اکتشافات ژئوفیزیکی

ترجمه و تدوین: محمود صداقت

اندازه‌گیری و تعبیر و تفسیر خواص فیزیکی زمین به منظور کاربرد عملی آن، «اکتشاف ژئوفیزیکی»[1] یا «ژئوفیزیک کاربردی»[2] خوانده می‌شود. اکتشافات ژئوفیزیکی بیشتر برای یافتن ذخایر با ارزش نفت، گاز و دیگر کانیها انجام می‌گیرد ولی علاوه بر آن در خدمت هدفهای مهندسی، مثل مطالعه زمین برای ایجاد پی جاده‌ها، بناها، سدها، تونلها، نیروگاههای هسته‌ای و ساختمانهای دیگر و همچنین جستجوی منابع آب، مناطق زمین گرمایی، آثار باستانی و غیره نیز می‌باشد.

خواصی از سنگها که در مطالعات ژئوفیزیک از مسافت دور قابل اندازه‌گیری است عبارتند از: چگالی، هدایت الکتریکی، هدایت حرارتی، خاصیت مغناطیسی، رادیو اکتیویته والاستیسیته. شاید در آینده بتوان خواص دیگری را که امروزه در بررسی‌های ژئوفیزیکی مورد مطالعه نیستند نیز اندازه‌گیری کرد. گاهی اوقات مواد معدنی مورد نظر، مثلاً کانسارهای آهن را با توجه به خواص مغناطیسی آن می‌توان مستقیماً به نقشه درآورد، ولی غالباً بررسی به طور غیرمستقیم و با اندازه‌گیری خواص یا موقعیت سنگهایی که معمولاً همراه با کانسارهای معینی هستند انجام می‌گیرد.

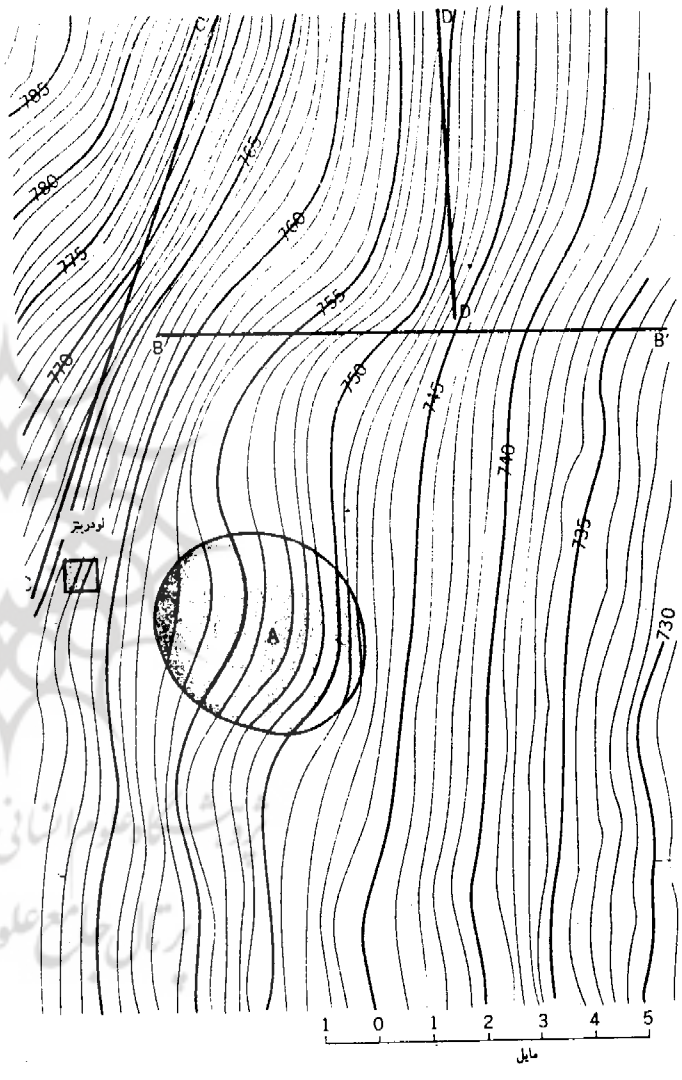
توسعه و تکامل روشهای اکتشافی ژئوفیزیک را بخصوص در ارتباط با پیشرفت صنعت اکتشاف نفت باید درنظر گرفت. با بهره‌برداری از منابع سطحی نفت و منابعی که تشخیص آنها آسان بود نیاز برای یافتن منابع عمیق‌تر بیشتر می‌شد. لذا لازم بود که روشهای اکتشافی موجود را تکامل بخشند تا بتوانند به منابع نفتی عمیق‌تر دست یابند. مطالعات زمین شناسی در هر منطقه برای مشخص کردن محلهای مناسب از نظر وجود نفت و ذخایر زیرزمینی دیگر اهمیت زیادی دارد. ولی این مطالعات برای تعیین وضعیت زمین شناسی در زیرزمین کافی نیست. برای تکمیل اطلاعات در مورد ساختهای زیرزمینی و تعیین محل ذخایر با ارزش از نتایج مطالعات ژئوفیزیک و حفاری چاههای اکتشافی سود جسته می‌شود. حفاری چاههای اکتشافی که معمولاً عمق زیادی دارند هزینه زیادی در برداشته و لذا باید تعداد آنها حتی الامکان محدود شود. با استفاده از مطالعات ژئوفیزیک می‌توان اطلاعاتی کلی از منطقه مورد نظر به دست آورده و محلهایی را که امکان وجود ذخایر با ارزش در آنها هست مشخص نموده و به این ترتیب تعداد چاههای اکتشافی را تقلیل داد. اطلاعات حاصل از مطالعات ژئوفیزیک سریعتر و اقتصادی‌تر از روش حفاری است ولی مسلماً نتایج حاصله از دقت کمتری برخوردار است. مطالعات ژئوفیزیک جانشین روشهای حفاری نمی‌شوند، بلکه با محدود کردن محلهای مناسب برای حفاری، هزینه عملیات حفاری را کاهش می‌دهند.

ژئوفیزیک اکتشافی را غالباً بر اساس خاصیتی که اندازه‌گیری می‌شود، مثل خواص مغناطیسی، گرانی، لرزه‌ای، الکتریکی، حرارتی یا رادیواکتیویته به شاخه‌های فرعی تقسیم می‌کنند. در این مقاله ابتدا اصولی کلی را که در مورد اکثر روشها کاربرد دارد مورد بحث قرار می‌دهیم و آنگاه روشهای مختلف ژئوفیزیک را مختصراً بررسی می‌کنیم.

اصول کلی ــ چند اصل کلی در مورد اکثر روشهای اکتشافی ژئوفیزیک به کار می‌رود. دراین اکتشافات معمولاً به دنبال یک «آنومالی»[3] یا ناجوری هستیم. منظور از آنومالی، انحراف از مشخصات یکنواخت و منظم زمین شناسی یا بی‌قاعدگی در بخشی از زمین است. وجود یک توده یا رگه حاوی مواد معدنی (مثلاً آهن) در قسمتی از یک ناحیه، وجود یک گسل یا یک لایه نفتدار را می‌توان آنومالی به حساب آورد (شکل ۱).

هدف اصلی در هر بررسی ژئوفیزیکی معمولاً تعیین موقعیت اینگونه آنومالیهاست. اگر منبع آنومالی در عمق زیادی از زمین باشد در منطقهٔ وسیعی پخش شده و درنتیجه مقدار آنومالی یا ناجوری در هر موقعیت معینی کوچک خواهد بود. گاهی اوقات مناطق دارای داده‌های ناجور کاملاً مشخصند، ولی غالباً به علت کوچک بودن مقدار آنومالی و تداخل اثرات پدیده‌های مختلف، تشخیص آنومالی آسان نیست. تکنیکهای مختلفی وجود دارد که می‌توان مناطقی را که دارای تغییرات ناجور است بهتر مشخص کرد. معمولاً با افزایش فاصله از منبع ناجوری تا حد اکثر اندازه‌گیری آنومالی کوچکتر به نظر می‌رسد (شکل ۲). از اینرو، یک منبع ژئوفیزیک معمولاً ناجوری تندی ایجاد می‌کند که در ناحیه مجاورت قابل دریافت است. گرچه ممکن است اندازهٔ آن

در ناحیه مورد نظر باید [illegible] تعیین محل آنومالیها لازم است بستگی به عمق منابع مورد نظر دارد. با افزایش عمق آنومالی دستگاههای حساستری مورد نیاز است، زیرا که اثرات آن بسیار کمتر می‌شود. از این و عمق جستجوی مواد معدنی مشخص کننده جزئیات و دقت لازم در اندازه‌گیریهاست. بسیاری از تفاوتهای بین روشهای ژئوفیزیکی نتیجه اعماق مختلف مورد نظر است. کانیها و آبهای زیرزمینی معمولاً از هدفهای کم عمق هستند، درحالیکه نفت و گاز طبیعی معمولاً در عمق بیشتر (۱ تا ۶ کیلومتر) قرار دارند.



شکل ۱ ــ بخشی از یک نقشه گرانی سنجی بوگر در ناحیه‌ای در غرب استرالیا. فاصله منحنی‌ها یک میلی گال (۱۰ سانتیمتر بر مجذور ثانیه) است و سطح مبناء اختیاری است. انحراف از حالت منظم و یکنواخت آنومالی نامیده می‌شود. قسمت A در شکل حاصل یک منطقه بالازده است. جابجائی منحنی‌ها در امتداد BB' یک گسل شرقی غربی است که بخش فرو افتاده آن به طرف جنوب است. گسلهای دیگر (CC' و DD') به وسیله نزدیک شدن منحنی‌ها مشخص می‌شوند و در هر دو بخش فرو افتاده به طرف شرق است.

در داده‌های ژئوفیزیک معمولاً اثراتی که مورد نظر نیستند تداخل می‌کنند، لذا چنین اثرات ناخواسته‌ای که «پارازیت»[۴] خوانده می‌شود، باید به نحوی کنار گذاشته شوند یا کاهش داده شوند تا بتوان اثرات آنومالی مورد جستجو را دریافت نموده و تجزیه و تحلیل کرد. بخصوص تغییرات نزدیک سطح زمین از این نظر می‌تواند تأثیر زیادی داشته باشد. متوسط گیری مقادیر خوانده شده معمولی‌ترین روش برای کاهش دادن اثر اینگونه پارازیتهاست.

تعبیر و تفسیر داده‌های ژئوفیزیکی تقریباً همیشه با ابهام همراه است، زیرا که برای داده‌های ژئوفیزیکی یکسان توضیحات مختلفی وجود دارد. لذا لازم است که از بین تمام توضیحات ممکن، آنهایی را برگزید که بیشترین احتمال را دارند و از بین توضیحات محتمل نیز تعداد کمی را که از نقطه نظر دستیابی به اهداف مورد نظر خوشبینانه‌ترین آنها هستند انتخاب نمود. تعبیر و تفسیرهای خوشبینانه مانع از آن می‌شوند که ذخایر امیدبخش نادیده گرفته شوند. با اندازه‌گیریهای بیشتر می‌توان یک فرض را مورد آزمایش قرار داده تا خوش بینی بیش از حد باعث اشتباه در تجزیه و تحلیل نهایی نشود.

