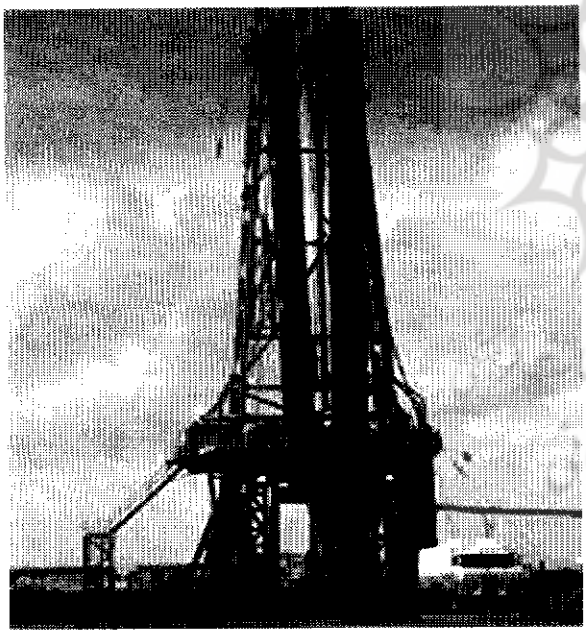
نمودارگیری در چاه‌های نفت و گاز

بهرام موحد، احمد توحیدی‌نیا*



شکل ۱. دکل حفاری در خشکی

تاریخچه‌ی مختصر

«صنعت نفت» هزاران سال پیش آغاز شده است. زمانی از نفت‌های حاصل از چشمه‌های نفتی طبیعی[1] برای عایق کاری قایق‌ها، نقاشی، روشنایی و حتی به عنوان دارو استفاده می‌شد. اما این ماده به تدریج جایگزین روغن نهنگ[2] و ذغال سنگ شد و تقاضا برای آن بیش‌تر و بیش‌تر گردید.

بیش‌ترین استفاده از نفت، با پیدایش اتومبیل شکل گرفت و پالایشگاه‌های عظیمی با هدف تولید بنزین[3] برای مصرف اتومبیل‌ها، ساخته شدند. امروزه تقریباً همه‌ی شکل‌های حمل و نقل به نوعی به نفت و فراورده‌های آن محتاجند. این سوخت فسیلی برای تولید برق هم به کار گرفته شده است؛ کاری که ابتدا توسط ذغال سنگ انجام می‌شد. اکنون تقاضا برای نفت و فراورده‌های آن، بسیار بیش از مقدار تهیه و تولید آن است و کمپانی‌های نفتی علاوه بر سطح زمین (خشکی) بستر دریاها را نیز برای کشف ذخایر جدید هیدروکربوری جست‌وجو می‌کنند. اصولاً صنعت نفت با تمام گستردگی آن، بر پایه‌ی اکتشاف منابع و ذخایر هیدروکربوری استوار است.

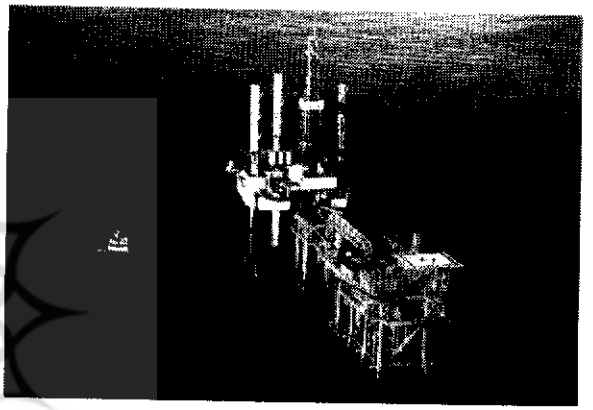
اولین چاه اکتشافی نفت در سال ۱۷۴۵م در فرانسه حفر شد. ولی اولین چاه برای استخراج نفت را کلنل ادوین دریک[4] در سال ۱۸۵۹ در پنسیلوانیا (آمریکا) حفاری کرد که حدود ۶۹ فوت عمق داشت و کم‌تر از ۲۰ بشکه در روز نفت تولید می‌کرد تا امروز که بیش از ۳/۶ میلیون حلقه چاه به وسیله‌ی شرکت‌های نفتی حفر شده است. در قاره‌ی آمریکا حدود ۶۰ هزار چاه تولیدی وجود دارد[5] که میزان تولید هر کدام به طور متوسط حدود ۳ مترمکعب در روز است. در حالی که تعداد این نوع چاه‌ها در خاورمیانه به مراتب کم‌تر، ولی تولید متوسط روزانه‌ی هر کدام بسیاربیش‌تر، یعنی حدود هزار متر مکعب در روز است. از نظر میزان ذخایر نفتی خلیج فارس[6] به تنهایی نیمی از نفت، جهان را در خود دارد.

پس از کشف و استخراج هیدروکربن، مباحثی چون پالایش نفت و گاز، به منظور تهیه‌ی انواع سوخت‌ها و ... و نیز صنعت پتروشیمی، برای ساخت فرآورده‌های گوناگون مطرح می‌شود. پس

صنعت عظیم نفت به طور کلی شامل دو بخش عمده است: بخش بالادستی که مشتمل بر فعالیت‌های اکتشافی است و بخش پائین دستی که برگیرنده‌ی فعالیت‌هایی مثل پالایش و پتروشیمی است.

نفت در چه مکان هایی یافت می‌شود؟

پترولیوم[7] واژه‌ای لاتین است که در زبان فارسی معادل مناسبی



شکل ۲. دکل حفاری در دریا

ندارد. این اسم به موادی گفته می‌شود که به طور عمده از دو عنصر هیدروژن و کربن به وجود آمده‌اند و به این دلیل، «هیدروکربن» نام دارند. این مواد به صورت طبیعی در سنگ‌های رسوبی زمین یافت می‌شوند و ممکن است به حالت گاز (مثل گاز طبیعی)[8]، حالت مایع (مثل نفت خام)[9] و یا جامد (مثل قیر)[10] در فضای خلل و فرج و شکستگی های سنگ‌ها و لایه‌های زمین تجمع یابند.

به طور کلی، برای این که در یک منطقه نفت یا گاز تجمع یابد، وجود چند عامل ضروری است که عبارتند از:

۱. سنگ منشأ یامادر[11]

۲. سنگ مخزن[12]

۳. مهاجرت[13] هیدروکربن بین سنگ منشأ و سنگ مخزن

۴. پوش سنگ[14] و تله‌ی نفتی[15] در این جا هر یک از این عوامل به اختصار توضیح داده می‌شوند:

۱. منشأ نفت و سنگ منشأ[16]

الف) منشأ نفت

دو تئوری کلی در مورد منشأ نفت وجود دارد: یکی نظریه‌ی منشأ غیر آلی نفت[17] و دیگری نظریه‌ی منشأ آلی نفت[18]

ـ منشأ غیر آلی نفت: پایه‌ی اصلی این نظریه، وجود گازمتان (CH_4) در اتمسفر بعضی سیارات و نیز وجود هیدروکربن در شهاب سنگ‌هاست. طبق این تئوری، هیدروکربن‌ها در دما و فشار بالای قسمت‌های عمیق پیوسته‌ی زمین[19] و جبه[20] تشکیل شده و سپس به طرف قسمت‌های کم عمق پوسته مهاجرت کرده‌اند. به عبارت دیگر، آب H_2O موجود در اعماق زمین، در دمای بالا به هیدروژن H و اکسیژن O شکسته شده و در واکنش با کربن C موجود، هیدروکربن را به وجود آوردند و سپس از طریق شکستگی های عمق به بالا انتقال یافته‌اند.

ـ منشأ آلی نفت: در این نظریه، اعتقاد بر این است که هیدروکربن‌ها از مواد آلی یعنی از بقایای گیاهان و جانورانی که در زمین می‌زیسته‌اند، به وجود می‌آیند. در سال ۱۹۳۰، با پیشرفت علم و فناوری، مدارک و شواهد معتبری در حمایت از این نظریه به دست آمد، ولی تا قبل از آن، پایه‌ی این تئوری فقط شباهت‌هایی بود که میان هیدروکربن‌ها و مواد آلی گیاهی-جانوری وجود داشت؛ از جمله این که:

- بخش عمده‌ای از بدن جانوران و گیاهان را پروتئین‌ها، اسیدهای چرب و چربی‌ها و مواد آلی دیگری تشکیل می‌دهند که بسیار شبیه ترکیب مواد هیدروکربوری هستند.
- حلقه‌ی مهم چرخه‌ی کربن در طبیعت، در گیاهان و جانوران قرار دارد.
- هیدروکربن‌ها با سنگ‌های رسوبی و تجمعات فسیلی همراهند.

ب) سنگ منشأ

رسوباتی که مواد آلی گیاهی در آن‌ها مدفون می‌شوند، به مرور زمان به سنگ‌های دانه ریز غنی از ماده‌ی آلی تبدیل می‌شوند که قادرند در اثر تکامل حرارتی هیدروکربن تولید کنند. این سنگ‌ها به سنگ مادر یا هیدروکربنی موسومند.

