
بسم الله الرحمن الرحيم

شرح جامع و نمونه سوالات

چاه‌آزمائی و نمونه گیری از چاه

«مهندسی نفت»

(مهندسی حفاری و بهره برداری نفت–مهندسی مخازن هیدروکربوری)

مولف: محمد پرواز دوانی

انتشارات ارشد

پیشگفتار ناشر

خداوند بزرگ را شاکریم که فرصتی عنایت فرمود تا بتوانیم قدمی در جهت گسترش علم و فرهنگ کشور عزیزمان برداریم و مسیری هموار را در اختیار مخاطبان و داوطلبان علاقمند به ادامه تحصیل قرار دهیم. از آنجائی که درحوزه کتاب‌های درسی و کمک درسی کارشناسی ارشد کتاب‌های زیادی به رشته تحریر در آمده است با این حال وجود یک مجموعه جامع، دقیق، کامل و دارای رفرنس(منابع) مستند احساس می‌شود.

همیشه دغدغه داشتیم که ای کاش می‌شد تمامی منابع پراکنده و گاهاً دست نایافتنی کنکور در یک مجموعه به گونه‌ای جذاب و شیوا آماده می‌شد و همچنین سوالات دوره‌های قبل کنکور نیز به گونه‌ای تشریحی پاسخ داده می شدند، که خدشه‌ای بر آنها وارد نشود و خیال داوطلبان عزیز آنقدر آسوده باشد که اطلاعات مندرج در پاسخنامه‌ها را برای بهره‌گیری در آزمون خود بکار گیرند. این کار با یاری خداوند بزرگ و همکاری نخبه‌ترین دانشجویان و اساتید کشور در انتشارات ارشد هماهنگ گردید و در تمامی مقاطع تحصیلی از کاردانی به کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در حوزهٔ آزمون‌های سراسری – آزاد و پیام نور بسته‌های آموزشی شامل کتاب‌های بانک سوالات و کتاب‌های شرح جامع درس آماده گردید. در تهیه مجموعه‌های فوق‌الذکر از فارغ‌التحصیلان کارشناسی ارشد و دکتری که حائز رتبه‌های تک رقمی کنکور می‌باشند، استفاده کرده‌ایم، تا شما عزیزان بتوانید در راستای افزایش توان علمی خود در جهت نیل به مقصود خویش نایل آیید. بدون تردید می‌توان گفت که برای اولین بار در نظام آموزشی کشور مجموعه‌ای به این سبک عرضه می‌شود که در کیفیت و کمیت بی‌نظیر بوده و تمامی نیازهای دانشجویان و داوطلبان عزیز را پوشش می‌دهد. امید است که استفاده از این مجموعه عزیزان را در جهت موفقیت در آزمون یاری رسانده باشد. در پایان لازم به ذکر است که بی نقصی محض از آن خداوند متعال می‌باشد، بنا براین از تمامی خوانندگان و داوطلبان عزیز خواهشمندیم نظرات سازنده خود را در مورد این کتاب به سایت انتشارات ارشد اعلام نمایند تا ما را در جهت هر چه بهتر آماده کردن این محصولات یاری رسانند.

با تشکر

ناشـــــر

www.arshadbook. ir

تقدیم به

دومین خالق روی زمین

مادر و پدرم

که در رگهایم محبت را با خون عجین نمودند

که خدمتگزار صادق برای وطنم باشم

پیشگفتار مولف

با نام و یاد خدا و همت و تلاش گروه انتشارات ارشد بر آن شدیم تا برای تسهیل کار داوطلبان کنکور کارشناسی ارشد رشتهٔ مهندسی نفت، کتابی را در زمینهٔ نمودارگیری از چاه و چاه‌آزمایی تألیف نماییم. با توجه به هجمهٔ روزافزون افراد و نیز رقابت شدید در این مقطع می‌بایست کتابی را با ویژگیهای بارز به رشتهٔ تحریر در می‌آوردیم.

از ویژگیهای منحصر به فرد این کتاب تقسیم‌بندی آن به سه بخش شرح جامعه، تستهای تألیفی و تستهای کنکور (سراسری و آزاد) می‌باشد تا دانشجویان در عین فراگیری دقیق مطالب درسی با تستها کنکور و تألیفی جهت قوی شدن در درس آشنا شوند.

اینجانب خود را موظف می‌دانم که از مدیریت محترم انتشارات، و استاد عزیز، جناب آقای مهندس لواخان و نیز دوست گرامی آقای علیزاده جهت همکاری و همچنین تمامی کسانی که مرا در نوشتن کتاب یاری دادند کمال تشکر قدردانی را به عمل آوردم.

با توجه به اینکه هیچ اثر تألیفی خالی از مشکل و ایراد نیست لذا از صمیم قلب خواهشمندیم این اثر را از نظرات و پیشنهادات سازندهٔ خود محروم نگردانید تا ایرادهای احتمالی در چاپهای بعدی انتشارات رفع گردد.

با امید سرافرازی

محمد پرواز دوانی دانشجوی کارشناسی ارشد
مهندسی مخازن دانشگاه شریف

فهرست مطالب

پیشگفتار ناشر ۳
پیشگفتار مولف ۴

بخش اول: نمودارگیری از چاه

فصل اول: مفاهیم مورد نیاز چاه پیمایی ۱۱
فصل دوم: نمودار پتانسیل خود زا یا سلف پتانسیل SPONTANEOUS WELL LOGGING ۳۵
فصل سوم: نمودار مقاومت مخصوص الکتریکی RESISTIVITY LOGS و کاربرد آن ۵۵
فصل چهارم: نمودار صوتی ACOUSTIC SONIC LOG ۸۳
فصل پنجم: نمودارهای رادیو اکتیویته RADIOACTIVITY LOGGING ۸۹
فصل ششم: نمودارهای دیگر چاه‌پیمایی ۱۰۹
تستهای آخر فصل ۱۱۳
پاسخ تستهای آخر فصل ۱۲۲

بخش دوم چاه‌آزمایی

فصل اول: مفاهیم مقدماتی چاه آزمایی ۱۳۱
فصل دوم: آزمایشات چاه‌های نفتی و گازی: ۱۳۷
فصل سوم: اساس آنالیز Transient Test ۱۵۱
فصل چهارم: pressure Drawdown ۱۶۱
فصل پنجم: تست دبی متغیر Multiple Rate Test ۱۷۳
فصل ششم: pressure Build Up Testing ۱۸۵
فصل هفتم: برآورد فشار متوسط مخزن ۱۹۳
فصل هشتم:چاه آزمایی چاههای تزریقی ۲۰۳
فصل نهم: آزمایش DST ۲۱۱
تستهای آخر بخش ۲۲۳
پاسخ تستهای آخر بخش ۲۳۷
تستهای تألیفی ۲۴۸
پاسخ تستهای تألیفی ۲۶۸
نمونه سوالات از سال ۱۳۸۹-۱۳۸۶ ..... ۲۸۹

بخش اول

نمودارگیری از چاه

عناوین اصلی:

- فصل اول: مفاهیم مورد نیاز چاه‌پیمایی
- فصل دوم: نمودار پتانسیل خود زا یا سلف پتانسیل Spontaneous well logging
- فصل سوم: نمودار مقاومت مخصوص الکتریکی Resistivity logs و کاربرد آن
- فصل چهارم: نمودار صوتی Acoustic sonic log
- فصل پنجم: نمودارهای رادیو اکتیویته Radioactivity logging
- فصل ششم: نمودارهای دیگر چاه‌پیمایی
- تستهای آخر فصل

فصل اول

مفاهیم مورد نیاز چاه پیمایی

a. طبقه بندی روش های چاه نگاری Well loging classification :

نمودارهای چاه را که امروزه در اغلب چاه های نفت و گاز پس از حفاری باید حتما برداشت نمود بستگی به نوع چاه بسیار متنوع می باشند تقسیم بندی آن به قرار زیر می‌باشد.

۱-لاگ یا نمودار پتانسیل خود زا (بدون تزریق الکتریسیته) با علامت اختصاری S.P Self Potential Logging

۲-لاگ یا نمودار مقاومت مخصوص الکتریکی Retistivity Logging (با تزریق الکتریسیته به بدنه چاه) این روش به دو قسمت تقسیم می شود.

الف) سوند نرمال Normal Logging

ب) سوند لترال یا جانبی Lateral Logging

که هر کدام از روش های فوق خود به الف ۱ کوتاه نرمال short Normal با فاصله الکترودی ۱۶ اینچ

الف ۲ نرمال بلند Long Normal با فاصله الکترودی ۶۴ اینچ

ب ۱؛ کوتاه Short Lateral لترال شش فوت

ب ۲، بلند لترال Long Lateral با هشت فوت و ۱۸ اینچ

۳-لاگ یا نمودار میکرو رزیستیویتی micro Resistivity (برای اندازه‌گیری لایه های نازک استفاده می شود).

