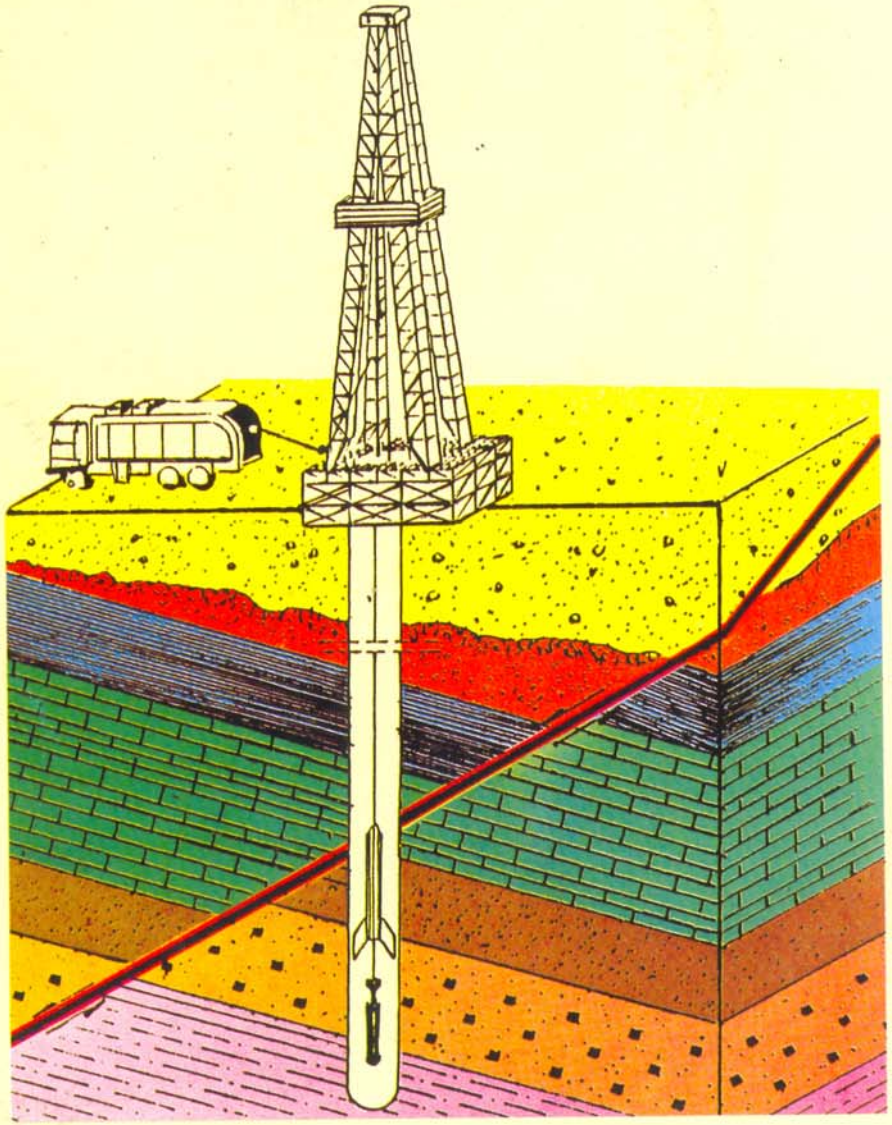
Well Logging

Dr. Hamid Reza Ramazi
Amir Kabir University

1998

SANAM Publishing Co. Tehran: P.O. box. 11495-397.
ISBN: 964-91719-2-4

چاه پیمایی



تألیف دکتر حمید رضا رمضی

استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر

چاه پیمایی

تألیف حمید رضا رمضی
استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر

انتشارات صنم
چاپ دوم ۱۳۸۵

فهرست برگه

رمضی، حمید رضا
چاه پیمایی/ تألیف حمید رضا رمضی .-- تهران: صنم، ۱۳۷۷.
۲۷۴ ص.: مصور، نمودار.
ISBN: 964-91719-2-4
فهرستنویسی براساس اطلاعات فیپا.
عنوان به انگلیسی: Well Loggingeza
چاپ دوم: ۱۳۸۵: ۲۵۰۰ تومان.
کتابنامه: ص. ۲۷۳ – ۲۷۴

۱. اکتشافهای زیرزمینی -- روشهای ژئوفیزیکی. ۲. آبهای زیرزمینی -- حفاری و استخراج. ۳. سکوهای دریایی. الف عنوان.

TN ۲۷۰ / ۲ چ ۸ ر/ ۶۲۲ / ۱۵
کتابخانه ملی ایران ۷۷ م - ۱۶۵۲۵

شابک : ۴ – ۲ - ۹۱۷۱۹ - ۹۶۴ ISBN : 964-91719-2-4

عنوان: چاه پیمایی
تألیف: حمید رضا رمضی
ناشر: انتشارات صنم
صفحه آرا: مرضیه پورشه
شمارگان: ۱۰۰۰ نسخه
چاپ دوم: ۱۳۸۵
قیمت: ۲۵۰۰ تومان
چاپ و صحافی: زحل چاپ
کلیه حقوق برای ناشر محفوظ است
انتشارات صنم: تهران – صندوق پستی ۳۹۷ - ۱۱۴۹۵
تلفن همراه: ۰۹۱۲۱۵۰۲۶۲۳
تلفن: ۷۷۵۳۸۰۲۲
نمابر: ۷۷۵۰۱۷۵۷
Email: Sanam_ pub@yahoo.com
مرکز پخش: کتابیران- تهران، میدان انقلاب، خیابان شهید وحید نظری، بین اردیبهشت و فروردین، پلاک ۲۶۲، تلفن: ۶۶۴۰۹۲۱۸ ۵- ۶۶۴۸۳۵۴۴

دل گرچه در این بادیه بسیار شتافت

یک موی ندانست ولی موی شکافت

پیشنوشتار

همگام با رشد فن‌آوری در رشته‌های مختلف، نیاز به مواد اولیه نیز آهنگی فزاینده می‌یابد. گسترش فن‌آوری‌های مطرح روز مانند صنایع اتمی، مهندسی پزشکی، ساخت ابزار مقاوم سبک و... نیازمند عناصر کمیاب است و یافتن این عناصر در پرتو کاوش‌های گستردهٔ اکتشافی امکان‌پذیر می‌گردد. از سوی دیگر پایان یافتن معادن سطحی مربوط به مواد اولیه پر مصرف، بشر را ناچار نموده است که به منابع زیرسطحی روی آورد. نبود امکان دسترسی مستقیم به منابع زیرسطحی، اهمیت روش‌های مطالعاتی غیرمستقیم را روشن می‌نماید. مطالعه ویژگی‌های فیزیکی مواد پیرامون گمانه‌ها و چاه‌ها نقش ارزنده‌ای در شناسایی کمی و کیفی این مواد دارد. این مطالعات به وسیلهٔ نمودارگیری فیزیکی از چاه انجام می‌شود که امروزه گسترش فراوانی یافته و روش‌های گونه‌گونی را دربرمی‌گیرد. مجموعهٔ این روش‌ها چاه‌پیمایی نامیده می‌شود.

مطالعات چاه‌پیمایی در ارزیابی منابع نفتی نقش بسیار بارزی را ایفا می‌کنند و اهمیت این مطالعات به حدی است که هر ساله ابزار جدیدی که کارایی بیشتری دارند طراحی و به کار گرفته می‌شوند. افزون بر مهندسی نفت، روش‌های چاه‌پیمایی در ارزیابی آبخوان‌ها و چاه‌های آب، مهندسی اکتشاف معدن، مکانیک سنگ، مطالعات ساختگاهی و حتی ژئوفیزیک محیط‌زیست مورد استفاده قرار می‌گیرند. از این رو آموزش این روش‌ها برای دانشجویان و کارشناسان رشته‌های مربوط لازم است.

با وجود استفاده از رسانه‌های نوین آموزشی مانند فیلم، کامپیوتر و غیره هنوز کتاب جایگاه ویژه و

یگانه‌ای در آموزش دارد. کمبود کتاب چاه‌پیمایی به زبان فارسی و نبود کتاب چاه‌پیمایی که شامل روش‌هایی که در اکتشاف کانسارها (غیر از نفت) مورد استفاده قرار می‌گیرند، انگیزهٔ تهیه این کتاب بوده است. این کتاب براساس فهرست درس چاه‌پیمایی رشتهٔ مهندسی اکتشاف معدن تهیه شده و امید است که افزون بر دانشجویان و مهندسان معدن، بتواند مورد استفادهٔ دانشجویان و علاقه‌مندان دیگر به ویژه دانشجویان ژئوفیزیک، مهندسی نفت، آب‌های زیرزمینی، زمین‌شناسی، مکانیک سنگ و عمران نیز قرار گیرد.

نمودارهای کمکی برای تفسیر داده‌های چاه‌پیمایی به ویژه نمودارهایی که از طرف شرکت شلومبرژه تهیه شده‌اند کاربرد شایان توجهی در تفسیرهای کمی نمودارهای چاه‌پیمایی دارند. با توجه به اینکه اکثر این نمودارها بیشتر در ارزیابی‌های کمی مهندسی نفت کاربرد دارند و با در نظر گرفتن شمار زیاد و افزایش روزافزون آنها از ارائه این گونه نمودارهای کمکی در کتاب حاضر خودداری شده است. نظر خوانندگان گرامی را به انتشارات شرکت شلومبرژه جلب می‌نمایم.

فرصت را مغتنم شمرده از تمام اساتیدی که مشوق اینجانب بوده‌اند و از دوستانی که در به انجام رسیدن این کار همکاری داشته‌اند سپاسگزاری می‌نمایم.

حمیدرضا رمضی
استادیار دانشگاه صنعتی امیرکبیر
تهران
تابستان ۱۳۷۷

فهرست مطالب

عنوان صفحه

دیباچه ۱۷

۱. ابزار چاه پیمایی ۲۳

کامیون ۲۳

سوند ۲۴

سیم ۲۴

چرخ ۲۵

ژنراتور تولید نیرو ۲۵

حسابگرها و پردازشگرها ۲۵

نگارنده‌ها ۲۶

ابزار کوچک چاه پیمایی ۲۶

۲. ویژگی‌های فیزیکی مورد استفاده در چاه‌پیمایی ۲۷

مقاومت الکتریکی ۲۷

مقاومت ویژه الکتریکی ۲۸

رسانندگی الکتریکی ۲۸

رسانندگی ویژه الکتریکی ۲۹

رسانندگی الکتریکی سازندهای زمین‌شناسی ۲۹

عنوان | صفحه

اثر غلظت املاح آب سازند روی رسانندگی ویژه ۳۰
رابطه رسانندگی ویژه الکتریکی با درجهٔ حرارت ۳۱
تخلخل ۳۲
انواع زایشی تخلخل ۳۳
الف- تخلخل نخستین ۳۳
ب- تخلخل پسین ۳۳
تخلخل مرتبط ۳۴
تخلخل مؤثر ۳۴
نفوذپذیری ۳۵
واحد نفوذپذیری ۳۶
اشباع ۳۶
ضریب سازند ۳۸
رابطه اشباع و ضریب سازند ۳۹
شاخص مقاومت ۴۰
تأثیر نفوذ گل حفاری در پیرامون چاه ۴۰
نشانه‌های مورد استفاده در چاه‌پیمایی ۴۴
پرسش و تمرین ۴۵

۳. پتانسیل خودزا ۴۷
منشاء اصلی پتانسیل خودزا در گمانه‌ها ۴۸
منشاء دیگر *SP* ۵۳
پتانسیل ایستا ۵۴

عنوان **صفحه**

شبه پتانسیل خودزا ۵۸
ضریب تخفیف ۵۹
تأثیر هیدروکربورها روی *PSP* ۵۹
ابزار اندازه‌گیری پتانسیل *SP* ۵۹
شکل نمودار پتانسیل خودزا *SP* ۶۰
خط شیل ۶۱
خط ماسه سنگ ۶۲
ارتباط *SP* با شرایط تراوش گل حفاری ۶۳
پتانسیل خودزا ناشی از اکسیداسیون و احیاء ۶۵
اثر تغییر غلظت گل حفاری روی نمودار *SP* ۶۶
تأثیر نمک‌های مختلف آب سازند روی نمودار *SP* ۶۷
نوفه‌ها در برداشت‌های *SP* ۶۷
کاربردهای نمودار *SP* ۶۸
کاستی‌های روش *SP* ۶۹
پرسش و تمرین ۷۰

۴. نمودارهای الکتریکی (مقاومت ویژه) ۷۱
رسانندگی الکتریکی ۷۱
مقاومت الکتریکی ۷۲
رسانندگی الکترولیتی ۷۲
کاربرد مقاومت ویژه الکتریکی در ژئوالکتریک ۷۳
روش نرمال ۷۵

عنوان | صفحه

نقشهٔ اثر سوند در روش نرمال ۷۶
پژوهٔ سوند ۷۷
روش لترال ۷۷
نقشهٔ اثر سوند در روش لترال ۷۸
شکل نمودار مقاومت ویژه در روش نرمال ۷۸
شعاع کاوش ۸۲
برتریهای روش نرمال ۸۲
کاستیهای روش نرمال ۸۳
شکل نمودار در روش لترال ۸۳
برآورد مقاومت ویژه توسط نمودارهای نرمال و لترال ۸۸
نمودارهای جریان متمرکز *Focusing logs* ۸۸
لترولوگ ۷ ..... ۹۲
لترولوگ ۳ *LL3* ۹۳
لترولوگ ۸ *LL8* ۹۳
لترولوگ دوگانه *DLL* ۹۴
روش جریان متمرکز کرمانی ۹۵
شکل نمودار لترولوگ ۹۵
تصحیحها در روشهای جریان متمرکز ۹۷
خرد نمودارهای مقاومت ویژه ۹۹
اندازهگیری مقاومت گل حفاری توسط خردسوندها ۱۰۱
روش القائی ۱۰۱
اساس روش القائی ۱۰۲

عنوان | صفحه

شکل نمودار رسانندگی ویژه ۱۰۳
نمودار القائی متمرکز ۱۰۵
تأثیر جداری ۱۰۷
ضریب هندسی ۱۰۸
شبه ضریب هندسی ۱۰۸
تأثیر ناحیه اغشته ۱۰۹
نمودار القائی و نمودار لترولوگ ۱۱۰
کاربرد روش القایی ۱۱۰
نمودار *Proximity* ۱۱۰
برآورد مقاومت ویژه توسط نمه‌دارهای حاصل از خرد سوندها ۱۱۲
برآورد مقاومت ویژه ناحیه آغشته R_{xo} ۱۱۲
روشهای الکتریکی که بیشتر در اکتشاف معادن کاربرد دارند ۱۱۳
روش پتانسیل الکترودی *(EP)* ۱۱۴
ابزار اندازه‌گیری ۱۱۴
نمودار جریان ۱۱۶
نمودار قطبش القائی ۱۱۷
پرسش و تمرین ۱۲۴

۵. نمودارهای رادیواکتیویته (روشهای هسته‌ای) ۱۲۷
عناصر رادیواکتیو ۱۲۷
پرتو آلفا ۱۲۷
پرتو بتا ۱۲۸

عنوان	صفحه

پرتوگاما ۱۲۸
ثابت زمانی ۱۳۱
ضخامت نیمه ۱۳۲
عناصر عمدهٔ رادیواکتیو ۱۳۲
واحد رادیواکتیویتهٔ سنگها ۱۳۲
اثر جرم مخصوص سازند ۱۳۳
روش‌های هسته‌ای در چاه پیمایی ۱۳۴
نمودار پرتوگامای طبیعی *GR* ۱۳۵
ابزار اندازه‌گیری پرتوهای گاما طبیعی ۱۳۶
نمودار طیفی پرتوگاما *SGL* ۱۳۷
رادیومتری مصنوعی ۱۳۹
نمودار نترون – گاما ۱۳۹
نمودار نترون – نترون ۱۴۲
ابزار نترون – نترون ۱۴۳
شعاع کاوش در روشهای نترون ۱۴۶
اثر شوری آب روی نمودار تخلخل نترون ۱۴۶
اثر کانیهای آبدار ۱۴۷
اثر جنس سنگها ۱۴۷
اثر گازها ۱۴۸
کاربردهای نترون ۱۴۹
نمودار تپ نترون ۱۵۰
نمودار فعال سازی نترون ۱۵۲
نمودار گاما- گاما ۱۵۴
پرسش و تمرین ۱۵۹

عنوان | صفحه

۶ روشهای صوتی ۱۶۵
انواع امواج ۱۶۶
امواج پیکری ۱۶۶
امواج فشاری ۱۶۶
امواج برشی ۱۶۷
امواج سطحی ۱۶۸
امواج ریلی ۱۶۸
امواج لاو ۱۷۰
امواج استونلی ۱۷۰
ناپیوستگی‌های سرعتی و تبدیل امواج ۱۷۱
امواج مورد استفاده در چاه پیمایی ۱۷۳
ابزار صوتی ۱۷۵
سوندهای با یک فرستنده و دوگیرنده ۱۷۶
سوندهای مجهز به دو فرستنده و دوگیرنده ۱۷۷
ابزار صوتی *BHC* ۱۷۹
ابزار صوتی با بازهٔ بلند *LSS* ۱۸۱
ابزار آرایه‌های صوتی ۱۸۴
شعاع کاوش روشهای صوتی ۱۸۷
کل زمان گذر موج ۱۸۷
پرش سیگل‌ها ۱۸۸
ارائه نمودارهای صوتی ۱۸۹
اثر لایه‌هایی که فشار سیال در آنها زیاد است ۱۹۰
کاربردهای روش صوتی ۱۹۲
برآورد تخلخل توسط نمودار صوتی ۱۹۳

عنوان | صفحه

کاربرد امواج برشی ۱۹۶
پرسش و تمرین ۱۹۸

۷. نمودارهای مغناطیسی و الکترومغناطیسی ۲۰۱
نمودار خودپذیری مغناطیسی *MSL* ۲۰۱
سوندهای دارای یک سیم پیچ ۲۰۱
سوندهای دارای دو سیم پیچ ۲۰۴
کاربردهای نمودار خودپذیری مغناطیسی ۲۰۵
نمودار میدان مغناطیسی *MFL* ۲۰۶
کاربردهای نمودار مغناطیسی ۲۰۷
نمودار مغناطیس هسته‌ای ۲۰۷
کاربرد نمودار *NML* ۲۰۸
نمودارهای الکترومغناطیسی ۲۰۹
ابزار اندازه‌گیری روشهای الکترومغناطیسی ۲۱۰
ابزار *EPT* ۲۱۲
ارائه نمودارهای الکترومغناطیسی ۲۱۴
ابزار *ADEPT* ۲۱۴
تفسیر نمودارهای الکترومغناطیسی ۲۱۶
ابزار با شعاع گسترش زیاد *DPT* ۲۱۸
تمرین و پرسش ۲۲۲

۸. نمودارهای ویژگیهای هندسی گمانه و لایه‌ها ۲۲۵
نمودار قطرسنجی *CL* ۲۲۵

عنوان | صفحه

ابزار قطرسنجی ۲۲۵
شکل سنج چاه ۲۲۷
شکل سنج فرآوایی ۲۲۸
کاربردهای قطرسنجی ۲۲۹
نمودار میل سنجی ۲۲۹
نمودارهای شب‌سنجی ۲۳۰
تصویر برداری از گمانه ۲۳۱
نمودار گیرش سیمان ۲۳۶
نمودار تغییرات وزن مخصوص و سیمانکاری ۲۳۷
نمودار تغییرات درجه حرارت ۲۴۰
نمودار میل و انحراف چاه ۲۴۲
نمودار حرکت سیال ۲۴۳
پرسش و تمرین ۲۴۵

۹. برآورد مقاومت ویژه آب سازند و اشباع آب ۲۴۷
استفاده از شناسنامهٔ آب ۲۴۷
استفاده از تجزیه‌های شیمیایی ۲۴۸
استفاده از SP ۲۴۸
برآورد R_W از نمودارهای مقاومت ویژه ۲۵۲
روشهای تعیین اشباع از آب S_W ۲۵۲
برآورد S_W به وسیله خرد نمودارها ۲۵۶

عنوان | صفحه

۱۰. برآورد تخلخل ۲۵۷

برآورد تخلخل از نمودار صوتی ۲۵۷

وجود شیل در سازند ۲۵۹

نافشردگی سازند ۲۶۰

اثر درزه‌ها و شکستگی‌ها ۲۶۱

اثر گازهای تحت فشار ۲۶۲

پرش سیکلها ۲۶۳

برآورد تخلخل توسط روش نترون ۲۶۳

اثر قطر چاه و ویژگیهای فیزیکی گل حفاری ۲۶۵

اثر نوع سیال سازند روی نمودار نترون ۲۶۶

اثر شیل روی نمودار نترون ۲۶۶

اثر گاز روی نمودار نتروں ۲۶۶

اثر نوع سنگ سازند ۲۶۸

برآورد تخلخل از نمودار جرم مخصوص ۲۶۸

اثر وجود شیل روی نمودار تخلخل ۲۷۱

اثر فشار غیر معمول ۲۷۱

برآورد تخلخل از نمودار الکترومغناطیسی ۲۷۲

کتابنگاری (رفرنسها) ۲۷۳

دیباچه

برای شناخت مواد روشهای متفاوتی وجود دارد. در بسیاری موارد با اندازه‌گیری ویژگیهای فیزیکی مواد می‌توان آنها را شناسایی کرد. از آنجا که در برخی از موارد دسترسی مستقیم به مواد معدنی امکان ناپذیر بوده و یا مستلزم هزینه‌های زیاد می‌باشد، برای بررسی و شناسایی این مواد از روشهای ژئوفیزیکی استفاده می‌شود. در این روشها با اندازه‌گیری یک یا چند ویژگی فیزیکی زمین، کم و کیف پیکره‌های زمین‌شناسی مورد بررسی قرار می‌گیرد. به عنوان مثال در ژئومغناطیس با اندازه‌گیری اندازه و یا جهت میدان مغناطیسی پیرامون توده‌های مغناطیسی و بررسی و تحلیل این میدان می‌توان به وجود این توده‌ها پی‌برد. و با اندازه‌گیری مقاومت ویژه الکتریکی[۱] سنگها و خاکها می‌توان به بررسی، تفکیک و در مواردی شناسایی آنها پرداخت.

در چاه‌پیمایی[۲] با اندازه‌گیری ویژگیهای فیزیکی مواد پیرامون چاهها و گمانه‌های حفر شده، به بررسی کمی و کیفی این مواد پرداخته می‌شود. در این روش‌ها وسیله اندازه‌گیری سوند[۳] می‌باشد. که به گیرنده‌هایی (در مواردی فرستنده و گیرنده) مجهز بوده و ویژگیهای مورد نظر را اندازه‌گیری و به وسیله سیمهای رابط به سطح زمین گسیل می‌کند. داده‌های فرستاده شده به سطح زمین توسط ابزار لازم مورد پردازش قرار گرفته، و نتیجه معمولا به صورت نمودار یا نمودارهایی که معرف یک یا چند ویژگی فیزیکی مواد می‌باشد، روی کاغذ نگاشته می‌شود. سرعت حرکت سوند در گمانه‌ها ثابت است و بسته به نیاز، اندازه‌گیری از ته گمانه و یا از دهانه آن شروع می‌شود.

1. Resistivity 2. Well Logging 3. Sond

نخستین نمودار[۱] چاه‌پیمایی یک نمودار الکتریکی بود که در سال ۱۹۲۷ در چاهی واقع در یک میدان کوچک نفتی در شمال خاوری فرانسه برداشت شد که نمودار مقاومت ویژه سازندهای پیرامون چاه بود. در آن زمان اندازه‌گیری‌ها به صورت پیوسته نبود، بلکه بصورت ایستگاهی انجام می‌شد، بدین طریق که تعدادی نقطه با فاصله‌های معین مورد اندازه‌گیری قرار می‌گرفتند. به عبارت دیگر، سوند در درون گمانه حرکت و در نقطه موردنظر توقف می‌کرد، اندازه‌گیری را انجام می‌داد و بعد به نقطه دیگری منتقل می‌شد. نتایج بدست آمده پس از انجام محاسبات لازم به صورت مقادیر مقاومت ویژه الکتریکی روی کاغذی پیاده و سرانجام نمودار به وسیلهٔ دست رسم می‌شد.

در سال ۱۹۲۹ نمودار مقاومت ویژه الکتریکی در آمریکا، شوروی و ونزوئلا مورد استفاده قرار گرفت و اهمیت کاربردی این نمودار در شناسایی چینه‌هایی که پتانسیل ذخیره‌سازی هیدروکربورها را داشتند روشن شد، به همین دلیل این روش در صنعت نفت به سرعت توسعه و گسترش یافت.

نمودار دیگری که بعد از نمودار مقاومت ویژه مورد استفاده قرار گرفت نمودار پتانسیل خودزا[۲] (SP) بود که برداشت آن از سال ۱۹۳۱ به همراه نمودار مقاومت ویژه شروع شد. در همان سال برادران شلومبرژه روشی را تکمیل کردند که توسط آن نخستین نمودار پیوسته که توسط قلم نگارنده[۳] نگاشته می‌شد، تهیه شد. سرانجام در سال ۱۹۳۶ روش نگاشت بر روی فیلم معرفی و مورد استفاده قرار گرفت. از آن به بعد نمودارهای الکتریکی گسترش یافت و شامل زیر مجموعه‌های متفاوتی از جمله نرمال کوچک،[۴] نرمال بزرگ[۵] و لترال[۶] شد. این مجموعه از نمودارها از سال ۱۹۳۶ تا اواخر دهه ۱۹۵۰ مورد استفاده قرار گرفت. از سال ۱۹۴۹ امکان نگاشت همزمان این نمودارها فراهم آمد. یعنی برخی از نمودارها همزمان و با یک بار حرکت سوند در چاه مورد برداشت قرار گرفتند.

1. Log
2. Self Potential
3. Recorder
4. Short Normal
5. Long Normal
6. Lateral

امکان کاربرد سوندهای الکتریکی با آرایهٔ الکترودی متفاوت سبب گسترش بیشتر این روش و کاربرد آن در موارد گوناگون گردید. امکان نگاشت همزمان مقاومت ویژه الکتریکی در بخشهای متفاوت یک چاه،در یک ژرفای معین سبب گردید تا بتوان شیب و امتداد لایه‌های مایل را مورد مطالعه قرار داد (نگاه کنید به فصل نمودار شیب سنجی). به همین دلیل شیب سنجی[۱] از روشهایی بود که از سال ۱۹۴۰ مورد استفاده قرار گرفت. بعدها در سال ۱۹۴۳ سوندی شامل یک ابزار شیب‌سنجی طراحی شد که در واقع دارای سه گیرنده بود که پتانسیل خودزا را به طور جداگانه اندازه‌گیری می‌کردند. این سوند به یک فتو انحراف سنج[۲] هم مجهز شد که امکان برآورد شیب و جهت شیب لایه‌ها را فراهم می‌آورد. در سال ۱۹۴۶ گیرنده‌های مقاومت سنج جایگزین SP شدند. با گذشت زمان، گیرنده‌های شیب‌سنجی پیشرفت نمود و تعداد آن در یک سوند افزایش یافت. امروزه از سوندهای شیب‌سنجی که همزمان امکان نگاشت ۴ تا ۸ خرد نمودار مقاومت ویژهٔ الکتریکی[۳] را فراهم می‌آورند استفاده می‌شود که با بررسی و تفسیر آنها می‌توان تا حد شایان توجهی شیب و جهت شیب سازندهای پیرامون چاه را برآورد نمود.

اندازه‌گیری ویژگیهای مواد رادیواکتیو[۴] در گمانه‌ها از نخستین سالهای دهه ۱۹۴۰ شروع شد. پرتوگاما[۵] نخستین ویژگی رادیواکتیو بود که در برداشتهای چاه‌پیمایی مورد استفاده قرار گرفت. ابزار اندازه‌گیری پرتوگاما و نترون به سرعت مراحل پیشرفت را سپری نموده و امکان نگاشت نمودارهای پرتوگاما و نترون را فراهم نمود. مهمترین برتری نمودارهای رادیواکتیو، امکان نگاشت آنها در گمانه‌های خشک و گمانه‌هایی است که دارای لولهٔ جداری فلزی می‌باشند. (در چنین مواردی امکان نگاشت نمودارهای الکتریکی معمولی نیست). بر هم نهی نمودارهای رادیواکتیویته و الکتریکی و ترکیب داده‌های حاصل می‌تواند به تفسیر ستون زمین‌شناسی و شناسایی سنگها و

1. Inclinometry
2. Photo Inclinometer
3. Micro Resistivity Log
4. Radio Active
5. γ - Ray

سازندهای پیرامون چاه منجر شود. این گونه تفسیر از دهه ۱۹۴۰ شروع شد. گرچه نمودارهای نترون در آن زمان به شدت متأثر از محیط چاه بود ولی در ابتدای دهه ۱۹۵۰ با به کارگیری تمهیداتی نمودار نترون به عنوان نموداری که برآورد تخلخل[۱] را امکان‌پذیر می‌ساخت مورد توجه قرار گرفت. بعدها در دهه‌های ۶۰ و ۷۰ ابزار اندازه‌گیری نترون توسعه داده شدند و امروزه نمودارهای گاما و نترون بطور بسیار گسترده در برداشتهای چاه‌پیمایی مورد استفاده قرار می‌گیرند و در بسیاری از موارد برای انجام ارتباط بین نمودارهای متفاوت معمولا همراه هر نمودار یک نمودار پرتوگاما یا SP برداشت می‌شود. در سال ۱۹۵۱ ابزار لترولوگ[۲] برای اندازه‌گیری نمودارهای الکتریکی طراحی شدند که نمودارهای مقاومت ویژه را به طریقی متفاوت از آنچه بیان شد می‌نگاشتند. این ابزار با وجود بازهٔ کم سوند، دارای شعاع کاوش زیادی هستند و مقادیر اندازه‌گیری شده توسط آنها کمتر تحت تاثیر گل حفاری قرار می‌گیرد. (یکنواخت نبودن قطر چاه در ژرفاهای متفاوت آن سبب تاثیر ناهمگون گل حفاری روی نمودارهای الکتریکی است). در سالهای بعد ابزار لترولوگ گسترش یافتند و بعنوان وسایل با صرفه اقتصادی مورد استفاده قرار گرفتند. امروزه سوندهای متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرند از جمله لترولوگ دوگانه[۳] DLL که در برگیرنده ابزار لترولوگ ژرف و کم ژرفا است و کاربرد بسیار گسترده‌ای دارد.

ابزار الکتریکی که برای برداشت نمودارهای الکتریکی گفته شده در بالا بکار می‌روند، در گمانه‌های خشک و یا پر از آب شیرین که هدایت الکتریکی آنها بسیار کم است نمی‌توانند مورد استفاده قرار گیرند. این امر سبب و انگیزه طرح و ساخت ابزار القایی شد و نمودار حاصل نمودار القایی[۴] نام گرفت. کاربرد این ابزار به چاههای خشک محدود نشد، بلکه در سال ۱۹۵۶ این ابراز با ابزار SP و نرمال ترکیب شده و امکان نگاشت همزمان چند نمودار الکتریکی را فراهم آورد. امروزه

1. Porosity
2. Laterolog
3. Doal Laterolog
4. Induction

بیشتر از نمودار القایی دوگانه استفاده می‌شود که برای نخستین بار در سال ۱۹۶۳ مورد استفاده قرار گرفت و بعدها پیشرفت شایان توجهی کرد. برخی از این ابزار اندازه‌گیریهای با شعاع کاوش کم، متوسط و زیاد را همزمان انجام می‌دهد و سه نمودار مقاومت ویژهٔ ارائه می‌دهد.

اندازه‌گیری سرعت امواج در امتداد دیواره گمانه‌ها از مواردی بود که از اوایل دهه ۱۹۳۰ مورد توجه قرار گرفت. در این روش از سوندی مجهز به گیرنده‌های لرزه‌ای استفاده می‌شود. در بررسیهای آغازین چشمه تولید موج[۱] در سطح زمین قرار داشت و اندازه‌گیریها در فاصله‌های نسبتاً زیاد درون گمانه انجام می‌شد. (مانند روش سطح زمین به گمانه در روشهای لرزه‌ای مطالعات ساختگاهی) با گذشت زمان ابزارهای مورد نیاز گسترش یافته و کم و کاستیهای آن رفع شد. از دهه ۱۹۵۰ به بعد نمودارهای صوتی[۲] در برآورد میزان تخلخل سازندهای پیرامون چاه مورد استفاده قرار گرفت و حتی امروزه از آن بعنوان نمودار تخلخل[۳] نام برده می‌شود. ابزار اندازه‌گیری سرعت امواج در حال حاضر پیشرفت شایان توجهی نموده‌اند. سوندهای مورد استفاده به چشمهٔ تولید موج و حداقل دو گیرنده مجهز می‌باشند. نمونه‌های پیشرفته‌تر شامل دو فرستنده و چهار گیرنده است. کم و کاستیها و خطاهای موجود در نمودارهای تهیه شده توسط ابزار قدیمی به میزان درخور توجهی کاهش یافته است. انواع دیگری از سوندهای صوتی نیز وجود دارند که در فصل مربوط به خود مورد بررسی قرار خواهند گرفت. افزون بر برآورد تخلخل، با استفاده از نمودارهای صوتی می‌توان بررسیهایی در مورد چگالی و ویژگیهای دینامیکی مواد پیرامون گمانه‌ها انجام داد. اندازه‌گیری سرعت امواج برشی[۴] و امواج فشاری[۵] در گمانه امکان برآورد ویژگیهای دینامیکی مانند مدول یانگ،[۶] مدول برشی،[۷] مدول بالک[۸] و ضریب پوآسون[۹] را فراهم آورده است. به همین سبب نمودارهای صوتی در مطالعهٔ پی‌های سازه‌های بزرگ مانند سدها، سیلوها، پالایشگاهها، کارخانه‌ها، مجتمع‌های معدنی،

1. Seismic Source
2. Sonic Log
3. Porosity Log
4. Shear Wave
5. Compressional Wave
6. Young Modulus
7. Shear Modulus
8. Bulk Modulus
9. Poison Ratio

تونل‌سازی و... نیز مورد استفادهٔ فراوان قرار گرفته‌اند.

اندازه‌گیری درجه حرارت داخل گمانه‌ها از موارد دیگری است که بوسیله ابزار چاه‌پیمایی انجام می‌پذیرد. نمودارهای حرارتی افزون بر کاربرد گسترده‌ای که در مهندسی منابع نفت دارند، در اکتشافهای معدنی و ارزیابی منابع آب زیرزمینی نیز کاربرد فراوان یافته‌اند. تکنیکهای حرارت سنجی امروزه برای تعیین جهت حرکت آبهای زیرزمینی در مواردی که حتی سرعت این حرکت بسیار کم است نیز بکار می‌روند. برای این منظور سوندهای ویژه‌ای طراحی شده که در آن المانهای گرمایی و گیرنده‌های حساس حرارتی جاسازی شده است.

در حال حاضر از ابزار چاه‌پیمایی افزون بر تهیه نمودارهای متفاوت، برای سرویس دهی‌های دیگر نیز استفاده می‌شود که می‌توان به تهیه نمونه‌های جداری[۱] از دیوارهٔ چاهها، تهیه نمونه از گل حفاری درون چاه، اندازه‌گیری ویژگیهای فیزیکی مایع حفاری، تهیه نمونه از آب سازند، مشبک نمودن لولهٔ جداری[۲]، بریدن لولهٔ جداری و غیره اشاره نمود.

1. Side well sampling 2. Perforating

۱

ابزار چاه‌پیمایی

در حالت بسیار معمولی دستگاه چاه‌پیمایی از یک سوند، سیمهای رابط،[۱] چرخ،[۲] ابزار کنترل‌کننده سرعت سوند در چاه، حسابگرها، کامپیوترها[۳] و ابزار نگارنده[۴] تشکیل شده است. نمونه‌هایی از ابزار چاه‌پیمایی ساده نیز به صورت قابل حمل مورد استفاده قرار می‌گیرند که معمولا شامل وسایل نگارنده نمودارهای الکتریکی هستند. ولی ابزار چاه‌پیمایی معمولا به صورت یک گروه کامل شامل شماری از نگارنده‌ها و سوندهای مربوط به نمودارهای متفاوت می‌باشد و اندازه و وزن آنها بگونه‌ایست که بر روی یک کامیون (و حتی در مواردی دو کامیون) جاسازی می‌شوند. به هر ترتیب مهمترین بخشهای ابزار چاه‌پیمایی به شرح زیر است:

کامیون[۵]

ابزار چاه‌پیمایی معمولا بر روی یک کامیون (وگاهی دو کامیون) جا سازی و توسط آن حمل و نقل می‌شوند. افزون بر این، از نیروی موتور کامیون برای تولید نیروی الکتریکی نیز استفاده می‌گردد.

از آنجا که برخی از چاهها در مناطق کوهستانی حفر می‌شوند، کامیونهای مورد استفاده

1. Cable
2. Hoist
3. Computers
4. Recorder
5. Truck

بگونه‌ای طراحی و ساخته شده‌اند که بتوانند در راههای صعب العبور نیز مورد استفاده قرار گیرند.

سوند

سوند از یک پوسته سخت و یک و یا چند فرستنده و گیرنده تشکیل شده است. پوسته خارجی بگونه‌ای ساخته می‌شود که در برابر فشار و درجه حرارت زیاد انتهای چاه($T=130\ ^{o}C$، $P=150\ kg/cm^2$) پایدار باشد. قطر پوسته به قطر گمانه بستگی دارد. بنابر این قطر خارجی سوند محدود است. پوسته سوند ممکن است فلزی و یا از فایبر گلاس[1] ساخته شده باشد. گیرنده‌ها و فرستنده‌ها بگونه‌ای درون پوسته جاسازی شده‌اند که ضمن مصون بودن از آسیبهای احتمالی، با خارج از فضای سوند ارتباط لازم را داشته باشند. در بسیاری از موارد سوندها تنها به گیرنده مجهز می‌باشند، از جمله زمانی که یک ویژگی طبیعی اندازه‌گیری می‌شود و نیازی به فرستنده نیست، مانند پرتوگامای طبیعی، پتانسیل خودزا، اندازه‌گیری درجه حرارت و ... . در برخی موارد سوندها شامل گیرنده‌ها و فرستنده‌ها هستند، مانند سوندهای صوتی و رادیواکتیوتیه مصنوعی. گاهی نیز فرستنده‌ها در خارج از سوند قرار دارند. نوع گیرنده‌ها و فرستنده‌ها به طبیعت ویژگی مورد اندازه‌گیری بستگی دارد. در سوندهای مقاومت ویژه از الکترودها و سیم‌پیچها، در سوندهای صوتی از گیرنده‌ها و فرستنده‌های صوتی، و در سوندهای رادیواکتیویته از فرستنده‌های پرتوهای رادیواکتیو و گیرنده‌هایی که به این پرتوها حساسیت دارند استفاده می‌شود.

سیم[2]

داده‌های دریافت شده توسط سوند، به وسیله سیمهای رابط به دستگاههای پردازشگر و نگارنده فرستاده می‌شود. جریانهای الکتریکی ودستورهای لازم برای انجام برخی عملیات نیز از

1. Fiber Glass 2. Cable

سطح زمین توسط کابل به سوند ارسال می‌شود. این سیمها درون یک روکش مقاوم جا سازی شده‌اند. مجموعه سیمهای رابط و روکش را کابل می‌نامند. گرچه کابلهای چاه‌پیمایی بگونه‌ای ساخته می‌شوند که مقاومت کششی آنها زیاد است و در برابر فشار و درجه حرارت نیز مقاوم هستند، ولی در برداشتهای با ژرفای زیاد افزایش طول کابل در اثر وزن سوند و وزن خود کابل، در خور توجه است. این افزایش طول بطور خودکار توسط دستگاههای پردازشگر به حساب آورده می‌شود.

افزون بر انتقال داده‌ها از سوند به پردازشگرها، ژرفای نقطهٔ برداشت درون چاه نیز توسط حرکت کابل و میزان چرخش چرخ، اندازه‌گیری می‌شود. از سوی دیگر حرکت کابل چرخش فیلمی که نمودار روی آن نگاشته می‌شود را با ژرفای مورد نظر هماهنگ می‌سازد.

چرخ

سوند به انتهای کابل متصل است و کابل دور چرخ پیچیده می‌شود. با حرکت چرخ که معمولا توسط نیروی محرکهٔ کامیون به چرخش در می‌آید، کابل و سوند درون چاه جابجا می‌شوند. از آنجا که ژرفای محل قرارگیری سوند در چاه توسط این چرخ اندازه‌گیری می‌شود، حساسیت چرخ بسیار اهمیت دارد و لازم است که کالیبره شود.

ژنراتور تولید نیرو

در مواردی که نیاز به تولید نیروی محرکه الکتریکی باشد (که معمولا نیز هست) از یک ژنراتور استفاده می‌شود. ژنراتور به وسیله نیروی محرکه کامیون به چرخش در می‌آید.

حسابگرها و پردازشگرها

ویژگیهای دریافت شده توسط گیرنده‌هادرسه مرحله موردپردازش قرار می‌گیرند. نخستین در داخل برخی از سوندها، محاسبات و تجزیه و تحلیلهای آغازین انجام می‌گیرد. ویژگیهای دریافت

شده معمولاً به ویژگیهای فیزیکی قابل انتقال توسط کابل تبدیل می‌شوند. گام دوم پردازش داده‌ها توسط حسابگرها و پردازشگرهای جاسازی شده درون کامیون انجام می‌شود و داده‌های دریافتی از سوند به گونه‌ای مورد پردازش قرار می‌گیرند و تحویل نگارنده‌ها می‌شوند که نگارنده‌ها بتوانند نمودار مورد نظر را بنگارند. گام سوم یعنی پردازش در ادارهٔ مهندسی، توسط پردازشگرهای پیشرفته انجام می‌پذیرد.

نگارنده‌ها

پس از انجام محاسبات و پردازشهای لازم بر روی داده‌ها، این داده‌ها تحویل نگارنده شده و نگارنده‌ها نمودارهای مربوط را بر روی فیلم می‌نگارند و یا داده‌های پردازش شده توسط چاپگرهای رایانه‌ای روی کاغذ چاپ می‌شوند.

ابزار کوچک چاه‌پیمایی

همانگونه که اشاره شد، ابزار جدید چاه‌پیمایی به صورت ترابرپذیر بوسیله یک نفر، ساخته شده‌اند که معمولاً در اکتشاف معادن و ارزیابی آبخوانها کاربرد دارند. این گونه دستگاه‌ها معمولاً یک یا دو ویژگی فیزیکی را اندازه‌گیری می‌نمایند.

۲

ویژگیهای فیزیکی مورد استفاده در چاه پیمایی

همانگونه که اشاره شد، درچاه پیمایی باانـدازه گـیری بـرخـی ازویـژگیهای فـیزیکی مـواد پیرامـون چـاه، مـی‌توان بـه بـررسی کـمی، کـیفی وسـرانـجام شـناسایی مـواد پـرداخت. در ایـن فصل مهمترین ویـژگیهای فـیزیکی وپـارامـترهایی راکـه درچـاه پـیمایی انـدازه‌گـیری مـی‌شوند و یـا تـوسط نـمودارهـا مـی تـوان آنـهارابـرآوردنـمود، مـعرفی وبـه صـورت بسـیارفشرده تـعریف شدداند.

مقاومت الکتریکی [1]

مقاومت الکتریکی یک جسم رسانا (هادی) بنابراصل اهم عبارت است از

$$R_1 = R \frac{l}{S}$$

دراین رابطه :

R_1 مقاومت جسم رسانا　　l طول جسم رسانا　　S سطح مقطع

و R عبارت ازپارامتری است که آن رامقاومت ویژه الکتریکی جسم رساناگویند.

1. Electrical resistance

مقاومت ویژه الکتریکی[1]

در رابطهٔ مقاومت الکتریکی اگر R رامحاسبه کنیم داریم :

$$R = R_1 \frac{S}{l}$$

در این رابطه اگر مقاومت الکتریکی را بر حسب اهم (Ω)، طول را بر حسب متر (m) و سطح مقطع را بر حسب متر مربع (m^2) بیان کنیم یکای R[2] برابر خواهد شد با:

$$R = \frac{\Omega\ m^2}{m} = \Omega\ m$$

به عبارت دیگر یکای مقاومت ویژه الکتریکی اهم متر و یا اهم سانتیمتر است. حال اگر هریک از پارامترهای فوق به اندازهٔ یکا در نظر گرفته شوند مقداری که برای R حاصل می‌شود برابر مقاومت ویژه الکتریکی جسم است . به عبارت دیگر مقاومت ویژه الکتریکی یک جسم عبارت است از مقاومت الکتریکی قطعه‌ای از آن جسم به ابعاد یکه (مکعبی به ابعاد یکه و یا استوانه‌ای به سطح مقطع یکه و ارتفاع یکه). در میان نمودارهای چاه‌پیمایی نمودار مقاومت ویژهٔ الکتریکی از اهمیت چشمگیری برخوردار است زیرا توسط ابزار اندازه‌گیری مقاومت ویژه می‌توان اطلاعاتی در مورد سازندهای پیرامون چاه با یک شعاع قابل توجه بدست آورد. به عبارت دیگر شعاع کاوش در برخی از ابزار مقاومت ویژه بیش از دیگر ابزار است و در مواردی به چندین فوت هم می‌رسد. بنابر این می‌توان مقاومت ویژهٔ سازند. مقاومت ویژهٔ گل حفاری، مقاومت ویژهٔ ناحیهٔ تراویده و ... را بطور جداگانه برداشت نمود که هر یک دارای کاربردهای مهمی هستند.

رسانندگی الکتریکی

رسانندگی الکتریکی عکس مقاومت الکتریکی است و عبارت از ویژگی است که در اجسام رسانا اجازهٔ عبورجریان الکتریسیته را می‌دهد . در اجسام مختلف رسانش

1. Resistivity 2. Dimension

الکتریکی به صورتهای مختلف انجام می پذیرد . مثلاً فلزات به علت ایجاد امر الکترونی به سادگی قادربه هدایت جریان الکتریسیته هستند. رساناترین فلزات نقره، پلاتین، طلا و مس می‌باشند.

رسانش الکتریکی درمایعات به صورت دیگری انجام می‌گیرد و بستگی به نمکهای موجود در آنها دارد. این گونه رسانندگی را رسانندگی الکترولیتی می‌نامند. رسانندگی الکترولیتی آب خالص بسیار کم است اما در صورتی که نمک‌هایی مانند Nacl در آن حل شوند رسانندگی آن را افزایش می‌دهند. علت این امر آن است که نمکها در آب به صورت یونهای با بار مختلف در می‌آیند و جریان الکتریسیته توسط تغییر مکان و توجیه یونها میسر می‌گردد. چون الکترولیتها زود به حد اشباع می‌رسند لذا رسانندگی الکترولیتی به مراتب از رسانندگی فلزی کمتر است .

رسانندگی ویژه الکتریکی [1]

رسانندگی ویژه الکتریکی عکس مقاومت ویژه الکتریکی است و واحد آن نیز عکس واحد مقاومت ویژه یعنی $\Omega^{-1}m^{-1}$ می‌باشد.

رسانندگی الکتریکی سازندهای زمین‌شناسی

رسانندگی سازندهای زمین‌شناسی بستگی به جنس سنگ، ساخت و بافت و نمکهای حلال درون سنگهای آنها دارد. به عبارت دیگر رسانندگی سازندهای زمین‌شناسی بستگی به کانیهای تشکیل دهندهٔ سنگهای این سازندها، درصد اشباع[2] از آب و مقدار نمکهای آب دارد. آنچه که مربوط به رسانندگی (فلزی) الکتریکی کانیها می‌شود معمولاً قابل چشم‌پوشی است که استثناء

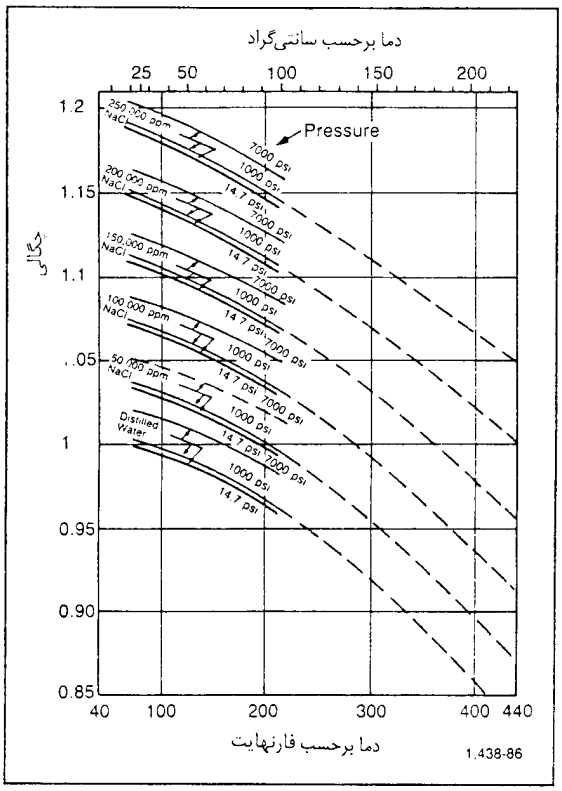
1. Electrical Conductivity 2. Saturation

کانه‌ها). زیرا فقط کانیهای فلزی مانند سولفورها و اکسیدهای آهن وسولفورهای فلزی و ... دارای رسانندگی فلزی درخور توجه هستند.

درصد این کانیها معمولاً در سنگها به ویژه سنگهای رسوبی کم است، لذا در مورد سنگهای رسوبی رسانندگی آنها در زیر سطح ایستابی به طور عمده مربوط به رسانندگی الکترولیتی آب درون آنها می‌باشد. و در بالای سطح ایستابی رطوبت نقش عمده‌ای را ایفا می‌کند به عبارت دیگر، کاتیونها و آنیونهای موجود در آب سازند مانند $So4^{--}, Ca^{++}, Cl^{-}, Na^{+}$ هستند که رسانندگی جریان الکتریسیته رابه عهده دارند . به سادگی از مطالب بالا می‌توان دریافت که رسانندگی الکترولیتی سنگها به میزان تخلخل آنها، درصد اشباع از آب، غلظت نمکهای آب، درجه حرارت و ... بستگی دارد. هر یک از این پارامترها هر یک به نوبهٔ خود بررسی خواهند شد.

اثر غلظت نمکهای آب سازند روی رسانندگی ویژه

گفته شد که آنیونها وکاتیونهای موجود در آب سازندها، رسانندگی جریان الکتریکی در سازندها را به عهده دارند . لذا با افزایش شمار این یونها باید رسانندگی ویژه نیز افزایش یابد . اما چون حداشباع وجوددارد رسانندگی الکترولیتی نمی تواندازکرانی بالاتر رود . پیوندهای تجربی چندی برای رسانندگی ویژهٔ الکتریکی و غلظت پیشنهاد شده است که البته درهمهٔ آنها نقش درجه حرارت چشمگیراست واصولاً این پیوندها به ازاء درجه حرارتهای خاصی نوشته شده اند . مثلاً در درجه حرارت حدود $۴۰^{\circ}c$ رابطهٔ تجربی $\rho_w = \frac{C}{5}$ ارائه شده است که در آن ρ_w رسانندگی ویژه آب سازند برحسب $\Omega^{-1}m^{-1}$ و C غلظت نمک برحسب گرم در لیتر است . در این مورد جدولها و نمودارهایی وجود دارد که نمونه‌ای از آنها در شکل (۲-۱) ارائه شده است و در قسمت کاربردی نیز روش استفاده از آن بیان شده است. نمودار ارائه شده، رابطهٔ بین چگالی، درجه حرارت، فشار و غلظت را نشان می‌دهد.



شکل (۲-۱) ارتباط رسانندگی الکتریکی آب با درجهٔ حرارت، فشار و غلظت نمکهای حل شده در آب [۲]

رابطه رسانندگی ویژهٔ الکتریکی با درجهٔ حرارت

در بخش پیش اشاره شد که روابطی که برای مقاومت ویژه الکتریکی (یا عکس آن رسانندگی ویژه) و غلظت نمکهای آب سازند وجود دارد در درجه حرارت معین معتبرند زیرا درجه حرارت روی میزان حل شدن و یونیزه شدن نمکها تأثیر می‌گذارد.

افزایش درجهٔ حرارت سبب روانی بیشتر می شود. همین روانی باعث آزادی بیشتر یونها شده

و رسانندگی ویژهٔ سازند را افزایش می‌دهد. به عبارت ساده‌تر همراه افزایش درجه حرارت در فاصله‌های ثابت، مقاومت ویژه کاهش می‌یابد. این موضوع توسط شکل (۲-۱) قابل بررسی است.

تخلخل[1]

تخلخل عبارت است ازنسبت حجم فضای خالی به حجم کل سنگ. بیشترین تخلخل در حالتی ایجاد می شودکه تمام اجزاء سنگ به صورت کره‌های مساوی باشند و طرز قرار گرفتن آنها طوری باشد که خط المرکزین کره‌های هرردیف به خط المرکزین کره‌های هرستون عمود باشد. در این صورت می توان به کمک روشهای هندسی تخلخل رامحاسبه نمود. اگر مکعبی به ابعاد a را در نظر بگیریم که ابعاد آن معادل قطرکره ای باشدکه در آن محاط شده است، دراینصورت اختلاف بین حجم مکعب و حجم کره برابر حجم فضای خالی ونسبت تفاوت این حجمها به حجم مکعب برابر تخلخل خواهد شد .

در صورتیکه شعاع کره را $\frac{a}{2}$ فرض کنیم ابعاد مکعب برابر a خواهد شد و داریم:

حجم فضای خالی $V_2 = V - V_1$

حجم بخش جامد سنگ $V_1 = \frac{4\pi}{3} \quad \frac{a^3}{8}$

حجم مکعب $V = a^3$

تخلخل $\varphi = \frac{v_2}{v} = \frac{v - v_1}{v} = \frac{a^3 - (4\pi/3)(a^3/8)}{a^3}$

$\varphi = 1 - \frac{\pi}{6} = 0/47 = 47\%$

1. Porosity

در صورتیکه تجمع به صورت رومبیک[1] باشد نیز میزان تخلخل را می‌توان از روش هندسی محاسبه نمود که حدود 30% می‌شود در تجمع هگزاگونال ایده‌آل تخلخل به 26% می‌رسد. در طبیعت هرگز حالت ایده‌آل فوق وجود ندارد. به استثناء بعضی از سنگهای آذرین خروجی مثل پامیس میزان تخلخل بالا نیست و نمی‌توان به روش هندسی تخلخل را محاسبه نمود. در سنگهای رسوبی رسها دارای بیشترین تخلخل بوده و ماسه سنگهای با جورشدگی بسیار زیاد و دولومیتها نیز تخلخل زیادی دارند. سنگهای تبخیری مانند ژیپس و ایندریت و بلور نمک طعام دارای کمترین مقدار تخلخل هستند

محاسبه تخلخل دربرآورد ذخیره‌های هیدروکربورها و آبخوان‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. یکی از راههای برآورد تخلخل روشهای آزمایشگاهی است. ولی امروزه از برخی نمودارهای چاه‌پیمایی مانند نمودار صوتی، جرم مخصوص، نترون و الکترومغناطیسی می‌توان میزان تخلخل رادرسازندهای پیرامون چاه برآورد نمود که در فصلهای بعدی به آن اشاره خواهد شد. با توجه به اینکه این نمودارها در کل چاه برداشت می‌شوند. برآورد تخلخل توسط این روش به مراتب اقتصادی‌تر، عملی‌تر و کاربردی‌تر از روشهای آزمایشگاهی است.

انواع زایشی تخلخل

الف : تخلخل نخستین[2] : تخلخل نخستین بخشی ازتخلخل است که درهنگام تشکیل سنگهاپدید می‌آید . تخلخل نخستین درسنگهای رسوبی تابع جور شدگی دانه‌ها[3] و محیط رسوب‌گذاری است.

در آبرفتها نیز این تخلخل به جورشدگی دانه‌ها، هم اندازه بودن یا نبودن دانه‌ها، شرایط نهشته‌گذاری و فشار لیتواستاتیکی بستگی دارد.

ب : تخلخل پسین[4] : تخلخل پسین پیرو فرایندهای تکتونیکی، زمین‌ساختی، شیمیایی

1. Rombic Packing 2. Primary Porosity 3. Sorting
4. Secondary Porosity

و فیزیکوشیمیایی پس از تشکل سنگها مانند خردشدگی، شکاف برداشتن[۱] و انحلال[۲] که سبب افزایش تخلخل و سیمانی شدن[۳] و تبلور دوباره [۴] که سبب کاهش تخلخل میشوند، می‌باشد.

تخلخل مرتبط :

نسبت حجم بخشی ازفضاهای حالی که به یکدیگرارتباط داشته باشند را به حجم کل سنگ، تخلخل مرتبط می‌گویند معمولاً تخلخل مرتبط از تخلخل کل کمتر است و در شرایط مساعد با آن برابر می‌شود.

تخلخل مؤثر[۵] :

تخلخل مفید یا موثر عبارتست از بخشی از تخلخل مرتبط که ابعاد فضاهای بهم پیوستهٔ آن به اندازه‌ای باشدکه سیال بتواندازآن عبورنماید . نفوذ پذیری سنگ مستقیماً به تخلخل مفید وابسته است. در بین سنگهای رسوبی بیشترین تخلخل از آن سنگهای رسی است که به ۵۰٪ هم میرسد اما تخلخل مفید رسها بسیار کم است. به عبارتی رسها تراوائی ندارند. این موضوع نشان می‌دهد که وابستگی مستقیم میان تخلخل کل و تخلخل مؤثر وجود ندارد.

تخلخل مفید ماسه سنگهای با جورشدگی بسیار زیاد[۶] و دولومیتهایی که در اثر عمل دولومیتی شدن[۷] تخلخل انها افزایش یافته، زیاد است. در مورد مخازن هیدروکربوری تخلخل بین ۱۰ - ۵٪ تخلخل ضعف، بین ۱۵ - ۱۰٪ تخلخل متوسط، بین ۲۰ - ۱۵٪ تخلخل خوب و بیشتر از

1. Fracturing
2. Solution
3. Cementation
4. Recrystalization
5. Effective Porosity
6. Super Mature
7. Dolomitization

۲۰٪ تحلخل عالی نامده می‌شود.

نفوذ پذیری[1]

هر ده جسم متخلخلی تحت عبور سیالی قرار گیرد، مقدار سیال عبور نموده در واحد زمان و از واحد سطح جسم متخلخل به روانی سیال و روزنه‌های بهم ... جسم متخلخل که سیال بتواند از آن عبور کند، یعنی به تخلخل مفید بستگی دارد. بطور کلی قابلیت عبور سیالات از جسم متخلخل، نفوذ پذیری نامیده میشود. نفوذ پذیری نخستین بار توسط دارسی اندازه‌گیری شد. وی این عمل را توسط لوله‌ای استوانه‌ای که از ماسه پرکرده بود انجام داد. با تغییر طول استوانه و سطح مقطع آن تغییرات میزان سیال عبور کرده را بررسی نموده و به رابطهٔ

$$Q = c \frac{s.p}{l}$$

رسید. در این رابطه Q دبی یا حجم سیالی است که در زمان مشخص عبور می‌کند . S سطح مقطع (قاعده) و l طول استوانه، P اختلاف فشار آب بین سطح و قاعدهٔ استوانه، c ضریب ثابتی‌است که بستگی به روانروی مایع دارد و برای سیالات مختلف متفاوت است. با توجه به اینکه آزمایش دارسی برای ماسه انجام شد نقشی از تخلخل در آن دیده نمی‌شود. بدیهی است که برای سنگهای مختلف نفوذپذیری تابع مستقیمی از تخلخل مؤثر است.

واحد روانروی پواز است. (یک پواز عبارت از روانروی سیالی است که برای جابجائی دو لایه موازی آن به اندازه یک سانتی متر و به مساحت هر لایه یک سانتی متر مربع نیرویی برابر یک دین

1. Permeability

لازم باشد.) روانروی آب حدود ۰/۰۱ پواز یا یک سانتی پواز در ۲۰ درجه سانتیگراد است. گفتنی است که روانروی تابع درجه حرارت است.

واحد نفوذپذیری :

واحد نفوذپذیری دارسی است و آن عبارت از نفوذپذیری جسم متخلخلی است که اگر ارتفاع آن یک سانتیمتر و سطح مقطع آن برابر یک سانتیمتر مربع باشد و تمام خلل و فرج آن از سیالی با روانروی یک سانتی پواز پر شود و اختلاف فشار سیال در دو طرف آن برابر یک اتمسفر باشد، در مدت یک ثانیه یک سانتی متر مکعب مایع از آن بگذرد. در عمل از واحد میلی دارسی استفاده می‌شود.

نفوذپذیری سنگها اگر بین ۱۰-۱ میلی دارسی باشد متوسط و اگر بین ۱۰۰-۱۰ میلی‌دارسی باشد زیاد و بین ۱۰۰۰-۱۰۰ میلی دارسی خیلی زیاد است. بعنوان مثال از مکعبی از ماسه به ابعاد یک فوت و نفوذپذیری یک دارسی با اختلاف فشار در طرفین برابر یک پاوند بر اینچ مربع، حدود یک بشکه نفت در روز عبور می‌کند.

اشباع :[1]

سطح ایستابی سطحی است که پایین‌تر از آن فضاهای خالی سنگها توسط آب پرشده است. در مخازن نفتی معمولاً آب و نفت و گاز با هم همراهند. اگر قسمتی از مخزن را در نظر بگیریم که هر سه ماده فوق با هم فضاهای خالی سنگ مخزن را پر نموده‌اند، اشباع از آب را میتوان چنین تعریف کرد : اشباع از آب عبارتست از درصدی از حجم فضاهای خالی که توسط آب پر شده است . همچنین است تعریف اشباع از نفت و گاز.

اگر فقط آب در مخزن موجود باشد اشباع از آب عبارتست از :

1. Saturation

$$S_w = \frac{V_w}{V_p}$$

دراین رابطه :

S_w اشباع از آب ، V_w حجم آب موجود در فضاهای خالی

و V_p حجم فضای خالی سنگ (خلل و فرج) است.

اگر مخزنی آب و نفت داشته باشد اشباع از نفت عبارتست از :

$$S_{oil} = \frac{V_P - V_W}{V_P} = 1 - S_W$$

در صورتیکه مخزنی نواماً نفت و آب و گاز داشته باشد اسباع از گاز برابر است با

$$S_{gass} = \frac{V_P - (V_W + V_O)}{V_P} = 1 - (S_W + S_O)$$

در زیر سطح ایستابی و در مخازنی که فقط آب داشته باشد اشباع از آب ٪۱۰۰ است یعنی تمام فضاهای خالی توسط آب پر شده است . در صورت وجود سیالات دیگر اشباع از آب کاهش می‌یابد ولی هرگز به صفر نمی‌رسد. به علت اختلاف فشاری که در اثر حفرچاه در دیواره چاه و اطراف حاصل میشود و در صورت تراوا بودن سنگها سیالات موجود در مخزن بطرف چاه حرکت میکنند و چون در اثر مرور زمان این اختلاف فشار به سمت صفر میل می‌نماید. نمی‌توان تمام سیال موجود در مخزن را بدون پمپاژ استخراج نمود. درصدی از سیال که تحت فشار هیدرواستاتیک سیال مخزن. و بدون پمپاژ مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرد معمولا بین ۳۵-۲۰٪ کل ذخیره است. میزان اشباع آب و هیدروکربورها در مخازن هیدروکربوری و برآورد حجم ذخایر دارای اهمیت ویژه است. اشباع از آب را می‌توان توسط روابطی که بین اشباع و مقاومت ویژهٔ ناحیه تراویده، R_{mf}، مقاومت آب سازند R_w و

مقاومت سازند R_t وجود دارد تعیین نمود. مقاومتهای فوق توسط نمودارهای مقاومت ویژه برآورد می‌شوند.