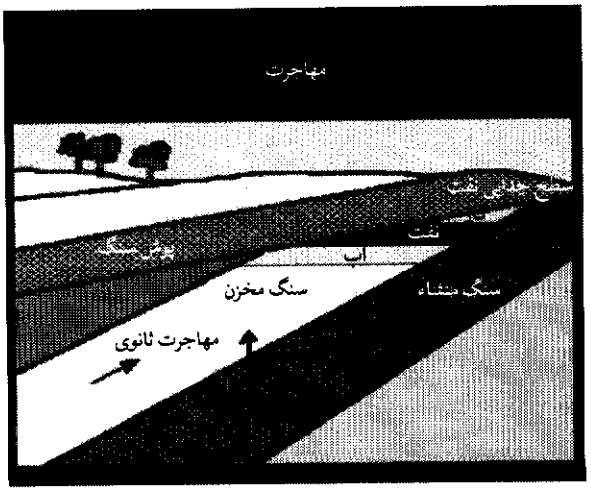
۲. سنگ مخزن

گاهی بین ذرات و اجزای تشکیل دهنده سنگهای رسوبی (که طی میلیون‌ها سال از تکامل رسوبات اولیه تحت دما و فشارهای بالا بوجود آمده‌اند)، فضاهای خالی و خلل و فرج بسیار ریز و میکروسکوپی می‌مانند (یابعداً بوجود می‌آیند) که محلهای مناسبی

جهت تجمع و ذخیره هیدروکربن‌ها هستند. چنین سنگهایی که هم دارای ظرفیت ذخیره‌سازی هیدروکربن بوده و هم توانایی عبور سیال را از میان خود دارند، مخزن هیدروکربنی نام دارند. ظرفیت ذخیره‌سازی و نگهداری هیدروکربورها در واقع بیانگر تخلخل و فضاهای موجود میان سنگ است و قابلیت عبوردهی سیال، معرّف میزان (تراوایی و نفوذپذیری) آن. هرچه مقدار فضاهای بین ذرات سنگ که محل استقرار سیالات (یعنی آب، نفت و یا گاز) است بیشتر و امکان عبور سیالات از میان این دانه‌ها و فضاها بیشتر باشد مخزن کیفیت بهتری دارد.

۳. مهاجرت هیدروکربن‌ها از سنگ منشأ به طرف سنگ مخزن

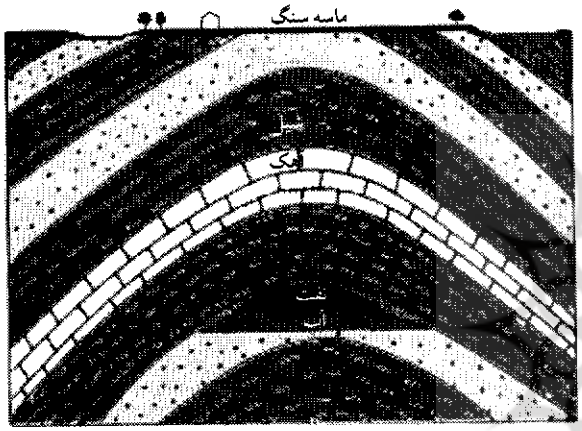
مهاجرت[۱۳] فرآیندی است که باعث حرکت نفت و گاز از سنگ منشأ ریزدانه به طرف سنگ‌های مخزن درشت دانه و تراوا می‌شود. دلیل عمده حرکت اخیر هیدروکربن‌ها آنست که آن‌ها نسبت به آب وزن مخصوص کمتری دارند و در نتیجه در فضاها و خلل و فرج موجود بین سنگ‌ها که هم آب و هم هیدروکربن‌ها، همراه هم وجود دارند، هیدروکربن‌ها تمایل دارند که در بالاترین سطح ممکن نسبت به آب قرار گیرند. (از روی لایه‌های آبی حرکت کرده و بالا می‌روند) و سپس در زیر یک لایه غیر قابل نفوذ به نام پوش سنگ به دام می‌افتند و حرکتشان متوقف می‌شود.



شکل۳. مهاجرت نفت

۴. پوش سنگ و تله نفتی

پوش سنگ‌ها در واقع سنگ هایی هستند که در برابر هیدروکربن‌ها نفوذناپذیرند و در نتیجه می‌توانند از حرکت رو به بالای نفت یاگاز جلوگیری کنند. اما تله نفتی یا نفتگیر، یکی از عوامل اصلی و ضروری برای تجمع هیدروکربن است و لذا اهمیت اقتصادی دارد. وقتی که نفت از سنگ منشا به وجود آید، از لایه‌های



شکل۴. نفت گیر طاقدیسی

نفوذپذیر به طرف بالا شروع به حرکت می‌کند و می‌تواند به سطح زمین برسد؛ مگر این که مانعی سر راه حرکت رو به بالای آن قرار گیرد (همان پوش سنگ‌ها). در این حالت، سنگ‌هایی که حاوی هیدروکربن‌ها هستند (مخزن) و سنگ‌هایی که از ادامه‌ی حرکت نفت یا گاز به سطح زمین جلوگیری کرده‌اند (پوش سنگ‌ها)، همراه هم ساختاری زمین شناسی به نام تله نفتی یا نفتگیر را تشکیل می‌دهند. هر نفتگیر، بخش‌های متعددی دارد و ممکن است دارای نفت، گاز یا مخلوطی یا از هر دو باشد.

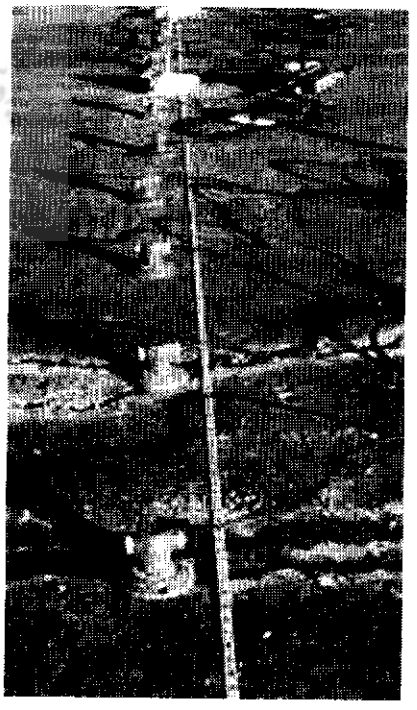
ساده‌ترین و فراوان‌ترین تله‌های نفتی، نفتگیرهای طاقدیسی[۲۱] هستند. بعضی طاقدیس‌ها به شکل برجستگی‌های کوه مانندی در سطح زمین نمایان می‌شوند و البته بسیاری نیز اصلاً دیده نمی‌شوند و در زیر لایه‌های متعدد مدفون هستند. نظر به این که نفتگیرها شکل‌های گوناگون دیگری (به غیر از طاقدیس) هم دارند و در ضمن همه‌ی طاقدیس‌ها نیز تله‌ی نفتی نیستند، لذا برای تشخیص این که در چه جاهایی از زمین و در چه ساختارهای زمین‌شناسی احتمال دستیابی به هیدروکربور هست، عملیات اکتشافی انجام می‌شود که در ادامه شرح داده خواهد شد.

روش های کشف مخازن نفتی [۲۲] (هیدروکربوری)

می توان ادعا کرد، تنها راهی که جست و جو کنندگان نفت و گاز را نسبت به وجود یا عدم وجود مخزن هیدروکربوری در یک منطقه مطمئن می سازد، «حفرچاه» است. اما از آن جا که عملیات حفاری چاه مستلزم هزینه های زیاد و صرف وقت بسیار است، لذا بهتر است در مرحله ی اول، احتمال یافتن مخزن در ناحیه بررسی شود. براین مبنا، فعالیت های اکتشافی را می توان به مراحل زیر تقسیم کرد:

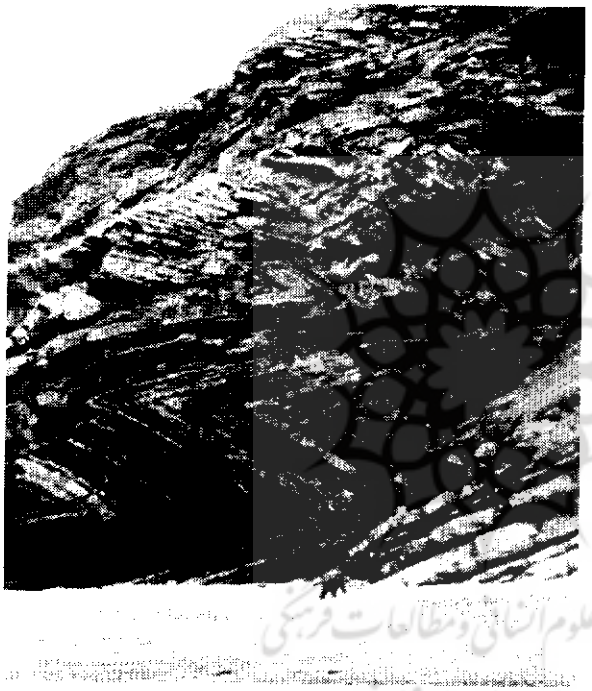
- بررسی های زمین شناسی سطحی (سطح الارضی)
- مطالعات ژئوفیزیکی
- حفاری
- بررسی های زمین شناسی تحت الارضی
- چاه پیمایی و نمودارگیری
- آزمایش چاه

موضوع اصلی علم زمین شناسی، مطالعه ی سنگ های تشکیل دهنده ی زمین است. پوسته ی زمین از لایه های متعددی از نهشته ها



شکل ۵. ژئوفون ها، بخشی از ابزار مطالعات ژئوفیزیکی که امواج لرزه نگاری را ثبت می کنند.

