
بسم الله الرحمن الرحيم

شرح جامع و نمونه سوالات

پتروفیزیک و چاه نگاری(چاه پیمایی)

«مهندسی معدن مهندسی نفت»

(مهندسی اکتشاف نفت فرآوری مواد معدنی مکانیک سنگ اکتشاف معدن)

مولفان: مهدی بادل – مسعود طهرانی مجد

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

پیشگفتار مولف

تورا گرچه در مال افزایش است به اندازه دانشت ارزش است

ادیب پیشاوری

چاه نگاری از مهمترین مباحث اکتشافی در صنعت نفت است. از اجرای نگارگیری و سونداژزنی تا تفسیر نمودارهای چاه پیمایی همه و همه نیازمند تخصص و تجربه است. از چاه نگاری در اکتشاف منابع معدنی نیز کمک گرفته می‌شود. از این جهت است که این واحد درسی در مقاطع بالاتر مجموعه مهندسی نفت و معدن حائز اهمیت است. مجموعه حاضر چکیده‌ای از مهمترین بخش‌های کتب چاه‌نگاری و پتروفیزیک است که در حال حاضر جزو منابع این واحد درسی می‌باشند. بخش‌هایی که در این کتاب از منابع جمع‌آوری شده شامل مهمترین نکات مورد توجه مولفان و طراحان سوالات آزمون‌های کارشناسی ارشد مهندسی معدن و نفت می‌باشد. پیشنهاد می‌شود که داوطلبین گرامی خط به خط این کتاب را به دقت مطالعه کنند و پاسخ‌های تشریحی را نیز مورد نظر قرار دهند. این مجموعه به همراه بخش‌هایی از جزوات درسی اینجانب از کلاس‌های درسی استا گرامی‌ام آقای دکتر غلامحسین نوروزی نیز می‌باشد. در انتهای این کتاب چندین نمونه نگارهای مختلف به همراه تفسیرشان آورده شده تا در چهت هر چه بهتر درک نگارها اقدام شود. پیشنهاد می‌شود تا داوطلبین شعاع بررسی هر دستگاه و پاسخ سازنده‌های مربوطه را به دقت دنبال کنند، این مطلب یکی از مهمترین نکاتی است که بایستی در چاه پیمایی و تفسیر نگارهای مربوط به آن دقت شود.

در انتها از زحمات کلیه کادر انتشارات ارشد تشکر و قدردانی می‌کنم. وظیفه خود می‌دانم تا آقای مهندس مسعود طهرانی مجد را به عنوان مولف دوم این اثر معرفی کنم که تالیف بخش‌هایی از فصل‌های مربوط به چاه نگاری هسته‌ای و صوتی به عهده ایشان بود. همچنین از خانم مهندس الناز بادل که در ترسیم برخی از اشکال اینجانب را یاری فرمودند سپاسگذاری می‌کنم. از داوطلبین گرامی تقاضا دارم تا هر گونه اشکال و ایراد مربوط به این کتاب را به پست الکترونیکی اینجانب ارسال کنند تا در چاپ‌های آتی لحاظ شوند.

Badel@ut.ac.ir

موفق و پیروز باشید

مهدی بادل

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

پیشگفتار ناشر ۳
پیشگفتار مولف ۴

فصل اول: کلیات چاه‌پیمایی

۱- مقدمه ۱۱
۲- نحوه عملیات چاه‌پیمایی ۱۱
۳- کاربردهای چاه‌پیمایی ۱۲
۳-۱- اکتشافات نفتی ۱۲
۳-۲- اکتشافات معدنی ۱۲
۳-۳- اکتشافات آب‌های زیرزمینی یا هیدروژئولوژی ۱۲
۳-۴- مطالعات زمین‌شناسی ۱۲
۳-۵- مطالعات ژئوتکنیکی ۱۲
۴- تعیین ترکیب سنگ‌ها ۱۲
۴-۱- خمیره ۱۲
۴-۲- رس‌ها ۱۲
۴-۳- سیالات ۱۳
۵- بافت و ساخت سنگ‌ها ۱۶
۵-۱- رابطه بین تخلخل و مقاومت ویژه: ضریب سازند ۱۶
۵-۲- رابطه بین مقاومت ویژه و درجه اشباع ۱۶
۵-۳- اثر حضور رس بر مقاومت ویژه ۱۷
۵-۴- اثر توزیع رس در سنگ ۱۷
۵-۵- تراوایی ۱۸
۶- دسته‌بندی اندازه‌گیری‌ها ۲۱
۷- مسائل خاص مرتبط با اندازه‌گیری‌های چاه‌نگاری ۲۱
۷-۱- اثر چاه ۲۱
۷-۲- اثر شکل دستگاه اندازه‌گیری ۲۳
۷-۳- سرعت نگاربرداری ۲۵
تست‌های آخر فصل ۳۰
پاسخ تست‌های آخر فصل ۳۲

عنوان ..... صفحه

فصل دوم: پتانسیل خودزا (SP)