۴-لاگ یا نمودار جانبی لا لترالوگ Lateralog

۴ الف فوکوسینگ لاگ Focusing Log

۴ ب لترالوگ ۳ Lateralog 3

۴ ج لترالوگ ۷ Lateralog 7

۵-میکرولترالوگ microlateralog

۶-لاگ یا نمودار الکتریکی القایی induction Logging

۷-لاگ یا نمودار صوتی یا آگوستیک Sonic Logging

۸-لاگ یا نمودار رادیو اکتیویته Radioactivity Logging

۸ الف گاما لاگینگ Gamma logging

۸ ب نترون لاگینگ Neutron Logging

۸ ج نمودار پرتو گاما (اشعه طبیعی) Gamma Ray Logging

۸ د نمودار پرتو گاما – گاما (اشعه مصنوعی) Gamma Logging

۸ و نمودار زمان کاهش حرارت Thermal Decay Time Logging

۸ ز نمودار نوترون Neutron Logging

۹-نمودار درجه حرارت Temprature Logging

۱۰- نمودار قطر چاه Diameter section Logging

۱۱- نمودار شیب طبقات و انحراف چاه از محور قائم Dipmeter and directional survey

۱۲- نمودار نمونه گیری از جداره چاه Side Wall Sampling Logging

۱۳- سوراخ کردن جداره چاه با داشتن لوله پوش Casing Perforation

۱۴- نمودار نمونه گیری از سیال موجود در سازندهای اطراف چاه Fluid Sampling

که در مورد تمام نمودارهای فوق الذکر به طور مفصل بحث خواهد شد و نحوه تفسیر هرکدام از نمودارها بیـان خواهـد گشت قبل از بررسی آنها به بعضی از علائم اختصاری در چاه نگاری پرداخته می‌شود.

علائم اختصاری در چاه نگاری:

- فاصله منحنی جانبی Lateralog Curve Spacing. A.O
- فاصله منحنی نرمال Normal Curve Spacing. A.m
- دمای کف چاه Bottom Hole Temprature. B.H.T
- نمودار منحنی اصلاحی نوترون Compensated Neutron C.N.L
- قطر گمانه Diameter of Bore Hole . dh
- میانگین قطر ناحیه شسته شده Diameter of Flashed Zone . di
- میانگین زون قطر آغشته شده Average Diameter of Invaded Zone . di
- ضریب مقاومت مخصوص سازند Formation Resistiviy Factor . F
- نمودار اصلاحی جرم مخصوص سازند Formation Density Compensated Log . F.D.C
- ضخامت اندوده گل Bed Thickness . hmc
- مقاومت مخصوص اندوده گل Resistivity of the mud cake . Rmc
- مقاومت مخصوص آب سازندی Resistivity of the Fomation Water . Rw
- مقاومت مخصوص الکتریکی زون دست نخورده Rt Resistivity of the uninvaded Zone
- مقاومت مخصوص سازند آبدار Ro Resistivity of the water
- اشباع آب زون دست نخورده Sw water saturation
- ضخامت لایه e یا h bed thickness
- فاکتور سیمان شدگی m Cementation Faction
- مقاومت مخصوص الکتریکی آب گل حفاری Rmf Resistivity of the mud filtrate
- مقاومت مخصوص الکتریکی زون شسته شده Rxo Resistivity of the flashed zone
- مقاومت مخصوص لایه شیلی مجاور Rs Resistivity of adjacent shale
- اشباع شدگی آب در ناحیه شسته شده Sxo Water saturation of flushed zone

فاکتورهای مورد ارزیابی در نمودارهای چاه نگاری:

در نمودار های چاه نگاری که اغلب بعد از هر حفاری انجام می پذیرد، اغلب سه فاکتور مد نظر می‌باشد:

۱-تخلخل Porosity

۲-نفوذپذیری Permeability

۳-پر شدگی یا اشباع Saturation

تخلخل چیست؟

تخلخل یعنی وجود روزنه یا خلل و فرج موجود در شبکه درون سنگی را گویند که ممکن است به صورت کانال های موئینه ای به هم ارتباط داشته باشند. اغلب این روزنه ها به هم مرتبطند یا ارتباطی با یکدیگر ندارند (سنگ پا) . این شبکه های مرتبط از نظر وجود سیال های نفتی و همچنین گاز طبیعی دارای اهمیت ویژه ای می باشند.

در نفت گیرها Oil traps مقدار ذخیره هر مخزن به حجم شبکه های مرتبط این روزنه ها مربوط می باشند که آن را درجه تخلخل سازند نامند یعنی هرچه تخلخل بیشتر باشد مقدار بیشتری سیال یا هیدروکربور در آنها جای می گیرد. برای اثبات این موضوع با آزمایشی ساده می توان به وجود روزنه ها و احیاناً آ بین روزنه ای و یا نفت و یا گاز در یک نمونه دستی که از چاه به دست آمده است، پی برد. برای این منظور مغزه ای Core sample که دارای طول مشخصی است و همچنین مقطع آن نیز معلوم است و تازه از چاه به دست آمده است را، در زیر حباب شیشه ای قرار می دهیم و از پایین به آن حرارت داده می شود. پس از لحظه ای مشاهده می کنیم که قطرات بخار آب زیر حباب شیشه ای جمع شده است.

اگر مغزه دارای نفت باشد در اثر حرارت به صورت سیال سیاه رنگی در روی کف صفحه حباب شیشه ای ظاهر خواهد شد و چنانچه مغزه دارای گاز باشد در نتیجه حرارت، می توان گاز فرار را به وسیله مواد جذب کننده جذب و آن را تشخیص داد.

به محض اینکه چنین مغزهای را که در زیر سرپوش وجود دارد در معرض هوا قرار دهیم مقداری از بخار آب هوا را جذب می کند.

با داشتن درصد تخلخل و همچنین حجم سازند می توان زون بازده (Production zone) را طبق فرمول زیر محاسبه نمود.

$$STOIIP = \frac{V_b \times \varnothing \times (1 - S_w)}{۴۳۵۶۰}$$

که V_b حجم سازند برحسب $ac - ft$ (اکرفوت) و s_w درجه اشباع سازند است.

انواع تخلخل کدام است:

۱-تخلخل کل Bulk pprosity

۲-تخلخل مؤثر Effective porosity

تخلخل کل عبارت است از : حجم کل روزنه ها یا فضاهای خالی به حجم کل سنگ. این تخلخل شامل کلیه فضاهای درون سنگی یا تمام روزنه های موجود در یک توده سنگی است. چه به صورت مرتبط و چه به صورت جدا از هم باشند مثلاً سنگ پا دارای تخلخل کلی ۵ درصد می‌باشد در حالیکه تخلخل ارتباطی آن صفر است بنابراین روی آب قرار می گیرد.

تخلخل مؤثر Effective porosity به تخلخلی اطلاق می شود که فقط فضاها و روزنه های مربوط به یکدیگر را در بر می گیرد. در صورتیکه حرکت سیال درون روزنه ها به آسانی انجام پذیرد.

تخلخل به صورت تخلخل اولیه و تخلخل ثانویه نیز مورد بررسی قرار می گیرد.

تخلخل اولیه به آن تخلخلی گویند که بین دانه ها وجود دارد و معمولاً در زمان رسوب گذاری و نهشته شدن دانه ها به وجود می‌آید، مقدار تخلخل به شکل قرار گرفتن و چگونگی دانه بندی و ارتباط دانه ها با هم نیز بستگی دارد، بعلاوه مقدار سیمان دانه ها (Matrix) نیز مهم می‌باشد هرچه سیمان بیشتر باشد تخلخل کمتر خواهد بود.

ماتریکس به قسمت های تشکیل دهنده سنگ مثل دانه های اصلی و سیمان اطلاق می شود. سنگ های رسوبی یا ساده است و یا مرکب . در صورتی ماتریکس را ساده گویند که دانه بندی سنگ و سیمان تشکیل دهنده سنگ از یک جنس باشند مانند دانه های کلسیتی و ماتریکس کلسیتی.

ماتریکس کمپلکس و یا مرکب به سنگی اطلاق می شود که دانه بندی سنگ و سیمان تشکیل دهنده از یک جنس نباشند مثلاً ماسه سنگی را در نظر می‌گیریم که سیمان آن آهکی است.

تخلخل ثانویه

این نوع تخلخل اغلب بعد از عمل رسوب گذاری پدیدار می‌آید، مانند انحلال – بازشدگی مجدد Opening ترک های موئی – درزه و شکاف های حاصله از عوامل تکنونیکی را می توان نام برد.

ضریب تخلخل

مقدار روزنه ها یا فضای آزاد در واحد حجم سنگ را ضریب تخلخل آن سنگ گویند. ضریب تخلخل با نوع سنگ تفاوت می نماید به طوری که داریم:

ضریب تخلخل (Porosity Coefficient)

$$\frac{\text{حجم فضاهای خالی موجود در یک سنگ}}{\text{حجم کل یک سنگ}} \times ۱۰۰$$

در صورتیکه داشته باشیم $V_i = V_b - V_g$ که در آن V_i حجم فضای آزاد Free volume و V_b حجم کل سنگ یا حجم ظاهری Apparent volume و V_g حجم دانه های تشکیل دهنده سنگ Grain volume بنابراین فرمول بالا به صورت

$$\varphi = \frac{V_i}{V_b} \times ۱۰۰ = \frac{V_b - V_g}{V_b} \times ۱۰۰ = ۱ - \frac{V_g}{V_b}$$

در می‌آید که با اندازه‌گیری حجم دانه های تشکیل دهنده نمونه دستی و همچنین حجم ظاهری آن و با اتکا به تخلخل سنج بویل Boyles low porositymeters مقدار تخلخل به آسانی قابل محاسبه خواهد بود.

