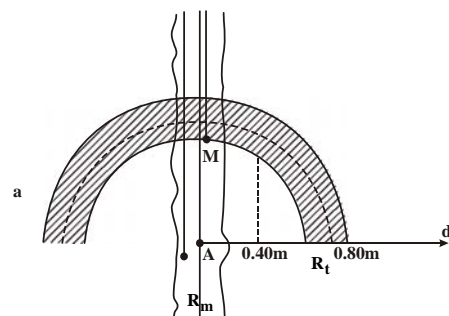
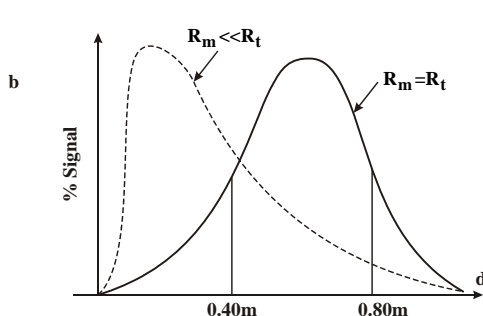
#### ج) روش معکوس

در روش معکوس که آرایش الکترودها همانند سمت راست شکل ارائه‌شده قسمت لترال می‌باشد،  $O$  وسط  $AB$  نقطه اثر سوند است.

### شعاع بررسی

#### الف) روش نرمال

در محیط همگون،  $50^\circ$  درصد افت پتانسیل در کره‌ای به شعاع  $AM$  (بازه‌ی سوند) رخ می‌دهد و حدود  $90^\circ$  درصد افت پتانسیل کل در کره‌ای به شعاع  $AM$   $10^\circ$  رخ داده و تنها  $10^\circ$  درصد سیگنال‌های دریافتی از سازند به فاصله‌ی  $160^\circ$  اینچی  $A$ ، دریافت می‌شوند. بنابراین شعاع بررسی در روش نرمال دو برابر بازه‌ی سوند ( $2AM$ ) می‌باشد. قدرت تفکیک قائم نیز برابر  $2AM$  (باتوجه به کروی بودن جبهه‌ها) می‌باشد.



شعاع بررسی به روش نرمال



# مدرسای شریف

## فصل چهارم

### «هسته‌ای و رادیواکتیو»

#### مقدمه

در فصل‌های مربوط به نمودارهای الکتریکی، ابزارهای الکتریکی بیشتر از اینکه تحت تأثیر ماتریکس سنگ قرار داشته باشند، تحت تأثیر سیال سازند قرار داشتند. اندازه‌گیری‌های هسته‌ای، مربوط به ماتریکس سنگ و نیز سازند می‌باشند. بنابراین با استفاده از این نمودارها می‌توان اطلاعات جامعی هم در مورد بخش جامد سنگ و هم در مورد سیال موجود در سنگ به دست آورد.

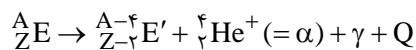
#### رادیواکتیوینه طبیعی

عناصری در طبیعت وجود دارند که از نظر ساختار اتمی پایدار نبوده و با گذشت زمان و با از دست دادن پروتون و الکترون به عناصر دیگری تبدیل می‌شوند. عناصر حاصل که تحت عنوان دختر شناخته می‌شوند، ممکن است پایدار نبوده و مجدداً به عناصر دیگری (ایزوتوپ‌های دیگری) که پایدار می‌باشند، تبدیل شوند. به این عناصر ناپایدار، **رادیواکتیو** می‌گویند، عناصر رادیواکتیو دارای فعل و انفعالات هسته‌ای هستند که به خاطر همین فعل و انفعالات، پرتوهای آلفا، بتا، گاما و انرژی گرمایی را ساطع می‌کنند.

#### پرتو آلفا ( $\alpha$ )

پرتو آلفا از هسته‌ای اتم ساطع شده، دارای بار مثبت بوده و دارای دو پروتون و دو نوترون می‌باشد. از نظر فیزیکی، پرتو آلفا معادل با هسته اتم هلیم (دارای دو پروتون و دو نوترون) می‌باشد. سرعت پرتو آلفا در زمان ساطع شدن حدود  $10^8$  کیلومتر بر ثانیه است. قدرت یونیزاسیون آن به حدی است که هوا را یونیزه می‌کند، اما دارای قدرت نفوذ بسیار کم بوده و فقط می‌تواند از  $50$  میکرون آلومینیوم و یک سانتی‌متر هوا عبور کند و یک صفحه کاغذ معمولی مانع نفوذ آن می‌شود.

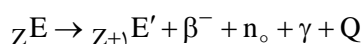
با ساطع کردن یک پرتوی آلفا، عدد اتمی  $Z$  به عدد اتمی  $Z-2$  و عدد جرمی از  $A$  به  $A-4$  تبدیل می‌شود.



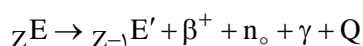
فاکتور  $\gamma$ ، به صورت نمادین است. در بعضی از انتقال‌ها ممکن است هیچ گامایی ساطع نشود، اما در بعضی ممکن است صورت گیرد.  $Q$ ، بیانگر انرژی اضافی تولیدشده طی فرایند است.

#### پرتو بتا ( $\beta$ ) یا ( $\beta^+$ یا $\beta^-$ )

پرتو  $\beta$  از نظر فیزیکی مشابه الکترون است. ممکن است پرتوی  $\beta$  دارای بار مثبت (پوزیترون) یا دارای بار منفی (الکترون) باشد. به دلیل اینکه جرم الکترون در مقابل جرم پروتون و نوترون ناچیز است با انتشار پرتو بتا، جرم اتمی عنصر رادیواکتیو را تغییر نمی‌دهد، ولی عدد اتمی یک واحد کاهش یا



افزایش می‌یابد. به عبارتی:



$Q$ ،  $\gamma$  مشابه حالت قبل و  $n_0$  تعداد نوترینوها است یا:

قدرت نفوذ پرتو بتا بیشتر از پرتو آلفا است و به مقدار انرژی سینتیک الکترون یا پوزیترون بستگی دارد. برای مثال اگر یک میلیون الکترون ولت انرژی داشته باشد از حدود  $4$  متر هوا،  $4/4$  میلی‌متر آب و  $2$  میلی‌متر آلومینیوم عبور می‌کند. با این حال قدرت نفوذ پرتو  $\beta$  مثل  $\alpha$  چندان قوی نیست که در نمودارگیری مورد بررسی قرار گیرد. سرعت پرتو  $\beta$  در حد سرعت نور است.

**پرتو گاما (۷)**

پرتو گاما از جنس فوتون‌های پراثرژی یا نور (امواج الکترومغناطیس) بوده که در اثر واکنش‌های خود به خودی (تغییر انرژی) در هسته اتم تولید می‌شود. در اثر این واکنش‌ها، هسته‌ی رادیواکتیو جدید به همراه پرتو گاما، حاصل می‌شود. سرعت انتشار پرتو گاما در حدود سرعت نور و طول موج آن‌ها  $10^{-9}$  تا  $10^{-11}$  سانتی‌متر است. زمانی که الکترون از یک مدار (اوربیتال) به مداری با انرژی پایین‌تر جابه‌جا می‌شود، از خود انرژی نورانی ساطع می‌کند که همان پرتو گاما است. قدرت یونیزه کردن پرتوی گاما کم بوده، ولی قابلیت نفوذ زیادتری دارد، به طوری که از حدود یک متر سنگ، ۷۰۰ متر هوا یا ۲۰ سانتی‌متر سرب عبور می‌کند. فوتون انرژی آزادشده به هنگام جابه‌جایی از یک مدار به مدار دیگر برابر  $h\nu$  می‌باشد، به عبارت دیگر:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

که  $c$  سرعت نور و  $h$  ثابت پلانک ( $6.626 \times 10^{-27}$  erg یا  $6.627 \times 10^{-34}$  ژول) و  $\lambda$  نیز، طول موج است.

**نکته:** با توجه به مطالب بیان‌شده تنها موردی که در نمودارگیری اهمیت می‌یابد و از آن استفاده می‌شود، پرتوی  $\gamma$  است.

**فروپاشی رادیواکتیو و آمار مربوط به آن**

فروپاشی رادیواکتیو، خاصیتی از هسته بوده که در آن گذار از یک انرژی بالاتر به انرژی پایین‌تر به صورت لحظه‌ای رخ می‌دهد. همان‌طور که توضیح داده شد، انرژی اضافی ساطع‌شده همراه با یک یا دو پرتو ساطع‌شده می‌باشد. اما نکته‌ای که باید مورد توجه قرار گیرد این است که احتمال فروپاشی هر هسته در یک بازه زمانی  $\Delta t$ ، متناسب با  $\Delta t$  است. به عبارت دیگر فروپاشی هسته‌های دیگر است. بنابراین برای یک اتم رادیواکتیو، احتمال فروپاشی  $p(dt)$  (بیانگر این است که احتمال تابع زمان است)، در بازه زمانی  $dt$  عبارت است از:

که در رابطه فوق،  $\lambda$  ثابت فروپاشی نامیده می‌شود.

برای یک مجموعه ذرات مشابه رادیواکتیو که دارای تعداد  $N_p$  عضو است، عدد فروپاشی عبارت است از:

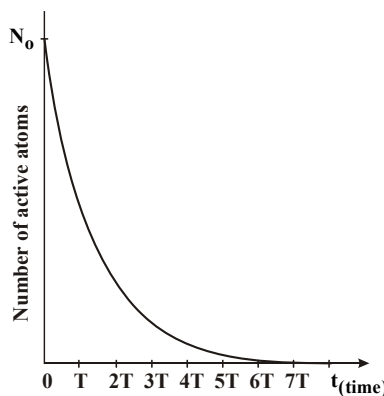
$$dN = N_p p(dt) = -\lambda dt N_p \Rightarrow \frac{dN}{N_p} = -\lambda dt$$

با انتگرال‌گیری از طرفین تساوی فوق خواهیم داشت:

$$\int_{N_0}^{N_p} \frac{dN}{N_p} = \int_0^t -\lambda dt \Rightarrow \ln N_p - \ln N_0 = -\lambda t \Rightarrow \ln \frac{N_p}{N_0} = -\lambda t$$

$$\Rightarrow N_p = N_0 e^{-\lambda t}$$

که در رابطه فوق،  $N_p$  تعداد ذرات باقی‌مانده (پس از گذشت زمان  $t$ ) از تعداد ذرات اولیه  $N_0$  پس از فروپاشی می‌باشد.



فروپاشی رادیواکتیو

$\lambda$  (ضریب تناسب) با استفاده از مفهوم نیمه عمر تعریف می‌شود. نیمه عمر عبارت است از زمانی که طول می‌کشد تا تعداد ذرات باقی‌مانده به نصف تعداد ذرات اولیه کاهش پیدا کند و آن را با  $t_{\frac{1}{2}}$  نشان می‌دهند.

$$@ \quad t_{\frac{1}{2}} \quad N_p = \frac{1}{2} N_0 \Rightarrow \frac{1}{2} = e^{-\lambda t_{\frac{1}{2}}} \Rightarrow t_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\lambda}$$

با توجه به اینکه زمان نیمه عمر بر حسب سال، روز، ساعت، دقیقه، ثانیه یا حتی میکروثانیه بیان می‌شود، بنابراین هر مقدار  $\lambda$  بر حسب  $y^{-1}, d^{-1}, h^{-1}, m^{-1}, s^{-1}$  یا  $\mu s^{-1}$  خواهد بود.