۱- مقدمه ۳۷
۲- منشأ SP ۳۸
۲-۱- پتانسیل غشایی (پوسته‌ای – صافی – نرنست – شیلی) ۳۸
۲-۲- پتانسیل دیفوزیون (اتصال – نفوذی – جریانی – انتشاری – تماس دوسیال – اثر سل تمرکزی) ۳۸
۲-۳- پتانسیل الکتروشیمیایی ۳۸
۳- SP استاتیک (SSP) ۳۸
۴- عواملی که بر شکل، دامنه و قله‌های SP اثر می‌گذارند ۳۹
۴-۱- قطر چاه ۳۹
۴-۲- قطر رخنه ۳۹
۴-۳- ضخامت لایه ۳۹
۴-۴- مقاومت ویژه زون‌های موجود ۴۰
۴-۵- سازندهای متراکم ۴۰
۴-۶- تغییر خط مبنای رس در منحنی SP ۴۱
۴-۷- رخنه متفاوت ۴۲
۵- عوامل زمین شناختی مؤثر بر پتانسیل خودزا ۴۳
۵-۱- ترکیب سنگ ۴۳
۵-۲- بافت سنگ ۴۴
۵-۳- دما و فشار ۴۴
۵-۴- کاربردها ۴۴
تست‌های آخر فصل ۴۸
پاسخ تست‌های آخر فصل ۵۴

فصل سوم: اندازه‌گیری مقاومت ویژه

۱- کلیات ۵۹
۲- دستگاه‌های غیرمتمرکز بزرگ بازه ۶۰
۲-۱- اصول اندازه‌گیری ۶۰
۲-۲- روش نرمال ۶۱
۲-۳- روش جانبی (لترال یا انورس) ۶۲
۲-۴- عوامل نوفه‌ای مؤثر بر اندازه‌گیری‌ها ۶۴
۲-۵- عوامل مؤثر بر شکل منحنی مقاومت ویژه ۶۴
۳- دستگاه‌های متمرکز بزرگ بازه ۷۴
۳-۱- سوند القایی (IL) ۷۵
۳-۲- لاترولوگ (LL) ۷۷
۳-۳- دستگاه با تمرکز کروی (SLF) ۸۱
۳-۴- ریز آرایش غیرمتمرکز: میکرولوگ (ML) ۸۱

عنوان ..... صفحه

۳-۵- ریز آرایش متمرکز ۸۲
۳-۶- نتایج حاصل از اندازه‌گیری‌های مقاومت ویژه ۸۳
تست‌های آخر فصل ۹۶
پاسخ تست‌های آخر فصل ۱۰۴

فصل چهارم: چاه‌نگاری هسته‌ای

۱- مقدمه ۱۱۱
۵- اندازه‌گیری پرتوزایی گاما ۱۱۲
۵-۱- انواع برخوردهای اشعه گاما و نوترون با اجسام ۱۱۲
۵-۲- شعاع بررسی ۱۱۳
۵-۳- اثر چاه ۱۱۴
۵-۴- مهم‌ترین کاربردهای نمودارهای گامای طبیعی ۱۱۴
۵-۵- برخی ویژگی‌های نگار گامای طبیعی ۱۱۵
۶- طیف سنجی پرتوزایی گامای طبیعی ۱۱۶
۷- رادیومتری مصنوعی ۱۱۶
۷-۲- نمودار نوترون – گاما ۱۱۸
۷-۳- نمودار نوترون – نوترون ۱۱۹
۷-۳-۴- مهم‌ترین کاربردهای نگارهای نوترون ۱۲۲
۷-۳-۵- عوامل مؤثر بر اندازه‌گیری ۱۲۲
۷-۳-۶- بررسی بعضی عوامل تأثیرگذار بر نگارهای نوترون ۱۲۴
۷-۵- نمودار گاما– گاما ۱۲۸
۷-۵-۱- اصول ۱۲۸
۷-۵-۲- شعاع بررسی ۱۲۸
۷-۵-۳- عوامل مؤثر براندازه گیری ۱۲۸
۷-۵-۴- تفسیر ۱۲۹
۷-۵-۵- عوامل نوفه‌ای مؤثر بر اندازه‌گیری‌ها ۱۲۹
تست‌های آخر فصل ۱۳۴
پاسخ تست‌های آخر فصل ۱۴۲

فصل پنجم: نمودارهای صوتی

۱- مقدمه ۱۵۱
۲- انواع امواج ۱۵۱
۲-۱- امواج پیکری ۱۵۱
۲-۱-۱- موج تراکمی، اولیه، طولی یا فشاری (موج P) ۱۵۲
۲-۱-۲- موج برشی، ثانویه یا عرضی (موج S) ۱۵۲
۲-۲- امواج سطحی ۱۵۲
۲-۳- نحوه انتشار امواج صوتی در چاه ۱۵۳