ضریب سازند [1]

براوردهای تجربی مختلف نشان داده‌اند که مقاومت ویژه الکتریکی یک سازند تمیز (سازند کم رس) بامقاومت ویژه الکتریکی آب آن سازند متناسب است . این تناسب دارای ضریب ثابتی است که آنرا ضریب سازند می‌نامند به عبارت دیگر ضریب سازند عبارتست از نسبت مقاومت ویژهٔ الکتریکی سازند R_o (در صورتی که سازند کاملاً اشباع از آب باشد)، به مقاومت ویژهٔ الکتریکی آب درون آن R_w

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

برای یک تخلخل مشخص و در صورتیکه $R_w \leq 1$ باشد، F تقریباً ثابت است اما تجربه نشان داده است که در بیشتر آبهای مقاوم مقدار F همراه با افزایش R_W کاهش می‌یابد.

اگر اندازه دانه‌ها افزایش یابند باز هم مقدار F کاهش می‌یابد این پدیده به رسانندگی بالاتر جریان توسط دانه‌های رسانای درشت‌تر در آب شیرین نسبت داده میشود.

ضریب سازند تابع تخلخل و مقدار اشباع است . روابط تجربی برای بیان رابطه بین این دو ارائه شده است ارچی[2] رابطه.

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

1. Formation Factor 2. Archie

را ارائه نموده است که در آن φ تخلخل و a یک عدد ثابت و m فاکتور سیمانته شدن است. a , m به صورت تجربی و بطور تقریب برآورد مشوند. برای ماسه سنگها رابطهٔ

$$F=\frac{0.81}{\varphi^2}$$

و برای سازندهای فشرده رابطهٔ [۱]

$$F = \frac{1}{\varphi^2}$$

پیشنهاد شده است.

رابطه کلی

$$F = \frac{0.62}{\varphi^{2.15}}$$

نیز توسط هامبل [۲] ارائه گردیده است. که در بسیاری موارد نتایج پذیرفتنی را بـه هـمراه دارد ولی برای سنگهای گچی رابطهٔ $F = \frac{1}{\varphi^2}$ مناسب‌تر است. و برای سنگها اوولیتی F برابر $\frac{1}{\varphi^{2.5}}$ تـا $\frac{1}{\varphi^{2.2}}$ ره‌آورد بـهتری دارد. حـتی در سـنگهای کـاملاً اوولیـتی مـمکن است m بـه ۳ هم برسد.

رابطه اشباع و ضریب سازند

در حالت کلی رابطه بین اشباع و ضریب سازند به‌نوع سازند بستگی دارد. در یک سازند تمیز (کم رس) رابطه تجربی $S^nw = \frac{R_o}{R_t}$ توسط آرچی ارائه شده است که در این رابطه Sw اشباع آب و R_o مقاومت ویژهٔ سارند است در صورتیکه اشباع آب ٪ ۱۰۰ باشد و R_t مقاومت مخصوص همان (سازند) است در صورتیکه از اب و هیدروکربور تواماً اشباع شده باشد. توان n تقریباً برابر ۲ (بین ۲/۲-۱/۷) می‌باشد. از طرفی دیدیم که

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

1. Compact 2. Humble

لذا $S^n_w = \frac{FR_w}{R_t}$

خواهد بود. این رابطه به رابطهٔ اشباع آب آرچی معروف است. برای تفسیر کمی نمودارهای الکتریکی از رابطه $S^2_w = \frac{R_o}{R_t}$ استفاده می‌شود.

R_t از نمودار بدست آمده از بخشی از چاه که حاوی هیدروکربور است بدست می‌آید و R_o از بخشی که سازند ٪۱۰۰ اشباع از آب است قابل محاسبه است. البته این رابطه به شرطی قابل قبول است که تخلخل و ضریب سازند در هر دو بخش چاه یکسان و یا نزدیک بهم باشند.

شاخص مقاومت[1]

نسبت $\frac{R_t}{R_o}$ شاخص مقاومت نامیده میشود. $I = \frac{R_t}{R_o}$

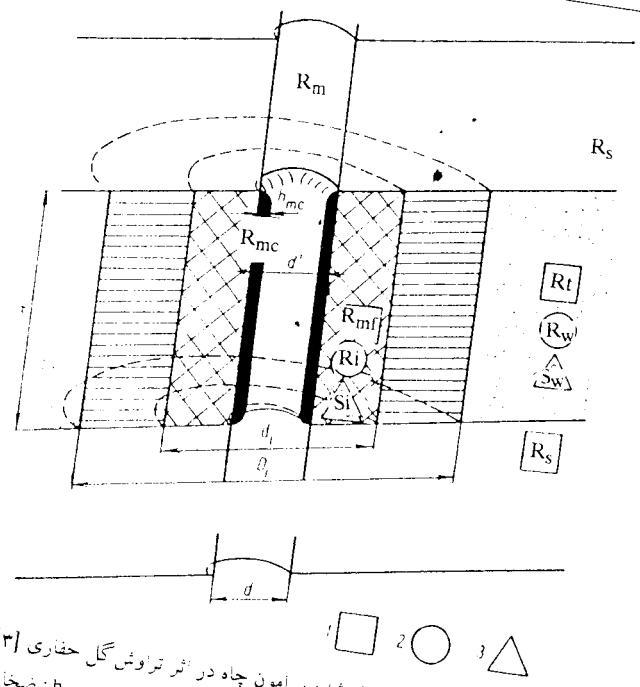
باتوجه به آنچه که گفته شد، روابط زیر بین پارامترهای متفاوت برقراراست :

$$I = \frac{1}{S^n_w} \qquad F = \frac{R_t}{IR_w} \qquad R_o = F R_w \qquad S^n_w = F \frac{R_w}{R_t}$$

تأثیر نفوذ گل حفاری در پیرامون چاه

گل حفاری علاوه بر اینکه فضای حفر شده یعنی داخل چاه را پرمیکند تا حدی هم به سازندهای پیرامون چاه نفوذ می‌نماید لذا در اطراف چاه ناحیه‌هایی مطابق شکل ایجاد (۲-۲) میشود.

1. Resistivity Index



شکل (۲-۲) فضاهای ایجاد شده پیرامون چاه در اثر تراوش گل حفاری [۳]

d : قطرچاه، d_I:قطر فضای‌تراویده، D : قطر فضای تراویده‌و آغشته، h_{mc} : ضخامت‌کیرد
R_s: مقاومت ویژه لایه‌های بالا و پایین لایهٔ موردنظر

I- فضای داخل چاه با مقاومت ویژه‌گل حفاری R_m

II- کیرد (اندود) چاه[۱] که عبارت است از ضخامتی از گل که به جدارد چاه چسبیده و حالت اندود دارد. با مقاومت ویژه R_{mc}

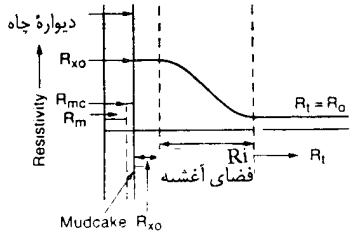
III- ناحیه تراویده[۲] (اشباع ازگل حفاری) با مقاومت ویژه R_{xo}،R_{mf}

IV- ناحیه آغشته[۳] (تحت تاثیر نفوذ گل است اما از آن اشباع نمی‌شود) با مقاومت ویژه R_i

1. Mud cake
2. Flushed zone
3. Invaded zone

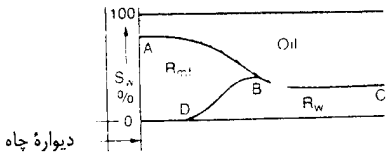
V- ناحیه حاوی آب سازند [1](ناحیهٔ دست نخورده) با مقاومت ویژه R_t

وقتیکه چاه در یک آخوان حفر شده باشد به عبارت دیگر وقتیکه سیال درون سازند فقط آب باشد، گسترش هر یک از زونها و مقاومت ویژه الکتریکی آنها، بشرطی که $R_{mf}>R_w$ باشد به صورت زیر است



شکل (۲-۳) فضاهای ایجاد شده پیرامون چاه و مقاومت ویژه آنها در نقاطی که سازند فقط حاوی آب است. [۲]

وقتیکه سازند حاوی آب و نفت (یا هیدروکربورهای دیگر) باشد گسترش فضاها در صورتیکه $R_{mf}>R_w$ باشد به صورت شکل (۲-۴) می‌باشد.

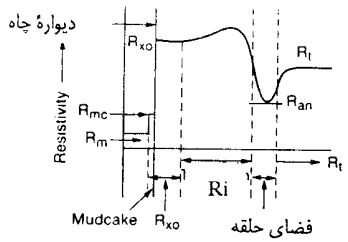


شکل (۲-۴) فضاهای ایجاد شده پیرامون چاه و مقاومت ویژه آنها در سازندهای حاوی آب و هیدروکربور. [۲]

1 Uninvaded zone water formation

و سرانجام شکل (۲-۵) گسترش فضاهای تراویده و آغشته را در یک سازند کـه اشـباع از هیدروکربور زیاد می‌باشد و حاوی مقدار بسیار کمی آب است را نشان می‌دهد.

در چنین شرایطی یک فضا به صورت یک پوستهٔ استوانه‌ای شکل و با مقطع افقی بشکل یک حلقه که در شکل با علامت حلقه یا Annulus نشان داده شده است در پیرامون گمانه ایجاد می‌شود علت ایجاد این حلقه، پسروی سریع‌تر نفت نسبت به آب در اثر فشار گـل تـراویـده است. مقاومت ویژهٔ الکتریکی آن R_{an}، کمتر از R_{xo} و R_t می‌باشد.



شکل (۲-۵) فضاهای تراویده R_{xo}، آغشته R_i و حلقه R_{an} که در پیرامون چاه در یک سازند حاوی هیدروکربور (اشباع بسیار کم آب) ایجاد می‌شود [۲]

نشانه‌های مورد استفاده در چاه پیمایی :

درچاه پیمایی برخی ازحروف لاتین ویونانی به عنوان نشانه‌های مربوط به پارامترهای متفاوت مورداستفاده قرارمی گیرندکه کم وبیش جنبه جهان شمول یافته‌اند. مهمترین این نشانه‌هابه شرح زیرند.

مقاومت ویژه گل حفاری	R_m	مقاومت ویژه معادل گل تراویده	R_{mfe}
مقاومت ویژه حقیقی سازند	R_t	مقاومت ویژهٔ کیره چاه	Rm_c
ضخامت کیرهٔ جا	t_{m_c}	مقاومت ویژه ناحیه تراوند	R_{xo}
مقاومت ویژه ناحیه آغشته و تراویده	R_i	مقاومت ویژه گل تراویده	R_{mf}
تخلخل	φ	مقاومت ویژه آب سازند	R_w
ضخامت لایه (فوت)	e , t	مقاومت سازند ٪۱۰۰ اشباع از آب	R_O
قطرمتوسط ناحیه آغشته	D_i	مقاومت ویژهٔ گل حفاری	R_m
قطر چاه	d	درجه حرارت ته چاه برحسب فارنهایت	BHT
شاخص هیدروژنی آب	H_w	ضریب سازند	F
شاخص هیدروژنی نفت	H_o	اشباع از آب	S_w
پتانسیل ممراز	E_m	اشباع از نفت	S_o
پتانسیل الکتروشیمیایی	E_c	اشباع از گاز	Sg
پتانسیل الکتروکینیک	E_k	پتانسیل خودزا	SP
جرم مخصوص	ρ	نمودار پرتوگاما	GR.L
مقاومت ویژه معادل آب سازند		R_{we}	
نمودارنوترون پرتوگاما		(SGR)NGS	
نمودارگسترش امواج الکترومغناطیسی		EMPL	
نمودار زمان گسترش امواج الکترومغناطیسی		EMTPL	
کاهیدگی امواج الکترومغناطیسی		EMATT	
ابزار گسترش امواج الکترومغناطیسی		EPT	

پرسش و تمرین

۱- ویژگیهای فیزیکی مورد استفاده در چاه‌پیمایی را تعریف کنید و علت استفاده آنها را بیان کنید.

۲- عوامل مؤثر در مقاومت ویژه الکتریکی در سازندها و چگونگی تأثیر آنها بر مقاومت ویژه را بیان کنید.

۳- ارتباط تخلخلهای تعریف شدهٔ مختلف با یکدیگر را بیان کنید. این ارتباط را به صورت یک مجموعه و زیرمجموعه‌های آن بنویسید.

۴- عوامل مؤثر در نفوذپذیری سنگها را بیان کنید.

۵- اگر در محاسبات اشباع از آب در یک نفت خوان با فضای دوکیلومتر مکعب ۲٪ اشتباه شده باشد، در ذخیرهٔ برآورد شده چند بشکه نفت اشتباه شده است؟

۶- تفاوت فضاهای تراویده و آغشته چیست؟

۷- در مورد مقاومت ویژهٔ هر یک از فضاهای ایجاد شده در پیرامون چاه و ارتباط آنها با یکدیگر بحث کنید.

۸- علت ایجاد کیره چیست؟

۹- در مورد ارتباط ضخامت با تراوایی بحث کنید.

۱۰- فضای حلقه چیست و چگونه ایجاد می‌شود؟

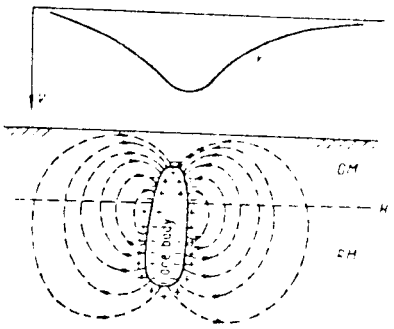
۳

پتانسیل حودزا[1] (SP)

پتانسیل خودزا

پتانسیل خودزا عبارت است از پتانسیل طبیعی که در اثر عدم تقارن بارهای موجود در نقاط مختلف زمین ایجاد می‌شود بعنوان مثال اگر بعضی از پیکره‌های معدنی نظیر پیریت FeS_2، منیتیت Fe_3O_4 و اکثر سولفورها و ... طوری در زمین واقع شوند که یک قسمت آن در بالای سطح ایستابی و قسمت دیگر در زیر سطح ایستابی قرار گیرد، قسمت بالایی تحت تاثیر هوازدگی قرار گرفته و در اثر اکسیژن موجود در هوا بار منفی قسمت بالائی افزایش می‌یابد. و پیلی طبیعی مطابق شکل بوجود می‌آید. در اثر ایجاد این پیل اختلاف پتانسیل بین قسمتهای مختلف پیکره، حاصل می‌شود شکل (۳-۱). اگر پیکرهٔ مذکور در نزدیکی سطح زمین باشد با دو الکترود و یک ولت‌متر می‌توان اختلاف پتانسیل بین دو الکترود در سطح زمین را اندازه‌گیری و خطوط هم پتانسیل را در سطح رسم نمود.

1. Spontaneous - Potential (self potential)



شکل (۳-۱) یک پیکرهٔ سولفوری و پتانسیل خودزای پدید آمده در اثر اکسیدان و احیاء پیرامون آن

در گمانه‌های اکتشافی بویژه چاههای نفت و آب، پتانسیل خودزا مربوط به حالت فوق نیست بلکه در اثر اختلاف غلظت نمکهای موجود در آب سازند و گل حفاری و تبادل یونی بین گل و آب و تفاوت جنبش یونها در سازندها است که پتانسیل خودزا ایجاد می‌شود. در برخی از موارد، در پیرامون کانه‌های فلزی بویژه سولفورها، در گمانه‌ها نیز پتانسیل خودزای ناشی از اکسیداسیون و احیاء پیکرهٔ فلزی پدید می‌آید. در این مورد در صفحه‌های بعد گفتگو خواهد شد.

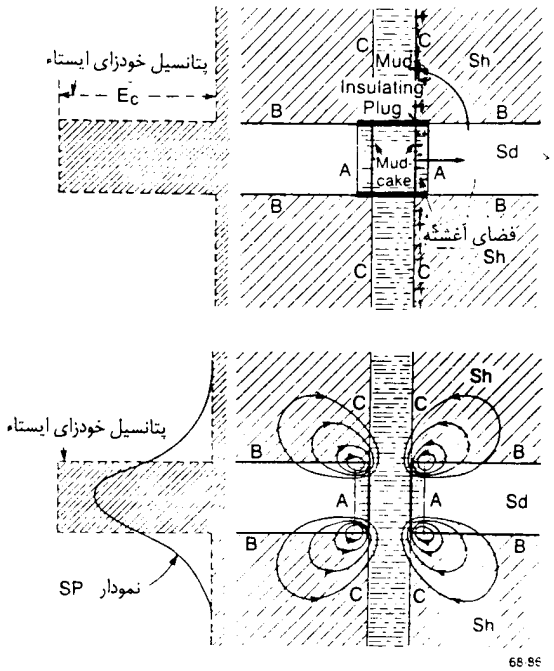
منشاء اصلی پتانسیل خودزا در گمانه‌ها

برای بررسی منشاء SP ژرفای پیرامون همبری دو لایه شیل و ماسه سنگ را در یک چاه در نظر می‌گیریم. اگر شوری آب سازند بیشتر از گل باشد (که معمولاً چنین است) آب سازند حاوی مقدار زیادی از نمکها است که بفرض نمک طعام بودن، یونهای Na^+ و Cl^- به فراوانی در آب موجود خواهند بود. از طرفی در شیلها همواره مقداری اکسیژن آزاد موجود است که این اکسیژن آزاد میل

جذب Na^+ را دارد. از طرف دیگر شیلها فقط نسبت به Na^+ تراوا هستند و تنها اجازه عبور یونهای Na^+ را می‌دهند و نسبت به Cl^- تراوایی ندارد در نتیجه یونهای Na^+ از لایهٔ تراوا (ماسه سنگ) جذب شیل می‌شوند و یک انتقال یونهای مثبت الکتریکی از ماسه سنگ بطرف شیل ایجاد می‌شود. این فرآیند باعث یک پتانسیل الکتریکی در شیل می‌شود که نسبت به ماسه سنگ پتانسیل مثبت است (شکل ۳-۲).

از طرف دیگر چون غلظت نمک گل حفاری کمتر از غلظت نمک موجود در شیل است این مسئله باعث حرکت یونهای Na^+ از شیل به گل می‌شود. در نتیجهٔ این تبادلهای یونی جریان الکتریکی خودزائی بین آب سازند، شیل و گل حاصل می‌شود. که به پتانسیل ناشی از آن، پتانسیل ممبران[1] گفته می‌شود.

1. Membrane Potential



شکل(۳-۲) نمایش شماتیک پتانسیل خودزا و پخش خطوط جریان در پیرامون یک لایهٔ تراوا، ـــــ نمودار SP، ---- نمودار SSP، Sd : ماسه سنگ، Sh : شیل [۲]

بین آب سازند و ناحیه تراویده هم تبادل یونی وجود دارد. چون معمولاً غلظت آب سازند بیشتر از گل تراویده است، یونهای Cl^- آب جذب ناحیهٔ تراویده می‌شوند. علت جذب کمتر یونهای Na^+ توسط ناحیه تراویده، جنبش کمتر این یونها نسبت به Cl^- و زیاد بودن فشار در ناحیهٔ تراویده نسبت به ناحیه دست نخورده است. این تبادل یونی مسبب یک شارژ منفی در سازند تراوا

می‌شود. پتانسیلی که بین ناحیهٔ تراویده و آب سازند ایجاد می‌گردد به پتانسیل تراوش[1] موسوم است.

بین گل حفاری و ناحیه تراویده هم پتانسیلی وجود دارد که این پتانسیل ناچیز بوده و از آن صرف‌نظر می‌شود. همانطور که از مطالب فوق استنباط میشود منشاء اصلی SP منشاء الکتروشیمیائی است.

برای محاسبهٔ هر یک از پتانسیلهای فوق رابطه‌هائی موجود است. برای محاسبهٔ میزان پتانسیل ممبران از رابطهٔ

$$E_m = \frac{R\ T}{F} \text{Log} \frac{a_W}{a_{mf}}$$

استفاده می‌شود که در این فرمول، a_W فعالیت شیمیایی آب سازند، RT ثابت گازها، F عدد فاراده و a_{mf} فعالیت شیمیائی گل تراویده است.از آنجا که هدایت ویژه متناسب با فعالیت شیمیایی و متناسب با وارون مقاومت ویژه الکتریکی است می‌توان رابطهٔ فوق را برای مقاومت ویژه به صورت زیر نوشت.

$$E_m = \frac{RT}{F} \text{Log} \frac{R_{mf}}{R_W}$$

در ۷۷ درجه فارنهایت با عددگذاری در رابطهٔ فوق داریم.

$$E_m = 59.1 \log \frac{R_{mf}}{R_w}$$

1. Liquid Junction Potantial

مقدار پتانسیل تراوش E_j بستگی به تحرک یونهای Na^+ و Cl^- دارد اگر U تحرک یونهای Cl^- و V تحرک یونهای Na^+ باشد مقدار E_j از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود:

$$E_J = \frac{U - V}{U + V} \cdot \frac{R\,T}{F} \operatorname{Log} \frac{R_{mf}}{R_W}$$

در ۷۷ درجهٔ فارنهایت با توجه به توان تحرک یونهای Na^+ و Cl^- E_j برابر خواهد بود با:

$$E_j = 11.5 \log \frac{R_{mf}}{R_w}$$

و پتانسیل الکتروشیمیائی جمع دو پتانسیل فوق است یعنی :

$$E_c = E_M + E_J = \frac{R\,T}{F} \operatorname{Log} \frac{R_{mf}}{R_W} + \frac{U - V}{U + V} \cdot \frac{R\,T}{F} \operatorname{Log} \frac{R_{mf}}{R_W}$$

$$E_c = K \operatorname{Log} \frac{R_W}{R_{mf}} = - K \log \frac{R_{mf}}{R_w}$$

K به درجهٔ حرارت بستگی دارد و از رابطهٔ زیر بدست می‌آید. در این رابطه t بر حسب درجهٔ فارنهایت است.

$$K = 61 + 0.133t$$

علی رغم مطالب فوق فرمول بالا تقریبی بوده و فقط در مواردی که بین شوری آب سازند و گل حفاری اختلاف چشمگیری وجود دارد، قابل استفاده است. مثلاً در مواردی که غلظت آب سازند کمتر از ۱/۵٪ باشد فرمول فوق اعتبار چندانی ندارد و باید از رابطهٔ دقیق‌تری یاری جست که فعالیت شیمیائی تمام نمکهای مهم آب سازند و گل حفاری را شامل شود. در موردی که نمکهای سدیم،

منیزیم و کلسیم موجود باشند از رابطهٔ دقیق‌تر زیر استفاده می‌نمائیم.

مربوط به گل تراویده

$$SP = K \text{ Log } \frac{(a_{Na^+} \ a_{Ca^+} \ a_{mg^+})_{mf}}{(a_{Na^+} \ a_{Ca^+} \ a_{mg^+})_{w}}$$

مربوط به آب

منشاء دیگر SP

افزون بر منشاء الکترو شیمیائی، SP منشاء الکتروکنتیک نیز دارد این بخش از Sp پتانسیل الکتروفیلتراسیون نامیده می‌شود. گل حفاری در سازندها به فراخور تراوایی که دارند تراوش می‌کند و به همین علت در دیوارهٔ چاه و پیرامون آن اختلاف فشاری به وجود می‌آید اگر اختلاف فشار در یک سازند تراوا را بین دو نقطهٔ نزدیک دیواره و حوالی آن برابر P فرض کنیم پتانسیل الکترو فیلتراسیون برابر است با:

$$E_k = \frac{K P}{n}$$

k ضریب ثابت و n ویسکوزیتهٔ گل فیلتره است

در سازندهای شیلی هم که دارای تراوایی کافی باشند به طوری که اجازهٔ عبور گل حفاری را بدهند. پتانسیل الکتروفیلتراسیون E_k(Sp) حاصل می‌شود. پتانسیل فوق طوری عمل می‌نمایند که در لایهٔ تراوا SP از مقدار مثبت فاصله بگیرد(خط شیل به منفی نزدیک می‌شود). در عمل اثر پتانسیل الکتروفیلتراسیون ناچیز است و می‌توان از آن چشم‌پوشی کرد. بویژه در حالتی که آب سازند شور بوده و مقاومت ویژهٔ آن کمتر از ۰/۱ اهم متر باشد. اما در مواردی ممکن است اهمیت یابد بویژه

اگر اختلاف فشار تاحد درخور توجهی افزایش یابد و این عمل برای گلهای با وزن مخصوص خیلی زیاد صادق است (در چنین مواردی ممکن است E ناشی ازکبرهٔ چاه وشیل یکدیگر را خنثی کنند). در صورت فشار زیادگل حفاری و تراوا بودن سازند، کبرهٔ ضخیم تری تشکیل می شود و فشار بیشتری به سازند منتقل می‌گردد. اگر سازند تمیز و متخلخل باشد، تاثیر E_K زیاد می‌شود. و ممکن است تا ۲۰۰- میلی‌ولت برسد این تغییرات در عمل ممکن است روی منحنی SP تاثیر گذاشته و اشکالاتی در تفسیر ایجاد کند. و در چنین شرایطی نمی‌توان از SP برای محاسبه مقاومت آب سازند R_w استفاده کرد. امابه هر ترتیب در شرایط عادی SP ناشی از الکتروفیلتراسیون در مقابل SP الکترو شیمیائی یا SP الکترو موتوری قابل چشم‌پوشی است.

نمودار SP برداشت شده معمولاً تنها بخشی از تغییرات شدید SP را در برابر سازندهای متفاوت نشان می‌دهد و با روشهای کنونی اندازه‌گیری و دستگاههای حال حاضر نمی‌توان تغییرات SP را به صورت ایده‌آل بدست آورد و نمودار آنها را تهیه کرد. ولی در شرایط مناسب نمودار تهیه شده به نمودار واقعی نزدیک است.

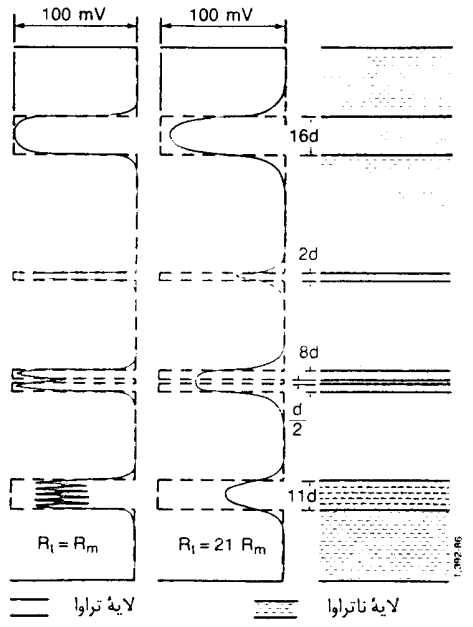
پتانسیل ایستاء [1]

اگر پتانسیل خودزای سازند بطور بسیار ایده‌آل و نزدیک به پتانسیل واقعی آنها رسم شود نمودار پتانسیل ایستاء یا دیاگرام استاتیک SSP حاصل می‌شود. (شکلهای ۳-۲ و ۳-۳).

همانگونه که اشاره شد. مقدار SP پیرو میزان نمک‌های موجود در آب سازند و گل حفاریست معمولاً نمک گل حفاری از آب سازند کمتر است. به عبارت بهتر معمولاً گل حفاری از آب سازند شیرین‌تر است در چنین شرایطی نمودار SP به طرف خط شیل متمایل می‌شود.

1. Static SP (S.SP)

در مواردی هم آب سازند شیرین‌تر از گل حفاری است (این وضعیت در سفره‌های آب‌شیرین پیش می‌آید). در چنین شرایطی نمودار SP بطرف خط ماسه سنگ متمایل می‌شود. بهر ترتیب این گونه تأثیرها سبب پدید آمدن تغییراتی در اندازه‌گیری‌ها می‌شوند و باعث می‌شود که نمودار SP با نمودار SP واقعی متفاوت باشد. SSP پس از حذف این اثرهای ناخواسته بدست می‌آید و دامنه تغییرات آن همواره از دامنهٔ تغییرات SP بیشتر است.



شکل (۳-۳)نمودار SP و (SSP) در لایه‌های با تراوایی متفاوت [۲]

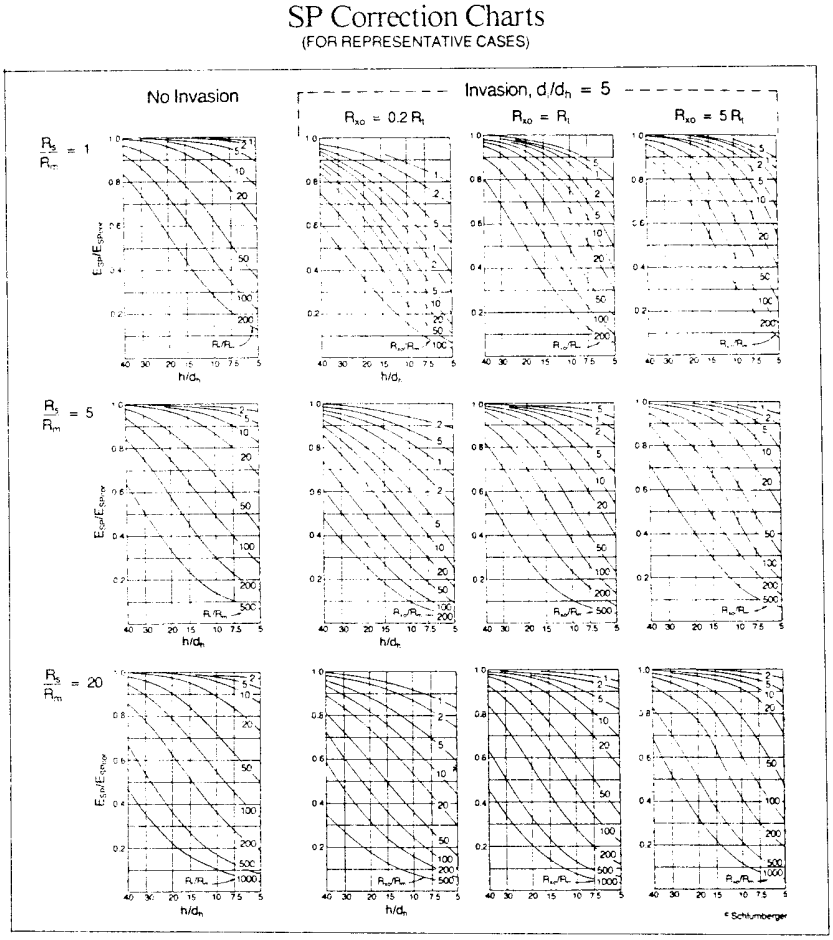
SP ـــــ ، SSP ----- ، d : قطر چاه

در عمل اگر تاثیر SP شیل را از روی SP لایه‌های دیگر حذف نمائیم SSP حاصل می‌شود. برای این کار کافی است SP شیل را از SP هر لایه کم نمائیم تا مقدار SSP بدست آید.

پتانسیل ایستاء سازندهای غیررسی نیروی محرکهٔ الکتروموتیو است که در اثر اختلاف فعالیت (یامقاومت) نمکهای گل تراویده و آب سازند حاصل میشود و مقدار آن برابر است با :

$$SSP = K \, Log \frac{R_W}{R_{mf}}$$

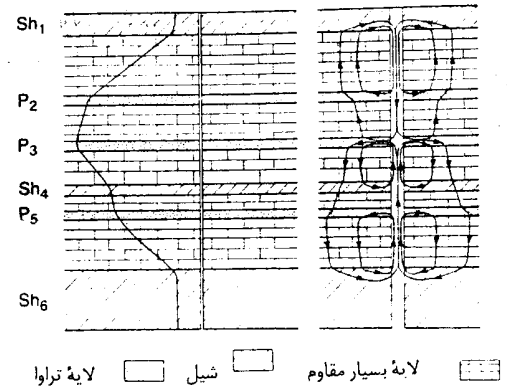
که در مورد آن بحث کافی بعمل آمد. اگر لایه‌های رسی تراوایی لازم داشته باشند بگونه‌ای که نسبت به یون Cl^- هم تراوا باشند، افزون برگذر یونهای Na^+ یونهای Cl^- نیز از آن عبور می‌نمایند. گذردهی انتخابی شیل در این حالت کم شده و پتانسیل شیمیایی کاهش می‌یابد و در صورت افزایش تراوائی شیل نسبت به یون Cl^- این پتانسیل بسمت صفر میل می‌کند. در نتیجه کل نیروی الکترو شیمیائی با نیروی E_m الکتروموتیو برابر می‌شود. وجود شیل ممکن است جهت تغییرات E_l را مخالف E_m سازد و نتیجتاً نیروی الکتروموتیوکم شود . با افزایش تراوایی رس این دو مقدار میتوانند همدیگر را خنثی نمایند و $E_c = 0$ شود. در این حالت،تشخیص لایه‌های تراوا از لایه شیل مجاور بسیار مشکل است. در مواردی که لایه‌ها به اندازهٔ کافی ضخیم باشند و آب سازند شور باشد می‌توان SSP را با توجه به نمودار SP برآورد نمود. اما در مواردی که لایه‌ها نازک هستند و لایه‌های شیلی کامل و یا لایه‌های تمیز وجود ندارد باید از نمودارهای کمکی برای تصحیح SSP استفاده نمود (شکل ۳-۴).



شکل (۳-۴) تصحیح SP برای نسبتهای متفاوت مقاومت ویژهٔ لایه R_S به مقاومت ویژهٔ گل حفاری R_m و نسبتهای متفاوت قطر فضای آغشته d_i به قطر گمانه d_h و همچنین نسبتهای متفاوت مقاومت فضای تراویده R_{XO} به مقاومت لایه مقاوم R_t [5]

شبه پتانسیل خودزا[1]

شبه پتانسیل خود عبارتست از اختلاف پتانسیل نقطه‌ای در داخل گل حفاری در کنار سازند نارسا و نقطه‌ای در خارج از آن سازند. به عبارت بهتر شبه پتانسیل، اختلاف پتانسیل بین دو نقطه درون چاه است که یکی در لایه رسانا و دیگری در نارسانا قرار دارد. شبه پتانسیل خودزا با مقاومت ویژه پیوند وارون دارد. شبه پتانسیل خودزا در چنین شرایطی تحت عنوان اثر لایه‌های بسیار مقاوم بر روی نمودار SP نیز بررسی می‌شود. در حالتی که یک لایه بسیار مقاوم بین یک شیل و یک لایهٔ تراوا قرار گرفته باشد نمودار SP با یک شیب ثابت به صورت خطی در مقابل لایهٔ بسیار مقاوم تغییر می‌کند. علت آن است که قطبهای مثبت و منفی مقابل دو لایه رسانا و تراوا داخل گل یک میدان الکتریکی ایجاد می‌کنند و دستگاه تغییرات این میدان را اندازه می‌گیرد، نه SP موجود در لایه مقاوم را زیرا خطوط جریان تمایلی به عبور از لایه مقاوم ندارند و اکثراً در کل متمرکز می‌شوند (شکل ۳ـ ۵).



شکل (۳-۵) نمایش شماتیک نمودار SP در لایه‌های بسیار مقاوم که بین لایه‌های رسانا و نیمه رسانا قرار گرفته‌اند و نحوهٔ بخش خطوط جریان در لایه‌ها. همانگونه که در شکل مشاهده می‌شود نمودار SPبا شیب ثابت در لایه‌های بسیار مقاوم (آهکها) تغییر می‌کند که علت آن SP ناشی از دو قطب مخالف SP در لایهٔ رسانا و نیمه رسانامی‌باشد Sh1,Sh2,Sh6شیل (رسانا) P2, P3, P5 ماسه سنگ (نیمه رسانا) در بین این لایه‌ها لایه‌های بسیار مقاوم آهکی قرار گرفته است.

1. Pseudo Static Selfpotantial (P.SP)

ضریب تخفیف [1]

نسبت شبه پتانسیل خودزا به پتانسیل ایستاء را ضریب تخفیف می‌نامند :

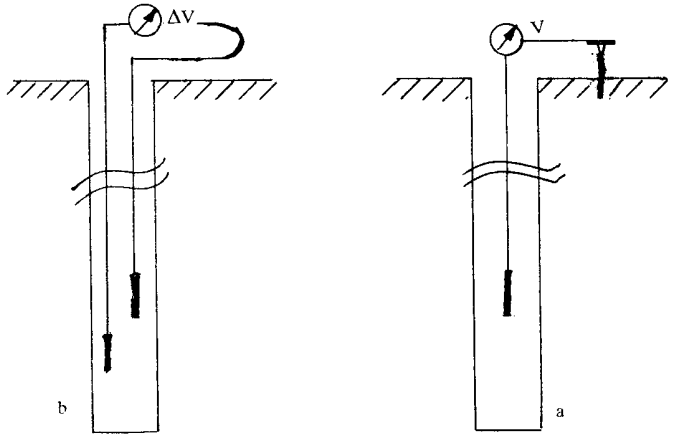
$$\text{ضریب تخفیف} = \frac{PSP}{SSP}$$

تاثیر هیدروکربور هاروی PSP

هیدروکربورها مانع حرکت و مهاجرت یونها شده و در صورت تساوی شرایط دیگر P.SP در یک سازند نفت‌دار کمتر از PSP در یک سازند آب دار است.

ابزار اندازه‌گیری SP

ابزار اندازه‌گیری SP بسیار ساده است، در این ابزار از یک الکترود ثابت در سطح زمین و یک الکترود متحرک که درسوند جاسازی شده است استفاده می‌شود. در مورد کانسارهای فلزی گاهی گرادیان SP اندازه‌گیری می‌شود که در این حالت هر دو الکترود درون سوند قرار می‌گیرند.



شکل (۳-۶)- ابزار اندازه‌گیری SP،
a - ابزار SP معمولی، b - ابزار اندازه‌گیری گرادیان SP

1. Reduction factor

شکل نمودار پتانسیل خودزا SP

شیب نمودار SP در هر ژرفایی بطور نسبی بستگی به شدت جریان SP دارد. همانطور که در شکل (۳-۵) نشان داده شده است شدت جریان SP در گل و در حد فاصل بین دو لایه به حداکثر خود می‌رسد لذا تغییرات نمودار در محل همبریها به بیشترین حد خواهد رسید. بطور کلی شکل منحنی SP به عوامل زیادی بستگی دارد که مهمترین آنها عبارتند از:

۱- ضخامت لایه و مقاومت ویژه حقیقی لایه تراوا R_t و ضخامت لایه‌های شیلی مجاور

۲- مقاومت ویژه و شعاع ناحیه تراویده R_{xo} ، d_i

۳- مقاومت ویژه لایه‌های مجاور R_s

۴- قطر چاه و مقاومت ویژه گل حفاری R_m

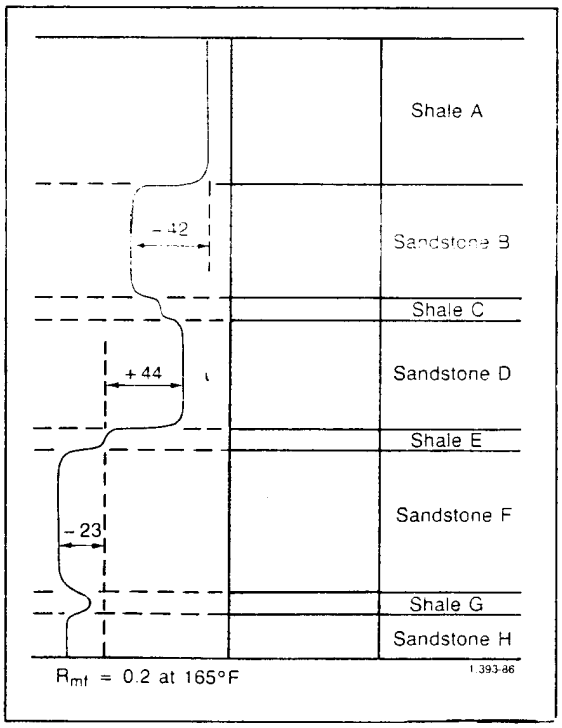
در حالت کلی برای جدا نمودن لایه‌های مختلف بکمک منحنی SP میتوان همبری لایه‌ها را در نقطهٔ عطف منحنی SP در نظر گرفت برای لایه‌های نازک مقدار تغییرات SP ممکن است خیلی از تغییرات SP ایستاء کمتر شود. در بعضی از سازندهای مقاوم اختلاف SP در زونهای تراوا و شیل ممکن است خیلی زیاد باشد. این اختلاف پتانسیل زیاد روی جریان SP و درپی آن روی شکل نمودار SP تأثیر می‌گذارد. زیرا در چنین شرایطی خطوط جریان SP در مقابل لایه بسیار مقاوم در گل (فضای چاه) متمرکز می‌شود. علت این امر اینست که خطوط جریان در هنگام برخورد با لایه مقاوم از آن دوری جسته و تمایل دارند که از مسیر رساناتر عبور نمایند. لذا مسیر خود را در گل انتخاب می‌کنند و پس از رسیدن به شیل چون شیل رساناتر از گل است به داخل شیل هدایت میشود (مطابق شکل ۳-۲) و در همبری بین شیل و لایه مقاوم جریان یافته و چنانچه در شکل مشهود است سیکل خود را طی میکند در این حالت منحنی SP دقیقاً نمی‌تواند بیانگر چگونگی موقعیت لایه باشد. در چنین شرایطی جدا نمودن حد لایه‌ها از یکدیگر به وسیله نمودار SP به تنهائی با اشکالات فراوان مواجه است.

خط شیل[1]

معمولاً مقدار SP شیل که بیشترین SP مثبت است در دیاگرام SP با خطی مجانب میشود که خط شیل نامیده می‌شود. این خط اساس و مبنای اندازه‌گیری SP بقیه لایه‌ها قرار داده میشود. وقتی که لایه‌هایی با غلظت‌های مختلف نمکها موجود بوده و توسط شیلها از یکدیگر جدا باشند. خط شیل به وضوح قابل مشاهده است. شکل (۳-۷) خط شیل رانمایش داده است. در این شکل لایه‌های ماسه سنگی B و D و F و H و لایه‌های شیلی یا شیل‌دار A و C و E و G وجود دارند. همانطور که اشاره شد، برای محاسبه SSP، SP شیل مبنا قرار می‌گیرد. لذا SSP لایهٔ B برابر mv-42 (میلی‌وولت) برآورد شده که بر مبنای SP لایه A است. شیل C یک لایهٔ کاندی نیست لذا SP آن به حد مبنای SP شیل نمی‌رسد SP لایه D باید با SP لایه C یا E مقایسه شود که در مقایسه با E برابر mV 44+ می‌باشد. مثبت بودن SP لایه D نسبت به E گواهی بر وجود آب شیرین (شیرین تراز گل حفاری) می‌دهد و بیشتر بودن SP در لایه E نسبت به C گواه بر تراوائی بیشتر این لایه نسبت به C است . مقدار SSP لایه F و E برابر mv 23- است. در این حالت لایه دارای تراوائی است اما آب سازند به مراتب شورتر از گل حفاری است. در بعضی از میدانهای نفتی ممکن است لایه شیلی موجود نباشد. با این وجود بازیک خط مبنا وجود دارد. اگر غلظت گل تراویده شده بین غلظت‌های نمکهای آب دو سازند متوالی باشد. یعنی آب یکی از سازندها از گل تراویده شده شیرین‌تر و آب دیگری از آن شورتر باشد ممکن است منحنی SP تغییرات وارون داشته باشد.

اگر لایهٔ تراوا کاملاً تمیز و بدون شیل باشد و ضخامت آن و ضخامت لایه‌های پیرامون آن به اندازه کافی زیاد باشد مقدار SP بدست آمده از نمودار به مقدار SSP نزدیک می‌شود.

1. Shale Line



شکل (۳-۷) جابجایی خط شیل در نمودار SP [۲]

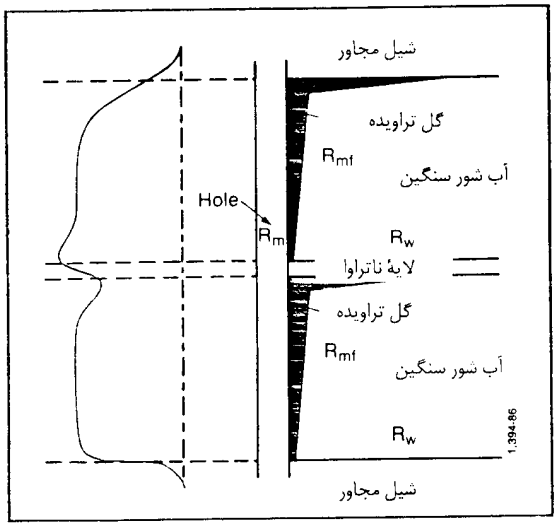
خط ماسه سنگ[1] :

کمترین مقدار، (منفی‌ترین مقدار SP) مربوط به تراواترین سازندی است که حاوی آب شور باشد. در یک میدان نفتی یادر منابع آب معمولاً سازند تراوای حاوی آب شور ماسه سنگ تمیز است، لذا SP ماسه سنگ به خطی مجانب می‌شود که خط ماسه سنگ نامیده شده است. (شکل ۳-۷).

1. Sand Stone Line

ارتباط SP با شرایط تراوش گل حفاری:

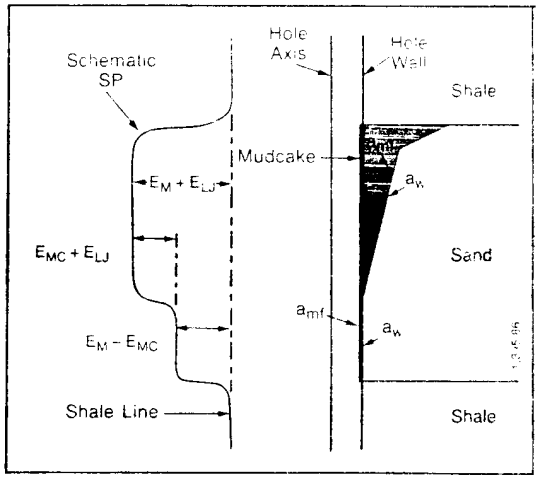
در سازندهای با تراوایی زیاد، موارد غیر عادی از SP مشاهده میشود که اگر به درستی درک و بررسی نشوند اشتباهاتی در ارزیابی رخ خواهد داد. وقتیکه یک سازند با تراوایی زیاد حاوی آب شور در زیر یک سازند ناتراوا قرار گرفته باشد و تحت تاثیر گل تراویده قرار گیرد، گل تراویده، شده توسط آب سنگین سازند به طرف بالای سازند رانده می‌شود. در این حالت گسترش ناحیهٔ تراویده به صورتی در می‌آید که در شکل ۳-۸ سمت راست نمایش داده شده است.



شکل (۳-۸) اثر تراوش گل حفاری در زیر همبری یک لایهٔ ناتراوا و تراوا روی نمودار SP [۲]

در واقع به علت ناتراوا بودن لایهٔ بالایی فشار آب در قسمت بالای سازند تراوای زیرین کم می‌شود و همین کاهش فشار سبب تراوش بیشتر گل حفاری در قسمت بالایی لایهٔ تراوا می‌شود بنابر این گل تراویده در قسمت بالای سازند تراوا شعاع وسیع‌تری را در بر می‌گیرد و بر عکس در سطح پائینی آن، گل قادر به نفوذ قابل ملاحظه‌ای نیست لذا منحنی SP در قسمت بالای سازند با تراوایی

زیاد تحت تاثیر تراوش گل حفاری واقع شده و به طرف SP مثبت میل می‌کند. در حالی که در قسمت زیرین آن چون تراوش گل از حد معمول کمتر است. نمودار SP به طرف مقدار منفی (در اثر حذف اثر تل) میل خواهد نمود و در کل در همبری دو لایه حالت دندانه‌دار به خود خواهد گرفت. در مواردی ممکن است رانش گل تراویده بطرف بالا بطور کامل انجام پذیرد و حالتی مثل شکل ۳-۹ حاصل شود و منحنی SP بگونه‌ای نگاشته شود که گویا دو لایه متفاوت موجود است. در صورتیکه چنین نیست. عملا در ناحیه‌ای که گل تراویده وجود دارد دو پتانسیل E_J,E_M وجود دارند اما در قسمت پایین که گل تراویده وجود ندارد عملاً E_J حذف می‌شود و از طرف دیگر کبرد چاه افزایش می‌یابد و بعنوان یک عضو کاتدی بر میزان منحنی SP می‌افزاید (بطرف شیل) ولی هرگز تأثیر آن به اندازه شیل نیست. لذا در نمودار SP بنظر میرسد که یک لایه با SP بین شیل و ماسه وجود دارد. در تفسیر منحنی SP با توجه به تراوایی سازندهای مختلف و شوری آنها باید چنین مواردی بررسی و از اشتباهات جلوگیری شود.



شکل (۳-۹) اثر رانش کامل گل تراویده توسط آب سازند در یک لایه ناتراوا [۲]

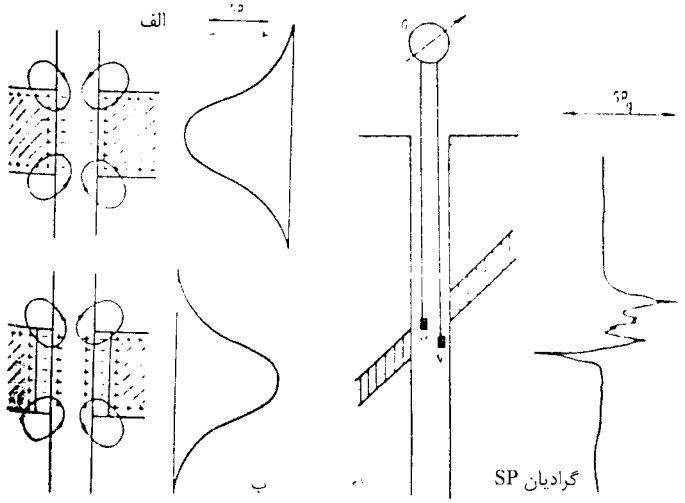
پتانسیل خودزا ناشی از اکسیداسیون و احیاء[1]

پتانسیل ناشی از اکسیداسیون و احیاء در گمانه‌هایی که برای اکتشاف گانه‌ها بویژه سولفورها حفر شده‌اند ایجاد می‌شود. در جاهایی که کمانه ر کانه‌ها (مانند سولفورها) آنتر سبت و یا گرافیت می‌گذرد. چون این مواد رسانندگی الکترونی دا ند در اثر فرآیند کسید سیون و احیاء در دیوارهٔ چاه، کانه‌ها سبب جذب یونهای منفی در داخل چاه شده و این یونها به دیوارهٔ چاه در محلی که چاه کانه را قطع می‌کند چسبیده می‌شوند. با اندازه‌گیری پتانسیل حاصل می‌توان به وجود توده‌های فلزی که چنین ویژگی دارند پی برد (شکل ۳-۱۰).

شرایط فوق تنها زمانی پدید می‌آید که از موقع حفاری چند روزی گذشته باشد. در عمل چون معمولاً پیمایش چاه‌ها در هنگام حفاری انجام می‌شود. بی‌هنجاری پدید آمده در چاه در جایی که چاه توده کانسار را قطع می‌کند بی‌هنجاری مثبت است. علت این است که در هنگام حفاری دره‌های بسیار ریز آهن که در اثر سایش ابزار حفاری بوجود می‌آید و بار مثبت دارند در قسمتی که پیکره فلزی وجود دارد به علت خاصیت آهن‌ربایی که دارد به دیوارهٔ چاه می‌چسبد. شکل (۳-۱۰).

در چنین شرایطی می‌توان از نمودار SP برای تشخیص محل پیکره‌های فلزی استفاده نمود. برای بدست آوردن اطلاعات دقیق‌تر و تشخیص بهتر حدود پیکره فلزی گرادیان SP با دو الکترود که در فاصلهٔ حدود ۲۰ سانتی متری از هم قرار دارند اندازه‌گیری می‌شود.

1. Oxidation Reduction Potential



شکل (۳-۱۰) پتانسیل خودزای ناشی از اکسیداسیون و احیا در پیرامون یک پیکرهٔ سولفوری
الف : زمان زیادی از حفاری گذشته است ب: در حین حفاری برداشت انجام شده است

اثر تغییر غلظت گل حفاری روی نمودار SP

تغییر ماهیت و شوری گل حفاری روی منحنی SP تأثیر می‌گذارد. در صورت عوض شدن ترکیب گل، علیٰرغم اینکه گل داخل چاه هم عوض میشود و تأثیر یکسانی در تمام طول چاه دارد ولی گل نراویده و گل ناحیه آغشته، کمتر تحت تأثیر ماهیت تغییر یافتهٔ گل قرار میگیرند. به عبارت دیگر غلظت آنها با گل جدید متفاوت است و همین امر سبب میشود که در منحنی SP اثرات نامطلوبی حاصل شده و تفسیر را دچار اشکال سازد. در تفسیر نمودارهایی که از چاههایی بدست آمده‌اند که با گلهای با ویژگیهای متفاوت حفاری شده‌اند باید به این نکته توجه نمود.

تاثیر نمکهای مختلف آب سازند روی منحنی SP

در بخشهای قبل ملاحظه شد که مقدار SP از رابطهٔ

$$SP = k \log \frac{R_W}{R_{mf}}$$

و یا

$$SP = -k \log \frac{(a_{Na^+})\ w}{(a_{Na^+})\ mf}$$

حاصل میشود.

امّا اگر علاوه بر یون Na^+ یونهای دیگر نظیر Ca^{++} و Mg^{++} هم موجود باشند (که معمولاً در آب سازند وجود دارند) باید از رابطه دقیق‌تر مربوط به گل ترایده استفاده شود .

$$SP = K \text{ Log } \frac{(a_{Na^+} + a_{Ca^{++}} + a_{Mg^{++}})\ mf}{(a_{Na^+} + a_{Ca^{++}} + a_{Mg^{++}})\ w}$$

در این رابطه Mg^{++} و Ca^{++} و Na^+ بترتیب مربوط به فعالیتهای سدیم و کلسیم و منیزیم است، اندیس mf مربوط به گل ترایده و اندیس w مربوط به آب سازند است.

نوفه‌ها در برداشتهای SP

گاهی برداشتهای SP همراه با نوفه‌هایی می‌شود که برخی از آنها تصادفی و برخی نیز در اثر شرایط فیزیکی درون چاه و یا وجود لایه‌های بسیار مقاوم که بین لایه‌های دیگر قرار می‌گیرند پدید می‌آید. بطور کلی نوفه‌های SP را می‌توان به صورت زیر خلاصه نمود.

۱ ـ اگر به دلایلی (بطور تصادفی) یکی از قسمتهای ابزار اندازه‌گیری مانند بالا بر حالت مغناطیسی بخود بگیرد روی نمودار SP یک نوفه که معمولاً تغییرات آن شکل سینوسی دارد ایجاد

می‌شود. در چنین شرایطی تغییرات سینوسی SP باید از نمودار حذف شده و در نظر گرفته نشوند.

۲ - در صورتیکه بین لولهٔ حداری و کابل رابط سوند به دستگاه نگارنده اتصالی پدید آید، در نمودار SP نوفه ایجاد می‌شود.

۳ - جریانهای مستقیم در پیرامون الکترود SP وقتی که الکترود در برابر سارند خیلی مقاوم قرار دارد باعث افزایش زیاد SP می‌شود. این جریانهای مستقیم ممکن است در اثر در کنار هم قرار گرفتن دو قطعه از ابزار حفاری که از فلزات مختلف ساخته شده‌اند حاصل شود. این دو الکترود و گل حفاری بین آنها یک پیل تشکیل می‌دهند.

۴ - در کناره‌های دریا که کشتی‌ها در عبور و مرور هستند و در محلهایی که خطوط فشار قوی برق از نزدیکی چاه عبور می‌کنند، نوفه در نمودار SP ایجاد می‌شود. این نوفه‌ها با گزینش محل مناسب الکترود سطحی تا حد چشمگیری کاهش می‌یابند.

کاربردهای نمودار SP

روش SP به دلیل آسان و کم هزینه بودن آن کاربرد گسترده‌ای یافته است و حتی در بسیاری موارد بعنوان یک نمودار کمکی همراه نمودارهای دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرد. مهمترین کاربردهای نمودار SP بشرح زیر است.

- شناسایی و تفکیک لایه‌های تراوا از ناتراوا در آبخوانها
- ارزیابی میزان آبدهی لایه‌های آبده در آبخوانها
- شناسایی لایه‌های شیلی از لایه‌های دیگر در نفت خوانها
- استفاده از SSP برای برآورد R_w و یا R_{mf} در نفت خوانها
- استفاده از نمودار SP بعنوان نمودار کمکی همراه برخی از نمودارهای دیگر

- شناسایی لایه‌های شیلی همراه ذغال سنگ در معادن ذغال
- شناسایی پیکره‌های سولفوری و یا گرافیت

کاستیهای روش SP

مهمترین کاستی روش SP کارآیی نداشتن آن در چاه‌های دارای لولهٔ جداری و چاه‌های حشک می‌باشد در برخی موارد شبه SP نمود زیادی روی نمودار SP دارد و مشکلاتی را در تفسیر بوجود می‌آورد. نوفه‌های SP نیز از کاستیهای روش SP می‌باشد.

پرسش و تمرین

۱- عوامل مؤثر در پتانسیل خودزا در چاه‌ها را بنویسید.

۲- اثر لایه‌های با مقاومت ویژهٔ الکتریکی زیاد روی نمودار پتانسیل خودزا را بررسی کنید.

۳- به نظر شما مهمترین کاربرد نمودار پتانسیل خودزا در چیست؟

۴- در رابطه با کار شما مهمترین کاربرد نمودار پتانسیل خودزا چیست؟

۵- چاه آبی در نهشته‌های آبرفتی که تناوبی از لایه‌های ریز دانه، درشت دانه حاوی آب شیرین، و بسیار ریز دانه می‌باشد حفر شده است. به نظر شما نمودار پتانسیل خودزا در این چاه چقدر می‌تواند مفید باشد. نمودار گرادیان SP چطور؟

۶- در مورد ارتباط میان تغییرات نمودار SP و ضخامت و چگونگی قرار گرفتن لایه‌های تراوا و ناتراوا بحث کنید.

۷- آیا از نمودار SP می‌توان در اکتشاف کانسارهای ذغال سنگ استفاده نمود؟ چگونه؟

۸- چگونه می‌توان با روش SP یک نمودار مستقل از زمان حفر گمانه، در یک گمانه‌ای که در کارنسارهای سولفیدی حفر شده است تهیه نمود.

۹- در مورد نوفه‌های SP بحث کنید. آیا افزون بر موارد اشاره شده در این فصل نوفه‌های دیگری را می‌توانید نام ببرید؟

۱۰- اگر گل حفاری، گل نفت سرشت باشد چگونه می‌توان از روش SP استفاده نمود؟ در مورد گل‌های نفت آمیز چی؟

۱۱- در روشهای ژئوفیزیک سطحی، روش قطبش القایی (IP) به سرعت جایگزین روش SP شده است آیا در روشهای چاه پیمایی نیز چنین خواهد بود؟

۱۲- کدامیک از نمودارهای دیگر به SP شباهت داشته و یا می‌توانند جایگزین آن شوند.

۴

نمودارهای الکتریکی

(مقاومت ویژه)[1]

رسانندگی الکتریکی [2]

رسانندگی الکتریکی عبارت از خاصیتی در اجسام است که امکان عبور جریان الکتریسیته را در آن فراهم می‌کند. به اجسامی که رسانندگی الکتریکی آنها زیاد بوده و به سادگی جریان الکتریسته را از خود عبور دهند رسانا می‌گویند. اجسام رسانا به علت پیوندهای ضعیف الکترونی و پدید آمدن ابر الکترونی در صورت وجود جریان الکتریسیته، الکترونها به سادگی در جهت آن توجیه شده و جریان را به خوبی از خود عبور می‌دهند. به عکس در اجسام نارسانا پیوند الکترونی قوی است و ابر الکترونی ایجاد نمی‌شود لذا در صورت وجود جریان الکتریسیته، الکترونها در جهت آن توجیه نشده و جریان را عبور نمی‌دهند (بطور نسبی). باید توجه نمود که هر دو ویژگی رسانایی و مقاومت (نارسانایی) مانند بسیاری ویژگیهای دیگر نسبی هستند. در سازندها و پیکره‌های زمین‌شناسی رسانندگی الکتریکی به علت پدید آمدن ابر الکترونی نیست بلکه گذر جریان بطور جیره با توجیه یونهای موجود در آب سازند امکان‌پذیر می‌شود این گونه رسانندگی را رسانندگی الکترولیتی می‌نامند.

1. Resistivity log 2. Conductivity

مقاومت الکتریکی[1]

مقاومت الکتریکی هر جسم از رابطه $R_1 = \frac{R\,L}{A}$ به دست می‌آید. که در آن R_1 مقاومت الکتریکی جسم، S سطح مقطع و L طول جسم است. R عبارت از پارامتری است که مقاومت ویژه نامیده می‌شود. اگر R را محاسبه کنیم. داریم:

$$R = R_1 \frac{S}{L}$$

اگر در این رابطه $R=1\ \Omega$ اهم و $L = 1\ m$ و $S=1\ m^2$ باشد. در این حالت مقدار R برابر یک اهم متر (Ω m) می‌شود. از واحدهای اهم سانتیمتر و گاهی اهم میلیمتر هم استفاده می‌شود. از رابطهٔ بالا استنباط می‌شود که مقاومت ویژه عبارت است از مقاومت مکعبی از جسم به ابعاد یکه یا مقاومت استوانه‌ای از هر جسم به سطح قاعده یکه و ارتفاع یکه. مقاومت ویژهٔ سازندها و پیکره‌های زمین‌شناسی معمولاً بین ۰/۲ تا ۲۰۰۰ اهم‌متر می‌باشد و مقاومتهای خارج از این محدوده نادر هستند.

رسانندگی الکترولیتی

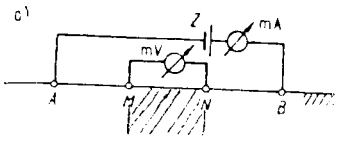
سیالها در برخورد با جریان الکتریسیته مانند فلزها عمل نمی‌کنند. بلکه جریان الکتریسیته بسبب یونیزه شدن بیشتر نمکهای موجود در سیالها می‌شود.

یونهای موجود در سیالها توسط جریان هدایت شده و مسئولیت رسانش جریان را به عهده دارند. رسانندگی سنگها در حالتی که حاوی آب نباشد بسیار کم است اما وجود نمکهای آب درون سنگها رسانندگی آنها را افزایش می‌دهد. این نوع رسانندگی را رسانندگی الکترولیتی گویند و آنچه در مورد سنگها اندازه‌گیری می‌شود معمولا رسانندگی الکترولیتی است.

1 Electrical Resistant

کاربرد مقاومت ویژه الکتریکی در ژئوالکتریک

در برخی از روشهای ژئوالکتریکی برای بررسی لایه‌های زمین به ویژه بررسی معادن فلزی نزدیک به سطح و آبهای زیرزمینی مقاومت ویژهٔ زمین اندازه‌گیری می‌شود. برای این منظور معمولا از دو الکترود فرستنده و دو الکترود گیرنده مطابق شکل (۴-۱) استفاده می‌شود. B,A الکترودهای فرستنده و N,M الکترودهای گیرندهٔ جریان هستند. با برقراری جریان بین A وB اختلاف پتانسیلی بین دو الکترود N,M که مربوط به ستون‌هاشور زده است ایجاد می‌گردد. این اختلاف پتانسیل توسط الکترودهای گیرنده اندازه‌گیری و با اعمال ضرایب لازم می‌توان مقاومت ویژهٔ الکتریکی را محاسبه نمود.



شکل (۴-۱) یک آرایه الکترودی در روش ژئوالکتریک A.B الکترودهای فرستنده و N.M الکترودهای گیرنده هستند.

$$R_1 = R\frac{L}{S} \qquad V=R_1 I \qquad V= R\, I \frac{L}{S}$$

V اختلاف پتانسیل و I شدت جریان می باشد.