مفهوم دیگری که در بحث رادیواکتیو مطرح است، طول عمر میانگین (Mean life time) می‌باشد. این مفهوم به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\bar{T} = \frac{1}{N_0} \int_0^{\infty} \lambda N_t dt = \int_0^{\infty} \lambda t e^{-\lambda t} dt$$

برای حل این انتگرال به روش جزء به جزء عمل می‌کنیم.

$$\bar{T} = \lambda \left[ -\frac{t}{\lambda} e^{-\lambda t} - \frac{1}{\lambda^2} e^{-\lambda t} \right]_0^{\infty}$$

$$= \lambda \left[ (0 - 0) - \left( 0 - \frac{1}{\lambda^2} \right) \right] = \frac{1}{\lambda}$$

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{0.693}{\lambda} \Rightarrow \frac{1}{\lambda} = \frac{t_{\frac{1}{2}}}{0.693} = 1.44 t_{\frac{1}{2}}$$

$$\bar{T} = 1.44 t_{\frac{1}{2}}$$

مشتق	انتگرال
$t$	$e^{-\lambda t}$
$1$	$-\frac{1}{\lambda} e^{-\lambda t}$
$0$	$+\frac{1}{\lambda^2} e^{-\lambda t}$

بنابراین:

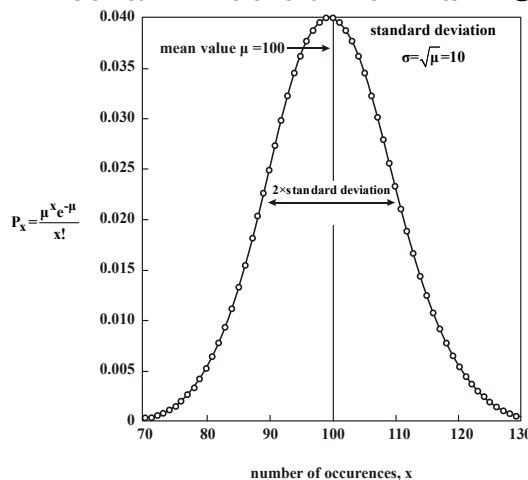
قبل از بیان احتمالات مربوط بهتر است توزیع احتمال دو جمله‌ای برنولی بیان شود. این توزیع بیان می‌دارد که اگر تعداد مشاهدات  $Z$  بار تکرار شود، برای اینکه یک مشاهده خاص  $X$  بار اتفاق بیفتد، احتمال آن  $P_X$  است. اگر یک مشاهده اتفاق بیفتد، احتمالش  $p$  و اگر رخ ندهد  $(1-p)$  می‌باشد. بنابراین:

$$P_X = \binom{Z}{X} p^X (1-p)^{Z-X} = \frac{Z!}{X!(Z-X)!} p^X (1-p)^{Z-X}$$

برای نمودارهای هسته‌ای احتمال ( $P_X$ ) اینکه  $X$  هسته در زمان  $dt$  (وقتی  $Z$  اتم وجود دارند)، دچار فروپاشی شوند، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_X = \mu^X \frac{e^{-\mu}}{X!}$$

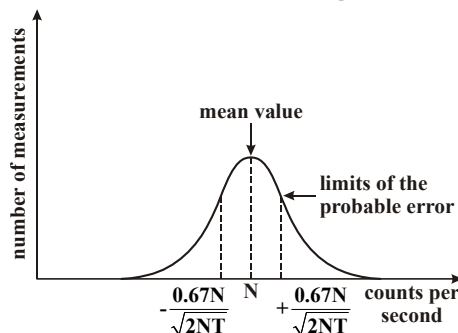
$\mu$ ، میانگین تعداد فروپاشی‌های مشاهده شده می‌باشد. روند تغییرات نمودار این رابطه به صورت زیر است:



روند تغییرات احتمال فروپاشی هسته ماده رادیواکتیو

برای یک حالت خاص نشان داده شده است که ۵۰ درصد داده‌های گرفته شده در فاصله  $\pm \frac{0.67N}{\sqrt{2NT}}$  از مقدار متوسط می‌باشند (احتمال خطای موجود).

در این رابطه  $T$  ثابت زمانی و  $N$  میانگین شمارش تعداد پرتوها می‌باشد.

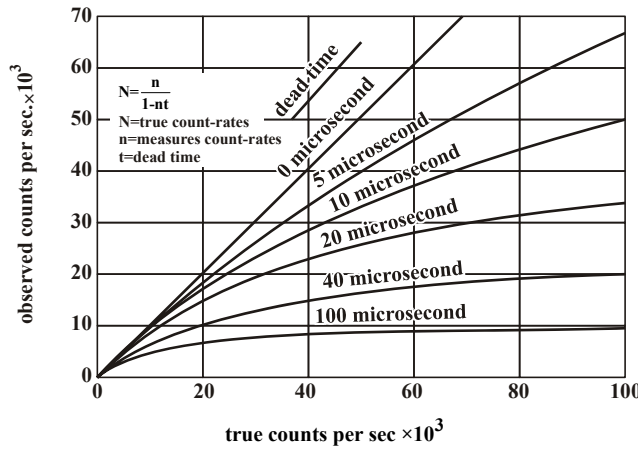


توزیع احتمال اطراف مقدار متوسط



مفهوم دیگر، زمان مرده (Dead time) می‌باشد. زمان مرده یک حسگر، مدت زمانی است که پس از کشف یا ثبت یک پالس یا یک ذره آغاز شده و هیچ ثبت دیگری صورت نمی‌گیرد تا مجدداً ثبت جدیدی صورت گیرد. به عبارت دیگر به فاصله بین دو ثبت یک حسگر، زمان مرده می‌گویند. اگر  $N$ ، آهنگ شمارش صحیح،  $n$ ، آهنگ شمارش اندازه‌گیری شده و  $t$ ، زمان مرده باشد آنگاه:

$$N = \frac{n}{1 - nt}$$



نمودار اصلاحی برای مفهوم زمان مرده به منظور تصحیح تعداد پالس‌های مشاهده‌شده و اندازه‌گیری شده

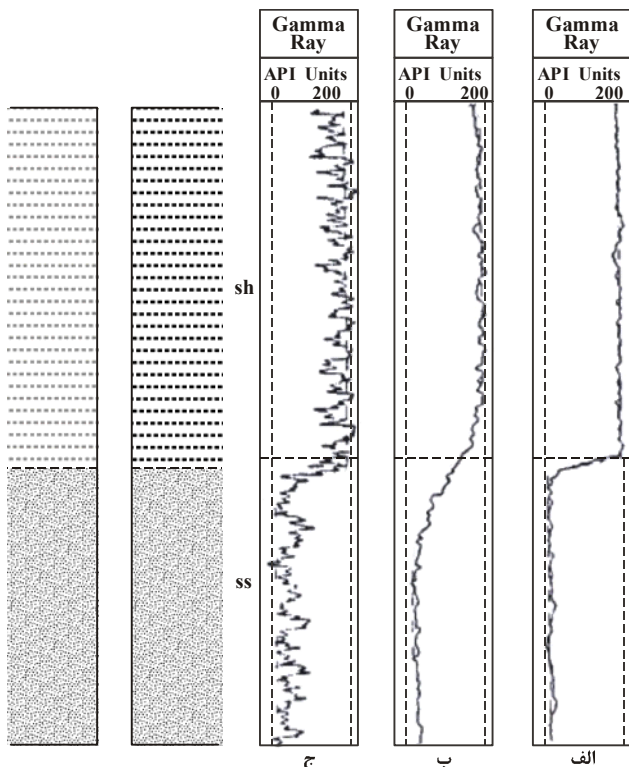
کدام مثال ۱: ضخامت نیمه چیست؟

- ۱) ضخامتی از ماده که شدت پرتو گاما با انرژی مشخص را به نصف کاهش می‌دهد.
- ۲) ضخامتی از ماده که در آن دامنه موج صوتی نصف می‌گردد.
- ۳) ضخامتی از ماده که گامای حاصل از تورسیم و پتاسیم نیمی از گامای کل باشد.
- ۴) ضخامتی از ماده که در نصف بازه سوندی اندازه‌گیری می‌شود.

پاسخ: گزینه «۱» ضخامت نیمه هر ماده عبارت است از ضخامتی از گل ماده که شدت پرتو گاما با انرژی مشخص را به نصف کاهش می‌دهد.

### ثابت زمانی (Time Constant)

مدت زمانی را که برای محاسبه متوسط شمارش در ثانیه یا دقیقه در نظر گرفته می‌شود، ثابت زمانی گویند و با  $T_c$  نشان می‌دهند. ثابت زمانی به گونه‌ای انتخاب می‌شود که منحنی از کادر خارج نشده و مرز لایه‌ها قابل شناسایی باشد. نسبت ثابت زمانی و سرعت سوند در گمانه، روی اندازه‌گیری‌ها تأثیر زیادی دارد.



الف) سرعت سوند کم و ثابت زمانی کم ب) سرعت سوند زیاد و ثابت زمانی زیاد ج) سرعت سوند زیاد و ثابت زمانی کم



# مدرسایان شریف

## فصل پنجم

### «نمودار اکوستیک (Acoustic Log)»

#### مقدمه

- در چارچوب چاه‌نگاری ثبت پارامترهایی مورد نظر است که در ارتباط با فرستادن قطار امواج به داخل سازند به دست می‌آید. این پارامترها عبارتند از:
- ۱- سرعت انتشار امواج در درون سازند که با اندازه‌گیری زمان عبور موج از داخل ضخامت معینی از آن به دست می‌آید. این روش را چاه‌نگاری صوتی می‌نامند.
  - ۲- اندازه‌گیری دامنه اولیه اولین و دومین نوسان سیگنالی که به گیرنده می‌رسد و روی امواج فشاری یا برشی دریافتی انجام می‌شود. این بررسی‌ها را چاه‌نگاری دامنه صوتی می‌خوانند و کاربرد مهمی در مطالعه پیوستگی سیمان در چاه Cement Bond Log (CBL) دارند.
  - ۳- دامنه و موقعیت نوسان‌های مثبت سیگنال دریافتی که شامل چاه‌نگاری چگالی متغیر Variable Density Log (VDL) می‌شود.

#### سیگنال‌های اکوستیک

سیگنال اکوستیک، موجی است که وقتی انرژی اکوستیک آزاد می‌شود، ایجاد می‌شود و دارای مشخصه‌های زیر است:

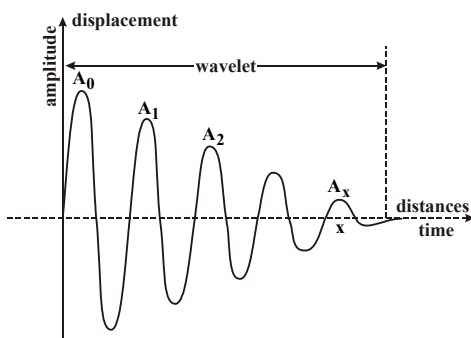
۱- **دوره (T, Period):** دوره یک موج مدت زمانی است که طول می‌کشد تا یک چرخه کامل طی شود و برحسب میکروثانیه بیان می‌شود. به عبارت دیگر فاصله زمانی بین دو نقطه اوج (Peak) مثبت یا دو نقطه اوج منفی برابر یک دوره است.