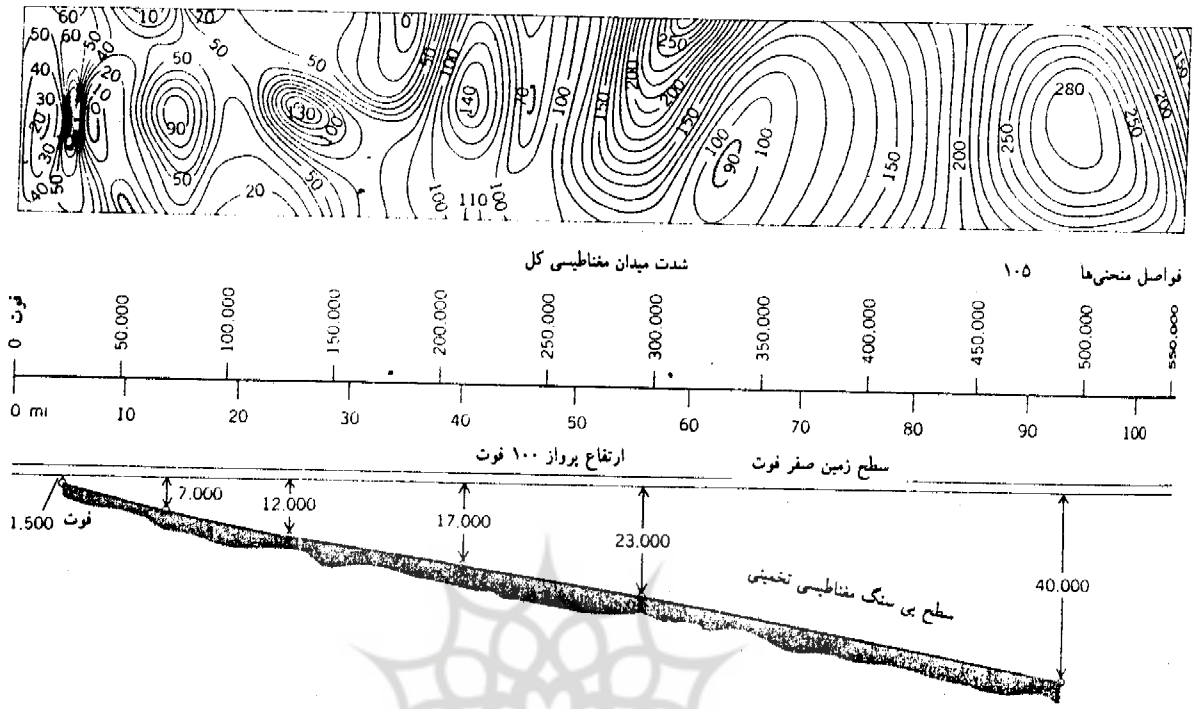
پدیده‌های زمین شناسی بر روی اندازه‌گیریهای مختلف تأثیرات متفاوتی دارند. بنابراین اطلاعاتی که از چندین نوع اندازه‌گیری به‌دست می‌آید بیش از فقط یک نوع آن است. بخصوص ترکیب روشهای مختلف در اکتشافات معدنی بسیار سودمند است. در اکتشاف نفت بهتر است روشهای مغناطیسی، گرانی سنجی و لرزه‌ای به ترتیب انجام گیرد. ابتدا از روشهای ارزانتر استفاده می‌شود تا ناحیه‌ای که باید با روشهای گرانتر مورد اکتشاف قرار گیرد محدودتر شود.

خواصی که ژئوفیزیکدانها قادر به اندازه‌گیری آنها هستند معمولاً به طور مستقیم با هدف مورد نظر مرتبط نیست. از اینرو باید به نوعی ارتباط بین خواص اندازه‌گیری شده و آنچه که به دنبالش هستند متکی باشند. بنابراین تعبیر و تفسیرهای ژئوفیزیک بیشتر استنباطی است. مثلاً یک دایک حاوی سرپانتین غالباً آنومالی مغناطیسی ایجاد می‌کند. بنابراین کانه‌ای را که اغلب همراه دایک است باید در نزدیک آنومالی مغناطیسی به دنبالش بود، و این درحالی است که می‌دانیم اکثر آنومالیهای مغناطیسی همراه با کانسار نیستند. به همین ترتیب ممکن است چنین استنباط کنیم که همان عواملی که شکل ساختمانی خاصی را ایجاد می‌کند، بر روی رسوب‌گذاری نیز تأثیر داشته باشد. بنابراین تعیین موقعیت چنین ساختمانی ممکن است ما را در کشف تمرکزی از یک ماده معدنی هدایت کند.

اشکال اینگونه تعبیر و تفسیرهایی که متکی بر استنباطهای شخصی است آنست که شخص همواره در معرض خطا کردن است. ولی اگر هیچ استنباطی نکند بیشتر در معرض خطا خواهد بود. بنابراین اکتشاف ژئوفیزیکی، همچنانکه اشاره شد، فقط خطر عدم موفقیت را

کاهش می‌دهد. هزینه بررسی‌های ژئوفیزیکی غالباً درصد کمی از کل هزینه‌های اکتشافی است. البته دائماً کوشش بر آنست که با بهبود بخشیدن روشهای ژئوفیزیکی مخارج انجام شده هرچه مؤثرتر باشد.

شکل ۲ ــ بخشی از یک نقشه مغناطیسی (در بالا) و تعبیر و تفسیر آن (در پائین). فاصله کمتر منحنی‌ها، یعنی تغییرات سریعتر شدت میدان مغناطیسی، درسمت چپ نقشه نشان می‌دهد که پی سنگ در عمق کمی قرار دارد، درحالیکه فاصله زیاد منحنی‌ها در سمت راست نشانه عمق زیاد پی سنگ است.



اکتشاف به روش مغناطیس‌سنجی

سنگها و مواد معدنی حاوی کانیهای مغناطیسی، بر اثر القاء در میدان مغناطیسی زمین دارای خاصیت مغناطیسی می‌شوند، بنابراین میدان القایی آنها به میدان مغناطیسی زمین اضافه می‌شود. اکتشاف به روش مغناطیسی مستلزم به نقشه درآوردن تغییرات میدان مغناطیسی زمین است که هدف از آن تعیین محل، اندازه و شکل توده‌هایی است که باعث این تغییرات می‌شوند.

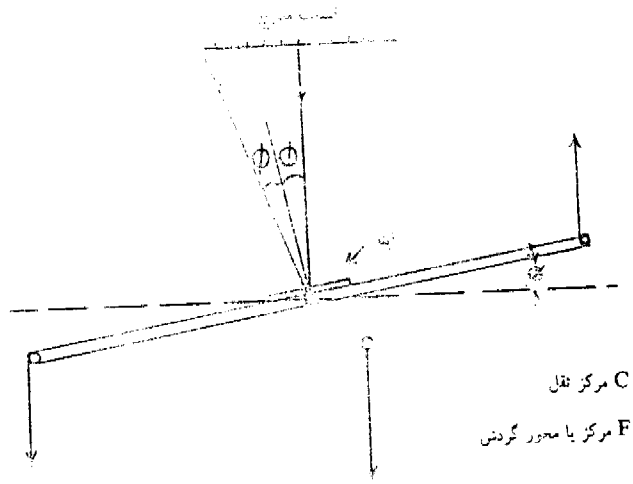
ضریب قابلیت مغناطیسی سنگهای رسوبی عموماً کمتر از سنگهای آذرین و دگرگونی است. در نتیجه اکثر آنومالیهای مغناطیسی که در اندازه‌گیریهای سطوح رسوبی مشاهده می‌شود، معمولاً نتیجه پی سنگی است که در زیر سنگهای رسوبی قرار گرفته است. بنابراین تعیین عمق سطح فوقانی توده‌های سنگ مغناطیسی راهی برای برآورد ضخامت رسوبات است.

جز مانیتیت[5] و معدودی کانیهای دیگر، اغلب کانه‌ها خاصیت مغناطیسی خیلی کمی دارند ولی بسیار دیده می‌شود که کانه‌ها همراه با توده‌هایی سنگ دایکها هستند که حالت مغناطیسی دارند و بنابراین آنومالیهای مغناطیسی را معمولاً می‌توان به طور تجربی به آنها مرتبط نمود. مثلاً مثلاً در [illegible] کانه‌ها غالباً در [illegible] مانیتیت نیز [illegible]

وسایل و روشهای کار: از آنجا که میدان مغناطیسی کمیتی برداری است، هم مقدار و هم جهت آن قابل اندازه‌گیری است و همچنین می‌توان مؤلفه‌های میدان را در جهات مختلف اندازه‌گیری کرد. ولی معمولاً در اندازه‌گیریهای صحرائی مقدار مؤلفه قائم میدان و در اندازه‌گیریهائی هوایی و دریائی میدان کلی اندازه‌گیری می‌شود. «مغناطیس‌سنج»[7]هایی که در کار اکتشافات مورد استفاده‌اند حساسیت و دقت خیلی زیادی دارند (دقت این دستگاهها بین ۱ تا ۱۰ گاما[8] است).

دستگاههای مختلفی برای اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیسی زمین به کار می‌رود. یکی از متداولترین این دستگاهها که در اندازه‌گیریهای زمینی مورد استفاده است «ترازوی مغناطیسی نوع اشمیت»[9] است که تغییرات مؤلفه قائم میدان مغناطیسی زمین را اندازه‌گیری می‌کند. قسمت اصلی این دستگاه به طور ساده عبارت است [illegible] مغناطیسی است که حول یک محور گردش می‌کند. برای آنکه تأثیر مؤلفه افقی میدان مغناطیسی زمین از بین برود محور گردش را عمود بر [illegible] مؤلفه افقی میدان مغناطیسی زمین قرار می‌دهند. تا حدی که [illegible] گردش آن وجود دارد. در نتیجه [illegible] می‌شود که مخالف با گشتاور [illegible] میدان که در آن تعادل ایجاد

می‌شود تا شدت میدان [illegible] زاویه را که متناسب با تغییرات مؤلفه [illegible] دستگاه تبدیل به [illegible]



شکل ۳ ــ اصول کار مغناطیس‌سنج نوع اشمیت. مرکز ثقل تیغه فاصله کمی از محور گردش آن دارد. مؤلفه قائم میدان مغناطیسی چرخشی خلاف حرکت عقربه‌های ساعت و نیروی ثقل چرخشی در جهت عقربه‌های ساعت ایجاد می‌کنند. مقدار زاویه ϕ را که تابع شدت میدان مغناطیسی است توسط یک دسته شعاع نورانی که به آینهٔ متصل به تیغه تابانده می‌شود، اندازه‌گیری می‌کنند.

مغناطیس‌سنجهای دیگری نیز امروزه متداولند، از جمله مغناطیس‌سنج نوع «فلاکس گیت»[10] که بیشتر در اندازه‌گیریهای هوائی مورد استفاده است و تغییرات شدت کلی میدان مغناطیسی زمین را به طور پیوسته ثبت می‌کند، یا مغناطیس‌سنجهای اتمی که دقت زیادی دارند و به طور وسیعی مورد استفاده‌اند.

امروزه بیشتر اندازه‌گیریهای مغناطیسی توسط هواپیما انجام می‌گیرد، زیرا که منطقه وسیعی را می‌توان در زمان کوتاهی مطالعه کرد و لذا مخارج واحد سطح مورد مطالعه خیلی کمتر خواهد بود. اندازه‌گیریهای مغناطیسی هوایی مخصوصاً از نظر شناسایی اولیه مناسب است و با این روش می‌توان بخشهایی از مناطق بزرگ ناشناخته را که بهترین هدفهای اکتشافی هستند مشخص کرد تا فعالیتهای آینده در آنجا متمرکز شود.