عنوان..... صفحه

۲-۴- امواج مورد استفاده در چاه‌پیمایی..... ۱۵۴
۳- ابزار صوتی..... ۱۵۴
۳-۱- شعاع بررسی..... ۱۵۴
۳-۲- تأثیر نوفه‌ها..... ۱۵۵
۴- نحوه محاسبه تخلخل ۱۵۵
۵- عوامل مؤثر بر اندازه‌گیری‌های صوتی..... ۱۵۶
۶- مزایا و معایب نمودارهای صوتی ۱۵۷
خلاصه فصل..... ۱۵۹
نکات فصل ۱۶۰
پاسخ تست‌های تلفیقی..... ۱۶۶
پاسخ تست‌های تلفیقی..... ۱۷۱

فصل اول

کلیات چاه‌پیمایی

فصل اول

کلیات چاه‌پیمایی

۱- مقدمه

ثبت پیوسته تغییرات یک مشخصه فیزیکی بر حسب عمق در سازندهایی که چاه از آنها عبور می‌کند را نگار می‌نامند. در این بررسی، اندازه‌گیری‌ها می‌توانند به موازات حفر چاه و یا پس از پایان حفاری انجام پذیرند. به همین ترتیب اطلاعات مورد نظر می‌تواند به صورت لحظه‌ای در هر مرحله اندازه‌گیری به دست آید و یا پس از حفر کامل چاه و اجرای اندازه‌گیری‌های مختلف، یک جا جمع‌آوری شوند.

به دلایل تکنیکی و اقتصادی در بعضی شرایط حفاری و یا در بعضی سازندها مغزه‌گیری مشکل یا غیرممکن است. در نتیجه مبنای اصلی کار یک زمین‌شناس برای مطالعاتش، که استفاده از نمونه‌های سنگ و سازند است، با مشکل روبه‌رو می‌شود. برای رفع این نوع نارسایی‌ها، ایده استفاده از اندازه‌گیری پارامترهای فیزیکی به صورت درجا، در ارتباط با تخلخل، لیتولوژی، وجود هیدروکربورها و دیگر پارامترهای مورد استفاده برای زمین‌شناسان و مهندسین مورد توجه قرار گرفت.

اولین مطالعات چاه‌نگاری منسوب است به «مارسل و کنراد شولمبرژه» که در سال ۱۹۷۲ برای اولین بار در فرانسه، مقاومت ویژه طبقات اندازه‌گیری و تحت عنوان «مغزه‌گیری الکتریکی» ارائه شد. به دنبال آن پیشرفت‌های علمی و تکنیکی باعث شد، ثبت پارامترهای مختلف با دستگاه‌هایی که هر روز پیشرفته‌تر می‌شوند، امکان‌پذیر شود.

استفاده‌کنندگان تکنیک‌های مذکور، تولیدکنندگان نفت هستند که از این مطالعات برای محاسبه تخلخل و درجه اشباع منابع نفتی سود می‌برند. باید گفت که در ابتدا زمین‌شناسان از چاه‌نگاری به عنوان وسیله‌ای برای همبستگی چاه‌ها استفاده می‌کردند.

۲- نحوه عملیات چاه‌پیمایی

به منظور نمودارگیری از طبقات داخل چاه، از طریق دکل حفاری دستگاه اندازه‌گیری کوچکی به نام سوند که به کابلی متصل است به داخل چاه ارسال می‌شود. قابل ذکر است که سوند در برابر آب یا گل حفاری مقاوم است. کابل، رابط بین سوند و دستگاه ثبت شده است که وظیفه آن نگهداری سوند درون چاه، انتقال علائم از سوند به دستگاه ثبت‌کننده و اندازه‌گیری عمق چاه می‌باشد. با حرکت از پایین به بالای سوند، عملیات ثبت نمودار شروع می‌شود.

دستگاه ثبت‌کننده با شروع عملیات به طور پیوسته و خودکار، عمل برداشت و ثبت را انجام می‌دهد و اغلب در اتومبیل مخصوصی نگهداری می‌شود. سوند با سرعت یکنواختی بالا کشیده می‌شود و اندازه‌گیری‌ها به صورت علائم الکتریکی یا نوری و تصویری روی فیلم طویلی ثبت می‌شوند.

۳- کاربردهای چاه‌پیمایی

۳-۱- اکتشافات نفتی

برای ارزیابی دقیق مخازن نفتی (تعیین تخلخل، اشباع‌شدگی از آب، نفت یا گاز و وضعیت سنگ‌شناسی و زمین‌شناسی زیرسطحی)، وضعیت سیمان‌شدگی در پشت لوله‌های جداری چاه‌ها و غیره.

۳-۲- اکتشافات معدنی

نمودارهای مختلف چاه‌پیمایی برای مواد معدنی متفاوتی کاربرد دارند از آن جمله می‌توان استفاده از نمودارهای رادیواکتیو در ذخایر اورانیوم و ذغال‌سنگ، نمودارهای الکتریکی در کانسارهای آهن و غیره را نام برد.