تشکیل شده است که پس از انباشته شدن روی هم، تحت شرایط خاصی به سنگ تبدیل شده اند و به هر مجموعه از آن ها که خواص مشترک و در یک دوره ی مشابه زیست شناسی به وجود آمده باشند، سازند گفته می شود. همان گونه که دیده می شود، در مرحله ی اول، زمین شناسان هستند که یک منطقه را از نظر وجود شرایط لازم



شکل ۶. رخ نمون سازندها و تغییر وضعیت آن ها از حالت افقی

برای تولید و ذخیره ی هیدروکربن ها بررسی می کنند. و در این مطالعه ی سطحی (سطح الارضی)، از نمونه های لایه های رسوبی و سازندها که در سطح زمین قابل دسترسی اند و اصطلاحاً به آن ها رخ نمون گفته می شود، استفاده می کنند.

لایه های رسوبی اولیه همیشه به شکل افقی رسوب گذاری و تشکیل می شوند. اما طی میلیون ها سال و با گذشت دوران های گوناگون زمین شناسی، در اثر نیروهای درونی زمین (و در اصطلاح فعالیت های زمین ساختی و تکتونیکی)، از وضع افقی خارج می شوند و به شکل هایی نظیر طاقدیس، ناودیس و... در می آیند. در بعضی نقاط زمین نیز از زیر لایه های بالایی بیرون می آیند و در دسترس قرار می گیرند. مطالعه ی چنین لایه هایی برای زمین شناسان ساده تر است. برای مثال، از مطالعات سطح الارضی و نقش آن ها

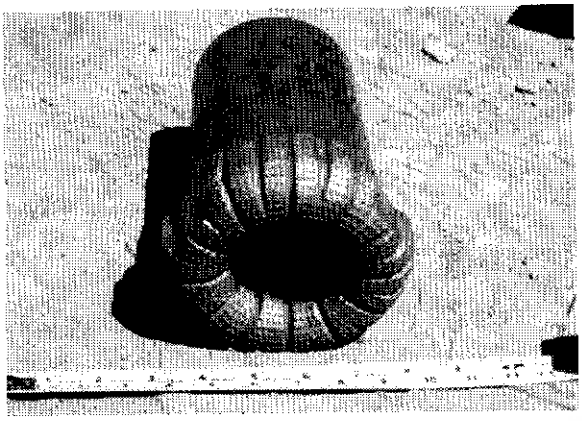
در یافتن نواحی دارای مخازن هیدروکربوری می توان نتیجه گرفت که؛ چنانچه زمین شناسان در منطقه‌ای علائم فعالیت‌های آتشفشانی و سنگ‌های آذرین و آتشفشانی را بیابند، می‌توانند با اطمینان زیادی آن منطقه را فاقد پتانسیل به منظور یافتن هیدروکربن بدانند. چراکه بقایای جانوری یا گیاهی، در اثر گدازه‌های داغ آتشفشانی از بین می‌روند و امکان تبدیل آن‌ها به مواد نفتی از بین می‌رود.

در مرحله‌ی بعدی، متخصصان ژئوفیزیک با روش‌های ویژه مانند بررسی‌های مغناطیسی و ثقل‌سنجی ولرزه‌نگاری‌های دو بعدی و سه بعدی، احتمال وجود نفت گیرها را بررسی می‌کنند. با استفاده از مجموعه‌ی این مطالعات، می‌توان بهترین نقاط را برای حفر چاه‌های اکتشافی و دسترسی به مخازن احتمالی مشخص کرد.

همان‌گونه که گفته شد، تنها حفر چاه است که می‌تواند، جست‌وجو کنندگان نفت و گاز را نسبت به وجود یا عدم وجود هیدروکربن در یک منطقه مطمئن سازد. بنابراین، تجهیزات و دستگاه‌های عظیم حفاری، در نقطه‌ای که طی بررسی‌های قبلی مشخص شده است، برپا و عملیات حفاری آغاز می‌شود. از این پس، بررسی‌های زمین شناسی هم در فاز دیگری ادامه می‌یابد و آن، مطالعه‌ی خرده سنگ‌های حاصل از حفاری[24] است که ضمن حفاری توسط گل حفاری[25] به سطح زمین آورده می‌شوند. زمین‌شناسان حاضر در محل چاه، این قطعات را از نظر فیزیکی و شیمیایی مطالعه کنند. نوع و جنس سنگ‌ها، میزان تخلخل آن‌ها و آثار اولیه‌ای از هیدروکربن‌های احتمالی، وجود یا عدم وجود فسیل‌ها و بسیاری مواد مهم دیگر، از این مشاهدات به دست می‌آیند.

البته در مواردی هم خرده سنگ‌های مذکور در اثر عوامل متعدد، اطلاعات دقیقی به دست نمی‌دهند؛ مثلاً در اثر ریز شدن بسیار زیاد و یا شسته شدن توسط سیال حفاری و از دست دادن بعضی ترکیبات.

بنابراین ضمن حفاری، روش‌های دیگری هم برای مطالعه وجود دارد؛ از جمله عملیات مغزه‌گیری[26]. مغزه[27] در واقع مقطعی استوانه‌ای باقطر چند سانتی متر و ارتفاع چند متر از یک سازند و لایه‌ی رسوبی خاص است که توسط مته‌های مخصوصی برداشت می‌شود و مورد مطالعه و آزمایش‌های گوناگون قرار گیرد. مغزه‌ها از این نظر که نمونه‌ای واقعی‌تر از سازند هستند و وضع تخلخل،

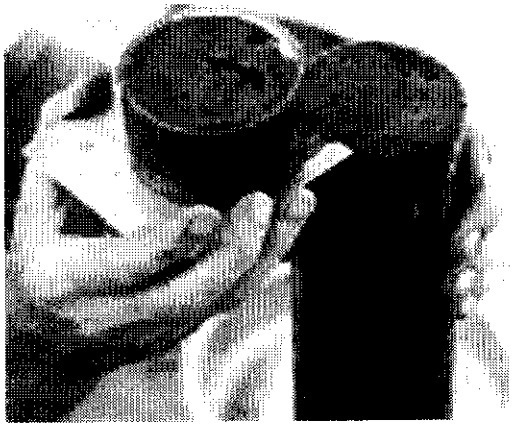


شکل ۷. مته‌ی مخصوص عملیات مغزه‌گیری

نفوذپذیری، جنس سازند و نوع سیالات موجود و بسیاری پارامترهای مهم دیگر ازنظر زمین‌شناسی و مهندسی مخزن را در اختیار کارشناسان قرار می‌دهند، بسیار اهمیت دارند. ولی عملیات مغزه‌گیری از جهاتی عیب‌ها و نقص‌هایی دارد؛ از جمله:

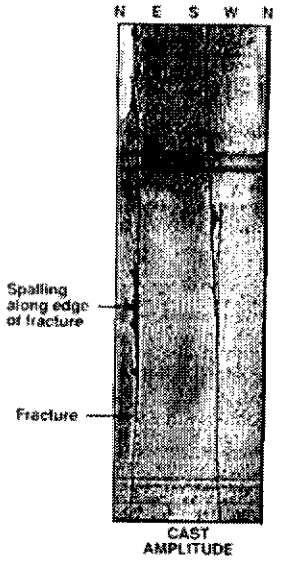
- در بعضی سازندها، به دلایل فنی امکانپذیر نیست.
- هزینه‌ی حفاری و آزمایش‌های بعدی روی مغزه‌ها، در مجموع گزاف و مستلزم صرف وقت بسیار است.
- به دلیل این که امکان انجام عملیات در تمام فاصله و عمق حفاری (به طور پیوسته)، هم از نظر اقتصادی و هم از نظر فنی وجود ندارد، اطلاعاتی هم که از نظر مغزه‌ها به دست می‌آید، پیوسته نیست و تمام فاصله‌ی حفاری شده را پوشش نمی‌دهد.

به دلایل فوق و بعضی عوامل دیگر، در صنعت



شکل ۸. نمونه‌ای از مغزه‌ی اخذ شده از حفره چاه

حفاری، ضرورت استفاده از روشی که ساده‌تر، سریع‌تر، کم هزینه‌تر باشد و در ضمن، اطلاعات حاصل از آن با شرایط واقعی سازندها در عمق زمین مطابقت و پیوستگی داشته باشد و تمام فاصله‌ی عمقی حفاری شده را پوشش دهد، احساس می‌شد. این



شکل۹. نموداری تصویری از شکست لایه‌های زمین

ضرورت، مبنای ابداع عملیاتی به نام «چاه پیمایی» یا «نمودارگیری از چاه»[۲۸] شد. این عملیات هم خود شامل روش‌های بسیار متعدد و مباحث مفصلی است که در بخش بعدی به آن‌ها می‌پردازیم. در این جا تنها به ذکر این نکته اکتفا می‌کنیم که اطلاعات حاصل از نمودارهای چاه پیمایی، پاسخ بسیاری از مسائل مطرح در مورد مخزن هیدروکربوری و خصوصیات آن را مشخص می‌کنند.