اگر تغییرات پتانسیل را در حجم نیم کره‌ای که جریان از آن عبور می‌کند در نظر بگیریم، این تغییرات از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$dV = R\, I \frac{dL}{S} \qquad dV = \frac{RI}{2\pi} \cdot \frac{dr}{r^2}$$

و برای محاسبه V باید از رابطه یاد شده انتگرال گرفت:

$$V = \int \frac{RI}{2\pi} \cdot \frac{dr}{r^2} = \frac{RI}{2\pi} \int \frac{dr}{r^2} = \frac{RI}{2\pi} \cdot \frac{1}{r} + c$$

حدود انتگرال برای الکترودM از AM تا BM و برای الکترود N از AN تا BN می‌باشد.
در صورت اعمال این حدود انتگرال نامعین فوق تبدیل به انتگرال معین شده و قابل محاسبه است .

$$V_M = \frac{RI}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right] \quad \text{و} \quad V_N = \frac{RI}{2\pi} \left[\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right]$$

درنتیجه :

$$\Delta V = V_M - V_N = \frac{RI}{2\pi} \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]$$

$$R = \frac{\Delta V}{I} \times \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM}}$$

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

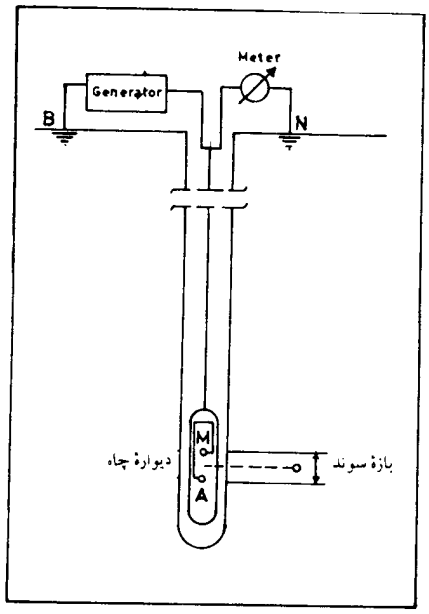
همانگونه که پیداست K بستگی به محل الکترودها و فاصلهٔ آنها دارد و برای آرایه‌های مختلف، متفاوت است. در شرایطی که لایه‌ها افقی باشد برای لایه اول R حاصله مقاومت ویژه الکتریکی حقیقی و برای بقیه لایه‌ها حاصله مقاومت ویژه ظاهری است. مقاومت ویژهٔ بدست آمده از برداشت‌های بدین ترتیب پیرامون دیوارهٔ چاه محدود می‌شود و معمولاً شعاع کاوش این

برداشتها از چند فوت فراتر نمی‌رود. در چاه‌پیمائی هم از آرایه‌های الکترودی متفاوت استفاده می‌شود و معمولاً نام روشهای مقاومت ویژه الکتریکی از همین آرایه‌های الکترودی آنها گرفته شده است.

بعنوان مثال می‌توان از روشهای نرمال، لترال، لترولوگ و .... نام برد.

روش نرمال[1]

دراین روش الکترودهای A و B الکترودهای فرستندهٔ جریان هستند و M و N الکترودهای گیرنده‌اند. آرایه الکترودها مطابق شکل ۴-۲ است.



شکل (۴-۲) آرایه الکترودها در روش نرمال

1. Normal

یعنی الکترودهای B و N در سطح زمین و الکترودهای MوA در داخل سوند قرار دارند. چنانچه شدت جریان را ثابت نگهداریم (اگر شدت جریان هم ثابت نباشد نسبت اختلاف پتانسیل به شدت جریان محاسبه می‌شود) اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده با اعمال ضرایب لازم تبدیل به مقاومت ویژه الکتریکی شده و نمودار آن به صورت پیوسته رسم می‌شود.

لازم است بین سوند و سازند ماده‌ای رسانا وجود داشته باشد (گل حفاری). لذا برداشت نمودار مقاومت ویژه به روش‌های نرمال، لترال [1] و لترولوگ [2] در چاههایی که به طریق ضربه‌ای و بدون وجود گل حفاری می‌شوند فقط در پایین‌تر از سطح ایستابی امکان‌پذیر است.

اختلاف پتانسیل برای چنین آرایه‌ای از رابطه:

$$\Delta V = \frac{R\,I}{4\pi}\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN} - \frac{1}{AN}\right)$$

محاسبه می‌شود. چون A نسبت به N و B نسبت به M و N در بی‌نهایت فیزیکی واقعند داریم:

$$\frac{1}{BM} = \frac{1}{AN} = \frac{1}{BN} = 0$$

و از آنجا:

$$\Delta V = \frac{RI}{4\pi(AM)} \Rightarrow R = 4\pi\,AM\frac{\Delta V}{I}$$

چون AM ثابت است، R مستقیماً با $\frac{\Delta V}{I}$ متناسب می‌شود. دستگاههای چاه‌پیمایی طوری ساخته می‌شوند که ضریب $(4\pi\,AM)$ را به طور خودکار اعمال و مستقیماً نمودار مقاومت ویژه الکتریکی را رسم می‌نمایند.

نقطهٔ اثر سوند در روش نرمال

نقطهٔ برداشت یا نقطهٔ اثر سوند نقطه‌ای است در سوند که اندازه‌گیریها را به آن نقطه نسبت می‌دهیم در روش نرمال نقطه اثر سوند وسط الکترودهای M و A است

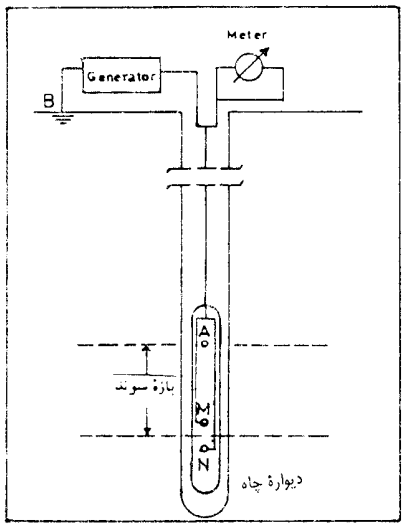
1. Lateral 2. Laterolog

بازهٔ سوند

در روش نرمال فاصله بین دو الکترود A و M اصطلاحاً بازهٔ سوند[1] نامیده می‌شود. بازه سوندهای معمولی برابر "۱۶ می‌باشد ولی به طور کلی از بازه‌های "۸، "۱۰، "۱۶، "۳۲، "۴۰، "۶۴ و... و "۴ و ۸ فوت هم استفاده می‌شود. سوندهای نرمال بر اساس بازهٔ آنها به نرمال کوچک و نرمال بزرگ تقسیم می‌شوند.

روش لترال[2]

دراین روش جریانی به شدت I بین دو الکترود فرستنده A و B برقرار می‌شود و اختلاف پتانسیل بین دو الکترود گیرنده M و N اندازه‌گیری می‌شود. آرایه این روش مانند شکل (۴-۳) است یعنی سه الکترودهای A و M و N در سوند قرار دارند.



شکل (۴-۳) آرایهٔ الکترودی روش لترال

1. Spacing 2. Lateral

در این روش هم رابطه بین اختلاف پتانسیل و مقاومت ویژه همان رابطهٔ قبلی است باید توجه داشت که B نسبت به الکترودهای M و N در بینهایت فیزیکی است (B در سطح زمین است). لذا داریم:

$$\frac{1}{BM} = \frac{1}{BN} = 0$$

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

چون AM و AN ثابت است داریم:

$$R = \frac{\Delta V}{I}\left(\frac{4\pi}{(1/AM - 1/AN)}\right) \Rightarrow R = K\frac{\Delta V}{I}$$

نقطهٔ اثر سوند در روش لترال

در روش لترال نقطه O وسط MN نقطه اثر سوند است. و بازهٔ سوند برابر فاصله OA می‌باشد بازهٔ سوندهای استاندارد برابر ″۸ و ′۱۸ است ولی بازه‌های ″۸ و ′۱۴ و ′۶ و ′۹ و ′۱۳ و ′۱۵ و ′۱۹ و ′۲۴ هم به کار می‌روند. گفتنی است که مقاومتی که به این ترتیب حاصل می‌شود مقاومت حقیقی نیست، بلکه ترکیبی است از مقاومت گل حفاری، گل تراویده، ناحیهٔ آغشته و ناحیه دست نخورده که مقاومت ویژه الکتریکی ظاهری[1] نامیده می‌شود.

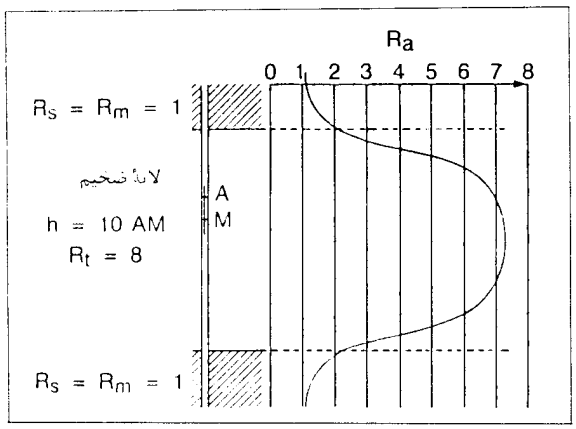
شکل نمودار مقاومت ویژه در روش نرمال

اگر یک لایه مقاوم بین دو لایه رسانا قرار گیرد (شکل ۴-۳)، تغییرات نمودار در ظاهر باید به صورت تغییرات ناگهانی در همبری لایه‌ها باشد. اما در عمل چنین نیست. و همانگونه که از رابطه R

1. Apparent Resistivity

$K\frac{\Delta V}{I}$ = بر می‌آید، مقاومت ویژهٔ تمام موادی که بین دو الکترود A و M قرار دارند روی اندازه‌گیری تأثیر می‌گذارند بنابر این تغیرات نمودار در همبری لایه‌ها، ناگهانی و به صورت پله‌ای نیست بلکه آرام و به صورت یک منحنی است که دارای نقطهٔ عطف می‌باشد.

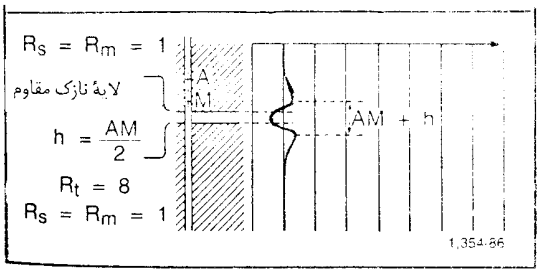
از سوی دیگر نسبت ضخامت لایه‌ها به بارهٔ سوند روی اندازه‌گیری‌ها تأثیر بسزایی دارد و چه بسا در مواردی حتی جهت تغییرات نمودار عوض می‌شود. تنها در مواردی که ضخامت لایه‌ها زیاد و بازهٔ سوند نیز زیاد باشد مقاومت ویژهٔ بدست آمده، به مقاومت ویژه واقعی نزدیک است چون اثر گل و ناحیهٔ تراویده کاهش می‌یابد. البته برای لایه‌های رسانا ممکن است مقاومت بدست آمده از نمودارهای حاصل از نرمال کوچک نیز به مقاومت ویژه حقیقی نزدیک باشد. اگر ضخامت لایهٔ مقاوم برابر h باشد فاصله دو نقطهٔ عطف منحنی برابر h-AM می‌باشد.



شکل (۴-۴) شکل نمودار نرمال در حالتی که یک لایه مقاوم بین دو لایهٔ رسانا قرار گرفته و ضخامت آن چند برابر بازهٔ سوند است.[۲]

در صورتیکه ضخامت لایهٔ مقاوم کمتر از بازهٔ سوند باشد، وقتی که دو الکترود A و M در طرفین لایه مقاوم واقع می‌شوند شکل (۴-۵)، یعنی که ده در ده لایه رسانا تر واقعند، مقاومت

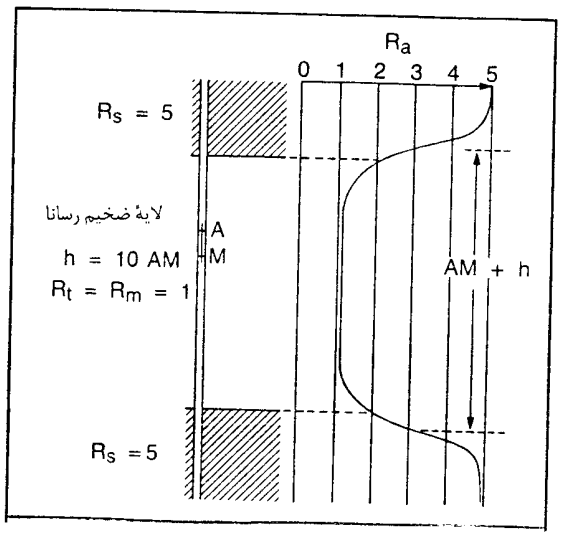
اندازه گیری شده، حتی از مقاومت ویژهٔ لایهٔ رسانا نیز کمتر است.

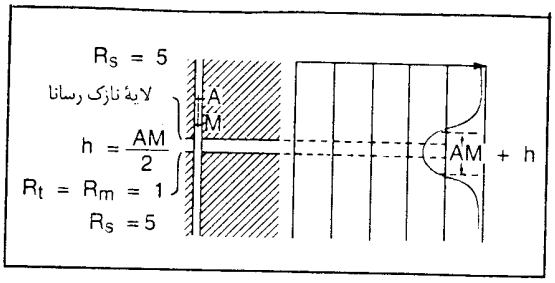


شکل (۴-۵) شکل نمودار ترسیل در حالتی که لایه مقاوم بین دو لایه رسانا قرار گرفته و ضخامت آن از پازدهٔ سوند کمتر است. [۲]

علت این امر این است که خطوط میدان الکتریکی هنگام برخورد با لایه مقاوم از آن دوری جسته و در آن به مقدار بسیار کم نفوذ می‌کنند و بیشتر در گل حفاری متمرکز می‌شوند بنابر این وقتی نقطهٔ اثر سوند (وسط AM) به لایه مقاوم می‌رسد اختلاف پتانسیل بین دو الکترود M و A کم شده و در نتیجه مقاومت ویژهٔ به دست آمده بسیار کمتر از مقاومت ویژه حقیقی لایهٔ مقاوم است (شکل ۴-۵). در چنین حالتی منحنی دارای سه نقطه اکسترمم (دو ماکزیمم در اطراف لایه مقاوم و یک مینیمم در وسط آن) می‌شود. فاصلهٔ نقاط ماکزیمم که نسبت به وسط لایه رسانا قرینه هستند برابر است با (MA+h). در صورتیکه یک لایه ضخیم رسانا بین دو لایه مقاوم قرار گرفته باشد، تغییرات نمودار مانند شکل ۴-۶ است. یعنی مقاومت ویژه‌های بدست آمده کم و بیش به مقدار واقعی نزدیک است فاصله بین دو نقطهٔ عطف منحنی برابر (AM+h) می‌باشد که نسبت به لایهٔ مقاوم قرینه هستند.

اگر پازده سوند دو برابر ضخامت لایهٔ مقاوم باشد که بین دو لایهٔ رسانا قرار گرفته است مقاومت ظاهری لایه رسانا در طرفین لایه مقاوم بین سه تا چهار برابر مقاومت حقیقی آن است و فاصلهٔ بین دو نقطهٔ عطف منحنی برابر (MA+h) خواهد شد. این دو نقطه نسبت به لایه هادی قرینه هستند.





شکل (۴-۶) شکل نمودار روش نرمال در حالتی که یک لایه رسانا با ضخامت h بین دو لایه مقاوم قرار گرفته است فاصله دو نقطهٔ عطف منحنی برابر است با AM+h، AM ، بازهٔ سوند است. [۲]

شعاع کاوش[1]

در روش ژئوالکتریک دیدیم که پتانسیل در اطراف الکترودهای فرستندهٔ جریان زیاد بوده و در اثر فاصله گرفتن از این الکترودها با یک افت پتانسیل مواجه می‌شویم که به طور تقریبی با توان دوم فاصله از الکترود و مقاومت ویژهٔ لایه متناسب است. به عنوان مثال در صورتیکه جریانی به شدت ۱۰۰ میلی‌آمپر از لایه‌ای به مقاومت ویژه ۳۰ اهم‌متر عبور نماید در فاصله یک سانتیمتری، پتانسیل برابر ۲/۵ ولت و در فاصله یک متری، برابر ۰/۰۲۵ ولت خواهد بود. یعنی در فاصله یک متری حدود ۹۹ درصد افت پتانسیل داریم، بنابر این لازم است محدوده‌ای را در نظر بگیریم که فراتر از آن محدوده در اندازه‌گیری پتانسیل نقش درخور توجهی نداشته باشد. چنین محدوده‌ای در صورت همگن بودن محل مورد بررسی، به صورت کره با شعاع تقریباً معین است. ولی چون شرایط در چاه و سازندهای پیرامون یکسان نیست لازم است که شعاع متوسطی را در نظر بگیریم که افت پتانسیل بعد از آن قابل چشم‌پوشی باشد. چنین شعاعی را اصطلاحاً شعاع کاوش یا عملکرد سوند می‌نامند. بطور خلاصه می‌توان گفت شعاع کاوش سوند برابر شعاع متوسطی از حجم مواد اطراف چاه است که در اندازه‌گیریها نقش چشمگیر دارد. در روش نرمال معمولاً شعاع کاوش دو برابر بازهٔ سوند است البته شعاع کاوش بستگی به مقاومت ویژه الکتریکی سازند اطراف چاه دارد و با افزایش آن کاهش می‌یابد.

برتریهای روش نرمال

- مهمترین برتری نمودارهای روش نرمال متقارن بودن این نمودارهاست بطوریکه از نقطهٔ عطف منحنی می‌توان برای شناسایی و تعیین محل همبری لایه‌ها استفاده نمود. البته باید در نظر گرفت که نقطه‌های عطف معمولاً در داخل لایه مقاوم قرار می‌گیرند به عبارت دیگر ضخامت لایه‌های رسانا به اندازه AM از فاصلهٔ دو نقطهٔ عطف کمتر است.

1. Redius of Investigation

- در نرمال کوچک لایه‌هایی که دارای ضخامت کم هستند به سادگی تشخیص داده می‌شوند. چنانچه ضخامت لایه‌های مقاوم از بازهٔ سوند کمتر باشد باید به آنچه در مورد شکل نمودار مقاومت ویژه در روش نرمال گفته شد توجه نمود.
- در نرمال بزرگ چون شعاع کاوش زیاد است مقاومت ویژهٔ ظاهری (نشان داده شده روی نمودار) به مقاومت ویژهٔ حقیقی لایه نزدیک است بشرطی که ضخامت لایه‌ها چند برابر بازهٔ سوند باشد.

کاستی‌های روش نرمال

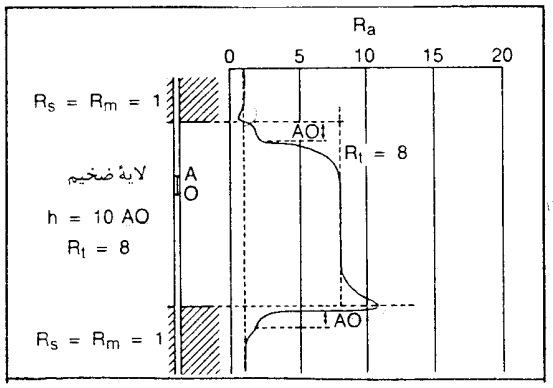
- در نرمال کوچک به علت کم بودن شعاع کاوش سوند اثر نامطلوب گل حفاری روی اندازه‌گیریها بسیار زیاد است و مقاومت ویژه حاصل برای لایه‌های مقاوم با مقدار حقیقی آن تفاوت بسیاری دارد. افزون بر آن همانگونه که بیان شد مقاومت لایه‌های مقاوم نازک که بین دو لایهٔ رسانا قرار گرفته‌اند قابل اندازه‌گیری نیست و حتی جهت وارونه دارد(شکل ۴-۵).
- در نرمال بزرگ به علت زیاد بودن بازهٔ سوند شعاع کاوش هم زیاد شده و تفکیک لایه‌های نازک مشکل و در مواردی ناممکن می‌نماید. موضوع تغییر جهت نمودار در لایه‌های مقاوم که بین لایه‌های رسانا قرار دارند در این نمودار هم مشکل ساز است.

بنابر این در روشهای نرمال حتی نرمال کوچک لایه‌های مقاومی که دارای ضخامتی کمتر از یک متر باشند به خوبی مشخص نمی‌شوند.

شکل نمودار در روش لترال

در حالتی که یک لایه رسانا بین دو لایه مقاوم واقع می‌شود، بر خلاف روش نرمال منحنی متقارن نیست اصولاً در روش لترال تمام نمودارها به صورت نامتقارن هستند. شکل (۴-۸) منحنی مقاومت ویژه را در حالتی که ضخامت لایه مقاوم حدود ۱۰ برابر بازهٔ سوند است را نشان می‌دهد. در

چنین حالتی مشاهده می‌شود که منحنی بجز در همسایگی همبریهای لایه‌ها به مقدار نسبتاً ثابتی مجانب می‌شود که خط مجانب به مقاومت حقیقی لایه نزدیک است. همان‌طور که از شکل پیداست در اطراف همبری دو لایهٔ مقاوم و رسانا نوساناتی در منحنی آشکار می‌شود که طول آنها تقریباً برابر بازهٔ سوند است.



شکل (۴-۸) نمودار مقاومت ویژه در روش لترال در حالتی که یک لایه مقاوم با ضخامت h حدود ۱۰ برابر بازهٔ سوند، بین دو لایه رسانا قرار گرفته است، در این حالت ضخامت لایهٔ مقاومت به اندازه بازهٔ سوند (Ao) از فاصلهٔ بین دو محل تغییرات شدید منحنی بیشتر است. [۲]

در هنگام تفسیر باید به این نکته توجه نمود که محل همبری لایه‌ها بین این دو نوسان است و ضمناً:

$$\frac{Rt}{Rs} \leq \frac{Ra\ max}{Ra\ min}$$

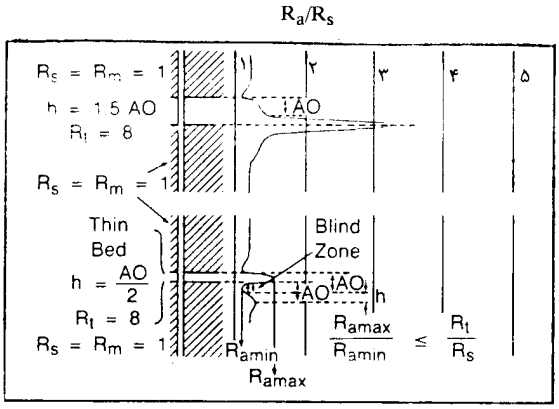
Ra مقاومت ویژهٔ ظاهری است.

Rt مقاومت ویژهٔ لایهٔ مقاوم و Rs مقاومت ویژهٔ لایهٔ هادی است.

نوسانات منحنی در اطراف همبری لایه‌ها مربوط به موقعیت الکترودهاست. همانگونه که از شکل پیداست قبل از رسیدن نقطهٔ اثر سوند به سازند مقاوم‌تر، مقاومت ویژهٔ نگاشته شده اندکی کمتر از مقاومت ویژه شیل است. این مقدار به این علت از مقاومت واقعی شیل کمتر است که تا زمانیکه الکترودهای N,M,A در لایه رسانا واقع هستند و سوند به لایه مقاوم نزدیک می‌شود خطوط میدان در اثر برخورد با لایه مقاوم تمایل به نفوذ در آن را ندارند و در سازند رساناتر متمرکز می‌شوند لذا در نزدیکی لایه مقاوم تمرکز خطوط میدان در لایه رسانا بسیار زیاد و تغییرات پتانسیل کم می‌شود. به عبارت دیگر اختلاف پتانسیل بین N,M تا زمانیکه یکی از آنها هنوز در مقابل سازند رسانا قرار دارد کمتر از حد انتظار است و به دنبال آن مقاومت ثبت شده نیز مقداری کمتر از مقدار واقعی را نشان می‌دهد.

مسئله تمرکز بیشتر خطوط میدان در سازند رسانا و یا پراکندگی بیشتر آنها در سازند نارسانا تا زمانیکه بخشی از بازهٔ سوند در برابر سازند رسانا و بخشی دیگر در برابر سازند نارسانا باشد سبب می‌شود که در بخش زیرین همبری این سازندها (زمانیکه سازند رسانا در بالای سازند نارسانا قرار دارد) نیز به علت پراکندگی ناهمگن خطوط میدان، مقاومت ویژهٔ نگاشته شده کمتر از مقدار واقعی باشد. بنابر این تا زمانیکه بازهٔ سوند بطور کلی از برابر سازند رسانا عبور نکرده است، نمودار نگاشته شده به سوی مقاومت ویژه کمتر متمایل است. در چنین حالتی محل افزایش شدید منحنی به اندازه بازهٔ سوند(AO) از همبری دو لایه پایین‌تر است. بنابر این ضخامت ظاهری لایه مقاوم (فاصلهٔ بین دو ژرفا با تغییرات شدید نمودار) روی نمودار به اندازه AO از ضخامت حقیقی آن کمتر است. در چنین حالتی فاصله نقاط ماکزیمم و مینیمم تقریباً برابر ضخامت لایهٔ مقاوم است بشرطی که بتوان آنها را تشخیص داد. بعد از اینکه هر سه الکترود N,M,A در سازند مقاوم قرار گرفتند نمودار به مقدار واقعی نزدیک می‌شود. بر عکس در همبری پایین لایهٔ مقاوم خطوط میدان تمایل به نفوذ هر چه سریعتر در لایه رسانای زیرین داشته و از مسیر گل حفاری به صورت متمرکز خود را به لایهٔ رسانا می‌رسانند.

همین عدم تمایل خطوط میدان به گسترش آنها در لایه مقاوم سبب تمرکز آنها در لایـه رسـانای نزدیکی همبری شده و تغییرات پتانسیل در پایین‌ترین بخش لایه مقاوم شدید و زیاد بوده و در نتیجه مقدار مقاومت ظاهری بدست آمده هم بیشتر از حد واقعی است. اما به هر حال نقطهٔ ماکزیمم منحنی در این حالت بر همبری دو لایه منطبق است و منحنی در پایین همبری یک کاهش شدید داشته و در فاصلهٔ برابر بازهٔ سوند به مقاومت ویژهٔ لایه رسانا نزدیک می‌شود. اگر ضخامت لایه مقاوم کم باشد تشخیص همبری لایه‌ها مشکل‌تر مـی‌شود، شکـل (۴-۹) شکـل نـمودار لتـرال را در حـالتی کـه $h=1/5AO$ و $h=0/5AO$ نشان می‌دهد. برخلاف روش نرمال به هر ترتیب لایه‌های نازک مقاوم نیز کم و بیش در این نمودار قابل شناسایی هستند و باید دقت نمود که نقطهٔ ماکزیمم منحنی همبری پایین لایهٔ مقاوم را نشان می‌دهد.

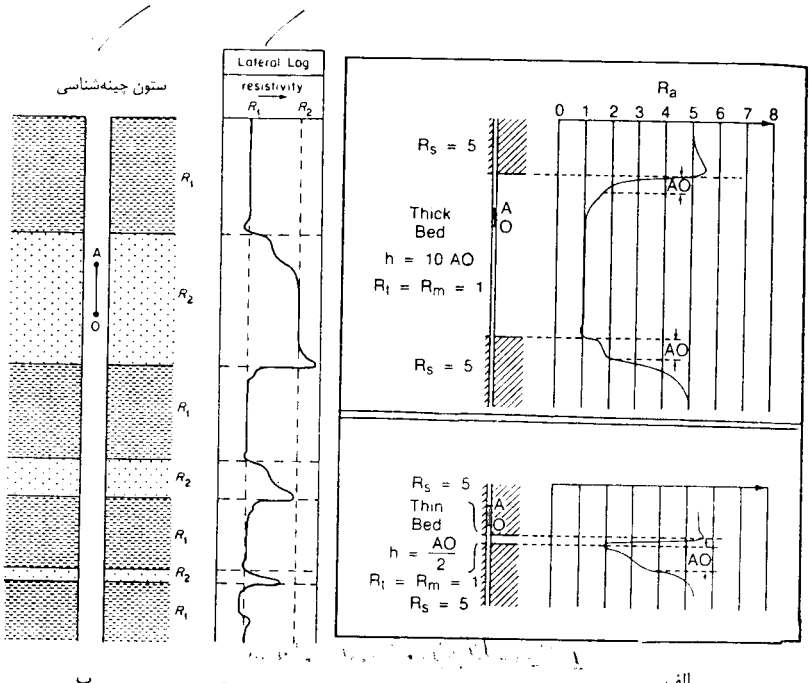


شکل (۴-۹) نمودار لترال وقتیکه یک‌لایه‌مقاوم‌نازک بین‌دو لایهٔ رسانا قرارگرفته‌است [۲]

شکل منحنی مقاومت (لترال) در مواردی که یک لایه رسانا بین دو لایه مقاوم واقع شده‌باشد و ضخامت آن چندین برابر بازهٔ سوند باشد مطابق شکل (۴-۱۰) است. در این مورد هم شکل منحنی

نامتقارن است. چنانکه ملاحظه می‌شود. قبل از رسیدن به لایهٔ رسانا، مقاومت نگاشته شده کمی بیشتر از مقاومت لایه مقاوم است. علت، درست مانند حالت قبل است یعنی در نزدیکی همبری دو لایه، تمرکز و پراکندگی غیر عادی خطوط میدان باعث این وضعیت می‌شود.

به هر ترتیب در این حالت هم ضخامت لایهٔ رسانا از فاصلهٔ تغییرات شدید نمودار به اندازهٔ بازهٔ سوند کمتر است. تغییرات شدید منحنی در همبری بالایی لایه رسانا، بر این همبری منطبق است در صورتیکه در همبری پایینی محل تغییرات شدید منحنی به اندازهٔ بازهٔ سوند(AO) از محل واقعی همبری پایین‌تر است.



شکل (۴-۱۰) نمودار مقاومت ویژه لترال [۲]

الف: حالتی که h =۱۰AO و یا h = $\frac{Ao}{۲}$ است ب: نسبتهای مختلف بین h و AO

برآورد مقاومت ویژه توسط نمودارهای نرمال ولترال

همانگونه که بیان شد مقاومت ویژه نگاشته شده به چند علت ممکن است که با مقاومت ویژه حقیقی تفاوت داشته باشد. یکی از این علت‌ها گل حفاری و مقاومت ویژه آن است. هر چه مقاومت ویژه سازند به مقاومت ویژهٔ گل حفاری نزدیکتر باشد در سازند رسانا مقاومت ظاهری به مقاومت حقیقی سازند نزدیکتر است. در این حالت می‌توان از سوندهای با بازهٔ کم هم استفاده نمود. هر چه سازند مقاوم‌تر باشد، تفاوت بین مقاومت ظاهری و حقیقی بیشتر می‌شود. و استفاده از سوندهای با بازهٔ بیشتر گریز ناپذیر است بطور کلی می‌توان سه حالت را در نظر گرفت.

۱ - سازندهای با مقاومت ویژهٔ کم: اگر مقاومت ویژه بدست آمده از سوند با بازه ۱۶ اینچی R_{16} کمتر از ده برابر مقاومت گل حفاری R_m باشد. در چنین شرایطی می‌توان از سوندهای با بازهٔ "۱۶ تا "۶۴ برای محاسبهٔ R_t استفاده نمود.

۲ - سازندهای با مقاومت ویژهٔ متوسط: اگر R_{16}، ۱۰ تا ۵۰ برابر R_m باشد، سوندهای با بازهٔ ۶۴ اینچ مناسب هستند و هر چه نسبت مقاومتها به ۵۰ نزدیک شود استفاده از بازه‌های ۱۶ فوت و ۸ اینچ نتایج بهتری را بدست می‌دهد.

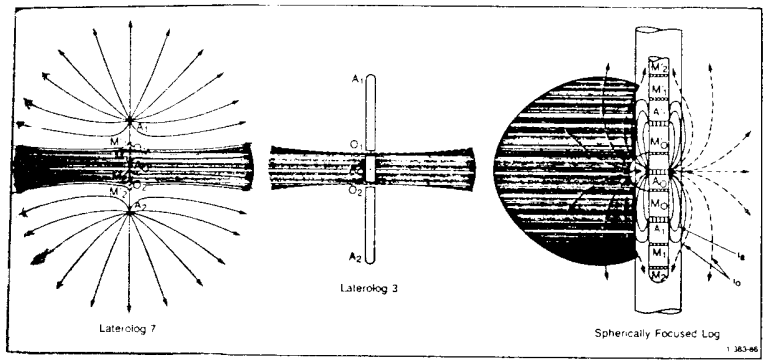
۳ - سازندهای بسیار مقاوم: اگر R_{16} بیش از ۵۰ برابر R_m باشد در این حالت استفاده از نمودارهای روش لترال بابازهٔ سوندی زیاد، مناسب است و اصولاً روش نرمال نتایج صحیح را ارائه نمی‌دهد.

نمودار جریان متمرکز[1]

با وجود کاربرد وسیع روشهای نرمال و لترال برای تعیین مقاومت ویژهٔ لایه‌های پیرامون چاه، این روشها دارای کم و کاستی‌هایی هستند. بعنوان نمونه اگر اختلاف بین مقاومت ویژهٔ سازند و گل حفاری زیاد باشد، یعنی مقدار Rt/Rm عددی بزرگ و ضخامت لایه‌ها هم کم باشد، مقاومت ارائه شده توسط نمودار با مقاومت ویژهٔ حقیقی لایه اختلاف زیادی خواهد داشت. افزون بر آن شکل

1. Focusing logs

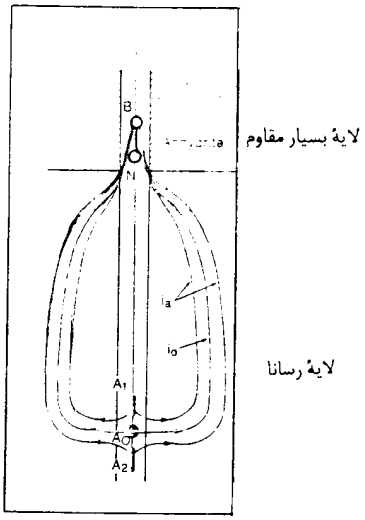
نمودار تا حدی نامطلوب می‌شود. حتی در مواردی تشخیص و تمیز لایه‌ها ممکن نیست. همچنین در لایه‌های رسانا که مقدار Rs/Rt (مقاومت ویژهٔ لایهٔ رسانا به لایه مقاوم) مقدار کوچکی را شامل می‌شود. تغییرات مشاهده شده در منحنی هرگز به اندازه مقدار واقعی نیست. به عبارت دیگر می‌توان گفت که نمودارهای حاصل از این روشها می‌توانند به شدت تحت تاثیر ویژگیهای گل حفاری، قطر گمانه و سازندهای همسایه باشند. برای روبرو نشدن با چنین شرایطی و این خطاها را به حداقل رساندن، از وسایلی که جریانهای تمرکز دهندهٔ مسیر عبور جریان را کنترل می‌کند استفاده می‌شود که فقط مقاومت ویژهٔ قسمت کوچکی از فضای پیرامون سوند را اندازه‌گیری می‌نماید. در این حالت جریان پخش نمی‌شود و سهم سازند در اندازه‌گیری نسبت به روشهای نرمال و لترال جریس برابر افزایش می‌یابد. روشهای جریان متمرکز در برگیرنده ابزار لترولوگ [۱] و ابزار متمرکز کره‌ای[۲] می‌باشند که نسبت به ابزار روشهای نرمال و لاترال پیچیده‌تر و پیشرفته‌تر هستند.



شکل (۴-۱۱) آرایه الکترودی در روشهای لترولوگ و جریان متمرکز کره‌ای
لترولوگ۳ LL3، لترولوگ ۷ LL7 و جریان متمرکز کره‌ای SFL [۲]

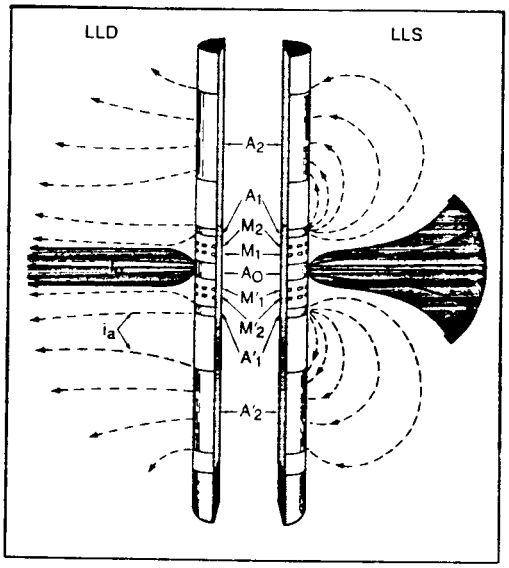
1. Laterolog
2. Spherically Focused Devices

در روش متمرکز الکترود A از سه یا چند سیستم الکترود یا از سه یا چند الکترود تشکیل شده است. الکترود کوچک (OA) در مرکز و دو الکترود A2, A1 در اطراف آن به طور قرینه قرار دارند که توسط مقاومتهای کوچکی به الکترود مرکزی وصل شده‌اند.

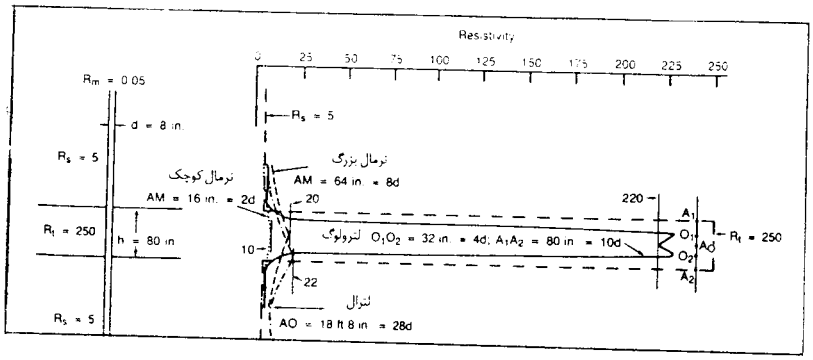


شکل (۴-۱۲) نحوه پخش و گسترش خطوط جریان در روشهای جریان متمرکز

جریانی با شدت کم از دو الکترود A1 و A2 (یا دو سیستم الکترود A1 و A2) عبور می‌کند و بطور خودکار به گونه‌ای تنظیم می‌شود که این دو الکترود و الکترود OA همواره نسبت به یکدیگر، هم پتانسیل باشند. این مسئله باعث می‌شود که خطوط جریان خارج شده از الکترود OA در گمانه پخش نشده و به صورت یک پهنه (یک واشر) در آمده و در سازند نفوذ بیشتری داشته باشند. در واقع با این ابتکار شعاع کاوش سوند به مقدار زیاد افزایش می‌یابد بدون اینکه‌بازهٔ سوند افزایش یابد (شکل ۴-۱۲). بنابر این مقاومت ویژهٔ بدست آمده از این روش‌ها به مقاومت ویژهٔ حقیقی بسیار نزدیک است شکل (۴-۱۳).



شکل (۴-۱۳) سوند DLL سمت راست شعاع کاوش کم سمت چپ شعاع کاوش زیاد



شکل (۴-۱۴) مقایسه نمودارهای نرمال بزرگ با بازهٔ ۶۴ اینچ، نرمال کوچک با بازهٔ ۱۶ اینچ لترال با بازهٔ ۱۸ فوت و ۸ اینچ و جریان متمرکز با سوند مرکزی O1O2برابر ۳۲ اینچ

روش‌های جریان متمرکز بنابر منظورهای مختلف کاربردی، به روشهای لترولوگ ۷ [۱] و لترولوگ ۸ [۲] و لترولوگ ۳ [۳] و روش لترولوگ دوگانه LLD[۴] و جریان متمرکز کره‌ای [۵] تقسیم می‌شود که هر یک مورد بحث واقع خواهد شد.

لترولوگ ۷

در این روش از یک الکترود مرکزی OA و سه زوج الکترود M1-M′1 و M2-M′2 و A1-A2 استفاده می‌شود. تمام زوج الکترودها نسبت به الکترود مرکزی (OA) قرینه هستند و توسط یک شنت ضعیف به هم وصل شده‌اند (شکل ۴-۱۱). یک جریان به شدت ثابت I از الکترود OA فرستاده می‌شود. و جریانهای دیگر توسط دو الکترود A2, A1 طوری فرستاده می‌شوند که به صورت خودکار عمل نموده به طوری که اختلاف پتانسیل بین M1-M′1 و همچنین M2-M′2 همواره صفر باشد. اختلاف پتانسیل بین یک سری (مثلاً M1, M′1) از این الکترودها و الکترودی که در سطح زمین قرار دارد اندازه‌گیری می‌شود. چنانچه شدت جریان ثابت باشد تغییرات اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده پیوند مستقیم با تغییرات مقاومت ویژه الکتریکی دارد.

تا زمانیکه اختلاف پتانسیل بین M1-M′1 و M2-M′2 برابر صفر باشد، جریانی که از الکترود OA فرستاده می‌شود در چاه بین دو الکترود M′1 و M1 و یا M′2 و M2 تمرکز یافته و پخش نمی‌شود و بعلاوه انتشار آن در نزدیکی دیوارهٔ چاه به صورت افقی و مطابق شکل ۴-۱۱ می‌باشد. چنانچه سازند همگن باشد ضخامت پهنه‌ای که جریان درون آن گسترش می‌یابد تا فاصله زیادی در پیرامون گمانه گاهی تا فاصله‌ای بیشتر از A1A2 (۸۰ اینچ) ثابت می‌ماند. و باعث می‌شود شعاع کاوش ابزارهای جریان متمرکز به میزان چشمگیری نسبت به ابزار معمولی افزایش یافته و

1. Laterolog7 LL7
2. Laterolog 8 LL8
3. Laterolog3 LL3
4. Dual Laterolog LLD
5. Sphericaly Focused Log SFL

پیرو آن مقاومت ویژهٔ بدست آمده توسط نمودار به مقاومت ویژه حقیقی نزدیکتر باشد.

لازم به تذکر است که فاصله A1A2 معمولا برابر "۸۰ و ضخامت مسیری که خطوط میدان طی می‌کنند یعنی O1O2 برابر "۳۲ می‌باشد.

لترولوگ ۳ LL3

آرایه الکترودی در لترولوگ ۳ مانند آرایهٔ الکترودی در سوند لترولوگ ۷ است شکل (۴- ۱۱). تفاوت عمده در این است که در سوند لترولوگ ۳ تنها از یک زوج الکترودهای O_1A_1 و O_2A_2 برای جلوگیری از پخش جریان استفاده می‌شود این زوج الکترود نسبت به الکترود مرکزی AO قرینه هستند طول الکترودهای O_2A_2,O_1A_1 زیاد و حدود ۵ فوت می‌باشد. جریان I از الکترود AO که دارای پتانسیل ثابت است عبور می‌کند از دو الکترود تمرکز دهنده نیز یک جریان عبور می‌کند که به صورت خودکار بگونه‌ای تنظیم می‌شود که تمام الکترودها در یک پتانسیل ثابت باشند. در این حالت بزرگی [1] (مقدار) جریان I به رسانندگی سازند فضای پخش جریان که به صورت یک قرص پهن با ضخامت O_1O_2 که معمولاً برابر ۱۲ اینچ است، بستگی دارد. و در هر لحظه مقاومتی که بدست می‌آید. مربوط به این پهنه می‌باشد. چون ضخامت جریان متمرکز در سوند LL3 کمتر از LL7 می‌باشد شناسایی و جدا نمودن لایه‌های نازک توسط نمودارهای LL3 آسان‌تر از نمودارهای LL7 است.

لترولوگ ۸ LL8

ابزار لترولوگ ۸ در اساس مانند ابزار لترولوگ ۷ می‌باشد تنها تفاوت چشمگیر این است که بازهٔ سوند لترولوگ ۸ کوچکتر از لترولوگ ۷ است به همین دلیل شعاع کاوش از آن هم کمتر است.

1. Magnitude

بنابراین اثر گل حفاری و ناحیهٔ تراویده و آغشته روی آن زیادتر از LL7،LL3 می‌باشد و ضخامت پهنه‌ای که جریان از آن می‌گذرد حدود ۱۴ اینچ است.

لترولوگ دوگانه DLL[1]

در اندازه‌گیری مقاومت توسط یک دریافت کننده چنانچه بازهٔ سوند کم باشد، تاثیر گل حفاری ناحیهٔ تراویده و آغشته بر نمودارهای نگاشته شده زیاد است و به همین دلیل برای برآورد مقاومت ویژهٔ سازند(R_t) باید مقاومت گل حفاری و ناحیهٔ آغشته در دسترس باشد. از سوی دیگر چنانچه بازهٔ سوند خیلی زیاد باشد تفکیک لایه‌های نازک مشکل خواهد شد. برای حل این مشکل می‌توان از ابزاری که همزمان دو یا چند نمودار توسط آرایه‌های الکترودی با بازهٔ سوندی متفاوت را می‌نگارند استفاده نمود.

در چنین مواردی می‌توان از سوندی مطابق شکل ۴-۱۳ استفاده نمود که مجهز به دو سیستم فرستنده و دریافت کننده است. همانطور که از شکل پیداست سوند طوری ساخته شده که یکی از جریانهای فرستاده شده به سازند از شعاع کاوش بیشتری برخوردار باشد و دیگری مقدار کمتری در سازند نفوذ کند. برای این منظور کافی است که در یک قسمت سوند الکترودهای تمرکز دهنده نقش کوچکتری ایفا نمایند. در این حالت دو نمودار مقاومت ویژه یکی با شعاع کاوش کم LLS و دیگر با شعاع کاوش زیاد LLD بطور همزمان نگاشته می‌شود. شعاع کاوش LLD از دو روش LL7 و LL3 بیشتر است و شعاع کاوش LLS برابر LL8 می‌باشد. قدرت تفکیک شاقولی[2] این سوند حدود ۶۵ سانتی‌متر است. امروزه از سوندهای با سه آرایهٔ الکترودی استفاده می‌شود که بازهٔ و ژرفای کاوش آنها کم، متوسط و زیاد است و همزمان سه نمودار مقاومت ویژه را می‌نگارند.

1. Dual Laterolog
2. Vertical rezolution

روش جریان متمرکز کره‌ای [1]

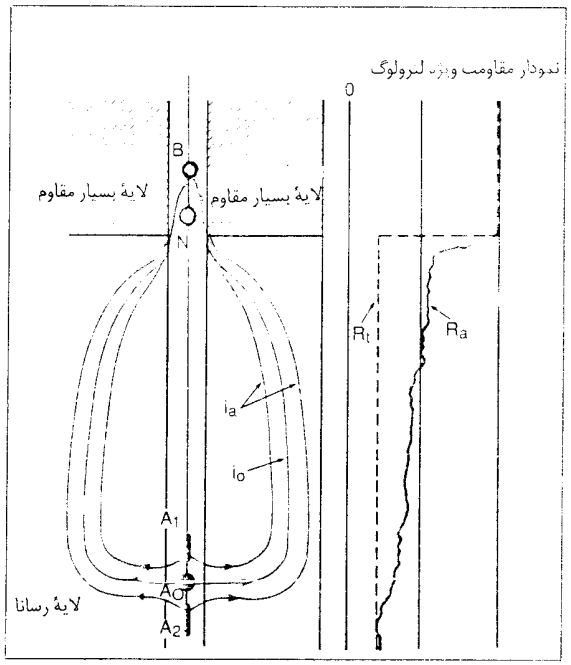
در روش جریان متمرکز کره‌ای رسانندگی مواد پیرامون چاه اندازه‌گیری می‌شود. شعاع کاوش سوند جریان متمرکز کمتر از سوندهای لترولوگ است و این امکان را فراهم می‌آورد که ویژگیهای گل حفاری، ناحیه‌های فیلتره و آغشته را اندازه‌گیری و اثر آنها بر روی نمودار حاصل از کاربرد سوندهای با شعاع کاوش زیاد را ارزیابی نمود. امروزه سوند جریان متمرکز با بازهٔ کم کاربرد فراوان یافته و اندک اندک جایگزین نرمال کوچک وLL8 می‌شود.

سطوح هم پتانسیل در روش جریان متمرکز به صورت کره‌ای شکل در سازندهای پیرامون چاه پدید می‌آیند. (شکل ۴-۱۱). کره‌های هم پتانسیل حتی زمانی که گل حفاری خیلی رسانا است تشکیل می‌شوند. برای این منظور در ابزار جریان متمرکز از دو سیستم جداگانه جریان الکتریکی استفاده می‌شود. یک جریان در الکترودهای پیرامون سبب پدید آمدن کره‌های هم پتانسیل می‌شود و جریان مرکزی که از پیکرهٔ مورد کاوش عبور می‌کند. جریان مرکزی تحت پتانسیل ثابت ۲/۵ میلی ولت بین الکترود مرکزی و الکتردی که در سطح زمین واقع است برقرار می‌شود. چون پتانسیل ثابت است، شدت جریان متمرکز متناسب با رسانندگی سازند می‌باشد.

شکل نمودار لترولوگ

نمودار لترولوگ دارای نوسان بیشتری نسبت به نمودار مقاومت ویژهٔ الکتریکی معمولی است. و همانگونه که بیان شد مقاومت ظاهری حتی برای لایه‌های مقاومی که بین لایه‌های رسانا قرار گرفته‌اند به مقاومت حقیقی نزدیک است شکل (۴-۳). با این وجود در لترولوگ هم نمودار تا حدودی از آرایهٔ الکتردی متأثر می‌شود. شکل ۴-۵ نمودار لترولوگ را در حوالی همبری بین دو لایه مقاوم و رسانا نشان میدهد.

1. Spherically Focused log



شکل (۴-۱۵) نمونه‌ای از نمودار روش لترولوگ و اثر مقاومت لایه‌های پیرامون روی اندازه‌گیریها [۲]

همانگونه که پیداست بین مقاومت حقیقی و نمودار حاصل (مقاومت ظاهری) اختلافی موجود است. علت آنست که، جریان منتشره از الکترود مرکزی باید (بطور تئوریک و در محیط همگن) مسیر بیضی گون را سپری کرده تا به الکترود B برسند. اما چون محیط همگن نیست خطوط میدان تمایل دارند که از مسیری گذر نمایند که دارای مقاومت کمتری است. لذا در نزدیکی همبری دو لایه این خطوط از لایه مقاوم گریز نموده و از مسیر گل حفاری که رساناتراست به الکترود B می‌رسند وقتیکه سوند از طرف پایین به بالا حرکت می‌کند. تا زمانی که الکترود B از همبری دو لایه نگذشته باشد مقاومت حاصله از آن لایهٔ رسانای پایین است بنابر این به مقاومت لایه رسانا نزدیک است.

اما پس از اینکه الکترود B از همبری دو لایه گذشته لایه مقاوم همبری را تحت تاثیر گذاشته و با رمایی که الکترود A0 از همبری دو لایه کمتر مقاوم لایه مقاوم روی خود را تحت تاثیر گذاشته و مقاومت ظاهری ساز کیرر [1] بین مقاومت دو لایه است و یک کرنش ریزشی دارد. در صورت زیاد بودن ضخامت لایه مقاوم به محض اینکه الکترود M0 همبری را ترک کند مقاومت ثبت شده تقریبا به مقاومت حقیقی لایه مقاوم نزدیک می‌شود. این اثر گرادیان [1] نامیده می‌شود. نام دیگر این پدیده "اثر دلور" است که از نام یک ناحیه نفتی در آمریکا گرفته شده است.

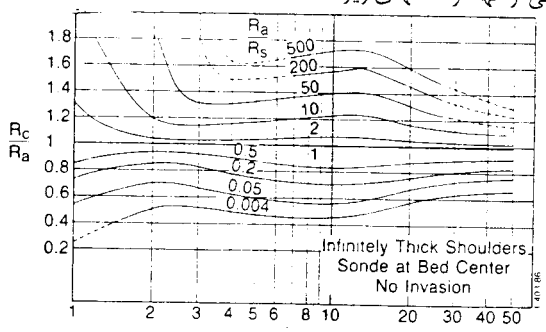
در بعضی از روشهای جریانهای متمرکز مانند H H Z الکترود B در سطح زمین قرار داده می‌شود. لذا تاثیر قوی به شدتی که بیان شده نیست ولی همواره اثر گرادیان کم و بیش در روشهای همبری لایه‌ها وجود دارد. برای LLD نیز در مواردی اثری بنام گرونینگن [2] در حالتی که یک لایه ضخیم خیلی مقاوم در بالای لایهٔ هادی قرار گرفته باشد در ژرفای حدود ۱۰۰ فوتی پایین همبری دو لایه پدید می‌آید. در این حالت خطوط جریان تمایلی به گسترش در لایه مقاوم ندارند و در نتیجه از متمرکز می‌شوند و ممکن است دوباره به الکترودهای تمرکز دهنده برسند و باعث [illegible] منفی شوند. اثر این پتانسیل روی اندازه‌گیرها اثر کرونینگن نامیده می[illegible] هلند گرفته شده است. در چنین سرایطی بهتر است از روش القایی استفاده شود

تصحیح‌ها در روشهای جریان متمرکز

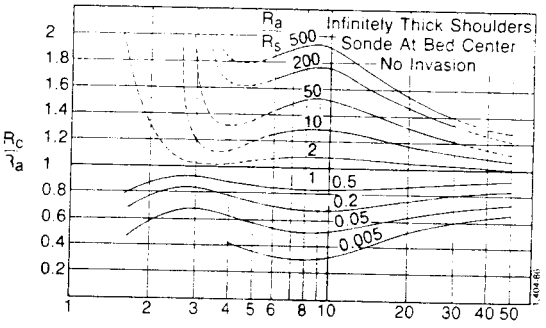
برداشتهای جریان متمرکز نیز مانند دیگر برداشتهای مقاومت ویژه توسط شرایط حفاری و ویژگیهای لایه‌های بالا و پایین متأثر می‌شود. تمام این لایه‌ها [illegible] بخشها [illegible] توجه به [illegible] لایه [illegible] سوراخ [illegible]

1. Gradient or Delaware Effect
2. Groningen Effect

می‌شود.اثر گمانه روی نمودار LLD اندک است اما برای LLS این اثر اهمیت پیدا می‌کند به ویژه در شرایطی که نسبت Rt/Rm زیاد باشد. برای هر یک از موارد یاد شده از دیاگرامهای ویژه استفاده می‌شود که شرح برخی از آنها در شکلهای زیر آمده است.



شکل (۴-۱۶) تصحیح مقاومت ویژه بدست آمده از LL3 برای اثر لایه‌های همسایه R_a مقاومت ظاهری اندازه‌گیری شده، R_c مقاومت تصحیح شده، R_s مقاومت لایه همسایه [۶]



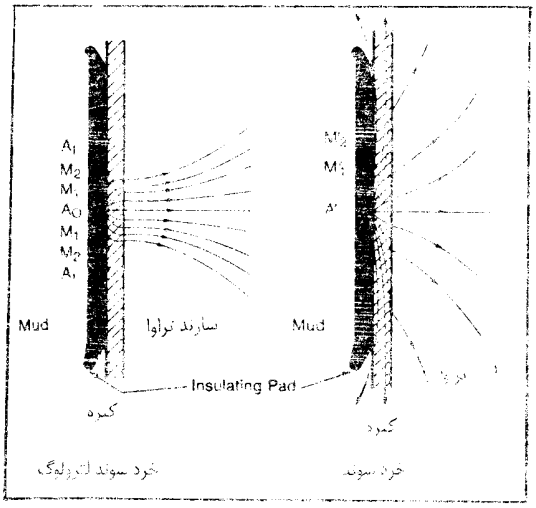
شکل (۴-۱۷)تصحیح مقاومت ویژه بدست آمده از LL7 برای اثر لایه‌های همسایه R_a مقاومت ظاهری اندازه‌گیری شده، R_c مقاومت تصحیح شده. R_s مقاومت لایه همسایه [۶]

خرد نمودارهای [۱] مقاومت ویژه

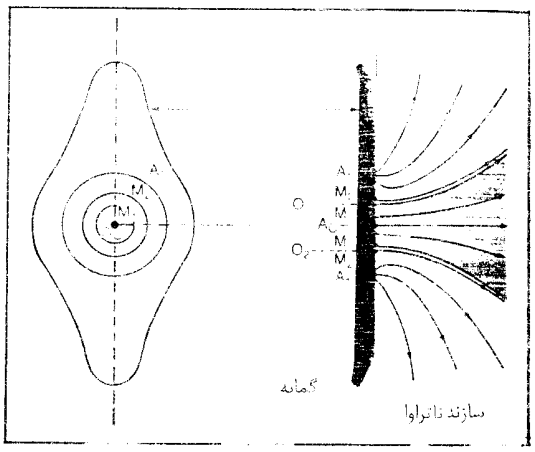
در روش میکرولوگ از سوندهایی که دارای بازهٔ بسیار کوچک هستند استفاده می‌شود. الکترودها روی زبانه‌هایی که روی شیارهای درون سوند قرار دارد جاسازی شده‌اند. این زبانه‌ها مجهز به فنرهائی است که در مقابل تغییرات قطر چاه انعطاف پذیر بوده و در اثر فشاری که این فنرها به زبانه وارد می‌کنند الکترودها همواره با دیواره تماس داشته و اثر ناخواستهٔ گل حفاری را در اندازه‌گیری کاهش می‌دهند. چون بازهٔ این سوندها بسیار کوچک است (حدود ۱ اینچ) شعاع کاوش آن اندک است و معمولاً ازناحیهٔ تراویده یا آغشته فراتر نمی‌رود. این امر اندازه‌گیری مقاومت ویژهٔ ناحیهٔ تراویده و آغشته را میسر می‌سازد. ضمناً بطور غیرمستقیم می‌توان میزان تراوایی سازندها را بررسی نمود. تراوش گل با تراوایی سازند پیوند مستقیم دارد. از خرد نمودارهای مقاومت ویژه می‌توان برای برآورد مقاومت ناحیهٔ تراویده و آغشته استفاده نمود. خرد سوندهای لترال و لترولوگ (شکل ۴-۱۸) و جریان متمرکز کروی (شکل ۴-۲۰) امروزه کاربردهای فراوان دارند. اساس این خرد سوندها مانند سوندهای مربوطه است.

برخی از خرد سوندهای مقاومت ویژه مجهز به قطر سنج نیز هستند که میتوان توسط آن تغییرات قطر چاه را اندازه‌گیری نمود(چگونگی انجام این کار در بخش قطر سنجی توضیح داده میشود).

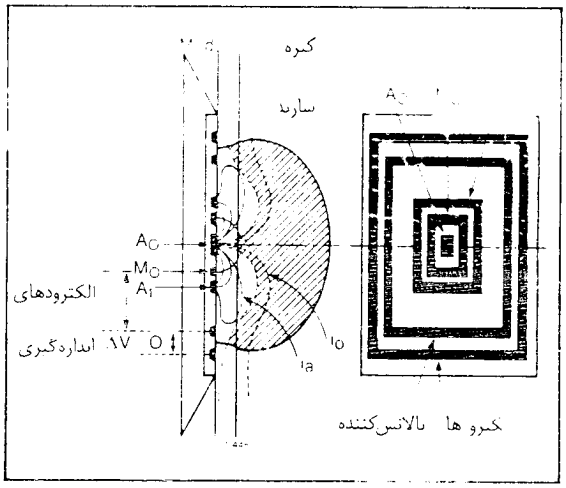
1. Microlog



شکل (۴-۱۸) آرایهٔ الکترودی در خرد سوندهای لترال و لترولوگ [۲]



شکل ۴-... آرایهٔ الکتر... ی ... قائم (افقی) ... سند لترلوگ [۲]



شکل (۴- ۲۰) آرایهٔ الکترودی و برش افقی خرد سوند جریان متمرکز کننده [۲]

اندازه‌گیری مقاومت گل حفاری وسط حر سوندها

برای اندازه‌گیری مقاومت گل حفاری در طول حاه می‌توان فنر خرد سوندها را بسته نکه داشت و از چسبیدن رباته‌ها به دیواره چاه جلوگیری کرد. بدین طریق شعاع کاوش سوند معمولاً از محدوده گل حفاری فراتر نمی‌رود و مقاومت نگاشته سد برابر مقاومت گل ا کفمی است که در این مورد باید سوند را طوری داخل حا هدایت نمود که همواره از محور چاه عبور کند و به دیوارهٔ آن تکیه ننماید. بدین منظور می‌توان از سه فنر هلالی شکل جهت هدایت سوند در چاه استفاده نمود. اعمال جنس سرطی در نقاطی که محور چاه قائم نیست اهمیت بسزای می‌یابد.

روس القائی [۱]

ازمایشها و قوانین الکترو مغناطیسی چگونگی ایجاد جریان ... ی وسط میدان

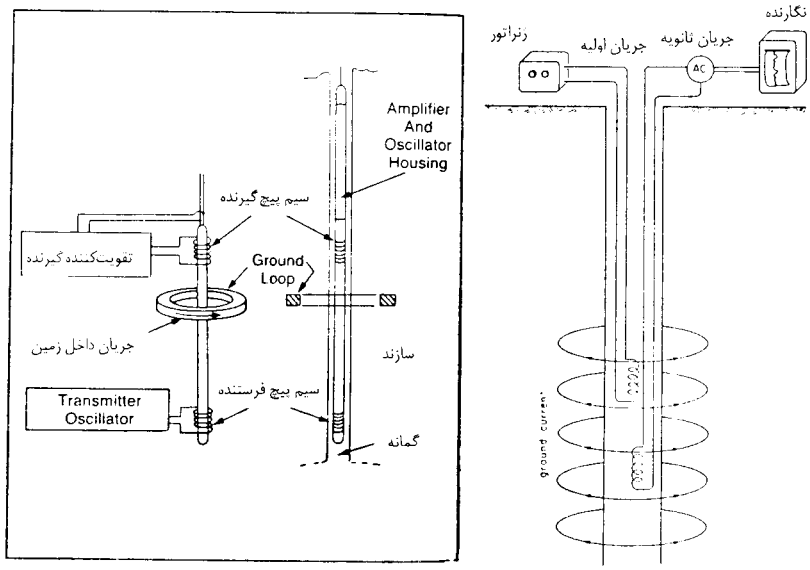
1. Induction

مغناطیسی را نشان میدهد. اگر سیمی فلزی را به دو سرگالوانمتر (ولتمتر حساس) بسته و سیم را در میدان مغناطیسی یک آهنربا قرار دهیم ملاحظه میشود که با حرکت سیم بگونه‌ای که سیم خطوط میدان را قطع نماید گالوانمتر انحرافی را نشان میدهد که نشانهٔ پدید آمدن یک جریان القائی در سیم است. از طرف دیگر می‌دانیم که در اطراف سیمی که حامل جریان الکتریکی متناوب باشد یک میدان مغناطیسی پدید می‌آید. حال اگر سیمی دیگر در این میدان مغناطیسی واقع شود. بگونه‌ای که خطوط میدان مغناطیسی را قطع نماید. و هر لحظه در آن تغییر شار(فلو) مغناطیسی ایجاد شود جریان الکتریکی در آن القاء خواهد شد از این ویژگیها برای اندازه‌گیری مقاومت ویژهٔ زمین استفاده می‌شود.