تخلخل را بر حسب واحد تخلخل Porosity unit نیز می شناسند و علامت اختصاری آن P-u است.

قابلیت نفوذ یا تراوایی Permeability

آسانی عبور سیالات گوناگون داخل روزنه ها یا خلل و فرج و فضاهای خالی در یک سنگ را گویند به عبارت دیگر قابلیت هدایت مایعات Fluid conductivity درون سنگی را تراوایی نامند.

مثلاً اگر سنگی بتواند مایعات را در زمانی چون t از خود عبور دهد، گوییم دارای قابلیت نفوذ نسبی خوبی در مدت زمان مذکور است و اگر مقدار کمی را در همان زمان عبور دهد پس دارای قابلیت نفوذ ناچیز یا Impermeability می‌باشد. تراوایی به شکل قرار گرفتن دانه ها و اندازه روزنه ها نسبت به یکدیگر ارتباط دارد.

واحد اندازه‌گیری قابلیت نفوذ یا تراوایی در سیستم C.G.S دارسی یا میلی دارسی است که با K_a نشان می دهند و آن قابلیت نفوذ سیالی همگن را گویند که در صورتی که در مجاورت یک اتمسفر بر سانتیمتر مربع از سطحی برابر با یک سانتیمتر مربع در مدت یک ثانیه، یک سانتیمتر مکعب از سیال همگن با غلظت یک سانتی پواز را عبور دهد.

اگر ضخامت سنگ سازند را با h برحسب سانتیمتر و سطح مقطع آن را با s برحسب سانتیمتر مربع و فشار ورودی و خروجی سیال را با P1.P2 و ویسکوزیته سیال را با μ برحسب سانتی پواز می‌باشد نشان دهیم بنبراین Q را دبی بر حسب سانتیمتر مکعب بر ثانیه می توان نشان داد که این خود فرمول مشهور دارسی می‌باشد که به شرح زیر است:

$$Q = K \times \frac{۱}{\mu} \times \frac{s}{h} \times (P۱ - P۲)$$

که در اینجا K را ضریب نفوذپذیری مطلق نامند.

ضریب نفوذپذیری مطلق Absolute permeability

در صورتی که سنگی از سیالی هموژن به طور صد در صد اشباع شده باشد و بتواند سیال مذکور را به آسانی از خود عبور دهد، آن را تراوایی مطلق نامند.

اشباع

پر یا اشباع شدگی سیال یعنی چه؟

پر شدگی یا اشباع شدگی Fluid saturation فضاهای خالی یا حجم در بر گیرنده یک طبقه به وسیله سیالات گوناگون را گویند .

$$S_W = \frac{V_W}{V_P}$$

در صورتی که تمام حجم سنگ مثلاً از آب اشباع شده باشد، در این صورت آن را صد در صد اشباع از آب می‌دانیم و یا حجم آب اشباع شده در سنگ را مترادف حجم فضاهای خالی از آن سنگ محسوب می نماییم.

$S_O = \frac{V_O}{V_P}$ و $S_g = \frac{V_g}{V_p}$ به ترتیب اشباع شدگی نفت و گاز است. پس از تخلیه سیال، مقداری آب یا نفت و یا گاز به جداره دانه ها می چسبد که آن را نفت یا آب بازماند Residual oil نامند. اگر روزنه ها شامل نفت و آب با هم باشند، می توان مقدار اشباع شدگی را از رابطه $S_O = \frac{V_P - V_W}{V_P}$ که در آن V_P حجم کل فضاهای خالی در سنگ و V_W حجم آب داخل روزنه می‌باشد و اگر نفت موجود باشد S_O را از رابطه زیر به دست می آوریم که در آن : $S_O = ۱ - \frac{V_W}{V_P}$ و $S_O = ۱ - S_W$ است. بنابراین با داشتن اشباع شدگی آب یک ساند می توان اشابع شدگی هیدروکربور را به دست آورد. چون اشباع شدگی واحد ندارد لذا آن را با درصد نمایش می دهند.

$$S_W = \frac{V_W}{V_P} \times ۱۰۰$$

در صورتی که وجود گاز و یا نفت در سازند موجود باشد، همیشه مجموع اشباع شدگی آب و یا نفت را از عدد یک می کاهند به طوری که داریم:

$$S_g = ۱ - (S_W + S_O)$$

تغییرات قابلیت هدایت الکتریکی نسبت به املاح موجود در سازند و درجه حرارت محیط در برگیرنده:

با افزایش املاح در گل حفاری و یا افزایش حررات که در نتیجه افزایش عمق نتیجه می شود، قابلیت هدایت الکترولیتی افزایش می‌یابد. چون در آب درون روزنه ای و همچنین در گل حفاری ممکن است، یون های گوناگون وجود داشته باشند، به فرض اینکه تنها کلرور سدیم یا پتاسیم یافت شود. در درجه حرارت معین قابلیت هدایت الکتریکی با تمرکز بیشتر نمک افزایش می‌یابد. با کمک جداول ویژه یا آباک های مقاومت مخصوص الکتریکی که برای محلول های کلرور سدیم تهیه شده است می توان هر کدام از پارامترهای دیگر را مشخص نمود به طوری که در درجه حرارت محیط (ثابت فرض شود)، مقاومت مخصوص الکتریکی محیط قابل محاسبه خواهد بود. به فرض اینکه درجه حرارت محیط متفاوت باشد که این امر به دلیل افزایش عمق چاه می‌باشد. می‌دانیم که درجه حرارت در بالا و در پایین چاه یک نواخت نیست بنابراین مقاومت مخصوص الکتریکی در بال و در پایین چاه یک نواخت نخواهد بود و متغیر است.

رابطه بین Rw و T :

$$Rw۲ = Rw۱ \times \frac{T_۱}{T_۲}$$

که در این فرمول Rw1 مقاومت مخصوص الکتریکی در درجه حرارت T1 است که از روی منحنی می توان به دست آورد و Rw2 مقاومت مخصوص الکتریکی است که در درجه حرارت معلوم T2 به دست می‌آید.

سؤال: چطور می توانیم با داشتن مقاومت گل حفاری یعنی Rm مقاومت مخصوص اندود گل را یعنی Rmc و یا مقاومت مخصوص آب گل حفاری Rma را از روی منحنی به دست آورد.

دانستن مقاومت مخصوص الکتریکی گل حفاری برای تفسیر نمودارهای الکتریکی بسیار مهم است. اندازه‌گیری یا به وسیله نمونه برداری سطحی یا نمونه برداری چاهی و یا از روی نمودارهای چاه امکان پذیر است. همواره مقاومت مخصوص الکتریکی گل حفاری بیشتر از آب گل نفوذی می‌باشد با آباک ویژه شولمبرگر می توان هر هرکدام از فاکتورها را نسبت به دیگری به دست آورد مشروط بر اینکه یکی از پارامترها مشخص باشد. در صورتیکه گل حفاری منحصراً از کلرور سدیم تشکیل یافته باشد از رابطه زیر می توان استفاده کرد که داریم:

$$Rmf = ۰/۷۵Rm$$

$$Rmc = ۱/۵Rm$$

که در اینجا Rm مقاومت مخصوص گل حفاری و Rmf مقاومت مخصوص الکتریکی آب گل تراویده و Rmc مقاومت مخصوص الکتریکی اندوده گل در درجه حرارت مشخصی بر حسب اهم متر می‌باشد.

حال اگر گل حفاری غیر از کلرور سدیم یون های دیگری نیز داشته باشد باید از رابطه های دیگری استفاده کرد که عبارتند از:

$$R_{mf} = K_m (R_m)^{۱/۰۷}$$

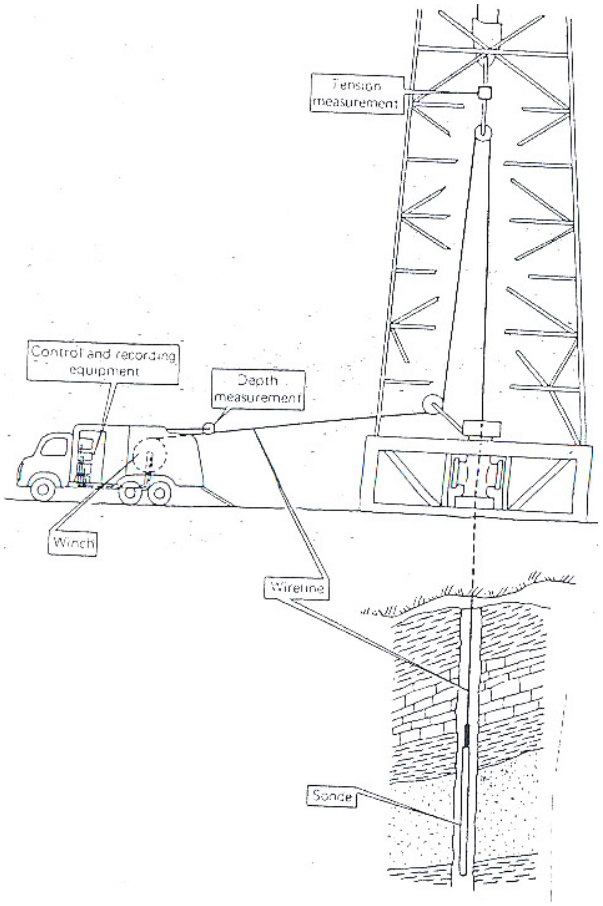
$$R_{mc} = ۰/۹۶(R_{mf})\left(\frac{R_m}{R_{mf}}\right)^{۲/۶۵}$$

در جدول زیر وزن گل و فاکتور Km آورده شده است.