۲- **فرکانس (f, frequency):** به تعداد چرخه‌های کامل در یک ثانیه فرکانس گویند و برحسب هرتز (Hz) بیان می‌شود.

$$1 \text{ (Hz)} = 1 \frac{\text{Cycle}}{\text{second}}$$

$$f = \frac{1}{T}$$

فرکانس، معکوس دوره است:



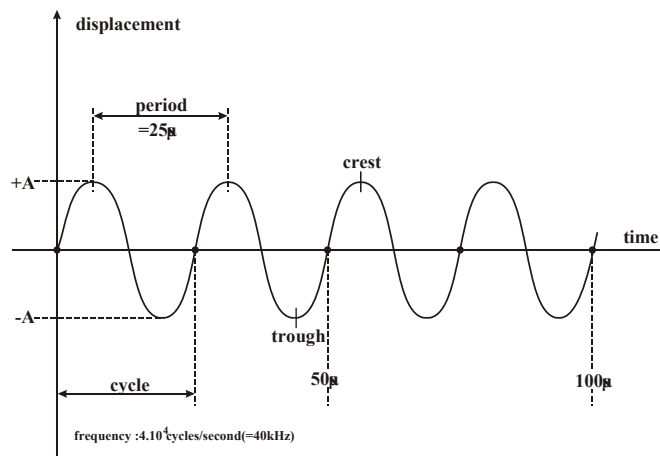
سیگنال اکوستیک

#### ۳- طول موج ( $\lambda$ )

مسافتی که در طول یک چرخه به وسیله جبهه‌ی موج طی می‌شود. طول موج، برابر خارج قسمت سرعت انتشار موج (V) به فرکانس می‌باشد.

$$\lambda = \frac{V}{f}$$

شکل زیر این قسمت‌ها را نشان می‌دهد.



قسمت‌های مختلف یک موج

کجه مثال ۱: کدام یک از عبارات زیر صحیح است؟

- ۱) میزان نفوذ امواج صوتی در سنگ مخزن رابطه مستقیم با سرعت امواج در سنگ و فرکانس صوتی دارد.
- ۲) میزان نفوذ امواج صوتی در سنگ مخزن مستقل از فرکانس و سرعت آن‌ها در سنگ است.
- ۳) میزان نفوذ امواج صوتی در سنگ مخزن رابطه مستقیم با سرعت امواج در سنگ و نسبت معکوس با فرکانس صوتی دارد.
- ۴) میزان نفوذ امواج صوتی در سنگ مخزن رابطه مستقیم با فرکانس صوتی و نسبت معکوس با سرعت امواج صوتی در سنگ دارد.

پاسخ: گزینه «۳» به‌طور کلی رابطه‌ی میزان نفوذ صوت در سنگ با سرعت و فرکانس صوتی به صورت زیر است:

$$\alpha = \frac{\text{سرعت}}{\text{فرکانس}} \frac{V}{f}$$

میزان نفوذ صوت از سنگ

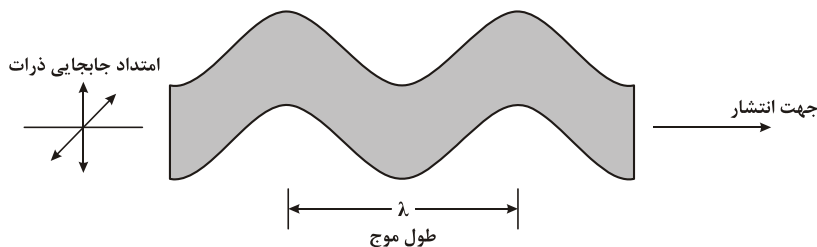
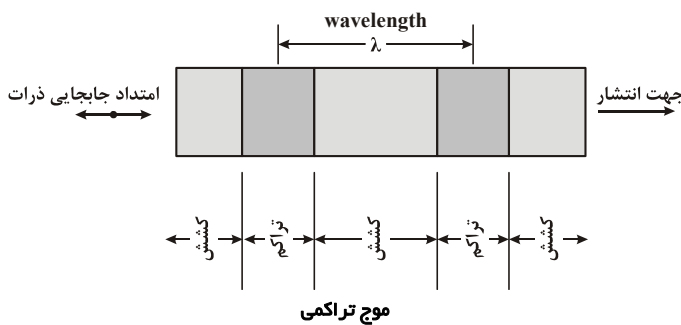
به عبارت دیگر هر چقدر سرعت صوت در سنگ بیشتر باشد، صوت مسافت بیشتری را تا از دست دادن انرژی خود طی می‌کند و هرچقدر فرکانس موج صوتی افزایش یابد، انرژی آن در اثر برخوردهای بیشتر کاهش می‌یابد و مسافت کمتری را طی می‌کند.

### امواج اکوستیک

چند نوع موج اکوستیک وجود دارد که هر کدام بر اساس حرکت ذرات شناسایی می‌شوند.

**موج تراکمی یا طولی:** این موج که P نیز خوانده می‌شود، مشخصه آن هم امتداد بودن حرکت ذرات و انتشار موج است. این موج بیشترین سرعت انتشار را دارد و اولین موجی است که به گیرنده می‌رسد. موج طولی تنها موجی است که در مایعات منتشر می‌شود.

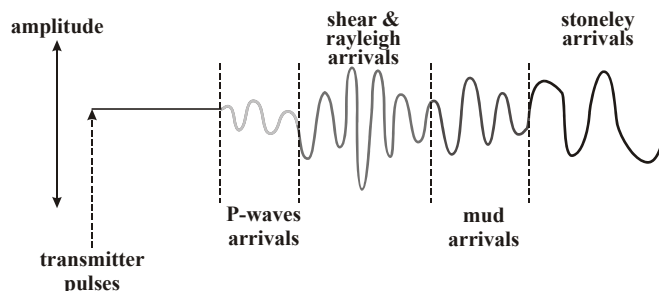
**موج برشی یا عرضی:** این موج که S نیز خوانده می‌شود، ویژگی آن عمود بودن حرکت ذرات بر امتداد انتشار است. سرعت انتشار موج عرضی کمتر از موج طولی است. (نسبت سرعت موج P به S در محدود ۱/۶ تا ۲ است).



این موج در مایعات انتشار نمی‌یابد. در سازند قسمتی از انرژی صوتی توسط موج عرضی انتشار پیدا می‌کند. در گل حفاری تمام این انرژی به صورت موج تراکمی انتشار می‌یابد. انرژی انتقالی موج برشی (S) بیشتر از انرژی انتقالی موج تراکمی (P) است. بنابراین پس از عبور امواج از داخل سنگ‌ها، امواج با سرعت کمتر (S) نسبت به امواج با سرعت بیشتر (P) خود را به طور مشخص تری روی گیرنده نشان می‌دهند. این موضوع امکان مشخص کردن امواج را روی قطار موج فراهم می‌سازد. به عبارت دیگر دامنه امواج عرضی خیلی بیشتر از امواج طولی است.

نکته ۱: رس‌ها چون عموماً حالت سفت‌شده ندارند، امواج عرضی را به خوبی انتقال نمی‌دهند.

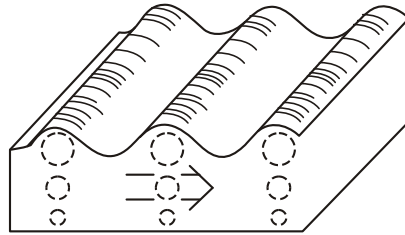
شکل زیر نشان می‌دهد که امواج تراکمی سریع‌تر از امواج عرضی به گیرنده می‌رسند.



تفاوت موج تراکمی و موج برشی در دامنه و سرعت انتشار

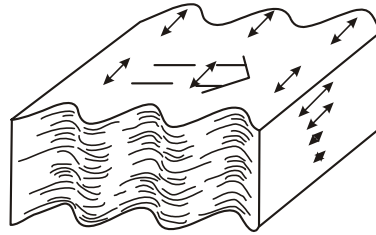


**امواج سطحی:** این‌ها امواجی هستند که مشخصاً در سطح و درون لایه‌ای که ضخامتی به اندازه طول موج دارا می‌باشد، جابه‌جا می‌شوند و عبارتند از: امواج ریلی که در آن‌ها حرکت ذرات به صورت بیضی‌وار است. سرعت و انرژی آن‌ها در حدود ۹۰ درصد امواج عرضی است و در مایعات انتقال پیدا نمی‌کنند.



امواج ریلی

امواج لائو که در آن‌ها حرکت ذرات متقاطع بر امتداد انتشار ولی بدون جابه‌جایی قائم است. امواج لائو از امواج ریلی سریع‌تر هستند.

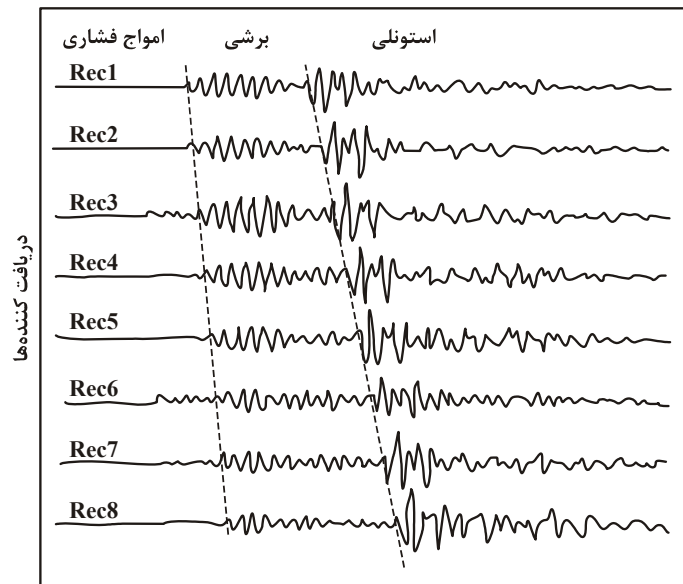


امواج لائو

امواج جفت که در آن‌ها حرکت قطری است. این‌ها سریع‌ترین امواج سطحی هستند.

امواج هیدرودینامیک که حرکت آن‌ها بیضی‌وار است، ولی نسبت به امواج ریلی متقارن‌اند.

امواج استونلی امواجی هستند که در سطح جدایی جامد-مایع حرکت می‌نمایند و در نتیجه اثر متقابل امواج متراکم در مایع و موج برشی در جامد به وجود می‌آیند. بنا بر تعریف، موج استونلی باید طول موجی کوچکتر از قطر چاه داشته باشد. جنس ذرات در جامدات بیضوی است. سرعت موج استونلی کمتر از موج متراکم در مایعات و موج برشی در جامدات است و انرژی آن با فرکانس پایینی انتشار یافته و تقلیل آن کم است. گیرنده دستگاه مجموعه‌ای از این امواج را دریافت می‌کند، ولی تنها موج متراکم مورد نظر می‌باشد.



امواج تراکمی، برشی و استونلی

کدام یک از امواج زیر از لحاظ نوع حرکت با سایر امواج متفاوت است؟

(۴) امواج لائو

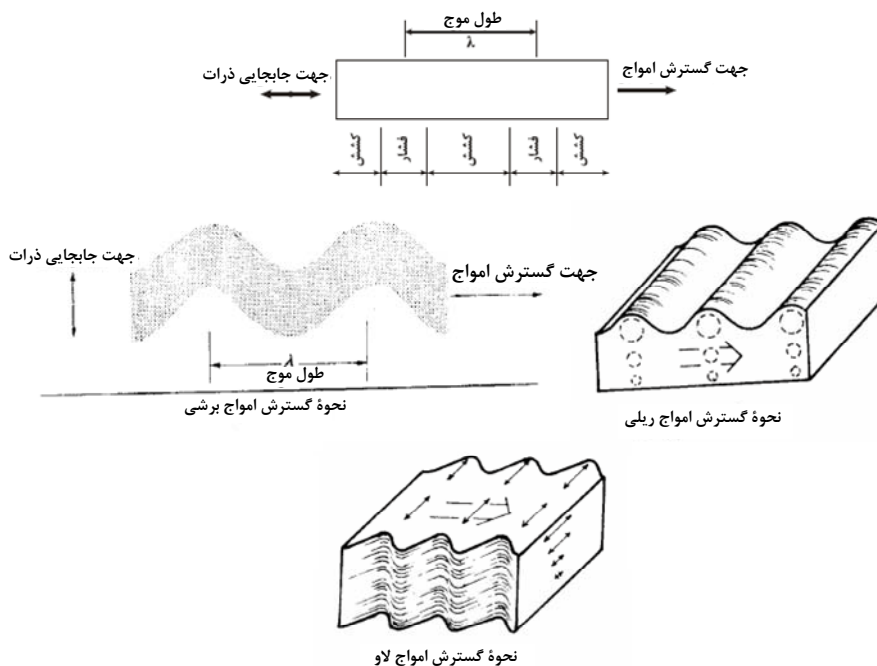
(۳) امواج ریلی

(۲) امواج برشی

(۱) امواج فشاری

پاسخ: گزینه «۱» در این سؤال منظور راستای حرکت (جهت گسترش) و جهت جابه‌جایی ذرات مورد نظر است.