اساس روش القائی

در این روش جریانی با فرکانس بالا و شدت ثابت از یک سیم پیچ که سیم پیچ فرستنده نامیده می‌شود می‌گذرد. در پیرامون این سیم پیچ یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود و در نتیجه این میدان جریانی در سازند اطراف القاء می‌شود. جریان حاصله مسیر دایره‌ای را طی می‌کند این جریان به نوبه خود میدان مغناطیسی دیگری را در زمین ایجاد می‌کند که محور آن بر محور سیم پیچ فرستنده منطبق است (شکل ۴-۲۱). چون مسیر این میدان مغناطیسی و جریان پدید آورندهٔ آن در زمین است لذا مقاومت زمین روی آن تاثیر می‌گذارد. در اثر همین میدان مغناطیسی جریانی در سیم پیچ گیرنده القاء میشود. پتانسیل ناشی از این جریان اندازه‌گیری و با اعمال ضریب لازم تبدیل به مقاومت میشود و در دستگاه نگارنده بطور پیوسته و به صورت نمودار نگاشته می‌شود. از آنجا که رسانندگی ویژه وارونهٔ مقاومت ویژه است بجای نگاشت مقاومت ویژه می‌توان رسانندگی ویژه را نگاشت. بازهٔ این سوند عبارتست از فاصله بین دو سیم پیچ گیرنده و فرستنده و شعاع کاوش تقریباً برابر بازهٔ سوند است. مقاومتی که نگاشته می‌شود عبارتست از مقاومت کره‌ای به قطر بازهٔ سوند که در

هر لحظه ایجاد می‌شود برای کاهش اثر گل حفاری از سیم پیچهای فرعی دیگری نیز استفاده می‌شود که طرز عمل آنها بگونه‌ایست که اثر گل را به حداقل ممکن کاهش می‌دهند.



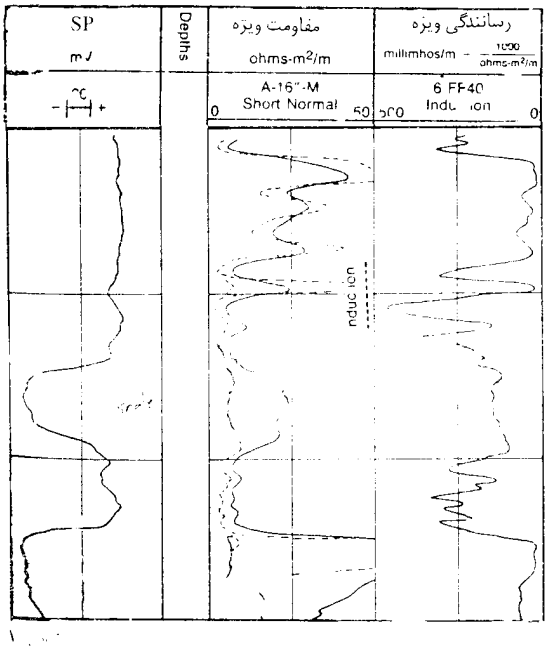
شکل (۴-۲۱) سوند القایی، سیم‌پیچهای فرستنده و گیرنده و جریان القاء شده در زمین [۴]

شکل نمودار رسانندگی ویژه

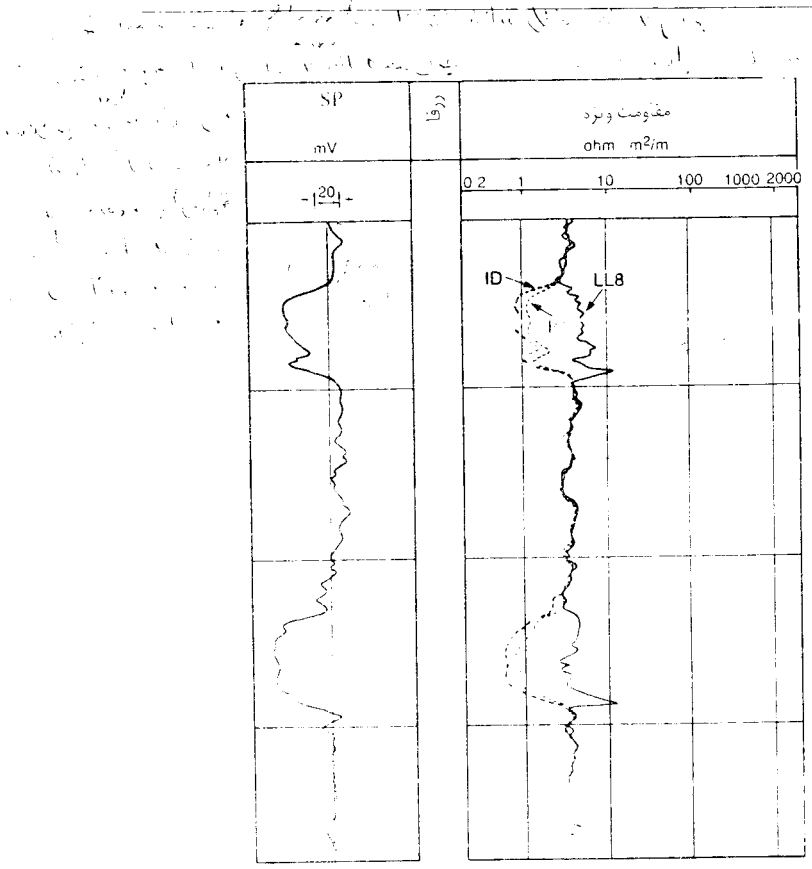
چون رسانندگی ویژه وارونهٔ مقاومت ویژه است، لذا یکای [1] آن بر حسب $\Omega^{-1}m^{-1}$ یا mho/m می‌باشد شکل نمودار رسانندگی ویژه مانند نمودار مقاومت ویژه است (شکل ۴-۲۲) فقط

1. dimension

تعبیر آن بر خلاف جهت تغییر نمودار مقاومت ویژه است. برای این منظور همانگونه که نمودارها ترسیم می‌شوند و نمودارهای مقاومت ویژه و رسانندگی در داخل ستون‌ها ترسیم می‌شوند جهت ترسیم نمودار رسانندگی ویژه را خلاف جهت افزایش نمودار مقاومت ویژه انتخاب می‌کنند. نمودار رسانندگی ویژه هم با مقیاس خطی هم با مقیاس لگاریتمی رسم می‌شود که هر یک در مواردی دارای برتری‌ها و کاستی‌هایی است. ولی از آنجا که رسانندگی ویژهٔ سازندها معمولاً کم و یا بسیار کم است، بطور کلی مقیاس لگاریتمی کاربرد گسترده‌تری دارد.



شکل ۲ - ۲) نمودارهای SP، مقاومت ویژه حاصل از دو پتانسیل یکسان کوچک و بزرگ و رسانندگی ویژه [۲]



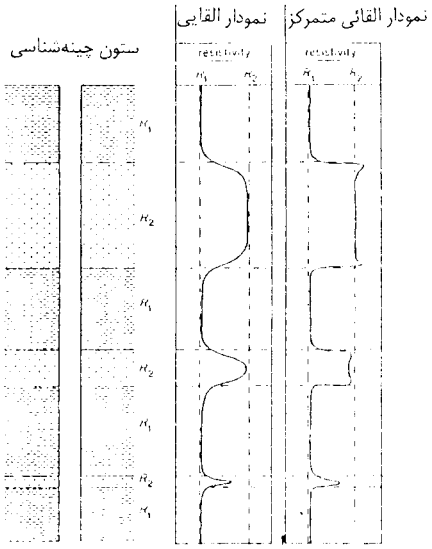
شکل (۴-۲۳) دار SP و ... مت ویژه حاصل از روتن لگی با شعاع ...
زیاد ID شعاع کاوش متوسط IM لترولوگ LL8 A

نمودارالقایی متمرکز[1]

همانگونه که در ابزار جریان متمرکز با بکارگیری چند الکترود با سیستم الکترودی مسمز

1 Focused Induction log

دهندهٔ جریان از پخش جریان جلوگیری می‌شود، در ابزار القائی متمرکز نیز از سیم پیچ اضافی به این منظور استفاده می‌شود. این امر باعث افزایش دقت و جدایش[1] قائم سوند و نمودار حاصل می‌شود. شکل ۴-۲۴ نمونه‌ای از نمودارهای مقاومت ویژهٔ الکتریکی را برای روش القائی و روش القائی متمرکز نشان می‌دهد.



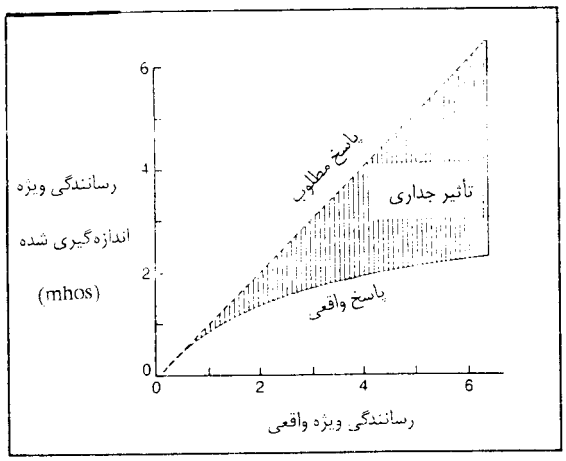
شکل (۴-۲۴) نمودار مقاومت ویژه حاصل از روش القائی و القائی متمرکز

همانگونه که مشاهده می‌شود در نمودار القائی متمرکز تغییرات منحنی در محل همبری لایه‌ها خیلی شدید است و این تغییرات برای لایه‌هایی که خیلی نازک نیستند منطبق بر همبری لایه‌هاست در صورتی که در نمودار القایی تغییرات منحنی در محل همبری لایه‌ها به شدت نمودار متمرکز نیست و تعیین دقیق همبری لایه‌ها در این نمودار مشکل‌تر است

1 Resolution

تاثیر جداری [1]

در صورتیکه سازند پیرامون گمانه دارای رسانندگی زیاد باشد. میزان جریان القائی ثانویه در سازند رسانا زیاد است. میدان مغناطیسی حاصل از آن نیز درخور اهمیت است. این میدان مغناطیسی باعث القاء یک نیروی محرکهٔ اضافی در سازندهای دیگر می‌شود که با پتانسیل القایی نخستین که توسط سیم پیچ فرستنده القاء می‌شود هم فاز نیست و اثر چشمگیری در اندازه‌گیریها گذارده و سبب کاهش مقدار نگاشته شده نسبت به مقدار حقیقی رسانندگی ویژه می‌شود. این اثر سازندهای رسانا را روی نمودار رسانندگی ویژه تاثیر جداری می‌نامند. این اثر قابل پیش‌بینی و درخور بررسی است و برای تصحیح آن دیاگرام‌هایی ارائه شده است (شکل ۴-۴). امروزه ابزار پیشرفتهٔ القائی بطور خودکار تاثیر جداری را برآورد و تصحیح لازم را روی نمودار انجام می‌دهند.



شکل (۴-۲۵) اثر جداری روی اندازه‌گیری روش القائی، خط مستقیم میزان رسانندگی ویژهٔ مطلوب و منحنی میزان رسانندگی ویژهٔ بدست آمده را نشان می‌دهد [۱]

1. Skin effect

ترکیب هندسی[1]

در پیرامون چاه فضاهای مختلف تراوا، آغشته و حاوی آب سازند پدید می‌آیند. وقتی که رسانندگی ویژه سازند چندان زیاد نباشد، تاثیر هر یک از این فضاها روی رسانندگی ظاهری جسمکه است. یعنی رسانندگی ویژه اندازه‌گیری شده جمع سازگی ویژه فضا ضربدر حجمشان، تقسیم بر حجم کل خواهد بود.

$$C = g_m c_m + g_{xo} c_{xo} + g_v c_v$$

$$g_m + g_{xo} + g_v = 1$$

$$g_{xo} = \frac{V_{xo}}{V_t} \qquad g_m = \frac{V_m}{V_t} \qquad g_v = \frac{V_v}{V_t}$$

C_m رسانندگی ویژه گل حفاری

C_{xo} رسانندگی ویژه فضای آغشته و تراویده

C_v رسانندگی ویژه سازند

g_m, g_x, g_v ضرایب هندسی هر یک از فضاها

با حل فوق، کمیت و قدر ناحیهٔ آغشته و رسانندگی ویژهٔ آنها می‌توان اثر آنها را روی اندازه‌گیری‌ها برآورد و حذف کرد. این عمل به وسیله پردازشگرهای دستگاه القایی بطور خودکار انجام می‌شود.

شبه ضریب هندسی[2]

در صورتیکه با ذ سود رسانا باشد، ضریب هندسی گل در مقابل بقیه قابل چشم پوشی است.

1. Geometrical Factor 2. Pseudo Geometrical Factor

...ن قرار فرض نمود که دو نقطه‌ی تراوش و آشفتگی ... فقط عمل می‌نماید و در ... قرار خواهند داشت

...

...

تاثیر ناحیه آشفته

همانگونه که اشاره شد در مواردی از شبیه‌سازی هندسی استفاده می‌شود که در آن ... در ناحیه آشفته d_i برابر ... ایجاد باشد در روش [11] ... شبیه‌سازی ... شده و در صورت استفاده از روش گل، به طوری که مقاومت ناحیه آشفته ۳ برابر مقاومت آب ... (یا ضریب تراوایی آن ۱/۳ آب باشد) داریم :

...

...

و در شرایط مشابه اگر گل حفاری آلوده باشد و قطر هدایت آن ... برابر ... باشد، ... خواهد داشت:

...

...

از روابط فوق نتیجه می‌شود که نمودار ... گل حفاری ... باشد کمتر تحت تاثیر ناحیه آشفته قرار می‌گیرد تا گل ...

...

نمودار القائی و نمودار لترولوگ

ابزاری وجود دارد که در آن بطور همزمان سه نمودار رسانندگی الکتریکی با شعاع کاوش زیاد ID و نمودار باشعاع کاوش متوسط IM[1] ومنحنی لترولوگ LL8 برداشت می‌شوند این ابزار حتی مجهز به یک الکترود SP می‌باشد و افزون بر سه نمودار مقاومت ویژه یک نمودار SP نیز رسم می‌نماید.

کاربرد روش القایی

نمودار القائی در چاههائی که با گل حفاری با هدایت کم تا متوسط و یا گل نفت آمیز یا گل نفت سرشت یا هوای فشرده حفر شده‌اند بطور گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد و با سوندهای مختلف می‌توان لایه‌های با ضخامتهای متفاوت را بررسی نمود. بعلاوه نمایش نمودار القائی به صورت خطی و لگاریتمی تاثیر زیادی در قرائت صحیح مقدار هدایت ویژهٔ سازندها خواهد داشت. روشهای القایی متمرکز دارای دقت درخور توجه هستند و کاربرد آنها رو به گسترش است.

نمودار Proximity

ابزار این نمودار در اساس، شبیه ابزار خردلترولوگ می‌باشد. با این تفاوت که الکترود جریان اصلی و الکترودهای تمرکز دهنده روی یک محفظه وسیع‌تر قرار گرفته‌اند و شعاع کاوش آن بیشتر از خردسوندها و خرد سوندهای لترولوگ است و جریان به‌صورت خودکار توسط الکترودهای تمرکزدهنده، متمرکز می‌شود. سوند و الکترودهای آن بگونه‌ای طراحی شده‌اند که چنانچه کبره همگن باشد، حتی اگر ضخامت کبره به حدود 2cm هم برسد، تأثیر درخور توجهی روی اندازه‌گیریها ندارد.

به علت شعاع کاوش بیشتر نسبت به خرد نمودارهای دیگر، اگر شعاع ناحیهٔ آغشته و تراویده کم باشد، مقاومت ویژه سازند نیز روی این نمودار تأثیر می‌گذارد و مقاومت ویژه ظاهری اندازه‌گیری شده در چنین شرایطی برابر است با:

$$R_p = G_{xo}\rho_{xo} + (1-G_{xo})\rho_t$$

R_p مقاومت ویژهٔ بدست آمده از نمودار Proximity

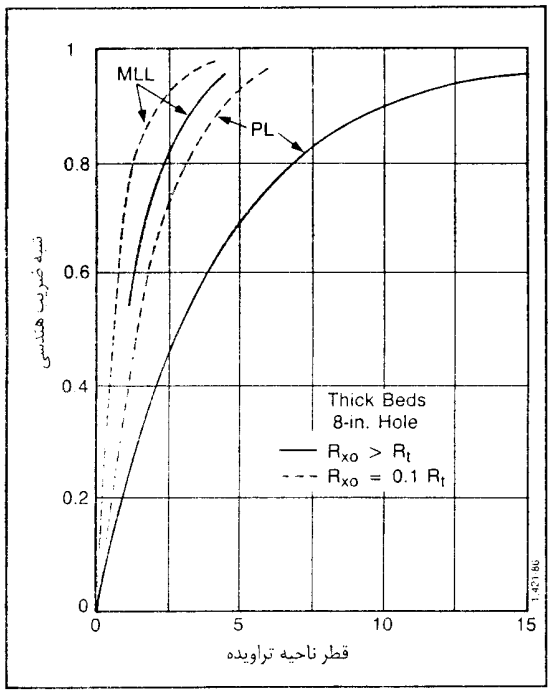
1. Medium Induction Divice

مقاومت ویژهٔ ناحیه آغشته و تراویده R_{xo}

شبه ضریب هندسی G_{xo}

مقاومت ویژه سازند R_t

G_{xo} بستگی به نسبت R_{xo} به R_t و قطر ناحیه آغشته و تراویده دارد و با افزایش R_t/R_{xo} و قطر ناحیهٔ تاثیر پذیرفته از گل، شبه ضریب هندسی نیز افزایش می‌یابد. پیوند میان G_{xo} با پارامترهای فوق در شکل ۴-۲۶ نمایش داده شده است.



شکل (۴-۲۶) پیوند میان شبه ضریب هندسی و قطر ناحیهٔ آغشته وتراویده‌در روش‌های خردلترولوگ (MLL)و(PL) Proximity ، قطرگمانه حدود ۸ اینچ
خطوط پر مربوط به حالتی است که R_{xo} از R_t بیشتر است و خط‌چین‌ها در رابطه به حالتی است که R_{xo} برابر یک دهم R_t باشد

برآورد مقاومت ویژه به وسیلهٔ نمودارهای حاصل از خرد سوندها

همانگونه که اشاره شد نمودارهای حاصل از خرد سوندها تا حد زیادی بیانگر مقاومت ویژه کل حفاری، کیرهٔ چاه و ناحیهٔ آغشته است. بنابر این وقتیکه قطر ناحیهٔ آغشته زیاد است برآورد مقاومت ویژه سازند توسط این نمودارها مشکل است. اگر نسبت R_{mf}/R_w زیاد باشد، در مقادیر بدست آمده اثر مقاومت ویژهٔ سازند بسیار کم شده و در چنین شرایطی نمودارها برای برآورد R_{xo} [illegible] هستند.

[illegible] نمودارها باید سه پارامتر مجهول را بدست آورد. این سه پارامتر عبارتند از [illegible] مقاومت سازند و قطر ناحیه آغشته برای بدست آوردن این سه پارامتر سه [illegible] مستقل در شرایط متفاوت مورد نیاز است. بنابر این باید شرایطی را برگزید که در هر یک از آنها یکی از پارامترهای یاد شده نقش چشمگیر داشته باشد. معمولاً برآورد R_{xo} آسان‌تر از دو پارامتر دیگر است.

برآورد مقاومت ویژه ناحیه آغشته R_{xo}

مقاومت ویژهٔ ناحیهٔ آغشته را می‌توان از یک نمودار بدست آمده به وسیله خرد سوند [illegible] میکروکنتر[1] و یا خرد سوند لترولوگ[2] برآورد نمود. حتی گاهی می‌توان از نمودارهای حاصل از خرد سوندهای نرمال[3] نیز برای این کار استفاده کرد. این نمودارها تا حدی پیرو شرایط فیزیکی و [illegible] کیرهٔ چاه هستند اما نیز حائل چندانی برای محاسبهٔ R_t این شرایط نیز وجود دارد لذا از R_{xo} بدست آمده از این نمودارها نیز تنها برای برآورد مقاومت ویژه سازند (و یا تصحیح آن) استفاده نمود.

چنانچه نمودارهای حاصل از خرد سوندها در دسترس نباشند می‌توان مقاومت ناحیهٔ آغشته را از رابطه زیر بدست آورد

1. Micro SFL 2. Microlaterolog 3. Microlog

$$R_{xo}=\frac{0.62R_{mf}}{\varphi^{2.15}(1-S_{oil})^2}$$

تخلخل (φ) از یکی از نمودارهای تخلخل [۱] (در فصلهای به آن پرداخته خواهد شد) بدست می‌آید. برای برآورد اشباع از نفت [۲] S_{oil} نیز روشهایی وجود دارد که در فصلهای بعد به آن پرداخته خواهد شد (اگر نفت وجود نداشته باشد $S_{oil}=0$ خواهد شد).

مقاومت ویژهٔ گل تراویده R_{mf} نیز از نمودارهای حاصل از حرد سوندها قابل محاسبه است.

بهر حال همانگونه که اشاره شد سه نمودار مقاومت ویژه با شعاعهای کاوش متفاوت لازم است تا بتوان R_t،R_{xo} و d_i را محاسبه نمود. با این وجود مقادیر بدست آمده نیاز به اصلاح دارند و به همین منظور نمودارهای کمکی برای انجام این اصلاحات تهیه شده که بسیار پرشمار هستند و هر از چندگاهی نیز به آنها افزوده می‌شود.(به انتشارات شلومبرژه مراجعه شود).

روشهای الکتریکی که بیشتر در اکتشاف معادن کاربرد دارند

برخی از روشهای الکتریکی کاربرد گسترده‌ای در اکتشاف کانسارها دارند. در این مورد در بخشهای پیشین به روش پتانسیل خودزا اشاره شد. این روش می‌تواند برای اندازه‌گیری پتانسیل سرچشمه گرفته از اکسیداسیون و احیاء در ژرفاهایی که گمانه از کانسارهای فلزی بویژه سولفورها می‌گذرد، بکار گرفته شود. افزون بر روش پتانسیل خودزا، روش‌های الکتریکی دیگری که بر مبنای میدانهای طبیعی یا مصنوعی پدید آمده در زمین بنا نهاده شده‌اند نیز برای اکتشاف کانسارها کاربرد دارند مهمترین این روشها بشرح زیرند.

1. Porosity Log
2. Residual Oil Saturation

روش پتانسیل الکترودی[1] (EP)

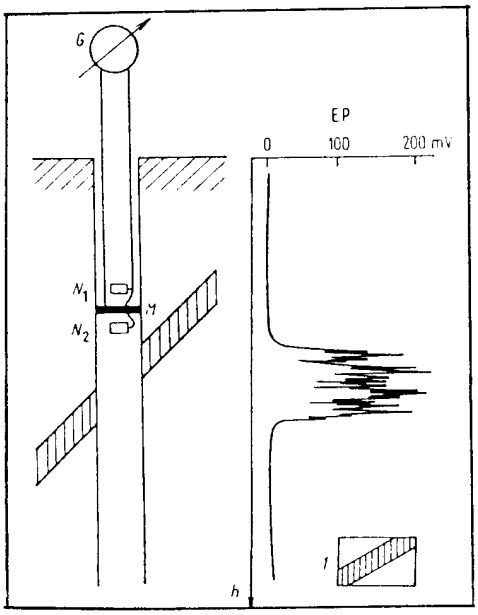
بسیاری از کانه‌ها دارای ویژگی رسانندگی الکترونی هستند. در میان کانه‌هایی که این ویژگی را دارند می‌توان به سولفیدها (به استثناء اسفالریت)و منینیت اشاره نمود. افزون بر این کانه‌ها برخی از کانیها نیز مانند گرافیت و آنتراسیت هم ویژگی رسانندگی الکترونی را دارند.

اگر این کانه‌ها در یک الکترولیت قرار بگیرند که در آن یک الکترود فلزی با پتانسیل منفی کافی وجود دارد، تبدیل به قطب مثبت شده و پتانسیل حاصل، الکترود پتانسیل نامیده می‌شود. به عبارت بهتر در چنین شرایطی کانه نقش الکترود مثبت را در یک پیل ایفا می‌نماید. از این پدیده برای شناسایی کانه‌هایی که رسانا هستند استفاده می‌شود. پیرامون یک گمانه گل حفاری و آب سازند نقش الکترولیت را ایفا می‌کنند و یک الکترود فلزی که معمولاً از جنس روی می‌باشد نقش الکترود منفی و کانه نقش الکترود مثبت را دارد. اگر الکترود داخل چاه حرکت کند و اختلاف پتانسیل این الکترود و الکترود دیگری که به دیواره چاه چسبیده و حرکت می‌کند اندازه‌گیری شود. در ژرفایی که گمانه از کانه می‌گذرد. نمودار EP افزایش می‌یابد.

ابزار اندازه‌گیری

ابزار اندازه‌گیری پتانسیل الکترودی از دو الکترود (افزون بر سیم رابط و غیره که برای تمام اندازه‌گیریها لازم است) تشکیل شده است (شکل ۴-۲۷).

1. Eloctrode Potential(EP)



شکل (۴-۲۷) نمودار EP ، نگاشته شده در یک چاه اکتشافی در یک کانسار سولفیدی
افزایش EP در محل گذر گمانه از پیکرهٔ سولفیدی (قسمت هاشورزده شده)به حدود ۲۰۰ mV می‌رسد. [۳]

جنس الکترودها معمولاً از روی است.یکی از الکترودها (M) به صورت یک حلقه است که به دیواره چاه می‌چسبد و حرکت می‌کند و الکترود دیگر (N) به دو الکترود N_2.N_1 تقسیم شده و در بالا و پایین الکترود M، در فاصله‌های برابر قرار دارند(علت استفاده از دو الکترود N_1وN_2 بجای N حذف پتانسیل خودزای ناشی از همگن نبودن فضای اندازه گیر بست).

وقتیکه سوند درون گمانه حرکت می‌کند تا زمانی که به کانه نرسیده است تنها گرادیان SP اندازه‌گیری می‌شود که مقدار آن با توجه به وجود دو الکترود N_1 و N_2 قابل چشم‌پوشی است اما زمانی که الکترود M به کانه می‌رسد یک اختلاف پتانسیل درخور توجه تا حدود چند صد میلی ولت

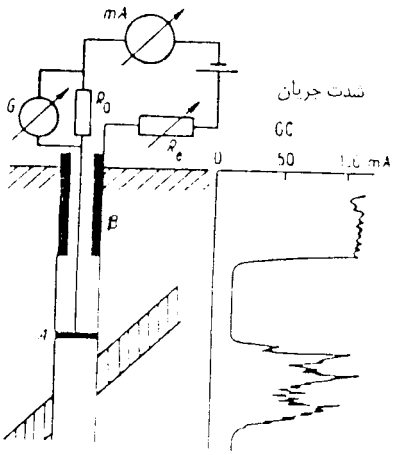
اندازه‌گیری می‌شود. از این افزایش چشمگیر پتانسیل الکترودی می‌توان برای شناسایی کانه‌ها و گسترش آنها استفاده نمود. سرعت برداشت نمودار یا سرعت حرکت سوند در چاه حدود ۸/۴ متر بر دقیقه است.

نمودار جریان [1]

روش نمودار جریان نیز کاربرد گسترده‌ای در شناسایی توده‌های معدنی بویژه کانه‌ها دارد. این روش، روش جریان لغزش [2] (GC) نیز نامیده می‌شود. اساس روش جریان اختلاف چشمگیر رسانندگی الکتریکی بین کانه‌ها و کانیهای غیرفلزی است.

ابزار اندازه‌گیری در روش GC شامل دو الکترود یک رئوستا، یک باطری ، یک گالوانومتر و یک اهم‌متر است یکی از الکترودها (A) در حالیکه با دیوارهٔ چاه در تماس است درون چاه حرکت می‌کند و الکترود دیگر به لولهٔ جداری دهانه چاه و یا حتی به لولهٔ جداری در یک چاه همسایه (در صورت وجود) وصل می‌شود. این عمل سبب برقراری بهتر جریان الکتریسته بین دو الکترود می‌شود (شکل ۴-۲۸). جریانی بین دو الکترود برقرار می‌شود. این جریان توسط یک باطری که دارای پتانسیل ثابتی است تأمین می‌شود. و رئوستا نقش تنظیم شدت جریان را به عهده دارد. وقتی که الکترود A در گمانه حرکت داده می‌شود تا زمانیکه این الکترود به توده کانسار فلزی نرسیده است جریان کم کنترل شده بین دو الکترود برقرار است. اما وقتی که الکترود A به تودهٔ کانسار می‌رسد، به علت مقاومت کم آن، یک افزایش چشمگیر در شدت جریان پدید می‌آید که به چندین ۱۰ میلی آمپر حتی افزون بر یک صد میلی آمپر هم می‌رسد.

1. Current Logging 2. Gliding Current



شکل (۴-۲۸) ابزار اندازه‌گیری و نمونه‌ای از نمود GC در یک گمانهٔ اکتشافی در یک کانسار فلزی، الکترود سطحی (B)به لولهٔ جداری وصل شده است [۳]

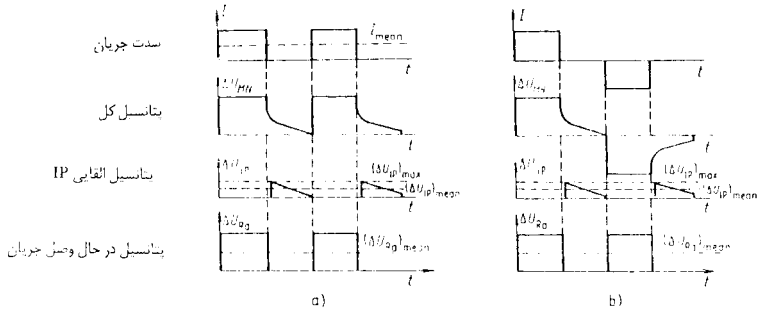
نمودار قطبش القائی [۱]

روش قطبش القایی IP در کاوشهای معدنی بویژه لایه‌های زغال سنگ و معادن فلزی کاربرد گسترده‌ای دارد. در این روش هم از جریان مستقیم و هم از جریان متناوب استفاده می‌شود. در صورت استفاده از جریان مستقیم، برداشتها در حوزهٔ زمان [۲] و در صورت استفاده از جریان متناوب برداشتها در حوزهٔ بسامد [۳] انجام می‌شود.

چنانچه از جریان مستقیم استفاده شود این جریان با شدت ثابت برای زمانی معین و محدود بین دو الکترود فرستنده گسیل شده و در هیمن زمان اختلاف پتانسیل بین دو الکترود گیرنده

1. Induced Polarization (IP)
2. Time Domain
3. Frequency Domain

اندازه‌گیری می‌شود. پس از اینکه جریان قطع شد، اختلاف پتانسیل دوباره بین الکتردهای پتانسیل اندازه‌گیری می‌شود همانگونه که در شکل (۴-۲۹) دیده می‌شود پس از قطع جریان بلافاصله اختلاف پتانسیل به صفر نمی‌رسد و زمانی حدود چند هزارم ثانیه بطول خواهد انجامید تا به صفر برسد. منحنی افت پتانسیل و کم و کیف آن بستگی به ویژگیهای فیزیکی پیکره‌های زمین‌شناسی مورد مطالعه دارد. کانه‌ها و بویژه سولفیدها از جمله موادی هستند که در مقابل جریان نسبتاً خوب پلاریزه می‌شوند و پس از قطع جریان، افت پتانسیل در آنها نسبتاً کند است لذا از این روش می‌توان برای شناسایی کانه‌ها بویژه سولفیدها استفاده نمود. در حالتی که برداشتها در حوزهٔ بسامد انجام می‌شود از جریانهای متناوب با بسامدهای متفاوت استفاده می‌شود. وقتیکه بسامد زیاد باشد، مواد پلاریزه شده و در بسامدهای کم پتانسیل ناشی از قطبش القایی افت می‌کند.



شکل (۴-۲۹) نحوهٔ قطع و وصل جریان در برداشتهای قطبش القائی در حوزهٔ زمان

a: جریان یک سو b: جریان دو سو

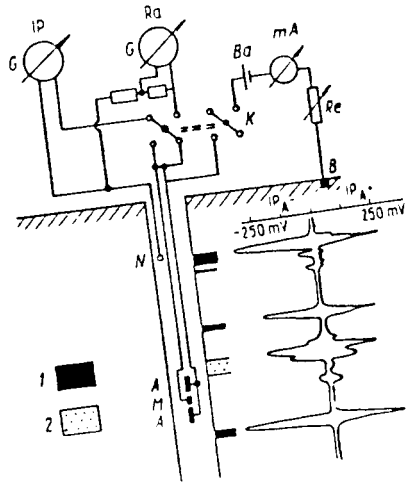
در چاه پیمایی هم از روش قطبش القایی برای شناسایی پیکرده‌های فلزی استفاده می‌شود. تنها تفاوت با برداشتهای سطحی در شکل و آرایه الکترودها است که مطابق شکل ۴-۳۰ می‌باشد. یکی از الکترودهای فرستنده B در سطح زمین و الکترود دیگر A بهمراه الکترودهای گیرنده M و N درون سوند جاسازی می‌شوند. آرایه الکترودی طوری در نظر گرفته می‌شود که بجای الکترود A، دو الکترود، مطابق شکل مورد استفاده قرار گیرد که بطور قرینه در دو پهلوی الکترود M جاسازی می‌شوند. یک جریان بین الکترودهای A وB برقرار می‌گردد و اختلاف پتانسیل همانگونه که اشاره شد بین دو الکترود گیرنده اندازه‌گیری می‌شود. مانند برداشتهای سطحی اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل هم در زمان وصل جریان و هم در زمان معینی پس از قطع جریان (در حوزه بسامد پس از کاهش بسامد) انجام می‌پذیرد. این اختلاف پتانسیل بستگی به زمان و قطبش پذیری مواد دارد.

$$(\Delta V_{Ip})_t = (\Delta V_{Ip})_0 \exp(-t\propto -1)$$

$(\Delta V_{Ip})_t$ اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده در لحظه t بعد از قطع جریان

$(\Delta V_{Ip})0$ اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده در لحظه قطع جریان

$\propto$ ثابتی که بستگی به ماهیت و قطبش پذیری مواد مورد مطالعه دارد



شکل (۴- ۳۰) آرایه الکترودی و نمونه‌ای از برداشتهای IP [۳]
برای حذف SP، اندازه‌گیریها دوبار و با تغییر جهت جریان انجام می‌شود.
۱: لایه ذغال سنگ ۲: ماسه سنگ، بقیه گمانه گل سنگ و لای سنگ است.

در حالتی که از جریان ثابت استفاده می‌شود مقادیر اندازه‌گیری شده تحت تأثیر SP قرار می‌گیرد. برای کاهش اثر SP شدت جریان طوری انتخاب می‌شود که ΔV_{Ip} خیلی بزرگتر از SP باشد.

از سوی دیگر برای حذف SP می‌توان دوبار برداشت را انجام دا د و هر بار جهت جریان را تغییر داد با این کار دو نمودار بدست می‌آید که در جهت عکس هم خواهند بود(شکل ۴-۳۰). به این طریق می‌توان مقدار SP را محاسبه و از نمودارها کاست یا به آنها افزود. بزرگی IP اندازه‌گیری شده در مواردی به چندصد میلی ولت می‌رسد.

در برداشتهای IP درون چاهها مقدار $(IP)_t$ به تنهایی قابل استفاده است. برای اینکه آرایه

الکترودی ثابت است. اما در برداشتهای سطحی که محل الکترودها در هر قرائت تغییر می‌کند مقدار IP اندازه‌گیری شده بشدت پیرو آرایه الکترودی و فاصلهٔ الکترودها و شرایط توپوگرافی می‌باشد. بنابراین بجای استفاده از $(IP)_t$ از نسبت ΔV_{Ip} به ΔV_{Ra} یعنی اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری شده بین الکترودهای پتانسیل در زمانی که جریان وصل است، استفاده می‌شود.

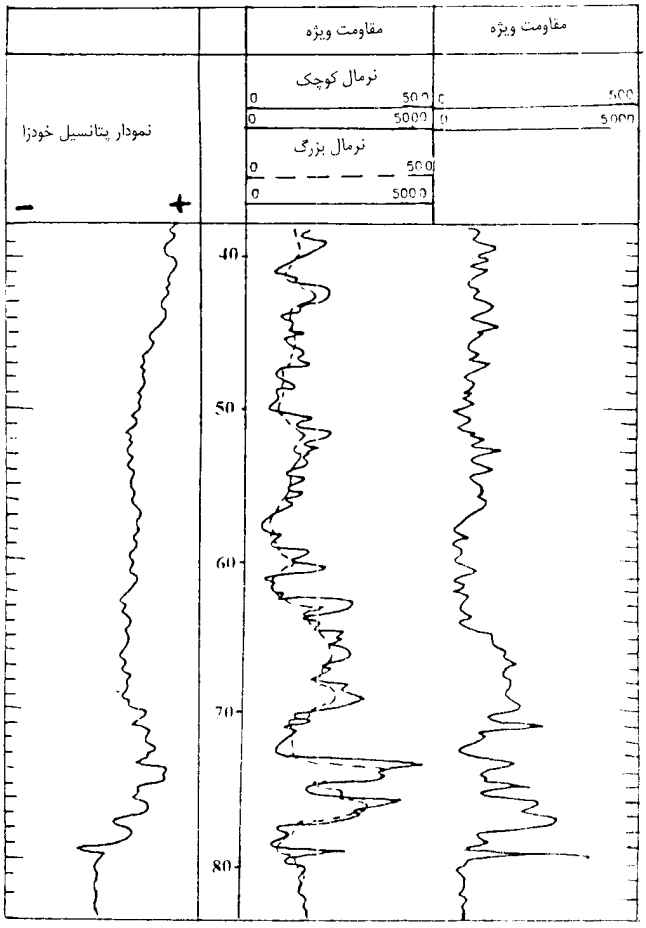
$$\eta = \frac{\Delta V_{Ip}}{\Delta V_{Ra}}$$

این نسبت (η) شارژ ابیلته [1] یا قطبش پذیری نامیده می‌شود.

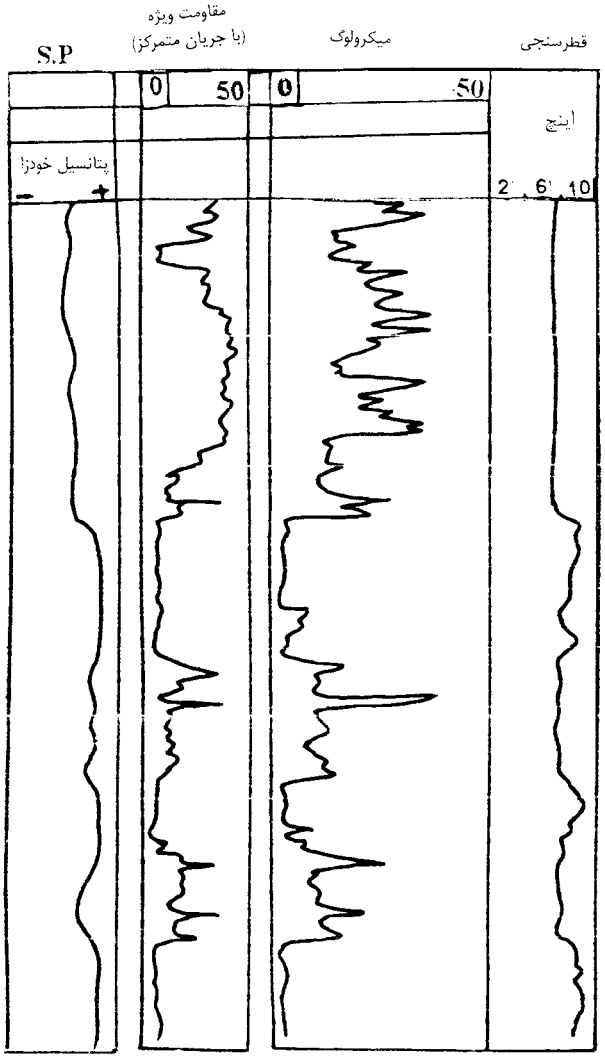
- قطبش‌پذیری در سنگهایی که در برگیرندهٔ کانه‌ها (بارسانندگی الکترونی) هستند بستگی به میزان این کانه‌ها در سنگها دارد و با افزایش درصد کانه‌ها در سنگ، افزایش می‌یابد. افزایش اشباع از آب S_w باعث کاهش η می‌شود و بستگی خطی و مستقیم با مقاومت آب سازند دارد بنابر این با افزایش غلظت نمکهای آب قطبش‌پذیری کاهش می‌یابد.

در سنگهای رسوبی قطبش‌پذیری پیرو اندازهٔ دانه‌ها، میزان رس، جنس دانه‌ها، شکل فضاهای خالی (خلل و فرج) و آب است.

1. Polarizability



شکل (۴-۳۱) نمودارهای SP، مقاومت ویژهٔ روش نرمال و مقاومت ویژهٔ روش لترال حاصل از یک گمانه حفر شده در یک آبخوان



شکل (۴-۳۲) نمودارهای SP، مقاومت ویژه و قطرسنجی حاصل از یک گمانهٔ حفر شده در یک آبخوان

پرسش و تمرین

۱- تفاوت روشهای نرمال و لترال را بنویسید؟

۲- در چه مواردی هر یک از نمودارهای نرمال برای تعیین همبری لایه‌های مناسب‌تر هستند.

۳- نقطهٔ اثر سوندهای مختلف روشهای الکتریکی را با هم مقایسه کنید.

۴- نقطهٔ اثر سوند روش SP کجاست؟

۵- در مورد رابطهٔ بین محل همبری لایه‌ها و محل تغییرات شدید نمودار مقاومت ویژه در روشهای مختلف بحث کنید.

۶- نمود لایه‌های نارسانای بسیار نازک (با ضخامت کم‌تراز بازهٔ سوند) روی نمودار حاصل از نرمال کوچک چگونه است.

۷- در مورد دامنهٔ تغییرات مقاومت ویژهٔ الکتریکی لایه‌ها و دامنهٔ این تغییرات در روی نمودارهای حاصل از روشهای مختلف بحث کنید.

۸- معیارهای گزینش سوندهای مقاومت ویژه الکتریکی برای برآورد ویژگیهای هر یک از فضاهای ایجاد شده در پیرامون چاه (در اثر تراوش گل) کدامند؟

۹- تفاوتهای روشهای جریان متمرکز و روش القایی چیست؟

۱۰- کاربردهای خرد سوندها را بنویسید.

۱۱- به فرض آنکه نمودارهای شکل (۴-۲۲) از یک آبخوان به دست آمده باشند لایه‌های حاوی آب شیرین را تعیین کنید.

۱۲- تأثیر جداری در مطالعات چاههای حفر شده در کدام پیکره‌های معدنی چشمگیر است؟

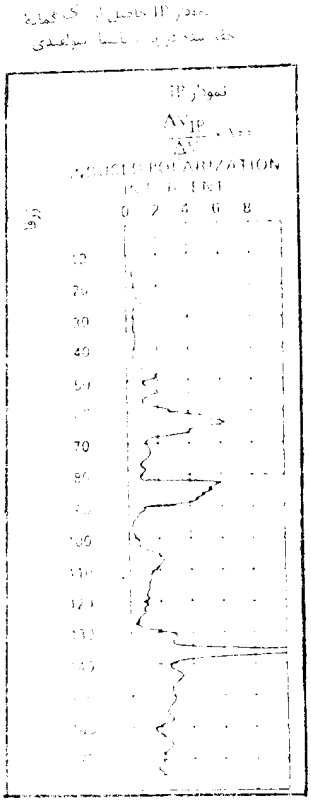
۱۳- ضریب هندسی و شبه ضریب هندسی در مطالعهٔ نفت خوانها چه نقشی دارند؟

۱۴- روشهای EP و GC را از نظر مبنای علمی، ابزار و کاربرد با هم مقایسه کنید.

۱۵- کاربرد روش IP در کانسارهای رسوبی را بنویسید.

۱۶- به فرض اینکه نمودارهای ارائه شده در شکلهای ۴ ۳۱ و ۴ ۳۲ از دو آبخوان متفاوت تهیه شده باشند، لایه‌های آبده را معین کنید.

۱۷- نمود پلاریزاسیون القائی IP ارائه شده در شکل (۴ ۳۳) از یک گمانه [illegible] تهیه شده است. محل رگه‌های سولفیدی را مشخص کنید. آیا می‌توانید ضخامت رگه سولفید در این رگه‌ها داوری کنید.



شکل (۴-۳۳) نمودار IP حاصل از یک گمانه حفر شده در یک کانسار سولفیدی

۵

نمودارهای رادیواکتیویته[1]
(روشهای هسته‌ای[2])

عناصر رادیواکتیو

عناصری در طبیعت وجود دارند که دارای ساختمان اتمی پایدار نیستند. در اثر مرور زمان با از دست دادن پروتون والکترون، این عناصر به عناصر دیگری تبدیل می‌شوند. این گونه عناصر، عناصر رادیواکتیو نامیده می‌شوند. عناصر رادیواکتیو همواره دارای فعل و انفعال هسته‌ای می‌باشند. در اثر همین فعل و انفعالات پرتوهای گاما، آلفا و بتا ساطع می‌نمایند. این پرتوها دارای خصوصیات زیر هستند.

پرتو آلفا[3]

پرتو آلفا از ذرات هلیم با بار مثبت که شامل دو پروتون و دو نترون می‌باشد، تشکیل شده است. سرعت پرتو آلفا در زمان ساطع شدن حدود $۱۰^{۴}$ کیلومتر بر ثانیه است. قدرت یونیزاسیون آن بقدری زیاد است که هوارا یونیزه می‌کند. اما قدرت نفوذ آن کم و فقط می‌تواند از ۵۰ میکرون آلومینیم

1. Radioactive logs 2. Nuclear 3. ∝ Radiation

و یک سانتیمتر هوا عبور نماید، یک صفحه کاغذ معمولی مانع نفوذ آن می‌شود. هر ایزوتوپ عنصر رادیواکتیو با از دست دادن (باصدور) پرتو آلفا به اندازهٔ چهار واحد از جرم اتمی و به اندازهٔ ۲ واحد از بار الکتریکی خود را از دست می‌دهد. بنابر این از نظر خواص شیمیائی در جدول مندلیف به دو خانهٔ قبل منتقل می‌شود. به همین علت پرتو آلفا با جذب دو الکترون می‌تواند بصورت اتم هلیم در آید.

پرتو بتا[1]

این پرتو از جنس الکترون است. چون جرم الکترون در مقابل جرم پروتون و نترون قابل چشم‌پوشی است، صدور پرتو بتا سبب تغییر جرم اتمی عنصر رادیوکتیو نمی‌شود. ولی بار الکتریکی آن به اندازهٔ یک واحد (الکترون) افزایش می‌یابد. قدرت نفوذ پرتو بتا بیشتر از پرتو آلفا است درازای مسیری که یک پرتو بتا سپری می‌کند بستگی به انرژی آن دارد اگر انرژی آن در حدود یک میلیون الکترون ولت باشد از حدود ۴ متر هوا و ۴/۴ میلی متر آب و ۲ میلی متر آلومینیم می‌گذرد. به هر حال قدرت نفوذ آنقدر بالا نیست که اهمیت داشته باشد. سرعت پرتو بتا در هنگام ساطع شدن ثابت نیست ولی در حدود سرعت نور است.

پرتو گاما[2]

پرتو گاما از جنس فوتونهای پرانرژی یا نور (امواج الکترو مغناطیسی) است که در اثر واکنشهای خود بخود (تغییر انرژی) در هستهٔ اتم تولید می‌شود. در اثر این واکنش‌ها هستهٔ رادیواکتیو جدید بهمراه پرتو گاما حاصل می‌شود. سرعت انتشار پرتو گاما در حدود سرعت نور است. اگر الکترونی

1. β Radiation 2. γ Radiation

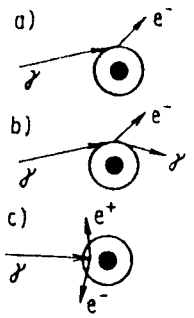
از مداری (اوربیتالی) به مدار دیگر جابجا شود از خود انرژی نورانی ساطع می‌نماید که همان پرتو گاما است. در صورت بمب باران هسته، انرژی حرارتی و مکانیکی که الکترونها بدست می‌آورند بصورت انرژی نورانی تجلی می‌نماید. پرتو گاما دارای انرژی زیادیست و طول موج آن حدود انگستروم می‌باشد. قدرت یونیزه کردن آن کم ولی قابلیت نفوذش زیاد است بطوریکه از حدود یک متر سنگ، ۷۰۰ متر هوا و از ۲۰ سانتی‌متر سرب عبور می‌نماید. کمترین انرژی پرتوهای گاما در حدود ۴۰ کیلو الکترون ولت است.

هنگام عبور پرتوهای گاما از مواد، این پرتوها با اتمهای مواد برخورد کرده و بنابر انرژی این پرتوها و عدد اتمی مواد، فرایند برخورد متفاوت است. در اثر این فرآیندها، پدیده‌های فتوالکتریک،(۱) اثر کامپتون،(۲) زوج الکترون - پزیترون (۳) حاصل می‌شوند. (شکل ۵-۱).

همانگونه که در شکل پیداست اگر انرژی پرتوهای گاما کم باشد این انرژی توسط الکترون آخرین مدار مواد جذب شده و الکترون آزاد می‌شود (پدیدهٔ فتوالکتریک). اگر عدد اتمی مواد کم و یا انرژی پرتوهای گاما متوسط باشد، بخشی از انرژی پرتوهای گاما جذب و تعدادی الکترون آزاد می‌شود. و پرتوهای گاما با انرژی کمتر به مسیر خود ادامه می‌دهند (اثر کامپتون) و چون از انرژی آنها کاسته شده است برخوردهای بعدی در مسیر سبب پدید آمدن فتوالکتریک می‌شود.

چنانچه انرژی پرتوهای گاما زیاد (بیش از حدود ۳ میلیون الکترون ولت) و عدد اتمی مواد هم بیش از ۳۰ باشد. انرژی زیاد پرتوهای گاما افزون بر آزاد سازی الکترون، پوزیترون هم آزاد می‌نمایند. این پدیده، پدیدهٔ تولید زوج الکترون - پزیترون نامیده می‌شود.

1. Photo - Electric 2. Compton Effect (compton scattering)
3. Electron - Positron Pair Production



شکل (۵-۱) فرآیند برخورد پرتوهای گاما با هستهٔ عناصر

a- پدیدهٔ فتوالکتریک b- اثر کامپتون c- تولید جفت الکترون - پزیترون

طبیعی است که تا زمانی که انرژی زیاد است در مسیر طی شده فرآیند تولید زوج الکترون - پزیترون حاکم است و وقتی که انرژی کمتر شد پرتوهای گاما، بخش دیگری از مسیر را تحت فرایند اثر کامپتون سپری می‌کنند و در آخرین بخش مسیر نیز فرآیند فتوالکتریک کنترل کنندهٔ ساز و کار برخورد است. طول کل مسیر را می‌توان بصورت زیر بیان نمود.

$$d_t = d_{ph} + d_c + d_p$$

از سوی دیگر ضرایب کاهیدگی[1] پرتوهای گاما را نیز می‌توان بصورت زیر بیان نمود.

$$a_t = a_{ph} + a_c + a_p$$

زیر نویسهای مربوط هستند به:

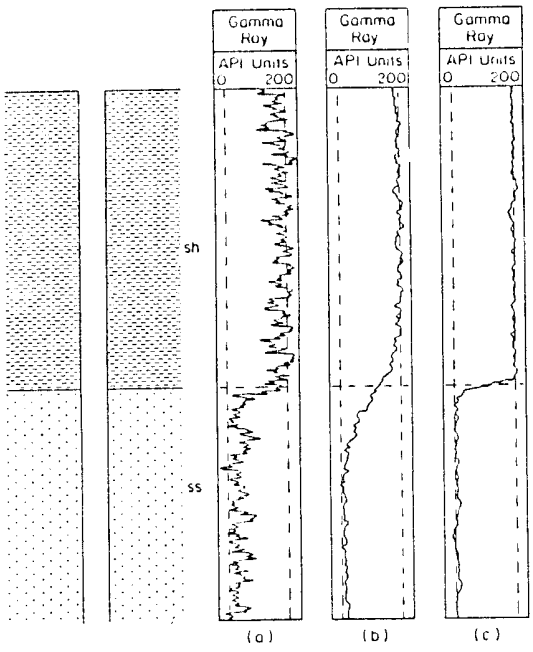
کل	t	فتوالکتریک	ph
اثر کامپتون	c	جفت الکترون-پزیترون	p

مسیر سپری شده و کاهیدگی بستگی به انرژی پرتوهای گاما، جرم مخصوص، ترکیب شیمیائی و عدد اتمی موادی که پرتوها از آنها گذر می‌کند دارد. بعنوان نمونه برای سنگها این مقادیر پیرو نوع کانیها، تخلخل، تراکم سنگهاو آب درون سنگها می‌باشد.

1. Attnuation Coefficient

ثابت زمانی[1]

زمانی را که برای محاسبهٔ متوسط شمارش در ثانیه یا در دقیقه در نظر می‌گیرند ثابت زمانی نامیده می‌شود. ثابت زمانی بسته به ضخامت سازند انتخاب و معمولاً با علامت Tc در بالای نمودار مشخص می‌شود(مثلاً Tc=4S). در عمل ثابت زمانی با توجه به تجربه و نوع سازندهای زمین‌شناسی بگونه‌ای انتخاب می‌گردد که منحنی از کادر خارج نشده و ضمناً همبری لایه‌ها قابل شناسایی باشد. نسبت ثابت زمانی و سرعت سوند در گمانه روی اندازه‌گیریها تأثیر زیادی دارد این تأثیر در شکل ۵-۲ دیده می‌شود.



شکل (۵-۲) اثر سرعت حرکت سوند درگمانه و ثابت زمانی روی نمودار پرتوگاما [۴]
a- سرعت سوند زیاد و ثابت زمانی کم b- سرعت سوند زیاد و ثابت زمانی زیاد
c- سرعت سوند کم و ثابت زمانی کم

1. Time Constant

ضخامت نیمه

ضخامت نیمه H.V.T[1] هر ماده عبارتست از ضخامتی از آن ماده که شدت پرتوهای گاما با انرژی مشخص را به نصف کاهش دهد. بعنوان نمونه، H.V.T برخی از مواد به صورت جدول زیر است. در این جدول انرژی بر حسب میلیون الکترون ولت و ضخامت بر حسب اینچ است.

انرژی	آب	ماسه و آهک	آهن	سرب
0.2	2	0.83	0.26	0.058
1	4	1.8	0.61	0.34
5	9.1	3.9	1.1	0.56

عناصر عمدهٔ رادیو اکتیو

مهمترین عناصر رادیو اکتیو عبارتند از : اورانیم، توریم، رادیم و پتاسیم ۴۰. در این میان پتاسیم به علت فراوانی نسبی اهمیت اساسی دارد. ایزوتوپ پتاسیم ۴۰ هر سه پرتو آلفا، بتا و گاما را ساطع می‌نماید ولی به علت قدرت نفوذ کم آلفا و بتا این پرتوها جذب دستگاه نمی‌شوند و فقط پرتو گاما می‌تواند جذب دستگاه شود به همین دلیل، رادیومتری طبیعی به گاماسنجی معروف شده است.

به علت وجود نسبتاً زیاد پتاسیم در رسها روش گاماسنجی بعنوان یک روش مناسب برای شناسایی رسها کاربرد گسترده‌ای دارد. در چاه‌پیمایی سنجش پرتوهای طبیعی گاما در پیمایش چاههای نفت، آب و گمانه‌های اکتشافی زغال سنگ کاربرد وسیعی دارد.

واحد رادیواکتیویتهٔ سنگها

واحد رادیواکتیویته سنگها بر حسب معادل میکروگرم رادیم در یک تن سنگ بیان می‌شود.

1. Half Valu Thickness

بعنوان مثال: اگر رادیواکتیویتهٔ سنگی ۱۲ باشد، در یک تن سنگ معادل ۱۲ میکروگرم رادیم، مواد رادیواکتیو وجود دارد. رادیواکتیویتهٔ سنگهای مختلف بقرار زیر است:

نام سنگ	تعداد نمونه	میزان رادیو اکتیویته (معادل میکروگرم رادیم در تن)
شیل خاکستری و سیاه	۴۰	۲۶/۱
مارن شیلی	۳۰	۱۶/۱
ماسه و شیل	۲۹	۱۳/۵
لای سنگ	۳۱	۱۰/۳
مارن و شیل آهکی	۳۰	۸/۸
ماسه سنگ سیلتی تمیز	۲۶	۷/۳
ماسه سنگ با کمی شیل	۱۳۰	۵/۳
آهک میکریتی	۲۸	۴/۳
دولومیت	۲۱	۳

اثر جرم مخصوص سازند

اگر تغییرات جرم مخصوص سازند بعلت تغییرات تخلخل و سیمان‌بندی باشد و ربطی بـه تغییر عناصر با اعداد اتمی مختلف نداشته باشد نمودار پرتوگاما با افزایش میزان مواد رادیواکتیو در سنگها و با وارون جرم مخصوص سازندها متناسب است یعنی دو سازندی که دارای مقدار مساوی عناصر رادیواکتیو در واحد حجم باشند. آنکه جرم مخصوصش بـیشتر است مـقدار کـمتری را روی منحنی نشان خواهد داد. اگر سازندی حاوی چند عنصر رادیواکتیو باشد مقدار رادیو اکتیویتهٔ آن از

رابطهٔ زیر محاسبه میشود.

$$GR = \frac{\Sigma \rho_i V_i A_i}{\rho_b}$$

- میزان رادیواکتیویته GR
- جرم مخصوص مواد رادیواکتیو ρ_i
- جرم مخصوص سازند ρ_b
- جزء حجمی مادهٔ رادیواکتیو V_i
- ضریب متناسب با ماهیت رادیواکتیوتیه (نوع ماده رادیواکتیو) A_i

روش‌های هسته‌ای در چاه‌پیمایی

برداشتهای هسته‌ای در گمانه‌ها از نخستین سالهای دههٔ ۱۹۴۰ شروع شد و پرتو گاما نخستین ویژگی رادیواکتیو بود که در چاه پیمایی مورد استفاده قرار گرفت و بعد از آن روشهای رادیواکتیویته مصنوعی گسترش یافتند. ابزار روشهای هسته‌ای بسته به نوع روش شامل یک گیرنده، و یا یک فرستنده و یک گیرنده و حتی یک فرستنده و دوگیرنده هستند. مانند برخی از روشهای دیگر در روشهای هسته‌ای نیز وجود گل حفاری، گبرهٔ چاه، گل تراویده و تغییرات قطر گمانه اثر ناخواسته‌ای روی اندازه‌گیریها می‌گذارد که در مواردی باید اثر آنها را از روی نمودارها حذف نمود. بنابر این همراه این نمودارها معمولاً نمودار قطرسنجی نیز برداشت می‌شود. گرچه بیشتر روشهای هسته‌ای را می‌توان در گمانه‌های با لولهٔ جداری نیز بکار برد اما در برخی از موارد باید چاه بدون لولهٔ جداری باشد بویژه زمانی که تجزیه طیفی پرتوها مورد نظر باشد.

هدف از بکارگیری روشهای هسته‌ای در چاه‌پیمایی بدست آوردن اطلاعاتی در مورد ترکیب شیمیایی و کانی‌شناسی سنگها، درصد مواد رادیواکتیو در سنگها، درصد رسها، گل حفاری، آب سازند، جرم مخصوص و تخلخل سازند، چگونگی سیمانکاری در پیرامون لولهٔ جداری، شناسایی لایه‌های

تمیز بدون رس و... می‌باشد به طور کلی روشهای هسته‌ای را می‌توان به دو گروه روشهای رادیواکتیو طبیعی و روشهای مصنوعی تقسیم نمود.

روشهای طبیعی شامل روشهایی است که شدت پرتوهای گامای طبیعی اندازه‌گیری می‌شود در برخی از موارد افزون بر اندازه‌گیری میزان شدت پرتوها، انرژی آنها نیز اندازه‌گیری شده و در بررسی‌های طیفی از آنها استفاده می‌شود. ابزار این روشها تنها مجهز به گیرنده‌ها می‌باشند.

در روشهای هسته‌ای مصنوعی، هستهٔ مواد پیرامون گمانه توسط پرتوهای رادیواکتیو گاما یا نترون که از فرستنده، گسیل می‌شوند بمباران شده و اثر مواد روی این پرتوها مطالعه می‌شود.

مهمترین نمودارهای حاصل از روشهای هسته‌ای بشرح زیرند.

نمودار پرتوگامای طبیعی GR[1]

واژه نمودار پرتوگاما در مورد اندازه‌گیری کل پرتوهای گاما که توسط عناصر رادیواکتیو (پتاسیم ۴۰، رادیم، اورانیم و توریم) ساطع می‌شوند بکار می‌رود. سوند پرتوگاما مجهز به یک گیرنده و چند تقویت کننده است با حرکت سوند در گمانه پرتوهای گاما توسط گیرنده جذب و پس از چندین مرحله تقویت و پردازش داده‌ها، نمودار گامای طبیعی به صورت پیوسته در طول گمانه رسم می‌شود.

در بررسی‌های نفت خوانها و آبخوان‌ها که معمولاً در حوضه‌های رسوبی هستند، نمودار گاما معمولاً نمایگر میزان رس در سازندهاست چرا که پرتوهای گاما معمولاً سرچشمه گرفته از پتاسیم ۴۰ هستند که در رس فراوان‌تر است البته شرایط غیرعادی نیز وجود دارد که نمودار گاما تحت تاثیر خاکسترهای آتشفشانی و یا نمکهای حاوی عناصر رادیواکتیو حل شده در آب سازند قرار می‌گیرد.

در معادن ذغال سنگ نمودار گاما می‌تواند به صورت کیفی برای تشخیص لایه‌های ذغال که در بین شیلها قرار گرفته‌اند و به صورت نیمه کمی برای تشخیص میزان خاکستر ذغال بکار رود.

1. Natural Gamma Ray log

(نمودار گاما با افزایش درصد خاکستر، افزایش می‌یابد). از نمودار گاما برای بررسی رگه‌های حاوی مواد رادیواکتیو مانند اورانیم در کانسارهای اورانیم و غیره می‌توان استفاده نمود. در این حالت روشهایی برای تفسیر کمی نمودار گاما توسط برخی از ژئوفیزیست‌های اروپای خاوری ارائه شده است [۳]. در تفسیرهای کمی نمودار گاما، پرتوهای ناشی از تمام عناصر رادیواکتیو به معادل PPM اورانیم تبدیل می‌شود.

ابزار اندازه‌گیری پرتوهای گامای طبیعی

معمول‌ترین وسیلهٔ اندازه‌گیری گاما شمارش گر گایگر [۱] است. امروزه در چاه‌پیمائی از کنتورهای جرقه‌ای استفاده می‌شود. در این دستگاه پرتوگاما به کریستال یدور سدیم که توسط تالیم فعال شده، برخورد نموده و جرقه ایجاد می‌کند. این جرقه به نوبهٔ خود با سطح حساس فتوکاتدی برخورد کرده، سبب خروج الکترون‌هایی از آن می‌شود که به الکترون‌های نخستین موسومند، این الکترونها به سمت نخستین بار مثبت (آند) کشیده شده و به علت دارا بودن انرژی کافی سبب می‌شود که تعداد زیادی الکترون ثانویه از آن خارج شود. این الکترونها به سمت آند بعدی که دارای ولتاژ بیشتری است حرکت نموده و این عمل به همین نحو تکرار می‌شود و جرقه به حدی تقویت می‌شود (تا حدود یک میلیون برابر) که بتواند توسط تقویت کننده‌های معمولی الکترونیکی تقویت شده و بعد نگاشته شود. سطح فتوکاتد در مقابل درجهٔ حرارت بالا حساس است و عایق‌بندی سوند و یا سیستم خنک‌کننده مورد نیاز است.

ابزار اندازه‌گیری پرتوهای گامای طبیعی باید کالیبره شوند. برای کالیبره کردن این ابزار معمولاً از چاهی که در هوستون [۲] وجود دارد استفاده می‌شود. این عمل، آزمایش API نامیده می‌شود. میزان پرتوهای گاما در شیلها معمولاً بیش از API ۲۰۰ است چون اندازه‌گیری‌ها بشدت

1. Geiger
2. Houston

تحت تاثیر گل حفاری و قطرگمانه است باید تصحیح‌های لازم در این مورد بعمل آید.