وزن گل Mud Weight, lb/gal	فاکتور Km
۰	۰/۸۴۷
۱۱	۰/۷۰۸
۱۲	۰/۸۵۴
۱۳	۰/۴۸۸
۱۴	۰/۴۱۲
۱۶	۰/۳۸۰
۱۸	۰/۳۵۰

علائم کاربردی در تفسیر نمودارهای چاه:

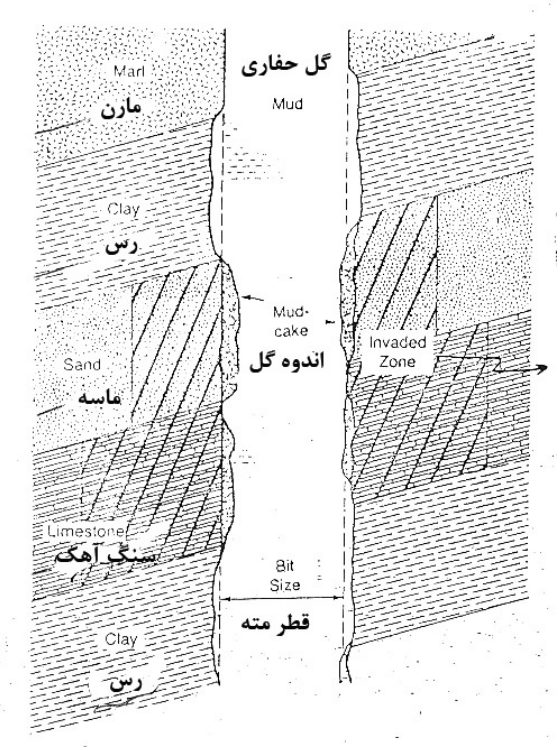
برای شناسایی لایه های یک چاه همان طوری که قبلاً اشاره شد، ابتدا یک گمانه اکتشافی حفر می نمایند. سپس به کمک دستگاه های نمودار گیر یا لاگینگ که به گیرنده های حساس متصل هستند و بوسیله دکل حفاری که بر روی چاه مستقر می‌باشد از بالا به پایین سوند نمودار گیر را داخل چاه می نمایند و از پایین به بالا سوند را با سرعت یکنواخت انتقال می دهند مطابق شکل زیر .



شکل بالا شمائی از دستگاه حفاری و چاه‌آزمایشی را که در آن نمودار لاگینگ انجام می‌شود نشان می‌دهد سوند لاگینگ در مقابل لایه‌های شیلی – ماسه سنگی – آهکی اثراتی را نشان می دهد که در کامیون ثبات به ثبت می‌رسد

در این عملیات، بسته به نوع نمودار گیر، خصوصیات کلی لایه های درون چاه اکتشافی مورد بررسی قرار می گیرد و اثرات پارامترهای فیزیکی آن در بیرون چاه و در درون کامیون ثبات ترسیم می شود. این نمودارهای ترسیم شده باید بررسی و با نمودارهای استاندارد انطباق و سپس مورد تفسیر و بالاخره شناسایی لایه ها درون گمانه اکتشافی صورت می گیرد. که البته این نوع تفسیرها باید همراه با بررسی و مقایسه با مغزه حفاری Core Sample باشد. از مقایسه با نمودارهای الکتریکی و مغزه حفاری لایه به طور کامل از نظر محتوای درون آن مورد سنجش قرار می گیرد. در روش های نمودارپرداری شرایطی وجود دارد که عدم توجه به آن شرایط مانع از انجام نمودار برداری می شود مثلاً چاه باید پر از گل حفاری یا آب باشد. در صورتی که چاه تهی از آب یا گل حفاری باشد از روش های دیگر چاه پیمایی استفاده می کنند مثلاً از روش های القایی که در نتیجه از وجود امواج الکترومغناطیس برای شناسایی لایه های چاه یا چاه های متروکه استفاده می شود یا روش های صوتی بکار می برند.

در چاه هایی که از گل حفاری استفاده می شود. خواص فیزیکی گل و آب گل حفاری و همچنین وضعیت اندازه‌گیری درجه حرارت باید مد نظر قرار گیرد. بعلاوه قطر گمانه نیز با نوع و اندازه سوند الکتریکی باید متناسب باشد چون قطر گمانه با وضعیت سازند نسبت دارد یعنی بدین صورت که هرچه لایه سست تر باشد محتوای آن داخل گل حفاری بیشتر می‌شود. بنابر این همراه گل حفاری برده می شود پس قطر چاه بیشتر از حد معمول خواهد بود. هرچه لایه سخت تر باشد قطر چاه به قطر واقعی و سر مته نزدیکتر خواهد بود.



شکل بالا چاهی را مشاهده می‌کنید که دارای لایه‌های رسی – سنگ آهک ماسه‌سنگ و مارن است. در این لایه هازون اشغال نشده و همچنین وضعیت سازندها نسبت به سرمته حفاری را نشان می‌دهد

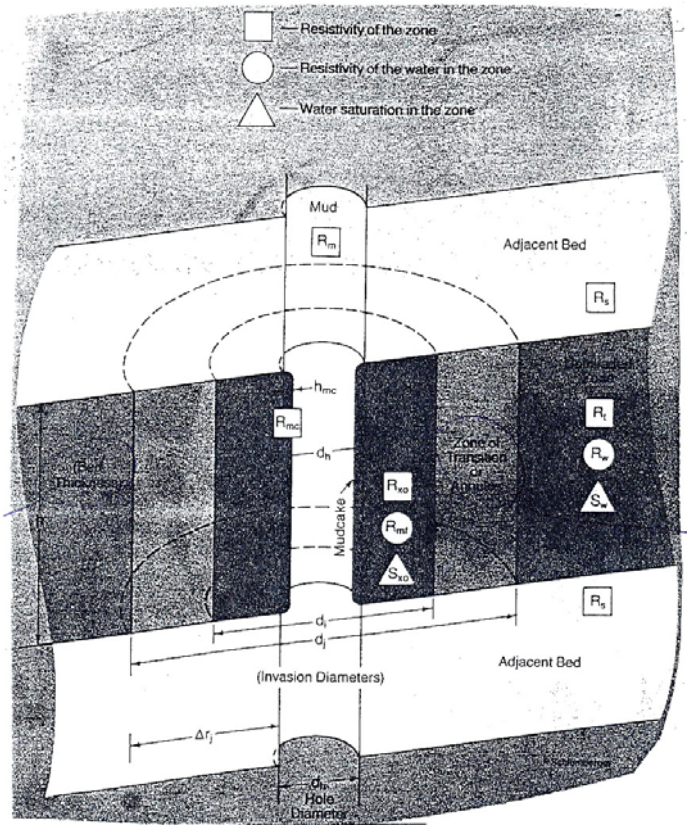
در مقابل طبقات نفوذپذیر ماند ماسه سنگ یا آهک متخلخل، آب موجود در گل از آن جدا شده و به داخل لایه نفوذپذیر وارد می شود و بنابراین مشخصات الکتریکی سازند را عوض می نماید و بعلاوه در اطراف چاه حلقه ای را به وجود می آورد که به نام منطقه آغشته یا آلوده یا منطقه اشغال شده نامیده می شود. وسعت آلودگی در اطراف چاه در یک سازند بستگی به وضعیت فیلتریشن گل حفاری، اختلاف فشار بین چاه و سازند و زمان نفوذ دارد و به علاوه وضعیت خود سازند نیز در رابطه با املاح موجود آن مؤثر می‌باشد. بنابراین زون آغشته خود به دو منطقه تبدیل می شود که عبارتند از زون شسته شده Flushed zone و زون حد واسط Transition zone که زون شسته شده بلافاصله بعد از جداره چاه و زون حدواسط بعد از زون شسته شده قرار می گیرند.زون حدواسط هم دارای آب گل حفاری است.

همچنین این زون دارای آب درون سازندی نیز می‌باشد. زون حدواسط در شرایط خاص به نام آنالوس Annalus نامیده می شود. بعد از منطقه آغشته یا آلوده، منطقه ای قرار دارد که به نام غیر آلوده یا بکر Uninvaded zone گفته می شود که آب گل حفاری به این منطقه وارد نشده و به اصطلاح آب درون روزنه ای غیر آلوده و حالت اصیل خود را حفظ کرده است.