فواصل اندازه‌گیریها بستگی به اندازهٔ آنومالی مورد نظر دارد. معمولاً اکتشافات نفتی تنها در آنومالیهای بزرگ مورد توجه است. لذا برای بررسی چنین هدفهایی معمولاً پرواز در یک سری خطوط موازی به فاصله ۱ تا ۳ کیلومتر با خطوط رابطی در هر ۱۰ تا ۱۵ کیلومتر انجام می‌گیرد. ارتفاع پرواز معمولاً ۳۰۰ تا ۱۰۰۰ متر است. در اکتشافات کانیها خطوط پرواز معمولاً خیلی بهم نزدیکتر (گاهی اوقات کمتر از ۱۰۰ متر) و ارتفاع پرواز تا حد ممکن پائین است. گاهی اوقات در اکتشاف کانیها از هلی‌کوپتر استفاده می‌شود. ارتفاع پرواز اصولاً زیادی دارد زیرا اگر [illegible] باشد عوامل سطحی مثل [illegible] تأثیر می‌کند و اگر ارتفاع پرواز زیاد باشد دامنه تغییرات [illegible] کاهش پیدا کرده و ممکن است آنومالی قابل تشخیص نباشد.

در اکتشافات زمینی کانیها، میدان مغناطیسی در ایستگاههایی به فواصل نزدیک اندازه‌گیری می‌شود. در این حال اثرات توده‌های مغناطیسی نزدیک سطح زمین بیشتر از اندازه‌گیریهای هوایی است.

اندازه‌گیریهای مغناطیسی غالباً همراه با دیگر روشهای ژئوفیزیکی انجام می‌گیرد. این روش با افزودن مقدار کمی به هزینه‌های اکتشافی اطلاعاتی فراهم می‌کند که غالباً به حل ابهامات تفسیری کمک می‌کند. مثلاً مغناطیس‌سنجی که به دنبال یک کشتی که در حال بررسی‌های لرزه‌ای است کشیده می‌شود می‌تواند یک توده آتشفشانی را از یک گنبد نمکی تشخیص دهد، که با توجه به داده‌های لرزه‌ای ممکن است مشابه به نظر آیند.

تصحیح و تعبیر و تفسیر داده‌ها: قبل از آنکه مقادیر اندازه‌گیری شده مورد تعبیر و تفسیر قرار گیرند باید تصحیحاتی روی آنها انجام گیرد. تصحیح داده‌های مغناطیسی معمولاً آسان است. در بسیاری از موارد تغییر شرایط اندازه‌گیری آنقدر کم است که داده‌ها را می‌توان مستقیماً تعبیر و تفسیر نمود یا آنکه فقط تصحیحات شبکه‌ای انجام می‌گیرد (این تصحیحات برای به حداقل رساندن اختلافات در محل تقاطع خطوط که نتیجه اشتباه در تعیین محل دستگاه یا جابجائی دستگاه است لازم می‌باشد). بهر حال تصحیحاتی که در مورد داده‌های مغناطیسی ممکن است انجام گیرد عبارتند از:

تصحیح دما: اعداد خوانده شده را برای یک دمای معین و با استفاده از ضریب دمایی دستگاه تصحیح می‌کنند. در دستگاههای جدید ممکن است اثر دما خنثی شده و مقدار تصحیح نسبت به دما قابل صرف نظر کردن باشد.

تصحیح تغییرات روزانه میدان مغناطیسی: میدان مغناطیسی زمین ثابت نبوده و تحت تأثیر خورشید و ماه تغییر می‌نماید. این تغییرات در حدود دهها گاماست. همچنین در مواقع طوفانهای مغناطیسی خورشیدی که ممکن است کوتاه مدت بوده یا چند روزی ادامه داشته باشد تغییرات شدید و سریعی در میدان مغناطیسی زمین ایجاد می‌شود که ممکن است تا ۱۰۰۰ گاما برسد. باید اضافه نمود که میدان مغناطیسی زمین دارای تغییرات آهسته و غیرمنظم سالیانه و قرنی نیز می‌باشد. بهرحال داده‌های اندازه‌گیری شده را با توجه به منحنی تغییرات روزانه میدان مغناطیسی، که غالباً در یک ایستگاه مشخص توسط مغناطیس‌سنجهای ثبات تهیه می‌گردد، باید تصحیح کرد. در مواقع طوفان مغناطیسی که تغییرات در میدان مغناطیسی خیلی زیاد و

نامنظم است معمولاً کار اندازه‌گیری متوقف می‌شود.

تصحیح مربوط به عرض جغرافیائی: در اندازه‌گیریهایی که در مناطق بزرگ انجام می‌شود تغییرات میدان مغناطیسی کلی زمین را باید در نظر گرفت و داده‌ها را نسبت به آن تصحیح نمود. زیرا مقدار این تغییرات خیلی بزرگتر از آنومالیهای مربوط به اشکال زمین‌شناسی مورد مطالعه است. در مناطق کوچک که ابعاد ساختمانهای زمین‌شناسی بزرگ است این تصحیح ممکن است ضروری نباشد. این تصحیحات معمولاً به وسیله نقشه‌های مغناطیسی کلی که در هر کشور یا ناحیه‌ای از قبل تهیه شده انجام می‌گیرد.

در موارد استثنایی، از قبیل اندازه‌گیریهائی که در زمین ناهموار صورت می‌گیرد، مثل کف دره‌ها که ممکن است منابع مغناطیسی در بالای دستگاه اندازه‌گیری باشد تصحیح داده‌ها بسیار مشکل است.

پس از تصحیحات لازم نقشه مغناطیسی منطقه مورد نظر را تهیه می‌کنند. به این معنی که داده‌های تصحیح شده را در روی نقشه منطقه پیاده کرده و نقاطی را که شدت میدان مغناطیسی یکسانی دارند به وسیله منحنی‌هایی به هم متصل می‌کنند (شکل ۲). با بررسی و تعبیر و تفسیر این منحنی‌ها می‌توان اطلاعاتی در مورد وضعیت زمین‌شناسی زیرزمینی به دست آورد. تعبیر و تفسیرها غالباً به روش کیفی صورت می‌گیرد. از آنجا که قابلیت مغناطیسی سنگهای رسوبی مختلف آنقدر زیاد نیست که بتواند آنومالیهای مغناطیسی قابل توجه‌ای ایجاد کند، در غالب موارد اختلاف قابلیت مغناطیسی سنگهای رسوبی و آذرین موجود در زیر آنها روی اندازه‌گیری اثر می‌گذارد و بنابراین با استفاده از نقشه‌های مغناطیسی می‌توان اطلاعاتی در مورد ساختمان پی‌سنگ در هر منطقه به دست آورد. چنانکه اشاره شد هرچه منحنی‌ها به‌هم نزدیکتر باشند یعنی گرادیان بیشتر باشد معمولاً عمق سنگهای مورد نظر کمتر است. هر تغییر ناگهانی در فاصله منحنی‌ها در یک مسافت زیاد ممکن است احتمالاً نشانه یک گسل باشد. از روش مغناطیسی می‌توان برای اکتشاف مستقیم کانیهائی که دارای خاصیت مغناطیسی هستند (کانسارهای آهن) یا اکتشاف کانیهای غیرمغناطیسی، با پیدا کردن ساختهایی که محلهای مناسبی برای اینگونه کانیهاست یا با پیدا کردن مواد مغناطیسی که معمولاً همراه اینگونه کانیها هستند استفاده نمود.

روشهای تحلیلی کمی نیز برای محاسبه عمق احتمالی و شکل منبع آنومالی وجود دارد. برای این کار از منحنی‌هائی که به طور تئوری و برای اجسام مغناطیسی ساده با اشکال هندسی مشخص تهیه شده و تطبیق آنها با منحنی‌های مشاهده شده استفاده می‌شود.

اکتشاف به روش گرانی‌سنجی

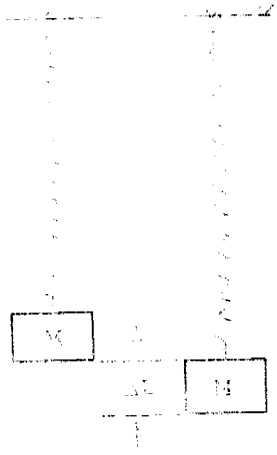
اکتشاف به روش گرانی‌سنجی[11] یا ثقل‌سنجی بر اساس قانون جاذبه عمومی نیوتن قرار دارد. بنا به این قانون نیروی جاذبه بین دو جسم به طور مستقیم با حاصلضرب جرم آنها و به طور معکوس با توان دوم فاصلهٔ بین آنها متناسب است.

چون چگالی زمین از محلی به محل دیگر متفاوت است، نیروی جاذبه یا گرانی نیز از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر تغییر می‌کند. در اکتشافات گرانی‌سنجی اینگونه تغییرات اندازه‌گیری می‌شود تا بتوان اطلاعاتی در مورد توده‌های سنگی نزدیک سطح زمین به دست آورد. تغییرات گرانی که مربوط به اینگونه علل محلی است خود بر روی میدان بسیار بزرگتری قرار گرفته که توسط جرم، اندازه و شکل زمین به طور کلی تعیین می‌شود.

تغییرات قائم چگالی بر روی تمام ایستگاههای اندازه‌گیری به یک اندازه تأثیر می‌کند و لذا اثراتی که به آسانی قابل اندازه‌گیری باشد ایجاد نمی‌کند. تغییرات میدان گرانی در اثر تغییرات جانبی در چگالی بوجود می‌آید. مقادیر مطلق چگالی مورد نظر نیست، بلکه فقط با تغییرات چگالی سر و کار داریم.

روش گرانی سنجی در اکتشافات نفتی بیشتر از کانسارهای فلزی به کار می‌رود. کانسارها از نظر اندازه معمولاً کوچکند، و با وجود آنکه ممکن است بین کانه‌ها و سنگهای اطراف آن اختلاف چگالی زیادی وجود داشته باشد، ولی اثرات گرانی آنها خیلی کم و محلی است. لذا استفاده از روش ثقل سنجی برای یافتن کانسارها باید با جزئیات و دقت زیادی انجام گیرد. در کاوشهای نفتی، اشکال مورد بررسی ابعاد بزرگتری دارند. گرچه اختلاف چگالی معمولاً کوچکتر است.

وسایل و روشهای اندازه‌گیری: برای اندازه‌گیری تغییرات نسبی گرانی از گرانی‌سنج (گراویمتر[12]) استفاده می‌شود. انواع سادهٔ گرانی‌سنجها اساساً از وزنه‌ای که به فنری آویزان است ساخته شده است. ساختمان آنها مشابه ساختمان نیروسنجهاست. با این تفاوت که در گرانی‌سنجها وزنه ثابت است و تغییرات طول فنر متناسب با تغییر شتاب ثقل می‌باشد. گرانی‌سنج را در یک نقطه به حالت تعادل در می‌آورند. وقتی دستگاه به محل دیگری برده شود تغییرات جزئی نیروی ثقل دستگاه را از حالت تعادل خارج می‌نماید و لذا لازم است که دوباره آنرا میزان نمود. این تغییر جزئی را می‌توان اندازه‌گیری کرد. البته تغییرات طول فنر بسیار کوچک است و لذا به وسایل مختلف نوری، مکانیکی و الکتریکی تقویت می‌شود. بنابراین دستگاههای گرانی‌سنجی میدان گرانی را به طور کلی اندازه‌گیری نمی‌کنند، بلکه تغییرات میدان گرانی را از یک محل به محل دیگر اندازه می‌گیرند. گرانی‌سنج اصولاً یک شتاب‌سنج[13] خیلی حساس است. [illegible] بسیار دقیق ساخته می‌شود. دقت کار



شکل ۴ ــ گرانی سنجها گرچه دستگاههایی بسیار حساس و دقیقند ولی اساس کار آنها ساده است. موقعیت وزنه M که به فنری آویزان است با تغییر شتاب جاذبه تغییر می‌کند. جابجایی بسیار کم وزنه (۵۱) به طرق مختلف تقویت شده و اندازه‌گیری می‌شود.