نمودار طیفی پرتوگاما (۱) SGL

در این روش افزون بر اندازه‌گیری میزان پرتوهای گامای طبیعی انرژی آنها نیز اندازه‌گیری می‌شود ابزار SGL به یک دستگاه شمارش‌گر و یک طیف سنج مجهز است. اندازه‌گیری‌ها معمولاً دوگونه انجام می‌شود.

الف- نقطه به نقطه، یعنی در یک نقطه اندازه‌گیری انجام می‌شود و بعد دستگاه به نقطهٔ دیگر گسیل می‌شود.

ب - اندازه‌گیریهای پیوسته،

در روش نقطه به نقطه کل تصویر طیف به وسیلهٔ یک آنالیزور چندین کاناله نگاشته می‌شود و در روش دوم سه سطح انرژی E3,E2,E1 با یک پنجره معین DE انتخاب می‌شود. شمارشها در هر پنجره با سطح انرژی‌های معین شده، انجام می‌شود. سطوح انرژی و پنجره‌ها بر مبنای تجزیه سه مؤلفه‌ای اورانیم، پتاسیم و توریم برگزیده می‌شود.

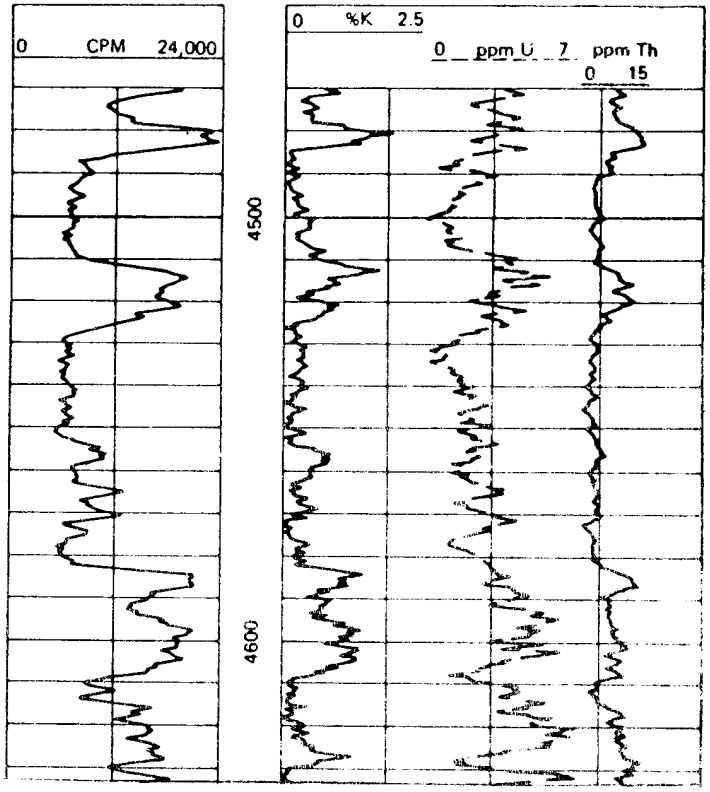
برای پتاسیم	$E_1=(۱/۴۶\pm ۰/۲)Mev$
برای اورانیم	$E_2=(۱/۷۶\pm ۰/۲)Mev$
برای توریم	$E_3=(۲/۶۱۵\pm ۰/۲)Mev$

تجزیه کننده‌های طیفی هر کانال نیاز به کالیبره شدن دارند. با این روش می‌توان میزان شمارش را در هر یک از پنجره‌های انرژی بدست آورد. نتیجه را می‌توان بر روی دیسکتهای مغناطیسی ثبت کرد و پردازش داده‌ها می‌تواند توسط کامپیوتر انجام شود. روش پرتوسنجی طیفی

1. Specterometry γ log

بیشتر در اکتشاف کانسارهای رادیواکتیو و برای شناسایی ژنز آنها و مهاجرت عناصر رادیواکتیو بکار می‌رود. دقت اندازه‌گیریها به کیفیت کالیبره کردن دستگاه بستگی دارد.

در روش SGL (یا SGR) سه نمودار جداگانه برای هر یک از مواد رسم می‌شود (شکل ۵-۳) بدیهی است که در این روش نیز تصحیح مربوط به گمانه و گل حفاری باید انجام پذیرد. این عوامل تأثیر چشمگیری بر روی نمودار بدست آمده برای پتاسیم دارند.



شکل ۵-۳ نمودارهای پرتوسنجی طبیعی گاما برای عناصر پتاسیم، اورانیم و توریم [۱۰]
نمودارها به ترتیب از چپ به راست نمودارهای گاما، پتاسیم، اورانیم و توریم بر حسب واحدهای میلیون ارائه شده‌اند

رادیومتری مصنوعی

اگر منبعی موجود باشد که بتواند نترون ایجاد کند و لایه‌های زمین را با این نترون بمباران کنیم، در ضمن جذب نترونها توسط هستهٔ عناصر تشکیل دهندهٔ سنگها، از سرعت آنها کاسته می‌شود و انرژی آنها تبدیل به انرژی حرارتی می‌گردد. اگر وسیلهٔ اندازه‌گیری نسبت کند شدن نترونها را اندازه‌گیری کند، روش "نترون - نترون "[1] نامیده می‌شود. ولی اگر دستگاه میزان پرتوهای گاما را که در اثر برخورد نترون با هسته و تبدیل انرژی حرارتی ایجاد می‌شود، ثبت نماید روش "نترون - گاما"[2] نامیده می‌شود.

روشهای پرتوگاما، از روشهای دیگر رادیومتری مصنوعی هستند. در این روشها از چشمه‌ای استفاده می‌شود که پرتوهای گاما به جای نترون ساطع می‌کند.

مهمترین عاملی که سبب جذب نترونها می‌شود هیدروژن است که در همهٔ سیالات مخزن چه در آب و چه در هیدروکربورها موجود است. بعد از هیدروژن عوامل جذب دیگر، اکسیژن و سیلیس هستند مقدار کند کنندگی (جذب) اکسیژن کسر کوچکی از جذب هیدروژن و میزان جذب سیلیس کسری از جذب اکسیژن است. بنابر این کاربرد اصلی این روش تعیین میزان سیالات و تخلخل موجود در سازند است.

اگر آهن در محیط موجود باشد بعلت جذب شدید نترون ایجاد اشکال می‌نماید. علاوه بر آهن عناصری نظیر کلر هم جاذب نترون هستند و تفسیر را مشکل می‌سازند.

نمودار نترون - گاما[3]

در روش‌های هسته‌ای مصنوعی مواد دیوارهٔ چاه توسط پرتوهای گاما و یا نترون بمباران می‌شوند. تأثیر مواد مختلف روی پرتوهای ساطع شده از چشمهٔ رادیواکتیو متفاوت است و همین

1. N-N 2. N-γ 3. Neutron - Gamma log

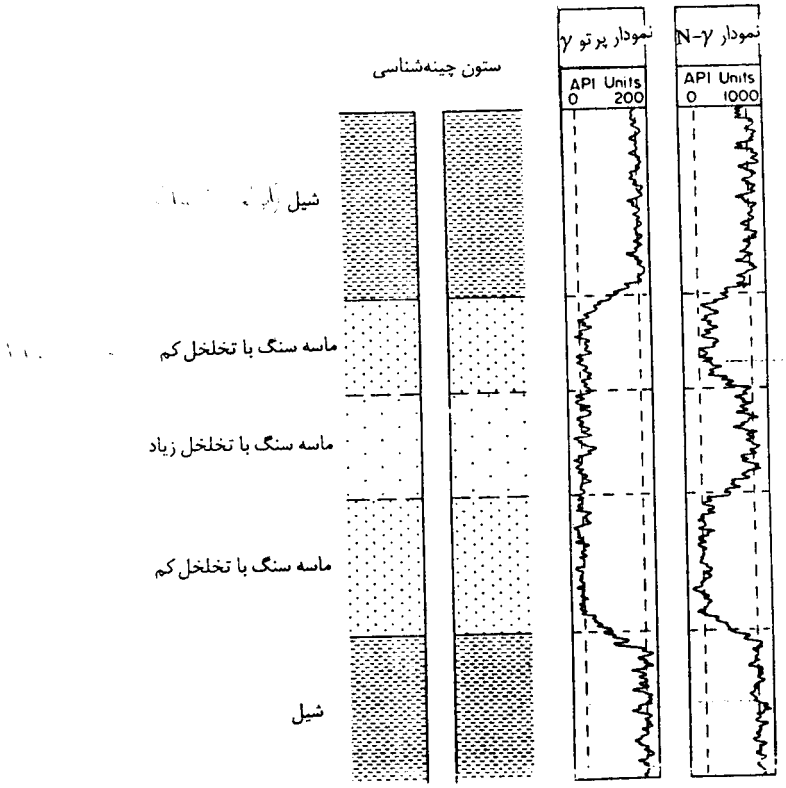
تفاوت باعث شناسایی آنها می‌شود. در روش نترون - گاما یک چشمهٔ تولید نترون و یک گیرنده در سوند جاسازی شده‌اند. نترونهایی که از چشمه گسیل می‌شوند. مسیری را درون سازند سپری می‌کنند و در مسیر خود با هستهٔ مواد سازند، آب و گل حفاری برخورد می‌کنند. ساز و کار برخورد نترون با هستهٔ مواد بستگی به تراکم جرمی مواد و نزدیکی جرم اتمی آنها با جرم اتمی نترون دارد. هر چه اختلاف جرم اتمی مواد با جرم اتمی نترون بیشتر باشد برخورد از نوع الاستیک‌تر است و در اثر برخورد، نترون انرژی کمتری را از دست می‌دهد. بنابر این می‌تواند مسیر بیشتری را درون سازند سپری کند تا انرژی آن به اندازه‌ای کم شود که بتواند توسط هسته‌های بزرگ جذب شود. حال اگر در مسیر نترون مواد حاوی هیدروژن وجود داشته باشد که جرم حجمی آن به جرم حجمی نترون نزدیک است، در اثر این برخورد انرژی بیشتری از بین می‌رود و نترونها تندتر انرژی خود را از دست می‌دهند.

از آنجا که در حفره‌های سنگها در زیر سطح ایستابی، آب و یا در مخازن هیدروکربوری، هیدروکربور وجود دارد، در چنین شرایطی جذب نترونها و یا شدت پرتوهای گامای تولید شده در اثر جذب نترونها افزایش می‌یابد. بنابر این روش نترون - گاما می‌تواند برای برآورد تخلخل بسیار مفید باشد زیرا میزان هیدروکربورها یا آب با میزان فضاهای خالی یا تخلخل متناسب است.

از سوی دیگر اگر نترونها بتوانند یک مسیر نسبتاً زیادی را قبل از جذب شدنشان سپری کنند. میزان کمی گاما می‌تواند توسط گیرنده که یک شمارندهٔ پرتوگاما می‌باشد، شمرده شود.

همانگونه که اشاره شد نمودارهای نترون - نترون و نترون - گاما به حد چشمگیری پیرو تراکم هیدروژن مواد هستند. در پایین‌تر از سطح آب زیرزمینی میزان هیدروژن در پیوند با افزایش آب یا هیدروکربورهاو آن هم در پیوند با افزایش تخلخل، افرایش می‌یابد. بنابر این می‌توان تخلخل را با یک تقریب خوب از این روشها بدست آورد. ولی تعیین جنس لایه‌ها توسط نمودارهای نترون بتنهایی مشکل و در مواردی بدون استفاده از نمودارهای دیگر ناممکن است. شکل (۵-۴) نمودار

بتنهایی مشکل و در مواردی بدون استفاده از نمودارهای دیگر ناممکن است. شکل (۵-۴) نمودار نترون - گاما و نمودار پرتوگامای طبیعی را نشان می‌دهد. همانگونه که دیده می‌شود نمودار نترون - گاما در لایهٔ شیل و در ماسه سنگ با تخلخل زیاد، تقریباً یکسان است. اما در نمودار پرتو گامای طبیعی این دو لایه به خوبی از یکدیگر قابل تفکیک هستند.



شکل (۵-۴) نمونه‌ای از نمودارهای پرتوگامای طبیعی و نترون گاما. [۴]
تفاوت این دو نمودار در لایه‌های ماسه سنگی با تخلخل زیاد و کم چشم‌گیر است.

نمودار نترون - نترون [۱]

اساس روش نترون - نترون مانند روش نترون - گاما است. یعنی یک چشمهٔ نترون‌زا و یک گیرنده در سوند جاسازی شده است. از چشمهٔ نترون‌زا، نترونها با انرژی زیاد بطرف سازند گسیل می‌شوند. همانگونه که اشاره شد ساز و کار برخورد نترونها با مواد بستگی به اختلاف جرم ملکولی آنها با نترون دارد. در حالتی که این اختلاف کم است (مانند هیدروژن و برون) برخورد پلاستیک‌تر است و باعث جذب مقدار زیادی از انرژی نترون‌ها می‌شود. برخورد نترونها با هستهٔ مواد را می‌توان با برخورد توپهای بیلیارد مقایسه کرد که در هر برخورد توپها بخشی از انرژی خود را از دست می‌دهند. اگر توپها هم‌وزن باشند، توپ متحرک انرژی خود را به توپ ساکن داده و توپ ساکن شروع به حرکت می‌کند. گیرنده نترونهایی را که انرژی خود را از دست داده‌اند دریافت و شمارش می‌کند.

دو نوع نمودار نترون ـ نترون وجود دارد، نمودار نترون ـ نترون ترمال [۲] و نمودار نترون — نترون اپی‌ترمال [۳] تفاوت ابزار فقط درگیرنده‌هاست. در گیرندهٔ اپی‌ترمال یک فیلتر کادمیم Cd وجود دارد که نترونهای ترمال را جذب کرده سد راه رسیدن آنها به گیرنده می‌شود. بنابر این تنها نترونهای اپی‌ترمال از فیلتر عبور کرده و ضمن کاهش سرعت، آنها به گیرنده می‌رسند. در حالی که گیرندهٔ ترمال که نسبت به گیرندهٔ اپی‌ترمال در فاصله‌ای نزدیک‌تر به چشمهٔ نترون زا درون سوند جاسازی شده است، تنها نترونهای ترمال را دریافت و شمارش می‌کند. در هر دو حالت نتیجه به صورت نمودارهای پیوسته رسم می‌شود.

همانگونه که اشارد شد زمانی که هیدروژن (هیدروکربور یا آب) در مسیر حرکت نترونهای

1. Neutron-Neutron log (NNL)
2. Thermal Neutron NNL-T
3. Epithermal Neutron NNL-E

گسیل شده از چشمه قرار گیرد، نترونها بسرعت انرژی خود را از دست داده و جذب گیرنده می‌شوند چون این مواد معمولاً فضاهای خالی بین دانه‌های سنگ را پر می‌کنند. بنابر این از نمودار نترون برای برآورد تخلخل استفاده می‌شود و حتی در بسیاری از موارد پردازشهای لازم انجام و تخلخل محاسبه و نمودار تخلخل رسم می‌شود.

ابزار نترون - نترون

ابزار چندگانه‌ای برای نترون - نترون وجود دارد که برخی از آنها امروزه از رده خارج شده‌اند. ابزار SNP[1] نیز در اکتشاف نفت کاربرد کمتری یافته‌اند و تمایل به استفاده از ابزار CNL[2] و DNL[3] (نمودار دوگانهٔ انرژی نترون) چشمگیر شده است. در ابزار جدید چشمهٔ نترون زا از جنس آمرسیم - بریلیم (Am-Be) می‌باشد که نترونهایی با انرژی حدود چند میلیون الکترون ولت تولید می‌کنند. در ابزار SNP چشمهٔ نترون‌زا و گیرنده چسبیده به دیوارهٔ چاه حرکت می‌کند و گیرنده دارای فیلتری است که تنها نترونهای با انرژی بیشتر از ۰/۴ میلیون الکترون ولت یعنی اپی‌ترمال را جذب می‌کند این ابزار بگونه‌ای طراحی شده‌اند که فقط در چاههای بدون لولهٔ جداری بکار گرفته شوند. قطر سوندSNP حدود ۵ اینچ است.

سوندCNL دارای دو گیرنده با بازهٔ سوندی متفاوت است هر دو گیرنده نترونهای ترمال را دریافت می‌کنند. بازه‌های سوند حدود ۵۰ و ۸۰ سانتیمتر است و چشمه از نوع Am-Be است. در این روش نسبت میزان نترونهای دریافت شده توسط دو چشمه و در مرحله پردازش داده‌ها در

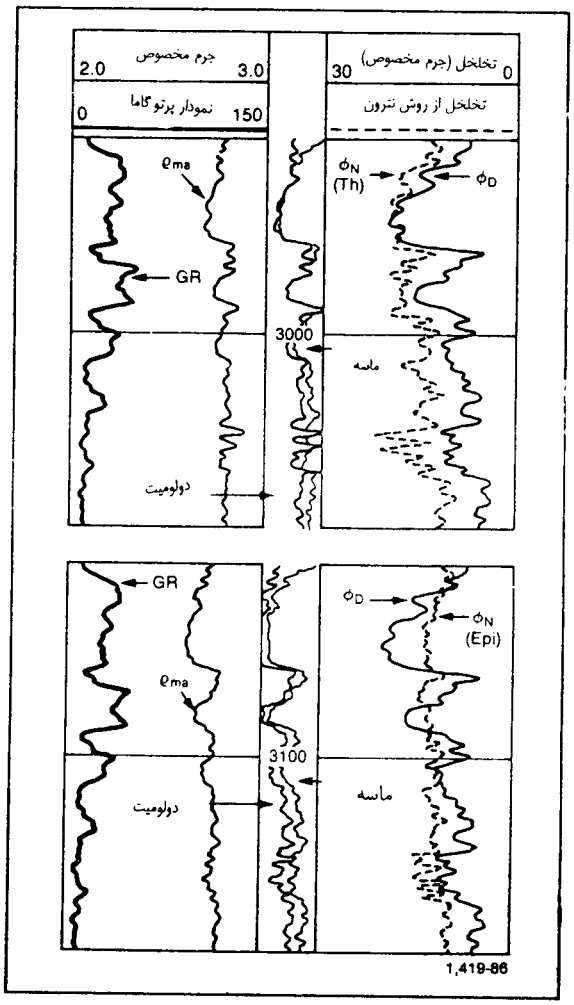
1. Side wall Neutron Porosity
2. Conpensated Neutron Log
3. Dual Energ Neutron Log

پردازشگرهای درون کامیون مورد پردازش قرار گرفته، تبدیل به تخلخل می‌شود و سرانجام نمودار تخلخل در طول گمانه رسم می‌شود. استفاده از نسبت میزان نترونهای دریافت شده باعث حذف اثر ناخواستهٔ گل حفاری به میزان چشمگیری می‌شود. این ابزار را می‌توان در گمانه‌های خشک، حاوی گل حفاری و حتی دارای لولهٔ جداری بکار بُرد. شیلها معمولاً حاوی عناصری مانند برون [1] هستند که نترونهای ترمال را جذب می‌کند. این عمل باعث می‌شود که در چنین مواردی خطای ناخواسته‌ای در برداشته‌ها پدید آید.

سوند DNL دارای یک چشمهٔ نترون‌زا A_m-B_e یک گیرندهٔ اپی‌ترمال و یک گیرندهٔ ترمال است. دریافت نترونهای اپی‌ترمال باعث می‌شود که بتوان خطاهای ناشی از عناصری مانند برون در شیلها را محاسبه و از اندازه‌گیریها حذف نمود. توسط این سوند بطور همزمان داده‌های لازم برای نگاشت دو منحنی تخلخل بدست می‌آید. با آنچه در مورد اثر شیلها روی نمودار نترون ترمال بیان شد، طبیعی است که بین دو نمودار در ژرفاهایی که شیل وجود دارد هماهنگی کامل وجود نداشته باشد. اما در ژرفاهایی که سازندهای غیر رسی وجود دارند هماهنگی بین دو نمودار چشمگیر است در شیلها همانگونه که اشاره شد به علت وجود عناصر جذب کنندهٔ نترونهای ترمال، مقدار تخلخل بدست آمده در نمودار ترمال بیشتر از نمودار اپی‌ترمال است. بهرحال در چنین شرایطی نمودار نترون اپی ترمال با نمودار تخلخل حاصل از روش جرم مخصوص هماهنگی بیشتری دارد و به واقعیت نزدیک‌تر است (شکل ۵-۵).

با توجه به بازه‌های مختلف سوند برای گیرنده‌های ترمال واپی‌ترمال روشن است که اثر شرایط فیزیکی چاه روی دو نمودار یکسان نباشد و نمودار اپی‌ترمال که نزدیکتر به چشمه است بیشتر تحت تأثیر شرایط چاه قرار می‌گیرد.

1. Boron



شکل (۵-۵) مقایسه نمودارهای تخلخل بدست آمده از روشهای ترمال Th (قسمت بالا) و اپی‌ترمال Epi (قسمت پایین) و تخلخل بدست آمده از روش جرم مخصوص در سمت چپ منحنی‌نمودارهای پرتوگامای طبیعی و جرم مخصوص ارائه شده است. [۲]

برای حذف این اثر ناخواسته با توجه به شرایط مختلف، از نرم افزارهای ویژه استفاده می‌شود. از نقطه قوتهای روش اپی ترمال امکان کاربرد آن در چاههای حفاری شده با هوای فشرده است. بهر ترتیب استفادهٔ هم زمان از دو نمودار ترمال و اپی‌ترمال با توجه به برتریها و کاستیهایی که هر یک از آنها دارند، باعث می‌شود که بتوان تخلخل را با خطای کمتر برآورد نمود.

با این وجود، شرایط فیزیکی چاه، میزان شوری و جرم مخصوص گل حفاری، درجهٔ حرارت، قطرگمانه و.... روی اندازه‌گیریها تأثیر می‌گذارد و برای هر یک از موارد فوق روشهایی وجود دارد که توسط آنها می‌توان تصحیح‌های لازم را انجام داد.

شعاع کاوش [۱] در روشهای نترون

شعاع کاوش در روشهای نترون به بازهٔ سوند و تخلخل بستگی دارد در سوندهای با گیرندهٔ اپی‌ترمال شعاع کاوش سوند در سازندی که تخلخل آن بسیار کم باشد حدود یک فوت است. با افزایش تخلخل در زیر سطح ایستابی به علت جذب بیشتر و تندتر نترونها شعاع کاوش سوند کاهش می‌یابد و در سنگهای با تخلخل زیاد برای سوند SNP به حدود ۸ اینچ و برای سوند CNL به ۱۰ اینچ می‌رسد.

اثر شوری آب روی نمودار تخلخل نترون

شاخص هیدروژنی بیانگر تراکم هیدروژنها در واحد حجم است. شاخص هیدروژنی آب شیرین به عنوان یکا[۲] در نظر گرفته می‌شود و شاخص هیدروژنی بقیه مواد نسبت به آن سنجیده می‌شود. شوری آب باعث جایگزین شدن نمکهای آب بجای مولکولهای آب و در نتیجه کاهش چگالی هیدروژن در آب می‌شود. بنابر این شوری آب باعث پدید آمدن خطا در برآورد تخلخل می‌شود

1. Radial Investigation 2. Unity

و از میزان آن می‌کاهد. این اثر در چاههای دارای لولهٔ جداری بیشتر است چون باگذر زمان ناحیه آغشته از بین می‌رود. تصحیح خطای ناشی از شوری آب در نمودارهای SNP به صورت خودکار توسط دستگاههای پردازشگر و در نمودارهای CNL بکمک نمودارهای کمکی انجام می‌شود. این تصحیحات معمولاً بر اساس شاخص هیدروژنی آب سازند انجام می‌شود شاخص هیدروژنی از شوری آب در دمای ۲۵ درجه سانتی‌گرداد، مطابق پیوند زیر پیروی می‌کند.

$$H_W=1-0.4C$$

H_W شاخص هیدروژنی آب

C غلظت نمک بر حسب میلی‌گرم در لیتر ضربدر $۱۰^{-۶}$ است. در حالت کلی با یک تقریب مناسب می‌توان این رابطه را به صورت زیر و مستقل از دما نوشت.

$$H_W=\rho_W(1-C)$$

ρ_W جرم مخصوص آب است

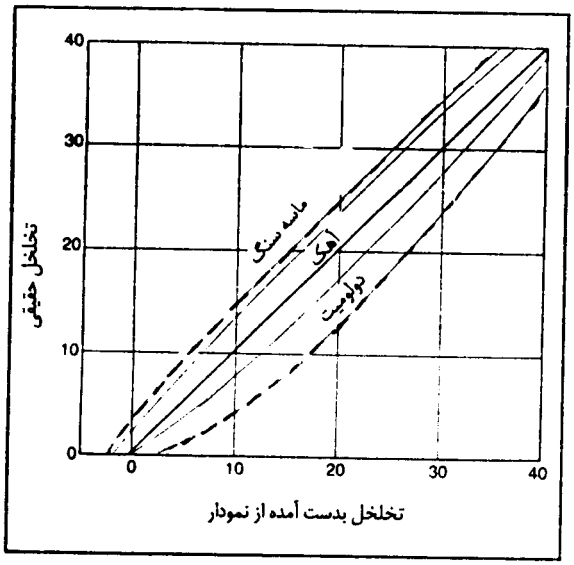
اثر کانیهای آبدار

برخی از کانیها از جمله ژیپس در ترکیب شیمایی خود، مقدار چشمگیری آب به صورت بلور دارند. در چنین شرایطی تخلخل بدست آمده از نترون از تخلخل واقعی بیشتر است.

اثر جنس سنگها

برداشتهای نترون افزون بر سیال درون سازند و گل حفاری تا حدی از جنس سنگها نیز پیروی می‌کند. به این ترتیب که ترکیب کانی‌شناسی سنگها روی برداشتها تأثیر گذاشته و این تأثیر برای سنگهای مختلف متفاوت است. به همین دلیل تصحیحاتی که برای برداشتهای نترون انجام می‌شود به ترکیب کانی‌شناسی سنگها بستگی دارد و برای سنگهای متفاوت، مختلف است. روشن

روشن است که وقتی که چاه توسط هوای فشرده حفر شده باشد اثر جنس سنگها کاهش می‌یابد برای تصحیح اثر جنس سنگها نیز روشهایی وجود دارد بعنوان نمونه می‌توان از شکل ۵-۶ برای این منظور استفاده کرد.



شکل (۵-۶) تصحیح تخلخل بدست آمده از روش روشهای نترون - نترون

[۲] (- - - - CNL , ـــــ SNP)

اثر گازها

نمودارهای تخلخل بدست آمده از روش نترون معمولاً با انگار اینکه سازند حاوی آب باشد تهیه می‌شوند. از آنجا که شاخص هیدروژنی هیدروکربورهای مایع کم و بیش به شاخص هیدروژنی آب نزدیک است، نمودار نترون در سازندهای نفت‌دار خطای اندکی دارد. اما وضعیت برای سازندهای

گازدار متفاوت است. شاخص هیدروژنی گازها به حد چشمگیری پیرو فشار و درجه حرارت است ولی بهر حال با توجه به تراکم کمتر گازها، نمودارهای نترون در سازندهای گازدار مقدار کمتری از مقدار واقعی ارائه می‌دهند. در چنین شرایطی برای برآورد تخلخل باید از نمودارهای دیگر نیز استفاده نمود.

کاربردهای نترون

مهمترین کاربرد روش نترون همانگونه که بیان شد، استفاده از این روش برای برآورد تخلخل است. در بسیاری از موارد بکارگیری نمودارهای دیگر از جمله SP، پرتوگاما و نمودارهای صوتی همراه نمودارهای نترون می‌تواند نتایج بهتری ارائه دهد. افزون بر برآورد تخلخل از نمودارهای نترون (به همراه نمودارهای دیگری) می‌توان برای تعیین جنس سنگها استفاده نمود.

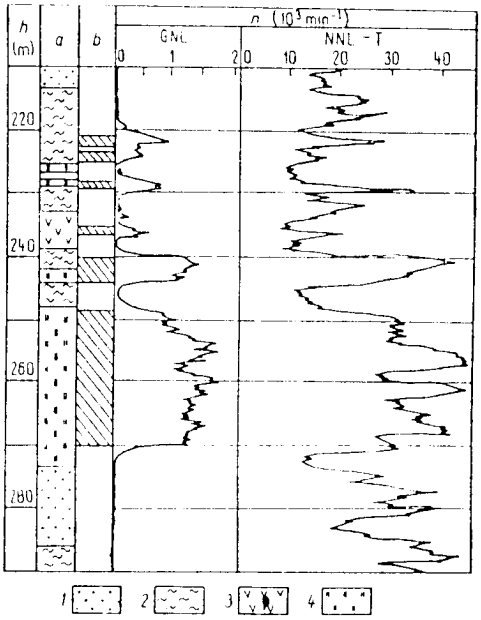
- از نمودار نترون - گاما همراه نمودار صوتی یا نمودارهای دیگر تخلخل می‌توان برای تعیین همبری بین لایه‌های آبدار و گازدار از یک سو و نفت‌دار و گازدار از سوی دیگر استفاده نمود.

- شناسایی لایه‌های ذغال و حتی درصد خاکستر آن توسط نمودار نترون - گاما،

اگر از نسبت طیفی استفاده شود و همراه با پرتوهای گاما، دو سطح انرژی E1d از ۱/۶ تا ۲/۵ و E2d از ۲/۸ تا ۳ میلیون الکترون ولت اندازه‌گیری شود، استفاده از نسبت میزان پرتوهای دریافت شده با هر یک از سطح انرژیهای فوق می‌تواند به شناسایی ذغال ختم شود. زیرا این نسبت برای ذغال حدود ۵/۳ و برای لایه‌های همراه ذغال بین ۱/۹ تا ۲/۹ می‌باشد.

- استفاده از نمودارهای گاما- نترون و نترون-نترون در اکتشاف کانسارهای بریلیم،

در این کانسارها مقدار نمودار افزایش می‌یابد. شکل ۵-۷ نمونه‌ای از این برداشتها را که در شوروی سابق انجام شده نشان می‌دهد.



شکل (۵-۷) نمونه‌ای‌ازنمودارهای‌نترون-نترون‌وگاما-نترون‌دریک‌کانسار‌بریلیم‌دراتحادشوروی [۱۲]

a- ستون سنگ‌شناسی b- محل کانهٔ بریلیم

۱- ماسه سنگ ۲- شیل ۳- آمفیبولیت ۴- پگماتیت

نمودار تپ نترون [۱]

از تپ نترون دوگونه نمودار بدست می‌آید نمودار تپ نترون - نترون و نمودار تپ نترون - گاما در روش تپ نترون - نترون [۲] (PNNL) یک چشمهٔ نترون‌زا وجود دارد که نترون‌های ترمال را به صورت تپ[۳] برای چند (۱۰۰-۲) میلی‌ثانیه به طرف سازند گسیل می‌کند نرخ میرایی نـترونهای

1. Pulsed Neutron Logging (PNL)
2. Pulsed Neutron - Neutron Logging
3. Pulse

ترمال در بین دو تپ پی‌درپی اندازه‌گیری می‌شود. هدف از این کار بدست آوردن اطلاعاتی در مورد زمان دوام[۱] نترونهای ترمال است. زمان دوام زمانی است که طول می‌کشد تا نتروهایی که از چشمه گسیل شده‌اند جذب شده و از بین بروند. از آنجا که زمان دوام نترونها پیرو ترکیب شیمیایی مواد مورد مطالعه به ویژه موادی که دارای توان بالای جذب نترون هستند می‌باشد، از این نمودار می‌توان برای شناسایی مواد کند کننده و جذب کنندهٔ نترونهای ترمال استفاده نمود. زمان دوام نترون در فاصلهٔ بین دو تپ پی‌درپی اندازه‌گیری می‌شود در واقع میزان نترونها در هر لحظه اندازه‌گیری و با توجه به آن زمان دوام برآورده می‌شود.

بازهٔ سوندهای مورد استفاده در این روش از ۲۰ تا ۶۰ سانتیمتر و شعاع کاوش آنها از ۱۰ تا ۳۰ سانتیمتر متغیر است. کاربرد نمودارهای تپ نترون ـ نترون بیشتر در تفسیر کیفی چاههای نفت است. از آنجا که جذب نترون بیش از هر عنصر دیگری توسط هیدروژن انجام می‌شود، از این نمودار می‌توان برای برآورد تخلخل، تعیین نوع سیال سازند (نفت، آب یا گاز) و تا حدودی برای تخمین کانیها استفاده نمود. همچنین از این روش می‌توان برای تعیین مرز گاز ـ نفت و آب ـ گاز استفاده نمود. تعیین مرز آب با نفت تنها در صورتی توسط این نمودار انجام‌پذیر است که آب حاوی میزان در خور توجهی نمک Nacl باشد.

روش تپ نترون ـ گاما[۲] (PNGL) نیز شبیه روش PNNL است. در هر دو روش چشمهٔ تولید نترون تقریباً یکسان است ولی انرژی نترونها در حد ترمال است. تنها تفاوت در اندازه‌گیری پرتوهای گامای تولید شده در اثر بمباران هستهٔ مواد توسط نترونها، بجای اندازه‌گیری میزان جذب نترونها می‌باشد. از سوی دیگر این روش به روش نترون ـ گاما هم شباهت دارد و تنها تفاوت در انرژی بیشتر نترونهای تولید شده است که در این روش حدود ۱۴ میلیون الکترون ولت است. به

1. Life Time
2. Plused Neutron-Gamma Logging

همین دلیل شعاع کاوش، حساسیت و توان جدایش[۱] قائم آن بیشتر از روش نترون ـ گاما است. برتری این روش نسبت به PNNL در تأثیر کمتر شرایط فیزیکی گمانه و گل حفاریست.

از این روش می‌توان در ارزیابی چاههای نفت و اکتشاف کانه‌ها استفاده نمود.

نمودار فعال‌سازی نترون[۲]

این نوع نمودارگیری از گمانه‌ها هنوز در مراحل آزمایش قرار دارد و کاربرد جهان مشمول پیدا نکرده است، اما در مواردی با موفقیت مورد استفاده قرار گرفته است. از این روش می‌توان برای شناسایی عناصر مس، منگنز، آلومینیوم، فلور، کلر و سدیم استفاده نمود. بنابر این در بررسی کانسارهای فلزی فوق کاربرد دارد. از میزان سدیم و کلر نیز می‌توان برای تشخیص مرز آب و نفت در مخازن هیدروکربوری استفاده نمود.

اساس این روش فعال نمودن برخی از هسته‌های مواد توسط بمباران آنها با پرتوهای نترون است. این بمباران باعث فعال شدن هستهٔ برخی از عناصر و ایجاد ایزوتوپهای جدید می‌باشد. دو زیر مجموعه از این روش وجود دارد یکی روش اندازه‌گیری نقطه‌ای[۳] دیگری روش اندازه‌گیری پیوسته که نتیجه آن به صورت یک نمودار پیوسته در ژرفاهای مختلف چاه است. در هر دو روش کل پرتو گامای تولید شده در اثر بمباران مواد با نترون اندازه‌گیری می‌شود و مواد مورد نظر بر اساس نیمه عمر ایزوتوپ‌های تولید شده با فعال‌سازی و یا با انتخاب یک پنجرهٔ طیفی مناسب در حدود طیف انرژی عنصر مورد نظر شناخته می‌شوند. در روش نقطه‌ای نقاط مورد نظر گزینش و اندازه‌گیری فقط در آن نقاط انجام می‌شود. بازهٔ سوند مربوط، حدود چند متر است و سوند مجهز به یک چشمه نترون‌زا و یک گیرنده است. ابتدا چشمه در ژرفای مورد نظر قرار داده می‌شود و برای مدتی بین ۰/۵ تا دو برابر نیمه عمر ایزوتوپهای موردنظر مواد پیرامون چاه توسط نترونها بمباران می‌شود. این عمل زمانی بین ۳ تا

1. Resolation 2. Neutron Activation 3. Point Measurment

چندین دقیقه و در مواردی چند ساعت طول می‌کشد. پس از زمان معین که زمان آرامش[1] نامیده می‌شود و براساس زمان نیمه عمر ایزوتوپهای مورد انتظار گزینش می‌شود، سوند به اندازهٔ بازهٔ سوند در گمانه حرکت داده می‌شود. تا گیرنده در نقطه بمباران شده قرار بگیرد و اندازه‌گیری انجام می‌شود. سوند روش اندازه‌گیری پیوسته شبیه به روش نقطه‌ای است. تفاوت مهم بازهٔ سوند است که در این روش حدود ۲ تا ۱/۵ متر می‌باشد. از این روش تنها برای شناسایی عناصری می‌توان استفاده نمود که نیمه عمر ایزوتوپهای آن حدود ۲ یا ۳ دقیقه باشد. برداشت در این روش از بالا به پایین انجام می‌شود و سرعت حرکت سوند از رابطه زیر بدست می‌آید(مارش ۱۹۸۶).

$V = ۰/۶۹۳L/T$

T : نیمه عمر ایزوتوپ عنصر مورد نظر

L : بازه سوند

شعاع کاوش سوند در این روش بین ۵ تا ۱۵ سانتیمتر است.

همانگونه که اشاره از روش نقطه‌ای می‌توان برای شناسایی عناصری مانند F,Na,Cl,Al,Ca,Mn,Cu استفاده نمود به عنوان مثال برای بررسی میزان Cu باید توجه داشت که در اثر بمباران هستهٔ Cu با نترون، ایزوتوپ Cu^{64} با انرژی حدود ۰/۵۱۱ میلیون الکترون ولت ایجاد می‌شود که نیمه عمر آن حدود ۱۲/۸ ساعت است. البته ایزوتوپ Cu^{66} نیز با انرژی ۱/۰۳۷ میلیون الکترون ولت با نیمه عمر ۵/۱ دقیقه نیز تولید می‌شود. برای بررسی Cu^{64} زمان بمباران توسط چشمهٔ نترون‌زا حدود ۳۰ تا ۶۰ دقیقه و زمان اندازه‌گیری حدود ۲۰ دقیقه است در صورتی که برای Cu^{66} این زمانها به ترتیب به ۱۰ تا ۱۵ دقیقه و ۱ تا ۱۵ دقیقه کاهش می‌یابد (مارش ۱۹۸۶).

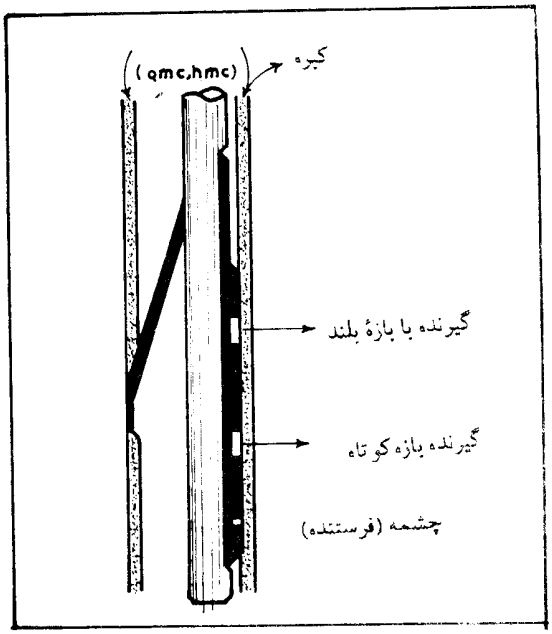
برای عناصری مانند F,Cl که نیمه عمر ایزوتوپهای آنها به ترتیب برابر ۲/۵ دقیقه و ۷/۴ ثانیه است می‌توان از روش اندازه‌گیری پیوسته استفاده نمود. سرعت حرکت سوند در گمانه به ترتیب

1. Cooling Time

برابر ۴۰ تا ۶۰ متر بر ساعت و ۴۰۰ تا ۵۰۰ متر بر ساعت است.

نمودار گاما- گاما[1]

در روش گاما - گاما، مانند روش نترون - گاما یک گیرنده و یک چشمهٔ پرتوگاما که به وسیلهٔ ضخامت کافی از سرب از هم دیگر جداسازی شده‌اند، درون سوند جاسازی شده است (شکل ۵-۸). از چشمه پرتوهای الکترومغناطیسی گاما به بیرون گسیل می‌شود. سازوکار برخورد این پرتوها با هستهٔ مواد بستگی به انرژی آنها داشته و همانگونه که قبلاً اشاره شد می‌تواند پدیده‌هایی مانند فتوالکتریک، اثر کامپتون و زوج الکترون - پزیترون را تولید کند.



شکل (۵-۸) سوند روش گاما- گاما جرم مخصوص با دو گیرندهٔ دور و نزدیک

1. Gamma-Gamma Log

انرژی پرتوهای گسیل شده از چشمه قابل کنترل است و معمولاً در حدی است که ابتدا برخورد تحت فرآیند کامپتون انجام می‌شود. به هر ترتیب در اثر هر برخورد پرتوهای گاما بخشی از انرژی خود را از دست می‌دهند. و برخی از آنها کاملاً انرژی خود را از دست داده (پدیده فتوالکتریک) و در اثر آخرین برخورد آنها پرتو جدیدی حاصل نمی‌شود. اما برخی دیگر (در اثر برخورد کمتر) انرژی خود را کاملاً از دست نمی‌دهند و به گیرنده می‌رسند.

میزان جذب پرتوهای گاما به وسیلهٔ گیرنده، بستگی به تراکم مواد بین گیرنده و فرستنده یعنی سازند زمین‌شناسی و سیال دارد. هر چه تراکم بیشتر باشد، پرتوهای گاما، زودتر انرژی خود را از دست داده و کمتر به گیرنده می‌رسند و در تراکم کمتر این پرتوها سریع‌تر و بیشتر به گیرنده می‌رسند. بنابر این از این روش می‌توان برای برآورد جرم مخصوص و تخلخل استفاده نمود. باید توجه داشت که اگر نمودار میزان پرتوهای گاما را نشان دهد، گاما- گاما نامیده می‌شود و اگر میزان پرتوهای دریافتی پردازش و بر اساس آن جرم مخصوص محاسبه شود، نمودار جرم مخصوص رسم خواهد شد و گاما - گاما جرم مخصوص [۱] نامیده می‌شود. باید توجه نمود که جهت تغییرات این دو نمودار خلاف یکدیگر است. چون هر چه جرم مخصوص بیشتر باشد تراکم الکترونها نیز بیشتر است و جذب پرتوها (به وسیلهٔ الکترونها) نیز بیشتر و میزان پرتوهای رسیده به دستگاه کمتر خواهد بود.

از سوی دیگر می‌دانیم که ارتباط جرم مخصوص با چگالی الکترونی [۲] به صورت زیر است.

$$\rho = \rho_e A/2Z$$

A جرم اتمی

Z عدد اتمی

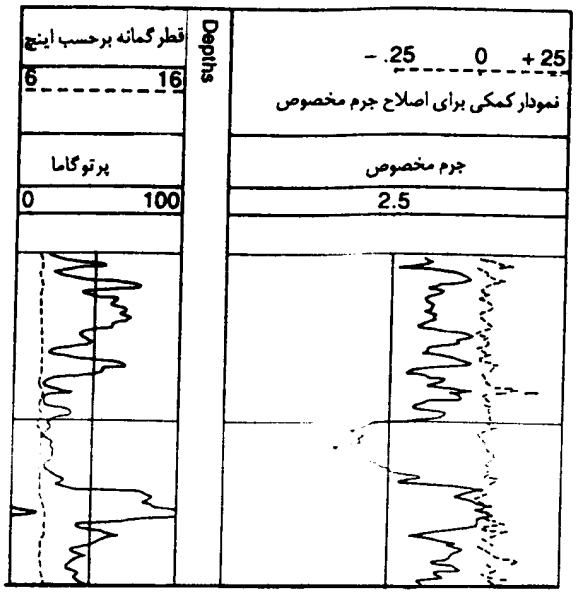
ρ_e چگالی الکترونی

برای اکثر مواد جرم اتمی دو برابر عدد اتمی است لذا از نظر بزرگی می‌تواند نوشت:

$$\rho = \rho_e$$

1. Gamma-Gamma Density Log (γ-γ-D.L)
2. Electron Densiy

به عبارت دیگر جرم مخصوص بستگی مستقیم به جرم مخصوص الکترونی و یا تعداد الکترونها در واحد حجم دارد. لذا با توجه به جذب پرتوهای گاما به وسیلهٔ الکترونهای سازند می‌توان جرم مخصوص آنها را برآورد نمود. نمونهٔ از نمودار جرم مخصوص در شکل ۵-۹ ارائه شده است. قطر گمانه، وزن مخصوص گل حفاری و شعاع ناحیهٔ تراویده روی اندازه‌گیریهای جرم مخصوص اثر می‌گذارد. لذا معمولاً نمودار حاصل نیاز به اصلاح دارد. این اصلاح به صورت خودکار و یا به وسیلهٔ یک نمودار کمکی انجام می‌شود (شکل ۵-۹).



شکل (۵-۹) نمونهٔ نمودار جرم مخصوص همراه نمودار پرتو گاما و قطرسنجی [۶]

برای برآورد تخلخل از نمودار گاما - گاما از رابطهٔ

$$\varphi = \frac{\rho_m - \rho_l}{\rho_m - \rho_f}$$

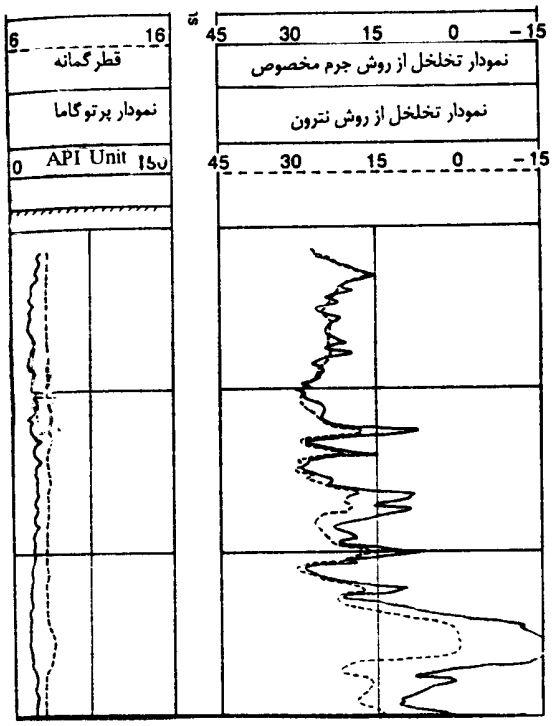
استفاده می‌شود. (در مورد این رابطه در بخش‌های بعد گفتگو خواهد شد)

ρ_m جرم مخصوص بخش جامد سنگ

ρ_l جرم مخصوص اندازه‌گیری شده(نمودار)

ρ_f جرم مخصوص سیال (آب سازند)

نمونهٔ از نمودار تخلخل حاصل از روش جرم مخصوص و تخلخل حاصل از روش نترون در شکل ۵-۱۰ ارائه شده است.



شکل (۵- ۱۰) نمونه‌ای از نمودارهای تخلخل ρ_bجرم مخصوص، پرتوگاما و قطرسنجی[۲]

با توجه به اهمیت زیاد جرم مخصوص و تخلخل در شناسایی جنس لایه‌ها، ترکیب سنگ‌شناسی آنها و ارزیابی نفت خوان‌ها و آبخوانها، نمودار گاما-گاما کاربرد گسترده‌ای یافته است.

پرسش و تمرین

۱- با توجه به شکل ۵-۲، در مورد ارتباط ثابت زمانی و سرعت سوند در گمانه و تاثیر آنها روی اندازه‌گیریها بحث کنید.

۲- بفرض اینکه نمودارهای شکل ۵-۳ از یک کانسار رادیواکتیوتیه بدست آمده باشد آیا بی‌هنجاری در این نمودارها وجود دارد؟

۳- با توجه به شکل ۵-۴، در مورد نمودارهای N-γ و GR بحث کنید آیا با داشتن اطلاعات N-γ می‌توان گفت نیازی به اطلاعات GR نداریم؟

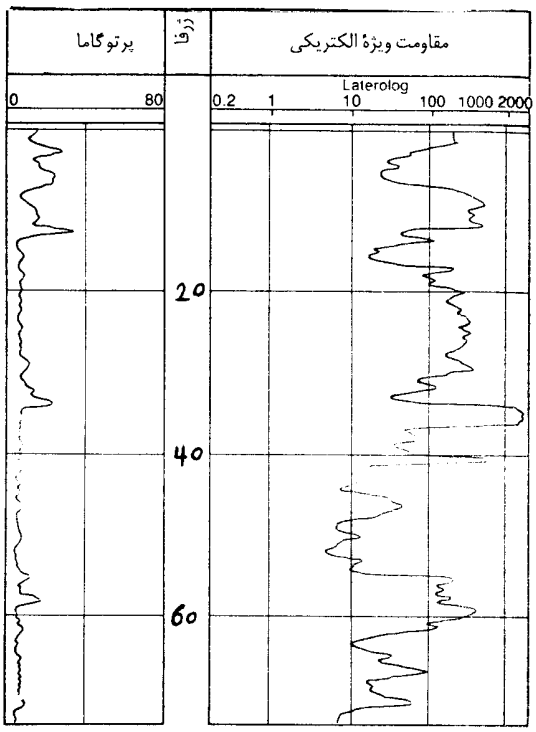
۴- نمودارهای شکل ۵-۵ را تفسیر کنید در مورد برتریها و کاستیهای هریک بحث کنید.

۵- اگر در محدوده‌ای از چاه که درون دولومیت است تخلخل بدست آمده از روش CNL برابر ٪۲۰ باشد، تخلخل واقعی چقدر است؟

۶- اگر تخلخل در نقطه‌ای از چاه درون سازند آهکی به وسیلهٔ روش SNP برابر ٪۱۵ باشد، تخلخل بدست آمده در همان نقطه به وسیلهٔ روش CNL چقدر است؟

۷- نمودارهای شکل ۵-۹ را تفسیر کنید.

۸- نمودارهای زیر را تفسیر کنید.



شکل (۵-۱۱)

۹- نمودارهای ارائه شده در شکل ۵-۱۰ را تفسیر نموده، چنانچه این نمودارها از سازندهای رسوبی برداشت شده باشد جنس سازندها را تخمین بزنید.

۱۰- در مورد تاثیر فشار و درجهٔ حرارت روی جرم مخصوص بحث کنید.

۱۱- تفاوت روشهای تپ نترون و فعال سازی نترون را بیان کنید.

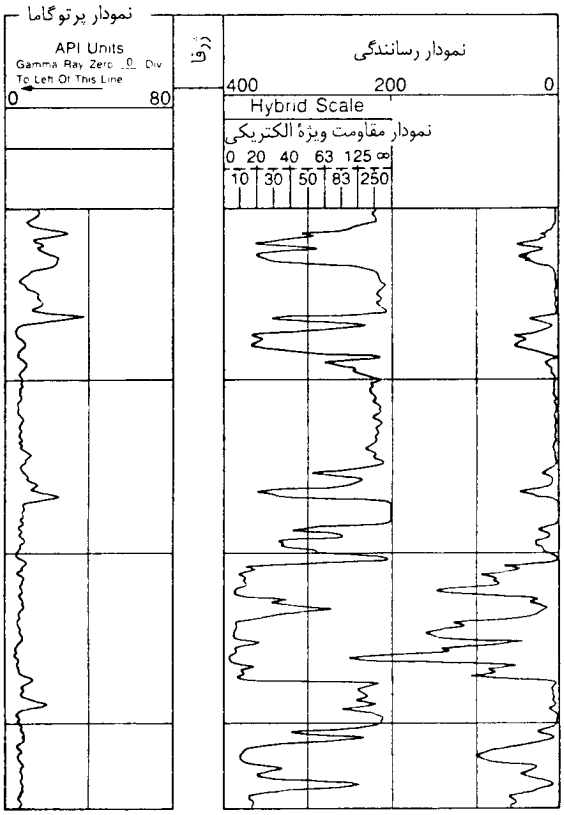
۱۲- کاربرد روش فعال سازی نترون را بیان کنید.

۱۳- کاربرد روش جرم مخصوص را در کانسارهای ذغال سنگ بنویسید.

۱۳- کاربرد روش جرم مخصوص را در کانسارهای ذغال سنگ بنویسید.

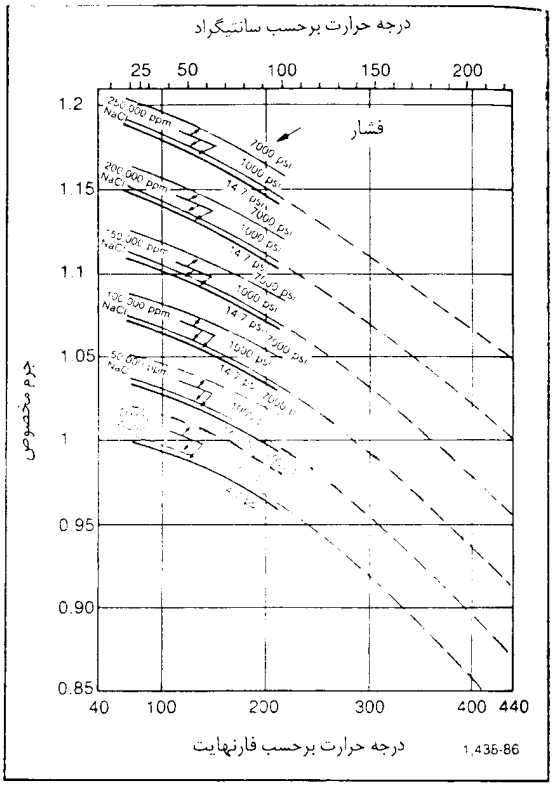
۱۴- کدام یک از روشهای هسته‌ای در اکتشاف لایه‌های ذغال سنگ کاربرد دارند.

۱۵- نمودارهای زیر را تفسیر کنید.



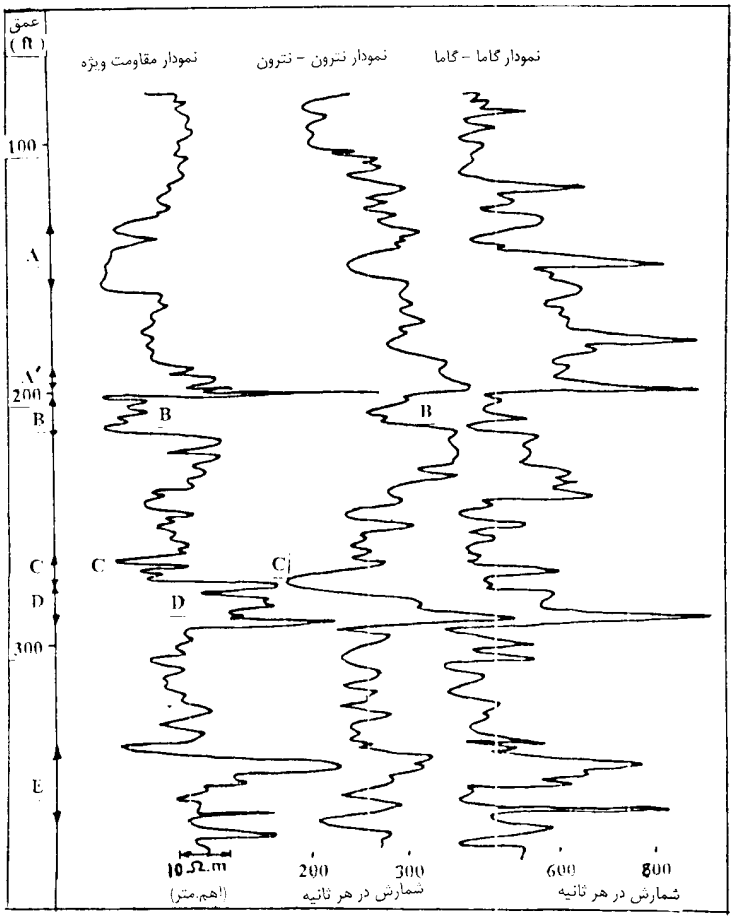
شکل (۵-۱۲)

۱۶- شکل (۵-۱۳) ارتباط بین درجهٔ حرارت، میزان نمکهای آب و جرم مخصوص آب را نشان می‌دهد. اگر جرم مخصوص آب شوری در فشار ۱۰۰۰PSI و دمای ۱۰۰°F برابر ۱/۱۵ گرم بر سانتیمتر مکعب باشد جرم مخصوص این محلول در فشار ۷۰۰۰ PSI و درجه حرارت ۲۵°C چقدر است.



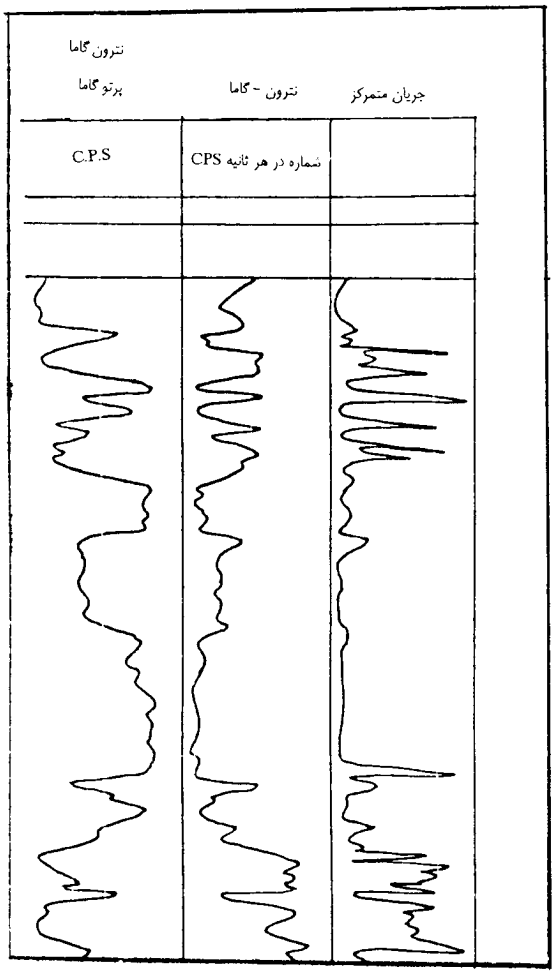
شکل (۵-۱۳)

۱۷- نمودارهای ارائه شده در شکل ۵-۱۴ از یک آبخوان تهیه شده‌اند، سطح آب، همبری لایه‌ها و لایه‌های آبده را مشخص نمایید. علت تغییرات شدید در نقاط A و B و C را بیان کنید.



شکل (۵-۱۴)

۱۸- نمودارهای ارائه شده در شکل ۵-۱۵ را تفسیر کنید.



شکل (۵-۱۵) نمودارهای حاصل از یک چاه آب

۶

روشهای صوتی[1]

سازندها و پیکره‌های زمین‌شناسی[2] از سنگهای گوناگون تشکیل شده‌اند. ترکیب کانی‌شناسی و ساختمان هسته‌ای متفاوت عناصر تشکیل دهندهٔ سنگها و ساخت و بافت آنها با یکدیگر یکسان نیست. از سوی دیگر میزان تخلخل، اشباع از آب، نوع و میزان نمکهای آب سازند و... نیز در سنگها متفاوت است. سرعت امواج در سنگها پیرو ویژگیهای یاد شده است بنابراین از سنگی به سنگ دیگر می‌تواند تغییر کند. در روشهای لرزه‌ای و صوتی از اختلاف سرعت امواج برای تمایز، جدایش و شناسایی سنگها استفاده می‌شود.

اگر ترکیب کانی‌شناسی سنگ ثابت باشد سرعت امواج به شدت پیرو ساخت و بافت سنگ بویژه تخلخل و میزان خردشدگی آن می‌باشد. بنابر این از روش‌های صوتی می‌توان برای برآورد تخلخل، درجهٔ خردشدگی و مدولهای الاستیکی سنگها استفاده نمود. از سوی دیگر ترکیب این نمودار با نمودارهای دیگر مانند نمودارهای هسته‌ای، مقاومت ویژهٔ الکتریکی و SP می‌تواند به شناسایی نوع سنگ نیز کمک نماید. پیش از گفتگو در مورد ابزار صوتی به انواع امواج مروری گذرا می‌شود.

1. Sonic Methods 2. Geological Bodies

انواع امواج

در حالت کلی امواج را می‌توان به دو گروه امواج پیکری و امواج سطحی تقسیم نمود. هر یک از این گروهها نیز بسته به ساز و کار ارتعاش و انتشار، پیوند میان راستای انتشار و جهت ارتعاش می‌توانند به گروههای دیگری تقسیم شوند.

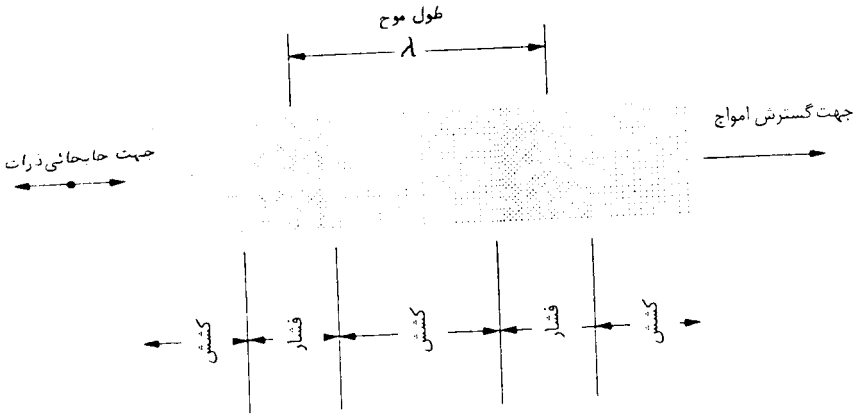
امواج پیکری[۱]

این گونه امواج در تمام پیکرهٔ مواد، و در تمام جهت‌ها پخش می‌شوند. به عنوان نمونه وقتیکه تمرکز تنش در پوستهٔ زمین از تاب برشی سنگها و یا تاب برشی سطح گسله‌ها فراتر می‌رود، یک شکست ناگهانی در پوسته ایجاد می‌شود (معمولاً سطح شکست بر سطح شکستگیهای پیشین یعنی گسله‌ها منطبق است). و سبب گسترش امواج پیکری در زمین می‌شود. امواج پیکری خود به دو گروه امواج فشاری و امواج برشی قابل تقسیم هستند.

امواج فشاری[۲]

امواج فشاری که امواج طولی[۳] و نخستین[۴] نیز نامیده می‌شوند. امواجی هستند که ساز و کار جنبش ذره‌ها در آنها به صورت فشاری و کششی است. یعنی در مسیرگذر خود مواد را در راستای گسترش[۵] خود فشرده و سپس در آنها کشش ایجاد می‌نمایند و یا ابتدا در آنها کشش و سپس فشار ایجاد می‌کنند. این گروه از امواج از آنجا که راستای گسترش و ارتعاش آنها بر هم منطبق است (شکل ۶-۱)، به عبارت دیگر ارتعاش در طول گسترش امواج است، امواج طولی نیز نامیده می‌شوند. از سوی دیگر به علت اینکه آنها نخستین گروهی هستند که به دستگاههای لرزه‌نگار می‌رسند به نام امواج نخستین (اولیه) نیز شناخته می‌شوند سرعت این امواج از امواج دیگر بیشتر است.