در درون چاه و مجاور لایه نفوذپذیر، لایه ای از گل حفاری به وجود می‌آید که این ضخامت از گل را به نام اندوده گل Mud cake نامند. هرچه تخلخل بیشتر باشد، ضخامت اندود گل نیز بیشتر خواهد بود و باعث کاهش قطر گمانه در این قسمت خواهد شد. ضخامت اندوده گل را با hmc نشان می دهند. تغییرات ضخامت اندوده گل در مقدار مقاومت مخصوص الکتریکی لایه مورد بررسی تأثیر زیادی دارد. در صورتی که مته حفاری در حال چرخش باشد، ضخامت اندوده گل کاهش می‌یابد و اگرچاه به طور آرام قرار گیرد ضخامت اندوده گل افزایش خواهد یافت.

اگر مقاومت آب تراوش نموده که آن را تراویده Filtrate نامند کمتر از مقاومت آب موجود در سازند باشد، بنابراین باعث کاهش مقاومت مخصوص الکتریکی طبقه نفوذپذیر می شود و برعکس.

اگر لایه ماسه سنگی دارای مواد رسی به صور مختلف باشد آن را ماسه سنگ ناپاک نامند و چنانچه چنین ماسه سنگی بدون ذرات رسی باشند آن را ماسه سنگ خالص یا سازند تمیز Clean formation امند که در بررسی نمودارهای چاه بسیار مهم می باشند.



شماتیکی از چاه و نواحی اطراف آن

در شکل ۳ چاهی را به قطر dh با لایه های متفاوت نشان داده است که در آن h ضخامت چاه و di لایه اندوده گل و زون شسته شده و dj برای لایه اندوده گل و زون شسته شده و زون حد واسط و در این شکل مقاومت گل را با Rm و مقاومت اندوده گل را با Rmc و ضخامت آن را با hmc و مقاومت هر یک از لایه ها را روی شکل همراه با مقاومت سیال درون آنها با علائم مخصوص نشان داده است.

باید متذکر شد که شعاع نفوذ بستگی به قطر چاه، نوع سیال داخل سازندهای چاه، ضخامت اندوده گل حفاری و به نوع الکترولیت موجود دارد. در ناحیه دست نخورده به دلیل عدم تماس سیال بیگانه، مقاومت حقیقی سازند Rt قابل اندازه‌گیری خواهد بود که با دستگاه های نمودارگیر می توان این مقاومت را به دست آورد. در این ناحیه ممکن است آب درون سازندی با مقاومتی چون Rw موجود باشد و یا ممکن است در این ناحیه دست نخورده حتی نفت و یا گاز نیز باشند، بنابراین محاسبه Sw یا اشباع آب در این منطقه بسیار مهم خواهد بود برای محاسبه اشباع شدگی هیدروکربور کافی است که اشباع شدگی آب را از واحد کم نماییم به طوری که داریم:

$$So = ۱ - Sw$$

ضریب مقاومت مخصوص طبقه یک چاه و ارتباط آن با تخلخل F.R.F

گمانه ای را در نظر بگیرید که در این گمانه یک لایه تمیز یعنی لایه ای که از جنس ماسه سنگ است و بدون مواد رسی یا مارنی می‌باشد. مقاومت مخصوص الکتریکی این لایه متخلخل را $R_{\circ}$ می نامیم و مقاومت ویژه الکتریکی آب موجود در این لایه را Rw نمایش می دهیم. بنابراین ضریب مقاومت مخصوص الکتریکی Formation Resistivity Factor این لایه از رابطه:

$F = \frac{R_{\circ}}{Rw}$ بدست می‌آید که رابطه بین ضریب مقاومت مخصوص الکتریکی و تخلخل برای تعیین a,m به صورت روبرو می‌باشد:

$$a = F_{۱}\varphi_{۱}^{m} = F_{۲}\varphi_{۲}^{m}$$

$$m = \frac{\log F_{۱} - \log F_{۲}}{\log \varphi_{۲} - \log \varphi_{۱}}$$

این ضریب که نسبت مقاومت مخصوص الکتریکی به مقاومت مخصوص آب موجود در آن است نسبت به نوع طبقه و جنس آن و آب موجود در آن متغیر است و با تخلخل و نفوذپذیری و به شکل و اندازه فضاهای خالی و بالاخره فاکتور پیچاپیچی (τ) یا تور توزینی Tortuosity مسیر عبور جریان سیال در روزنه بستگی دارد. می توان گفت که $R_{\circ}$ نسبت معکوس با تخلخل لایه یعنی (φ) دارد اصولاً اندازه‌گیری Rw یا مستقیماً با اندازه‌گیری نمونه آب درون سازندی یا نمودار S.P امکان پذیر می‌باشد.

مقدار F اغلب به طور تجربی و برحسب شرایط محلی محاسبه می شود. برای یک تخلخل ثابت نسبت $R_{\circ} / Rw$ در تمام مواردی که $Rw \leq ۱\Omega m$ باشد ثابت خواهد بود و در صورتی که مقاومت آب موجود در لایه افزایش یابد یعنی Rw افزوده گردد و در همین حال اندازه دانه بندی کاهش یابد (تخلخل زیاد شود) مقدار و ضریب مقاومت مخصوص الکتریکی کاهش می‌یابد.

از فرمول آرچی می توان تخلخل را به آسانی محاسبه نمود مشروط بر اینکه ضریب مقاومت مخصوص الکتریکی را داشته باشیم در این فرمول داریم:

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

این فرمول زمانی صادق است که سازند سخت بوده و عاری از رس یا مارن باشد. در فرمول آرچی m را ضریب سیمان شدگی و a ضریب ثابتی است که به جنس سنگ ارتباط دارد و φ هم تخلخل سازند است. در یک سازند m و a مقادیر ثابتی می باشند که در آزمایشگاه قابل محاسبه هستند.

طبق جدول گویود مقدار m بین ۱/۳ و ۲/۲ متغیر است جدول زیر مقدار m را مشخص نموده است.

m ضریب سیمان شدگی	نوع سنگ
۲/۲-۲/۰	سیمان زیاد (کوارتز – دولومیت - سنگ آهک)
۲/۰-۱/۸	سیمان متوسط (شن سیمان دار – شن سیمان کم)
۱/۷-۱/۴	شن با سیمان کم (شن با تخلخل و تراوایی زیاد)
۱/۳	شن با سیمان کم

و مقدار a نیز بسته به m متغیر است و بین ۰/۶ تا ۲ تغییر می نماید مثلاً در سنگ های کربناته $۰/۶ < a < ۱$ و در این سنگ ها m بین ۱ تا ۳ تغییر می نماید.

فرمول بالا را می توان به صورت مختلف نوشت. مثلاً فرمول هامبل Humble formula در مورد لایه های نرم یا رسوبات ناپیوسته مانند ماسه ها اغلب به صورت $F = \frac{۰.۸۱}{\varphi^{۲}}$ نوشته می شود.

در صورتی که سازند متراکم باشد این فرمول صادق نخواهد بود مثلاً در سنگ های آهکی آلیتی پیوسته فرمول $F = \frac{۱}{\varphi m}$ مورد استفاده قرار می گیرد.

اگر ماسه سنگ سخت و فاکتور سیمان شدگی آن برابر با ۲ باشد بنابراین $m = ۲$ و فرمول بالا به صورت $F = \frac{۱}{\varphi^{۲}}$ درخواهد آمد و اگر نرمی بیش از اندازه تصور باشد در نتیجه فرمول هامبل به شکل $F = \frac{۰/۶۲}{\varphi ۰/۱۵^{۲}}$ خواهد بود.

بنابراین اگر مقدار تخلخل سازند یا (φ) مشخص باشد، می توان با در نظر گرفتن نوع سنگ مقدار F واقعی را از روی منحنی شولمبرگر به دست آورد. کافی است با در نظر گرفتن وضعیت سنگ و نوع آن، مقدار تخلخل را بر روی محور عرض‌ها به دست آورد و سپس به موازات محور طول ها خطی ترسیم و محل برخورد آن را با یکی از منحنی ها به دست آورد و از آن نقطه به محور طول ها عمود نمو د و بنابراین مقدار F به دست می‌آید. عکس حالت بالا نیز صادق می‌باشد. اگر سازندی به طور یکنواخت در یک چاه حفاری وجود داشته باشد می توان مقدار ضریب a و m را از آنالیزهای نمونه های چاهی محاسبه و آن را با ضرایب a و m به چاه های دیگر تعمیم داد.

با داشتن Rw , a , m که از برداشت های پتانسیل خود زا یا S . P قابل محاسبه است، $R_{\circ}$. از فرمول آرچی به دست می‌آید که:

$$R_{\circ} = (\frac{a}{\varphi^{m}})Rw$$

رابطه بین مقاومت مخصوص الکتریکی لایه با اشباع آب یا هیدروکربور در آن:

مقاومت مخصوص الکتریکی لایه ها در نتیجه وجود آب یا هیدروکربورها یا گاز به طور کلی تغییر می نماید. چون نفت و گاز به سختی جریان الکتریکی را از خود عبور می دهند، پس مقاومت مخصوص الکتریکی سازند را افزایش می دهند . بنابراین مقاومت مخصوص الکتریکی لایه ها متناسب با مقاومت مخصوص الکتریکی آب (آب شور یا آب شیرین) یا هیدروکربور یا گاز در داخل روزنه های طبقات می‌باشد.