اندازه‌گیریهای اولیه گرانی با یک ترازوی پیچشی انجام می‌گرفت، که این دستگاه گرادیان میدان جاذبه را نشان می‌داد. اندازه‌گیریهای مطلق گرانی توسط پاندول انجام می‌گیرد. با تغییر شتاب ثقل زمان تناوب پاندول تغییر می‌کند. با اندازه‌گیری زمان تناوب و داشتن طول پاندول شتاب ثقل در هر نقطه به دست می‌آید.

تقریباً تمام اندازه‌گیریهای ثقل سنجی اندازه‌گیریهائی نسبی هستند. یعنی اختلاف بین نقاط مختلف اندازه‌گیری می‌شود، در حالیکه مقادیر مطلق نامعلوم باقی می‌ماند. معمولاً فاصلهٔ ایستگاههای اندازه‌گیری باید کمتر از نصف عمق ساختمان مورد مطالعه باشد.

اندازه‌گیریهای گرانی‌سنجی در خشکی معمولاً مستلزم اندازه‌گیری در ایستگاههای مجزاست. چنین ایستگاههایی ممکن است در بعضی از مطالعات معدنی یا باستانشناسی به فاصلهٔ چند متر، در اکتشافات نفتی حدود $\frac{1}{2}$ کیلومتر و در پاره‌ای مطالعات زمین‌شناسی ناحیه‌ای حتی ۱۰ تا ۲۰ کیلومتر باشد.

میدان گرانی نسبت به ارتفاع بسیار حساس است. اختلاف ارتفاعی معادل ۳ متر موجب تقریباً ۱ میلی گال اختلاف در گرانی می‌شود. بنابراین ارتفاع محلی باید به دقت معلوم باشد و مهمترین بخش عملیات گرانی سنجی غالباً تعیین ارتفاع با دقت کافی است.

اندازه‌گیریهای گرانی سنجی با کشتی در دریا نیز انجام می‌گیرد. دراین اندازه‌گیریها دستگاه را روی سکوئی که تا حد امکان آنرا تراز نگهمیدارند قرار می‌دهند. عامل محدود کننده در داده‌های گرانی‌سنجی دریائی معمولاً سرعت نامعلوم دستگاه، بخصوص در جهت شرقی غربی است. سرعت کشتی وقتی که به سمت شرق در حرکت است به سرعت چرخش زمین به دور خود اضافه می‌شود. در

[illegible] (Eötvös)
[illegible] دستگاه در [illegible]
[illegible] اقیانوس [illegible] [illegible] گیریهای گرانی
[illegible] سنجی به [illegible] [illegible] دریائی نیز
[illegible] انجام می‌گیرد [illegible] [illegible] برای کارهای
اکتشافی مفید باشد.

گرانی‌سنجهای مخصوصی وجود دارد [illegible] گیری در گمانه‌ها (چاههای اکتشافی) [illegible] مقدار گرانی در دو عمق گمانه، ناشی از جرم قطعه‌ای [illegible] بین این دو عمق قرار دارد. وقتی دستگاه در بالا قرار گرفته، این جرم باعث کششی به طرف پائین و وقتی دستگاه در پائین قرار گرفته باعث کششی به طرف بالا می‌شود. بنابراین اختلاف مقادیر خوانده شده بستگی به چگالی این قطعه خواهد داشت. در سنگهای رسوبی از گرانی‌سنجی در گمانه‌ها اصولاً برای اندازه‌گیری تغلخل استفاده می‌شود.

تصحیح داده‌های گرانی سنجی: اندازه‌گیریهای گرانی سنجی را باید برای عوامل دیگری جز توزیع جرم زمین تصحیح نمود:

گرانی‌سنجها دستگاههای بسیار حساسی هستند و به همین جهت اگر در یک محل معین دو قرائت در دو زمان مختلف انجام گیرد مقادیر خوانده شده مختصری با یکدیگر تفاوت خواهند داشت. این تفاوت علل مختلفی دارد از جمله آنکه فنرها در مدت زمان طولانی به آهستگی تغییر شکل می‌دهند. به علاوه مقدار g در یک نقطه معین تحت‌تأثیر جاذبه خورشید و ماه ثابت نیست. بنابراین در طول روز که خورشید و ماه در جهات مختلف بر روی دستگاه اثر می‌کنند انحرافاتی در اندازه‌گیریهای گرانی‌سنجی ایجاد می‌شود. مقدار اینگونه تغییرات در اندازه‌گیریهای بسیار دقیق ممکن است قابل توجه باشد و لذا مقادیر اندازه‌گیری شده باید تصحیح شود. برای این تصحیح معمولاً تغییرات در مدت زمان کوتاه مثلاً دو ساعت راخطی در نظر می‌گیرند. بنابراین در موقع کار هر دو ساعت یکبار مقدار g را در یک ایستگاه مبناء اندازه‌گیری می‌کنند و با توجه به آن مقادیر قرائت شده در ایستگاههای مختلف را تصحیح می‌نمایند.

داده‌های گرانی سنجی از نظر ارتفاع نیز باید تصحیح شود. با افزایش ارتفاع گرانی سنج نیروی جاذبه تغییر می‌کند، به دلیل آنکه اولاً فاصله آن از مرکز زمین افزایش می‌یابد (تصحیح هوای آزاد[15]) و ثانیاً به دلیل وجود جرمی است که بین دستگاه و ارتفاع مبناء، که معمولاً سطح متوسط دریاهاست، قرار دارد (تصحیح بوگر[16]). تصحیح مربوط به هوای آزاد با توجه به اینکه نیروی جاذبه به طور معکوس با مربع فاصله از مرکز زمین تغییر می‌کند، به سادگی انجام می‌گیرد. در تصحیح بوگر تأثیر گرانی طبقاتی را که بین ایستگاه اندازه‌گیری و سطح مبناء واقع

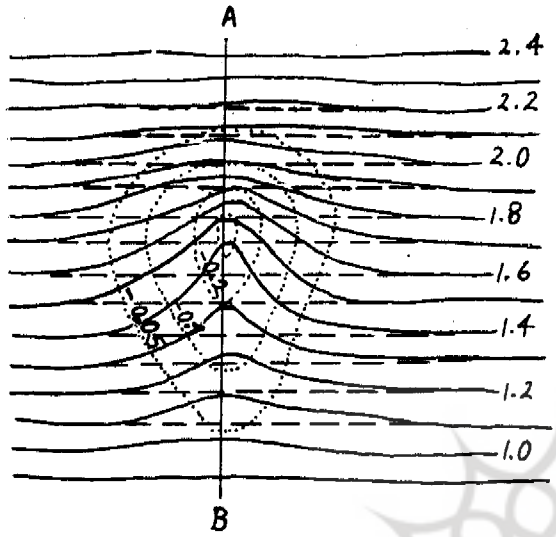
شده محاسبه می‌کنند. تصحیحات هوای آزاد و بوگر همواره دارای علامت مخالف هستند و تقریباً ۰/۲ میلی گال برای هر متر ارتفاع در نظرگرفته می‌شوند.

مقادیر گرانی با عرض جغرافیائی نیز تغییر می‌کند. زیرا که اولاً شعاع استوائی زمین بیش از شعاع قطبی آن است و ثانیاً نیروی گریز از مرکز ناشی از چرخش زمین به دور خود، با عرض جغرافیائی تغییر می‌نماید. برای این تصحیحات نیز روابطی وجود که با توجه به موقعیت نقطه انجام می‌گیرد. شتاب گرانی در استوا تقریباً ۵۰۰۰ میلی گال کمتر از شتاب گرانی در قطبین است. تغییرات گرانی در عرض جغرافیائی ۴۵ درجه برای هر ۱۲۲ متر جابجائی در امتداد شمالی ــ جنوبی تقریباً معادل ۰/۱ میلی گال است.

تصحیح دیگری که باید روی اندازه‌گریها انجام داد مربوط به پستی و بلندیهای زمین در مجاورت گرانی سنج است. ارتفاعات موجب کششی به سمت بالا و دره‌ها موجب کاهش کشش به سمت پائین می‌شوند. برای این تصحیح به طور فرضی ارتفاعات اطراف ایستگاه را که چگالی معینی برای آنها در نظر می‌گیرند از بین برده و قسمتهای گود را با موادی با همین چگالی پر می‌کنند. روش کار به طور ساده به این ترتیب است که جاذبه تمام جرمهایی را که در بالای ایستگاه قرار گرفته و باعث کاهش مقدار g می‌شود و همچنین تمام جرمهایی را که باید به فضای خالی زیر ایستگاه افزوده شود محاسبه می‌کنند. تصحیحات هر دو ناحیه برجسته و فرو رفته به گرانی اندازه‌گیری شده اضافه می‌شود. در عمل برای اینگونه تصحیحات از نمودارها و جداولی که به همین منظور تهیه شده استفاده می‌شود.

اندازه‌گیریهایی که در آنها تمام اثرات فوق تصحیح شده باشد «مقادیر آنومالی بوگر»[17] خوانده می‌شود. بنابراین چنین ارقامی اثرات توده‌های درون زمین را نشان می‌دهد، یعنی اثراتی که برای آنها تصحیح انجام نشده است. بیشتر نقشه‌های گرانی سنجی نمایش منحنی میزانهای مقادیر آنومالی بوگر هستند. گاهی اوقات نیز تصحیح مربوط به جرمی که بین ارتفاع دستگاه و ارتفاع مبناء واقع شده انجام نمی‌گیرد. در این حال نتایج حاصل را «مقادیر آنومالی هوای آزاد»[18] می‌نامند.

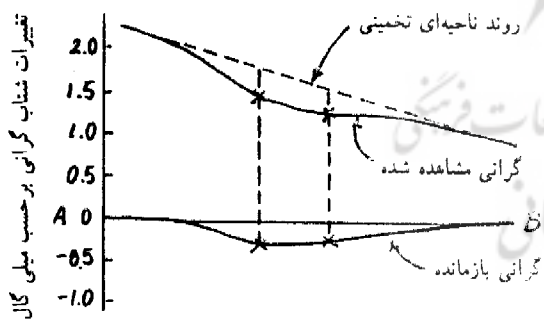
تعبیر و تفسیر داده‌ها: مهمترین بخش تعبیر و تفسیر نتایج گرانی سنجی عبارتست از تعیین موقعیت آنومالیهائی است که بتوان آنها را به ذخایری که به دنبال آنیم نسبت داده و آنها را از اثرات دیگر مجزا کنیم. در کارهای اکتشافی تغییرات چگالی مربوط به اعماق نسبتاً زیاد مورد نظر نیست. اینگونه تغییرات خیلی بزرگتر از ساختمانهایی است که معمولاً در اکتشاف مورد توجه است. از اینرو سعی می‌شود که اثر اینگونه تغییرات که آنومالی ناحیه‌ای نامیده می‌شود حذف گردد تا آنومالیهای «باز مانده»[19] خود را نشان دهند. روشهای مختلفی برای اینکار وجود دارد یکی از روشهای ترسیمی به این ترتیب است که از ناهمگنی‌های محلی صرف نظر کرده و شکل منحنی‌ها را به طور منظم تصحیح می‌نمائیم. آنومالی باز مانده در هر نقطه اختلاف بین مقادیر منحنی‌های قبلی و فعلی است (شکل ۵ ــ الف). بجای منحنی میزان می‌توان از برشهای عرضی گرانی استفاده کرد (شکل ۵ ــ ب). علاوه بر روشهای ترسیمی روشهای ریاضی نیز برای اینکار وجود دارد.