1. Body Waves
2. Comperssional Wares
3. Longitudinal
4. Primary
5. Propagation



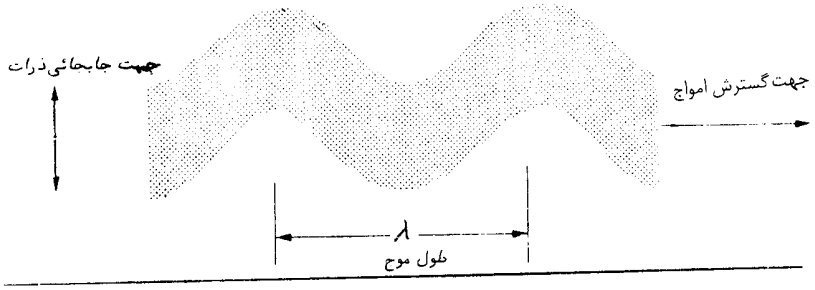
شکل (۶-۱) چگونگی گسترش امواج فشاری

امواج برشی[۱]

این گروه از امواج ساز و کار برشی دارند و به موادی که در گذرگاه آنها قرار می‌گیرند تنش برشی وارد می‌کنند. راستای ارتعاش ذرات و به عبارت دیگر راستای تنش برشی وارده به ذرات بر راستای گسترش امواج برشی عمود است. بنابر این تنجیدگی [۲] تنها در راستاهای عمود بر راستای گسترش پدید می‌آید (شکل ۶-۲). به همین علت آنها امواج عرضی [۳] نیز نامیده می‌شوند. از سوی دیگر این امواج، دومین گروه امواجی هستند که به لرزه‌نگارها می‌رسد از این رو به آنها امواج ثانویه[۴] هم گفته می‌شود. موادی که دارای تاب برشی نباشند نمی‌توانند امواج برشی را انتقال دهند. بنابر این، امواج برشی در سیالها و گازها گسترش نمی‌یابند. در چاه‌پیمایی منبع تولید کننده موج، موج برشی

1. Shear waves 2. Strain 3. Lalitudinal
4. Secondary

تولید نمی‌کند بلکه در اثر برخورد امواج فشاری با ناپیوستگیهای سرعتی مانند دیواره چاه و گل حفاری این امواج تولید می‌شوند.



شکل (۶-۲) نحوه گسترش امواج برشی

امواج سطحی [1]

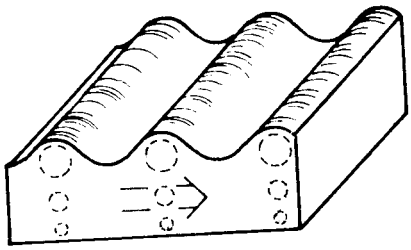
افزون برگروه امواج پیگیری گروه دیگری از امواج که بیشتر در زلزله‌شناسی مطرح هستند نیز وجود دارند که امواج سطحی نامیده می‌شوند. امواج سطحی در اثر بازتاب چندین بارهٔ امواج پیکری در لایه‌های سطحی زمین ایجاد می‌شوند و دامنهٔ آنها در ژرفا کاهش می‌یابد. بگونه‌ای که در ژرفای چندین کیلومتری محو می‌شوند. گروه امواج سطحی سبب ویرانیهای ناشی از زمینلرزه هستند. این امواج به امواج ریلی و لاو گروه‌بندی می‌شوند.

امواج ریلی [2]

این امواج سبب جنبش ذرات پیرامون یک بیضوی که در یک سطح شیب‌دار در نظر گرفته شود(مانند حرکت ماری که به صورت یک حلقه بدور خود پیچیده و بر روی یک سطح شیبدار قرار

1. Surface Waves 2. Rayleigh Waves

گرفته باشد)می‌شوند. امواج ریلی هم مولفهٔ موازی و هم مولفهٔ عمود بر مسیر گسترش دارند(شکل ۶-۳) و به دلیل پیچیدگی در ساز و کار جنبش و گسترش آنها و تنشهای پیچشی و برشی که به مواد گذرگاه خود وارد می‌کنند مسبب اصلی ویرانیها در زمینلرزه‌ها هستند. سرعت امواج ریلی حدود ۰/۹ سرعت امواج برشی است و به علت اینکه تاب برشی و پیچشی سیالها و گازها نزدیک به صفر است، در آنها گسترش نمی‌یابند.

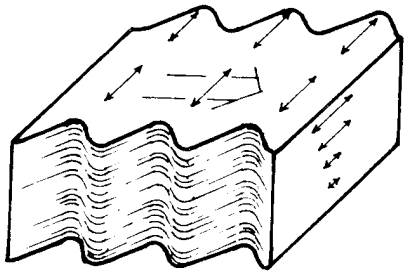


شکل (۶-۳) نحوهٔ گسترش امواج ریلی

در برداشتهای چاه‌پیمایی امواج ریلی در اثر برخورد امواج فشاری با دیوارهٔ چاه و بازتاب چندگانهٔ آنها در این دیواره ایجاد می‌شوند. در واقع قشر نازک دیوارهٔ چاه که در اثر حفاری خرد شده (حتی به صورت ترکهای کوچک) نقش قشر سطحی زمین که سرعت امواج در آن کم است را ایفا می‌کند. بنابر این امواج ریلی در سطح جدایش گل حفاری و دیوارهٔ چاه که یک ناپیوستگی مهم سرعتی است ایجاد و در درازنای دیواره گسترش می‌یابند و همانگونه که در هنگام زمینلرزه دامنهٔ این امواج با افزایش ژرفا بسرعت کاهش می‌یابد. دامنه آنها در سازند با فاصله گرفتن از دیوارهٔ چاه بسرعت کاهش یافته و موج میرا می‌شود. در چاه‌پیمایی عملاً از این گونه امواج استفاده نمی‌شود.

امواج لاو[۱]

گروه دیگری از امواج سطحی امواج لاو نامیده می‌شوند. این امواج هم مانند امواج ریلی نام خود را از کسی که نخستین بار آنها را روی لرزه‌نگاشتها شناسایی کرد گرفته‌اند. ساز و کار جنبش و گسترش این امواج با ساز و کار امواج برشی همسانی بسیار دارد.



شکل (۶-۴) نحوهٔ گسترش امواج لاو

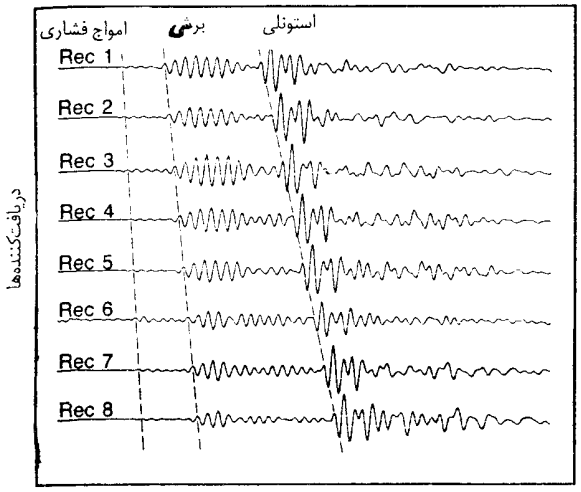
راستای جنبش ذرات عمود بر راستای گسترش امواج و موازی سطح ناپیوستگی سرعتی است (شکل ۶ ۴). چون سطح ناپیوستگی در هنگام روی دادن زمینلرزه‌ها سطح زمین است لذا می‌توان گفت که در این مورد، جنبش ذرات فقط دارای مولفهٔ افقی است. در چادپیمایی این امواج مانند امواج ریلی در دیوارهٔ چاه ایجاد می‌شوند و جهت جنبش ذرات موازی سطح ناپیوستگی سرعتی یعنی دیواره چاه است. سرعت امواج لاو اندکی از امواج ریلی بیشتر است و کاربرد چندانی در چادپیمایی ندارند.

امواج استونلی[۲]

در اثر برخورد امواج گسیل شده از چشمهٔ موج (فرستنده) با دیوارهٔ چاه افزون بر امواج ریلی و لاو که در دیوارهٔ چاه تولید و گسترش می‌یابند، گروه دیگری از امواج پدید می‌آیند که در گل حفاری گسترش می‌یابند. سرعت این امواج بستگی به بسامد[۳] آنها، قطر گمانهٔ حفاری، سرعت امواج

1. Love waves 2. Stonely 3. Frequency

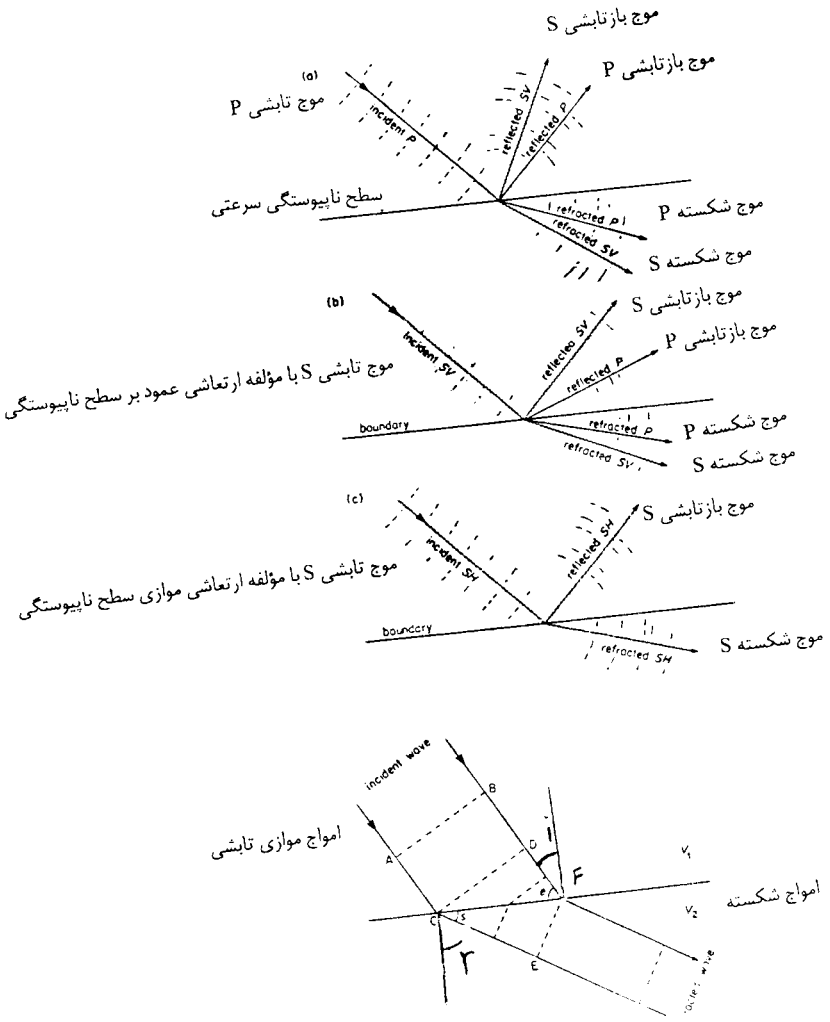
فشاری در گل حفاری و ویژگیهای سطح ناپیوستگی سرعتی که سبب پدید آمدن آن می‌شود یعنی دیواره چاه دارد. این ویژگیها که روی سرعت امواج استونلی موثرند عبارتند از سرعت امواج برشی در دیواره (سازند)، جرم مخصوص سازند و سرعت امواج فشاری در سیال سازند. بهر ترتیب سرعت امواج استونلی از سرعت امواج فشاری در گل حفاری کمتر است و معمولاً سومین گروه امواج هستند که به گیرنده‌ها می‌رسند (شکل ۶-۵).



شکل (۶-۵)نمونه‌ای از شکل امواج فشاری، برشی و استونلی نگاشته شده به‌وسیلهٔ دستگاه آرایه صوتی [۲]

ناپیوستگی‌های سرعتی و تبدیل امواج

تا زمانی که ویژگیهای الاستیکی مواد ثابت باشد سرعت موج هم ثابت است، اما با تغییر ویژگیهای الاستیکی سرعت هم تغییر می‌کند. مرز بین دو محیط که سرعت امواج در آنها متفاوت است، ناپیوسنگی سرعتی نامیده می‌شود. امواج در هنگام برخورد با ناپیوستگی‌های سرعتی بسته به زاویه تابشی که دارند مسیرهای گوناگونی را ممکن است طی کنند شکل (۶-۶).



شکل (۶-۶) گسترش و تبدیل امواج پس از برخورد به سطح ناپیوستگی سرعتی

رابطهٔ :

$$\frac{\text{Sini}}{\text{Sinr}} = \frac{V_1}{V_2}$$

بین زاویهٔ تابش i، زاویه شکست r و سرعتهای V_1 و V_2 در دو طرف سطح ناپیوستگی برقرار است. گروهی از امواج که زاویه شکست آنها کم است بعد از برخورد به ناپیوستگی سرعتی تغییر مسیر داده و تحت زاویه r در محیط دوم با سرعت V_2 گسترش می‌یابند. اگر زاویه تابش افزایش یابد زاویهٔ r از ۹۰ درجه بیشتر شده و در واقع موج وارد محیط دوم نمی‌شود و تنها در محیط اول باز تابیده می‌شود.

در اثر برخورد امواج با سطح ناپیوستگی افزون بر تغییر مسیر، گروه‌های جدیدی از امواج تولید می‌شود به عنوان مثال وقتی که امواج فشاری با زاویه تابش نسبتاً زیاد به یک سطح نـاپیوستگی برخورد می‌کنند. تنش ناشی از برخورد دارای مولفهٔ موازی سطح و عمود برآن است. مولفهٔ مـوازی باعث ایجاد امواج برشی می‌شود. مسیر این امواج بستگی به زاویه تابش دارد. به دلیل مشابه در اثر برخورد امواج برشی با یک ناپیوستگی سرعتی افزون بر امواج برشی باز شکسته و بازتابیده گـروه جدیدی از امواج فشاری نیز ایجاد می‌شود. این فرآیند باعث می‌شود تا بتوان امواج برشی را نیز در برداشتهای چاه‌پیمایی مورد استفاده قرار داد.

امواج مورد استفاده در چاه‌پیمایی

چشمه‌های تولید موج [۱] تنها امواج فشاری را تولید و بطرف سازند گسیل می‌کنند. امواج برشی به وسیلهٔ چشمه بطور مستقیم تولید نمی‌شوند. حتی اگر هم تولید می‌شدند چون نمی‌توانند از گل حفاری گذر کنند قابل استفاده نبودند. امواج فشاری در اثر تپ‌های [۲] گسیل شده از چشمه ایجاد و وارد گل حفاری می‌شوند. در اثر برخورد این امواج با دیواره چاه که یک ناپیوستگی سرعتی است هر

1. Trasmeters 2. Pulses

دسته از پرتوهای موج بسته به زاویهٔ تابشی که دارند مسیرهای گوناگونی را سپری خواهند کرد. برخی شکسته شده و وارد سازند می‌شوند و در آن گسترش می‌یابند، گروهی که تحت زاویهٔ حد تابیده شده‌اند تحت زاویهٔ ۹۰ درجه شکسته شده و مسیر بین فرستنده و گیرنده را طی نموده و دوباره شکسته شده و وارد گل می‌شوند و از آنجا به گیرنده می‌رسند. این گروه نخستین گروه امواجی هستند که به گیرنده می‌رسند.

در اثر برخورد امواج فشاری با دیواره همانگونه که گفته شد گروه جدیدی از امواج ایجاد می‌شوند که مهمترین آنها امواج برشی هستند. امواج برشی ایجاد شده مسیر بین چشمه و گیرنده را در دیوارهٔ چاه سپری کرده و در نزدیکی گیرنده دوباره شکسته شده و وارد گل می‌شوند و از بین می‌روند. اما بخشی از آنها در اثر برخورد با دیوارهٔ چاه باعث بوجود آمدن گروه جدیدی از امواج فشاری می‌شوند که می‌توانند در گل حفاری گسترش یافته و به گیرنده برسند. به عبارت ساده‌تر آنچه با عنوان موج برشی نگاشته می‌شود، مسیر بین چشمه و دیواره را در گل حفاری به صورت امواج فشاری، مسیر بین چشمه و گیرنده را در سازند به صورت امواج برشی و مسیر بین دیواره و گیرنده را هم به صورت امواج فشاری سپری می‌کند. اگر دو گیرنده داشته باشیم با توجه به اینکه اختلاف زمان دریافت موج بین دو گیرنده مطرح است و این اختلاف زمان فقط مربوط به مسیر سپری شده در سازند، یعنی به صورت برشی بوده است سرعت موج برشی در سازند قابل محاسبه است.

از سوی دیگر همانگونه که گفته شد دیواره چاه در اثر برخورد امواج پیکری با آن، نقش سطح زمین را در اثر برخورد این امواج در هنگام زمینلرزه ایفا می‌کند. بنابر این سبب پدید آمدن گروه امواج ریلی و لاو می‌شود. یعنی در اثر بازتابش چندگانهٔ امواج فشاری و برشی در دیوارهٔ چاه که تاحدی خرد شده (در اثر حفاری ترکهای هر چند ریز در دیوارهٔ چاه ایجاد می‌شود و نسبت به سازند دست نخورده دیواره یک زون کم سرعت محسوب می‌شود) این امواج ایجاد می‌شوند. که با توجه به اینکه در یک

زون کم سرعت‌تر گسترش می‌یابد و سرعت آنها نسبت به امواج پیکری کم‌تر است در چاه‌پیمایی اهمیت چندانی ندارند.

افزون بر گروه‌های امواج یاد شده گروه دیگری که امواج استونلی نامیده می‌شوند در اثر بازتاب امواج فشاری از دیواره به گل حفاری و بازگشت امواج برشی از دیواره در گل حفاری گسترش می‌یابند. این گروه از امواج که دارای سرعت کمتر از امواج دیگر هستند از گل حفاری گذر کرده و مستقیماً به گیرنده می‌رسند.

ابزار صوتی

همانگونه که بیان شد در روشهای صوتی سرعت امواج در سازند اندازه‌گیری و بر اساس آن اطلاعاتی در مورد ساخت،بافت، تخلخل و ترکیب کانی‌شناسی سنگها بدست می‌آید. برای اندازه‌گیری سرعت، دست کم به یک فرستنده و یک گیرندهٔ امواج نیاز است. بنابر این ساده‌ترین سوندهای صوتی شامل یک فرستنده و یک گیرنده هستند که در فاصلهٔ معینی درون سوند جاسازی شده‌اند. در این حالت فرستنده تپ‌های صوتی را ایجاد می‌کند و این تپ‌ها نخست باعث ایجاد امواج فشاری در گل شده و همانگونه که گفته شد در اثر برخورد این امواج با دیوارهٔ چاه گروه‌های دیگر امواج تولید می‌شوند موج ایجاد شده مسیر گل تا دیواره را سپری کرده وارد سازند می‌شود و فاصلهٔ بین فرستنده و گیرنده را در سازند سپری کرده، دوباره باز شکسته شده و از مسیر گل به گیرنده می‌رسد.

با توجه به گذرگاه موج و زمانی که طول می‌کشد تا موج این مسیر را طی کند می‌توان سرعت امواج را محاسبه نمود. بازهٔ سوند در روش صوتی برابر فاصلهٔ بین فرستنده و گیرنده است.

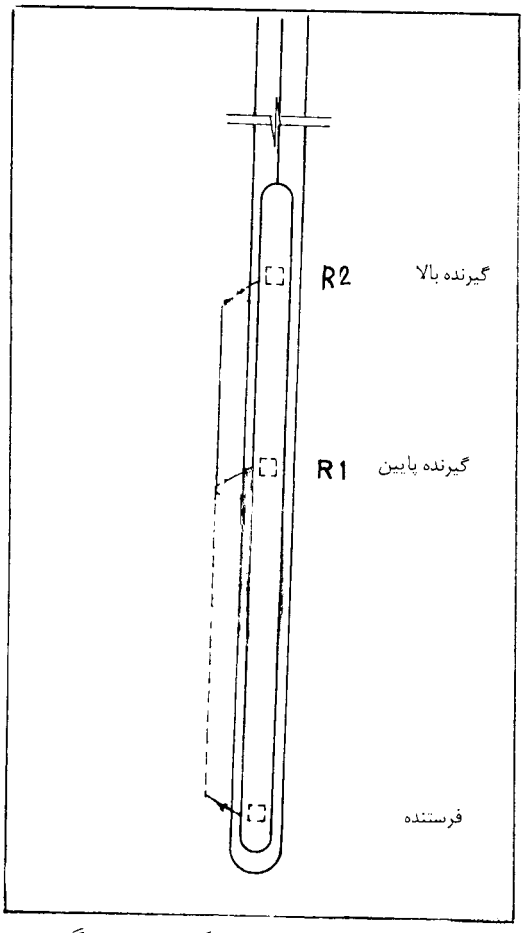
روشن است که چون بخشی از مسیر در گل حفاری است. شرایط فیزیکی گل و قطر گمانه

نقش بسزایی روی اندازه‌گیری‌ها خواهد داشت. گرچه با استفاده از نمودار قطرسنجی [۱] می‌توان اثر گل را محاسبه و از اندازه‌گیریها حذف نمود، ولی بهرحال خطای اینگونه برداشتها زیاد است. بنابر این برای برآوردهای کمی به ویژه در پیمایش چاه‌های نفت امروزه از سوندهای دارای یک گیرنده و یک فرستنده استفاده نمی‌شود. ابزار جدید صوتی که کاربرد گسترده‌ای در پیمایش چاههای نفت و گاز دارند، سه گروه BHC[۲], LSS[۳] و آرایه‌های صوتی هستند. افزون بر این دستگاهها هنوز از سوندهای مجهز به یک فرستنده و دو گیرنده و دو فرستنده و دو گیرنده نیز استفاده می‌شود.

سوندهای با یک فرستنده و دو گیرنده

در این سوندها یک گیرنده در قسمت پایین سوند و دو فرستنده در قسمت بالای سوند جاسازی شده است (شکل ۶-۷). امواج گسیل شده از فرستنده مسیر بین فرستنده و دیوارهٔ چاه را از درون گل و مسیر بین فرستنده تا گیرنده‌ها را از درون سازند سپری کرده و دوباره از سازند باز شکسته شده و به گیرنده‌ها می‌رسند. در این روش اختلاف زمانهای دریافت موج به وسیلهٔ گیرنده‌ها اندازه‌گیری می‌شود. مطابق شکل مشخص است که این اختلاف زمان مربوط به سپری کردن فاصلهٔ بین دو گیرنده در سازند است. بنابراین با تقسیم فاصلهٔ دو گیرنده بر اختلاف زمان بدست آمده، سرعت موج محاسبه می‌شود. تاثیر گل حفاری چنانچه قطر چاه در فاصلهٔ بین دو گیرنده ثابت باشد، از اندازه‌گیری‌ها حذف می‌شود. اما چنانچه قطرچاه در فاصله بین دو گیرنده تغییر کند باز در اندازه‌گیریها خطا بوجود می‌آید در چنین شرایطی استفاده از نمودار قطرسنجی می‌تواند بسیار مفید واقع شود.

1. Caliper
2. Borehole Compensated Tool
3. Long Spasing Sonic Tool



شکل (٦-٧) سوند صوتی مجهز به یک فرستنده و دوگیرنده

سوندهای مجهز به دو فرستنده و دوگیرنده

دوگیرنده در فاصلهٔ ۳ فوت در وسط سوند و فرستنده‌ها در فاصله‌ای برابر ۵ فوت از گیرنده‌ها

در ابتدا و انتهای سوند جاسازی شده‌اند (شکل ۶-۸). برداشت نمودار معمولاً از ته چاه شروع می‌شود

ابتدا فرستندهٔ بالایی امواج را گسیل می‌کند و گیرنده‌ها آنها را دریافت می‌کنند اختلاف زمان‌های دریافت در حافظه نگهداری می‌شود. بعد فرستندهٔ پایین شروع بکار نموده و امواجی را گسیل می‌کند باز هم گیرنده‌ها امواج را دریافت و اختلاف زمان در حافظه نگهداری می‌شود. در لحظه‌ای که سوند به اندازهٔ $a=dtgi$ بطرف بالا حرکت کرد، اختلاف زمان بدست آمده برای فرستندهٔ پایینی (ΔT_d) با نخستین اختلاف بدست آمده از موج گسیل شده به وسیلهٔ فرستنده بالایی (ΔT_u) مربوط به یک فاصله می‌شود.

برای بدست آوردن زمان گذر موج از دو اختلاف زمانی بدست آمده میانگین گرفته می‌شود.

$$\Delta T = \frac{\Delta T_d + \Delta T_u}{2}$$

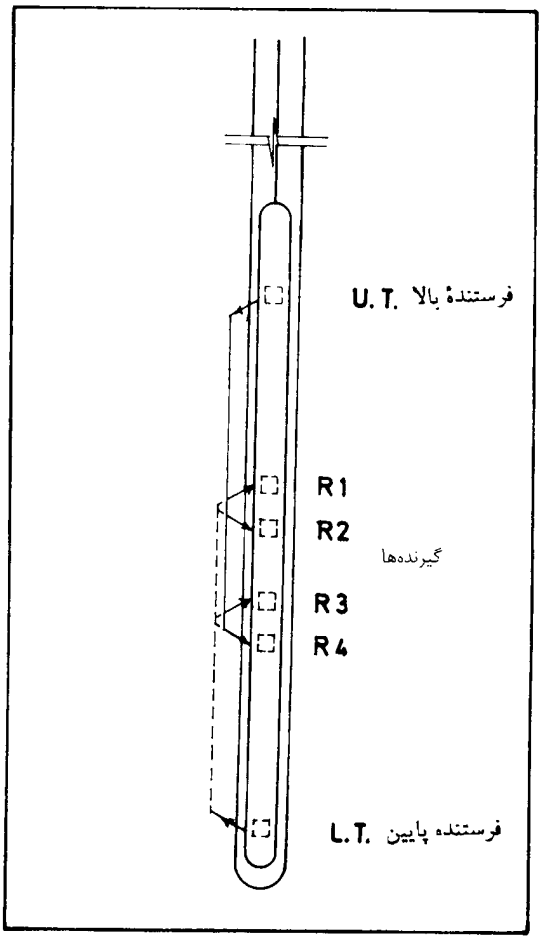
با توجه به زمان بدست آمده و فاصلهٔ بین دو گیرنده سرعت موج محاسبه می‌شود

در رابطهٔ $a=dtgi$

d برابر شعاع چاه است و i برابر است با

$$i = \text{ArcSin} = \frac{V_m}{V_t}$$

V_m سرعت امواج در کل حفاری و V_t سرعت امواج در سازند است.



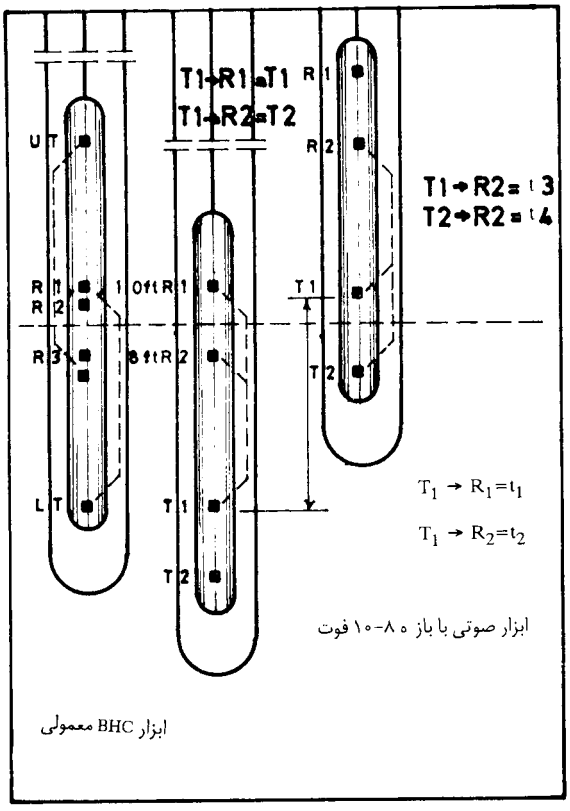
شکل (۶-۸) سوند صوتی مجهز به دو فرستنده و دو گیرنده

ابزار صوتی BHC[1]

سوند صوتی BHC دارای دو فرستنده و چهار گیرنده است که مطابق شکل (۶-۹). درون

1. Borehole Compansated Sonic Tool

سوند جاسازی شده‌اند در واقع به ازاء هر فرستنده یک جفت گیرنده وجود دارد. اگر فرستندهٔ بالایی را فرستندهٔ اول و گیرنده‌ها را به ترتیب از بالا به پایین گیرنده‌های اول، دوم، سوم و چهارم و فرستندهٔ پایین را فرستندهٔ دوم بنامیم، نخست امواج گسیل شده به وسیلهٔ فرستندهٔ بالایی، به وسیلهٔ گیرنده‌های دوم و چهارم دریافت می‌شوند (t_{R4} ، t_{R2}) و اختلاف زمانهای دریافت محاسبه می‌شود. بلافاصله فرستندهٔ دوم شروع به کار نموده و امواج گسیل شده از سوی آن به وسیلهٔ گیرنده‌های اول و سوم دریافت و اختلاف زمان (t_{R1} ، t_{R3}) محاسبه می‌شود.



شکل (۶-۹) ابزار صوتی BHC و ابزار صوتی با بازهٔ بلند

چون سرعت حرکت سوند نسبت به سرعت امواج و زمان اندازه‌گیری قابل چشم‌پوشی است، همانگونه که از شکل پیداست هر دو اختلاف زمان مربوط به گذرگاه بین وسط هر یک از جفت گیرنده‌ها (فاصله وسط گیرنده‌های سوم و چهارم تا وسط گیرندهای اول و دوم) در سازند است. با میانگین‌گیری از اختلاف زمانهای بدست آمده زمان گذر موج از فاصلهٔ مورد نظر بدست می‌آید.

$$\Delta T=\frac{(t_{R4}-t_{R2})+(t_{R1}-t_{R3})}{2}$$

حال با در دست داشتن فاصلهٔ هر یک از جفت گیرنده‌ها می‌توان سرعت موج را برآورد نمود.

ابزار صوتی با بازهٔ بلند[1] LSS

سوند LSS مجهز به دو فرستنده و دو گیرنده است. هر دو فرستنده در قسمت پایین سوند و هر دو گیرنده در قسمت بالای سوند جاسازی شده‌اند(شکل ۶-۹). اگر از بالا به پایین نخستین گیرنده را با R_1 و دومین گیرنده را با R_2 نخستین فرستنده را با T_1 و دومین فرستنده را با T_2 نمایش دهیم فاصلهٔ بین T_1 تا R_1 برابر ۸ فوت و فاصلهٔ T_1 تا R_2 برابر ۱۰ فوت می‌باشد. یعنی می‌توان گفت فاصلهٔ فرستنده‌ها از یکدیگر برابر با فاصلهٔ گیرنده‌ها از یکدیگر و برابر ۲ فوت است. بنابر این بازهٔ سوند ۸ فوت و ۱۰ فوت می‌باشد. البته سوندهایی با بازهٔ ۱۰ فوت و ۱۲ فوت هم وجود دارند. با توجه به بازهٔ بلند این سوندها، شعاع کاوش آنها زیاد است و اطلاعات بدست آمده مربوط بـه سـازند دست

1. Long Spaced Sonic Tool

نخورده می‌باشد. لذا اندازه‌گیریها از دقت خوبی برخوردار است. این دقت بالا در بسیاری موارد بویژه در مواردی که از نمودارهای صوتی برای برآورد مدولهای دینامیکی سازند استفاده می‌شود، ارزشمند است. شکل (۶-۱۰) اختلاف بین نتایج حاصل از بکارگیری ابزار LSS را با نتایج حاصل از ابزار BHC نشان می‌دهد (نمودار بر حسب زمان گذر موج از واحد طول [1] رسم شده که در قسمت‌های بعد در مورد آن گفتگو خواهد شد).

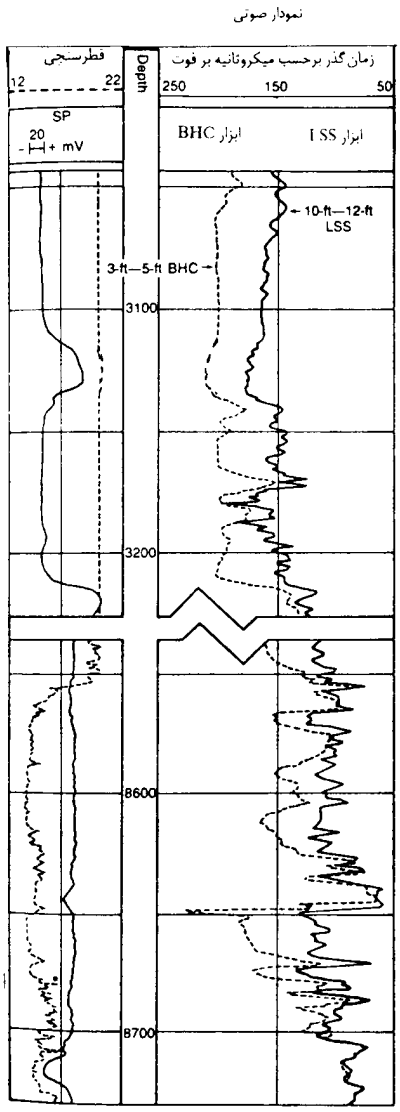
اندازه‌گیریها در دو مرحله بعمل می‌آید نخست امواج گسیل شده از فرستندهٔ T_1 به وسیلهٔ گیرنده‌ها دریافت می‌شود و اختلاف زمان $t_{1S}=T_1R_1-T_1R_2$ محاسبه می‌شود، بعد فرستندهٔ دوم شروع بکار می‌کند و امواج به وسیلهٔ گیرنده‌ها دریافت و اختلاف زمان برای بازهٔ بلندتر $t_{1L}=T_{2R1}-T_{2R2}$ محاسبه و در حافظه نگهداری می‌شود. زمانی که سوند به اندازه‌ای بالا آید که فرستنده‌ها در محل فعلی گیرنده‌ها قرار گیرند. در این حالت به همان صورت قبل زمان $t_{2S}=T_{1R1}-T_{1R2}$ و بعد زمان $t_{2L}=T_{2R1}-T_{2R2}$ محاسبه می‌شود.

میانگین زمانهای T_S و T_L که به ترتیب مربوط به بازهٔ کوتاهتر یعنی ۸ و ۱۰ فوت و بازهٔ بلندتر یعنی ۱۰ و ۱۲ فوت می‌باشد از روابط زیر بدست می‌آید. و سرانجام نمودار برای هر دو مورد قابل ترسیم است.

$$t_S=\frac{t_{1S}+t_{2S}}{2}$$

$$t_L=\frac{t_{1L}+t_{2L}}{2}$$

1. Interval Transit Time



شکل (۶-۱۰) مقایسه نمودارهای حاصل از ابزار صوتی با بازهٔ بلند و BHC [۵]

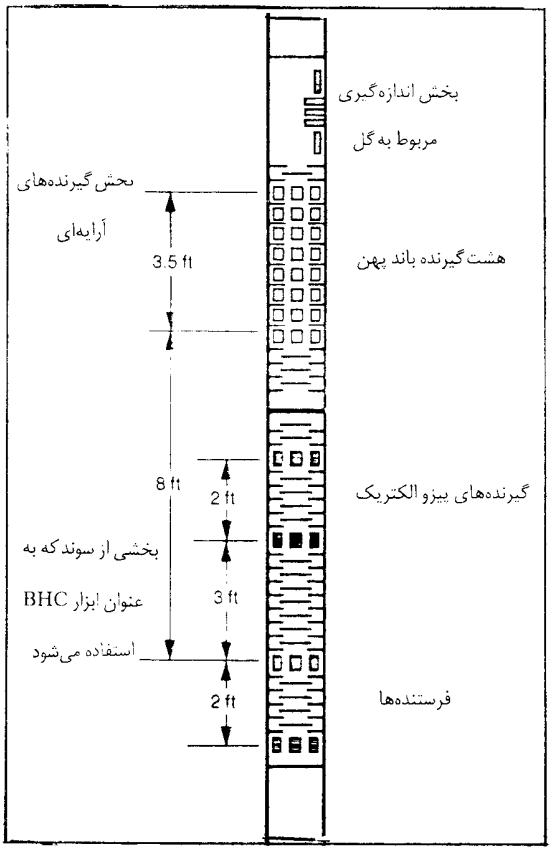
ابزار آرایه‌های صوتی [۱]

ابزار امروزی آرایه‌های صوتی امکان اندازه‌گیری همزمان نمودارهای BHC و LSS را فراهم می‌آورد و افزون بر آن با این ابزار می‌توان سیمای کلی امواج را بدست آورد. سوند آرایه‌های صوتی به دو فرستندهٔ باند پهن [۲] (با محدودهٔ بسامد از ۵ تا ۱۸ کیلوهرتز) پیزو الکتریک مجهز می‌باشد. این فرستنده‌ها در فاصله ۲ فوت از یکدیگر و در قسمت پایین سوند قرار گرفته‌اند. دو گیرندهٔ پیزو الکتریک نیز در فاصلهٔ ۳ و ۵ فوتی از فرستندهٔ بالایی قرار دارند. این گیرنده‌ها نقش دوگانه دارند. در چاه‌های بدون لولهٔ جداری، آنها و گیرنده‌هایی که به ترتیب در فاصله‌های ۳ و ۵ فوتی و ۵ و ۷ فوتی قرار دارند، امکان تهیه نمودارهای BHC را فراهم می‌آورند. در چاههای دارای لولهٔ جداری از آنها برای نمودار استاندارد سیمان‌بندی [۳] با بازهٔ سه فوت و نمودار جرم مخصوص با بازهٔ ۵ فوت استفاده می‌شود.

این سوند افزون بر موارد فوق در برگیرندهٔ یک آرایهٔ هشت گیرنده‌ای پیزو الکتریک باند پهن نیز می‌باشد. این گیرنده‌ها از یکدیگر ۶ اینچ فاصله دارند و نزدیکترین آنها به فرستنده‌ها، در فاصلهٔ ۸ فوتی از فرستندهٔ بالایی قرار دارد. از دو عدد از این گیرنده‌ها یعنی گیرنده‌های شماره ۱ و ۵ که در فاصله‌ای برابر ۲ فوت (اینچ ۲۴=۴×۶) از یکدیگر قرار دارند می‌توان بعنوان گیرنده‌های سوند با بازهٔ بلند (۸ و ۱۰ فوت و ۱۰ و ۱۲ فوت) استفاده کرد(شکل ۶-۱۱). برای اندازه‌گیری سرعت امواج در گل حفاری نیز یک زوج گیرنده و فرستنده در فاصلهٔ کم روی سوند جاسازی شده است.

نگاشتهای بدست آمده به وسیلهٔ آرایه چه به صورت عددی و چه به صورت پیوسته [۴] می‌تواند ارائه شود(شکل ۶-۵).

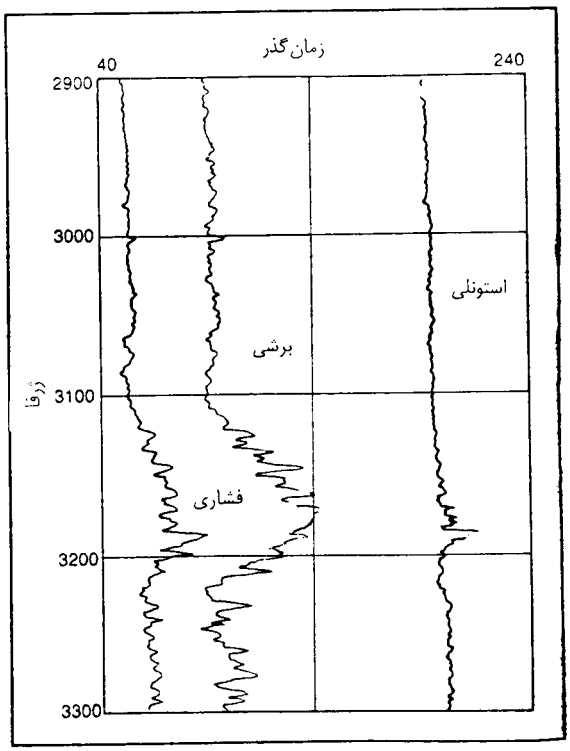
1. Array Sonic Tool
2. Broad Band
3. Cement Bond Log (CBL)
4. Analog



شکل (۶-۱۱) ابزار آرایهٔ صوتی [۲]

به این ترتیب امکان اندازه‌گیری سرعت امواج فشاری، برشی و استونلی فراهم می‌شود. و می‌توان نمودار مربوط به هر یک را تهیه و ارائه نمود. نمونه‌ای از این نمودارها در شکل (۶-۱۲)

ارائه شده است. در زمانی که محاسبه مدولهای دینامیکی سنگ مورد نظر باشد. این نمودارها بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند. با داشتن شکل کامل امواج دریافتی می‌توان سرعت امواج در گل حفاری، انرژی امواج، دامنه و فرکانس امواج و برخی اطلاعات باارزش دیگر را بدست آورد.



شکل (۶-۱۲) نمونه‌ای از نمودارهای بدست آمده برای امواج فشاری، برشی و استونلی [۲]

شعاع کاوش روشهای صوتی

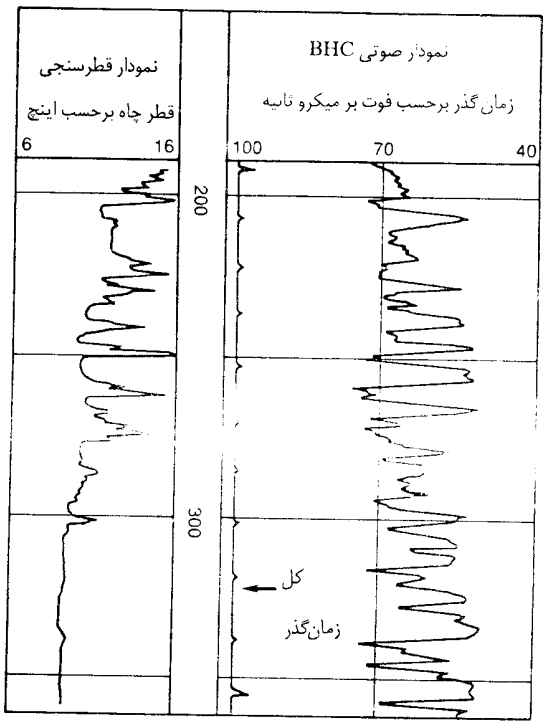
شعاع کاوش در روشهای صوتی بستگی به بازهٔ سوند و میزان خردشدگی سنگهای دیوارهٔ چاه دارد. در اثر حفاری سنگهای دیواره چاه خردشده یا دست کم در آنها ترکهای کوچک ایجاد می‌شود. این ترکها باعث کاهش سرعت امواج می‌شوند.از آنجا که نخستین امواجی که به گیرنده‌ها می‌رسند سریع‌ترین مسیر را بر می‌گزینند، بخشی از مسیر آنها معمولاً در سازند است.

چنانچه بازهٔ سوند به اندازهٔ کافی بلند باشد، امواج از دیوارهٔ خرد شده گذشته و از سنگ سالم حرکت نموده و به گیرنده‌ها می‌رسند. به هر ترتیب در سنگهای مقاوم که میزان خردشدگی آنها کم است شعاع کاوش از چند سانتیمتر بیشتر نیست اما در شرایطی که خردشدگی در اثر حفاری زیاد باشد ممکن است شعاع کاوش به چندین ده سانتیمتر هم برسد.

کل زمان گذر موج [1]

همراه با نمودارهای صوتی کل زمان گذر موج از سازند از ابتدای گمانه تا محل اندازه‌گیری (محل سوند) محاسبه و به صورت یک خط دندانه‌دار در کنارهٔ چپ نمودار نگاشته می‌شود هر یک از دندانه‌ها معمولاً برابر افزایش یک میلی ثانیه در کل زمان عبور است. پس از هر ده دندانهٔ کوچک یک دندانه بزرگ نگاشته می‌شود که نشانگر افزایش ۱۰ میلی ثانیه است (شکل ۶-۱۳). با توجه به کل زمان گذر می‌توان سرعت میانگین را در ژرفاهای مختلف برآورد نمود. افزون بر آن از این زمانها می‌توان برای بررسیهای لرزه‌ای و برآورد ویژگیهای مهندسی سنگ نیز کمک گرفت.

1. Total Transit Time (transit time integrated)



شکل (۶-۱۳) نمونه‌ای از نمودار صوتی همراه کل زمان گذر موج (قسمت وسط) [۲]

پرش سیگل‌ها[1]

گاهی ممکن است انرژی نخستین موج به حدی باشد که موج به گیرندهٔ نزدیک برسد، اما به گیرنده دور نرسد و امواج بعدی که به گیرندهٔ دور می‌رسند بعنوان نخستین موج دریافت و نگاشته شوند. این پدیده، پرش یا گم شدن سیگل‌ها نامیده می‌شود. در چنین شرایطی زمان گذر موج روی

1. Cycle Skiping

نمودار به طور چشم‌گیر و ناهنجاری افزایش می‌یابد و به صورت اوجهای [1] نوک تیزی حلوه‌گر می‌شود. پدیدهٔ پرش سیگها در لایه‌های نافشرده، سکستگی‌ها، حفره‌های بزرگ، سازندهای گازدار و گلهای در برگیرندهٔ حباب هوا گاهی بوجود آمده و بی‌توجهی به آن سبب خطا در برآوردها می‌شود.

ارائه نمودارهای صوتی

نمودارهای صوتی را می‌توان بر اساس سرعت گذر موج در سارند رسم نمود و نخستین نمودارهای صوتی نیز بر همین مبنا تهیه و رسم می‌شدند. اما دامنهٔ تغییرات سرعت امواج در پیکره‌ها و سازندهای زمین‌شناسی که می‌تواند از کمتر از ۱۰۰m/s برای امواج برشی در حاکهای سست (برای امواج فشاری گاهی سرعت در این گونه خاکها به کمتر از ۲۰۰ متر بر ثانیه می‌رسد) تا افزون بر حدود ۸ هزار متر بر ثانیه برای سنگهای خیلی متراکم متفاوت باشد، رسم نمودار بر حسب سرعت با نارسایی‌هایی روبرو می‌شود. برای گریز از این نارسایی‌ها بجای رسم نمودار بر حسب سرعت، نمودار بر حسب زمان گذر موج از واحد طول یعنی وارون سرعت رسم می‌شود. این زمان به اختصار زمان گذر [2] نامیده می‌شود و برحسب میکرو ثانیه بر متر و یا میکرو ثانیه برفوت بیان می‌شود. گرچه دامنه تغییرات زمان گذر از حدود ۱۲۰ تا ۱۰۰۰۰ میکرو ثانیه بر متر است. ولی این دامنه برای موارد معمول و بویژه برای سنگها و سازندهایی که حاوی مواد هیدروکربوری هستند به ۱۳۰ تا ۶۰۰ میکروثانیه بر متر یا حدود ۴۰ تا ۲۰۰ میکرو ثانیه بر فوت می‌رسد، که دامنه نسبتاً محدودی است.

البته در مواردی که هدف از کاربرد روشهای صوتی استفاده از نتایج آنها برای منظورهای ژئوتکنیکی باشد تهیهٔ نمودارها بر حسب سرعت معمول‌تر است زیرا مستقیماً می‌توان با استفاده از سرعتهای بدست آمده مدولهای دینامیکی را برآورد نمود یکی دیگر از دلایل انتخاب مقیاس سرعت، سرعت کم خاکها نسبت به سنگهاست. در موارد ژئوتکنیکی معمولاً با خاکها و یا سنگهای هوازده و سست سروکار داریم.

1. Peaks
2. Transit Time

به هر ترتیب هنوز هم روشهای صوتی گسترده‌ترین کاربرد را در پیمایش چاه‌های نفت و گاز (در مقایسه با چاههای آب و معادن) دارند. لذا استفاده از مقیاس خطی زمان گذر موج معمول است. زمان گذر و سرعت امواج در برخی از سنگهایی که سنگ مخزن نفت هستند به شرح زیر می‌باشد.

جدول (۶-۱) سرعت و زمان گذر امواج در برخی از سنگها

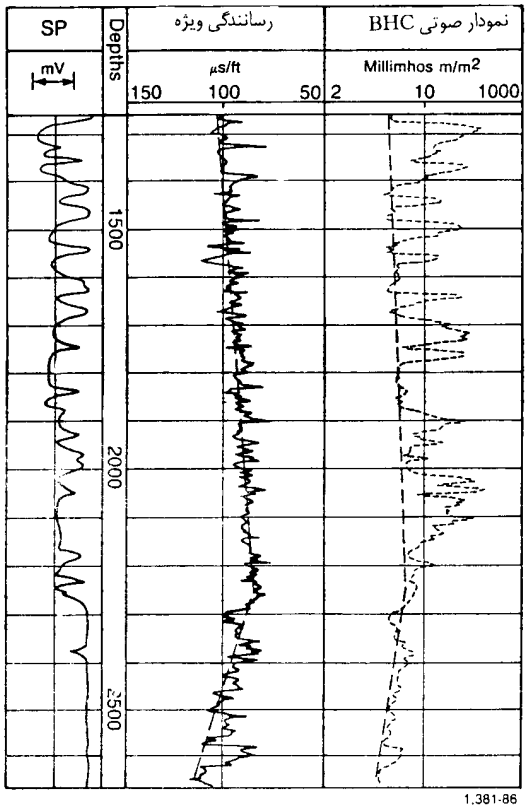
نوع سنگ	سرعت در بخش جامد سنگ هزار فوت بر ثانیه	زمان گذر موج میکروثانیه برفوت
ماسه سنگ	۱۸-۱۹/۵	۵۵/۵-۵۱
سنگ آهک	۲۱-۲۳	۴۷/۶-۴۳/۵
دولومیت	۲۳	۴۳/۵
سنگ نمک	۱۵	۶۶/۷
انیدریت	۲۰	۵۰

سرعت امواج در سنگها فقط بستگی به بخش جامد سنگ ندارد. افزون بر بخش جامد، سرعت پیرو ساخت و بافت سنگ، تخلخل،سیال و نمکهای سیال درون سازند است. نقش تخلخل در میان عوامل فوق از همه برجسته‌تر است. به همین دلیل روش صوتی یکی از مهمترین روشهای برآورد تخلخل می‌باشد.

اثر لایه‌هایی که فشار سیال در آنها زیاد است

در برخی از نفت خوانها سازندهای شیلی، ممکن است دارای فشار سیال زیاد به صورت

ناهنجار باشند. فشار زیاد سیال باعث می‌شود که این سازندهای شیلی دارای تراکم کمتر از شیلهای فشرده باشند، لذا سرعت امواج در آنها کمتر از سرعت امواج در شیلهای فشرده است. این گونه شیلها را می‌توان با استفاده از نمودارهای صوتی شناسایی نمود(شکل ۶-۱۴).



شکل (۶-۱۴) اثر شیلهای تحت فشار روی نمودارهای صوتی [۶]

این گونه شیلها با افزایش زمان گذر روی نمودار صوتی و کاهش رسانندگی ویژه مشخص می‌شود

کاربردهای روش صوتی

روشهای صوتی کاربرد گسترده‌ای در ارزیابی مخازن نفت، سفره‌های آب - معادن و بررسی‌های ژئوتکنیکی دارند. مهمترین کاربردهای روشهای صوتی را می‌توان به صورت زیر بر شمرد.

الف - مهندسی نفت

- برآورد تخلخل
- تخمین سنگ‌شناسی بکمک نمودارهای دیگر
- بررسی کیفیت سیمانکاری پشت لولهٔ جداری
- شناسایی زونهای خرد شده
- شناسایی لایه‌های شیلی تحت فشار
- بر آورد مدولهای الاستیکی سنگها به وسیلهٔ آرایه‌های صوتی
- تخمین جرم مخصوص

گرچه در مقایسه با مهندسی نفت، روشهای صوتی در کاوشهای غیر نفتی هنوز کاربرد چشمگیری ندارد اما این نمودارها بسرعت در معادن، چاههای آب و بویژه در کاوشهای ساختگاهی در حال گسترش هستند.

ب - منابع آب

- تشخیص آبرفت از سنگ
- برآورد تخلخل
- تخمین سنگ‌شناسی بکمک نمودارهای دیگر
- تخمین جرم مخصوص

ج - معادن

- تفکیک سنگهای مختلف و شناسایی پیکره‌های فلزی با توجه به تفاوتهای سرعتی که با

سنگهای دربرگیرنده دارند.

- بررسی کیفیت تودهٔ سنگ به منظور تعیین ویژگیهای مهندسی سنگ
- استفاده در کنار نمودارهای دیگر برای بررسی‌های چند منظوره

د- کاوشهای ساختگاهی

استفاده از روشهای لرزه‌ای در کاوش ساختگاههای سازه‌های بزرگ، بسرعت در حال گسترش است. روشهای صوتی چاه‌پیمایی نیز در این کاوشها مورد استفاده قرار می‌گیرند بویژه در ساختگاه سدهای بزرگ. مهمترین این استفاده‌ها به شرح زیر است.

- بررسی کیفیت سنگ پی ساختگاه سدها
- شناسایی زونهای خردشده
- استفاده از آرایه‌های صوتی برای برآورد مدولهای دینامیکی پی
- برآورد تخلخل و آبدهی پی و تکیه گاههای سد
- بررسی کیفیت پردهٔ تزریق سیمان
- بررسی کیفیت سنگ تونلها و فضاهای زیرزمینی مانند نیروگاهها قبل از حفر این فضاها

برآورد تخلخل به وسیلهٔ نمودار صوتی

همانگونه که اشاره شد، مهمترین کاربرد روشهای صوتی، استفاده از آنها برای برآورد تخلخل است. چنانچه ترکیب کانی‌شناسی سنگها مشخص و سرعت موج در قسمت جامد (کانیها) و سیال سنگ معلوم باشد و فشردگی سنگ به اندازه کافی باشد می‌توان نوشت.

$$t_l=\varphi t_f+ (1-\varphi)\ t_{ma}$$

$$t_l=\varphi(t_f - t_{ma})+ t_{ma}$$

$$t_l - t_{ma} = \varphi(t_f - t_{ma})$$

$$\varphi = \frac{t_l - t_{ma}}{t_f - l_{ma}}$$

φ	تخلخل
t_l	زمان گذر موج، بدست آمده از نمودار
t_f	زمان گذر موج برای سیال درون سازند(آب)
t_{ma}	زمان گذر موج برای ماتکریس سنگ (بخش جامدسنگ)

در میان سنگهای رسوبی تنها ماسه سنگهای تمیز و فشرده [1] دارای ترکیب کانی‌شناسی معین هستند و از نظر بافت بگونه‌ای هستند که می‌توان پیوند بالا را برای آنها بکار برد. تخلخل این نوع سنگها بین ۱۵ تا ۲۵ درصد تغییر می‌کند.

در ماسه سنگهای با تخلخل بیشتر از ۲۵ درصد بویژه چنانچه این ماسه سنگها حاوی هیدروکربور باشند و نمودار تحت تاثیر ناحیهٔ تراویده قرار نگرفته باشند (بازهٔ سوند بلند باشد)، ممکن است زمانهای گذر برآورد شده از مقدار آنها در مقایسه با زمانی که سنگ اشباع از آب است، بیشتر باشد. بنابر این تخلخل برآورد شده در چنین حالتی از تخلخل واقعی بیشتر خواهد بود.

وجود بین لایه‌های شیلی نیز باعث افزایش زمان گذر و به دنبال آن افزایش تخلخل می‌شود. زیرا سرعت در شیلها کمتر از ماسه سنگها است. این افزایش با ضخامت نسبی بین لایه‌های شیلی شدت می‌یابد.

عوامل فوق باعث می‌شود تا در حالتی که سازند از ماسه سنگهای نافشرده و سست تشکیل

1. Clean Consolidated Compact Sand Stones

شده است نتوان بطور مستقیم از رابطهٔ فوق استفاده نمود. در چنین شرایطی که معمولاً در حوضه‌های نهشته‌گذاری جوان‌تر دیده می‌شود باید به گونه‌ای، تخلخل محاسبه شده از روش صوتی کاهش داده شود. تجربه نشان داده است که در مواردی که زمان گذر موج بیش از ۳۰۰ میکرو ثانیه بر متراست، میان تخلخل محاسبه شده، تخلخل واقعی و سرعت امواج در شیلهای همبر ماسه سنگهای سست ارتباطی وجود دارد. بنابر این با توجه به سرعت امواج در شیلها می‌توان تخلخل برآورد شده راتصحیح نمود.

برای تصحیح تخلخل ماسه سنگهای سست شرکت شلومبرژه رابطهٔ زیر را پیشنهاد می‌نماید.

$$\varphi = \varphi_a \times C_c$$

و یا

$$\varphi = \frac{t_l - t_{ma}}{t_f - t_{ma}} \times C_c$$

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

φ_a تخلخل ظاهری محاسبه شده از نمودار صوتی

C_c ضریب تصحیح فشردگی [1] نامیده می‌شود

t_{sh} زمان گذر موج در شیلهاست که معمولاً برای شیلهای با فشردگی کم بیشتر از ۱۰۰ می‌باشد.

1. Compaction Correction Factor

از سوی دیگر می‌توان C_c را با توجه به تخلخل محاسبه شده از روشهای دیگر بدست آورد بعنوان مثال اگر تخلخل از روش جرم مخصوص در چاه دیگری با شرایط مشابه محاسبه شده باشد داریم:

$$C_c=\frac{\varphi_d}{\varphi_a}$$

φ_d تخلخل محاسبه شده از روش جرم مخصوص

φ_a تخلخل ظاهری برآورد شده از نمودار صوتی

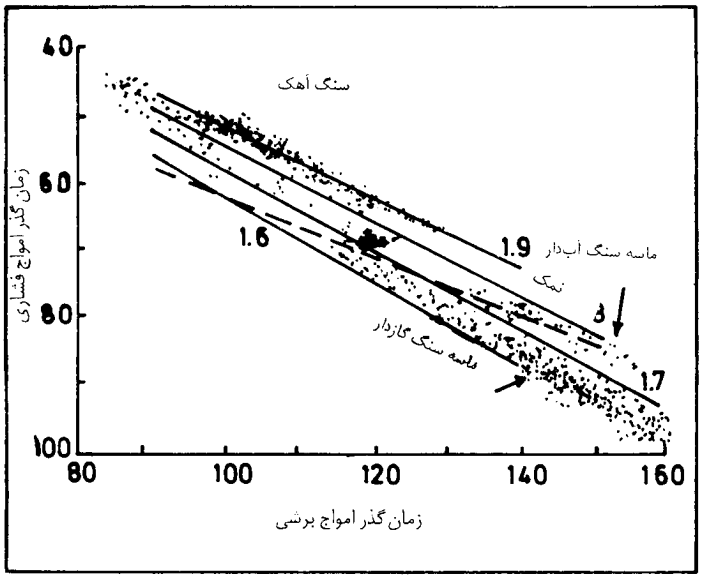
برای محاسبهٔ تخلخل سنگهای آهکی و دولومیتی نیز از روابط فوق با انجام اصلاحاتی می‌توان استفاده نمود. در بخش برآورد تخلخل به این مطلب پرداخته خواهد شد.

کاربرد امواج برشی

همانگونه که اشاره شد مهمترین کاربرد امواج برشی در برآورد مدولهای دینامیکی و ویژگیهای مهندسی سنگ است. امواج برشی به وسیلهٔ آرایه‌ها نگاشته می‌شوند و پس از نگاشت، پردازش و تفسیر آنها مانند پردازش و تفسیر امواج فشاری است. باید توجه نمود که امواج برشی ازسیالها و گازها نمی‌گذرند. استفاده از این امواج به همراه امواج فشاری می‌تواند به تفسیر بهتر نمودارهای صوتی کمک کند. از سرعت امواج برشی می‌توان برای تخمین سنگ‌شناسی نیز استفاده نمود و با توجه به اینکه این امواج تحت تاثیر سیال و گاز سازند نیستند، برای تخمین سنگ‌شناسی به دانستن نوع سیال سازند نیازی نیست.

چنانچه فضاهای خالی سنگ از آب یا هیدروکربورها پر باشد، نسبت سرعت امواج فشاری به

سرعت امواج برشی در سنگها، در مقایسه با زمانی که سنگها خشک باشند افزایش می‌یابد (شکل ۶-۱۵).



شکل (۶-۱۵) ارتباط میان زمان گذر امواج برشی و فشاری در چند نوع سنگ رسوبی

پرسش و تمرین

۱- اگر امواج ارائه شده در شکل ۶-۵ به وسیلهٔ آرایهٔ صوتی ارائه شده در شکل ۶-۱۱ بدست آمده باشد. سرعت امواج فشاری، برشی و استونلی را در محل برداشت محاسبه کنید. (تغییرات محور زمان در شکل ۶-۵ برای هر میلی‌متر برابر ۱۵ میلی ثانیه است)

۲- علت و چگونگی تولید و گسترش امواج استونلی را در گمانه‌ها شرح دهید.

۳- علت و چگونگی تولید و گسترش امواج برشی و نحوهٔ دریافت آنها به وسیلهٔ گیرنده‌ها را شرح دهید.

۴- در مورد نتایج حاصل از سوندهای صوتی مجهز به یک فرستنده و دوگیرنده و سوندهای مجهز به دو فرستنده و دوگیرنده بحث کنید.

۵- در شکل ۶-۱۲ همبری لایه‌ها را شناسایی و سرعت امواج فشاری، برشی و استونلی را برای هر سازند برآورد کنید و با توجه به زمانهای گذر بدست آمده نوع سازندها را تخمین بزنید. اگر سرعت امواج فشاری در سیال درون سازندها نصف سرعت ماتریکس آنها باشد تخلخل در هر یک از سازندها چقدر است؟ آیا تخلخل بدست آمده برای سازندها منطقی است؟

۶- نمودارهای ارائه شد در شکل ۶-۱۰ را تفسیر کنید.

۷- با توجه به شکل ۶-۱۳،

الف- سرعت امواج در ژرفاهای ۲۰۰ تا ۲۵۰ فوتی و ۳۰۰ تا ۳۵۰ فوتی را حساب کنید.

ب- نمودار قطرسنجی را بانمودار صوتی مقایسه کنید. اگر سرعت امواج در گل حفاری ۱۶۰۰m/s باشد، آیا می‌توانید نمودار صوتی را بر اساس آن اصلاح کنید.

ج - همگن بودن سازند را از نظر ویژگیهای دینامیکی، در ژرفاهای ۲۰۰ تا ۲۵۰ فوتی و ۳۰۰ تا ۳۵۰ فوتی مقایسه کنید.

۸- با توجه به شکل ۶-۱۴ به سوالهای زیر پاسخ دهید.

الف - چند لایه قابل شناسایی است؟

ب - علت تغییرات سرعت را در این نمودار بررسی کنید.

ج - آیا بین نمودارهای ارائه شده همخوانی وجود دارد؟

د- علت کاهش سرعت و افزایش SP در قسمت پایین نمودار چیست؟

س - آیا خط چین میانگین سرعت در قسمت پایین نمودار درست رسم شده است؟ آیا ناپیوستگی سرعت وجود ندارد؟

ص - علت افزایش مقاومت ویژهٔ الکتریکی در قسمت پایین نمودار چیست؟

د- اگر سرعت امواج در سیال درون سازندها حدود ۱۵۰۰m/s باشد تخلخل را در نقاط مختلف محاسبه کنید.

۹- شکل ۶-۱۵ پیوند میان زمان گذر امواج برشی و فشاری را برای سنگهای رسوبی نشان می‌دهد همین شکل را برای حالتی که محور افقی سرعت امواج فشاری و محور قائم سرعت امواج برشی را نشان دهد، رسم کنید.

۷

نمودارهای مغناطیسی و الکترومغناطیسی

به وسیلهٔ ابزار چاه‌پیمایی مغناطیسی، ویژگیهای مغناطیسی مواد پیرامون چاه اندازه‌گیری می‌شوند. ویژگیهای مغناطیسی مورد اندازه‌گیری در چاه‌پیمایی عبارتند از: خودپذیری مغناطیسی [۱] و حداقل یکی از مولفه‌های میدان مغناطیسی زمین که معمولاً مولفهٔ قائم می‌باشد.