در شکل‌های زیر انواع امواج دیده می‌شوند.

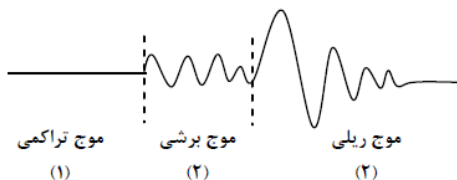


همان طور که در شکل‌ها نیز مشخص است، در سه نوع موج برشی، ریلی و لاو به نوعی جابه‌جایی ذرات در راستای عمود به جهت گسترش رخ می‌دهد، در حالی که برای موج فشارشی، جهت گسترش با جهت جابه‌جایی در یک راستاست.

مثال ۳: ترتیب رسیدن امواج از فرستنده به گیرنده به کدام صورت است؟

- (۱) برشی، تراکمی، ریلی (۲) تراکمی، ریلی، برشی (۳) تراکمی، برشی، ریلی (۴) برشی، ریلی، تراکمی

پاسخ: گزینه «۳» ترتیب رسیدن امواج به صورت زیر است:



ترتیب رسیدن از چپ به راست است.

مثال ۴: در نمودار صوتی، اندازه‌گیری بر اساس کدام نوع موج انجام می‌شود؟

- (۱) برشی (۲) فشارشی (۳) ریلی (۴) لاو

پاسخ: گزینه «۲» در نمودار صوتی اولین ورودی ثبت می‌شود و امواج فشارشی بیشترین سرعت را دارند، بنابراین زودتر به گیرنده می‌رسند.

مثال ۵: رس‌ها کدام نوع موج را از خود نمی‌توانند عبور دهند؟

- (۱) موج طولی (۲) موج عرضی (۳) موج ریلی (۴) موج لاو

پاسخ: گزینه «۲» رس‌ها موج عرضی (shear wave) را نمی‌توانند از خود عبور دهند.

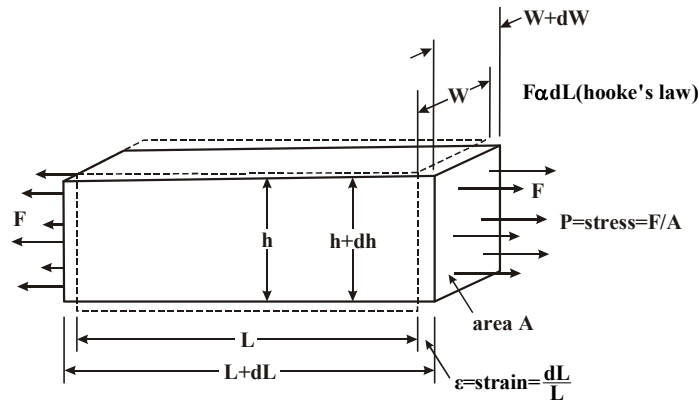
### خواص الاستیک سنگ

خواصی وجود دارند که توانایی مقاومت سنگ در برابر تغییر شکل دائمی را زمانی که تحت اعمال نیرو قرار می‌گیرد، بیان می‌کنند. تمامی جامدات از جمله سنگ‌ها از قانون هوک تبعیت می‌کنند که در آن ارتباط تناسبی بین تنش و تغییر شکل وجود دارد. این خواص عبارت‌اند از:

۱- مدول یانگ (Young's modulus),  $E$

نسبت تنش اعمالی به تغییر طول نسبی در یک تراکم یا کشش خطی را مدول یانگ می‌گویند.

$$E = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{dL}{L}} = \frac{P}{\epsilon}$$



جسم تحت تنش

که در رابطه فوق  $P$  تنش اعمال شده (نیرو در واحد سطح) و  $\epsilon$  کرنش (تغییر طول کششی یا تراکمی به طول اولیه) است.

## ۲- مدول الاستیک (elastic bulk modulus) $k$ ,

$$k = \frac{\frac{F}{A}}{\frac{dV}{V}}$$

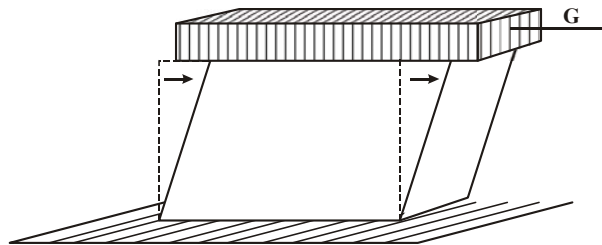
نسبت تنش اعمالی به تغییر حجم نسبی را مدول الاستیک می‌گویند:

$$dV = (L + dL)(W + dW)(h + dh) - LWh$$

که در رابطه فوق  $\frac{F}{A}$  تنش اعمال شده و  $\frac{dV}{V}$  تغییرات حجم به حجم اولیه است:

## ۳- مدول برشی (Shear modulus) $\mu$ ,

نسبت تنش اعمالی به تغییر طول نسبی زمانی که یک نیروی برشی (مماس بر سطح جابه‌جا شده) به جسم اعمال می‌کند، مدول برشی گویند.



جسم تحت تنش برشی

$$\mu = \frac{\frac{G}{A}}{\frac{dL}{L}}$$

که در رابطه فوق  $\frac{G}{A}$  تنش برشی اعمالی و  $\frac{dL}{L}$  تغییر شکل برشی بدون تغییر حجم است.

## ۴- تراکم‌پذیری (Compressibility) $C$ یا $\beta$

تراکم‌پذیری عکس مدول الاستیک است.

$$C = \frac{1}{k}$$

## ۵- نسبت پواسون (Poisson's ratio) $\sigma$

بیانگر میزان تغییرات شکل یا به عبارت دیگر نسبت کرنش جانبی به کرنش طولی را گویند:

۶- روابط بین ضرایب الاستیسیته عبارت‌اند از:

$$E = \frac{9k\mu}{3k + \mu} \quad \text{و} \quad \sigma = \frac{3k - 2\mu}{6k + 2\mu}$$



# مدرس‌ان شریف

## فصل ششم

### «نمودار الکترومغناطیس (Electromagnetic Propagation Tool, EPT)»

#### مقدمه

سه پارامتر وجود دارند که یک سنگ را از لحاظ خصوصیات الکتریکی مشخص می‌کنند.

الف) گذردهی مغناطیسی،  $\mu$  (Henry/meter)

ب) هدایت الکتریکی، C (mho/m یا siemens/meter)

ج) تراوایی دی‌الکتریک،  $\epsilon$  (Farad/meter)

به دلیل اینکه اکثر سنگ‌ها از کانی‌های غیرمغناطیس تشکیل شده‌اند، گذردهی مغناطیسی آن‌ها همانند هوای آزاد است.  $\mu_0 (= 4\pi \times 10^{-7} \frac{\text{Henry}}{\text{m}})$ .

بنابراین تغییرات این پارامتر برای اکثر مواد ناچیز است.

هدایت الکتریکی و عکس آن مقاومت الکتریکی مهمترین پارامتر مورد بررسی در سازندهای هیدروکربن‌دار و آبدار است. اما زمانی که آب سازند دارای شوری کم یا بسیار متغیر است، تشخیص هیدروکربن بسیار سخت می‌باشد. تراوایی دی‌الکتریک که در فرکانس‌های بالا (گیگا هرتز GHz) اندازه‌گیری می‌شود، تابعی از تخلخل اشباع از آب بوده و مستقل از شوری است، بنابراین:

دستگاه انتشار امواج الکترومغناطیس (Electromagnetic Propagation Tool) اساساً به آب حساس است. در صورتی که سایر دستگاه‌های اندازه‌گیری تخلخل، هم توسط آب و هم توسط هیدروکربن تحت تأثیر قرار می‌گیرند. استفاده همزمان این نمودار با نمودارهای نوترون و چگالی، در زون‌های مورد تهاجم تراویده گل، تشخیص دقیق‌تر لایه‌های هیدروکربن‌دار از لایه‌های آبدار را امکان‌پذیر می‌سازد.

#### مفاهیم اولیه

تراوایی دی‌الکتریک یکی از فاکتورهای اساسی برای انتشار امواج الکترومغناطیس است. تراوایی دی‌الکتریک متناسب با دو قطبی الکتریکی لحظه‌ای در واحد حجم است. مواردی که باعث ایجاد دو قطبی می‌شوند، عبارت‌اند از:

(۱) الکترونیک، (۲) یونی، (۳) سطحی و (۴) Dipolar.

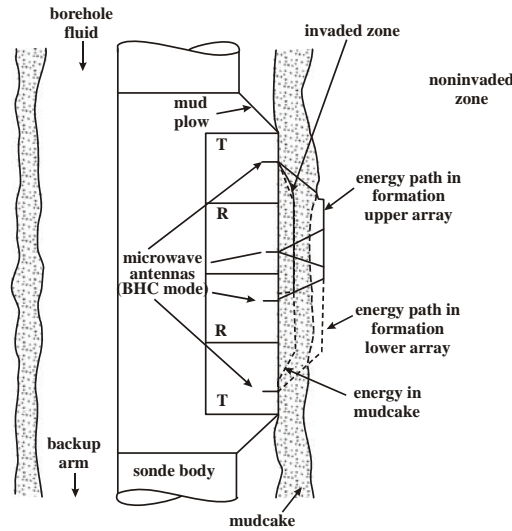
مورد الکترونیک به سبب جابه‌جایی ابرهای الکترونی است و تنها موردی است که در فرکانس‌های نوری عمل می‌کند. موارد یونی و سطحی (interfacial) به سبب جابه‌جایی یون‌ها ایجاد شده و مربوط به فرکانس‌های پایین است. مورد Dipolar که در فرکانس‌های EPT بیشتر از بقیه موارد رخ می‌دهد (گیگا هرتز)، به سبب وجود دو قطبی‌های دی‌الکتریک دائمی است که خود را در جهت میدان الکتریکی اعمالی قرار می‌دهند. به جز آب، مواد کمی در طبیعت دارای دو قطبی‌های دی‌الکتریک دائمی هستند.

**نکته:** دو قطبی‌های دی‌الکتریک همواره در آب می‌باشند (به دلیل ساختار مولکولی) و به میزان نمک حل‌شده در آب ارتباطی ندارد.

بنابراین با استفاده از نمودار الکترومغناطیس (EPT) در محدوده‌ی فرکانس گیگا هرتز، می‌توان مقدار آب موجود را مستقل از درجه شوری آن اندازه گرفت.

## اصول اندازه‌گیری

EPT دو پارامتر سازند را که قبلاً امکان اندازه‌گیری آنها نبود، مشخص می‌نماید. بدین ترتیب که دستگاه، یک موج الکترومغناطیسی با فرکانس بالا (۱/۱GHz) به درون سازند فرستاده و زمان انتشار (propagation time)  $t_p$  (ns) و مقدار تحلیل رفتگی  $A$  (dB/m) آنها را در نزدیکی گیرنده‌ها که در فاصله‌ی ۴cm از یکدیگر قرار دارند، اندازه‌گیری می‌نماید. یکی از بزرگترین فاکتورهایی که بر روی انتشار یک موج الکترومغناطیسی در یک ماده تأثیر می‌گذارد، خاصیت القاپذیری الکتریکی (E) آن جسم است.