مقدار آب اشباع شده در داخل طبقات که آن را با Sw نشان می دهیم Water Saturation بستگی به خواص پتروفابریک Petrofabric سنگ خواهد داشت. این خواص به عوامل زیر بستگی دارد:

- به نفوذپذیری و تخلخل سنگ.
- به سطح دانه بندی سنگ در برگیرنده لایه و طرز قرار گرفتن آنها نسبت به یکدیگر یا به عبارت دیگر به سطوح جانبی ذرات تشکیل دهنده سنگ.
- علاوه بر موارد بالا به نوع و مشخصات گل حفاری که این مشخصات عبارتند از: غلظت گل viscosity و وزن مخصوص آن Density بستگی دارد.
- ضخامت و ارتفاع منطقه اشباع شده و همچنین قسمتی که در بالای سطح آب زیر زمینی W T قرار دارد.

معمولاً با زیاد شدن ارتفاع در منبع، مقدار اشباع شدگی کم می شود به طوری که از صد در صد اشباع شدگی در عمق به کمترین مقدار در روی منبع می رسد. در این حال بر روی سطح منبع اشباع شدگی هیچگاه به صفر نمی رسد. به عبارت دیگر قسمتی از مخزن که زیر منطقه سطح آب قرار دارد دارای اشباع شدگی صد در صد می‌باشد و بقیه مخزن به وسیله نفت و گاز اشغال شده اند.

برطبق فرمول آرچی اشباع شدگی یک سازند تمیز را می توان به صورت مقاومت مخصوص واقعی و یا حقیقی Rt نشان داد. مقدار Rt از روی منحنی قابل محاسبه است.

$$Sw = (\frac{R_\circ}{Rt})^{\frac{1}{n}} = (\frac{F.Rw}{Rt})^{\frac{1}{n}} = (\frac{\varphi^m.Rw}{Rt})^{\frac{1}{n}}$$

در این فرمول n را نمای اشباعی Saturation Exponent می نامند و مقدار آن بین ۱/۷ تا ۲/۲ متغیر است. مناسب ترین عدد ۲ است. در رابطه بالا می توان .R را برابر با F×Rw نوشت یعنی مقاومت سازند در صورتی که صد در صد با آبی به مقاومت Rw پر شده باشد پس رابطه کلی اشباع شدگی را می توان به صورت زیر نوشت:

$$Sw = \sqrt{\frac{R_\circ}{Rt}}$$

که در این فرمول Sw اشباع شدگی آب موجود در طبقه برحسب درصد و $R_\circ$ مقاومت ویژه الکتریکی طبقه تمیز که صد در صد به وسیله آب نمک دار Rw اشباع شده باشد و Rt نیز مقاومت مخصوص الکتریکی واقعی لایه برحسب اهم متر می‌باشد.

نسبت $Rt/R_\circ$ را به نام شاخص مقاومت مخصوص الکتریکی لایه نامند اگر سازند دارای آب باشد این شاخص برابر با یک است و در صورت وجود هیدروکربور در سازند بزرگتر از یک خواهد بود.

هماطوری که متذکر شده ایم برای محاسبه مقدار هیدروکربور اشغال شده در سازند از رابطه 1-Sw استفاده می‌کنیم.

تذکر: در یک سنگ متخلخل، هرگز صد در صد از هیدروکربور اشباع نخواهد شد، بلکه تحت نیروی موئینه کمی در آن آب وجود دارد که این مقدار آب را درجه اشباع کاهش ناپذیری .Irreducible-water گویند که با (Sw) irr نشان می دهند. اشباع آب بستگی به اندازه خلل و فرج، قطر کانال های موئینه – ماهیت دانه ها و نوع خمیره دارد. درجه اشباع هیدروکربور باقیمانده در یک سنگ را با hr (S) نشان می دهند.

سؤال: مقاومت مخصوص الکتریکی یا لایه یا طبقه به چه عواملی بستگی دارد؟

جواب: به مقاومت مخصوص الکتریکی آب موجود در داخل حفره ها و روزنه های درون سنگی و به نوع سنگ که برای مشخص شدن سنگ به فاکتور مقاومت مخصوص طبقه مراجعه می کنیم. اگر طبقه دارای هیدروکربور یا گاز باشد به محتوای آن و مقدار آب آغشتگی موجود در سازند بستگی دارد.

حدود مقاومت مخصوص الکتریکی طبقات و دسته بندی آنها:

همانطوری که اشاره شد به دلیل وجود آب در خلل و فرج لایه های رسوبی، مقاومت مخصوص آنها تغییر می نماید. وجود هیدروکربورها در روزنه ها، مقاومت آنها را افزایش مید هد. معمولاً در طبقات رسی یا در لایه های شیلی به دلیل متخلخل بودن این گونه لایه ها دارای قابلیت نفوذ بسیار ناچیزی می‌باشد و به علاوه در نتیجه یکنواخت بودن گسترش مجاری در آنها و روزنه هایشان، مقاومت مخصوص الکتریکی آنها کم و هدایت الکتریکی بالا و یکنواخت دارند.

پس در لایه های رسی یا لایه های مارنی به دلیل داشتن درجه تخلخل خوب و قابلیت نفوذ بسیار جزئی، آب موجود در آنها از راه رگ های موئی به هم متصل هستند. پس نتیجه می‌گیریم اینگونه طبقات یعنی طبقات رسی دارای مقاومت کم و یک نواخت می باشند مشروط بر اینکه دارای خلوص خوبی باشند.

در طبقات فشرده شده یا متراکم Consolidate rock از قبیل سنگ آهک، سنگ گچ یا انیدرید یا سنگ نمک یا حتی ذغال سنگ، مقاومت مخصوص الکتریکی بالا می‌باشد و علت این امر به دلیل نبود آب در داخل خلل و فرج دانه بندی آنها است.

در طبقات غیر فشرده شده Unconsolidate rock یعنی آنهایی که درجه تخلخل و قابلیت نفوذشان بر خلاف شیل ها زیاد است مانند ماسه سنگ های متخلخل با سیمان کم یا ماسه شنی، در این دسته از سنگ ها مقاومت مخصوص الکتریکی آنها بسته به نوع سیال جاری موجود در بین دانه بندی آنها تغییر می نماید. اگر این طبقات پر از آب نمک باشند، دارای قابلیت هدایت زیاد و مقاومت مخصوص الکتریکی کم و در صورتی که مقدار هیدروکربور چه به صورت گاز چه به صورت مایع باشند مقاومت مخصوص الکتریکی زیادی خواهند داشت. با در نظر گرفتن موارد بالا، انواع سازندهای متشکله یک چاه را در رابطه با مقاومت مخصوص الکتریکی به قرار زیر تقسیم می نماییم:

۱- سازند نرم Soft Formation

این نوع سازندها معمولاً به طبقات ماسه و مارن اطلاق می گردد که درجه تخلخل آنها اغلب زیاد است و از ۲۵ درصد بیشتر می‌باشد. بنابراین این نوع لایه ها که اغلب در بین یک عده از لایه های نازک و سخت قرار می گیرند به آنها لایه های بین لایه ای Interbedded layer گویند. مقاومت مخصوص اینگونه لایه‌ها را از دهم متر برای ماسه‌سنگ‌ها که حاوی آب‌نمک می‌باشند تا چندین دهم متر برای ماسه‌سنگ‌هایی که با مقدار زیادی نفت آغشته‌اند متفاوت می‌باشد.

۲- سازند های متوسط Intermediate Formation

این نوع طبقات شامل آهک – ماسه سنگ – دولومیت می باشند که اغلب متراکم بوده و درجه تخلخل آنها از ۱۰ الی ۲۵ درصد متفاوت است. درجه سمانتاسیون آنها زیر ۲ است. اغلب لایه های مارنی یا لایه هایی از سنگ سخت در بین آنها قرار دارند. مقاومت مخصوص الکتریکی آنها متغیر است و در حدود ۵۰ الی ۱۰۰ اهم متر می‌باشد.

۳- سازندهای سخت Hard Formation

این نوع سازندها از سنگ های کاملاً متراکم آهکی یا دولومیتی یا ماسه سنگ های کاملاً فشرده شده با سیمان زیاد که درجه سمانتاسیون آنها ۲ است تشکیل شده اند. درجه تخلخل آنها زیر ۱۰ در صد است در صورتی که دارای قابلیت نفوذ خوبی باشد، که آن در نتیجه حفره یا شکاف های موئی موجود در آنها است، مقاومت مخصوص الکتریکی آنها بین ۲۰۰ تا ۳۰۰ اهم متر خواهد بود.