مرحله‌ی پایانی در یک بررسی اکتشافی، آزمایش چاه[۲۹] است که طی آن، فاصله‌ها و سازندهای خاصی که با مطالعات قبلی (مخصوصاً روش‌های چاه پیمایی)، دارای پتانسیل هیدروکربنی تشخیص داده شده‌اند، از نظر فشار، میزان تولید و نوع هیدروکربن مورد آزمایش واقع می‌شوند. همچنین، آزمایش‌هایی برای تشخیص حدود واقعی سطح تماس آب و نفت یا سطح تماس گاز و نفت انجام می‌گیرند.

پس از حفر چاه هم بعضی برنامه‌های لرزه نگاری توسط متخصصان ژئوفیزیک با استفاده از حفره‌ی چاه انجام می‌شود و اطلاعات دقیق‌تری که بااین روش حاصل می‌شود، برای تصحیح اطلاعات قبلی و توسعه‌ی دامنه‌ی شناخت منطقه و ساختارهای زمین‌شناسی آن به کار گرفته می‌شوند. به طور خلاصه، از توضیحات فوق می‌توان دریافت که کشف و برداشت اطلاعات از مخازن هیدروکربوری، توسط مجموعه‌ای از متخصصان گوناگون صورت می‌گیرد که عبارتند از: زمین‌شناسان، متخصصان ژئوفیزیک و حفاری، مهندسان نفت (شامل پتروفیزیست، مخزن و مهندسان آزمایش و تکمیل چاه‌ها) و ... هرگروه، در زمان خاص خود وارد عمل می‌شوند و با همکاری و هماهنگی سایر گروه‌ها، وظیفه‌ی خاصی را انجام می‌دهند.

نقش اداره‌ی مهندسی پتروفیزیک و عملیات چاه پیمایی[۳۰]

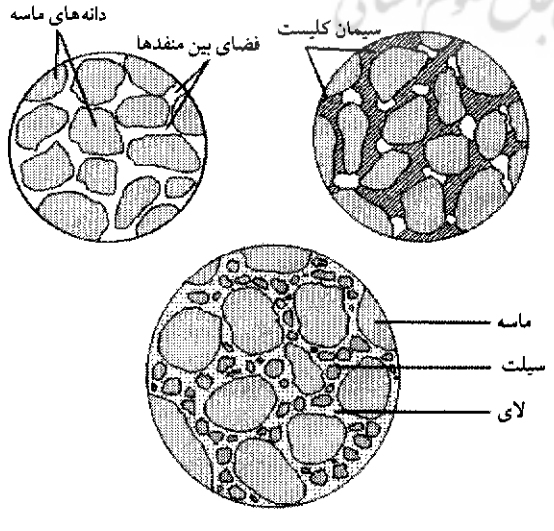
هدف اداره‌ی مهندسی پتروفیزیک، یافتن پاسخ بعضی مسائل مهم مربوط به اکتشاف مخازن هیدروکربوری است؛ مواردی مانند:

ـ وجود یاعدم وجود نفت یا گاز و این که در چه لایه و عمقی واقع است و مقدار آن (در جا و نیز قابل برداشت) چه قدر است.

ـ کیفیت حفرات وخلل و فرجی (تخلخل) که هیدروکربن در آن‌ها ذخیره شده و میزان آب موجود در آن‌ها یا اشباع آب[۳۱]

ـ سنگ‌شناسی و بررسی میزان نفوذپذیری (تراوایی[۳۲]) سنگ‌ها.

ـ تشخیص سطح تماس تقریبی یا دقیق سیالات مخزن با هم

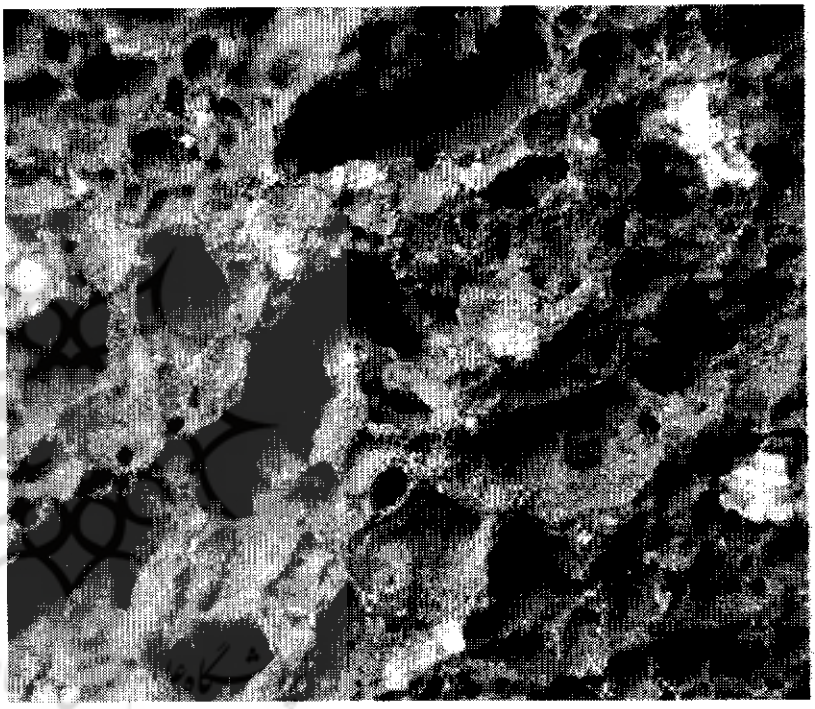


شکل۱۰. نمایشی از مفهوم تخلخل بین ذرات تشکیل دهنده‌ی سنگ‌ها

(سطوح تماس آب با نفت و نفت با گاز).

برای پرداختن به این موارد و یافتن پاسخ‌ها، این اداره در دو بخش فعالیت می‌کند:

۱. **بخش عملیاتی**: که وظیفه‌ی آن برنامه‌ریزی عملیاتی و



شکل ۱۱. تصویری واقعی از حفره‌ها و تخلخل موجود در سنگ

نظارت فنی بر اخذ اطلاعات صحیح از چاه به روش نمودارگیری (چاه پیمایی)، هماهنگ‌کردن گروه نمودارگیری و ارائه‌ی برنامه‌ی هر عملیات از نظر نوع نمودارهای مورد نیاز و ابزارهای مربوطه است.

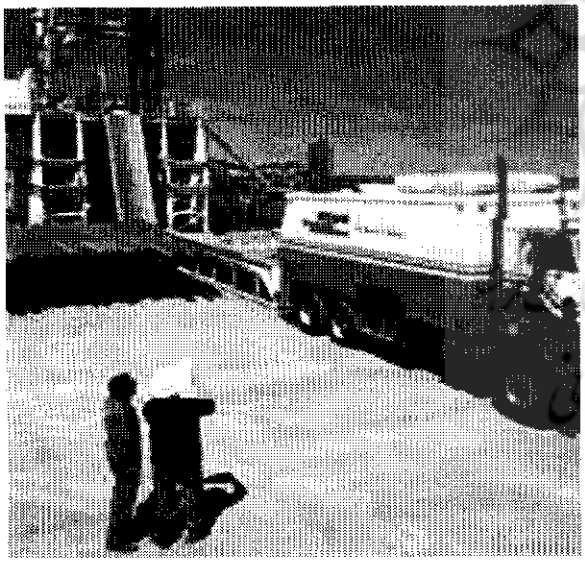
۲. **بخش مطالعاتی**: که در آن، داده‌های خام و نمودارهای به دست آمده از چاه، به‌وسیله‌ی نرم‌افزارهای قوی و تخصصی، توسط مهندسان پتروفیزیست، آنالیز و تجزیه و تحلیل می‌شوند و نتایج فراوری اطلاعات در اختیار سایر واحدهای متقاضی (نظیر اداره‌ی مهندسی مخازن) قرار داده می‌شود.

نمودار و نمودارگیری از چاه

ثبت پیوسته‌ی تغییرات یک مشخصه‌ی فیزیکی از سنگ‌ها برحسب عمق، در لایه‌ها و یا سازندهایی که چاه ضمن حفاری از آن‌ها عبور می‌کند، نمودارگیری از چاه یا چاه‌پیمایی نامیده می‌شود. در این اقدام، محور افقی نمودار برحسب یک یا چند مشخصه‌ی فیزیکی و محور عمودی برحسب مقادیر عمق درجه‌بندی می‌شود.

اندازه‌گیری آن خاصیت یا مشخصه‌ی فیزیکی را می‌توان هم‌زمان با حفر چاه انجام داد و روی نمودار ثبت کرد. این روش را نمودارگیری حین حفاری[۳۳] یا LWD می‌نامند. نمودارگیری را می‌توان پس از پایان حفاری و در یک مرحله‌ی جداگانه انجام داد.

روش اول یکی از جدیدترین روش‌های نمودارگیری است که در آن ابزار نمودارگیری هم‌زمان با مته در عمق زمین عمل و اطلاعات سازند را ثبت می‌کند. روش دوم که در حال حاضر طریقه‌ی معمول و رایج‌تری است، بدین صورت که ابزار حفاری



شکل ۱۲. کامیون نمودارگیری برای انجام عملیات در کنار دکل مستقر شده است.

(مته و لوله‌های حفاری) را از چاه خارج می‌کنند و سپس وسیله‌ی مخصوص نمودارگیری را به‌درون حفره‌ی چاه می‌فرستند. این ابزار که شامل قطعات پیچیده‌ی مکانیکی و الکترونیکی جاسازی شده درون یک پوشش فلزی[۳۴] است، معمولاً توسط کابلی هفت رشته با روکش فلزی مخصوص، تا انتهای چاه رانده می‌شود.