منحنی‌های مشاهده شده (برحسب میلی گال)

منحنی‌های ناحیه‌ای تخمینی

منحنی‌های گرانی بازمانده



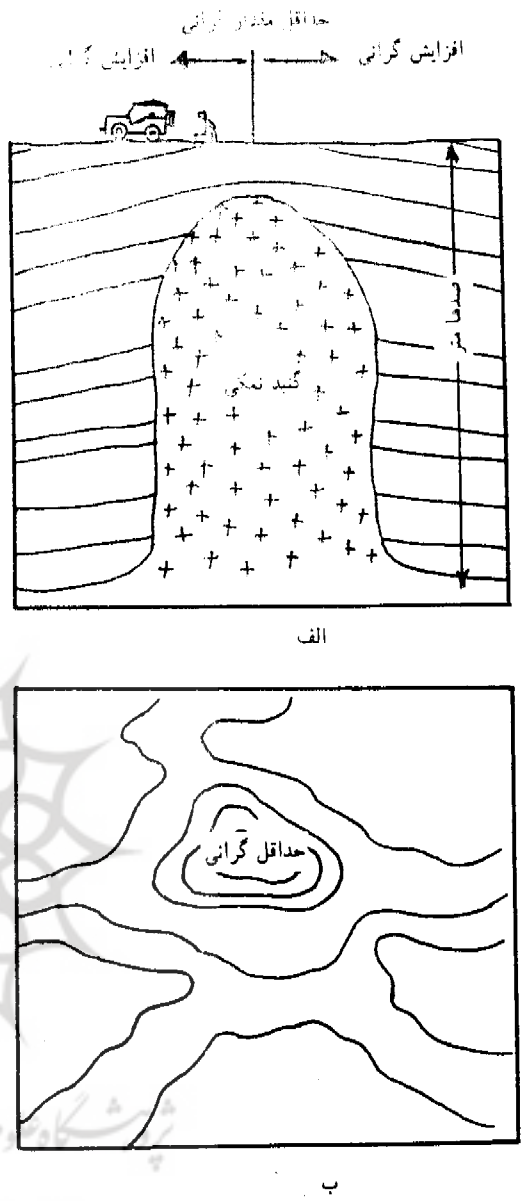
شکل ۵ ــ تشکیل آنومالی بوگر و ناحیه‌ای از یکدیگر

الف ــ روش منظم کردن منحنی‌ها

ب ــ روش استفاده از برش عرضی گرانی

نقشه‌های آنومالی بازمانده معمولاً به این ترتیب تفسیر کیفی می‌شوند که آنومالیهای مثبت یا قسمتهایی که افزایش گرانی را نشان می‌دهند به صورت بالا آمدگیهائی نظیر تاقدیسها، توده‌های نفوذی، هورست[20]، برآمدگی پی سنگ و غیره تفسیر می‌شوند و قسمتهائی که آنومالی منفی دارند به صورت ناودیس، گرابن[21] و فرو رفتگی پی‌سنگ تفسیر می‌شوند. شدتهای منحنی نیز معمولاً بیانگر کاهش نسبی گرانی

می‌شوند. (شکل ۶)



الف

ب

شکل ۶ ــ الف ــ گرانی سنجی به روی یک گنبد نمکی ب ــ نقشه منحنی میزانهای فرضی حاصله. منحنی‌ها نمایشگر خطوطی هستند که مقادیر گرانی آنها یکسان است. از منحنی بسته داخلی به طرف خارج گرانی افزایش پیدا می‌کند.

روش تفسیر نتایج اندازه‌گیری گرانی بستگی به هدف اندازه‌گیری، دقت، میزان اطلاعات زمین شناسی موجود از سایر منابع و غیره دارد. در بسیاری از حالات که فقط منظور شناسائی مقدماتی و تعیین محل اکتشافات بعدی است تفسیر کمی جزئیات لازم نیست. ولی در مواردی نیز نتایج حاصله را مورد تفسیر کمی قرار می‌دهند. اینگونه تفسیرها بخصوص در جائی که اطلاعات زمین شناسی دیگری وجود داشته باشد بسیار سودمند است. در روش کمی به طور ساده منحنی‌های اندازه‌گیری گرانی را با منحنی‌های اجسامی با اشکال هندسی ساده و مشخص که به طور تئوری محاسبه شده، مقایسه می‌کنند و مشخصاتی مثل عمق، شکل تقریبی آنومالیها را به دست می‌آورند. البته نتایج به دست آمده همواره با ابهاماتی همراه است.

اکتشاف به روش لرزه‌نگاری

لرزه نگاری مهمترین بخش فعالیتهای ژئوفیزیکی را تشکیل می‌دهد. امواج لرزه‌ای به وسیله منابع مختلف انرژی تولید شده و توسط گیرنده‌های حساسی به نام «ژئوفون[22]» یا «هیدروفون[23]» که به طور مناسبی در سطح زمین قرار داده شده‌اند دریافت می‌شود. آنچه که معمولاً اندازه‌گیری می‌شود زمان رسیدن امواج لرزه‌ای به این گیرنده‌هاست. گرچه دامنهٔ امواج لرزه‌ای، تغییرات فرکانس یا شکل موج نیز تدریجاً مورد توجه قرار می‌گیرد. با توجه به زمان رسیدن امواج لرزه‌ای از منبع تولید انرژی به دستگاههای گیرنده می‌توان اطلاعاتی در مورد عمق و شیب لایه‌ها در زیر زمین به دست آورد. اکتشافات لرزه‌ای به دو روش اصلی تقسیم می‌شوند که عبارتند از انکساری و انعکاسی. این تقسیم بندی بستگی به آن دارد که بخش غالب مسیر حرکت امواج به ترتیب افقی یا قائم باشد.

اصول کلی امواج لرزه‌ای: تغییر در تنش[24] مکانیکی سنگها موج تغییر شکلی ایجاد می‌کند که به صورت موج لرزه‌ای به حرکت در می‌آید. موج از محل ایجاد لرزه به صورت کروی به سمت خارج آن منتشر می‌شود. این موج با سرعتی که بستگی به خواص الاستیکی سنگ دارد از آن عبور می‌کند. امواج لرزه‌ای مشابه امواج ناشی از زمین لرزه ولی بسیار ضعیفتر است. در اکتشافات لرزه‌ای غالباً امواج طولی یا تراکمی[25] که در آنها ذرات در جهت انتشار موج ارتعاش می‌کنند و مشابه امواج صوتی در هوا هستند مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرند. گاهی نیز امواج عرضی یا برشی[26] که در آنها امتداد ارتعاش ذرات عمود بر جهت انتشار موج است نیز مطالعه می‌شوند. امواج سطحی بخصوص امواج ریلی[27] نیز ایجاد می‌شوند، ولی این نوع امواج در اکتشافات لرزه‌ای بیشتر باعث مزاحمت هستند، زیرا آنقدر در داخل زمین نفوذ نمی‌کنند که بتوانند اطلاعات مفیدی بهمراه آورند. تکنیکهائی برای تمیز آنها وجود دارد.

دامنهٔ امواج لرزه‌ای که در سطح حدفاصل دو محیط منعکس می‌شود بستگی به خواص الاستیک آنها دارد که غالباً برحسب سرعت امواج لرزه‌ای و چگالی در هر طرف این سطح بیان می‌شود. وقتی که جهت انتشار موج عمود بر این سطح باشد، نسبت دامنه امواج لرزه‌ای انعکاسی و تابشی توسط ضریب انعکاس Rنشان داده می‌شود:

$$R = \frac{\Delta(\rho v)}{2(\rho v)} \quad (1)$$

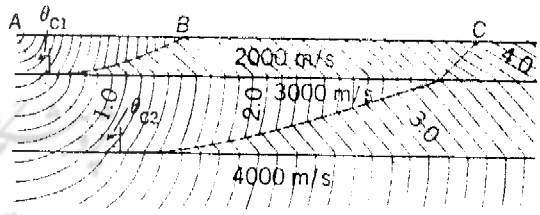
که در آن $\Delta(\rho V)$ تغییر در حاصلضرب سرعت در چگالی و $\overline{(\rho V)}$ متوسط حاصلضرب سرعت در چگالی در طرفین سطح حدفاصل دو محیط است. نسبت انرژی امواج انعکاسی به تابشی برابر R^2 است.

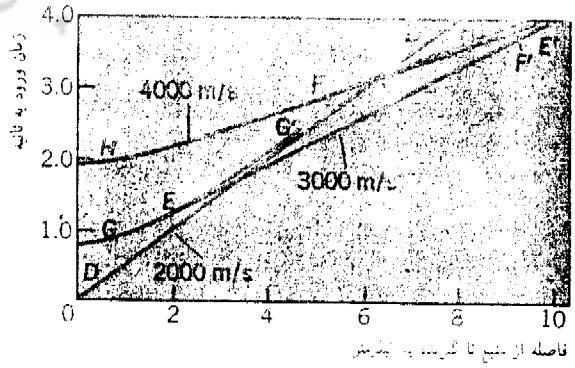
امواج لرزه‌ای با عبور از سطح حدفاصل دو محیط شکسته می‌شوند و «قانون اسنل[28]» که در معادله (۲) نشان داده شده در مورد آنها صادق است:

$$\frac{\sin\sigma_1}{V_1} = \frac{\sin\sigma_2}{V_2} \qquad (۲)$$

که در آن σ_i زاویه بین جبههٔ موج و سطح جدایی محیط iام است که در آن سرعت برابر V_i است. از آنجا که سرعت به طور معمول با افزایش عمق زیاد می‌شود سیر اشعه امواج لرزه‌ای دارای انحناء بوده و تقعر آن به سمت بالاست.

قدرت تفکیک[29] امواج لرزه‌ای بستگی معکوس با طول موج λ دارد. طول موج را معمولاً بر حسب سرعت موج V و فرکانس آن f بیان می‌کنند: $\lambda = \frac{V}{f}$. در اکتشافات لرزه‌ای غالباً با فرکانسهایی از ۲۰ تا ۵۰ هرتز سرو کار داریم و در اکثر سنگها نیز سرعت امواج حدود ۱۵۰۰ تا ۶۰۰۰ متر در ثانیه است، لذا طول موجها بین ۳۰ تا ۳۰۰ متر تغییر می‌کند. معمولاً با افزایش عمق زمین، فرکانس کمتر شده و سرعت بیشتر می‌شود، بنابراین طول موج افزایش پیدا می‌کند و قدرت تفکیک کاهش می‌یابد. کارهای اکتشافی خیلی کم عمق با قدرت تفکیک بالا مستلزم فرکانسهایی بیشتر از مقادیر ذکر شده و عملیات انکساری فواصل دور (و زمین لرزه‌ها) مستلزم فرکانسهای کمتر است.



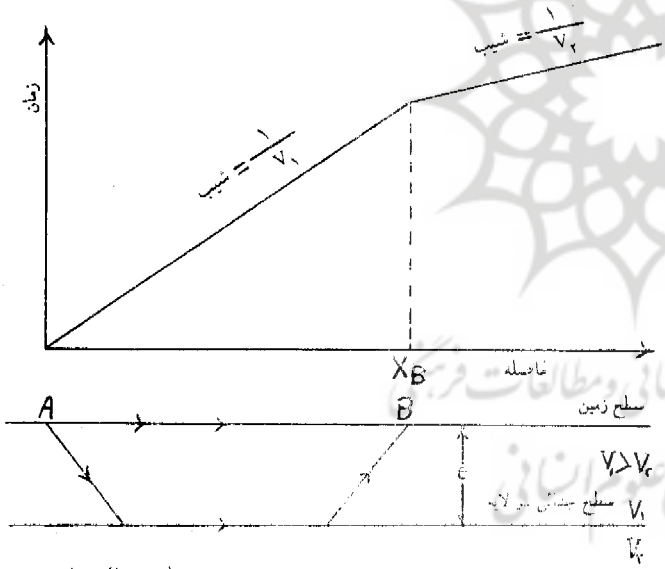


شکل ۷ ـ انتشار سطحی امواج لرزه‌ای در سیستم دو لایه‌ای مستلزم انرژی لرزه‌ای را در نقاط دور از منبع تأمین می‌کند. آنسوی نقطه B ابتدا انرژی انتقالی از طریق لایهٔ پرسرعت دوم و سپس انرژی انتقالی از سومین لایه می‌رسد.