انتشار سیال گل حفاری و تأثیر مقاومت مخصوص الکتریکی براساس آنها در طبقات نفوذپذیر:

در چاه هایی که حفر می شود برای خنک شدن سر مته و انتقال مواد ریز دانه شناور مجبورند از گل حفاری استفاده کنند. به دلیل سیکل گل حفاری از انتهای سرمته به بالا و بالعکس، داخل چاه همیشه فشار هیدرواستاتیکی گل حفاری بیشتر از فشار داخل سازندها است و در نتیجه مقداری از ذرات معلق درون گل که آن را به نام سوسپنشن Suspension نامند، از راه بین دانه ها و حفره خلل و فرج های سنگ به داخل طبقات نفوذ می کند و آب گل حفاری که به نام تراویده Mud filtrate یا فیلترات نامیده می شود و مقاومت مخصوص الکتریکی آن را با Rmf نشان می دهند، مواد جامد ریز دانه خود را در روی لایه سازند متخلخل جای می گذارد و به صورت تصفیه شده داخل روزنه طبقات شده و جایگزین آب موجود در سازند می شود. مواد بر جای مانده روی جداره لایه چاه، لایه ای به وجود می آورد که حالت فیلتر را دارد و به نام اندود گل Mud cake نامیده می شود و مقاومت مخصوص الکتریکی آن را Rmc نامند. ضخامت اندود گل و قابلیت نفوذش به نوع گل حفاری و همچنین به شکل انجام حفاری و همچنین خلل و فرج بستگی دارد یعنی نوع طبقه یا سازند در تعیین ضخامت اندود گل مؤثر است به عبارت دیگر هر چه ضخامت اندود گل بیشتر باشد تخلخل لایه و نفوذپذیری آن نیز بیشتر است ولی دارای حدی است.

پشت اندود گل ناحیه ای به وجود می‌آید که آن را ناحیه شسته شده گویند. قابلیت نفوذ آب گل حفاری و همچنین ناحیه اشغالی اهمیت زیادی در اندازه‌گیری مقاومت مخصوص الکتریکی سازندها دارد. چون قابلیت نفوذ در سنگ های گوناگون متفاوت است به همین دلیل زون آغشته و زون شسته شده دارای ضخامت متغیری می‌باشد.

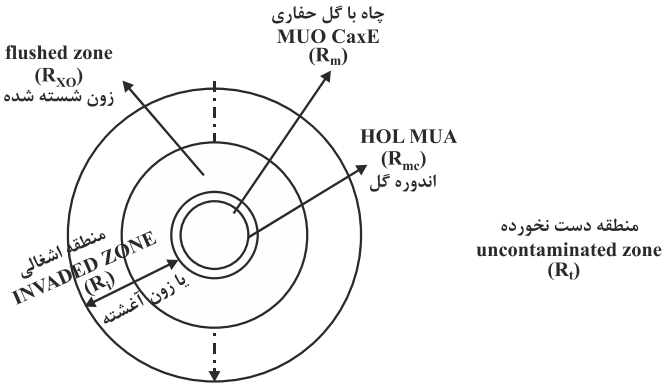
به طور کلی می توان وضعیت لایه های متخلخل را در ارتباط با تخلخل بین دانه ای به دو گروه تقسیم نمود:

۱- لایه ای که تخلخل آن منحصراً از فواصل بین دانه بندی تشکیل شده و تقریباً دارای تخلخل یک نواختی می‌باشد که تخلخل آن را اینتر گرانولار Uniform intergranular گویند.

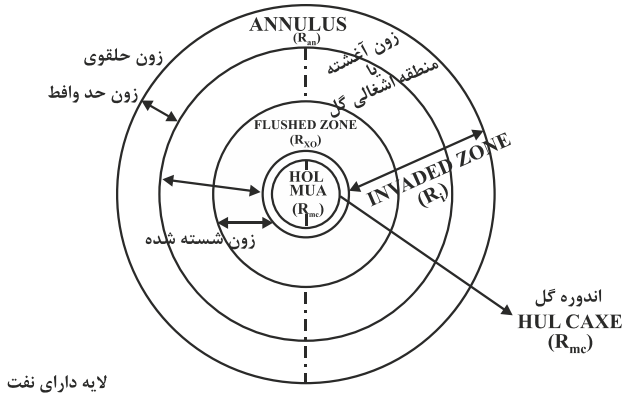
در این نوع تخلخل هر چه دانه های تشکیل دهنده روزنه یک نواخت تر و فواصل روزنه ها کوچک تر باشد، به همان نسبت زون آغشته کوچک تری تشکیل می شود و هر چه روزنه ها دارای فواصل زیادتری و در وسعت بیشتری باشند و ارتباط آنها گسترده تر باشند به همان نسبت ضخامت زون آغشته بزرگ تر خواهد بود.

۲- لایه یا طبقه ای که تخلخل آنها شامل شکاف ها یا درزه های موئین ریز یا درشت باشد که اینها ممکن است موازی یا غیر موازی باشند و دلیل تشکیل آنها عوامل تکنونیکی و تحت نیوری کوپل باشد، این دسته دارای تخلخل غیر یک نواخت می باشند.

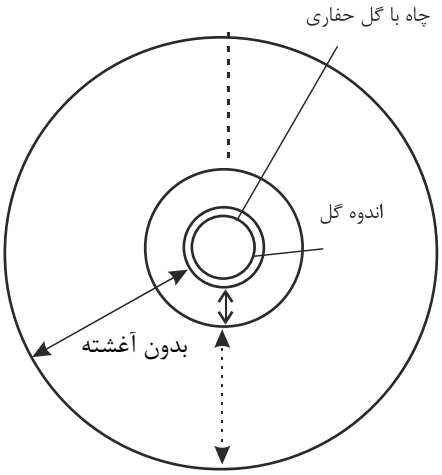
تخلخل غیر یکنواخت را به نام تخلخل نوع نان یونیفرم Non uniform porosity نامند در برخی از کتب اینگونه تخلخل را به نام تخلخل شکافی Fissure porosity گویند. نفوذپذیری در این شکاف ها بیشتر از نفوذپذیری در نوع تخلخل بین ذره ای یا روزنه ای است، چون در بعضی مواقع شکاف ها در نتیجه انحلال به هم مربوط هستند. با در نظر گرفتن دو نوع تخلخل بالا می توان گفت که اولاً لایه هایی که منحصراً دارای آب درون روزنه ای هستند در صورتی که روزنه های لایه ها صددرصد از آب اشباع باشد و این آب با جابه جایی به وسیله آب گل حفاری تا نواحی بیشتری نسبت به بدنه چاه رانده شده باشد، ناحیه ایجاد شده را به نام ناحیه اشغالی کامل یا زون شسته شده کامل Complete flushed zone گویند. اغلب نواحی کاملاً شسته شده بیشتر از ده اینچ توسعه دارد و هرچه تخلخل بیشتر باشد ناحیه شسته شده بهتر مشخص می شود. البته نفوذپذیری نیز رل اساسی ایفا می نماید. به طوری که قطر ناحیه آغشته در سنگ هایی که دارای نفوذپذیری کمی هستند مانند رس ها بیشتر از سنگ هایی است که نفوذپذیری بیشتری دارند.



هرچه روزنه یا تخلخل و فرج سنگ بیشتر و قابلیت نفوذش بالاتر باشد، گل آب عمق کمتری از سازند را اشغال خواهد کرد. به نظر شما چرا و چه عاملی باعث این تغییرات شده است. در شکل مقابل لایه ای را مشاهده می کنید که دارای آب بین روزنه ای بوده و اندوده گلی با مقاومت Rmc روی جداره چاه تشکیل یافته است و بعد از آن زون شسته شده ای را که مقاومت آن را Rxo است مشاهده می کنیم.



این مجموعه منطقه اشغالی را به وجود آورده است که دارای مقاومت Ri می‌باشد و بالاخره زون دست نخورده یا غیر اشغالی را با مقاومت مخصوص الکتریکی Rt را مشاهده می کنیم. گل حفاری دارای مقاومتی چون Rm است که در اینجا زون حد واسط یا حلقوی وجود ندارد.



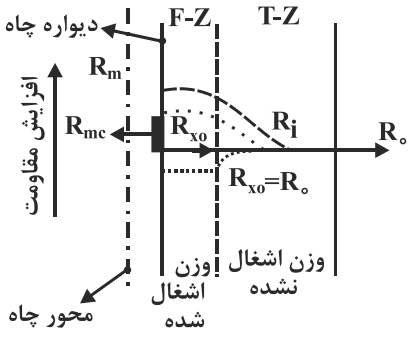
برش افقی از یک لایه حاوی نفت

در شکل دوم در صورتی که سازند دارای آب یا هیدروکربور و گاز باشد در این حالت تعیین وضع انتشار و نفوذ آب گل حفاری در منطقه شسته شده مسئله پیچیده ای را به وجود می آورد و باید عوامل زیر را همواره مد نظر قرار داد:

- ساختمان داخلی لایه به چه صورت است؟
- نسبت بین آب گل به آب موجود در طبقه به چه شکل است؟
- وزن مخصوص نسبی مایعات موجود در سازند و غلظت آنها به چه فرم است؟
- نیروی موئینه گی Capillary force موجود در روزنه ها چیست؟

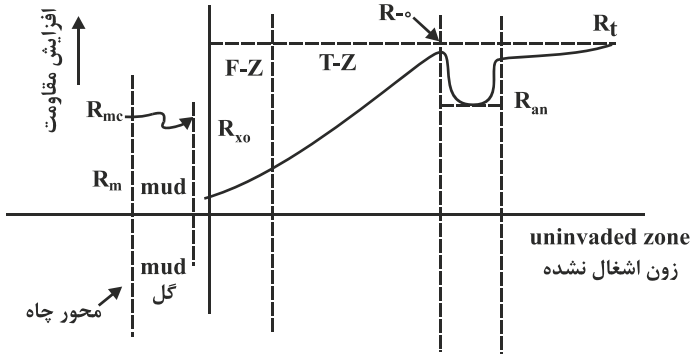
در شکل بالا، وضعیت افقی در یک چاه را مشاهده می کنیم در اینجا Rmc مقاومت مخصوص الکتریکی اندود گل و Rm مقاومت مخصوص گل حفاری و Rxo مقاومت مخصوص زون شسته شده را نشان می دهد. آب گل موجود از نوع کم نمک یا به اصطلاح آب شیرین است با افزایش فاصله از محور چاه در نتیجه کاهش نفوذ فیلترات به داخل سازند، مقاومت زون اشغال شده کاهش می‌یابد، به طوری که در منطقه اشغال نشده برابر با مقاومت مخصوص واقعی سازند خواهد بود.