نمودار خودپذیری مغناطیسی MSL

برای اندازه‌گیری خودپذیری مغناطیسی از دو نوع سوند استفاده می‌شود. نخست سوندهای با یک سیم پیچ که این سیم پیچ یک قسمت از یک پل جریان متناوب است. و نوع دوم سوندهای شامل دو سیم پیچ. آرایه سیم پیچ‌ها در این سوند مانند سوند روش القایی مقاومت ویژه است

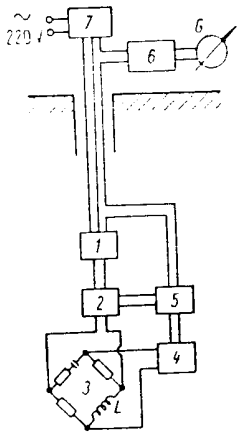
سوند دارای یک سیم پیچ

در سوند با یک سیم پیچ، قسمت اساسی سوند یک سیم پیچ القایی است که طول آن ۲۰ سانتیمتر است و یک بخش از پل الکتریکی را مانند شکل ۷-۱ تشکیل می‌دهد. از پل الکتریکی یک

1. Magnetic Susceptibility Log (MSL)

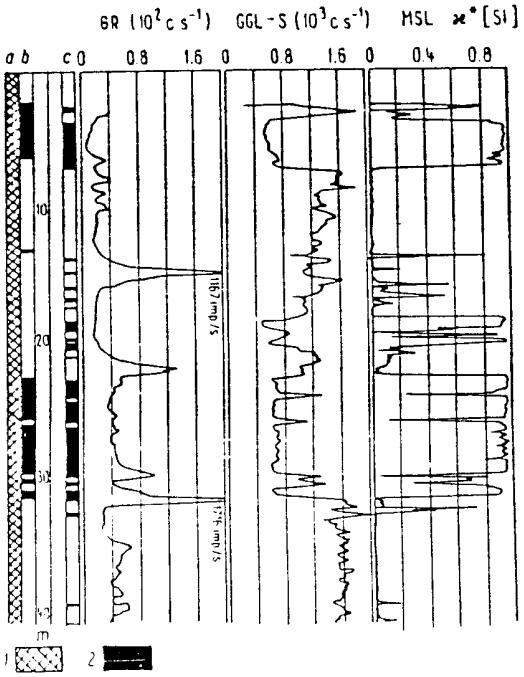
جریان متناوب با بسامد یک کیلوهرتز عبور می‌کند. تغییر خودپذیری مغناطیسی مواد باعث بر هم زدن تعادل در پل می‌شود. اختلاف پتانسیل هر یک از دو گوشهٔ‌های متقابل پل اندازه‌گیری می‌شود. هر چه خودپذیری مغناطیسی مواد بیشتر باشد، تفاوت بین اختلاف پتانسیل‌های اندازه‌گیری شده بیشتر می‌شود. این امر از طرفی می‌تواند به افزایش رسانندگی الکتریکی لایه‌ها نیز دلالت کند.

به عبارت دیگر جریان القاء شده که روی جریان اولیه تاثیر می‌گذارد، دارای دو مولفه است یکی مولفه‌ای که ناشی از رسانندگی الکتریکی است و دیگری مؤلفه‌ای که مربوط بـه خـودپذیری مغناطیسی می‌باشد. این دو مولفه با هم اختلاف فاز دارند مولفه القاء شده به وسـیلهٔ خـودپذیری مغناطیسی دارای اختلاف فازی برابر $\frac{\pi}{2}$ نسبت به جریان متناوب نخستین است در صورتیکه مولفه القاء شده به وسیلهٔ رسانندگی الکتریکی با جریان نخستین هم فاز است.



شکل (۷-۱) پل الکتریکی یک سوند خودپذیری مغناطیسی [۳]
۱- ترانس، ۲- ژانراتور، ۳- پل الکتریکی جریان متناوب، ۴- تقویت کننده،
۵- ابزار اندازه‌گیری اختلاف فاز

با یک گیرنده که اختلاف فاز را اندازه‌گیری می‌کند می‌توان مولفهٔ القایی ناشی از خودپذیری مغناطیسی را از اختلاف پتانسیل کل اندازه‌گیری شده تفکیک نمود. خودپذیری مغناطیسی مواد بستگی مستقیم به درصد کانه‌های فرومغناطیسی دارد. بنابر این با نمودارهای خودپذیری مغناطیسی می‌توان میزان و چگونگی گسترش کانه‌های فرو مغناطیس را ارزیابی نمود. شکل ۷-۲ نمونه‌ای از نمودارهای فرو مغناطیسی تهیه شده در یک گمانهٔ اکتشافی را نشان می‌دهد. گفتنی است که شرایط فیزیکی چاه و گل حفاری و ضخامت لایه‌های با خودپذیری مغناطیسی زیاد، روی اندازه‌گیریها تاثیر می‌گذارد، بنابر این برای تفسیرهای کمی باید تصحیح این عوامل انجام شود.



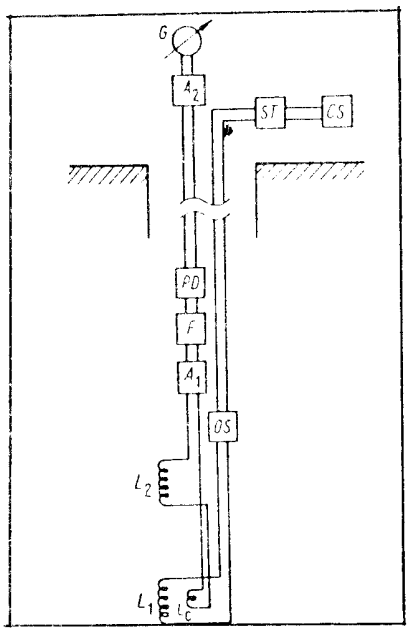
شکل (۷-۲) نمونه‌ای از نمودار خودپذیری مغناطیسی MSL، همراه نمودارهای پرتوگاما GR و جرم مخصوص GGL [۳]

۱- اسکارن ۲- کانه با ویژگیهای مغناطیسی

سوندهای دارای دو سیم‌پیچ

این سوندها دارای دو سیم پیچ الکتریکی L_1 و L_2 مطابق شکل ۷-۳ می‌باشند سیم پیچ (L_1) سیم پیچ فرستنده است و جریان متناوبی با بسامد ۲ کیلوهرتز ($f=2kH_z$) از آن عبور می‌کند. در کنار این سیم پیچ یک سیم پیچ دیگر (L_0) قرار گرفته است. L_0 بگونه‌ای عمل می‌نماید تا اثر میدان مغناطیسی ایجاد شده به وسیلهٔ سیم‌پیچ فرستنده در داخل گل خنثی شود و اثر گل حفاری تا حدودی حذف شود. با این وجود مقادیر بدست آمده نیاز به تصحیح برای خودپذیری مغناطیسی گل و شرایط گمانه دارند. مانند آنچه در روش القایی (مقاومت ویژه) گفته شد، میدان مغناطیسی ایجاد شده در پیرامون سیم پیچ فرستنده به گیرنده می‌رسد و جریانی را در آن القا می‌کند. افزون بر آن این میدان سبب القاء یک جریان در لایه‌های رسانا می‌شود که این جریان خود سبب ایجاد یک میدان ثانویه مغناطیسی می‌شود که آن هم بر روی جریان ایجاد شده در سیم پیچ گیرنده موثر است. فرآیند دیگری نیز می‌تواند بر روی جریان ایجاد شده در سیم‌پیچ گیرنده موثر باشد که آن خودپذیری مغناطیسی مواد است.

مولفه مربوط به خودپذیری مغناطیسی همانگونه که گفته شده دارای اختلاف فازی برابر $\frac{\pi}{2}$ با مولفه‌های دیگر است. لذا می‌توان آن را از مولفه‌های دیگر جدا و پس از تقویت به صورت نمودار رسم نمود. به علت ضعیف بودن همانگونه گمانگاهها کالیبره کردن آنها الزامی است.



شکل (۷-۳) سوند مغناطیسی مجهز به دو سیم پیچ فرستنده L_1 و گیرنده L_2 و سیم‌پیچ جبران‌کننده L_c [۳]
A_1 و A_2 تقویت کننده، F فیلتر، OSنوسان کننده، G گالوانومتر

کاربردهای نمودار خودپذیری مغناطیسی

مهمترین کاربرد این نمودار در بررسی و ارزیابی میزان مگنتیت و پیروتیت است. بنابر این از نمودارهای مهم در اکتشاف کانه‌های آهن بشمار می‌رود. در معادن آهن می‌توان از این نمودار برای منظورهای زیر استفاده نمود.

۱- برآورد میزان کانه‌های مگنتیت و پیرونتیت

۲- تعیین زون اکسیدهٔ حاوی لیمونیت

۳- تعیین محل همبری کاسنگ‌های آذرین با سنگهای دگرگونی

افزون بر اینها از نمودار MSL می‌توان برای پیوند افقهای هم ارز در سنگهای رسوبی استفاده نمود. در چنین شرایطی نیاز به ابزاری با حساسیت زیاد می‌باشد.

نمودار میدان مغناطیس MFL[1]

ساده‌ترین ابزار نمودارگیری مغناطیسی بگونه‌ای ساخته شده‌اند که به وسیلهٔ آنها می‌توان مولفه قائم (Z) میدان مغناطیسی زمین را اندازه‌گیری نمود. وسایل پیشرفته‌تر امکان اندازه‌گیری مولفه‌های دیگر میدان یعنی مولفهٔ شمالی - جنوبی (Y) و مولفهٔ خاوری باختری (X) را نیز فراهم آورده‌اند.

روشن است که برای اندازه‌گیری مولفه‌های افقی لازم است که جهت آنها را نیز در هر لحظه اندازه‌گیری کنیم. لذا سوند باید به یک قطب نما نیز مجهز باشد تا در هر لحظه جهت شمال معین شود. افزون بر آن زاویه میل چاه می‌تواند روی اندازه‌گیری‌ها تاثیر بگذارد.

اگر دستگاه فقط مجهز به یک سیم پیچ اندازه‌گیری برای مولفهٔ قائم باشد. بخش حساس دستگاه به صورت آویزان درون سوند قرار می‌گیرد و حتی در حالتی که سوند در گمانه‌های مایل به صورت قائم نباشد، بخش حساس سوند به صورت قائم است و مشکلی در اندازه‌گیری‌ها بوجود نمی‌آورد. برداشت مولفه قائم به صورت پیوسته در گمانه‌ها انجام می‌پذیرد و نمودار آن نیز به صورت پیوسته قابل رسم است.

برای اندازه‌گیری سه مولفه نیاز به سه سیم پیچ یکی قائم و دو تا افقی داریم. افزون بر آن

1. Magnetic Field Log

زاویه میل چاه و جهت شمال نیز باید در نقاط اندازه‌گیری معین باشند. اندازه‌گیری سه مولفه به صورت نقطه به نقطه و در محلهایی که مورد نظر هستند انجام می‌شود. با اندازه‌گیری سه مولفه می‌توان محورهای مغناطیسی پیکرهٔ فرو مغناطیسی را برآورد نمود.

کاربردهای نمودار مغناطیسی

مهمترین کاربرد نمودارهای MFL در اکتشاف کانساری آهن است. برتری چشمگیر این نمودار نسبت به نمودار خودپذیری مغناطیسی در شعاع کاوش بیشتر این روش است.

نمودار مغناطیس هسته‌ای [۱]

مغناطیس هسته‌ای تنها در مورد هیدروژن موجود در سیال پدید می‌آید. هیدروژن به وسیلهٔ بیشترین ممان مغناطیسی هستهٔ آن شناسایی می‌شود. البته این پدیده در مورد برخی عناصر دیگر مانند اکسیژن، سلفور، پتاسیم، سدیم، آلومینیم، و سیلیس نیز ایجاد می‌شود اما مقدار آن در مقابل ممان مغناطیسی هستهٔ هیدروژن قابل چشم‌پوشی است. و معمولاً قابل اندازه‌گیری نیست.

اگر سیالهای حاوی هیدروژن مانند آب و هیدروکربورها در یک میدان مغناطیسی قوی قرار بگیرند هسته‌های هیدروژن در جهت میدان توجیه شده و پلاریزه می‌شوند. به محض قطع میدان مغناطیسی قوی هسته‌های هیدروژن دوباره به حالت اولیه برمی‌گردند. برگشت هیدروژنها به حالت اولیه زمانی به طول خواهد انجامید. این زمان، زمان آرامش [۲] نامیده می‌شود و به ویژگیهای سیال و نوع سنگها بستگی دارد. در اثر چرخش هسته‌های هیدروژن و بازگشت آنها به شرایط نخستین، یک میدان مغناطیسی ایجاد می‌شود. این میدان مغناطیسی می‌تواند در سیم‌پیچ گیرنده یک جریان

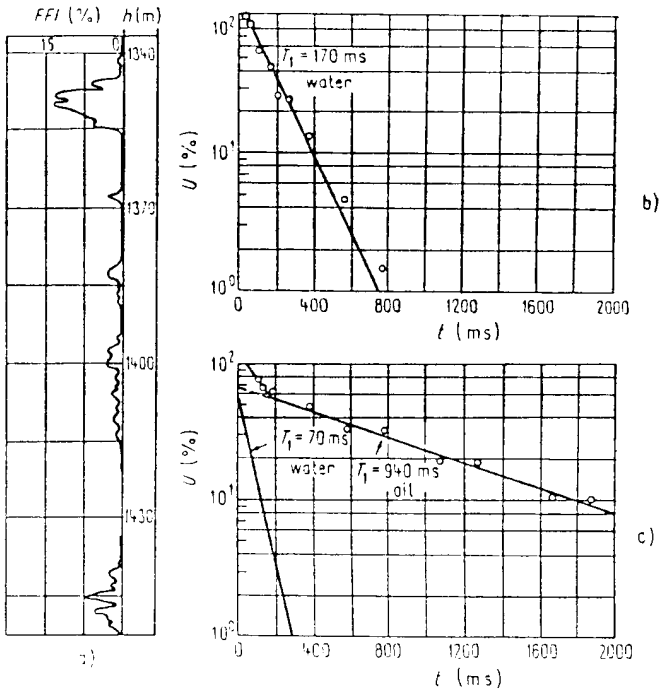
1. Nuclear Magnetism Log
2. Relaxation Time

متناوب ایجاد کند. این جریان بلافاصله پس از قطع میدان مغناطیسی نخستین اندازه‌گیری می‌شود. ولتاژ حاصل شده در اثر این جریان هماهنگ با میزان هیدروژن موجود در سیال است. روشن است که هیدروژن موجود در هیدروکربورهای جامد مانند آسفالت و هیدروژن موجود در بخشهای جامد سنگ نمی‌تواند در جهت میدان توجیه شود و تاثیری در اندازه‌گیرها ندارد.

کاربرد نمودار NML

۱- از نمودار NML می‌توان در چاههای نفت و آب برای برآورد شاخص سیال آزاد(FFI) استفاده نمود. شاخص سیال آزاد نمایانگر میزان سیالی است که در اثر پمپاژ می‌توان از چاه بدست آورد. گفتنی است که بخشی از سیال که به علت کشش سطحی به دیوارهٔ حفره‌ها چسبیده باشد، معمولا با پمپاژ قابل استخراج نیست. این بخش تحت تاثیر میدان مغناطیسی قرار نمی‌گیرد و در نمودار NML نیز نقشی ندارد.

۲- از روش NML می‌توان برای تشخیص نوع سیال استفاده نمود. به این منظور در جاههای گزینش شده در ژرفای چاه، که FFI به اندازه کافی زیاد است، در فواصل زمانی معینی پس از قطع میدان مغناطیسی، ولتاژ بعنوان درصدی از ولتاژ اولیه اندازه‌گیری می‌شود. ولتاژهای اندازه‌گیری شده در زمانهای معین بر روی یک نمودار که محور افقی آن زمان بر حسب میلی ثانیه و محور قائم آن لگاریتم ولتاژهای اندازه‌گیری شده بر حسب درصدی از ولتاژ اولیه است،پیاده می‌شوند. اگر تمام نقاط در این نمودار بر روی یک خط قرار گیرند، یک نوع سیال وجود دارد (نمودار بالایی شکل ۷-۴) و اگر نقاط بر روی رو خط جداگانه قرار گیرند، دو نوع سیال وجود دارد (نمودار پایینی شکل ۷-۴).



شکل (۴-۷)

a نمونه‌ای از نمودار NML که برای شاخص سیال آزاد FFI تهیه است

b داده‌های ولتاژ - زمان مربوط به یک نوع سیال

C همان داده‌ها مربوط به دو نوع سیال (آب و نفت) [۳]

نمودارهای الکترو مغناطیسی

همانگونه که اشاره شد چاه‌پیمایی کاربرد گسترده‌ای در ارزیابی نفت خوان‌ها دارد. در چاه‌های نفت درصد اشباع هر یک از هیدروکربورها و آب از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. برای ارزیابی یک نفت خوان تفکیک هر یک از سیالها ضروری است. شناسایی آب از هیدروکربورها

معمولاً بر اساس مقاومت ویژهٔ آب‌های شور که نسبت به هیدروکربورها بسیار اندک است انجام می‌شود. اما در برخی موارد میزان نمکهای آب اندک است و تفاوت مقاومتهای ویژه آب و هیدروکربور درحدی نیست که به سادگی بتوان به وسیلهٔ روشهای مقاومت ویژهٔ الکتریکی آنها را از یکدیگر تمیز داد بنابر این نیاز به روش دیگری داریم که کمتر به میزان نمکهای آب و شوری آن وابسته باشد. تا به وسیلهٔ آن بتوان درصد اشباع از آب را برآورد نمود.

یکی از ویژگیهایی که در نفت و گاز با آب تفاوت چشمگیر دارد تراوایی دی الکتریکی [1] یا تراوایی نسبی دی الکتریکی است. بنابر این می‌توان از این ویژگی برای تمیز آب از هیدروکربورها استفاده نمود. تراوایی نسبی دی‌الکتریکی یا ثابت دی الکتریک هر ماده یک ثابت بدون بعد می‌باشد و عبارت است از نسبت تراوایی دی‌الکتریکی آن ماده به تراوایی دی‌الکتریکی هوا. ثابت دی الکتریک در سنگها به ترکیب کانی‌شناسی و ویژگیهای سیال پرکنندهٔ فضاهای خالی آنها بستگی دارد. این ثابت برای ماتریکس سنگها بین ۲ تا ۲۵ تغییر می‌کند. ثابت دی الکتریک گاز طبیعی و نفت حدود ۱ تا ۳ است در صورتیکه ثابت دی الکتریک آب شور بسته به میزان نمک آن ۵۶ تا ۸۰ و آب شیرین حدود ۷۸ می‌باشد. ثابت دی‌الکتریک به درجهٔ حرارت هم بستگی دارد.

ثابت دی الکتریک و کاهیدگی امواج الکترومغناطیسی با هم رابطه دارند. افزایش زمان کاهیدگی امواج الکترو مغناطیسی با کاهش ثابت دی‌الکتریک همخوانی دارد. بنابر این می‌توان نمودارهای الکترومغناطیسی را بر حسب تغییرات ثابت دی الکتریک مواد رسم نمود. ویژگیهای دی الکتریک و کندی الکترومغناطیسی برخی از سنگها و مواد مطابق جدول ۷-۱ است.

ابزار اندازه‌گیری روشهای الکترومغناطیسی

اساس اندازه‌گیری‌ها در روشهای الکترومغناطیسی سرعت گسترش امواج الکترومغناطیسی و

1. Dielectrical Permitivity Slowness

میرائی آنها در سازندهاست. شعاع کاوش ین روشها بستگی وارون به بسامد امواج الکترومغناطیسی گسیل شده از چشمه دارد یعنی با کاهش بسامد، شعاع کاوش افزایش می‌یابد. در چاه‌پیمایی از امواج با بسامدهای چند مگاهرتز تا افزون بر یک گیگاهرتز استفاده می‌شود.

جدول (۷-۱) ثابت دی الکتریک و زمان کاهیدگی الکترومغناطیسی برخی از مواد

مواد	ثابت دی الکتریک	زمان کاهیدگی الکترو مغناطیسی تانیه بر متر
سنگ آهک	۷/۵-۹/۲	۹/۱-۱۰/۲
دولومیت	۶/۸	۸/۷
ماسه‌سنگ	۴/۶۵	۷/۲
شیل	۵/۲۵	۷/۴۵-۱۶/۶
انیدریت	۶/۳۵	۸/۴
هالیت	۵/۶-۶/۳۵	۷/۹-۸/۴
ژیپس	۴/۱۶	۶/۸
کولوئیدهای خشک	۵/۷۶	۸
آب‌شور	۵۶-۸۰	۲۵-۳۰
آب شبرین	۷۸/۳	۲۹/۵
نفت	۲-۲/۴	۴/۷- ۵/۲
گاز	۱	۳/۳

ابزار EPT[1]

سوند ابزار EPT مجهز به دو فرستنده و دو گیرنده امواج الکترومغناطیسی است. گیرنده‌ها در وسط سوند و فرستنده‌ها در بالا و پایین گیرنده‌ها جاسازی می‌شوند. این سوند دارای یک بازو است که باعث چسبیدن بخش حساس سوند (بخشی که فرستنده‌ها و گیرنده‌ها در آن قرار دارند) به دیوارهٔ چاه می‌شود و به این ترتیب اثر گل حفاری تا حد چشمگیری کاهش می‌یابد. شعاع کاوش این دستگاه کم است و به کمتر از چند سانتیمتر محدود می‌شود.

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

در هر دو گونهٔ ابزار EPT، امواج الکترومغناطیسی با بسامد ۱/۱ گیگاهرتز به تناوب از هر یک از فرستنده‌ها گسیل می‌شود. و در هر یک از گیرنده‌ها دامنه و اختلاف فاز امواج اندازه‌گیری می‌شود. زمان گسترش امواج در فاصلهٔ بین دو گیرنده.از رابطهٔ زیر بدست می‌آید [۳].

$$T_p=\frac{p}{w}$$

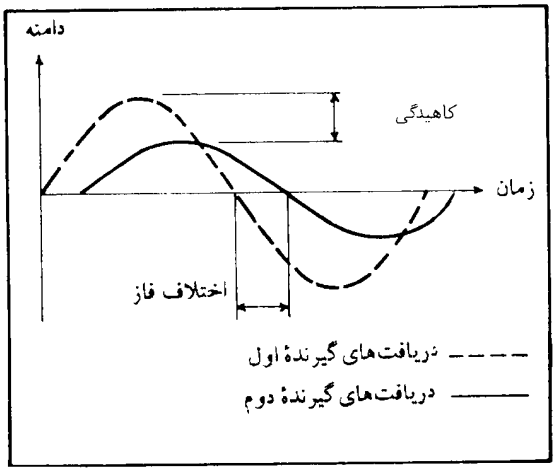
p اختلاف فاز

w سرعت زاویه‌ای

کاهیدگی امواج از بررسی دامنه‌های ثبت شده در دو گیرنده بدست می‌آید(شکل ۷-۵). برای هر یک از اندازه‌گیریها و در هر مرحله از دو فرستنده استفاده و از مقادیر حاصل میانگین گرفته می‌شود. سرعت اندازه‌گیریها بگونه‌ایست که در هر ثانیه ۶۰ اندازه‌گیری انجام می‌شود. اما معمولاً

1. Electromagetic Propagation Tool

اندازه‌گیریها در هر ۰/۴، ۱، ۱/۲، ۲ یا ۶ اینچ جمع شده و میانگین آنها برآورد می‌گردد و در حافظه نگهداری می‌شود.



شکل (۷-۵) انتشار و کاهیدگی امواج الکترومغناطیسی در هنگام رسیدن به گیرنده‌ها [۲]

از آنجا که امواج معمولاً به صورت کروی پخش می‌شوند، مقادیر کاهیدگی نیاز به یک تصحیح دارند که تصحیح مربوط به کاهیدگی گسترش کروی SL[1] نامیده می‌شود و از پیوند زیر محاسبه می‌شود.

$$A_c = A - (45 + 1.3t_p + 0.18t^2_p)$$

A_c کاهیدگی تصحیح شده بر حسب دسی‌بل برمتر

A کاهیدگی اندازه‌گیری شده

t_p زمان گسترش

1. Spherical Spreading Loss

ابزار EPT افزون بر فرستنده و گیرنده‌های الکترومغناطیسی، به یک ابزار میکرولوگ برای اندازه‌گیری مقاومت ویژهٔ گل و ناحیهٔ آغشته و یک سیستم فطرسنجی برای اندازه‌گیری قطر چاه و تغییرات آن نیز مجهز هستند.

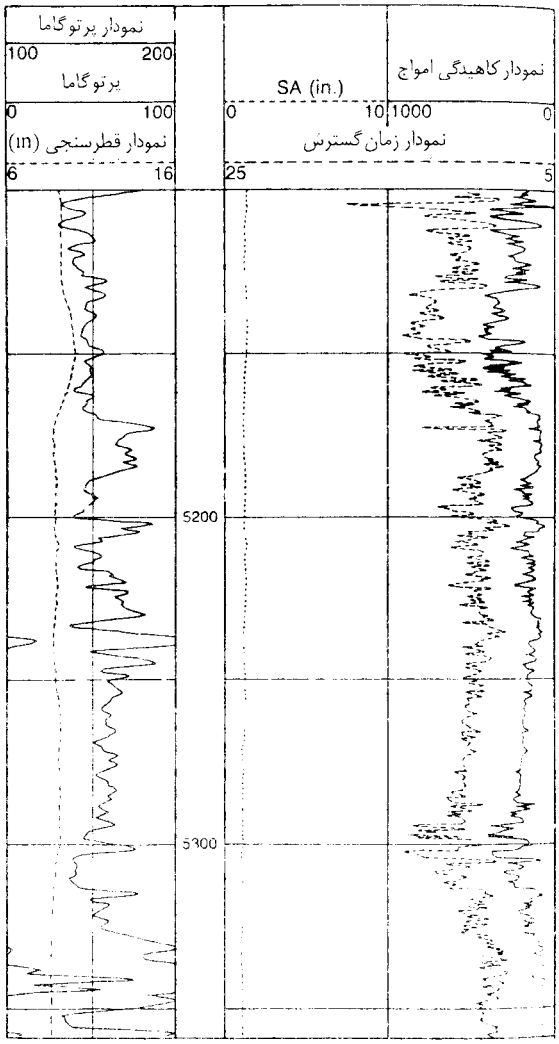
ارائه نمودارهای الکترومغناطیسی

نمودارهای الکترومغناطیسی برای کاهیدگی معمولاً بر حسب دسی‌بل بر متر و با مقیاس لگاریتمی و برای زمان گسترش بر حسب نانو ثانیه (یک میلیونیم ثانیه) برمتر، رسم می‌شود. شکل ۷-۶ نمونه ی از این نمودارها را همراه نمودارهای قطر سنجی و پرتوطبیعی گاما نشان می‌دهد. نمودارهای کاهیدگی معمولا با علامت اختصاری EATT[1] و نمودارهای زمان گسترش با علامت TPL[2] نشان داده می‌شوند. نمودارهای E.M معمولاً همراه نمودار قطرسنجی و گاهی همراه پرتوهای گاما و یا مقاومت ویژه (میکرولوگ) رسم می‌شود.

ابزار ADEPT[3]

همانگونه که اشاره شد شعاع کاوش ابزار EPT معمولی اندک است و نمودارهای EPT معمولی به شدت متاثر از شرایط فیزیکی گمانه، گل حفاری و کرهٔ چاه است. در ابزار ADEPT از آنتنی که ساده‌تر و دارای دیرکهای قابل پیش‌بینی‌تر می‌باشد استفاده می‌شود. از آنجا که کاهش گسترش کره‌ای SL در این ابزار معین است و بسادگی قابل تصحیح می‌باشد، مقادیر اندازه‌گیری شده دقیق‌تر هستند. دو نوع سوند با دو نوع آنتن متفاوت از این گونه ابزار وجود دارد.

1. Electromagnetic Attenuation
2. Time Propagation Log
3. Adaptable EPT



شکل (۶-۷) نمونه ی از نمودارهای FATT و TPL همراه نمودارهای گاما GR و قطرسنجی [۳]HD

تفسیر نمودارهای الکترومغناطیسی

همانگونه که اشاره شد به علت تاثیر زیاد آب روی نمودارهای الکترومغناطیسی در سازندهای آبدار این نمودارها بیشتر بیانگر میزان آب می‌باشند تا نوع سنگ، به علت شعاع کاوش کم این روشها که معمولاً کمتر از ۱۰ تا ۱۵ سانتیمتر است و گاه فقط به چند سانتیمتر محدود می‌شود. نتایج شدیداً تحت تأثیر گل حفاری و ناحیه فیلتره و آغشته قرار دارد. اگر زمان گسترش امواج در سیال و قسمت جامد سازند را داشته باشیم رابطهٔ زیر بین آنها برقرار است این رابطه شبیه رابطه‌ای است که در روش صوتی بدست آمد.

$$t_{pl} = \varphi t_{pf} + (1-\varphi) t_{pma}$$

t_{pl} زمان گسترش امواج الکترو مغناطیسی حاصل از نمودار (پس از اصلاحات لازم)

t_{pf} زمان گسترش امواج در سیال

t_{pma} زمان گسترش امواج در بخش جامد سنگ

φ تخلخل

حالت کلی‌تر این رابطه که برای محاسبهٔ اشباع از آب ناحیهٔ تراویده مورد استفاده قرار می‌گیرد به صورت زیر است.

$$t_{pl} = \varphi S_{xo} t_{pw} (1-S_{xo}) t_{pf} + (1-\varphi) t_{pma}$$

S_{xo} اشباع از آب ناحیه، تراویده

در هر صورت قبل از استفاده در پیوندهای بالا باید زمان گسترش (TPL) و کاهیدگی (EATT) برای پخش کروی اصلاح شوند. برای این منظور، روابط و نمودارهای اصلاحی وجود دارد که از آنها استفاده می‌شود.

اگر تخلخل را از نمودار EPTبرآورد کنیم داریم:

$$\varphi_{EPT} = \frac{t_{pl}-t_{pma}}{t_{pf}-t_{pma}}$$

حال با مقایسه تخلخل بدست آمده از این رابطه φ_{EPT} و تخلخل واقعی φ داریم:

$$S_{xo} = \frac{\varphi_{EPT}}{\varphi}$$

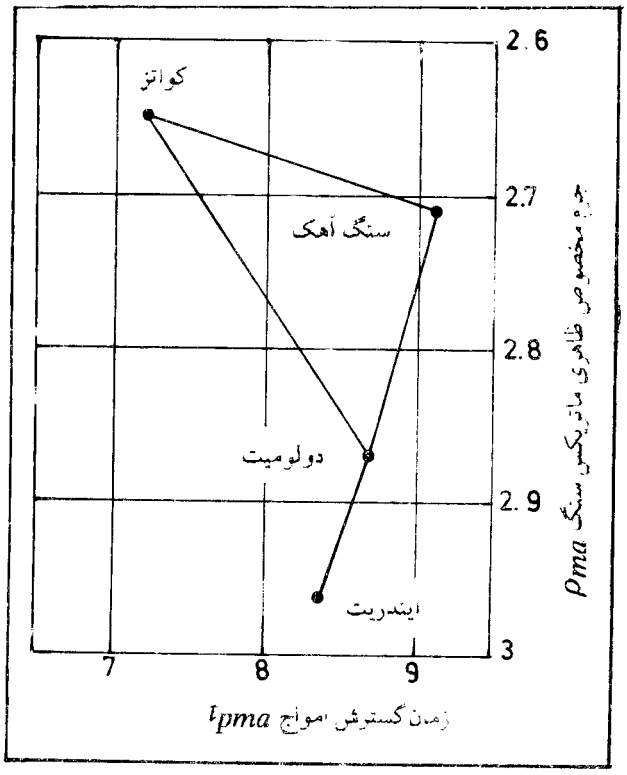
همانگونه که بیان شد برای استفاده از این روابط باید t_{pl} اصلاح شود. یکی از روشهای اصلاح به صورت زیر است:

$$t_{pl} = t_{plu} - \frac{A_c}{360}$$

t_{plu} زمان گسترش مواج الکترود معناطیسی قبل از اصلاح

A_c کاهیدگی اصلاح شده

برای برآورد t_{pma} از شکل ۷-۶ استفاده می‌شود.با داشتن جرم مخصوص ظاهری ماتریکس سنگ ρ_{pma} و دانستن نوع سنگ و یا سنگهای با درصدهای متفاوت از کانیهای مختلف می‌توان t_{pma} را برآورد نمود.



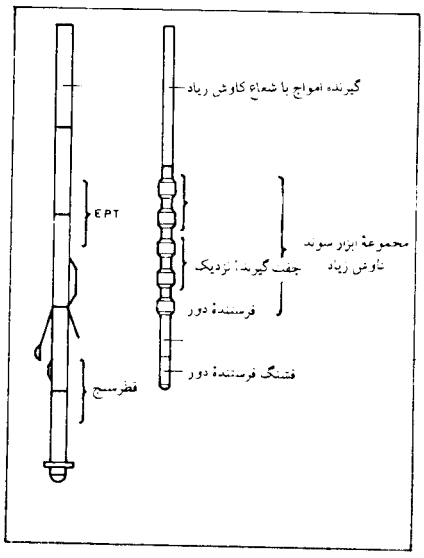
شکل (۷-۶) برآورد زمان گسترش امواج در ماتریکس سنگها با توجه به جرم مخصوص آنها [۶]

ابزار با شعاع گسترش زیاد[1] DPT

یکی دیگر از ابزار الکترومغناطیسی ابزار با شعاع گسترش زیاد است که دارای شعاع کاوش بیشتر از ابزار دیگر می‌باشد. سوند این ابزار می‌تواند مجهز به گیرنده‌های با شعاع گسترش کم نیز باشد. شکل (۷-۶). مانند ابزار معمولی الکترومغناطیسی در این ابزار نیز امواج الکترومغناطیسی از

1. Deep Propagation Tool (DPT)

بشود. شکل (۷-۶) مانند ابزار معمولی الکترومغناطیسی در این ابزار نیز امواج الکترومغناطیسی از فرستنده‌ها گسیل می‌شود. و فاز و دامنهٔ آنها به وسیلهٔ گیرنده‌ها دریافت می‌گردد. با توجه به فاز و دامنه‌های دریافت شده به وسیلهٔ گیرنده‌های پی‌درپی، اختلاف فاز و کاهیدگی محاسبه و سرانجام نتایج به صورت نمودارهای مربوط نگاشته می‌شود. اختلاف فاز را می‌توان به ثابت دی‌الکتریک تبدیل نمود و نمودار مربوط به ثابت دی‌الکتریک را رسم کرد. نتایج حاصل از گیرنده‌های دور با توجه به بازهٔ زیاد سوند و شعاع کاوش آن متأثر از ویژگیهای سازند است.



شکل (۷-۷) سوندهای DPT,EPT

فرستنده که امواج الکترومغناطیسی را با بسامد ۲۵ مگاهرتز گسیل می‌کند در قسمت پایین سوند و چهار گیرنده به ترتیب در فاصله‌های ثابت با فرستنده جاسازی شده‌اند. گیرنده‌های اول و دوم به صورت یک جفت گیرنده و گیرنده‌های سوم و چهارم نیز به صورت یک جفت گیرندهٔ دیگر مورد استفاده قرار می‌گیرند. سوند همچنین به یک سیستم قطرسنجی و یک ابزار مقاومت ویژه (به صورت یک خرد سوند) مجهز می‌باشد.

بر اساس داده‌های حاصل از جفت گیرنده‌های نزدیک (گیرنده‌های سوم و چهارم) و دور (گیرنده‌های اول و دوم) می‌توان ویژگیهای زیر را برآورد نمود. این برداشتها به وسیلهٔ شرکت شلومبرژه به صورت زیر نامگذاری شده‌اند.

برداشتهای نزدیک: برای این برداشتها از کاهیدگی و اختلاف فاز بین دو گیرندهٔ نزدیک استفاده می‌شود.

برداشتهای دور: برای این برداشتها از کاهیدگی و اختلاف فاز دو گیرندهٔ دور استفاده می‌شود.

برداشتهای کراس[1]**:** برای این برداشتها از کاهیدگی بین جفت گیرندهٔ نزدیک و از اختلاف فاز بین جفت گیرندهٔ دور استفاده می‌شود.

برداشتهای ژرف: برای این برداشتها از ترکیب داده‌های چهار گیرنده استفاده می‌شود.

برداشتهای نزدیک دارای شعاع کاوش کم بوده و معمولاً نشان دهنده ویژگیهای زون تراویده می‌باشد. برداشتهای دیگر، کمابیش به هم نزدیک هستند. استفاده از این سه برداشت می‌تواند به کسب نتایج مفیدتری ختم شود. با وجود شعاع کاوش نسبتاً زیاد این سوند، چنانچه شعاع ناحیهٔ تراویده و آغشته زیاد باشد داده‌های حاصل تحت تأثیر شرایط فیزیکی گمانه و گل حفاری قرار می‌گیرند.

با این روش می‌توان نمودارهای ثابت دی الکتریک، اشباع از آب، مقاومت ویژهٔ الکتریکی و

1. Cross

میزان کاهیدگی را بدست آورد. تفسیر نمودارها در بیشتر موارد مانند تفسیر نمودارهای روشهای الکترومغناطیسی معمولی است. اما با توجه به حجم بیشتر داده‌ها امکان استفاده از روشهای دیگر تفسیری نیز فراهم است. از آنجا که اشباع آب در ارزیابی مخازن هیدروکربوری از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، در ارزیابی این مخازن از روشهای ویژه‌ای استفاده می‌شود که معمولاً به وسیلهٔ شرکت شلومبرژه ابداع شده‌اند در این مورد می‌توان به انتشار شرکت شلومبرژه[1] در مورد تفسیر نمودارهای الکترومغناطیسی مراجعه نمود.

1. Schlumberger Interpretation Log

تمرین و پرسش

۱- اگر جرم مخصوص ظاهری سنگی ۲/۸ گرم بر سانتیمتر مترمکعب باشد و سنگ ترکیبی از دولومیت و آهک باشد زمان گسترش امواج EM در ماتریکس این سنگ چقدر است؟

۲- اگر سنگ فوق متشکل از دولومیت و کوارتز باشد زمان گسترش چقدر است؟

۳- اگر زمان گسترش امواج EM 7.5 میکروثانیه بر فوت باشد نوع سنگ را مشخص کنید.

۴- نمودارهای شکل ۷ -۶ را تفسیر کنید.

۵- نمودار NML ارائه شده در شکل ۷-۴ را تفسیر کنید.

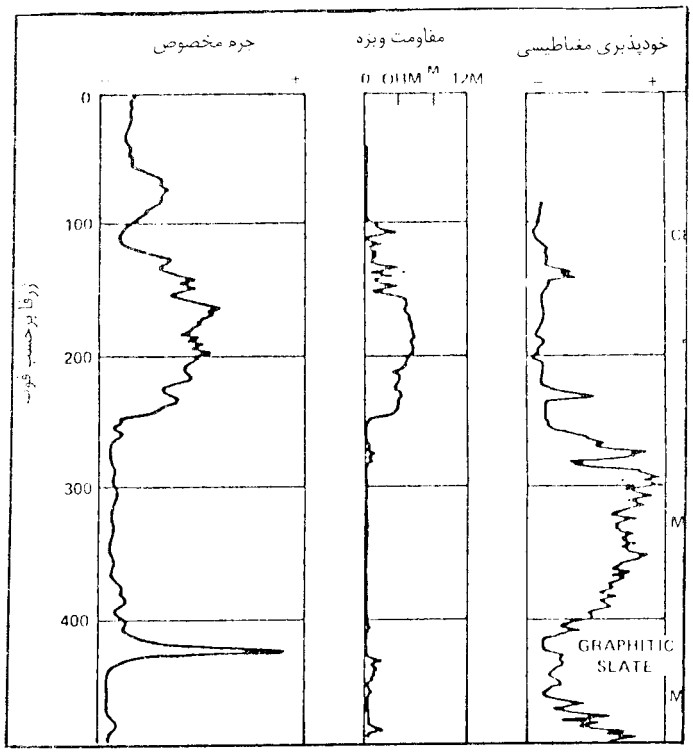
۶- نمودارهای ارائه شده در شکل ۷-۲ را بطور کامل تفسیر کنید و با توجه به ستون سنگ‌شناسی علت تغییرات نمودار را در نقاط مختلف بیان کنید.

۷ - موارد مهم کاربردهای روشهای مغناطیسی را بنویسید.

۸- کاربردهای روشهای الکترومغناطیسی را بنویسید. آیا از این نمودارها در معادن هم می‌توان استفاده نمود؟

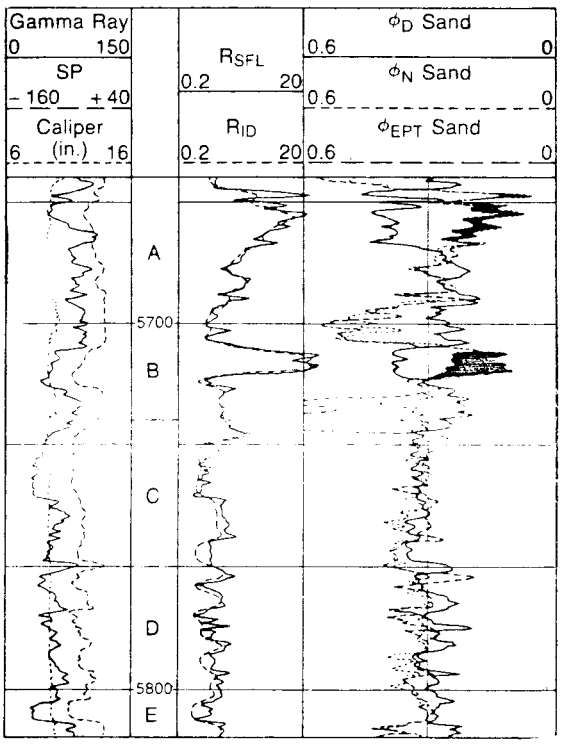
۹- شکل ۷-۸ در چاهی که در منطقهٔ حاوی سنگهای اسلیت، چرتهای مگنتیت دار و سنگهای دیگر می‌باشد حفر شده است. محلهایی که در آنها مگنتیت وجود دارد را مشخص کنید.
آیا می‌توانید در مورد درصد مگنتیت داوری کنید؟

۱۰- شکل ۷- ۹ نمونه‌ای از نمودارهای تخلخل بدست آمده از روشها EPT، نترون - نترون و جرم مخصوص همراه نمودارهای مقاومت ویژه، SP ، GR و قطرسنجی را نشان می‌دهد ضمن تفسیر نمودار در مورد اختلاف تخلخل‌های بدست آمده از روشهای مختلف بحث کنید.



شکل (۷-۸) نمونه‌ای از نمودارهای تخلخل بدست آمده از روشهای مختلف همراه

نمودارهای الکتریکی، GR و قطرسنجی [۶]



شکل (۷-۹) نمونه‌ای از نمودارهای تحلیل بدست آمده از روشهای EPT، نترون - نترون و جرم مخصوص همراه نمودارهای مقاومت ویژهٔ الکتریکی، SP و قطرسنجی [۲]

۸

نمودارهای ویژگیهای هندسی گمانه و لایه‌ها

ویژگیهای هندسی گمانه مانند شیب، جهت شیب و قطر گمانه و شیب و جهت شیب لایه‌ها به وسیلهٔ برخی از نمودارها بررسی می‌شوند. مهمترین این نمودارها عبارتند از قطرسنجی، شیب‌سنجی و نمودار میل گمانه.

نمودار قطر سنجی[1] CL

قطر گمانه در طول چاه یکسان نیست و در نقاط مختلف تغییر می‌کند. علت تغییرات قطر چاه وجود زونهای خرد شده و سست است که باعث ریزش دیوارهٔ چاه شده و قطرچاه افزایش می‌یابد. (گاهی تورم برخی از سنگها مانند شیلها سبب کاهش قطر گمانه می‌شود) افزایش قطرگمانه که به‌وسیلهٔ مایع حفاری پرشده است اثر نامطلوبی روی بسیاری از اندازه‌گیری‌ها می‌گذارد. برای تصحیح این اثر لازم است از قطر چاه در هر نقطه از آن اطلاع دقیق در دسترس باشد. به همین منظور نمودار قطر سنجی برداشت می‌شود.

ابزار قطرسنجی

سوندهای قطرسنجی متنوع‌ترین سوندهای چاه‌پیمایی هستند و دارای ساختمان گوناگون می‌باشند اما پایه و منطق الکتریکی تمام آنها یکسان است. سوندهای قطرسنجی از سه یا بیشتر

1. Caliper Log (CL)

زبانهٔ مکانیکی که فنری پشت آنها قرار گرفته تشکیل شده‌اند. فنرها باعث می‌شوند که هنگام حرکت سوند در چاه، زبانه‌ها به دیوارهٔ چاه چسبیده باشند و میزان باز و بسته شدن آنها به وسیلهٔ قطرگمانه کنترل شود. میزان باز و بسته شدن زبانه‌ها سبب تغییر در مقاومتهای الکتریکی نصب شده در پشت آنها می‌شود و این امر باعث تغییر اختلاف پتانسیل دو سر مقاومت می‌شود.

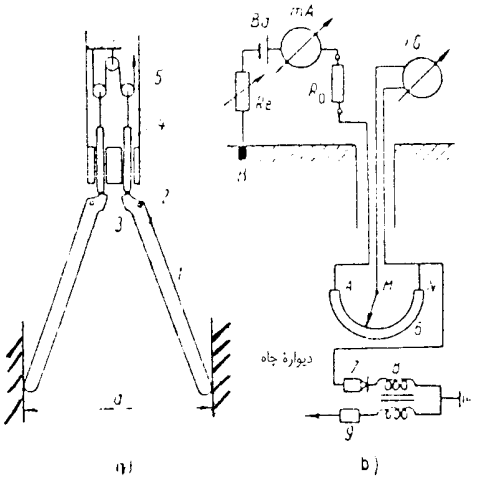
اگر تعداد زبانه‌ها را چند جفت زبانه در نظر بگیریم، بین هر جفت روبروی هم می‌توان اختلاف پتانسیل را اندازه‌گیری و از اختلاف پتانسیلهای بدست آمده میانگین گرفت (شکل ۸-۱). در این حالت متوسط قطر گمانه از رابطهٔ زیر محاسبه می‌شود.

$$d = d_O + k\frac{\Delta V}{I}$$

d	قطرگمانه بر حسب سانتیمتر یا اینچ
I	شدت جریان میلی‌آمپر
ΔV	اختلاف پتانسیل بر حسب میلی‌آمپر
K, d_O	ثابت‌هایی هستند که با کالبیره کردن دستگاه بدست می‌آیند.

باید توجه نمود بدین ترتیب متوسط قطر گمانه بدست می‌آید. زیرا در بعضی جهت‌ها ممکن است قطرگمانه متفاوت با جهت‌های دیگر باشد. از طرف دیگر d_O از قطر سرمته کوچکتر در نظر گرفته می‌شود. زیرا در مواردی تورم سنگها بویژه شیلها و یا ریزش‌های ناقص باعث می‌شود که قطرگمانه از قطر سرمته‌ای که گمانه با آن حفر شده کمتر شود.

آنچه از این روش بدست می‌آید همانگونه که اشاره شد، یک قطر متوسط از گمانه است. اگر به اطلاعات بیشتری در مورد شکل گمانه نیاز باشد از قطرسنجهای ویژه‌ای می‌توان استفاده نمود که شکل سنج چاه نامیده می‌شود.



شکل ۸-۱ نمونه‌ای از ابزار قطر سنجی
a - مکانیکی b - الکتریک

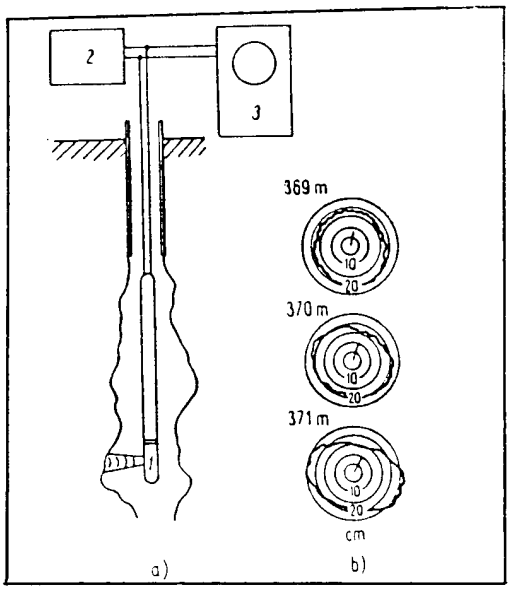
شکل سنج چاه[1]

این سوند در واقع نوع ویژه‌ای از قطرسنج است که چند (معمولاً ۲ تا ۴) جفت زبانه همان گونه که برای قطرسنجهای معمولی گفته شد در آن جاسازی شده است. پشت هر یک از جفت زبانه‌ها یک مقاومت الکتریکی قرار گرفته است. باز و بسته شدن این جفت زبانه‌ها باعث تغییر مقاومت الکتریکی و در نتیجه تغییر اختلاف پتانسیل در دو سر مقاومت می‌شود. تفاوت عمدهٔ شکل سنج با قطرسنج در این است که در شکل سنج اندازه‌گیریها برای هر جفت زبانه به صورت جداگانه انجام می‌شود و می‌توان قطرچاه را در جهت‌های مختلف برآورد نمود. سرانجام با توجه به نتایج بدست آمده شکل تقریبی (برش افقی) چاه در هر ژرفایی قابل برآورد است

1. Well Profiler

شکل سنج فرا آوایی [۱]

برای تعیین دقیق شکل گمانه (برش افقی) از دستگاه شکل سنج فرا آوایی استفاده می‌شود. این دستگاه مجهز به یک فرستندهٔ و یک گیرندهٔ امواج فراآوایی است. امواج گسیل شده از فرستنده از گل حفاری عبور نموده و پس از برخورد به دیوارهٔ چاه دوباره به گل بازتاب شده و به وسیلهٔ گیرنده دریافت و زمان دریافت آنها نگاشته می‌شود. با توجه به زاویهٔ تابش و بازتابش و فاصلهٔ فرستنده و گیرنده و سرعت امواج در گل حفاری (در چاه‌های خشک سرعت در هوا)، از زمان دریافت می‌توان قطر گمانه را در جهت‌های مختلف برآورد نمود (شکل ۸-۲). سوند ضمن حرکت در محور گمانه یک حرکت چرخشی دارد و در هر لحظه دو اندازه‌گیری انجام می‌شود یکی زمان رفت و برگشت امواج و دیگری جهت شمال مغناطیسی. به این ترتیب کل دیواره چاه در تمام ژرفاها مورد برداشت قرار می‌گیرد.



شکل (۸-۲) شکل سنج فرا آوایی و برش افقی چاه در ژرفای ۳۶۹، ۳۷۰ و ۳۷۱ متری
حاصل از نتایج شکل سنجی ماورء صوتی [۳]

1. Ultrasonic Profilometer

کاربردهای قطرسنجی

نتایج حاصل از قطرسنجی و شکل سنجی گمانه این امکان را فراهم می‌آورد که در هر نقطه قطرگمانه و شکل آنرا تعیین نمود، قطرگمانه در موارد زیرکاربرد دارد.

- انجام تصحیحات نمودارهای هسته‌ای (رادیواکتیوتیه) بویژه در برآوردهای کمی
- انجام تصحیحات نمودارهای SP و بررسی اثر تغییرات قطرگمانه روی شکل نمودار SP
- انجام تصحیحات نمودارهای صوتی
- انجام تصحیحات نمودارهای مربوط به برآورد تخلخل
- انجام تصحیحات نمودارهای مربوط به برآورد جرم مخصوص
- انجام تصحیحات مربوط به برداشتهای هیدروژئولوژیکی مانند:

سرعت آب در گمانه در جهت قائم و آبدهی گمانه

- برآورد شیب و امتداد لایه‌ها و ساختارهای صفحه‌ای شکل
- برآورد سیمان مورد نیاز سیمانکاری پشت لولهٔ جداری
- تعیین زونهای خردشده
- تعیین زونهای سست
- تعیین نقاط ریزش
- تعیین زونهای تورمی

نمودار میل سنجی[1]

در بسیاری از موارد بویژه برای ارزیابی ذخیره، ارتباط بین سازندها و پیکره‌های زمین‌شناسی در چاه‌های مختلف. برآورد شیب، امتداد و ضخامت لایه‌ها و... باید زاویه میل گمانه (انحراف از حالت

1. Inclinometery

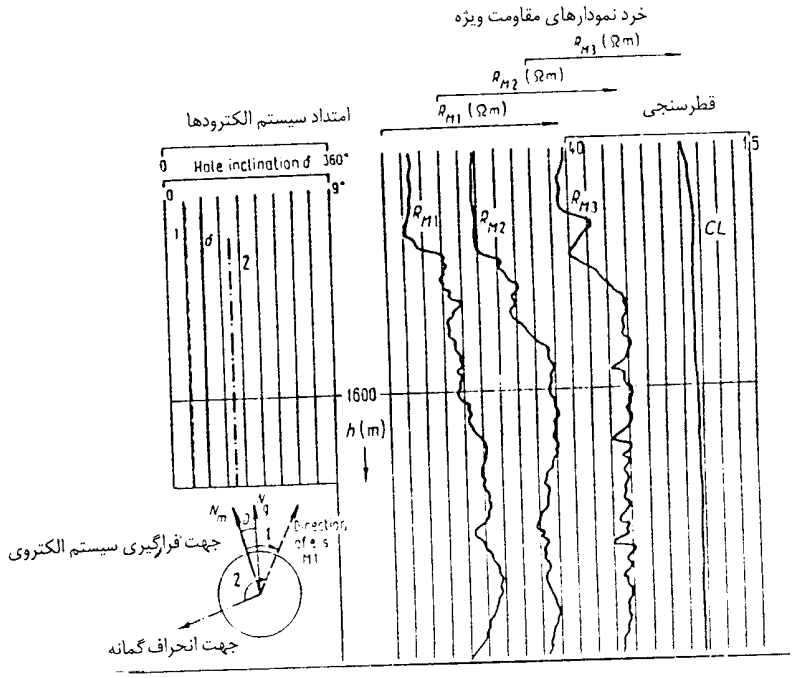
قائم) مشخص باشد تاکنون ابزار متفاوتی برای اندازه‌گیری زاویه میل گمانه‌ها ساخته و مورد بهره‌برداری قرار گرفته است. از جمله، میل سنج الکتریکی [۱] با عقربه مغناطیسی ساخت روسیه مدل (Ik-Z MI-30)، میل‌سنج الکتریکی با ژیروسکوپ مدل (I636-IG-50) ساخت جمهوری چک، میل سنج تصویری ساخت آلمان و... میل سنجهای مکانیکی، میل سنجهای شیمیایی و... به‌وسیلهٔ میل سنج‌ها میزان زاویهٔ میل و جهت میل گمانه در هر لحظه از ژرفای گمانه اندازه‌گیری می‌شود. در مورد میل‌سنجها در کتابهای حفاری به تفضیل بحث شده است.

نمودارهای شیب سنجی[۲]

برداشتهای شیب‌سنجی و تهیهٔ نمودارهای شیب سنجی (DML) امکان برآورد زاویه شیب و جهت شیب لایه‌ها و ساختارهای صفحه‌ای شکل را فراهم می‌آورد. وسیلهٔ اندازه‌گیری نمودارهای شیب‌سنجی، شیب‌سنج نامیده می‌شود. شیب‌سنجها بر اساس ترکیب ابزار میل سنجی و حداقل سه خرد سیستم مقاومت ویژه (به صورت میکرولترولوگ و یا خرد نمودارهای دیگر) با توان جدایش زیاد در جهت قائم[۳]، ساخته می‌شوند. خرد سیستم‌ها، مقاومت ویژه الکتریکی را در حداقل سه فاصلهٔ مساوی از یکدیگر در دیوارهٔ چاه اندازه‌گیری می‌کنند. این سه سیستم که به صورت شکل (۸-۴). روی سوند جاسازی شده‌اند. مجهز به یک سیستم هیدرولیکی هستند که آنها را به دیوارهٔ چاه می‌چسباند. به وسیلهٔ این سه سیستم، سه نمودار مقاومت ویژه بطور هم زمان رسم می‌شود (شکل۸-۳). اگر لایه‌بندی عمود بر گمانه باشد، وقتی که سوند به ناپیوستگی‌های مقاومت ویژه‌ای می‌رسد تغییرات مقاومت ویژه‌های نگاشته شده به وسیلهٔ هر سه سیستم در یک ژرفا نگاشته می‌شود اما اگر ناپیوستگی‌های مقاومت ویژه‌ای (همبری لایه‌های با مقاومت ویژهٔ متفاوت) عمود بر

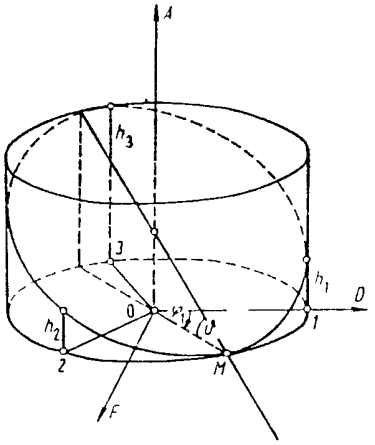
1. Electrical Inclinometer 2. Dipmeter Survey Logging (DSL)
3. High Vertical Resolution

محور گمانه نباشد یعنی برای گمانهٔ قائم اگر لایه‌بندی افقی نباشد، بسته به زاویهٔ شیب لایه‌بندی هر یک از سه خرد سیستم مقاومت ویژه در ژرفاهای مختلف به سطح همبری می‌رسند. بنابر این تغییرات مقاومت ویژه در ژرفاهای متفاوت ثبت می‌شود.



شکل (۸-۳) نمونه‌ای از اندازه‌گیریهای شیب‌سنجی و خرد نمودارهای مقاومت ویژهٔ الکتریکی [۳] در سمت چپ مقطع سوند مجهز به سه خرد سیستم مقاومت ویژه، جهت و زاویه میل چاه و جهت خرد سیستمهای مربوط دیده می‌شود و در سمت راست خرد نمودارهای مقاومت ویژهٔ الکتریکی و نمودار قطرسنجی (CL) ارائه شده است.

با توجه به جاسازی فضایی خرد سیستم‌های مقاومت ویژهٔ الکتریکی (شکل ۸-۴) می‌توان شیب و امتداد ناپیوستگی‌های مقاومت ویژه‌ای را تعیین نمود.



شکل (۸-۴) تصویر فضایی گمانه حفاری با محور A و محل برخورد خرد سیستم‌های مقاومت ویژه الکتریکی با ناپیوستگی مقاومت ویژه‌ای در ژرفاهای h_1 و h_2 و h_3 و نحوهٔ برآورد شیب ناپیوستگی V و راستای آن φ [۳]

با توجه به شکل ۸-۴، اگر خرد سیستم‌های مقاومت ویژه در ژرفاهای h_1 و h_2 و h_3 به ناپیوستگی مقاومت ویژه‌ای برسند و قطرگمانه برابر d و شیب ناپیوستگی (لایه‌بندی) برابر V فرض شود داریم:

$$h_1 = rTanV\,[1 - Cos\varphi_1]$$

$$h_2 = rTanV[1-Cos(\frac{2\pi}{3} - \varphi_1)]$$

$$h_3 = rTanV[1-Cos(\frac{4\pi}{3} - \varphi_1)]$$

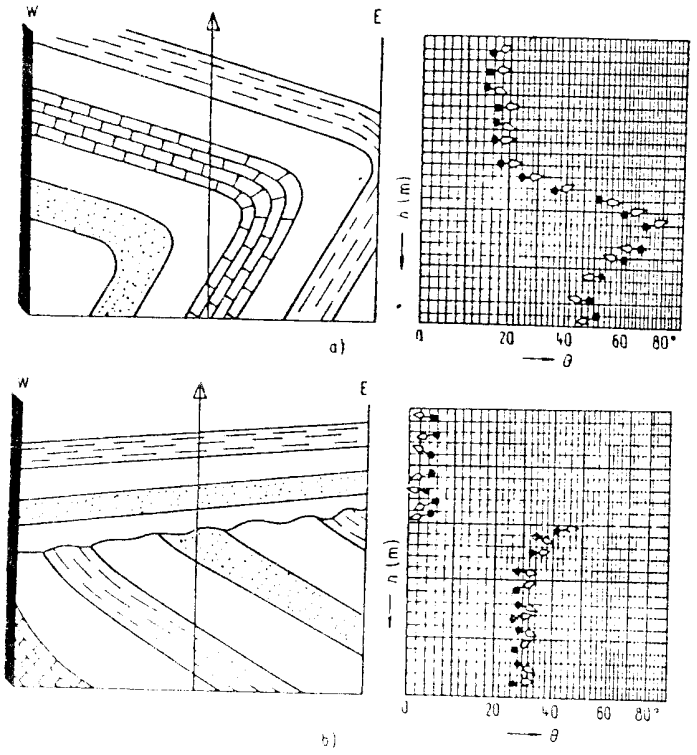
$$\Delta h_2 = h_2 - h_1 = rTanV[(Cos\varphi_1 - Cos\frac{2\pi}{3} - \varphi_1)]$$

$$\Delta h_3 = h_3 - h_1 = rTanV[(Cos\varphi_1 - Cos\frac{4\pi}{3} - \varphi_1)]$$

در روابط بالا φ_1 زاویهٔ بین جهت شیب لایه و جهت قرارگیری خردسیستم شمارهٔ ۱ است و r شعاع گمانه می‌باشد. در دو رابطهٔ آخر مقادیر φ_1 و V مجهول هستند و بقیه موارد معلومند لذا با دو

معادله و دو مجهول می‌توان φ_1 و V را محاسبه نمود و با توجه به اینکه زاویهٔ میل هر یک از خرد سیستمها وازجمله خرد سیستم شماره ۱ باشمال مشخص است، شیب وامتداد لایه‌بندی محاسبه می‌شود. در صورتیکه چاه در محل اندازه‌گیری قائم باشد شیب اندازه‌گیری شده شیب واقعی و در غیر اینصورت شیب ظاهری است. با داشتن زاویهٔ میل چاه می‌توان شیب ظاهری را به شیب واقعی تبدیل نمود.

ابزار پیشرفتهٔ شیب سنج کلیه داده‌ها را به صورت عددی و روی دیسکت‌های مغناطیسی ثبت می‌نماید و به صورت خودکار شیب و جهت شیب اندازه‌گیری می‌شود. نمونه‌ای از نتایج شیب‌سنجی در شکل ۸–۵ ارائه شده است.



شکل(۸-۵)نمونه‌ای از نتایج شیب‌سنجی حاصل از گمانه‌های حفرشده در شریط ساختاری سمت چپ [۶]

اگر نمودارهای مقاومت ویژهٔ حاصل از سه خرد سیستم یا چهار خرد سیستم را داشته باشیم از روش ترسیمی نیز می‌توان شیب و امتداد لایه‌بندی را بدست آورد. فرض کنید که یک تغییر شدید در سه منحنی در ژرفاهای ۹۶/۲۰، ۹۶/۲۵ و ۹۶/۳۵ متری مربوط به یک لایه‌بندی نگاشته شده باشد،خرد سیستم شماره ۱ در جهت خاور قرار گرفته باشد و قطر گمانه در محل اندازه‌گیری ۳۰ سانتیمتر باشد.

برای بدست آوردن شیب و جهت شیب لایه‌بندی دایره‌ای به شعاع ۳۰ سانتیمتر رسم می‌کنیم و محل سه خرد سیستم مقاومت ویژه را روی آن پیاده می‌کنیم و ارتفاع نسبی هر یک از آنها را می‌نویسم.

بین سیستم ۱ و ۳ ارتفاع ۹۶/۲۵ متر را پیدا می‌کنیم و از خرد سیستم شمارهٔ ۲ به آن وصل می‌کنیم امتداد لایه بدست می‌آید. برای بدست آوردن شیب V می‌توانیم بنویسیم.

$$\mathrm{Tan}V = \frac{\Delta}{\alpha}$$

Δ اختلاف خطوط تراز ۹۶/۲۰ و ۹۶/۲۵ متر است و α برحسب سانتیمتر برابر فاصلهٔ افقی این دو خط است که می‌توان آنرا با خط کش اندازه‌گیری نمود.