پس از آن، این وسیله، توسط کامیون نمودارگیری[۳۵]، با سرعت مشخصی بالا می‌آید و در همان حال اطلاعات را برداشت و ثبت می‌کند. داده‌ها به‌وسیله‌ی همان کابل، به حافظه‌ی رایانه‌ی موجود

در داخل کامیون نمودارگیری ارسال و ذخیره می‌شوند.

تاریخچه‌ی مختصر مطالعات چاه‌پیمایی

اولین مطالعات چاه‌پیمایی به برادران شلمبرژه[36] منسوب است که در سپتامبر ۱۹۲۷، برای اولین‌بار مقاومت الکتریکی ویژه‌ی لایه‌ها را به عنوان یک مشخصه‌ی فیزیکی، درچاهی در فرانسه اندازه‌گیری و تحت عنوان مغزه‌گیری الکتریکی[37] ارائه کردند. به‌دنبال آن، پیشرفت‌های علمی و تکنیکی باعث شد، ثبت پارامترهای گوناگون با دستگاه‌هایی که هر روز پیش‌رفته‌تر می‌شوند، امکانپذیر شود. استفاده‌کنندگان اصلی این تکنیک‌ها، تولیدکنندگان نفت هستند که از این مطالعات برای محاسبه‌ی تخلخل[38] و درجه‌ی اشباع آب منابع نفتی، سود می‌برند و همان‌طور که توضیح داده شد، می‌توان گفت که بررسی‌های چاه‌نگاری (نمودارگیری)، منبع اطلاعات زمین‌شناسان و مهندسان پتروفیزیست و به مثابه‌ی «چشم» آن‌هاست که می‌تواند آنچه را که در سطح زمین امکان بررسی ندارد و دسترسی مستقیم به آن‌ها امکان نیست، از اعماق زمین ببیند و نمایان سازد.

شرکت‌های خدمات دهنده‌ی عملیات چاه‌پیمایی

عملیات نمودارگیری توسط شرکت‌های داخلی و خارجی، تحت نظارت فنی کارشناسان اداره‌ی مهندسی پتروفیزیک انجام می‌شود. در مجموعه‌ی شرکت‌های داخلی، «شرکت ملی حفاری ایران»[39]، توانایی علمی و فنی لازم برای اجرای این عملیات را دارد. شرکت‌های خارجی نظیر شلمبرژه و «شرکت ملی نمودارگیری چین»[40] یا (CNLC) هم در این زمینه فعالند. تعدادی از شرکت‌های نمودارگیری، هزینه‌های گزافی را برای ابداع روش‌ها و ابزار جدیدی که بتوانند اطلاعات بیش‌تر، بهتر و دقیق‌تری را از اعماق زمین به سطح انتقال دهند، صرف می‌کنند.

شکل ۱۳. نمونه‌ای از ابزار نمودارگیری

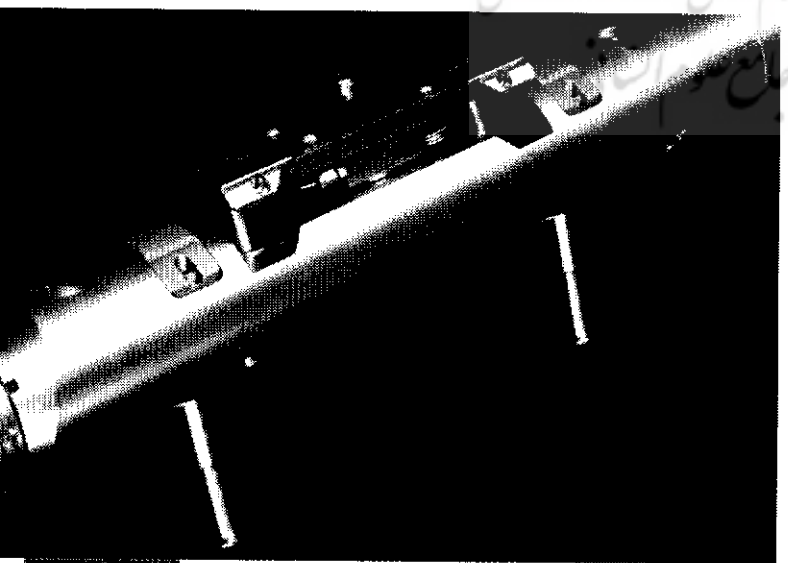
مشخصات فیزیکی

همان‌گونه که گفته شد، نمودار عبارت از ثبت یک مشخصه‌ی فیزیکی در برابر عمق است. به‌طور کلی، مشخصاتی که طی عملیات نمودارگیری ثبت می‌شوند و در تفسیر و آنالیز لایه‌های زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند، پارامترهای فیزیکی سازندهایی هستند که چاه از آن‌ها عبور می‌کند. این پارامترها را می‌توان به دو گروه عمده تقسیم کرد:

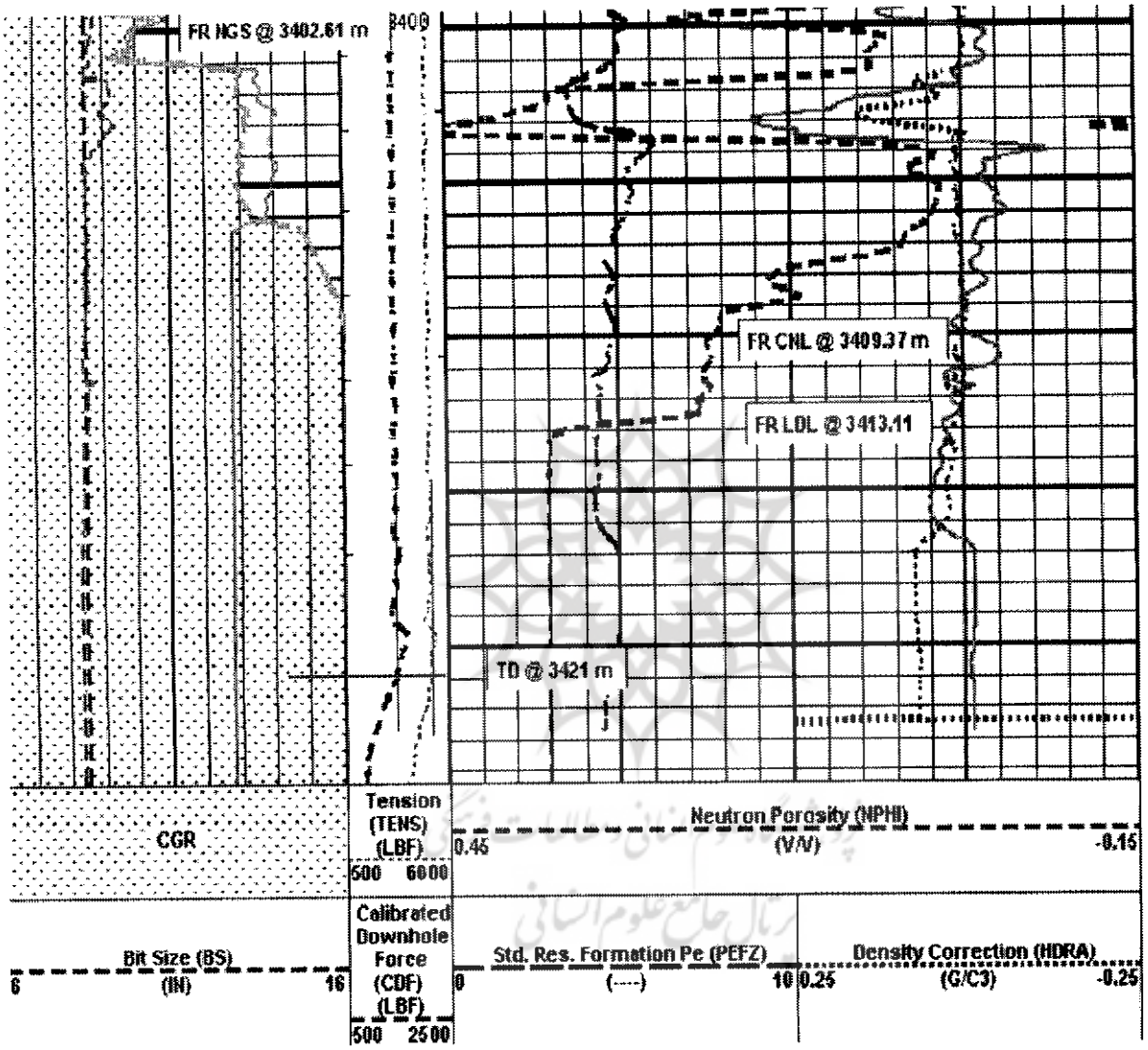
۱. **پدیده‌های طبیعی**: پارامترهایی که به‌طور طبیعی توسط لایه‌های زمین (سازندها) ایجاد می‌شوند و وظیفه‌ی دستگاه‌ها فقط دریافت و ثبت مقدار و آشکارسازی آن‌هاست.

به عنوان مثال: اندازه‌گیری پرتوهای گامای تابش شده توسط عناصر اورانیوم (U)، پتاسیم (K) و توریوم (Th) که به‌طور طبیعی در ترکیب سازندها وجود دارند و نیز طیف‌سنجی این اشعه (Natural Gamma - Ray Spectrometry)، و یا اندازه‌گیری دمای سازند و غیره.