در شکل دوم گل حفاری دارای نمک بیشتری نسبت به آب‌سازند است که در این شکل مقاومت مخصوص زون شسته شده برابر با مقاومت مخصوص الکتریکی زون دست نخورد ه خواهد بود و از آن کمی بیشتر خواهد بود. بر اساس این پدیده‌ها می توان با داشتن مقاومت مخصوص الکتریکی گل حفاری، مقاومت مخصوص الکتریکی زون دست نخورده را به دست آورد.



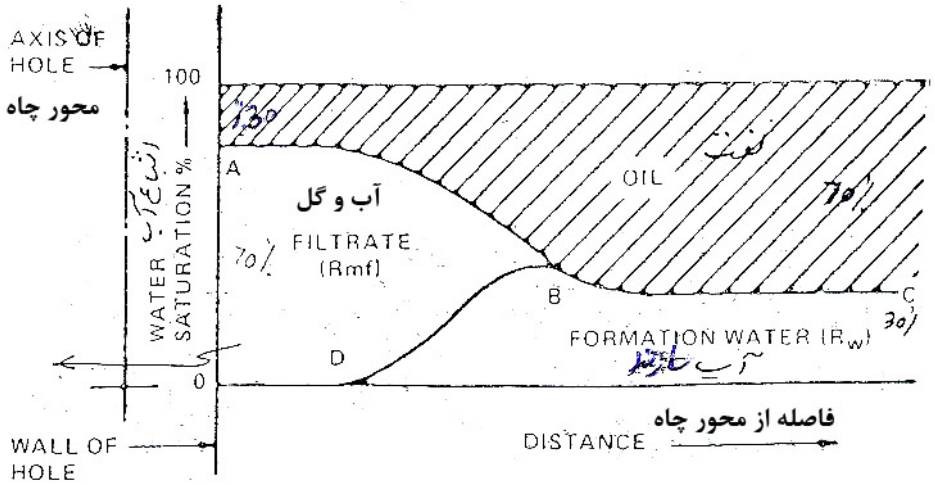
وضعیت زون اشغال شده و زون اشغال نشده در چاهی که دارای نمک است.

در حالتی که سازند علاوه بر آب دارای هیدروکربور نیز باشد، وضعیت نسبت به قبل فرق خواهد نمود.



وضعیت زون اشغال شده و زون اشغال نشده در چاهی که دارای نمک خیلی زیاد است.

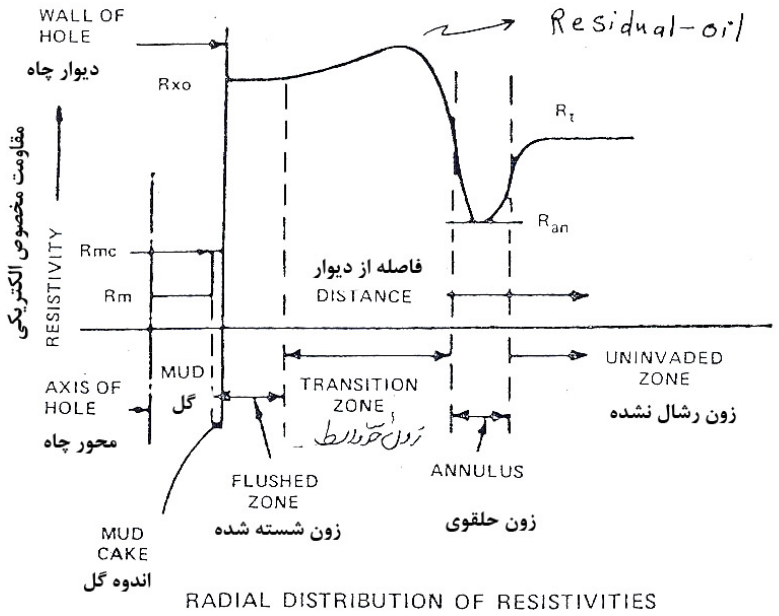
در شکل بالا وضعیت آب و نفت و آب فیلترات را در رابطه با اشباع شدگی مشاهده می کنیم همان طوری که در شکل دیده می شود، روی محور طول ها فاصله از دیواره چاه و روی محور عرض ها تغییرات کمی آب اشباع شده را آورده‌ایم.



شکل بالا اشباع‌شدگی آب گل – نفت و آب سازندی را در یک سازند نفت‌دار نشان می‌دهد.

شکل بالا نمایشی از سازند نفت دار است که در نتیجه فشار هیدرواستاتیکی نفت قبل از آب شور و به صورت نفت بازماند در آمده است در حالی که مقاومت ویژه آب شور کمتر از مقاومت ویژه نفت است.

منحنی A B C مقدار آب اشباع شده را در مناطق مختلف نشان می دهد. در نقطه A نفوذ آب گل کامل است. در امتداد A B به تدریج از میزان آب یا آب فیلتر شده کم و بر میزان آب طبقه ای افزوده می شود. B C حد اشباع شدگی نسبتی آب و نفت طبقه ای را در حالت عادی نشان می دهد. منحنی BD منطقه، نفوذ آب گل فیلتره شده و بخش آب مطبقه ای را از هم تفکیک می کند (فشار باعث رانده شدن نفت به داخل سازند شده است بنابراین در منطقه زون شسته شده نفتی وجود ندراد) . در منطقه B C به دلیل رانده شدن نفت به داخل کم کم به وضعیت نفت هفتاد درصدی و سی درصدی آب سازندی تبدیل می شود در اصل زون دست نخورده را نشان می دهد.



شکل بالا نمایشی از سازند نفت‌دار است که در نتیجه فشار هیدرواستاتیکی نفت قبل از آب شور و به صورت نفت بازماند درآمده است در حالیکه مقاومت ویژه آب شور کمتر از مقاومت ویژه نفت است

شکل ۱۰ مربوط به سازندهایی است که دارای هیدروکربور می باشند. در نتیجه نفوذ آب گل حفاری زون شسته شده تشکیل می شود و چون قابلیت هدایت الکتریکی گل حفاری کم و مقاومت آن بالا است در نتیجه مقاومت زون شسته شده در حد بسیاری بالایی خواهد بد. در اینجا مقدار نفتی که در ناحیه مجاور چاه وجود داشت به داخل رانده شده و منطقه ای را به وجود می آورد که به نام نفت باز ماند Residual oil نامیده می شود و این نفت بازماند در فاصله دورتر از جداره چاه در منطقه حدواسط، مقاومت مخصوص الکتریکی بالایی را به وجود می آورد بنابراین مقاومت مخصوص الکتریکی منطقه اشغالی از حالت قبلی که به طور یک نواخت بود بیشتر خواهد شد در اینجا مقاومت مخصوص الکتریکی زون شسته شده یعنی Rxo نیز نسبت به مقاومت مخصوص واقعی سازند یا Rt افزایش نشان می‌دهد و این افزایش کم کم در زون حد واسط به ماکزیممم خود می رسد که دلیل آن وجود نفت بازماند است و بعد از آن در زون حلقوی به طور ناگهانی مقاومت مخصوص الکتریکی کاهش می نمیاد و این خود به دلیل وجود ناحیه ای است به نام ناحیه حلقوی یا آنالوس Annaulus که مقاومت آن را با Ran نمایش می دهیم در اینجا مقاومت مخصوص دالکتریکی واقعی سازند Rt بزرگ تر از مقاومت مخصوص الکتریکی زون حلقوی است دلیل آن این است که نفوذ گل آب به داخل طبقه نفت و آبدار نفت و آب شور به داخل رانده می‌شوند و چون اشباع شدگی نفت بیشتر از آب شور است پس با سرعت بیشتری نسبت به گل آب رانده می شود. بر اثر این اختلاف سرعت که در واقع اختلاف در نفوذپذیری دو سیال است، در پشت منطقه نفت منطقه ای به وجود می‌آید از آب شور که به نام زون حلقوی یا آنالوس معروف است و منحصراً از آ طبقه ای که تمرکز نمک در آن زیاد است تشکیل شده است و به دلیل داشتن هدایت خوب الکتریکی، افت مقاومت دیده می شود . برای همین موضوع است که Ran از Rt و Rxo کمتر خواهد بود.

درشکل ۸ چاهی را مشاهده می کنیم که گل حفاری از نوع نمکی بوده و بنابراین مقاومت مخصوص الکتریکی Rxo از مقاومت مخصوص واقعی سازند یعنی Rt کمتر است.