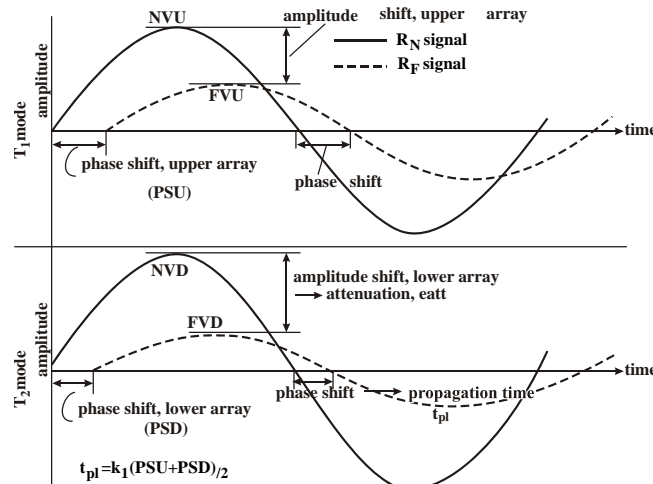
دستگاه EPT

خاصیت القاپذیری الکتریکی هر محیطی (در آن فرکانس)، متناسب با دو قطب پایدار آب است و به میزان نمک‌های حل‌شده در آن ارتباطی ندارد. علت اندازه‌گیری ثابت دی‌الکتریک آن است که آب و نفت با دقت زیادی از همدیگر تمیز داده شوند و در مواقعی که نمودارهای مقاومت مخصوص کلاسیک نتوانند در آب‌های شیرین‌تر کاربرد داشته باشند، می‌توان دقیق‌ترین اطلاعات را از EPT به دست آورد.

در ابزار EPT میزان جابه‌جایی و اختلاف فاز امواج اندازه‌گیری می‌شوند. یک فرستنده و یک گیرنده بالایی، اختلاف فاز بالایی (upper array phase shift, PSU) و یک فرستنده و یک گیرنده پایینی، اختلاف فاز پایینی (lower array phase shift, PSD) را اندازه‌گیری می‌کنند. سپس زمان انتشار میانگین  $t_{pl}$  برابر میانگین این دو زمان اندازه‌گیری شده می‌باشد. (اختلاف فاز بین موج ثبت‌شده، گیرنده نزدیک (Near receiver  $R_N$ ) و موج ثبت‌شده گیرنده دور (Far receiver  $R_F$ ) می‌باشد.)

$$t_{pl} \left( \frac{ns}{m} \right) = k_1 \left( \frac{PSU + PSD}{2} \right)$$

که  $k_1$  مقدار ثابت می‌باشد.



اندازه‌گیری جابجایی فازها و تضعیف دامنه‌ها در ابزار EPT



برای اندازه‌گیری مقدار تضعیف دامنه‌ها، نیز از میانگین‌گیری استفاده می‌شود. مقدار تضعیف میانگین امواج الکترومغناطیس عبارت است از:

$$eatt\left(\frac{db}{m}\right) = k_p \frac{\left(\frac{NVU + NVD}{2}\right) - \left(\frac{FVU + FVD}{2}\right)}{NVR - FVR}$$

که در رابطه فوق  $k_p$  مقدار ثابت،  $NVU$ ،  $NVD$  مقادیر ولتاژهای نزدیک اندازه‌گیری شده در فرستنده - گیرنده بالایی و فرستنده - گیرنده پایینی و  $FVD$ ،  $FVU$  ولتاژهای دور اندازه‌گیری شده در فرستنده - گیرنده بالایی و فرستنده - گیرنده پایینی می‌باشند.  $NVR$ ،  $FVR$  نیز ولتاژهای نزدیک و دور مرجع می‌باشند. تمامی اندازه‌گیری‌های ولتاژها و فازها به صورت دیجیتالی می‌باشد.

$$N = \frac{18000D}{LS}$$

تعداد اندازه‌گیری در واحد عمق به سرعت نمودارگیری بستگی دارد و عبارت است از:

که در رابطه فوق  $N$  تعداد اندازه‌گیری‌ها در واحد طول،  $D$  طول بر حسب اینچ و  $LS$  سرعت نمودارگیری بر حسب  $\left(\frac{\text{Feet}}{\text{ساعت}}\right)$  است.

### عمق بررسی

عمق بررسی عمودی که در دیواره چاه مورد مطالعه قرار می‌گیرد، ۴ سانتی‌متر و عمق بررسی افقی بین ۲ تا ۱۵ سانتی‌متر است و بستگی به قابلیت هدایت سازند دارند.

### تفسیر نمودار EPT

در جدول زیر مقادیر  $t_p, \epsilon$  برای سنگ‌هایی که معمولاً مورد ارزیابی پتروفیزیکی قرار می‌گیرند، نشان داده شده است.

سنگ یا سیال	ثابت دی‌الکتریک نسبی نسبت به هوا	$t_p \left(\frac{ns}{m}\right)$
ماسه‌سنگ	۴/۶۵	۷۲
دولومیت	۶/۸	۸/۷
سنگ آهک	۷/۵ - ۹/۲	۹/۱ - ۱۰/۲
ایندریت	۶/۳۵	۸/۴
هالیت	۵۶-۶/۳۵	۷/۹-۸/۴
ژیپس	۴/۱۶	۶/۸
شیل	۵/۲۵	۷/۴۵-۱۶/۶
نفت	۲-۲/۴	۴/۷-۵/۲
گاز	۱	۳/۳
آب شور	۵۶-۸۰	۲۵-۳۰
آب شیرین	۷۸/۳	۲۹/۵

EPT ناحیه مورد تهاجم تراویده گل را می‌خواند و می‌توان معادله بازتاب آن را زمان انتشار (وابسته به لیتولوژی) به صورت زیر نوشت:

$$t_p = (1 - \phi - V_{sh}) \cdot t_{p(ma)} + V_{sh} \cdot t_{p(sh)} + \phi S_{xo} \cdot t_{p(w)} + \phi(1 - S_{xo}) \cdot t_{p(h)}$$

که در آن  $t_p$  زمان انتشار و  $ma$  (ماتریکس)،  $sh$  (شیل)،  $w$  (آب) و  $h$  (هیدروکربن) می‌باشد.

$$S_{xo} = \frac{(t_p - t_{p(ma)}) - \phi \cdot (t_{p(h)} - t_{p(ma)}) - V_{sh}(t_{p(sh)} - t_{p(h)})}{\phi \cdot (t_{p(w)} - t_{p(h)})} = \frac{\phi_{EPT}}{\phi}$$

و اشباع به صورت:

$$A = \phi \cdot S_{xo} \cdot A_w + V_{sh} \cdot A_{sh}$$

و معادله تحلیل رفتگی  $A$  (مستقل از لیتولوژی):

$$S_{xo} = \frac{A - V_{sh} \cdot A_{sh}}{\phi \cdot A_w}$$

و یا اینکه به صورت:

اگر  $S_{xo} = S_w$  باشد، پس  $S_w = S_{wirr}$  و اگر  $S_{xo} < S_w$  باشد، پس آب تولید خواهد شد.

اگر شیل و هیدروکربن در محیط حضور نداشته باشند، پس از ساده‌سازی‌ها مقدار تخلخل حاصل از نمودار الکترومغناطیس به صورت زیر است:

$$\phi_{EPT} = \frac{t_p - t_{pma}}{t_{pw} - t_{pma}}$$



در ناحیه‌های دارای هیدروکربن،  $t_{ph}$  تقریباً برابر با  $t_{pma}$  است و به اصطلاح EPT فقط آب را ثبت می‌کند و مقدار اشباع آب در ناحیه شسته عبارت است از:

$$(S_{xo})_{EPT} = \frac{\phi_{EPT}}{\phi_{ND}}$$

که،  $\phi_{ND}$  مقدار تخلخل حاصل از نمودار نوترون یا چگالی است.

### ابزار EPT

دو گونه ابزار EPT در حال حاضر کاربرد دارند EPT-D و EPT-G که ADEPT نیز نامیده می‌شود. تفاوت این ابزار در آرایه فرستنده و گیرنده است. ابزار EPT-G دارای شعاع کاوش بیشتر است.

### فاکتور مؤثر بر EPT

ناهمواری‌های دیواره چاه در گل‌های پایه آبی بر اندازه‌گیری تأثیر می‌گذارد. بالعکس در گل‌های پایه نفتی بی‌تأثیر است. افزایش قطر چاه به دلیل افزایش حجم گل حفاری در آن بر EPT تأثیرگذار است.

### کاربرد لای EPT

- تعیین هیدروکربن باقی‌مانده در صورتی که  $R_w$  نامعلوم باشد و بدون در نظر گرفتن شوری آب.
- وجود یا حرکت هیدروکربن در نفت سنگین یا ماسه‌سنگ‌های قیردار.
- تعیین اشباع آب باقی‌مانده ( $S_{wirr}$ ) در گل‌های پایه روغنی (به جای نمودار  $R_{xo}$ ) و قادر است که نمودارهای دیگر را که تحت تأثیر نفوذ گل پایه روغنی در سازند قرار گرفته تصحیح نماید.
- تأمین  $R_{xo}$  مصنوعی برای مطالعه تغییرات نمایی سیمان‌شدگی ( $m$ ) در فرمول آرچی.

کج مثال ۱: در کدام نمودار، آب و نفت با دقت زیادی از هم متمایز می‌شوند؟

- Sonic (۴)
LDT (۳)
EPT (۲)
FDC (۱)

پاسخ: گزینه «۲» از EPT، ثابت دی‌الکتریک آب (۷۸/۳) و نفت ۲ می‌باشد که به صورت کاملاً مجزا از یکدیگر می‌باشند.

کج مثال ۲: کدام گزینه در مورد نمودار EPT صحیح نیست؟

(۱) درصد نمک آب بر نتایج آن تأثیر ندارد.

(۲) برای تلفیق لایه‌های هیدروکربور، از لایه‌های آبدار استفاده می‌شود.

(۳) سرعت انتشار امواج صوتی را در اطراف چاه اندازه‌گیری می‌کند.

(۴) برای تصحیح نمودارهایی که تحت تأثیر نفوذ گل پایه نفتی هستند، استفاده می‌گردد.

پاسخ: گزینه «۳» نمودار EPT سرعت انتشار امواج الکترومغناطیسی را در اطراف چاه محاسبه می‌کند که تلفیق آن با نمودارهای چگالی و نوترون،

برای تمیزسازی آب و نفت به کار می‌رود.



# مدرسایان شریف

## فصل هفتم

### «نمودارهای دیگر»

#### لاگ کالیبر (Caliper Log)



دستگاه قطر سنج

اندازه‌گیری قطر چاه با استفاده از دو بازوی متقارن که در دو طرف دستگاه قرار گرفته، انجام می‌پذیرد. دو بازو به لغزنده (Cursor) یک پتانسیومتر متصل‌اند. تغییرات قطر چاه در عمق‌های مختلف باعث باز و بسته شدن بازوها شده و این حرکات، مقاومت الکتریکی را تغییر می‌دهد و در پتانسیومتر منعکس می‌شود. با یک درجه‌بندی ساده، تبدیل تغییرات مقاومت به تغییرات قطر امکان‌پذیر می‌شود. این لاگ همواره برای تصحیح لاگ‌های دیگر و تصحیح آنها بسیار مهم است، زیرا اکثر لاگ‌ها نیاز به تصحیح قطر چاه دارند.