۳-۳- اکتشافات آب‌های زیرزمینی یا هیدروژئولوژی

به منظور ارزیابی تخلخل، نفوذپذیری و تعیین ضخامت لایه آبدار از انواع نمودارهای الکتریکی، القایی و رادیواکتیو کمک گرفته می‌شود.

۳-۴- مطالعات زمین‌شناسی

جهت تعیین وضعیت زمین‌شناسی زیرسطحی منطقه از طریق ارتباط دادن اطلاعات به دست آمده از چاه‌های اکتشافی از نمودارهای چاه‌پیمایی متناسب با جنس لایه‌ها می‌توان استفاده کرد.

۳-۵- مطالعات ژئوتکنیکی

در طرح‌های عمرانی، طراحی سازه‌های سنگی و تونل نیز از انواع نمودارهای چاه‌پیمایی استفاده می‌شود.

۴- تعیین ترکیب سنگ‌ها

اولین مشغله فکری زمین‌شناسان، تعیین ترکیب سنگ‌ها است. از طریق تفسیر داده‌های چاه‌نگاری به دنبال مواد تشکیل‌دهنده سنگ‌ها یعنی نوع کانی‌های اصلی و درصد آنها (دانه‌های اصلی، خمیره و سیمان) و نیز نوع و درصد سیالی (تخلخل و درجه اشباع) که توسط سنگ‌ها نگهداری می‌شوند، هستیم. در چاه‌نگاری معمول این است که برای قسمت جامد تمام سنگ‌ها، دو تشکیل‌دهنده در نظر می‌گیرند: خمیره (matrix) و رس (شیل).

۴-۱- خمیره

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

۴-۲- رس‌ها

رسوباتی که از کانی‌های فیلیتی آلومینوسیلیکاته آبدار تشکیل شده باشند، با این عنوان نامگذاری می‌شوند. عملاً در طبیعت

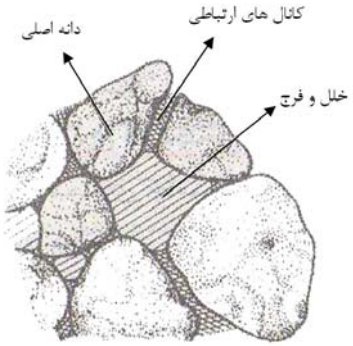
کمتر به یک کانی ثابت رسی در سنگ برمی‌خوریم و معمولاً درصد متغیری از سیلت‌ها یا کربنات‌ها همراه این کانی‌ها هستند. از طرف دیگر آرایش دانه‌های ریز رسی بر حسب درجه تراکم سنگ، موجب برجای گذاشتن فضاهای خالی کم و بیش فراوان و مهم می‌شود. این خلل و فرج به طور معمول از آب پر می‌شوند، ولی گاهی نیز هیدروکربورهای جامد، مایع یا گازی در آن جای می‌گیرند.

۴-۳- سیالات

آرایش دانه‌ها در سنگ عموماً فضاهای خالی (خلل و فرج و کانال‌های موئینه ارتباطی) در آن باقی می‌گذارد که توسط سیالات اشغال می‌شوند (شکل ۱-۱). درصد این سیالات در سنگ وابسته به درصد فضاهای خالی است که آن را درجه تخلخل می‌نامیم .

این سیالات به شکل‌ها و ترکیب‌های متفاوتی مانند آب، هوا، گاز، نفت، قطران و غیره‌اند. از میان این سیالات به جز آب، بقیه دارای یک خاصیت فیزیکی مشترک با اغلب کانی‌های تشکیل‌دهنده خمیره هسند که همانا رسانایی الکتریکی ضعیف آنهاست. برعکس این‌ها، آب بر حسب مقدار نمک محلول در آن می‌تواند باعث هدایت جریان الکتریکی شود.

اندازه‌گیری مقاومت ویژه سنگ‌ها، در صورت شناخت مقاومت ویژه آب سازند امکان تعیین درصد آب موجود در سنگ را فراهم ساخته و از آنجا با در دست داشتن تخلخل می‌توان درصد هیدروکربورهای موجود در خلل و فرج را به دست آورد.



شکل (۱-۱)- فضاهای خالی موجود در یک سنگ آواری.

۴-۳-۱- تخلخل

تخلخل عبارت است از قسمتی از حجم یک سنگ که توسط قسمت‌های جامد اشغال نشده باشد. چندین نوع تخلخل قابل تفکیک است.

الف) تخلخل‌های کلی ϕ_t - عبارت است از نسبت کل حجم فضاهای خالی (خلل و فرج، کانال‌ها، درزه‌ها، حفره‌ها و غیره) موجود بین قسمت‌های جامد، به حجم کلی سنگ

$$\phi_t = \frac{V_t - V_s}{V_t} = \frac{V_p}{V_t} \qquad (۱-۱)$$

که در آن، V_p حجم فضاهای خالی که عموماً توسط سیالاتی مانند آب، گاز و نفت اشغال می شود، V_s حجم اشغال شده توسط قسمت‌های جامد و V_t حجم کلی سنگ است.