ب ـ منحنیهای زمان ـ فاصله: DD' موج مستقیم، EE' موج انکساری در دومین لایه، FF' موج انکساری در سومین لایه، GG' انعکاس از سطح حدفاصل اولین و دومین لایه، HH' انعکاس از سطح حدفاصل دومین و سومین لایه.

روش انکساری: اکتشاف به روش انکساری مستلزم وجود سنگهایی است که سرعت امواج لرزه‌ای در آنها زیاد باشد. جبههٔ امواج در حدفاصل لایه‌ای که سرعت موج در آن زیاد و پوشیده از لایه‌ای با سرعت کمتر است شکسته می‌شود (شکل ۷)، و لذا انرژی قابل توجه‌ای از طریق لایهٔ پرسرعت جابجا شده و قبل از انرژی انتقالی توسط لایهٔ کم سرعت فوقانی به گیرنده‌هایی که به فاصله کافی از منبع تولید انرژی قرار گرفته‌اند می‌رسد. اختلاف در زمان رسیدن موج به گیرنده‌هائی که به فواصل مختلف از منبع قرار دارند اطلاعاتی در مورد سرعت، عمق و شیب لایه‌ها به دست می‌دهد.

برای آنکه ببینیم روش کار عملاً به چه صورتی است، حالت ساده‌ای را در نظر می‌گیریم که دولایه با خواص الاستیکی متفاوت به وسیله سطحی افقی در عمق e از هم جدا شده‌اند، به طوری که سرعت امواج لرزه‌ای در لایه زیرین (V_2) بیش از لایه فوقانی (V_1) است (شکل ۸).



شکل ۸ ـ استفاده از منحنی فاصله ـ زمان برای تعیین عمق سطح جدایی دولایه افقی به روش انکسار لرزه‌ای.

امواج لرزه‌ای ناشی از انفجار در نقطه A به صورت کروی منتشر می‌شوند. موج با رسیدن به سطح حدفاصل دولایه در امتداد این سطح حرکت می‌کند. همچنانکه موج در امتداد این سطح در حرکت است یک سری امواج دیگری در لایه فوقانی منتشر می‌کنند. در هر نقطه از زمین اولین موجی که وارد می‌شود یا مستقیماً از محل انفجار یا [illegible] است. با استفاده از [illegible] اولین زمان ورود در فواصل مختلف [illegible] فاصله را می‌توان رسم کرد (شکل [illegible] زودتر از امواج مستقیم به

گیرنده‌ها می‌رسند. [illegible] V_1 و V_2 را به دست می‌دهد. [illegible] می‌توان با توجه به سرعتهای [illegible] معادلهٔ آن چنین است:

$$e = \frac{AB}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} \qquad (۳)$$

مسائل چند لایه‌ای را نیز بدین ترتیب [illegible] حل کرد.

لایه‌های شیب‌دار، گسلها و بسیاری از [illegible] شناسی احتیاج به تجزیه و تحلیلهای ویژه دارند. برای [illegible] از تئوری استفاده می‌شود. وقتی لایه‌ها هموژن نباشند و تغییرات از یک لایه به لایه دیگر تدریجی باشد و در نتیجه سطح حد فاصل مشخصی وجود نداشته باشد دیگر نمودار زمان ــ فاصله به صورت سادهٔ فوق نیست.

شکل دیگر استفاده از اکتشافات لرزه‌ای عبارت از تجسس برای توده‌های با سرعت زیاد در یک مقطع کم سرعت است و این عمل با جستجوی مناطقی که امواج لرزه‌ای زودتر از آنچه که انتظار می‌رود، به گیرنده‌ها می‌رسند انجام می‌گیرد. این گونه مطالعات بخصوص برای تعیین محل گنبدهای نمکی در گذشته بسیار مفید بوده است.

تکنیکهای انکسار لرزه‌ای در ژئوفیزیک مهندسی، معدن، مطالعه آبهای زیرزمینی برای به نقشه درآوردن سنگ کف در زیر رسوبات ناپیوستهٔ فوقانی به کار می‌رود. در این مطالعات منظور به دست آوردن اطلاعاتی در مورد پی ساختمانها یا تعیین موقعیت بستر رودخانه‌های مدفون که ممکن است در آنها کانیهای سنگین متمرکز شده باشد یا محل تجمع آبهای زیرزمینی است. تکنیکهای انکساری در اکتشاف نفت و مطالعه پوستهٔ زمین نیز به کار می‌رود.

روش انعکاسی: بخشی از انرژی امواج لرزه‌ای در حد فاصل دو محیط که سرعت موج یا چگالی تغییر می‌کند منعکس می‌شود. بنابراین با اندازه گیری زمانهای وردو امواج انعکاسی (شکل ۹) می‌توان سطوحی را که مرز بین انواع مختلف سنگها را تشکیل می‌دهند به نقشه در آورد. این روش را که روش اصلی اکتشاف ژئوفیزیکی است می‌توان شبیه عملیات ژرفاسنجی صوتی[۳۰] در اقیانوسها دانست. در شکل ۹ ــ الف توسط منبع s انرژی لرزه‌ای تولید می‌شود که توسط گیرنده‌هایی که به فواصل معینی بین A و B قرار گرفته‌اند دریافت می‌شود. مقدار فاصله تا سطح منعکس کننده RR' را می‌توان با توجه به زمان ورود موج انعکاسی و در صورتی که سرعت معلوم باشد، تعیین کرد.

اگر سطح منعکس کننده شیب‌دار باشد، موج انعکاسی به B زودتر از A می‌رسد. بنابراین با توجه به اختلاف زمانهای ورود مقدار شیب‌را نیزمی‌توان‌اندازه‌گیری کرد. زاویهٔ بین مسیر شعاعها و عمود بر

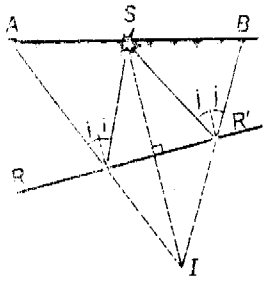
[illegible] تجهیز [illegible] می‌توان شکل را [illegible]

[illegible] سطح منعکس کننده [illegible] ــ ب) و سرعت ثابت [illegible] زمان ورود به گیرنده‌ای در محل مشخص [illegible] با توجه به مثلث CSI، معادلات (۴) و (۵) به دست می‌آید [illegible] مشابهی را

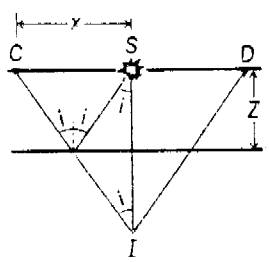
$$(Vt_2)^2 = (Vt_1)^2 + x^2 \qquad (۴)$$

$$V = x\,(t_2^2 - t_1^2)^{-\frac{1}{2}} \qquad (۵)$$

می‌توان برای به دست آوردن سرعت در مورد سطوح انعکاس غیر افقی یا سرعت غیر ثابت، نیز مورد استفاده قرار داد.



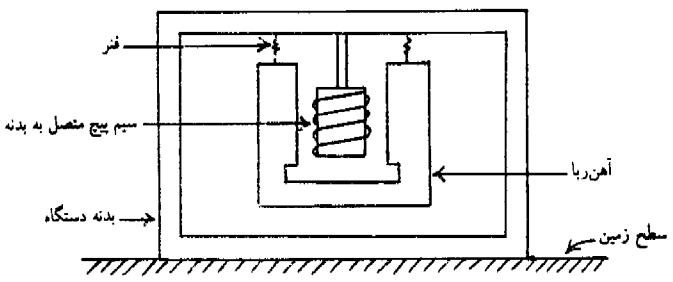
الف



ب

شکل ۹ ــ اندازه‌گیری انرژی امواج لرزه‌ای انعکاسی
الف ــ سطح انعکاس شیب‌دار ــ ب سطح انعکاس افقی

دستگاهها: گیرنده‌های انرژی لرزه‌ای در خشکی (ژئوفونها) انواع مختلفی دارند ولی نوع الکترومغناطیسی آن از همه ساده‌تر است. این نوع ژئوفونها از یک آهن‌ربا و یک سیم پیچ تشکیل شده است، به طوری که سیم‌پیچ به بدنه دستگاه ثابت بوده و آهن‌ربا توسط فنری به سقف آن آویخته است. سیم‌پیچ متصل به بدنه با زمین حرکت



شکل ۱۰ ــ اصول کار ژئوفون نوع الکترومغناطیسی. لرزش زمین موجب حرکت نسبی بین آهن‌ربا و سیم پیچ می‌شود و در نتیجه ولتاژی در سیم‌پیچ تولید می‌شود که متناسب با سرعت حرکت زمین است

می‌کند در حالیکه آهن‌ربا به علت خاصیت ماند (اینرسی) مایل است مانند جزء ساکنی عمل کند. هر حرکت نسبی بین آهن‌ربا و سیم‌پیچ ولتاژی تولید می‌کند که متناسب با سرعت حرکت است. (شکل ۱۰) معمولاً این دستگاهها را طوری می‌سازند که فقط نسبت به حرکات قائم حساسیت داشته باشد. گاهی اوقات گیرنده‌های خاصی به کار می‌رود که می‌توان جهتی را که موج از آنجا آمده و نوع موج (طولی، عرضی، ریلی و غیره) را تشخیص داد.

گیرنده‌هایی که در آب مورد استفاده قرار می‌گیرند معمولاً پیزوالکتریک[31] هستند و در اثر عبور یک موج لرزه‌ای فشار تغییر نموده و موجب تغییر شکل عنصر پیزو الکتریک شده و ولتاژی در بین صفحات آن القاء می‌کند.

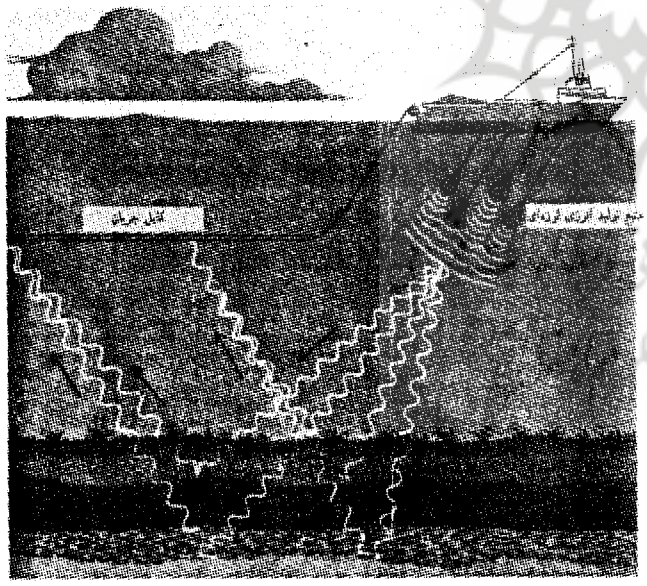
جریان ضعیفی که در نتیجه حرکت زمین در ژئوفون بوجود می‌آید مستقیماً قابل اندازه‌گیری نیست، لذا به کمک دستگاههایی تقویت می‌شود. به علاوه برای حذف امواج پارازیت صافی‌های[32] مخصوصی به کار می‌رود. علائمی که توسط گیرنده‌ها ایجاد می‌شود پس از عبور از صافیها و تقویت وارد دستگاههای ثبات می‌شوند. اکثر سیستمهای ثبات چند کاناله هستند. در اکتشافات نفت غالباً سیستمهای ۲۴ تا ۴۸ کاناله به کار می‌رود. علائم را معمولاً رقمی کرده و در روی نوارهای مغناطیسی ثبت می‌کنند و لذا بعداً می‌توانند مورد تجزیه و تحلیل کامپیوتری قرار دهند. علائم را به صورت تابعی از زمان ورود به صورت نمودارهایی در روی نوار کاغذی نیز نمایش می‌دهند که به وسیله این نمودارها تفسیر نتایج صورت می‌گیرد.