۲. **پارامترهای فیزیکی**: این پارامترها در اثر تحریک سازند



شکل ۱۴. ابزار اندازه‌گیری فشار لایه‌های زمین (دستگاه RFT). نوع پیشرفته‌تر MDT نام دارد. این وسیله برای نمونه‌برداری از سیالات سازند هم به کار می‌رود؛



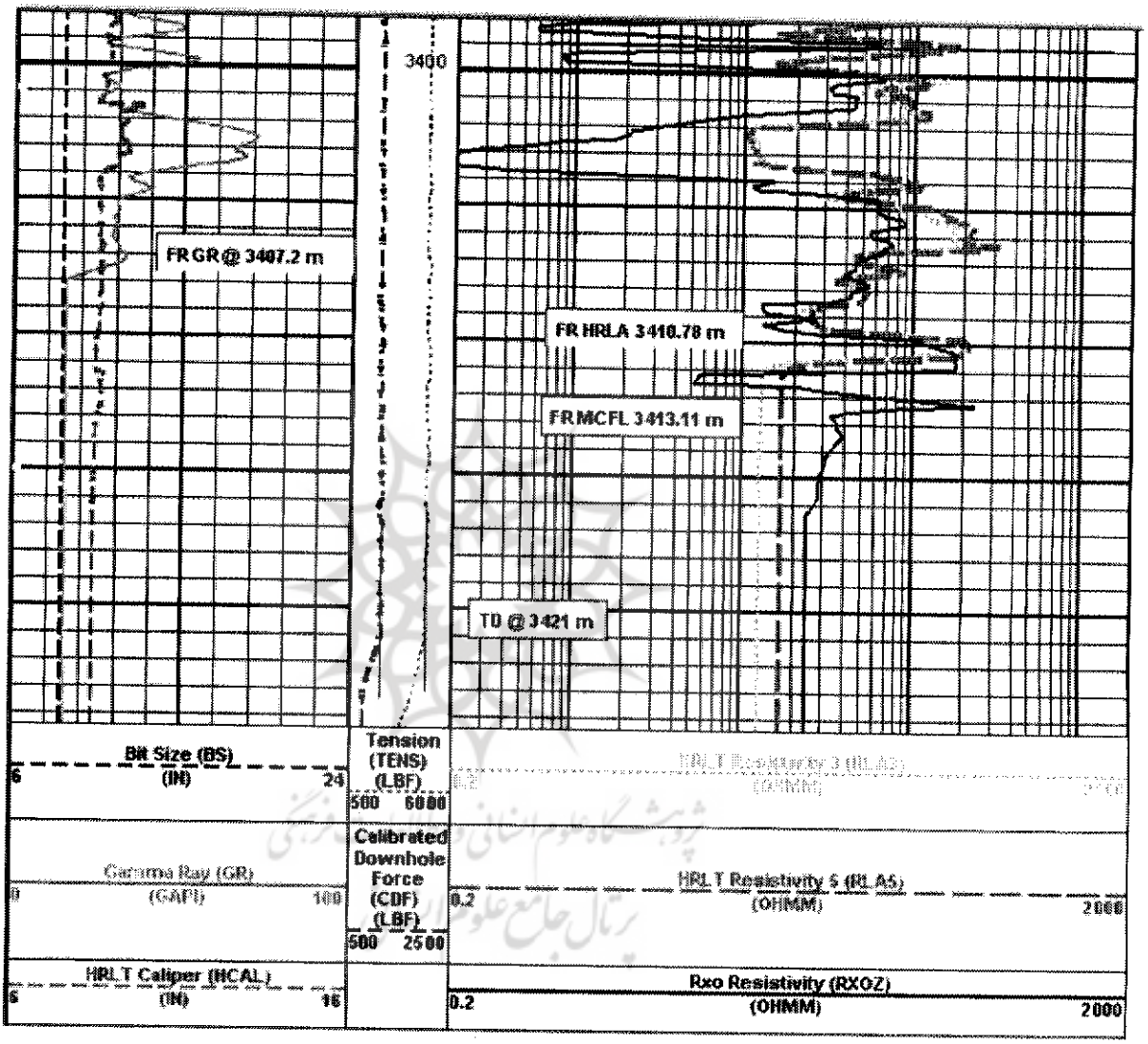
شکل ۱۵ . نمونه‌ای از نمودار و راهنمای منحنی‌های رسم شده (نمودارهای رادیواکتیو)

به‌دست می‌آیند . در این حالت ، دستگاه‌ها شامل نوعی فرستنده‌ی علائم مخصوص و نوعی گیرنده‌ی بازتابش آن علائم از طرف سازند هستند . برای مثال ممکن است این پارامترها ، با فرستادن جریان الکتریسیته ، یا ارسال پرتوهای رادیواکتیو گاما یا ذرات رادیواکتیو نوترون و یا امواج صوتی و غیره ـ باعث تحریک سازند و سپس بازتابش هر کدام از این علائم از طرف سازند ، توسط گیرنده‌های دستگاه ، شوند .

از آن‌جا که علائم دریافت شده توسط آشکارسازها ـ بسته به نوع سازند و جنس آن‌ها ، نوع سیالات موجود در خلل و فرج و میزان تخلخل ، مقاومت الکتریکی یا هدایت‌الکتریکی آن‌ها و عواملی دیگر ـ با هم متفاوتند ، متخصصان پتروفیزیست می‌توانند ، با تجزیه و تحلیل و تفسیر این داده‌ها و نمودارها ، به اطلاعات بسیار مهمی در مورد سازندها و مخازن احتمالی موجود دست یابند .

انواع نمودارها و نقش آن‌ها در کسب اطلاعات

با توجه به تنوع بسیار زیاد خواص فیزیکی قابل اندازه‌گیری از



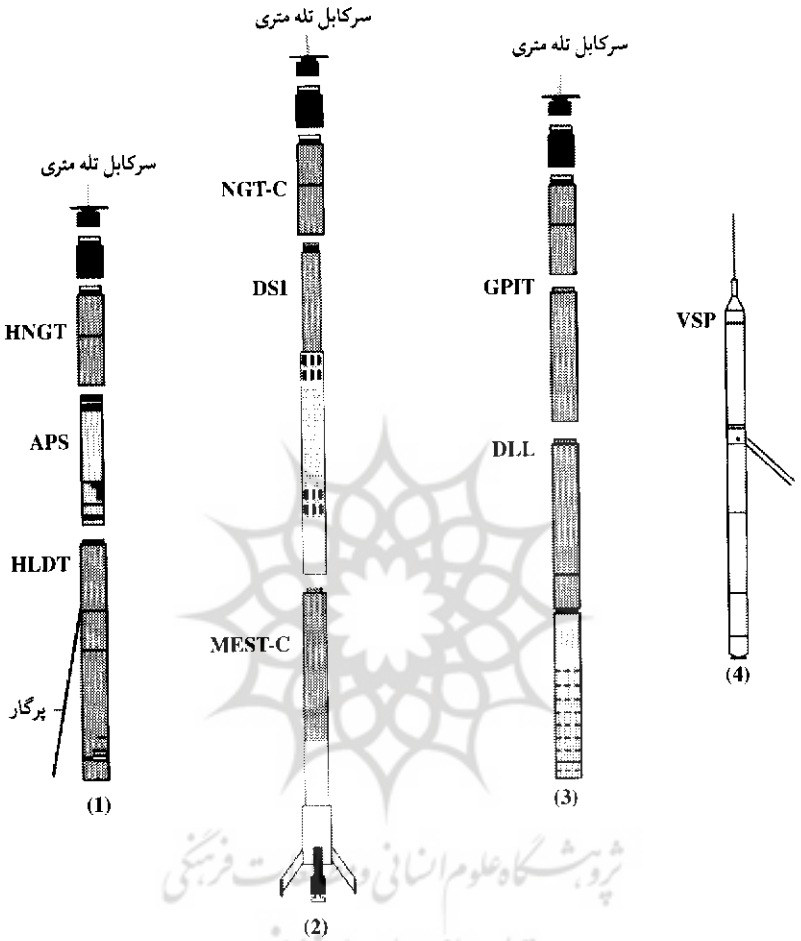
شکل ۱۶ . نمودارهای مقاومت مخصوص و پرتوی گامای طبیعی

سنگ‌ها، روش‌های نمودارگیری، و نیز انواع نمودارهای قابل اخذ از چاه بسیار متنوعند. در ادامه، یکی از ساده‌ترین دسته‌بندی‌های ممکن ارائه شده است:

۱. نمودارهای صوتی[۲۱]

در این نمودارها از خاصیت توانایی انتشار امواج صوتی در محیط‌های مادی استفاده می‌شود. همان‌گونه که می‌دانیم، صوت در جامدات سریع‌تر از مایعات و در مایعات سریع‌تر از گازها منتشر می‌شود.