تخلخل کلی شامل قسمت‌های زیر است:

یکی تخلخل بین دانه‌ای یا بین بلوری که تخلخل اولیه را تشکیل می‌دهد (ϕ_1). این تخلخل عمدتاً بـه شـکل، انـدازه و آرایش قسمت‌های جامد بستگی داشته و در سنگ‌های آواری به آن برمی‌خوریم؛

دیگری تخلخل ثانویه (ϕ_2)که در اثر حل بعضی از مواد جامد و نیز پیدایش شکاف‌ها و شکستگی‌هـای ناشـی از فـشارهای مکانیکی حاصل می‌شود. این قسمت از تخلخل اغلب در سنگ‌های دارای منشأ شیمیایی و بیوشیمیایی دیده می‌شود.

بنابراین تخلخل کلی از مجموع $\phi_1 + \phi_2$حاصل می‌شود.

ب) تخلخل ارتباطی $(\phi_{connect})$- این تخلخل برابر است با درصد فضاهای خالی مرتبط با یکدیگر در سنگ.

ج) تخلخل پتانسیل (ϕ_{Pot})- قسمتی از تخلخل ارتباطی است که در آن قطر کانال‌های موئینه در سنگ بـه انـدازه‌ای است که امکان حرکت سیال در آن وجود دارد (به عنوان مثال ۲۰ میکرومتر برای نفت و ۵ میکرومتر برای گاز).

تخلخل ارتباطی از تخلخل کل می‌تواند کوچکتر باشد و تخلخل پتانسیل می‌تواند از تخلخل ارتباطی کوچک‌تر باشد. به عنوان مثال رس‌ها که عموماً دارای تخلخل ارتباطی بسیار بالایی هستند، اندازه خلل و فرج و کانال‌های موئینه در آنها طوری است که به علت جاذبه مولکولی، سیالات نمی‌توانند در آن جابه‌جا شوند.

د) تخلخل مؤثر (ϕ_e)- قسمتی از تخلخـل اسـت کـه سـیالات آزاد بـه آن راه داشـته باشـد (بـه جـز فـضاهای غیرمرتبط و اشغال‌شده توسط جذب سطحی آب و گاز و نیـز آب وابـسته بـه رس‌هـا). از ایـن تخلخـل در مطالعـات چاه‌پیمایی استفاده می‌کنند.

۴-۳-۲- مقاومت ویژه، رسانایی

مقاومت ویژه ماده‌ای با سطح مقطع و طول واحد توسط درجه عدم عبور جریان الکتریکی از آن بیان می‌شود. نماد آن حـرف R و واحد آن اهم متر است. مقاومت ویژه‌ی یک ماده مشخص، با مقاومت الکتریکی اندازه‌گیری شده بـین دو سـطح متقابـل یک مکعب به ضلع یک متر از این ماده بر حسب اهم متر مطابقت دارد.

دو نوع رسانایی می‌تواند وجود داشته باشد:

الف) رسانایی الکترونی: این رسانایی مختص موادی ماننـد سـولفورهای فلـزی (پیریـت، گـالن، کالکوپیریـت و غیـره)، گرافیت، هماتیت و فلزات (طلا، نقره، مس و غیره) است؛

ب) رسانایی الکترولیتی: رسانایی مذکور حاصل آب همراه با نمک محلـول در آن اسـت. رسـانایی سـنگ‌هـای رسـوبی عمدتاً از این نوع‌اند. سنگ‌های خشک به جز آن دسته که دارای کانی‌های رسانا هستند، مقاومت بالایی دارند. اما عموماً ایـن سنگ‌ها به صورت درجا، مقدار و کم و بیش زیادی آب و نمک محلول را در خود جای می‌دهند که نتیجـه آن پـایین آمـدن مقاومت سنگ‌هاست.

با توجه به مطالبی که گفته شد، مقاومت ویژه یک سنگ بستگی به موارد زیر دارد:

الف) مقاومت ویژه آب موجود در خلل و فرج که خود وابسته به مقدار محلول و دما است؛

ب) مقدار آب موجود در سنگ یعنی درجه تخلخل از یک طرف و درجه اشباع آن از طرف دیگر؛

ج) لیتولوژی یعنی طبیعت و درصد رس موجود در سنگ و نیز نوع و درصد کانی‌های رسانا؛

د) بافت سنگ، یعنی چگونگی توزیع خلل و فرج، رس‌ها و کانی‌های رسانا.