برای تولید انرژی لرزه‌ای روشهای زیادی وجود دارد. منبع قدیمی تولید انرژی عبارت از انفجار در چاههایی است که به همین منظور حفر می‌شود. مواد منفجره جامد هنوز به طور وسیعی در کارهای صحرایی و در باطلاقها مورد استفاده است. انفجار مخلوطی از گاز در محفظهٔ بسته، رها کردن وزنه‌های سنگین، ضربه‌زدن با چکش بر روی صفحه‌ای فولادی، وسایل مکانیکی تولید نوسان (وبراتور) و بسیاری منابع دیگر برای تولید انرژی لرزه‌ای وجود دارد.

روش کار: در اکتشافات ژئوفیزیکی برای نفت غالباً اندازه‌گیریهای صحرائی در امتداد خطوط موازی هم، در جهت عمود بر امتدادهای زمین‌شناسی، که گاهگاهی عمود یا خطوط را با خط عمود است انجام می‌گیرد و غالباً شبکه منظمی را دنبال می‌کند. گاهی برای کسب اطلاعات تأییدی خطوط طولی که کیلومترها از هم فاصله دارند دنبال می‌شوند. در مناطقی که در مطالعات قبلی ژئوفیزیکی آنومالیهائی مشخص شده خطوط اندازه‌گیری غالباً بسیار نزدیکتر است. هدف از بررسی لرزه‌ای بیشتر به دست آوردن سطوح حد فاصل لایه‌هاست تا بتوان نقشه ساختمانی زیرزمینی را تهیه کرد.

معمولاً ۲۴ تا ۴۸ گروه ژئوفون در امتداد یک خط قرار داده می‌شود. هر گروه شامل ۶ تا ۲۴ ژئوفون است که تمام آنها برای یک ثبت به کار می‌رود. فاصلهٔ گروههای ژئوفون از هم ۵۰ تا ۱۰۰ متر است. منبع انرژی ممکن است در مرکز گروههای فعال، انتهای یک طرف و گاهی در محلی دیگر قرار داده شود. پس از انجام یک ثبت عملیات را در طول خط ادامه می‌دهند به طوری که در هر بار مجموعه منبع و ژئوفونها به اندازهٔ نصف طول خود جابجا می‌شود و این عمل عیناً در تمام طول پروفیل تکرار می‌شود. گاهی نیز عملیات در مضرب کوچکتری از طول تکرار می‌شود. نتیجه این عمل پوششهای متعدد است.

وقتی منابع سطحی تولید انرژی لرزه‌ای مثل ویبراتورها، انفجار گاز یا وزنه اندازی به کار می‌رود، از کامیونهای مخصوصی برای اینکار استفاده می‌شود. کامیونها در نقاط معین متوقف شده و انرژی لازم برای یک ثبت را به درون زمین می‌فرستند. آنگاه کامیونها به جلو رفته وکار را تکرار می‌کنند. غالباً چند کامیون که به فاصله چند متری هم مستقر هستند به طور همزمان مورد استفاده قرار می‌گیرند و به وسیله رادیو از واحد ثبت همزمان می‌شوند. یک اکیپ لرزه نگاری معمولاً می‌تواند ۱ تا ۱۰ کیلومتر در روز عملیات لرزه‌ای انجام دهد.



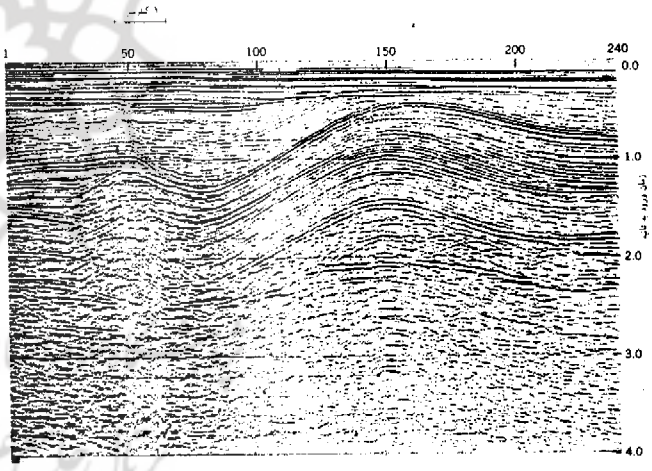
شکل ۱۱ ـ عملیات لرزه‌ای در دریا به وسیله کابل طویلی که همراه با هیدروفونها به دنبال کشتی کشیده می‌شوند انجام می‌گیرد. انرژی لرزه‌ای نیز توسط منابعی که به دنبال کشتی کشیده می‌شوند تولید می‌گردد.

اکتشافات لرزه‌ای در دریا این‌طور انجام می‌گیرد. عملیات کوچک دریائی معمولاً توسط کشتی تولید انرژی و کشیدن کابل جریان کوتاه با تعدادی هیدروفون متصل به دستگاه ثبات چند کاناله‌ای را تشکیل می‌کنند. در عملیات [illegible] کشتی‌هایی به طول ۶۰ متر یا

بیشتر استفاده می‌شود که [illegible] می‌کشد و این کابل شامل [illegible] خط جریان در عمق حدود [illegible] کشتی کشیده می‌شود. منبع تولید انرژی نیز به دنبال کشتی کشیده می‌شود. همچنانکه کشتی با سرعت تقریباً ۶ گره دریایی [illegible] حرکت است ثبت نتایج انجام می‌پذیرد.

عملیات دریایی مستلزم داشتن اطلاعات دقیق در مورد موقعیت کشتی است. برای تعیین موقعیت کشتی از ماهواره‌ها استفاده می‌شود. این ماهواره‌ها که در هر دو ساعت یک بار از بالای کشتی عبور می‌کنند نقاط ثابتی را به دست می‌دهند که دقت آنها در حدود ۵۰ متر است. موقعیت بین نقاط ثابت فوق به وسیله تکنیکهای مختلف به دست می‌آید.

تصحیح و تعبیر و تفسیر داده‌ها: داده‌های لرزه‌ای از نظر اختلاف ارتفاع بین نقاط مختلف اندازه‌گیری و نقطه شلیک و همچنین از نظر تغییرات نزدیک سطح زمین یعنی حذف اثر لایه سطحی با سرعت کم که بنام «منطقه هوازده» نامیده می‌شود، باید تصحیح شود.



بعد از تصحیحات لازم زمانهای ورود انرژی در روی نمودارهایی برای تعبیرو تفسیرهای بعدی پیاده می‌شود. امروزه از کامپیوتر برای «پردازش داده[33]» های لرزه‌ای استفاده می‌شود. زمانهای سیر انعکاسات لرزه‌ای را معمولاً از روی نمودارهایی به نام «مقاطع لرزه نگاشت[34]» که از پردازش داده‌ها نتیجه شده‌اند اندازه‌گیری می‌کنند (نمونه‌ای از این مقاطع در شکل ۱۲ نشان داده شده است). از این نمودارها می‌توان زمانهای لازم برای حرکت امواج لرزه‌ای از محل انفجار به طرف لایه‌های منعکس کننده و برگشت آنها به طرف یک گیرنده واقع در سطح زمین را خواند. گاهی نیز با توجه به

عمق مخصوص [illegible] می‌کنند تا شکل ساختمان لایه‌ای [illegible] عمق آنها معلوم باشد.

در اکتشافات نفت هدف معمولاً پیدا کردن تله‌های نفتی[35] است، یعنی جائی که سازندهای نفوذپذیر نسبت به اطراف زیاد بوده و سازندهای فوقانی نفوذناپذیر باشند. اگر نفت یا گاز، که سبکتر از آب هستند، وجود داشته باشد بر روی آب شناور می‌شوند و در منافذ سنگها جمع می‌شوند. در اکتشافات لرزه‌ای موقعیت هندسی لایه‌ها و بنابراین جائی که تله‌ها ممکن است باشند تعیین می‌شود. ولی معمولاً با استفاده از داده‌های لرزه‌ای نمی‌توان به چنین سوالاتی پاسخ گفت: آیا نفت یا گاز در این محل هرگز ایجاد شده است؟ آیا سنگها دارای نفوذپذیری هستند؟ آیا سنگهای فوقانی نفوذناپذیر؟ و آیا نفت یا گاز، حتی اگر زمانی وجود داشته، فرار کرده یا تخریب شده است؟

غالباً بعد از کسب تجربیاتی در یک منطقه می‌توان با توجه به داده‌های لرزه‌ای، سطوح انعکاسی یا ساختهای معینی را تشخیص داد. در اینجا اندازه‌گیریهای سرعت لرزه‌ای مفید است.

در رسوبات نسبتاً ناپیوسته، یا در بعضی موارد دیگر، وجود گاز یا نفتهای حاوی گاز قابل توجه ممکن است به قدر کافی باعث کم شدن سرعت لرزه‌ای یا چگالی سنگ شود که در نتیجه انعکاس مشخصی ایجاد کند، که معمولاً با دامنهٔ قوی یا مشخصات دیگر معلوم می‌شود. این روش را معمولاً کشف مستقیم می‌گویند. گرچه اینگونه آنومالیها الزاماً با ذخایر اقتصادی مهم مطابقت ندارد. لایه‌های ذغال سنگ و تورب نیز توسط انعکاسات با دامنه قوی مشخص می‌شوند.

روشهای الکتریکی

تغییر خواص الکتریکی سنگها اساس روشهای متنوع اکتشافات الکتریکی و الکترومغناطیسی را تشکیل می‌دهد. کاربرد این روشها بیشتر در کاووش کانیهای فلزی و مطالعهٔ آبهای زیرزمینی است. جریانهای الکتریکی طبیعی و القایی هر دو در این روشها اندازه‌گیری می‌شود. این روشها متنوعتر از سایر روشهای ژئوفیزیکی هستند. بعضی از این روشها مثل روشهای پتانسیل خودزا[36]، جریانهای تلوریک[37] و ماگنتوتلوریک[38] بر مبنای اندازه‌گیری میدانهایی که به طور طبیعی وجود دارند قرار دارد و مشابه روشهای گرانی‌سنجی و مغناطیسی می‌باشند. در بعضی از روشهای دیگر جریانهایی به طور مصنوعی به داخل زمین هدایت می‌شود و اثرات آنها اندازه‌گیری می‌گردد و لذا مشابه روشهای لرزه‌ای است.

بعضی از کانسارها خودبخود باعث ایجاد جریانهایی در زمین می‌شوند. غالباً میدان پتانسیل خودزای آنها را می‌توان به نقشه درآورد

و به این ترتیب منبع پتانسیل خودزا را پیدا کرد. اساس «روش پتانسیل خودزا» اندازه‌گیری اختلاف پتانسیلی است که به طور طبیعی بین دو نقطه از سطح زمین وجود دارد. وقتی در سطح زمین اختلاف پتانسیل بین نقاط را به طور مرتب در امتداد یک نیمرخ اندازه‌گیری کنیم و منحنی تغییرات آنرا رسم کنیم، بالای توده معدنی که این ویژگی را داراست آنومالی نشان خواهد داد.