#### دستگاه کالیبر

اغلب دستگاه‌های ترکیبی، یک قطر سنج چاه نیز دارند. دستگاه قطر سنجی می‌تواند به صورت مجزا نیز به کار می‌رود. دستگاه می‌تواند از ۱ تا ۴ بازوی فنی داشته باشد که با افزایش بازوها و نوع قرار گرفتن بازوهای آن درصد خطای آن کم می‌شود.

#### عوامل زمین‌شناختی مؤثر قطر چاه

به طور عمده، قطر چاه به عوامل زیر بستگی دارد:

الف) لیتولوژی به گونه‌ای که بعضی از سنگ‌ها می‌توانند:

۱- قابل حل در گل حفاری، مانند نمک، کارنالیت و مانند آنها.

۲- ریزشی باشند (مانند رسی، گراول‌ها و رس‌ها) که در این صورت در اثر ریزش، غارهایی در چاه ایجاد می‌شود.

۳- جاری شوند، مانند رس‌های آماسی یا تحت تراکم که در این صورت تنگ شدن چاه را به همراه خواهد داشت.

۴- متراکم باشند، که در این صورت چاه به اندازه قطر اسمی آن در می‌آید.

ب) بافت و ساخت سنگ، این پارامترها بر تخلخل و تراوایی سنگ تأثیر می‌گذارند که این دو خود تعیین‌کننده گسترش رخنه و ضخامت گل کبره حاصل روی دیواره چاه هستند.

#### کاربردها

- تعیین زون‌های متخلخل و تراوا (وجود گل کبره) و ضخامت گل کبره.

- اندازه حجم چاه برای ارزیابی حجم سیمان:

$$V_x = \frac{d_h^2}{4} + 0.01 \quad (\text{حجم چاه، لیتر بر متر})$$

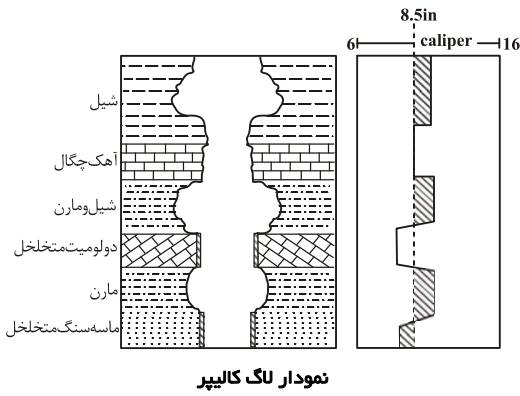
$d_h$  بر حسب اینچ است.

- در تصحیح لاگ‌ها کاربرد دارد.

- بررسی لیتولوژی

#### نمودار لاگ کالیبر

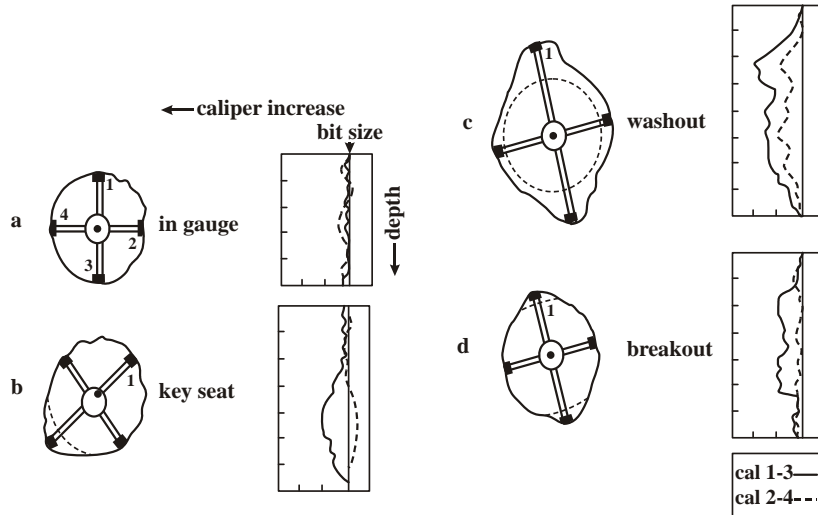
همان‌طور که گفته شد با توجه به نوع سازند امکان ریخته شدن دیواره و تشکیل گل کبره وجود دارد. پس در مقابل سازندهای مختلف قطری برابر، کمتر یا بیشتر از قطر چاه را نشان می‌دهد.



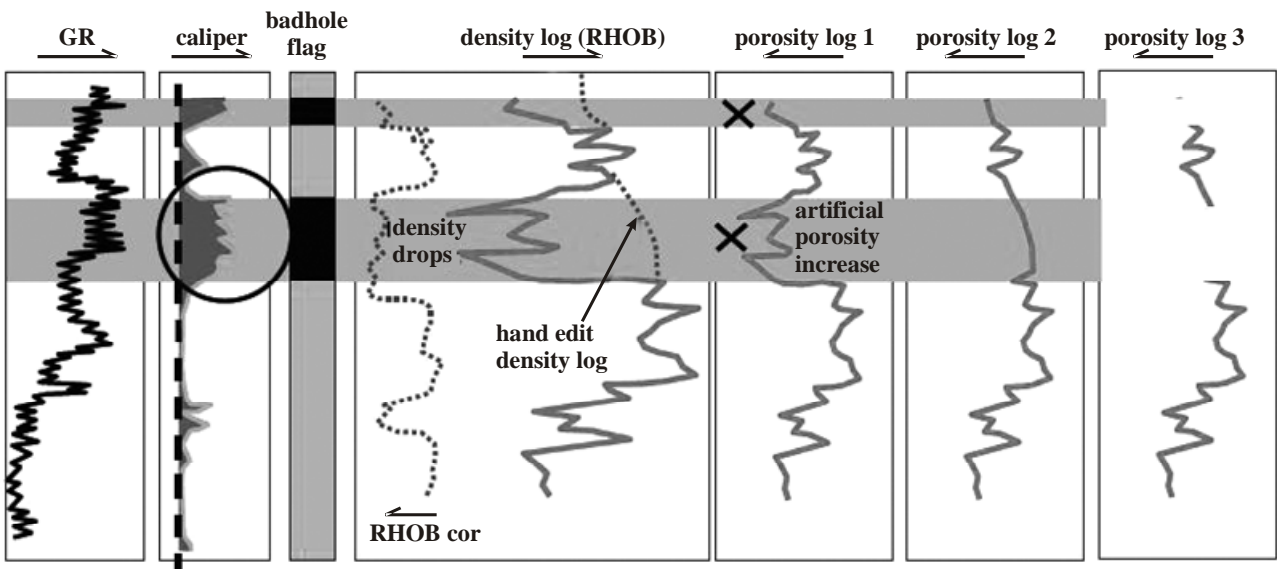
با توجه به شکل در مقابل لایه شیلی، شیل و مارن و لایه مارنی، کالیبر مقدار بیشتری از  $8\frac{1}{4}$  که اندازه قطر چاه است را نشان می‌دهد. زیرا این لایه‌ها در حین حفاری دچار ریزش می‌شوند. اما در مقابل لایه مارنی به دلیل چسبندگی بیشتر در این لایه‌ها مقدار کمتری ریزش حاصل می‌شود. لایه‌های دولومیتی متخلخل و ماسه‌سنگی به دلیل اینکه، تراوا هستند، فیلتره گل در آن نفوذ کرده و گل کبره تشکیل می‌شود. این گل کبره باعث می‌شود که قطر چاه کاهش را نشان دهد. در مقابل لایه‌های چگال آهکی نیز به دلیل نفوذ نداشتن فیلتره گل، گل کبره زیادی تشکیل نمی‌شود، همچنین این لایه ریزش زیادی ندارد.

معمولاً سه مشکل باعث افزایش قطر چاه و در نتیجه افزایش قرائت نمودار قطر سنج می‌شوند:

- الف) **key seat یا Dogleg**: این مورد زمانی ایجاد می‌شود که جهت چاه تغییر کرده و رشته حفاری باعث فرسایش قسمتی از دیواره چاه می‌شود.
- ب) **Breakouts**: این مورد زمانی ایجاد می‌شود که تنش میان نیروهای رشته حفاری و دیواره چاه باعث از بین رفتن و یا کنده شدن قسمتی از دیواره چاه می‌شود.
- ج) **Washouts**: به هنگام حفاری و چرخش گل حفاری، قسمتی از دیواره چاه که سست‌تر است، شسته می‌شود و باعث افزایش قطر چاه می‌شود.



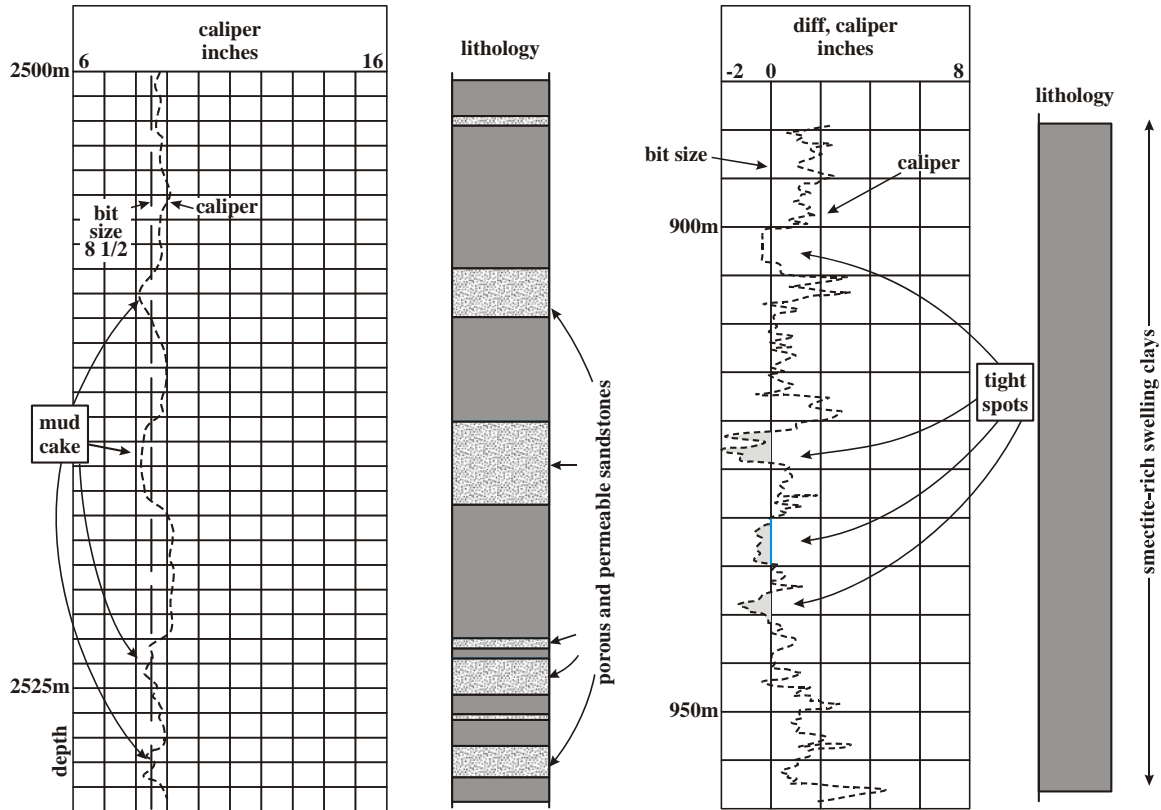
در برخی موارد افزایش بی‌مورد قطر چاه در نمودار، اشتباه در تفسیر نمودارها را جبران می‌کند. شکل زیر یکی از این اشتباهات را در تخمین بیش از واقعیت مقدار تخلخل و تشخیص آن به کمک نمودار قطر سنج نشان می‌دهد.