مقاومت ویژه می‌تواند به علت ناهمسانگردی در بافت سنگ، خود ناهمسانگرد باشد، پس بنابراین رسانایی در همـه امتـدادها یکسان نیست. مقاومت ویژه در امتداد لایه‌بندی را مقاومت ویژه افقی (R_H) و در امتداد عمود بر آن را مقاومـت ویـژه قـائم (R_V) می‌نامیم. ضریب ناهمسانگردی (λ) با رابطه زیر بیان می‌شود:

$$\lambda = \sqrt{\frac{R_v}{R_H}} \qquad (۲-۱)$$

و مقاومت ویژه متوسط R یک سازند ناهمسانگرد با رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$R = \sqrt{R_v R_H} \qquad (۳-۱)$$

λ می‌تواند بین ۱ تا ۲/۵ تغییر کند. عمدتاً R_v بزرگتر از R_H است. R_H با نگار القایی یا لاترولوگ عمیق تعیین می‌شود. نگار الکتریکی معمولی (نرمال و یا جانبی) مقدار متوسطی بین R_H و R_v را به دست می‌دهد.

ناهمسانگردی مربوط به یک سنگ مشخص را ناهمسانگردی میکروسکوپی و مقدار وابسته به سری‌هایی که از تکرار لایه‌های نازک مقاوم و رسانا تشکیل شده‌اند را ناهمسانگردی ماکروسکوپی می‌نامند.

در چاه، ناهمسانگردی میکروسکوپی می‌تواند در مقابل گل‌کبره و رس‌ها وجود داشته باشد. در این حالت مقاومت ویژه در امتداد عمود بر گل‌کبره بیشتر از امتداد موازی با جدار چاه است. این ناهمسانگردی روی دستگاه‌های «ریز مقاومت ویژه متمرکز» اثر می‌گذارد.

گل کبره با ضریب ناهمسانگردی λ و ضخامت h_{mc} از نظر الکتریکی معادل یک گل کبره همسانگرد با مقاومت ویژه متوسط $R_{mc} = \sqrt{R_H.R_v}$ و ضخامت $\lambda.h_{mc}$ است.

به طور کلی آنچه را که مقاومت ویژه حقیقی R_t، سنگ می‌نامند، عبارت است از مقاومت ویژه کپه‌ای حاصل از ترکیب اجزاء خمیره و محتوای سیال درون آن.

ارتباط بین مقاومت ویژه و درجه شوری- مقاومت ویژه یک الکترولیت بستگی به مقدار و نوع نمک محلول در آن دارد. هرچه مقدار نمک محلول افزایش یابد، مقاومت ویژه کاهش می‌پذیرد. نهایتاً هرگاه از آستانه اشباع نمک بگذریم، به علت حل نشدن نمک، مقاومت ویژه الکترولیت به دلیل مقاوم بودن نمک جامد، افزایش پیدا می‌کند.

ارتباط مقاومت ویژه و دما- رسانایی یک الکترولیت با افزایش دما زیادتر می‌شود. بنابراین برای تعیین مقاومت ویژه الکترولیت بایستی دمای آن مشخص شود. رابطه بین مقاومت ویژه و دما به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$R_۲ = R_۱\left[\frac{T_۱ + ۲۱/۵}{T_۲ + ۲۱/۵}\right] \quad (T \text{ بر حسب سانتی‌گراد}) \qquad (۴-۱)$$

$$R_۲ = R_۱\left[\frac{T_۱ + ۶/۷۷}{T_۲ + ۶/۷۷}\right] \quad (T \text{ بر حسب فارنهایت}) \qquad (۵-۱)$$

۴-۳-۳- مقاومت ویژه رس‌ها

بعضی انواع کانی‌ها از جمله کانی‌های فیلیتی با سطح ویژه بزرگ را می‌توان مانند جامدات رسانا در نظر گرفت. در واقع این کانی‌ها در حالت خشک کاملاً عایق هستند، ولی از یک طرف در هنگام تشکیل، رسوبات تشکیل‌دهنده آنها مملو از آب بوده و تخلخل مؤثر بسیاری دارند که می‌تواند تا ۸۰ درصد برسد. به این ترتیب این سنگ‌ها به دلیل تخلخل موجود، رسانا هستند.

رس‌ها در طبیعت، به صورت مجزا و یا همراه با سنگ‌های رسوبی دیگر (ماسه‌سنگ، آهک و غیره) به مقدار بسیار زیاد وجود دارند. وجود رسها فرضیه غیررسانا بودن خمیره را تغییر داده و بنابراین بایستی رسانایی آنها را در محاسبه ضریب سازند و به دنبال آن تخلخل و درجه اشباع در نظر گرفت.

۵- بافت و ساخت سنگ‌ها

اندازه و شکل دانه‌ها، درجه جورشدگی آنها، وضعیت سیمان شدنشان و نیز اهمیت کم و بیش زیاد خود سیمان، سه نتیجه مهم به بار می‌آورد. این عوامل تعیین‌کننده تخلخل، اندازه خلل و فرج و کانال‌های موئینه و در نتیجه تراوایی و به دنبال آن درجه اشباع هستند.