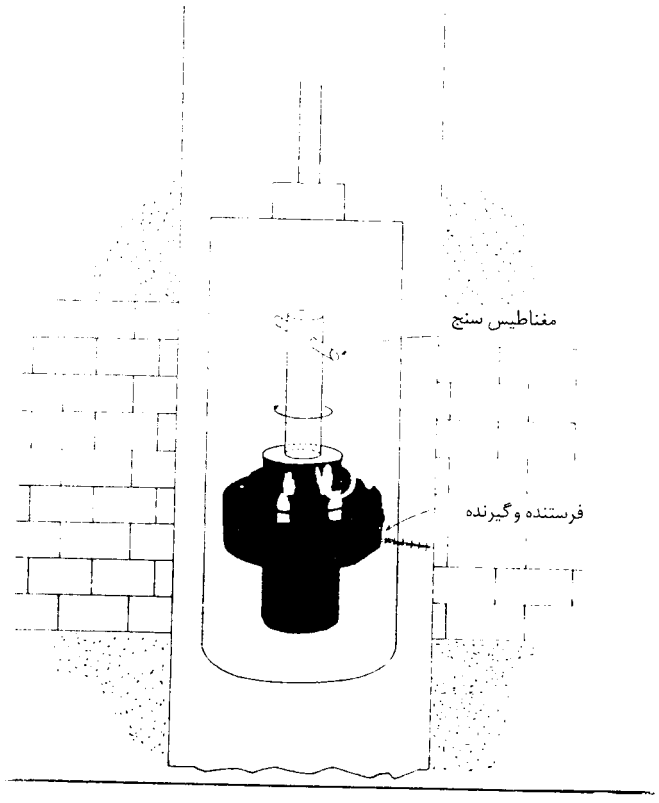
تصویربرداری از گمانه

تصویربرداری از دیوارهٔ گمانه‌ها به وسیلهٔ یک دستگاه که با استفاده از امواج صوتی کار می‌کند، انجام می‌شود. این ایستگاه، تلویزیون گمانه BHTV [1] نامیده می‌شود و دارای یک فرستنده و یک گیرندهٔ امواج صوتی است (شکل ۸-۶). امواج صوتی از فرستنده گسیل و پس از سپری کردن گل حفاری به دیوارهٔ چاه برخورد و دوباره به گل بازتابیده و به گیرنده می‌رسند. انرژی امواج باز تابیده و دریافت شده بستگی به انرژی امواج گسیل شده و سطح بازتاب کننده دارد چون انرژی تابش ثابت است می‌توان انرژی امواج بازتابش را به میزان صافی سطح بازتاب کننده یا دیوارهٔ چاه نسبت

1. Borehole TV

داد. در سنگ‌های سالم میزان بازتابش و انرژی امواج باز تابیده بیشتر از سنگهای خرد شده است. لذا با این روش می‌توان شکستگی‌ها و زونهای خرد شده را تشخیص داد.

سوند دو گونه حرکت در گمانه دارد. یکی حرکت بطرف پایین و دیگری حرکت چرخشی. در هر چرخش یک دور کامل از دیواره برداشت می‌شود و بعد سوند به اندازه ابعاد محدوده‌ای که در هر برداشت انجام می‌دهد در امتداد محور چاه حرکت می‌کند. بنابر این یک تصویر برداری کامل از دیوارهٔ چاه انجام می‌شود.



شکل (۸-۶) ابزار BHTV

نتایج حاصل به صورت تصاویر سایه روشن ارائه می‌شود هر چه دیوارهٔ چاه صاف‌تر باشد، انرژی امواج بازتابیده، بیشتر و تصویر روشن‌تر است. و در محل شکستگی‌ها تصویر تیره‌تر می‌شود بنابر این اثر شکستگی‌ها به صورت خطوط تیره روی تصویر آشکار می‌شود(شکل ۸-۶).

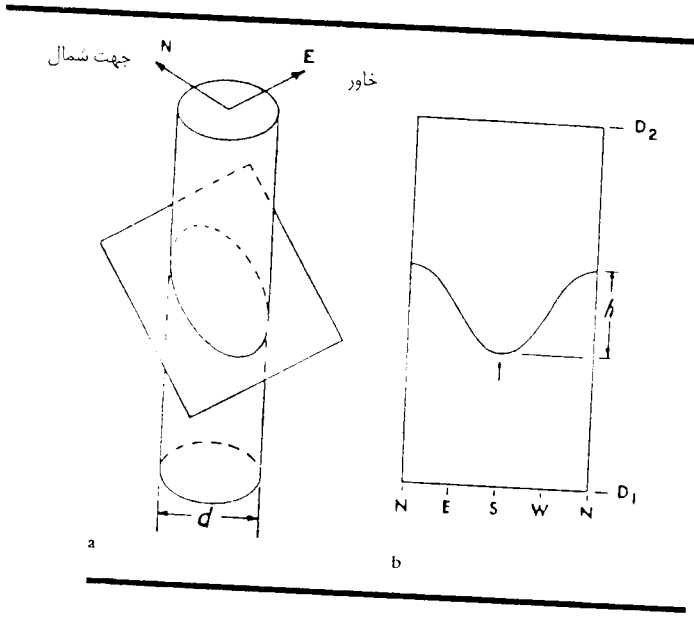
برای ارائه نتایج باید فرض کنیم که دیوارهٔ چاه به صورت قائم (در چاه‌های مایل در امتداد محور چاه) برش خورده و گسترده شده است. حال اگر شکستگی مانند درزه و یا یک لایه بسیار نازک سست در دیواره چاه وجود داشته باشد تصویر آن مانند شکلهای ۸-۷ و ۸-۸ است.

برای برآورد شیب درزه با توجه به شکل داریم:

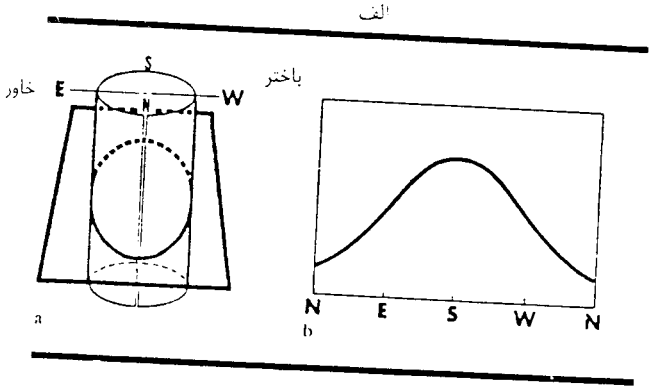
$$dipV = \text{Arc Tan}\frac{\Delta H}{d}$$

d قطرگمانه

ΔH اختلاف ژرفای بین دو اوج منحنی (بالاترین و پایین‌ترین محل برخورد درزه با دیوارهٔ چاه)

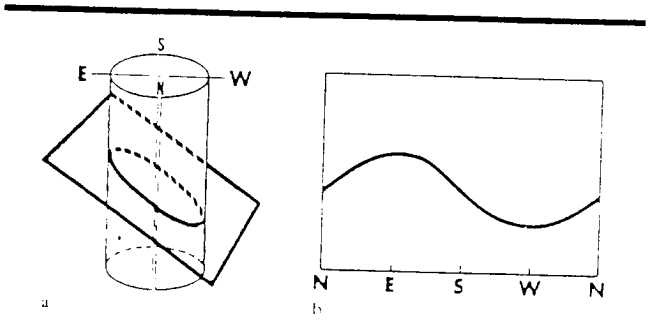


الف

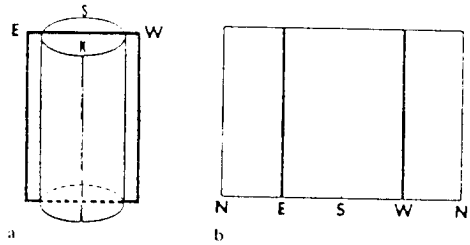


ب

شکل(۸-۷) الف: تصویر فضایی یک درزه در دیوارهٔ چاه و اثر آن روی تصویر BHTV
ب : تصویر فضایی یک درزه با امتداد E-W و اثر آن روی تصویر BHTV



الف



ب

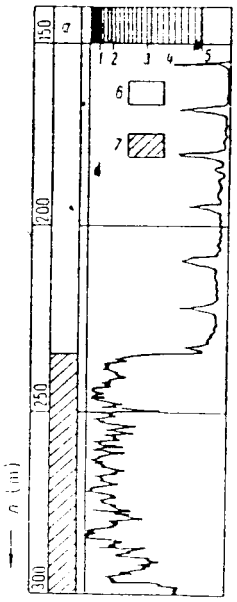
شکل (۸-۸) نمونه‌هایی از تصویرهای درزه‌ها در تصویر برداری تلویزیون گمانه
الف- یک درزه با روند شمالی - جنوبی و شیب به سمت باختر ب- یک درزه قائم خاوری -باختری

نمودار گیرش سیمان

برای کسب اطلاع از چگونگی گیرش سیمان و کیفیت سیمان‌کاری، می‌توان از دامنهٔ نوسان لولهٔ جداری در اثر امواج صوتی (یا از تغییرات درجه حرارت) استفاده نمود. در نقاطی که سیمان کاری بخوبی انجام نشده لولهٔ جداری در اثر دریافت موج به ارتعاش با دامنهٔ زیاد در خواهد آمد. اما در صورت خوب انجام شدن سیمانکاری دامنهٔ نوسان لولهٔ جداری در اثر دریافت موج کم خواهد بود.

سوند نمودار سیمان‌بندی مجهز به یک فرستنده و دوگیرنده که به ترتیب در فاصله‌های سه

و شش فوتی فرستنده جاسازی شده‌اند، می‌باشد. گیرندهٔ اول برای برداشت کیفیت سیمان‌بندی و گیرندهٔ دوم برای برداشت تغییرات وزن مخصوص بکار می‌رود. امواج صوتی بطور پی‌درپی و با بسامد معین به وسیلهٔ فرستنده تولید می‌شود. گیرندهٔ سیمان‌بندی طوری جاسازی شده که امواج صوتی را پس از عبور از لولهٔ جداری دریافت و زمان دریافت و همچنین دامنهٔ موج را اندازه‌گیری می‌نماید. اندازه‌گیری زمان به وسیلهٔ یک ساعت الکترونیکی انجام می‌شود. بدین ترتیب که همزمان با گسیل موج به وسیلهٔ فرستنده، ساعت شروع به کار و همزمان با دریافت آن به وسیلهٔ گیرنده ساعت متوقف می‌شود. برای اندازه‌گیری دامنه از یک دریچهٔ الکترونیکی استفاده می‌شود. این دریچه برای مدت معینی باز شده و دامنه‌های دریافتی را اندازه‌گیری می‌نماید. همانطور که توضیح داده شد میزان دامنه بستگی به کیفیت سیمانکاری دارد. لذا به کمک این نمودار می‌توان کم و کیف گیرش سیمان پشت لوله جداری را بررسی نمود (شکل ۸- ۹).



شکل (۸-۸) نمونه ی از نمود رگیرش سیمان پشت لولهٔ جداری

اگر فاصلهٔ سوند از دیواره چاه کم و زیاد شود (سوند هم محور با چاه نباشد) این تغییرات و این عدم تقارن روی زمان دریافت موج تاثیر گذارده و تولید اشکال می‌کند. برای دوری از این امر دستگاه مجهز به یک تمرکز دهنده است. این تمرکز دهنده بگونه‌ای عمل می‌نماید که فاصلهٔ سوند از لوله جداری همواره مقداری ثابت باشد به عبارت دیگر سوند و لولهٔ جداری حتی‌المقدور هم محور باشند. در مواردی که چاه انحراف از حالت قائم دارد به علت وزن سوند، علی‌رغم وجود سیستم تمرکز دهنده سوند با چاه هم محور نیست.

نمودار تغییرات وزن مخصوص و سیمانکاری

همانطور که در قسمت قبل توضیح داده شد امواج فرستاده شده مربوط به وزن مخصوص به وسیلهٔ گیرنده دورتر (دوم) دریافت می‌شود. گیرنده طوری جاسازی شده که هم امواجی را که از لوله جداری عبور می‌نمایند و هم امواجی را که از گل حفاری، لولهٔ جداری (ضخامت لوله) عبور نموده و مسافتی را هم در سازند سپری کرده و دوباره از مسیر لوله و گل به دریافت کننده رسیده‌اند، ثبت می‌کند. با توجه به اندازهٔ دامنه‌های امواج دریافتی خطوطی به تناوب سیاه و سفید را رسم می‌نماید (دامنهٔ مثبت به رنگ سیاه و دامنه منفی با رنگ سفید) ضخامت این خطوط متناوب با اندازهٔ دامنه رابطهٔ مستقیم و با کیفیت خوب سیمانکاری رابطه وارون دارد. امواج رسیده از سازند دارای دامنهٔ کمتری بوده و به صورت خطوط نازک و کم رنگ‌تر رسم می‌شوند.

در این روش برای اینکه ثبت دامنه‌های خیلی کم مطرح است، از روش دریچهٔ ثابت برای ثبت این دامنه‌های کم استفاده می‌شود. دو منحنی سیمان‌بندی و وزن مخصوص مکمل هم بوده و معمولا با هم مورد استفاده قرار می‌گیرند.

نمودار تغییرات درجه حرارت

تغییرات درجه حرارت در چاه چند علت اساسی دارد یکی گرادیان حرارتی است (افزایش

درجه حرارت با افزایش ژرفا) و عوامل دیگر جنس و خواص حرارتی سازندهای مختلف. وجود و حرکت سیال گرم یا سردتر از محیط اندازه‌گیری و... در چاههایی که با مایع حفاری، حفر می‌شوند، گل حفاری با حرکت مداوم خود در داخل چاه تا حدی تعادل حرارتی بین گل و سازندها را ایجاد می‌کند. اما اگر گل حفاری پمپ و بیرون آورده شود و یا برای مدتی ساکن باشد این تعادل حرارتی بهم خورده و میدانهای حرارتی از اطراف چاه به فراخور رسانندگی حرارتی و گرمای ویژه سازند به سمت چاه برقرار خواهد شد. روشن است که در ژرفاهایی که سازندها دارای گرمای ویژه کمتر و رسانندگی حرارتی بالاتر هستند فضای چاه زودتر گرم می‌شود و اگر پس از مدتی، نمودار تغییرات درجه حرارت برداشت شود. یک افزایش تدریجی درجه حرارت نسبت به عمق مشاهده می‌شود که مربوط به گرادیان حرارتی است و افزون بر آن تغییرات دیگری هم مشاهده می‌شود که به دلیل تفاوت رسانندگی گرمایی و گرمای ویژه سازند است.

یکی دیگر از استفاده‌های نمودار درجه حرارت کیفیت گیرش سیمان است، گیرش سیمان یک فرآیند حرارت‌زا است. لذا پس از عمل سیمانکاری با برداشت نمودار درجهٔ حرارت می‌توان به کیفیت سیمانکاری پی‌برد.

استفادهٔ دیگر نمودار درجهٔ حرارت، در مخازن گازی است. در این مخازن گاز تحت فشار است و وقتی که از مخزن خارج و در فضای چاه قرار می‌گیرد، منبسط می‌شود این فرآیند سرمازا است.

کاربرد مهم دیگر نمودار درجهٔ حرارت در چاههای آب و برای تشخیص لایه‌های آبده و محل و جهت حرکت آب در چاه است.

برای برداشت نمودار درجهٔ حرارت از مقاومتهای الکتریکی که در مقابل درجه حرارت حساسیت زیاد دارند، استفاده می‌شود. تغییرات مقاومت روی جریان برگشتی اثر گذارده و سبب تغییر آن می‌شود. با تبدیل مقادیر فیزیکی اندازه‌گیری شده و اعمال ضرایب لازم در دستگاه پردازشگر، نتیجه به صورت نمودار درجه حرارت نگاشته می‌شود.

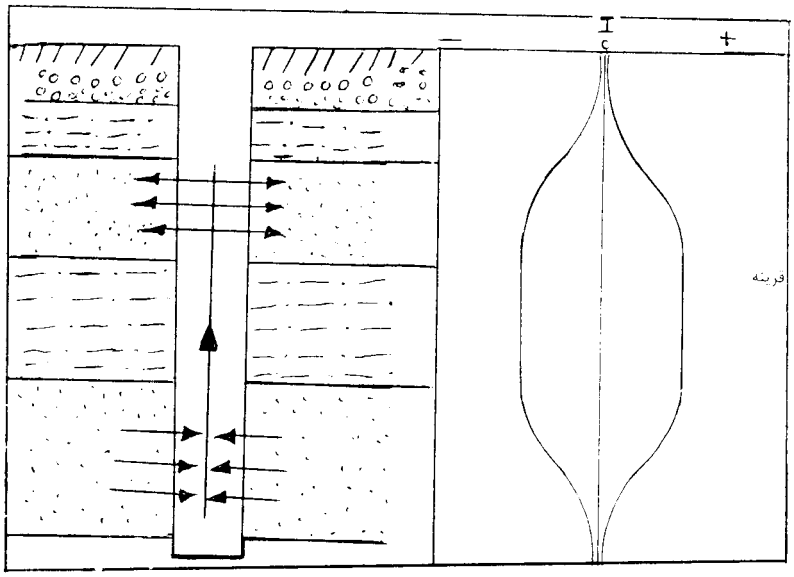
نمودار میل و انحراف چاه

محور چاه معمولاً به صورت یک خط راست نبوده بلکه در اثر عوامل متعددی از حالت راست خارج می‌شود این مسئله سبب می‌شود دو پارامتر مطرح و اندازه‌گیری شوند. یکی زاویه بین محور چاه و خط قائم (زاویه میل یا زاویه انحراف از حالت قائم) و دیگر جهتی که محور چاه بطرف آن منحرف شده است (آزیموت) که همان زاویه بین تصویر افقی چاه و امتداد شمال است. میل سنجها انواع مکانیکی، شیمیائی الکتریکی و اپنیک دارند که همگی مجهز به یک سیستم الکترو مغناطیسی نیز می‌باشند (جهت مطالعه بیشتر می‌توان به کتابها و جزوات حفاری مراجعه نمود). اندازه‌گیری میل و آزیموت محور چاه در ارزیابی ذخایر معدنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. زیرا در یک منطقه اکتشافی پیوند میان لایه‌ها در چاههای حفر شده لازم است و برای این منظور باید دو مشخصه فوق را در هر نقطه برداشت نمود. تغییرات آزیموت از ۰ تا ۳۶۰ درجه و تغییرات زاویه میل از ۰ تا ۹۰ درجه می‌باشد. نمودار مربوط به دو مشخصه فوق بطور توام رسم می‌شوند مقیاس هر دو نمودار به صورت خطی است.

نمودار حرکت سیال

پس از حفر چاه شرایط تعادل سیالها در زمین بهم خورده و سیال از سازندهای تحت فشار به بیرون و یا به سازندهای تراوایی که امکان پذیرش سیال را دارند تراوش می‌کند. دانستن این نکته که کدام سازند می‌تواند سیال را جذب کند در طراحی لوله گذاری چاه و تجهیز آن جهت بهره‌برداری لازم است. در نمودار حرکت سیال از یک سیستم الکترو مغناطیسی که مانند یک ژنراتور کار می‌کند استفاده می‌شود. سوند مربوطه متشکل از یک سیم پیچ و یک مبدان مغناطیسی است. اگر یکی از این دو چرخش نماید، طبق قانون القاء الکتریکی جریانی در سیم پیچ ایجاد می‌شود که شدت

آن متناسب با سرعت حرکت است. سوند مجهز به پروانه‌ای است که در فضای خارجی و در قسمت انتهایی آن قرار دارد. این پروانه به سیم پیچ وصل است و در اثر حرکت سوند در چاه هوای موجود در فضای چاه از لابلای پره‌های پروانه عبور نموده و باعث چرخش آن می‌شود. این چرخش هم به نوبه خود باعث چرخش سیم‌پیچ شده و در نتیجه در مدار جریانی القاء می‌شود. اگر سرعت جابجایی سوند در چاه یکنواخت و فشار هوای چاه هم ثابت باشد نموداری که حاصل می‌شود تغییراتی را نشان نمی‌دهد ولی اگر بعنوان مثال گاز و یا سیال از سازندی خارج و به سازند دیگری نفوذ کند در مسیری که این گاز یا سیال سپری می‌کند، حرکت گاز یا سیال باعث تغییر میزان حرکت پروانه شده و در نمودار نگاشته شده تغییراتی پدید می‌آید(شکل ۸-۱۰).



شکل (۸-۱۰) نمودار حرکت سیال در دو برداشت از پایین به بالا و از بالا به پایین [۱۱]

این نمودار دوبار برداشت می‌شود یکی هنگام حرکت سوند از بالا به پایین و دیگری هنگام حرکت سوند از پایین به بالا چون جهت حرکت مخالف هم است نمودارهای حاصل در محل حرکت گاز تغییراتی خلاف جهت یکدیگر نشان می‌دهند (شکل ۸-۱۰). در گمانه‌هایی که دارای گل حفاری باشند نیز می‌توان از نمودار حرکت سیال استفاده نمود در این حالت حرکت سوند در گمانه با سرعت ثابت و برخورد گل با پره‌های پروانه، سبب حرکت پروانه شده و یک جریان ثابت در سیم پیچ القا می‌شود. اگر در نقاطی از چاه سیال حرکت داشته باشد، حرکت این سیال باعث افزایش شدت جریان القاء شده می‌شود.

پرسش و تمرین

۱- تفاوت قطرسنج و شکل‌سنج چیست؟

۲- کاربردهای نمودار میل‌سنجی چیست؟

۳- با توجه به شکل ۸-۴ و روابط هندسی مربوط به آن، شکل مربوط به یک سوند دارای چهار سیستم الکترودی را رسم نموده و روابط هندسی مربوط را برای برآورد شیب ناپیوستگیهای مقاومت ویژه (همبریها) بنویسید.

۴- استفاده از نمودار درجهٔ حرارت برای اندازهٔ جهت حرکت سیال افقی و قائم در گمانه‌ها را شرح دهید.

۵- تفاوت کاربرد روشهای نمودار حرکت سیال و درجهٔ حرارت را دربرآوردهای مربوط به حرکت سیال بیان کنید.

۶- از کدامیک از روشهای این فصل می‌توان برای اطلاع حاصل کردن از کیفیت مشبک‌سازی لولهٔ جداری استفاده نمود.

۷- مهمترین روش ارائه شده در این فصل کدام است؟ چرا؟

۸- از کدامیک از روشهای این فصل می‌توان در کانسارهای فلزی استفاده نمود؟ چگونه؟

۹- از کدامیک از روشهای این فصل می‌توان در کانسارهای ذغال سنگ استفاده نمود؟ چگونه؟

۱۰- از کدامیک از روشهای این فصل می‌توان در مطالعات ژئوفیزیکی محیط زیست استفاده نمود؟

۱۱- آیا از این روشها می‌توان در بررسیهای زلزله‌شناسی هم استفاده کرده چگونه؟

۹

برآورد مقاومت ویژه آب سازند و اشباع از آب

برآورد مقاومت ویژهٔ آب سازند

آبی که داخل فضاهای خالی سنگ‌های یک سازند را پر می‌کند آب سازند[1] نامیده می‌شود. آب سازند و ویژگیهای آن اهمیت زیادی در مطالعات آبخوانها و نفت‌خوانها دارد. در آبخوانها اهمیت آب سازند روشن است. هر چه آب شیرین‌تر باشد، مطلوب‌تر است. لذا مقاومت ویژهٔ آب R_w که یک ویژگی مهم تعیین کنندهٔ میزان شوری آب است، بعنوان یک پارامتر کلیدی برای ارزیابی آبخوانها مطرح است. در نفت‌خوانها نیز تعیین مقاومت ویژهٔ آب سازند برای برآورد اشباع از آب لازم است. چندین روش برای برآورد مقاومت ویژهٔ آب وجود دارد. از جملهٔ این روشها می‌توان به شناسنامه آبها، روشهای تجزیه شیمی آب، استفاده از روش پتانسیل خودزا و روشهای مقاومت ویژه اشاره کرد.

استفاده از شناسنامهٔ آب

در بسیاری از حوضه‌های نفتی فعال شناسنامه‌های آب به صورت جدول ویژگیهای آب سازندها تهیه و منتشر می‌شود این ویژگیها، از جمله R_w، ممکن است از نمونه‌های تهیه شده از آب سازندها در افق‌های متفاوت و یا از آزمایشهای دیگر و حتی از نمودارهای مقاومت ویژه بدست آمده

1. Water Formation

باشند. شناسنامه‌های آب سازند ممکن است به وسیلهٔ شرکتهای نفتی، ارگانهای دانشگاهی و مطالعاتی و یا ارگانهای ملی و محلی تهیه شده باشند. بهر ترتیب با استفاده از شناسنامهٔ آب سازند، در صورت وجود، می‌توان مقاومت ویژه آب سازند را برآورد نمود.

استفاده از تجزیه‌های شیمیایی

با تجزیهٔ شیمیایی آب سازند در صورتی که بتوان از آب دست نخوردهٔ سازند نمونه برداشت، می‌توان مقاومت ویژهٔ الکتریکی آب را برآورد نمود. این برآورد را می‌توان به صورت مستقیم و یا بطور غیرمستقیم و با اندازه‌گیری یونهای نمکهای موجود در آب انجام داد. در این مورد نمودارهای مادر وجود دارد و با توجه به میزان نمکهای آب و فعالیتهای یونهای این نمکها می‌توان R_w را برآورد نمود(به نمودارهای مادر، تهیه شده به وسیلهٔ شلومبرژه مراجعه شود).

استفاده از SP

در شرایط مساعد از نمودار SP می‌توان برای برآورد R_w استفاده نمود. در سازندهای تراوا که دارای رس نباشند و ضخامت آنها نیز کم نباشد، مقدار نمودار SP به SSP نزدیک است. و همانگونه که قبلاً اشاره شد داریم (نگاه فصل سوم).

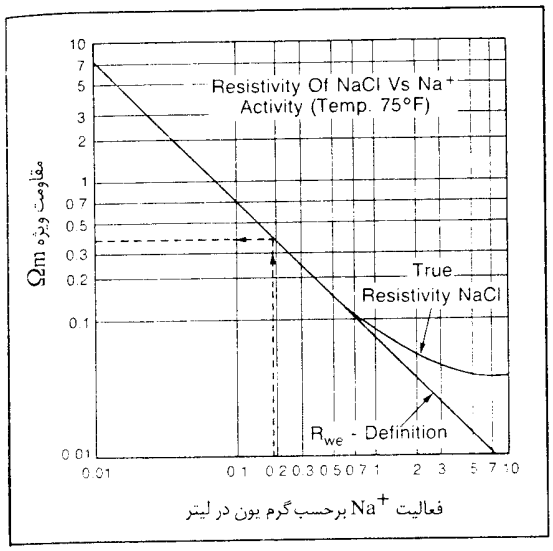
$$SSP = -K\log \frac{a_w}{a_{mf}}$$

K تابع درجهٔ حرارت است و از رابطهٔ زیر بدست می‌آید.

$$K = ۶۵+۰/۲۴t$$

t درجهٔ حرارت بر حسب سانتی‌گراد است.

مقاومت ویژهٔ آب سازند با وارون فعالیت یونهای موجود در آن پیوند دارد. اما در زمانی که غلظت نمکها از حدی فراتر می‌رود،مقاومت ویژه کاهش نمی‌یابد و تقریباً ثابت می‌ماند علت این امر این است که اگر غلظت از حدی فراتر رود یونها آزادی جنبش کامل خود را از دست می‌دهند و در مقابل جریان بخوبی توجیه نمی‌شود. بعنوان مثال اگر غلظت آبی که حاوی یون سدیم است، از ۲ گرم یون سدیم در لیتر بیشتر باشد، مقاومت ویژه با افزایش فعالیت یون سدیم کاهش نمی‌یابد و تقریباً ثابت می‌ماند. بنابر این در چنین شرایطی دو واژهٔ مقاومت ویژهٔ معادل آب سازند R_{we} و مقاومت ویژهٔ معادل گل تراویده R_{mfe} تعریف می‌شوند که آنها با وارون فعالیت یونهای موجود در آب پیوند دارند. به عبارت دیگر در غلظت‌های بالا هم این پیوند به صورت خطی باقی می‌ماند(شکل ۹-۱).



شکل(۹-۱) پیوندمیان مقاومت‌ویژهٔ معادل‌آب سازند و فعالیت یونهای موجود در آب [۲]

همانگونه که مشاهدهٔ می‌شود مقاومت ویژهٔ آب سازند در غلظت‌های زیاد با فعالیت یونها پیوند خطی ندارد.

مقاومت ویژهٔ معادل آب سازند را در ۲۵ درجهٔ سانتیگراد می‌توان از رابطهٔ زیر بدست آورد.

$$R_{we}=۰/۰۷۵/a_w$$

و با توجه پیوند SSP و a_w و R_{mf} می‌توان نوشت.

$$SSP=-K\log\frac{R_{mfe}}{R_{we}}$$

با داشتن SSP که می‌توان آنرا از یک نمودار SP بدست آورد می‌توان نسبت R_{mfe} به R_{we} را برآورد نمود. برای اندازه‌گیری R_{mf} می‌توان از گل تراویده نمونه‌برداری کرد. اما باید بخاطر سپرد که، ممکن R_{mfe} با R_{mf} متفاوت باشد. در چنین شرایطی می‌توان از رهنمودهای زیر برای محاسبه R_{mfe} استفاده نمود.

الف – اگر R_{mf} در دمای ۲۵ درجهٔ سانتیگراد کمتر از ۰/۱ اهم‌متر باشد از نمودارهای استاندارد شلومبرژه برای برآورد R_{mfe} استفاده می‌شود.

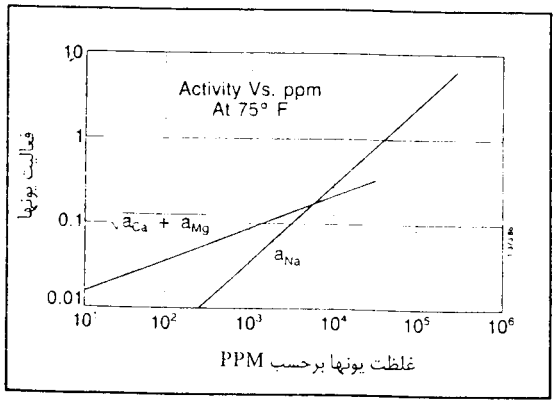
ب – اگر R_{mfe} در دمای ۲۵ درجه، بیشتر از ۰/۱ اهم‌متر باشد $R_{mfe}=۰/۸۵R_{mf}$

رهنمودهای فوق برای گلهایی که نمک طعام باشد کاربرد دارند اگر نمکهایی دیگر در گل وجود داشته باشد از نمودارهای استاندارد برای برآورد R_{we} استفاده می‌شود.برای تبدیل R_{we} به R_w هم نمودارهای استانداردی تهیه شده است. البته همانگونه که اشاره شد در غلظتهای کم این دو مقاومت با هم مساویند.

اگر آب سازند و یا گل تراویده افزون بر یون Na^+ حاوی یونهای Ca^{++} و Mg^{++} هم باشد این یونها هم در میزان SSP نقش دارند.

$$SSP=-K\log\frac{(a_{Na}+\sqrt{a_{Ca}+a_{Mg}})_w}{(a_{Na}+\sqrt{a_{Ca}+a_{Mg}})_{Mf}}$$

اگر غلظت Na و Ca و Mg را داشته باشیم. فعالیت آنها را می‌توانیم با توجه به شکل ۹-۲ برآورد کنیم.



شکل (۹-۲) پیوند میان فعالیت و غلظت یونهای Na و Ca و Mg [۲]

اگر از نمودار SP برای برآورد ρ_w استفاده می‌کنیم باید توجه داشته باشیم که در مواردی بی‌هنجاریهای غیرواقعی در نمودار SP ایجاد می‌شود که ممکن است آن را برای برآورد R_w غیرقابل استفاده نماید. یکی از این موارد زمانی پیش می‌آید که یک لایهٔ با مقاومت بسیار زیاد بین دو لایه تراوا و یا غیر تراوا قرار گرفته باشد (نگاه فصل سوم).

افزون بر آن نوفه‌های SP را نیز باید در نظر گرفته و در صورت امکان از نمودار SSP حذف نمود.

برآورد R_w از نمودارهای مقاومت ویژه

در فصل دوم بیان شد که بین مقاومت ویژهٔ آب سازند، مقاومت ویژهٔ سازند و ضریب سازند رابطه زیر برقرار است.

$$F=\frac{R_t}{R_w} \qquad R_w=\frac{R_t}{F}$$

R_t را می‌توان از نمودارهای مقاومت ویژهٔ الکتریکی با شعاع کاوش زیاد و F را می‌توان از نمودارهای تخلخل مانند نمودار صوتی و یا جرم مخصوص برآورد نمود. با داشتن این دو پارامتر R_w قابل محاسبه است.

از طرف دیگر با داشتن مقاومت ویژهٔ ناحیهٔ تراویده و آغشته R_{xo} و مقاومت ویژهٔ سازند که می‌توانند از دو نمودار مقاومت ویژه با شعاع کاوش کم و زیاد بدست آیند با توجه به رابطهٔ زیر می‌توان نسبت R_w و R_{mf} را محاسبه نمود.

$$\frac{R_w}{R_{mf}}=\frac{R_t}{R_{xo}}$$

با توجه به روشهایی که قبلاً توضیح داده شد می‌توان مقدار R_{mf} را تعیین و سرانجام مقدار R_w را محاسبه کرد.

روشهای تعیین اشباع از آب S_w

اشباع از آب برابر است با نسبت حجم آب سازند به حجم فضاهای خالی (قسمت غیر جامد)

سنگ که معمولاً به صورت درصد بیان می‌شود. اگر سازند تنها حاوی آب باشد، اشباع از آب ٪۱۰۰ است (در زیر سطح ایستایی) ولی اگر سازند حاوی آب و هیدروکربور باشد، اشباع از هیدروکربورها برابر است با:

$$S_h = 1 - S_w$$

اشباع از هیدروکربورها یکی از پارامترهای اساسی ارزیابی نفت خوانها می‌باشد لذا برآورد آن از اهداف مهم برداشتهای چاه‌پیمایی است.

همانگونه که در فصل دوم اشاره شد، در سازندهای تمیز (بدون رس) اشباع از آب را می‌توان از پیوند زیر بدست آورد.

$$S^n_w = \frac{FR_w}{R_t}$$

F ضریب سازند

R_t مقاومت ویژهٔ سازند

R_w مقاومت ویژهٔ آب سازند

F را می‌توان با توجه به تخلخل محاسبه نمود.

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

برای آهکها معمولاً از رابطهٔ

$$F = \frac{1}{\varphi_2}$$

برای ماسه سنگها از رابطهٔ

$$F = \frac{0.62}{\varphi^{2.15}}$$

و یا $F=\frac{0.82}{\varphi^2}$

استفاده می‌شود و توان $(S^n_w)n$ معمولاً برابر ۲ در نظر گرفته می‌شود.

بنابر این با توجه به نوع سازند و با در دست داشتن F و R_w و R_t می‌توان اشباع از آب را محاسبه نمود.

اگر اشباع از آب ٪۱۰۰ نباشد بجای R_w از R_{wa} (مقاومت ویژهٔ سیال سازند) استفاده می‌شود و در این حالت داریم.

$$R_{wa} = \frac{R_t}{F}$$

در چنین شرایطی می‌توان نوشت

$$S^2_w=\frac{R_w}{R_{wa}}$$

به عبارت دیگر روش دیگری برای برآورد اشباع از آب مطرح می‌شود.

برآورد S_w به وسیلهٔ خرد نمودارها

اگر مقاومت ویژه ناحیهٔ آغشته R_{xo} ، گل تراویده R_{mf} آب سازند R_w و سازند R_t در دسترس باشد می‌توان S_w را برآورد نمود.

$$\left(\frac{S_w}{S_{xo}}\right)^2 = \frac{R_{xo}/R_t}{R_{mf}/R_w}$$

R_{xo} از خرد نمودارها

R_t از نمودارهای القایی و یا لترولوگ

R_w و R_{mf} اندازه‌گیری شده و یا از نمودار SP برآورد می‌شوند

در بسیاری از موارد می‌توان از رابطه $S_w = S^5_{xo}$ استفاده نمود در این صورت اشباع از آب برابر است با

$$S_w = \left(\frac{R_{xo}/R_t}{R_{mf}/R_w}\right)^{5/8}$$

با توجه به اهمیتی که اشباع از آب در ارزیابی ذخایر هیدروکربوری دارد، شرکت شلومبرژه روشهای متفاوتی را برای برآورد آن ارائه داده است. برای جزئیات این روشها می‌توان به انتشارات این شرکت مراجعه نمود.

۱۰

برآورد تخلخل

تخلخل نمایانگر درصد حجم فضاهای خالی به حجم کل سنگ است. در آبخوانها و نفت خوانها از آنجاکه آب و یا نفت فضاهای خالی را پر می‌کند، ذخیره مخزن بستگی مستقیم به تخلخل دارد. بنابر این در مطالعهٔ آبخوانها و بویژه نفت خوانها، برآورد تخلخل از اهمیت شایان توجهی برخوردار است. برای برآورد تخلخل از چند نمودار می‌توان استفاده نمود. این نمودارها حتی بنام نمودارهای تخلخل شناخته می‌شوند. مهمترین نمودارهای تخلخل عبارتند از: نمودار صوتی، نمودار جرم مخصوص و نمودار نترون. البته تازه‌گی‌ها از نمودارهای الکترومغناطیسی نیز برای برآورد تخلخل استفاده می‌شود.

برآورد تخلخل از نمودار صوتی

همانگونه که اشاره شد با روشهای صوتی سرعت گذر امواج و یا زمان گذر امواج اندازه‌گیری می‌شود. اگر امواج فشاری را در نظر بگیریم، زمان گذر موج از یکای طول سازند(در راستای گذر یک دسته پرتو موازی)، برابر مجموع زمان گذر از قسمت جامد سنگ و قسمت سیال سنگ است.

$$t_t = t_{tf} + t_{tma}$$

t_t زمان گذر موج

t_{tf} زمان گذر موج در سیال سازند

t_{tma} زمان گذر موج در بخش جامد سازند

بخشی از سنگ که از سیال پر است، به تخلخل ارتباط دارد. اگر تخلخل را در سازند برابر φ در نظر بگیریم و زمان گذر کل را در یکای سازند برآورد کنیم، زمانی که موج بخشی از مسیر را در سیال سپری می‌کند برابر است با:

$$t_{tf} = \varphi . t_f$$

و زمان سپری شده در بخش جامد برابر می‌شود با:

$$t_{tma} = (1-\varphi) t_{ma}$$

t_f زمان گذر موج از یکای طول سیال سازند که به اختصار زمان گذر سیال نامیده می‌شود.

t_{ma} زمان گذر موج از یکای طول بخش جامد سازند که به اختصار زمان گذر ماتریکس نامیده می‌شود.

با جایگزینی t_{tf} و t_{tma} در پیوند فوق و با در نظر گرفتن اینکه زمان گذر را می‌توان از نمودار تعیین نمود.

$$t_l = \varphi t_f + (1 - \varphi) t_{ma}$$

$$t_l = \varphi t_f + t_{ma} - \varphi t_{ma}$$

$$\varphi = \frac{t_l - t_{ma}}{t_f - t_{ma}}$$

t_l زمان گذر بدست آمده از نمود صوتی

با توجه به این پیوند می‌توان تخلخل را از نمودار صوتی برآورد نمود. در عمل چون معمولاً نوع سازند و سیال آن مشخص است، t_{ma} و t_f تعیین شده و به دستگاه داده می‌شود و دستگاه با انجام محاسبات لازم نمودار تخلخل را در ژرفاهای مختلف چاه رسم می‌نماید.

پیوند بالا برای سازندهایی که فقط از یک نوع سنگ تراوا تشکیل شده باشند کاربرد دارد. و اگر سازند فقط حاوی آب باشد دقت تخلخل برآورد شده افزایش می‌یابد. زیرا اثر ناحیهٔ تراویده و آغشته در سازندهای آبدار در مقایسه با سازندهای هیدروکربوردار کاهش می‌یابد.

در صورتیکه سازند دارای شرایط فوق نباشد. بنابر مورد، لازم است که تخلخل بدست آمده اصلاح شود. از موارد مهمی که روی نمودار تخلخل اثر می‌گذارند عبارتند از:

- وجود شیل در سازند
- نافشردگی سازند
- درزه‌ها و شکستگی‌ها
- وجود گاز تحت فشار در سازند

وجود شیل در سازند

تخلخل شیلها معمولاً تخلخل غیر مفید است و در ارزیابی ذخیرهٔ سیالهایی که شیلها نسبت به آنها ناتراوا هستند باید قسمت شیل را بکلی در برآورد حذف نمود. بنابر این در محاسبهٔ زمان گذر موج در سازند باید زمان مربوط به شیل را از کل زمان گذر کاست. لذا می‌توان نوشت.

$$t_l=\varphi_{tf}+(1-\varphi-v_{sh})t_{ma}+t_{sh}.v_{sh}$$

$$t_l - t_{sh}.v_{ss}=\varphi^{tf}+(1-\varphi-v_{sh})t_{ma}$$

t_{sh} زمان گذر شیل (در واحد طول)

v_{sh} درصد حجم شیل در سازند

به عبارت دیگر اگر درصد شیل مشخص باشد می‌توان از این پیوند برای برآورد تخلخل مفید استفاده نمود. درصد شیل را می‌توان از نمودارهای پرتوی گاما طبیعی، SP و نمودارهای مقاومت ویژهٔ الکتریکی برآورد نمود. نمودارهای استاندارد نیز برای تصحیح تخلخل بدست آمده از نمودارهای صوتی تهیه شده است (انتشارات شلومبرژه).

نافشردگی سازند

سنگهایی که به اندازهٔ کافی تحت فشار قرار گرفته‌اند و فشردگی [1] آنها به اندازهٔ معمول باشد دارای ویژگیهای دینامیکی تقریباً ثابتی هستند. در فشارهای کم، سنگها به ویژه ماسه سنگها به اندازهٔ کافی فشرده نمی‌شوند و این نافشردگی روی زمان گذر موج در آنها تأثیری بیشتر از تأثیر روی تخلخل آنها دارد. بنابر این در صورت وجود ماسه سنگهای نافشرده لازم است که تخلخل برآورد شده از روش صوتی اصلاح شود. برای این اصلاح از ضریبی بنام ضریب اصلاح فشردگی C_p استفاده می‌شود و تخلخل از پیوند تجربی زیر بدست می‌آید (در بخش صوتی نیز این مسئله با بیانی دیگر مطرح شده است).

$$\varphi = \frac{t_t - t_{ma}}{t_f - t_{ma}} \times \frac{1}{C_p}$$

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

1. Compaction

t_{sh} زمان گذر موج برحسب میکرو ثانیه بر فوت، در شیلهای پیرامون ماسه سنگ نافشرده است.

اگر نمودار تخلخل حاصل از روش نترون در دسترس باشد با مقایسهٔ نمودارهای تخلخل نترون و نمودار تخلخل صوتی می‌توان ضریب C_p را بدست آورد و برای جاهایی که لازم است از آن استفاده نمود.

$$C_p = \frac{\varphi_s}{\varphi_n}$$

φ_s تخلخل حاصل از روش صوتی

φ_n تخلخل حاصل از روش نترون

پیوندهای تجربی نیز میان زمان گذر موج و تخلخل وجود دارد از جمله می‌توان به پیوند زیر اشاره نمود.

$$\varphi_s = C\frac{t_l - t_{ma}}{t_l}$$

C ضریبی است که به صورت تجربی برای سازندهای مختلف، در نفت خوانهای مختلف بدست می‌آید. مقدار C معمولاً بین ۰/۶۲۵ تا ۰/۷ تغییر می‌کند و مد آن ۰/۶۷ است.

اثر درزه‌ها و شکستگی‌ها

درزه‌ها و شکستگی‌ها مجراهای مهم گذر سیال هستند و نقش مهمی در تخلخل ایفا می‌کنند. از انجا که موج تندترین مسیر ممکن را برمی‌گزیند. در نزدیکی درزه‌ها و شکستگی‌ها به‌صورت عمود بر آنها حرکت نموده و کمتر تحت تأثیر این‌گونه شکستگی‌ها قرار می‌گیرد. لذا در سنگهای درزه‌دار و خرد شده تخلخل برآورد شده از روش صوتی از تخلخل واقعی کمتر است. به

عبارت دیگر می‌توان گفت که تخلخل پسین [۱] اثر چشمگیری روی سرعت امواج ندارد، بنابر این تخلخل بدست آمده از روش صوتی در چنین شرایطی تقریباً برابر تخلخل نخستین [۲] است و می‌توان نوشت:

$$\varphi_t=\varphi_s+\varphi_2$$

φ_t تخلخل کل واقعی

φ_s تخلخل بدست آمده از روش صوتی

φ_2 تخلخل پسین

در شرایط فوق تخلخل کل را می‌توان از روشهای دیگر بدست آورد و از تفاوت تخلخل‌های بدست آمده از روشهای دیگر با روش صوتی می‌توان تخلخل پسین را بر آورد نمود.

$$\varphi_2=\varphi_t-\varphi_s$$

اثر گازهای تحت فشار

سازندهای تحت فشار گاز، سازندهایی هستند که به وسیلهٔ لایه‌های شیلی ناتراوا محاصره شده‌اند. در چنین شرایطی معمولاً اشباع از گاز بیشتر از شرایط دیگر است و این مسئله باعث می‌شود تا زمان گذر موج بیشتر از شرایط عادی باشد، این افزایش زمان در شیلهای تحت فشار که با وجود حفرگمانه به علت ناتراوا بودن همچنان تحت فشار باقی می‌مانند چشم‌گیرتر است. نمونه‌ای از

1. Secondary Porosity 2. Primary Porosity

نمودارهای حاصل از شیل‌های تحت فشار در شکل (۶-۱۴)ارائه شده است. همانگونه که در قسمت انتهای این شکل دیده می‌شود، زمان گذر موج در شیل تحت فشار افزایش یافته است. از این افزایش زمان در شیلهای تحت فشار می‌توان برای پیش‌بینی رسیدن گمانه (در حین حفاری) به مخزن تحت فشار استفاده نمود.

پرش سیکلها[1]

در مواردی انرژی نخستین موج در حدی است که به گیرندهٔ اول می‌رسد اما پیش از رسیدن به گیرندهٔ دوم میرا شده و به گیرنده دوم نمی‌رسد. در چنین شرایطی امواج بعدی بعنوان نخستین موج رسیده به گیرندهٔ دوم نگاشته می‌شوند بنابر این زمان گذر محاسبه شده به حد چشم‌گیر و بی‌هنجاری افزایش نشان می‌دهد. این پدیده بعنوان پرش سیکلها شناخته می‌شود و افزایش زمان گذر موج به صورت دندانه‌های نوک نیز روی نمودار زمان گذر آشکار می‌شود. هر گاه میرایی سازند زیاد باشد امکان پدیدار شدن پرش سیکلها افزایش می‌یابد. معمولاً در سایه لایه های نافشرده، زونهای خرد شده، سازندهای گازدار، سازندهای پلاستیک‌تر مانند نمک‌ها، میرایی امواج زیادتر است. بنابر این، این گونه شرایط برای پدید آمدن پرش سیکلها مساعد می‌باشد.

برآورد تخلخل به وسیلهٔ روش نترون

در شرح روش نترون بیان شد که نمودارهای نترون بشدت تحت تأثیر هیدروژن آب و هیدروکربورهای سازند قرار دارند و از آنجا که میزان این سیالها در سازند بستگی به میزان تخلخل سازند دارد، از نمودارهای نترون می‌توان برای بر آورد تخلخل استفاده نمود. باید توجه نمود که از نمودار نترون فقط در پایین‌تر از سطح ایستابی می‌توان برای برآورد تخلخل استفاده کرد.

1. Sycle Skipping

مقایسه نمودار نترون با نمودارهای دیگر تخلخل، اطلاعات بسیار مفیدی در مورد نوع هیدروکربور سازند ارائه می‌دهد. همانگونه که در روش صوتی بیان شد سازندهای گازدار روی نمودار صوتی تاثیر می‌گذارند. در صورتیکه تاثیر گاز روی تخلخل بدست آمده از روش نترون قابل چشم‌پوشی است. لذا با مقایسهٔ این نمودارها می‌توان سازندهای گازدار را شناسایی کرد.

نمودار نترون - نترون و یا نترون - گاما بیان کنندهٔ مقدار هیدروژن سازند است. و باید توجه نمود که بخشی از این هیدروژنها ممکن است در ترکیب کانی‌شناسی سنگهای سازند وجود داشته باشند که در این صورت روی تخلخل محاسبه شده از روش نترون تاثیر می‌گذارند. اگر هیدروژنهای بخش جامد سازند در مقابل هیدروژنهای سیال سازند قابل چشم‌پوشی باشد، می‌توان نمودار نترون را بیانگر شاخص هیدروژنی سیال و میزان سیال آن یعنی تخلخل دانست.

شاخص هیدروژنی یک سیال بیانگر مقدار هیدروژن در واحد حجم آن سیال است. در عمل شاخص هیدروژنی آب خالص برابر یکا در نظر گرفته شده و شاخص هیدروژنی بقیه سیالها بر مبنای آن سنجیده می‌شود.

اگر آب شور باشد. ملکولها یا یونهای نمکهای آب. جانشین ملکولهای آب شده و باعث کاهش شاخص هیدروژنی آب می‌شوند. این کاهش به درجه حرارت هم بستگی دارد و در درجه حرارت ۲۵ درجهٔ سانتی‌گراد به وسیلهٔ پیوند زیر بیان می‌شود.

$$H_w = ۱ - ۰/۴C$$

H_w شاخص هیدروژنی آب شور

C غلظت نمک در آب بر حسب $PPM \times 10^{-6}$

در حالت کلی و بطور مستقل از درجه حرارت می‌توان از پیوند زیر برای برآورد شاخص هیدروژنی آب شور استفاده کرد.

$$H_w = \rho_w(۱ - C)$$

ρ_w جرم مخصوص آب شور

برای برآورد شاخص هیدروژنی نفت از پیوند زیر استفاده می‌شود.

ρ_o جرم مخصوص نفت $H_o = 1/28\rho_o$

پیوندهای دیگر نیز برای برآورد شاخص هیدروژنی هیدروکربورها وجود دارد. شرکت شلومبرژه افزون بر پیوندها نمودارهای استاندارد متفاوتی برای برآورد این شاخصها ارائه نموده است.

ابزار اندازه‌گیری نترون و پردازشگرها میزان نترونهای دریافت شده به وسیلهٔ گیرنده را با اعمال ضرایب لازم و پردازش داده‌ها، به تخلخل تبدیل و مستقیماً تخلخل را برآورد و نتیجه را به صورت نمودار می‌نگارند.

تخلخل برآورد شده از روش نترون تحت تأثیر عواملی بشرح زیر قرار دارد. اثر نامطلوب این عوامل باید حتی المقدور از روی اندازه‌گیریها حذف شود.

- قطر چاه و ویژگیهای گل حفاری
- نوع سیال سازند
- شیل
- گاز

اثر قطر چاه ویژگیهای فیزیکی گل حفاری

شرایطی فیزیکی گل حفاری مانند جرم مخصوص و درجهٔ شوری آن و قطر چاه روی نمودار نترون اثر می‌گذارد. دستگاههای جدید نترون مجهز به قطریاب هستند و با تعیین ویژگیهای گل و ارائه آنها به پردازشگرها، این دستگاهها اثرهای قطر چاه و ویژگیهای گل را برآورد و به صورت

خودکار آنها را از روی نمودار حذف می‌کنند.

اثر نوع سیال سازند روی نمودار نترون

شاخص هیدروژنی نفت و آب بهم نزدیک است در صورتیکه شاخص هیدروژنی گاز به مراتب کمتر از نفت و آب است. بنابر این در مواردی که در سازند گاز وجود دارد و یا اشباع از گاز زیاد است باید تخلخل برآورد شده از روش نترون را اصلاح نمود برای این منظور می‌توان از ارتباط میان جرم مخصوص و تخلخل استفاده کرد. نمودارهای استاندارد نیز برای این منظور وجود دارد.

اثر شیل روی نمودار نترون

همانگونه که اشاره شد تخلخل شیلها زیاد است و در فضاهای خالی معمولاً آب وجود دارد. اما تخلخل شیلها تخلخل مفید نیست. در شرایطی که سازند شیل دار است برای برآورد تخلخل مفید باید تخلخل بدست آمده از روش نترون را اصلاح نمود این اصلاح با پیوند زیر انجام پذیر است.

$$\varphi_e = \varphi_{nl} - V_{sh} \times \varphi_{nsh}$$

φ_e تخلخل مفید

φ_{nl} تخلخل بدست آمده از روش نترون در سازند تراوا

V_{sh} درصد حجمی شیل در سازند

φ_{nsh} تخلخل بدست آمده از روش نترون در لایه ۱۰۰٪ شیل

اثر گاز روی نمودار نترون

همانگونه که اشاره شعاع کاوش روشهای هسته‌ای بسیار کم است و معمولاً به ناحیهٔ آغشته محدود می‌شود. لذا نمودار نترون تحت تأثیر اشباع از آب یا اشباع ار هیدروکربورها در این ناحیه است.

چون شاخص هیدورژنی نفت و آب بهم نزدیک است اگر ناحیهٔ آغشته اشباع از آب و نفت زیاد باشد تخلخل محاسبه شده از روش نترون خطای زیادی ندارد. اما اگر بجای هر یک از این سیالها گاز وجود داشته باشد سبب می‌شود که در محاسبهٔ تخلخل خطا حاصل و تخلخل برآورد شده از روش نترون از تخلخل واقعی کمتر باشد. این اثر گاز، اثر تهی شدگی [1] نامیده می‌شود در چنین شرایطی بـرای اصلاح تخلخل می‌توان از پیوند زیر و یا شکل (۱۰-۱) استفاده نمود.

$$\varphi_c=\varphi_n+K(2\varphi^2_n\, S_{WH} + 0.04\varphi)(1-S_{WH})$$

$$S_{WH}= S_{xo}H_w + (1-S_{xo})H_h$$

φ_c تخلخل اصلاح شده

φ_n تخلخل بدست آمده از روش نترون

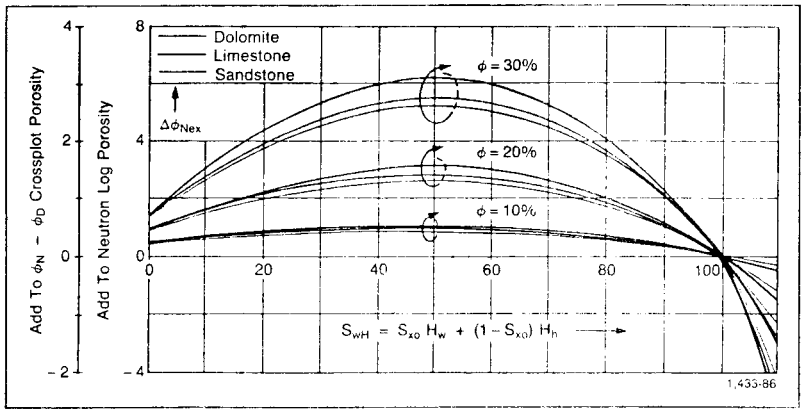
S_{xo} اشباع از آب در ناحیه آغشته

H_w شاخص هیدروژنی آب

H_h شاخص هیدروکربور

جملهٔ دوم پیوند فوق در مقابل جملهٔ اول قابل چشم‌پوشی است و ضریب K به نوع سنگ بستگی دارد. K برای دولومیت برابر ۱/۱۷۳ برای آهک برابر ۱/۰۴۶ و برای ماسه سنگ برابر ۱، در نظر گرفته می‌شود.

1. Excavation Effect



شکل (۱۰-۱) تصحیح تخلخل بدست آمده از نمودار نترون برای اثر تهی شدگی [۶]
با مراجعه به S_{WH} محاسبه شده و میزان تخلخل و نوع سنگ میزان اصلاح تخلخل معین می‌شود

اثر نوع سنگ سازند

همانگونه که بیان شد، ابزار نترونی بیشتر به هیدروژن موجود در پیرامون گمانه حساس است. بنابراین نوع سازند بخش عمده سنگ نیز ممکن است حاوی هیدروژن باشد و این مسئله را نیز باید در نظر گرفت. تأثیر می‌گذارد. چون معمولا دستگاه نترون برای سنگ آهک کالیبره می‌شود، از این رو برای سازندهای ماسه سنگی و دولومیتی تصحیح انجام شود. برای انجام این تصحیح می‌توان از نمودارهای زیر استفاده نمود.

برآورد تخلخل از نمودار نترون مخصوص

همانگونه که قبلا نیز بیان گردید، نترون مخصوص الکترونی مواد پرسازهای خاد

اندازه‌گیری می‌شود. جرم مخصوص الکترونی به شمار الکترونها در واحد حجم بستگی دارد و ارتباط آن با جرم مخصوص توده به صورت زیر است.

$$\rho_e = \rho_b \left(\frac{2Z}{A}\right)$$

ρ_e جرم مخصوص الکترونی (۱)

ρ_b جرم مخصوص توده (۲)

Z عدد اتمی

A جرم اتمی

اگر ماده از ملکولهای متفاوت تشکیل شده باشد پیوند به صورت زیر است

$$\rho_e = \rho_b \frac{2\Sigma Z_i}{M}$$

ΣZ_i مجموع عدد اتمی اتمهای یک ملکول

M جرم ملکولی

معمولاً برای عناصر، بزرگی ρ_e با ρ_b برابر است ولی برای مواد دیگر اندکی تفاوت ممکن است وجود داشته باشد. در حالت کلی می‌توان از پیوند زیر برای برآورد ρ_b سازندهای زمین‌شناسی استفاده نمود

$$\rho_b = ۱/۰۷۰۴\rho_e - ۰/۱۸۸۳$$

ρ_b بدست آمده از این طریق با جرم مخصوص واقعی اندکی تفاوت دارد. اما در برآوردهای چاه‌پیمایی می‌توان آنها را با یکدیگر برابر گرفت.

1. Electron Density 2. Bulk Density

جرم مخصوص سنگها با تخلخل آنها پیوند وارون دارد. در یک نوع سنگ با افزایش جرم مخصوص تودهٔ سنگ، تخلخل آن کاهش می‌یابد. بنابر این با در اختیار داشتن جرم مخصوص می‌توان تخلخل را برآورد نمود. از سوی دیگر با در اختیار داشتن جرم مخصوص و تخلخل بدست آمده از روشها دیگر (صوتی یا نترون) می‌توان جنس سنگ را تعیین نمود.

جرم مخصوص یک سازند بستگی به جرم مخصوص بخش جامد، بخش سیال و تخلخل آن سازند دارد. در یک سازند تراوای بدون رس می‌توان نوشت:

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

ρ_b جرم مخصوص بدست آمده از روش گاما - گاما

ρ_f جرم مخصوص سیال

ρ_{ma} جرم مخصوص بخش جامد سنگ

φ تخلخل

با تغییراتی در پیوند بالا می‌توان تخلخل را محاسبه نمود.

$$\rho_b = \varphi\rho_f + \rho_{ma} - \varphi\rho_{ma}$$

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

با در اختیار داشتن ρ_{ma} و ρ_f می‌توان نمودار جرم مخصوص را تبدیل به نمودار تخلخل کرد. برآورد تخلخل از روش جرم مخصوص مانند روشهای دیگر همراه با خطاهایی است که در شرایط نامطلوب این خطاها افزایش می‌یابند. مواردی که روی اندازه‌گیریها اثر نامطلوب دارند بشرح زیرند.

- وجود شیل
- فشار غیر معمول
- شرایط فیزیکی چاه

اثر وجود شیل روی نمودار تخلخل

وجود شیلهای نامتراکم سبب کاهش جرم مخصوص و افزایش تخلخل می‌شود. اگر این گونه شیلها به صورت لایه‌های جداگانه باشند، از لایه‌های تراوا، قابل تمیز و تفکیک هستند و در برآوردها مشکلی ایجاد نمی‌کنند. اما اگر در سازند تراوا، بین لایه‌های شیلی وجود داشته باشد، به علت جرم مخصوص کمتر شیل نسبت به سنگهای رسوبی دیگر (ماسه سنگها، آهکها و دولومیتها)، وجود این بین لایه‌های شیلی باعث کاهش جرم مخصوص اندازه‌گیری شده می‌شود. اگر علت این کاهش شناخته نشود، کاهش جرم مخصوص به افزایش تخلخل نسبت داده می‌شود. و برآورد تخلخل با خطا همراه شده سبب خطا در برآورد ذخیره می‌شود.

اثر فشار غیر معمول

جرم مخصوص سنگهای رسوبی بویژه شیلها با افزایش میزان فشردگی افزایش می‌یابد. بطوریکه در نهشته‌های جوان می‌توان انتظار یک افزایش تدریجی جرم مخصوص در ژرفاهای بیشتر را داشت. در مواردی نیز حالتهای خاصی پدید می‌آید که از این روند پیروی نمی‌کند و جرم مخصوص شیل با افزایش ژرفا کاهش می‌یابد. این شرایط زمانی پیش می‌آید که شیل در بالای یک لایه تراوای تحت فشار گاز قرار گرفته باشد. و به عبارتی بخشهایی از شیل نیز حاوی گاز با فشار زیاد باشد. این پدیده در برخی از نفت خوانها دیده شده است.

برآورد تخلخل از نمودار الکترو مغناطیسی

از روشهای الکترومغناطیسی نیز می‌توان برای برآورد تـخلخل اسـتفاده نـمود. اگـر زمـان گسترش امواج الکترومغناطیسی در سیال t_f و همین زمان را در بخش جامد سنگ t_{ma} داشته باشیم. با توجه به زمان گسترش اندازه‌گیری شده به وسیلهٔ روش الکترومغناطیسی t_l می‌توان تخلخل را مانند آنچه برای روش صوتی برآورد می‌شود، محاسبه نمود.

$$\varphi = \frac{t_l - t_{ma}}{t_f - t_{ma}}$$

بدیهی است که قبل از استفاده از نمودار زمان گسترش امواج الکترومغناطیسی باید این زمان بگونه‌ای که در فصل مربوطه اشاره شد اصلاح شود.

References

1- Schlumberger 1977 "Log Interpretation".

2- "Schlumberger 1989 Log Interpretation Principles/Applications".

3- Maresh S. et. al. 1986 "Introduction to applied geophysics" Charles University Prague Czech Repubuc.

4- Robinson, E.S. 1988 "Exploration geophgsics" Blacksburg Virginia.

5- Schlumberger 1982 , 1984 , 1989 chart book.

6- Schlumberger 1975 "Production services" New york.

7- Ballosser R.W. and H.W. lawrence (1990) "Application of well logging techniques in mineral mining" Geoph. vol. 35.

8- Mathews M. et. al. 1994 "Subsurface radionuclide investigation of a nuclear test" Applied Geoph.32. 1994 279-291.

9- Hilchie W.H. 1975. "Nuclear well logging". Am. Nucl. Soc. June, Neworleans.

10- Richard L . et . al. 1963 "Gamma ray spectroscopy in well logging" Geophysics, Vol.28.No.4 August 1963.

11- Ramazi .H.R 1985 "Well logging" National Iranian oil company Thehran 1985. (Farsi)

12- Artsybashev V.A. 1975 "Yaderno geofizicheskaya ravedka (Nuclear geophyseical prospecting)" Moscow , Atomizdat.

13- Czubek , J.A. 1961 "Some problems of the theoty and quantitalive interpretation of gamma ray logs" Acta Gephycica polonica 9.

14- Zboril A.and S. Maresh 1970 "Simultaneus fluid resistivity and temperatune logging and its use in hydrological wells". Sbornik Geol. Series , 9.

15- Movahhed. B. 1991 "Principles of well Logging" (Farsi).

۳۲۶۱۴