افزایش قرائت نمودار قطر سنج در برابر لایه‌ای که تخلخل آن بیش از واقعیت تخمین زده شده است.

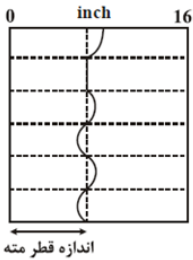


با توجه به اینکه اندود گل در برابر لایه‌های متخلخل و تراوا تشکیل می‌شود، از این رو مقدار قرائت نمودار قطر سنج کم می‌شود، که نشان‌دهنده لایه متخلخل تراوا می‌باشد. از طرفی تورم رس‌ها در لایه‌های شیلی نیز یکی از عوامل کاهش نمودار قطر سنج می‌باشد.



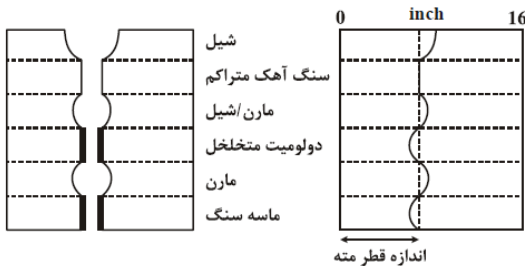
کاهش قرائت نمودار قطر سنج نشان‌دهنده تورم رس‌ها (شکل راست) یا اندود گل در برابر لایه‌های متخلخل تراوا (شکل چپ)

کج مثال ۱: شکل زیر نمودار Caliper (قطر سنجی) را نشان داده است. کدام گزینه صحیح است؟



- ۱) سنگ آهک متراکم: A، ماسه‌سنگ با لوله جداري: B، مارن: C
- ۲) سنگ آهک متراکم: A، مارن: B، ماسه‌سنگ با لوله جداري: C
- ۳) شیل: A، ماسه‌سنگ با لوله جداري: B، مارن: C
- ۴) شیل: A، مارن: B، ماسه‌سنگ با لوله جداري: C

پاسخ: گزینه «۲» در شکل زیر هر لایه مشخص شده است.



لاگ Caliper، نموداری است که قطر چاه را اندازه می‌گیرد و در وسط چاه قرار می‌گیرد. برای لایه‌ی A قطر چاه برابر با قطری است که اندازه‌گیری شد و این نشان از متراکم بودن سازند دارد. برای لایه‌ی B با توجه به اینکه Caliper قطر بیشتری را نسبت به اندازه مته (دانه‌های چاه) اندازه‌گیری کرده، بنابراین نشان از ریزش دانه‌های اطراف چاه در آن لایه‌ی خاص دارد که بین گزینه‌های ۱ و ۲ با توجه به اینکه ماسه‌سنگ تراوا است و برای آن casing گذاری می‌کنند و قطر کمتر می‌شود، بنابراین C ماسه‌سنگ با لوله جداري و B مارن خواهد بود. شیل نیز همچون مارن رفتار می‌کند. بنابراین گزینه‌های ۳ و ۴ رد می‌شوند.

کج مثال ۲: کدام گزینه از کاربردهای نمودار قطر سنج (Caliper) نمی‌باشد؟

۴) بررسی لیتولوژی

۳) تخمین میزان تخلخل

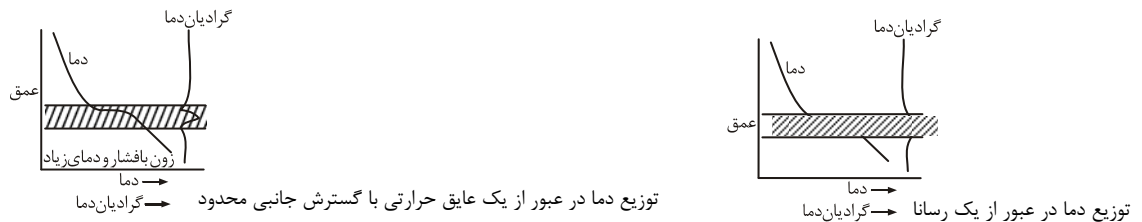
۲) ارزیابی حجم سیمان

۱) تعیین ضخامت اندود گل

پاسخ: گزینه «۳» سه گزینه‌ی دیگر از کاربردهای نمودار قطر سنج می‌باشند.

## چاهنگاری دماسنجی

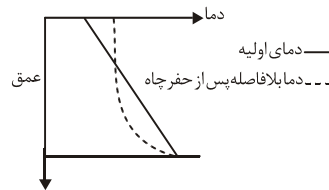
می‌دانیم که دمای سازند با افزایش عمق افزایش می‌یابد و در شرایط تعادل طبیعی، آهنگ این افزایش **گرادیان زمین گرمایی** نامیده می‌شود. این گرادیان بر حسب محل جغرافیایی و رسانندگی گرمایی سازند تغییر می‌کند. گرادیان‌ها معمولاً در سازند رسا، ضعیف (مانند نمک و انهدیریت) و در حالت عکس مانند رس قوی هستند.



## تغییرات دما در عبور از لایه رسا و عایق

دماهای موجود در چاه به گرادیان زمین گرمایی محل چاه بستگی دارد. اما از طرف دیگر تعادل حرارتی در نزدیکی چاه بر اثر گردش گل مغشوش می‌شود. در واقع گردش گل، سنگ‌هایی را که چاه از آنها عبور می‌کند، به طور مشخصی سرد می‌کند. در تماس گل و سنگ تبادل گرما توسط پدیده همرفت و در سنگ‌ها از طریق رسانش انجام می‌پذیرد. این تبادل گرما بین گل و سنگ که دارای اثر مشخصی است باعث می‌شود پروفیل دما در چاه از پروفیل زمین گرمایی اولیه تفاوت زیادی داشته باشد.

شکل زیر اختلاف بین پروفیل‌های یاد شده را نشان می‌دهد. همان‌طوری که پیداست قسمت فوقانی چاه دارای دمایی بیشتر از دمای اولیه زمین و قسمت تحتانی دارای دمای کمتری است. فقط در کف چاه دما به دمای اولیه زمین نزدیک می‌شود که در اینجا نیز اختلافی در حدود ۱۰ تا ۲۰ سانتی‌گراد وجود دارد. به محض قطع شدن جریان گل، دمای زمین در چاه به طرف دمای اولیه زمین گرایش پیدا می‌کند، ولی از آنجا که تبادل حرارت بین سنگ‌ها و گل از طریق رسانش فعال نیست، رسیدن به حالت تعادل (دمای اولیه زمین) به کندی صورت می‌پذیرد.



## تغییرات دما نسبت به عمق قبل و بعد از حفر چاه

## اندازه‌گیری دما - ناپیوسته (نقطه‌ای)

معمولاً همراه دستگاه اندازه‌گیری، حداکثر یک دماسنج نیز برای اندازه‌گیری دمای کف چاه به درون چاه فرستاده می‌شود. اگر اندازه‌گیری کف چاه را تکرار کنیم، مشاهده می‌شود که این دما بر حسب زمان افزایش می‌یابد. این مطلب بیانگر آن است که دمای کف چاه به طرف دمای تعادل میل می‌کند.

با استفاده از اندازه‌گیری‌هایی که در زمان‌های مختلف به دست می‌آید، می‌توان دمای حقیقی اولیه زمین را در کف چاه با استفاده از روش نقطه‌گذاری هورنر

$$T = k \log\left(\frac{\Delta t + t_k}{\Delta t}\right) + T(\infty) \quad \text{(Horner)} \quad \text{به دست آورد. رابطه هورنر به صورت مقابل می‌باشد:}$$

$t_k$ : مدت زمانی که کف چاه در اثر حفر و گردش گل سرد می‌شود.

$t_1$ : زمان گرم شدن که به فاصله زمانی بین توقف جریان گل و اولین اندازه‌گیری دما مطابقت دارد.

$t_2$ : زمان گرم شدن بین توقف جریان گل و دومین اندازه‌گیری.

## اندازه‌گیری دما - پیوسته

این اندازه‌گیری توسط دماسنجی که عنصر حساس آن یک رشته فلزی است و مقاومت الکتریکی آن با دما تغییر می‌کند، انجام می‌پذیرد. سیم مذکور از آلیاژی انتخاب می‌شود که در مقابل خوردگی مقاوم باشد و در نتیجه بتواند در محدوده دماهای چاه و بیشتر از آن (معمولاً صفر تا ۳۵۰ درجه فارنهایت) به صورت خطی عمل می‌کند. علاوه بر آن ثابت زمانی و اثر ژول (مربوط به عبور جریان برای اندازه‌گیری) نیز بایستی در آن ضعیف باشد.

**نکته ۱:** معمولاً ثابت دما در اثنای پایین بردن دستگاه انجام می‌شود تا به این طریق تعادل حرارتی، در اثر به هم خوردگی گل در عبور سوند و کابل مغشوش نشود.

## کاربردها

## چاه‌باز

- ۱- تعیین نظام زمین گرمایی
- ۲- بررسی لیتولوژیکی
- ۳- تعیین زون‌های فرار گل یا برعکس ورود سیال، به خصوص گاز



# مدرسارن شریف

## فصل هشتم

### «بر آورد تخلخل و اشباع»

#### مقدمه

تعیین تخلخل سنگ با استفاده از یک یا ترکیبی از این نمودارها به دست می‌آیند: ۱- نمودار اکوستیک ۲- نمودار چگالی ۳- نمودار نوترون

کدام گزینه بیانگر ابزارهای اندازه‌گیری تخلخل می‌باشند؟

۱) صوتی، چگالی، مقاومت ویژه ۲) نوترون، چگالی، مقاومت ویژه ۳) نوترون، چگالی، صوتی ۴) نوترون، صوتی، مقاومت ویژه

پاسخ: گزینه «۳» نمودار نوترون، چگالی و صوتی، نمودارهای تخلخل‌اند. نمودار نوترون تخلخل کل و نمودار تخلخل اولیه را محاسبه می‌کند.

#### تعیین تخلخل با استفاده از نمودار اکوستیک

معادلات مختلفی با استفاده از نمودار اکوستیک، تخلخل را محاسبه می‌کنند.

#### معادله میانگین زمانی وایلی

وایلی مطالعات آزمایشگاهی به منظور تعیین رابطه تخلخل و زمان گذر موج را انجام داد. برای سازندهای متراکم و تمیز وایلی رابطه زیر را ارائه نمود:

$$t_{\log} = \phi t_f + (1 - \phi)t_{ma} \Rightarrow$$

$$\phi_s = \frac{t_{\log} - t_{ma}}{t_f - t_{ma}}$$

که در رابطه فوق داریم:

$$t_{ma}: \text{زمان گذر از ماتریکس } \left(\frac{\mu s}{ft}\right)$$

$$t_{\log}: \text{قرائت نمودار صوتی } \left(\frac{\mu s}{ft}\right)$$

$$t_f: \text{زمان گذر از سیال اشباع‌کننده فضای خالی (حدود } 189 \frac{\mu s}{ft} \text{ برای آب‌سازندی)}$$

نکته: معمولاً ماسه‌سنگ متراکم و فشرده دارای تخلخل ۱۵ تا ۲۵ درصد است.

#### معادله تجربی براساس داده‌های میدانی

مشکلات استفاده از معادله وایلی باعث شد تا رابطه دیگری برای مشاهدات میدانی ارائه شود:

$$\phi_{sv} = C \left( \frac{t_{\log} - t_{ma}}{t_{\log}} \right)$$

که در رابطه فوق داریم:

C: ثابت با محدوده بین ۰/۶۲۵ و ۰/۷ بسته به شرایط استفاده‌کننده (معمولاً از ۰/۷ استفاده می‌شود) برای مخازن گازی (C = ۰/۶) است.