۵-۱- رابطه بین تخلخل و مقاومت ویژه: ضریب سازند

در زون‌های متخلخل آبدار تمیز، مقاومت ویژه سازند (R_o) با رابطه زیر به مقاومت ویژه آب بین دانه‌ای (R_w) مربوط می‌شود.

$$R_o = F_R . R_w \qquad (۶-۱)$$

که در آن F_R، ضریب سازند و تابع بافت سنگ است. بنابراین ضریب سازند بیانگر نسبت مقاومت ویژه سنگ متخلخل به مقاومت ویژه آبی است که آن را پر کرده $\left(F_R = \frac{R_o}{R_w}\right)$

رابطه بین ضریب سازند و تخلخل کل را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$F_R = \frac{۱}{\phi_t} \qquad (۷-۱)$$

اندازه‌گیری‌های متعدد انجام شده روی نمونه‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که ضریب سازند برای سنگی که مقدار رس آن صفر باشد، با رابطه زیر به مقدار تخلخل آن مربوط می‌شود:

$$F_R = \frac{a}{\phi^m} \qquad (۸-۱)$$

در رابطه (۱-۸)، a ضریبی است که بستگی به لیتولوژی سنگ داشته و بین ۰/۶ تا ۲ متغیر است؛ m ضریب سیمان شدگی یا پیچ‌درپیچی است که به نوع رسوبات، شکل خلل و فرج، ارتباط بین خلل و فرج و در نتیجه نوع تخلخل و چگونگی توزیع آن و بالاخره تا حدودی به درجه تراکم سنگ بستگی دارد.

بررسی‌های مختلف نشان می‌دهد که m به طور نظری بین ۱ تا ۳ متغیر است. در سازندهای ماسه‌ای اغلب از رابطه $F_R = \frac{۰/۶۲}{\phi^{-۲/۱۵}}$ (رابطه هیومبل) و در سازندهایی که به خوبی متراکم شده‌اند، اغلب از رابطه $F_R = \frac{۱}{\phi^m}$ و بالاخره در سازندهای سست از $F_R = \frac{۰/۸۱}{\phi^۲}$ استفاده می‌شود.

با توجه به مطالبی که بیان شد، با استفاده از دستگاه‌های اندازه‌گیری مقاومت ویژه که مقدار R_o (دستگاه بزرگ بازه) یا R_{xo} (دستگاه‌های کوچک بازه) را به دست می‌دهند، می‌توان با شناخت R_w یا R_{mf} و نیز a و m مقدار تخلخل سنگ را به دست می‌دهد. بایستی توجه داشت که مقاومت ویژه به طور مشخص نسبت به تخلخل ارتباطی حساس است.

۵-۲- رابطه بین مقاومت ویژه و درجه اشباع

درجه اشباع سیال در سازند (S) عبارت است از نسبت حجم اشغال شده توسط سیال مذکور (V_w) به حجم کلی خلل و فرج V_p است. برای درجه اشباع آب داخل سازند می‌توان نوشت:

$$S_w = \frac{V_w}{V_p} \qquad (۹-۱)$$

اگر جز آب هیچ سیال دیگر در داخل سازند وجود نداشته باشد $S_w = ۱$است. اندازه‌گیری‌های متعدد آزمایشگاهی نشان داده است که درجه اشباع آب (S_w)می‌تواند توسط رابطه‌ای به صورت زیر بیان شود.

$$S_w^n = \frac{R_o}{R_t} \qquad (۱۰-۱)$$

که در آن R_o، مقاومت ویژه حقیقی سنگی با درجه تخلخل ϕاست که توسط آبی به مقاوت ویژه R_w پر شده باشد. R_t ، مقاومت ویژه همان سنگی است، اگر از آب با درجه اشباع S_w و هیدروکربور (با درجه اشباع $(۱-S_w)$) پر شده باشد.

n توانی است که به طور تجربی مشخص می‌شود و معمولاً بین ۱/۲ و ۲/۲ متغیر است.

- نسبت $i = \frac{R_t}{R_o}$را گاهی شاخص مقاومت ویژه می‌نامند. این نسبت زمانی که فقط آب در داخل سازند باشد، برابر یک و هرگاه فقط هیدروکربور وجود داشته باشد بسیار بزرگتر از یک است.

در عمل معمولاً n را برابر ۲ در نظر می‌گیرند. با استفاده از ضریب سازند و جایگزین کردن R_oدر مقدار S_wبه رابطه زیر که به نام آرچی معروف است، خواهیم رسید:

$$\left.\begin{aligned} F_R &= \frac{R_o}{R_w} \\ S_w^n &= \frac{R_o}{R_t} \end{aligned}\right\} R_t = \frac{F_R R_w}{S_w^n} \qquad (۱۱-۱) \quad \text{«رابطه آرچی»}$$

درجه اشباع از هیدروکربورها هرگز صددرصد نیست. حتی پس از مهاجرت هیدروکربورها به یک سنگ مخزن همیشه مقداری آب به واسطه نیروهای موئین در سنگ می‌ماند. این مقدار جزیی از آب را درجه اشباع کاهش‌ناپذیر $(S_w)_{irr}$ می‌نامند. این اشباع بستگی به نوع تخلخل، اندازه خلل و فرج، قطر کانال‌های موئینه و ماهیت دانه‌های تشکیل‌دهنده خمیره دارد. بعضی از جامدات آب بیشتری را به خود جذب می‌کنند. به همان ترتیب که هیدروکربورها نمی‌توانند تمام آب موجود در خلل و فرج یک سنگ را بیرون برانند، تمام نفت موجود در یک سازند متخلخل نیز به طور کامل قابل جابه‌جا شدن نیست. این قسمت از حجم خلل و فرج که توسط هیدروکربورها اشغال می‌شود درجه اشباع از هیدروکربور باقیمانده (S_{hr}) خوانده می‌شود.