بنابراین، سرعت انتشار امواج صوتی و نیز زمان عبور این امواج در این محدوده‌ی خاص، بستگی به وضع فیزیکی محیط انتشار صوت خواهد داشت. از سویی دیگر، لایه‌های رسوبی زمین از جنس‌های متفاوت و حاوی سیالات گوناگونند. به گونه‌ای که «زمان عبور موج صوتی»[۲۲] با واحد میکروثانیه (μ sec.) در واحد طول آن‌ها (برحسب فوت)، بسته به جنس سنگ و سیال موجود در آن متفاوت خواهد بود. جایی که سنگ سخت، متراکم و فاقد هرگونه سیالی باشد، این زمان



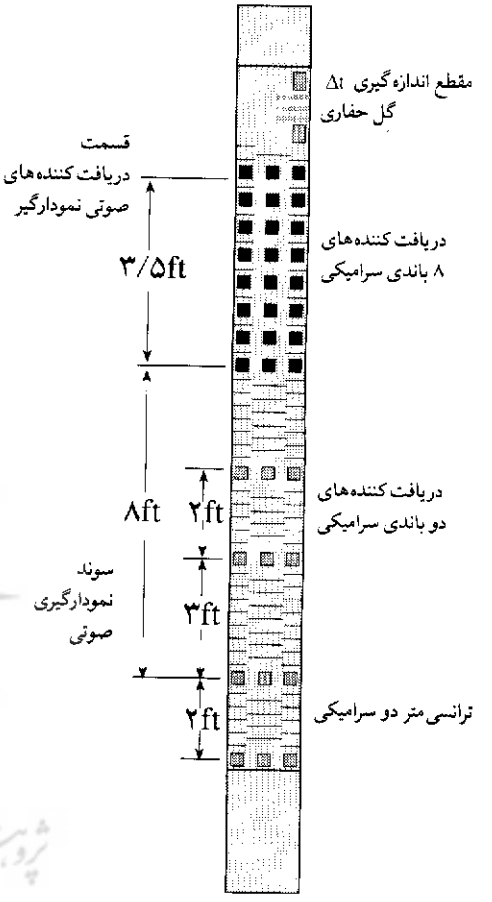
شکل ۱۷ . تصویری شماتیک از بعضی ابزارهای نمودارگیری

کوتاه است و برعکس، چنانچه سیال داخل سازند باشد، این زمان طولانی‌تر است . در مقایسه‌ی بین سیالات هم، چنانچه آب یا نفت وجود داشته باشند (که هر دو مایع هستند)، زمان عبور کم‌تر از موقعی خواهد بود که لایه گازدار باشد . این مفاهیم هنگامی که برحسب عمق ثبت شوند، نمودار صوتی را به وجود می‌آورند .

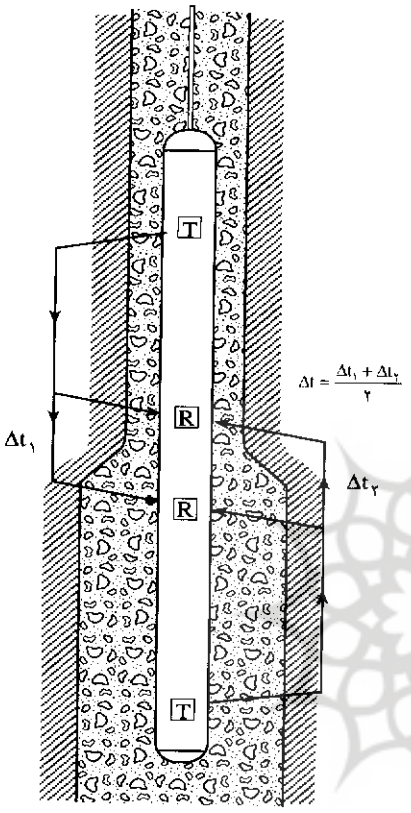
یکی از معمول‌ترین نمودارهای صوتی موجود، نمودار صوتی استاندارد یا Sonic Log است که توسط شرکت‌های سازنده‌ی آن با نام‌های تجارتی مشخصی که معرف نحوه‌ی عملکرد دستگاه و شرکت سازنده‌ی ابزار است، به بازار عرضه شده است .

به‌طور خلاصه در این دستگاه، امواج صوتی توسط فرستنده‌هایی به داخل سازند ارسال و موج برگشت آن‌ها توسط گیرنده‌هایی اخذ و زمان مربوط به آن با واحد $\mu sec/ft$ (میکروثانیه بر فوت) اندازه‌گیری و ثبت می‌شود . مهم‌ترین کاربردهای این نمودار، تعیین تخلخل سنگ و نیز سنگ‌شناسی است . ابزارهای صوتی موارد استفاده‌ی دیگری نیز دارند که از جمله‌ی آن‌ها، بررسی کیفیت سیمان پشت لوله‌های جداری[۴۳] است که در این حالت، نمودار را CBL-VDL[۴۴] می‌نامند .

به غیر از نمودار صوتی استاندارد، نمودارهای جدیدی با نام‌های Dipole Sonic یا DSI و نیز Array Sonic، نمودارهایی صوتی تصویری که از امواج صوتی با فرکانس بالا استفاده می‌کنند و دیواره چاه را به تصویر می‌کشند، مثل CAST[۴۵] هم وجود دارند که هر یک کاربرد اختصاصی خود را دارند .



شکل ۱۸ . ابزار صوتی با فرستنده‌ها و گیرنده‌های مربوطه



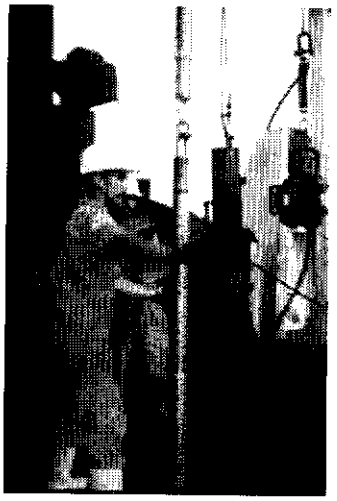
شمای دستگاه صوتی چاه‌نگار

شکل ۱۹ . دستگاه صوتی از نوع BHC و نحوه‌ی ارسال امواج به داخل سازند و دریافت موج بازگشت

۲. نمودارهای الکتریکی

مهم‌ترین این دسته نمودارها، نمودار پتانسیل خودزا[۴۶] (SP)، نمودارهای مقاومت مخصوص الکتریکی[۴۷] و نمودارهای القایی[۴۸] هستند. از جمله کاربردهای این دسته نمودارها، تطابق زمین‌شناسی، محاسبه‌ی مقاومت آب موجود در سازندها[۴۹] (R_W) یا محاسبه‌ی مقاومت حقیقی سازندها[۵۰] (R_t) و غیره است که در محاسبات پتروفیزیکی و تعیین مقادیر تخلخل لایه‌ها[۵۱] (ϕ) و میزان آب اشباع (S_w) بسیار اهمیت دارند.

آب‌های موجود در سازندها به‌طور قابل توجهی از نظر شوری و دما متغیرند و این تغییرات بر مقاومت الکتریکی آن‌ها (یا بر رسانایی و هدایت الکتریکی آن‌ها) اثر می‌گذارد. برای مثال، مقاومت الکتریکی آب، با افزایش شوری (به عبارتی افزایش تعداد یون‌های مثبت و منفی) و با افزایش دما، کاهش می‌یابد. مقاومت الکتریکی خود سازندها (نه آب آن‌ها) هم مقادیر متفاوتی دارد و می‌توان به عنوان یک مشخصه‌ی فیزیکی، از



شکل ۲۰ . راندن ابزار به داخل حفره‌ی چاه

هدف‌های اندازه‌گیری در این روش نمودارگیری باشد.

می‌دانید که مقاومت الکتریکی یک جسم، توانایی آن در جلوگیری از عبور جریان الکتریکی است. مقاومت مخصوص یا مقاومت ویژه[52] که با واحد اهم-متر ($\Omega - m$) نمایش داده می‌شود و تنها به جنس جسم بستگی دارد، مقاومت جسمی است به ابعاد یک متر، وقتی که جریانی با شدت یک آمپر و اختلاف پتانسیل یک ولت از آن می‌گذرد. این خصوصیت فیزیکی در مورد سازندها، با استفاده از قانون اهم، به سادگی اندازه‌گیری می‌شود. بدین صورت که یک جریان مشخص I توسط الکترودی به نام الکترود جریان[53] که در دستگاه تعبیه شده است، به داخل سازند فرستاده می‌شود و در عوض، افت پتانسیل ΔP در الکترود دیگری به نام گیرنده‌ی «measuring electorde» اندازه‌گیری می‌شود. آن‌گاه طبق قانون اهم، مقاومت از فرمول زیر به‌دست می‌آید:

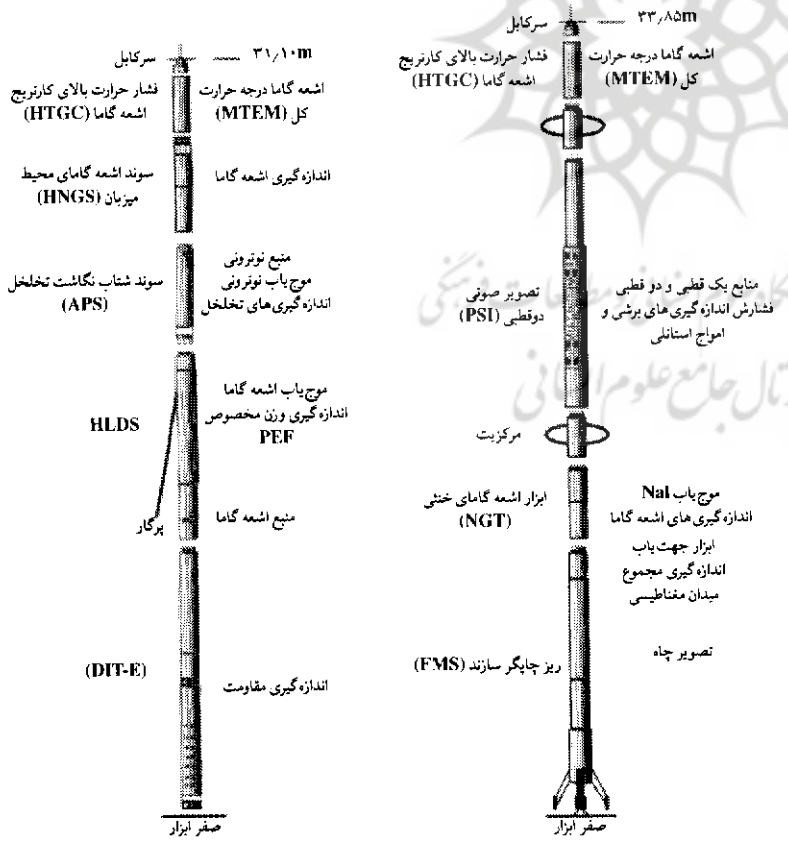
$$R = \frac{\Delta P}{I}$$

یعنی مقاومت برابر است با خارج قسمت اختلاف پتانسیل با واحد ولت، بر شدت جریان برحسب آمپر. مطابق این تعریف، چنانچه در سازند، آب شور و یا کانی‌های رسانا موجود باشند که هادی جریان الکتریسیته‌اند، مقاومت سازند پائین است، و برعکس، چنانچه سنگ فاقد هرگونه تخلخل و عاری از آب شور یا مواد رسانای دیگر باشد و یا در تخلخل‌های آن مواد هیدروکربنی وجود داشته باشند که آن‌ها هم رسانای الکتریسیته نیستند، مقاومت مخصوص سازند بالا خواهد بود. بدین ترتیب، امکان تفکیک سنگ‌های حاوی آب شور از سنگ‌های حاوی نفت یا گاز، با توجه به مقدار مقاومت آن‌ها، وجود خواهد داشت.

۳. نمودارهای رادیواکتیو

نمونه‌هایی از این دسته عبارتند از: نمودار پرتوگاما (طبیعی) یا GR و NGS، نمودار تخلخل نوترون یا CNL، نمودار دانسیته‌ی FDC یا LDT و نمودار زمان اضمحلال حرارتی نوترون TDT و غیره.

می‌دانیم که عناصر رادیواکتیو در طبیعت وجود دارند و به‌دلیل ساختار خاص هسته‌ی اتمشان، از خود تشعشات گوناگون مثل پرتوهای آلفا (α)، بتا (β) و گاما (γ) منتشر می‌سازند. همچنین، در تعدادی از این عناصر، ذرات نوترون هسته، در اثر واکنش هسته‌ای به بیرون راه می‌یابند. این ذرات و پرتوهای رادیواکتیو توسط گیرنده‌ها و آشکارسازهایی قابل دریافت و ثبت



شکل ۲۱. ابزارهای رادیواکتیو برای اندازه‌گیری دانسیته‌ی سنگ‌ها و میزان تخلخل آن‌ها. بعضی از ابزارها دارای بازوهایی هستند که آن‌ها را به‌دیواره‌ای ۴ چاه می‌چسبانند. در تعدادی هم، کمان‌هایی به منظور نگهداری دستگاه در وسط حفره و جلوگیری از تماس با دیواره تعبیه می‌شود.

هستند. بنابراین در این گروه نمودارها، به‌طور کلی ثبت این پرتوها وسیله‌ی اندازه‌گیری خواص فیزیکی سنگ خواهد بود.

ساده‌ترین شکل استفاده از این روش، نمودار GR است که ثبت پرتوی گامای طبیعی حاصل از ایزوتوپ‌های رادیواکتیو عناصر پتاسیم (K)، توریوم (Th) و اورانیوم (U) موجود در ترکیب سازندهاست. از آن‌جا که هر کدام از این سه عنصر (و ایزوتوپ‌های رادیواکتیو آن‌ها) در گروه خاصی از سنگ‌ها تجمع بیش‌تری دارند، اندازه‌گیری تشعشات گامای حاصل از آن‌ها، به تشخیص سنگ شناختی و نیز تطابق لایه‌های زمین با یکدیگر کمک می‌کند. مثلاً بالا بودن مقدار پرتوی گامای ثبت شده از عناصر توریوم و پتاسیم می‌تواند، نشان‌دهنده‌ی یک لایه‌ی رسی (شیلی) باشد.

در گروه دیگری از نمودارهای رادیواکتیو، از ایزوتوپ‌های رادیواکتیو عناصری همانند سزیوم (137 CS) استفاده می‌شود که پرتوهای گاما و مخلوطی از عناصر امرسیوم-برلیوم (Am-Be) هستند و ذرات نوترون ساطع می‌کنند. ایزوتوپ رادیواکتیو سزیوم ۱۳۷، در دستگاهی به نام LDT[۵۴] یا FDC[۵۵]، قرار داده می‌شود. سپس این دستگاه به داخل چاه رانده می‌شود. پرتوهای گامای تابش شده توسط این منبع رادیواکتیو، به داخل سازند و سیالات موجود نفوذ می‌کنند و توسط الکترون‌ها جذب می‌شوند. جذب یا پراکنده شدن پرتوهای گاما، به‌طور مستقیم به تعداد الکترون‌های موجود در مسیر پرتو و در نتیجه به تراکم مواد بستگی دارد. بنابراین هرچه تعداد الکترون‌های مسیر بیش‌تر باشد، یعنی تراکم سازند بالاتر و دانسیته‌ی آن نیز بالاتر باشد، تعداد بیش‌تری از پرتوهای گامای تابش شده جذب و پراکنده می‌شوند و آشکارساز، چگالی بالاتری را ثبت می‌کند. مقادیر اندازه‌گیری شده که همان دانسیته‌ی توده‌ی سازند است، با نام RHOB یا ρ_b، برحسب عمق و با واحد gr/cm^3، روی نمودار نشان داده می‌شود. برای مثال، هنگامی که لایه شامل سنگ‌هایی از جنس آهک، بدون هیچ نوع تخلخل و سیالی باشد، دستگاه مقدار $2/71\ gr/cm^3$ را برای چگالی سازند ثبت می‌کند.

همچنین، ایزوتوپ رادیواکتیو حاوی Am-Be که پرتوهای نوترون از هسته‌ی خود ساطع می‌کند، در دستگاهی به نام CNL یا CNT، برای اندازه‌گیری مقدار تخلخل سازندها به‌کار می‌رود. اصول کار بدین صورت است که نوترون تابش شده، توسط اتم‌های هیدروژن قابل جذب است و همان‌طور که می‌دانید، هیدروژن در نفت، گاز و یا آب وجود دارد و این ترکیبات (سیالات) هم در خلل و فرج سنگ‌ها موجودند. بنابراین هرچه مقدار نوترون بازگشتی از سازند به آشکارساز دستگاه، کم‌تر باشد، به معنی جذب بیش‌تر آن توسط این سیالات هیدروژن‌دار و در نتیجه، به مفهوم وجود تخلخل بیش‌تری در سنگ است. قرائت‌های آشکارساز با واحد «درصد» برحسب عمق و به نام نمودار NPHI یا φ ثبت می‌شوند. مهم‌ترین استفاده‌های نمودارهای دانسیته (P_b) و نوترون (NPHI)، اندازه‌گیری تخلخل کل، تشخیص لیتولوژیک، تشخیص لایه‌های گازی و تطابق چینه‌ای است.

با توجه به این‌که کشف منابع و ذخایر جدید هیدروکربوری روز به روز مشکل‌تر می‌شود و از طرف دیگر، منابع موجود محدود و تمام شدنی و عملاً تجدیدناپذیرند، بنابراین ضرورت بازنگری در نحوه‌ی مصرف و پیروی از الگوی صحیح مصرف این سرمایه‌ی ملی احساس می‌شود.

* وزارت نفت - مدیریت اکتشاف - اداره‌ی مهندسی پتروفیزیک

زیرنویس

1.Natural seepages 2. Whale oil 3. Gasoline
4. Edwin Drake 5. Producing well 6. Persian Gulf
7. Petroleum 8. Natural Gas 9. Crude Oil
10. asphlt 11. Source rock 12. Reservoir rock
13. Migration 14. Cap rock 15. Oil trap
16. Origin of Oil and Source rock 17. inorganic Origin
18. Organic Origin 19. Earthds Crust 20. Mantle
21. anticlinal trap 22.Methods of Exploration
23. Formation 24. Cutting 25. drilling mud
26. coring 27. Co 28. well logging 29. Well Testing
30. Well logging operation 31. water saturation
32. permeability 33. Logging While Drilling
34. Sond 35. Logging truck 36. Schlumberger
37. electrical Coring 38. porosity
39. National Iranian Drilling Company
40. China National Logging Corporation
41. Acoustic 42. transit time 43. Casing
44. Cement Bond Log-Variable Density Log
45. Circumferential Acoustic Scanning Tool
46. Spontaneous potential 47. Resistivity Log
48. Induction Log
49. Formation Water Resistivity
50. True Resistivity 51. porosity 52. Resistivity
53. Current electrode 54. Litho Density Tool
55. Formation Density Compensated