#### وجود شیل در سازند

تخلخل شیل‌ها معمولاً تخلخل غیرمفید است و در ارزیابی ذخیره سیالاتی که شیل‌ها نسبت به آن‌ها ناتراوا هستند، قسمت شیلی می‌بایست حذف شود. بنابراین در محاسبه زمان گذر موج در سازند باید زمان مربوط به شیل از کل زمان گذر کم شود. بنابراین:

$$t_{\log} = \phi_{tf} + (1 - \phi - V_{sh})t_{ma} + t_{sh} V_{sh}$$

که در رابطه فوق داریم:

$t_{sh}$ : زمان گذر شیل (در واحد طول)

$V_{sh}$ : کسر حجمی شیل در سازند (با استفاده از نمودار پرتوی گامای طبیعی، SP و نمودارهای مقاومت ویژه الکتریکی به دست می‌آید)

**عدم تراکم سازند**

در فشارهای کم، سنگ‌ها مثل ماسه‌سنگ‌ها به اندازه کافی فشرده نشده و این عدم تراکم روی زمان گذر موج در آن‌ها تأثیری بیشتر از تأثیر روی تخلخل آن، دارد. بنابراین در صورت وجود واحدهای غیرمتراکم، تصحیحاتی باید صورت پذیرد که از ضریبی به نام ضریب اصلاح فشردگی  $C_p$  استفاده می‌شود.

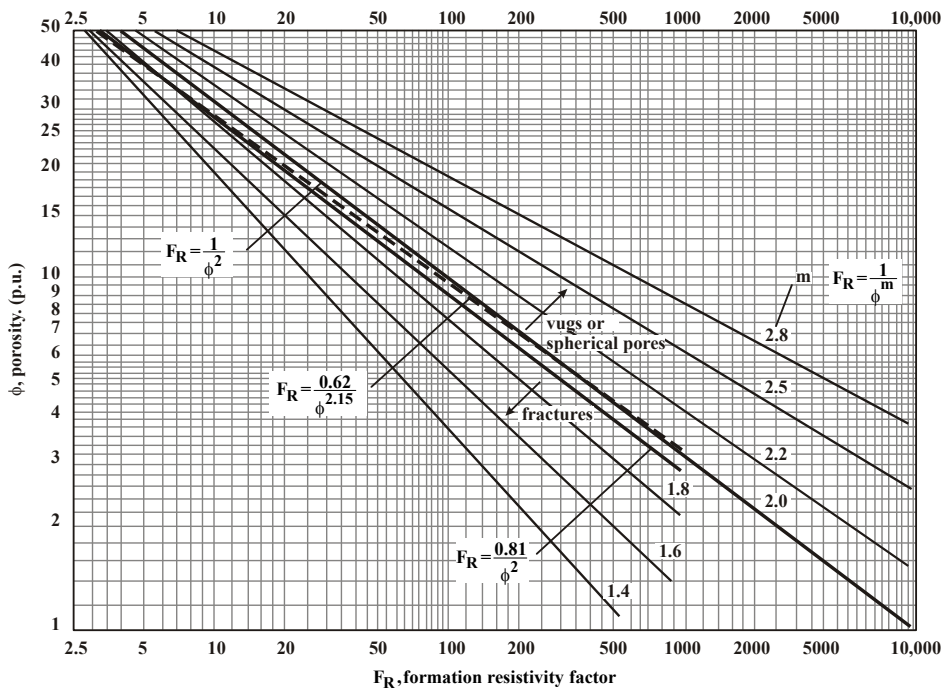
$$\phi_s = \frac{t_{log} - t_{ma}}{t_f - t_{ma}} \times \frac{1}{C_p}$$

$$C_p = \frac{t_{sh}}{100}$$

$t_{sh}$ : زمان گذر موج برحسب میکروثانیه بر فوت در شیل‌های پیرامون ماسه‌سنگ نافشرده است.

روش‌های مختلف برای به‌دست آوردن  $C_p$  عبارت‌اند از:

- روش  $R_0$ : مقدار  $R_0$  مشخص شده از مقاومت ویژه بر  $R_w$  تقسیم شده تا  $F$  (ضریب مقاومت سازند) به‌دست می‌آید. سپس تخلخل  $\phi$ ، با استفاده از  $F$  و شکل زیر به دست می‌آید.



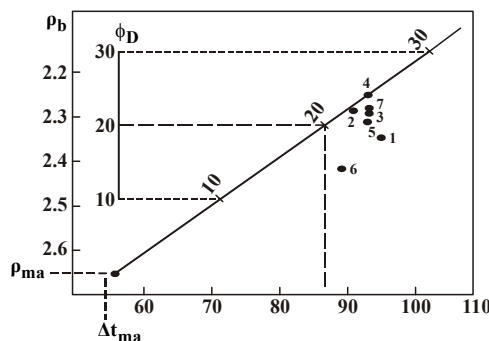
تعیین تخلخل با استفاده از ضریب مقاومت سازند

تخلخل به‌دست آمده با  $\phi_s$  محاسبه شده، مقایسه شده (تخلخل صوتی) و مقدار  $C_p$  عبارت است از:

$$C_p = \frac{\phi_s}{\phi_{\text{شکل}}}$$

که در رابطه فوق  $C_p$  محاسبه شده را می‌توان برای سازندهای هیدروکربن‌دار استفاده نمود.

- روش نمودار چگالی صوتی: زمانی که نمودارهای صوتی و چگالی در دست می‌باشند،  $\Delta t$  روی محور افقی و چگالی ( $\rho_{ma}$ ) روی محور قائم رسم می‌شوند. اگر ماسه‌ها، گازی نداشته باشند، خطی که نقطه‌ی ماتریکس را به نقاط واقع در بخش بالایی سمت راست وصل می‌کند، خط ماسه تمیز می‌گویند.



نمودار چگالی بر حسب زمان گذار

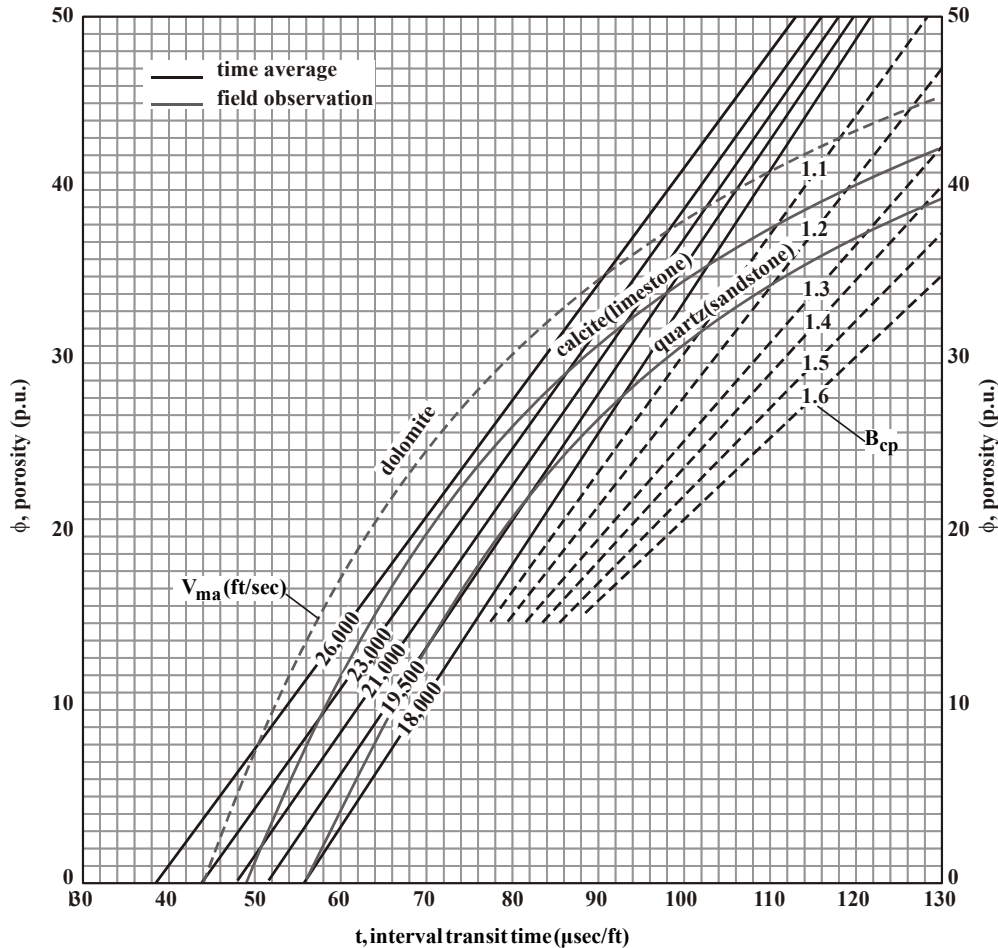


به ازای هر مقدار تخلخل روی این خط، یک مقدار زمان  $t$  وجود خواهد داشت. زمان یافته شده  $t$  را روی شکل زیر مشخص کرده و به صورت عمودی بالا می‌رویم تا با خط افقی مشخص‌کننده  $\phi$  تقاطع ایجاد شود. محل تقاطع  $B_{cp}$  همان  $C_p$  است.

$$C_p = \frac{\phi_s}{\phi_D}$$

اگر ماسه تمیز و اشباع از مایع باشد آنگاه:

$$V_f = 5300 \text{ ft/sec}$$



تعیین تخلخل با استفاده از زمان گذار در نمودار صوتی

روش نوترون: در دو روش قبل به ماسه تمیز نیاز است. اگر ماسه‌ها شیلی باشند از هیچ‌یک از دو روش قبل نمی‌توان استفاده کرد. اگر نمودار نوترون SNP

$$C_p = \frac{\phi_s}{\phi_N} \quad \text{یا CNL آماده باشند، داریم:}$$

### اثر درزه‌ها و شکستگی‌ها

درزه‌ها و شکستگی‌ها مجراهای مهم گذر سیال می‌باشند و نقش مهمی در تخلخل ایفا می‌کنند. از آنجا که موج، سریع‌ترین مسیر ممکن را برمی‌گزیند، در نزدیکی درزه‌ها و شکستگی‌ها به صورت عمود بر آنها حرکت نموده و کمتر تحت تأثیر شکستگی‌ها قرار می‌گیرد. بنابراین در سنگ‌های دارای شکاف، تخلخل محاسبه‌شده از روش صوتی از تخلخل واقعی کمتر است. پس تخلخل ثانویه اثر چشمگیری روی سرعت امواج ندارد. بنابراین تخلخل حاصل از روش صوتی در این حالت، برابر تخلخل اولیه است.

که در رابطه فوق داریم:

$$\phi_t = \phi_s + \phi_r \quad \text{تخلخل کل واقعی، } \phi_s: \text{تخلخل محاسبه‌شده به روش صوتی، } \phi_r: \text{تخلخل ثانویه}$$

$$\phi_t = \phi_N - \phi_s$$

بنابراین اگر تخلخل کل را از روش‌های دیگر به دست آوریم (معمولاً نوترون) می‌توان تخلخل ثانویه را محاسبه نمود:

### اثر گازهای تحت فشار

سازندهای تحت فشار گاز، سازندهایی می‌باشند که به وسیله لایه‌های شیلی ناتراوا محاصره شده‌اند. بنابراین اشباع از گاز، بیشتر از شرایط دیگر است و زمان گذر موج بیشتر از شرایط عادی است.