۵-۳- اثر حضور رس بر مقاومت ویژه

یک سازند رس‌دار در صورتی که از نظر تخلخل، درجه اشباع و آب با سازند تمیز (بدون رس) دیگری یکسان باشد، دارای مقاومت ویژه یکسانی نیستند. از طرف دیگر این مقاومت ویژه برای دو سازند با مقدار یکسانی از رس، بستگی به توزیع رس در سازند دارد.

۵-۴- اثر توزیع رس در سنگ

در چاه‌نگاری معمولاً سه نوع رس را بر حسب وضعیت توزیع آن در سنگ متمایز می‌کنند (شکل۱-۲).

۵-۴-۱- رس‌های نواری یا برگی

در این توزیع رس‌ها به صورت لایه‌های نازک بین طبقات سنگ مخزن (ماسه، آهک) قرار می‌گیرند. این نوع توزیع رس تأثیری بر تخلخل مفید، درجه اشباع و تراوایی مخازن ندارد.

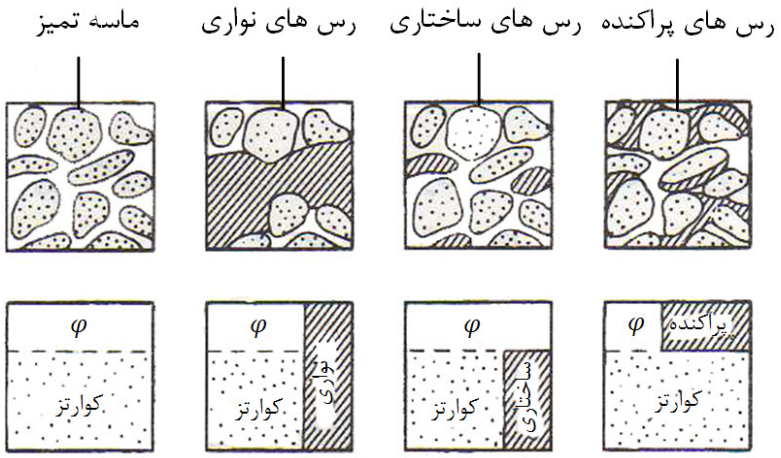
۵-۴-۲- رس‌های پراکنده

در این نوع توزیع، رس‌ها به دانه‌های اصلی سنگ چسبیده یا آنها را می‌پوشانند، ضمن اینکه ممکن است به صورت موضعی خلل و فرج سنگ را نیز اشغال کنند. تراوایی سنگ به طور مشخصی کاهش می‌یابد، زیرا خلل و فرج و کانال‌های موئینه ارتباطی کاهش می‌یابند. علاوه بر آن به دلیل قدرت جذب آن توسط رس، درجه اشباع آب افزایش یافته و حرکت سیال در سنگ کند می‌شود.

نگار صوتی، تخلخل بین دانه‌ای را که با آب یا رس‌های پراکنده اشغال شده به دست می‌دهد و تخلخل مؤثر از طریق نگارچگالی مشخص می‌شود.

۵-۴-۳- رس‌های ساختاری

این رس‌ها دارای مشخصاتی مشابه رس‌های نواری هستند، زیرا تحت‌تأثیر تنش‌های یکسان قرار دارند. اما از نظر تراوایی و مقاومت ویژه، نقش آنها متفاوت بوده و به رس‌های پراکنده نزدیکترند. البته درصد مساوی از این رس‌ها دارای اثر کمتری نسبت به رس‌های پراکنده است. با این حال رس‌های نواری و ساختاری به طور عمده آواری هستند، در صورتی که رس‌های پراکنده معمولاً حاصل دگرسانی (به‌طور مثال فلدسپات‌ها) یا ته‌نشست هستند.



شکل (۱-۲)- انواع توزیع رس و مقدار حجمی که اشغال می‌کند.

۵-۵- تراوایی

یک محیط متخلخل در صورتی که امکان جابه‌جایی سیالات را فراهم می‌سازد که خلل و فرج به یکدیگر ارتباط داشته باشند. تراوایی یک سنگ، اندازه سهولت جریان سیالی با یک گرانروی مشخص در یک فشار معین است. تراوایی مطلق بیانگر جریان یک سیال همگن بدون اثر شیمیایی بر محیطی که از آن عبور می‌کند است.