جریانهای طبیعی در زمین که «جریانهای تلوریک» خوانده می‌شود مناطق بزرگی را تحت تأثیر قرار می‌دهند. تصور می‌شود که جریانهای تلوریک با جریانهای یونسفری مرتبط باشد. «چگالی جریان[39]» این جریانهای تلوریک با هدایت الکتریکی سنگها تغییر می‌کند. ارقام خوانده شده در محلهای مختلف با هم مقایسه شده و همزمان با آن ارقام در یک محل مبناء نیز قرائت می‌شود.

بنابر معادلهٔ ماکسول تغییرات جریانهای الکتریکی باعث ایجاد میدانهای مغناطیسی وابسته به آن می‌شود، و عکس این موضوع نیز صحیح است. جریانهای طبیعی تا حدودی پریدویک هستند. در روش «ماگنتوتلوریک» تغییرات میدانهای الکتریکی و مغناطیسی طبیعی زمین به طور همزمان اندازه‌گیری می‌شود که با توجه به آن می‌توان تغییرات هدایت الکتریکی را نسبت به عمق تعیین کرد.

کانه‌های معینی وجود دارند که در نتیجه عبور جریان در خود انرژی ذخیره می‌کنند و پس از قطع جریان «جریان گذرا»[40] یی در آنها ایجاد می‌شود. این پدیده «پلاریزاسیون القایی»[41] نامیده می‌شود. علت این پدیده کاملاً روشن نیست. مشاهدهٔ سرعت از بین رفتن این جریانهای گذرا نیز در روشهای ژئوفیزیکی مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

یکی دیگر از روشهای متنوع الکتریکی روش اندازه‌گیری مقاومت مخصوص زمین است. از این روش در شرایط مساعد می‌توان برای یافتن عمق لایه‌هایی که از نظر هدایت الکتریکی دارای آنومالی هستند و همچنین برای تعیین عمق و شکل تقریبی توده‌هایی که دارای چنین خاصیتی هستند استفاده نمود. این روش بخصوص در مطالعهٔ آبهای زیرزمینی و تعیین موقعیت سفره‌های آبدار بسیار به‌کار می‌رود. در روش مقاومت مخصوص، جریان الکتریکی توسط یک جفت الکترود جریان به داخل زمین هدایت شده و توسط یک جفت الکترود پتانسیل در دو نقطه دیگر در همان امتداد اختلاف پتانسیل اندازه‌گیری می‌شود و بدین ترتیب «مقاومت مخصوص ظاهری»[42] عمقی از زمین به‌دست می‌آید. آرایشهای مختلفی برای الکترودهای فرستنده و گیرنده به‌کار می‌برند. با تغییر فاصله الکترودها می‌توان مقاومت مخصوص ظاهری اعماق مختلف زمین را به دست آورد. عمق نفوذ جریان بستگی به موقعیت الکترودها، ترکانس مورداستفاده و توزیع قابلیت هدایتها در زیرزمین دارد. دستگاههای مورد استفاده در این روش غالباً ساده بوده و اساساً شامل یک منبع تولید برق (باطری یا ژنراتور)، الکترودها و سیمهای رابط، آمپرتر و ولت‌متر است. مسأله مهم در تهیه این دستگاهها آنست که از یک طرف انرژی الکتریکی کافی در زمین تولید کنند و از طرف دیگر قابل حمل باشند. دو روش اساسی اندازه‌گیری وجود دارد: یکی آنکه با افزودن فواصل بین الکترودها، مقاومت مخصوص ظاهری اندازه‌گیری می‌شود. این اندازه‌گیریها اصولاً بستگی به تغییرات خواص الکتریکی نسبت به عمق دارد و در نتیجه تغییرات مقاومت مخصوص نسبت به عمق به دست می‌آید. در روش دوّم در حالیکه فاصله الکترودها ثابت است، رشته الکترودها از محلی به محل دیگر حرکت داده می‌شود و تغییرات اندازه‌گیری می‌گردد و به این‌ترتیب نیمرخ الکتریکی زمین تهیه می‌شود. پس از اندازه‌گیریهای صحرایی داده‌های مقاومت مخصوص مورد تعبیر و تفسیر قرار می‌گیرند. در این تعبیر و تفسیرها معمولاً از مدلهای تئوریک که برای حالات مختلف لایه‌های زمین تهیه شده استفاده می‌شود.

روشهای الکترو مغناطیسی عموماً مستلزم یک سیم‌پیچ فرستنده و یک سیم‌پیچ گیرنده است که یک یا چند مولفه میدان الکترو مغناطیسی را در تعدادی نقاط مشاهداتی اندازه‌گیری می‌کند. با تغییر دادن فرکانس امواج الکترو مغناطیسی می‌توان عمق مورد تجسس را تغییر داد. هرگونه غیریکنواختی در میدان الکترو مغناطیسی مشاهده شده در روی زمین نشان‌دهنده تغییرات در قابلیت هدایت مواد زیرین و وجود توده‌های دارای آنومالی در زیر سطح زمین است. اشکال زیادی از آنتن‌های فرستنده و گیرنده، در اندازه‌گیریهای زمینی و هوایی به کار می‌رود. در اندازه‌گیریهای هوایی فرستنده و گیرنده و تمام متعلقات آنها در یک هواپیما حمل می‌شود که معمولاً تا آنجا که امکان دارد نزدیک سطح زمین پرواز می‌کند. در اندازه‌گیریهای هوایی با استفاده از دستگاههایی ممکن است به طور همزمان داده‌های مختلف مثل داده‌های الکترو مغناطیسی، مغناطیسی، رادیواکتیویته، ارتفاع و غیره ثبت شوند. عمق نفوذ مؤثر در زمین در اکثر روشهای الکترو مغناطیسی چندان زیاد نیست، ولی برای تجسس کانسارها در اعماق حدود ۱۰۰ متر به طور وسیعی از این روشها استفاده می‌شود.

روشهای الکتریکی بخصوص در بررسی آبهای زیرزمینی، تهیه نقشه بستر کف (در محل احداث سدها) بسیار مفید است. از این روشها همچنین برای یافتن محل لوله‌های مدفون، یافتن معادن در خشکی و برای بعضی از هدفهای نظامی مثل پیدا کردن محل مین‌ها استفاده می‌شود.

اکتشافات رادیواکتیو

اکتشافات طبیعی زمین بخصوص اشعهٔ گاما، هم در عملیات

زمینی و هم در عملیات هوایی [illegible] اصلی عبارتند از او[illegible] اصل برای جستجوی اورانیم و کانسارهای دیگری مثل منیزیوم[3] است که معمولاً همراه اورانیم می‌باشند. در شمای رادیواکتیو گاهی اوقات برای جستجوی کانسارهای پنهانی به کار می‌روند. کنتور گیگر[24] و کنتور سنتیلاسیون[25] دستگاههایی هستند که عموماً برای پیدا نمودن و اندازه‌گیری تشعشع به کار می‌روند.

اکتشاف از راه دور

اندازه‌گیری تشعشات الکترو مغناطیسی طبیعی یا القایی به وسیله هواپیماهای بلندپرواز یا توسط ماهواره‌ها، به طور کلی اکتشاف از راه دور یا دورسنجی[26] گفته می‌شود. این روش مشتمل بر مشاهده تشعشع طبیعی در نوارهای طیفی مختلف شامل تشعشات مرئی و مادون قرمز از طریق عکسبرداری و اندازه‌گیریهای قابلیت انعکاس اشعه مادون قرمز و تشعشات را داری می‌باشد.

نمودارگیری از چاه

نمودارگیری از چاه[27] یا چاه‌پیمائی به طور کلی عبارت از عملیاتی است که طی آن پاره‌ای از مشخصات سازندها و لایه‌هایی که توسط یک گمانه حفر می‌شود برحسب عمق به صورت نمودارهایی رسم می‌شود. انواع مختلفی از اندازه‌گیریهای ژئوفیزیکی در گمانه‌ها انجام می‌گیرد که شامل پتانسیل خودزا، قابلیت هدایت الکتریکی، سرعت امواج لرزه‌ای، رادیواکتیویته طبیعی و القایی و تغییرات دماست. نمودارگیری از گمانه‌ها به طور وسیعی در اکتشافات نفت برای تعیین مشخصات سنگهایی که گمانه از آنها عبور کرده به کار می‌رود. از این روشها در اکتشاف کانیها و همچنین در مطالعه آبهای زیرزمینی نیز استفاده می‌شود. اندازه‌گیری در گمانه‌ها گاهی اوقات همراه با روشهای سطحی انجام می‌گیرد، مثلاً با قراردادن الکترودهایی در گمانه و الکترودهای دیگری در سطح زمین در اکتشاف به روش الکتریکی، یا با گذاشتن یک گیرنده لرزه‌ای در داخل گمانه و منبع انرژی در سطح زمین.

پایان

یادداشتها

1 – Geophysical Exploration 2 – Applied Geophysics

3 – Anomaly

۴ ــ بارازیت یا همهمه (Noise): هرگونه اغتشاش یا آشفتگی در [illegible] ولی نیستند. مثلاً [illegible] انرژی [illegible] بدون انفجار نباشد

5 – Magnetite

۶ ــ کانسارهای سطحی که در اثر تمرکز مکانیکی ذرات کانی از رسوبات تاپیوسته تشکیل می‌شوند، پلاسر (Placer) نام دارند. رسوبات معمولاً از نوع آبرفتی هستند ولی می‌توانند دریایی، دریاچه‌ای یا یخچالی باشند و کانیها نیز معمولاً فلزات سنگین مثل طلا هستند.

7 – Magnetometer

۸ ــ واحد میدان مغناطیسی در سیستم CGS اورستد (Orested) است. در تجسسات ژئوفیزیکی معمولاً واحد گاما (γ) معادل 10^{-5} اورستد مورداستفاده است. در قطبین مؤلفه عمودی میدان مغناطیسی کلی تقریباً ۰/۶۵ اورستد و در استوا ۰/۳۳ اورستد می‌باشد.

9 – Schmidt – Type Magnetic Field Balance

10 – fluxgate

11 – Gravity Exploration

12 – Gravimeter

13 – Accelerometer

۱۴ ــ واحد شتاب در سیستم CGS سانتیمتر بر مجذور ثانیه است که اصطلاحاً آنرا گال (Gall) می‌گویند. ولی چون این واحد برای کارهای اکتشافی واحد بزرگی است واحد کوچکتری بنام میلی‌گال که $\frac{1}{1000}$ گال است به کار می‌رود. هر میلی گال را تقریباً یک میلیونیم متوسط شتاب ثقل زمین می‌توان دانست.

15 – Free -air Correction

16 – Bouguer Correction

17 – Bouguer Anomaly Values

18 – Free-air Anomaly Values

19 – Residuals

20 – Horst

21 – Graben

22 – Geophone

23 – Hydrophone

۲۴ ــ تنش (Stress) عبارتست از نیرو بر واحد سطح که بر روی هر سطحی در درون یک جسم عمل می‌کند و بر حسب واحدهایی مثل دین بر سانتیمتر مربع یا کیلوگرم بر سانتیمتر مربع بیان می‌شود. در نتیجه تنش، شکل یا حجم جسم تغییر می‌نماید که نسبت تغییر به شکل اولیه را «تغییر شکل» یا «واتنش» (Strain) می‌گویند.

25 – Compressional Waves

26 – Sheer Waves

27 – Rayleigh Waves

28 – Snell's law

۲۹ ــ منظور از قدرت تفکیک (Resolving Power) در اکتشافات لرزه‌ای عبارتست از توانایی مشخص کردن دو سطح حدفاصل نزدیک هم.

۳۰ ــ با اندازه‌گیری زمان رفت و برگشت یک سیگنال صوتی از سطح آب به کف