جمهوری اسلامی ایران

معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور

راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی و لرزه‌نگاری در اکتشافات معدنی

نشریه شماره ۵۹۴

وزارت صنعت، معدن و تجارت

معاونت امور معادن و صنایع معدنی

دفتر نظارت و بهره‌برداری

http://www.mimt.gov.ir

معاونت نظارت راهبردی

امور نظام فنی

Nezamfanni.ir

۱۳۹۱

بسمه تعالی

ریاست جمهوری
معاون برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رئیس‌جمهور

بخشنامه به دستگاه‌های اجرایی، مهندسان مشاور و پیمانکاران	شماره: ۹۱/۱۰۸۵۳۸
	تاریخ: ۱۳۹۱/۱۲/۱۹

موضوع : راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی و لرزه‌نگاری در اکتشافات معدنی

به استناد ماده (۲۳) قانون برنامه و بودجه و ماده (۶) آیین‌نامه استانداردهای اجرایی طرح‌های عمرانی- مصوب سال ۱۳۵۲ و در چارچوب نظام فنی و اجرایی کشور (موضوع تصویبنامه شماره ۴۲۳۳۹/ت۳۳۴۹۷هـ مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیأت محترم وزیران)، به پیوست نشریه شماره ۵۹۴ امور نظام فنی، با عنوان «**راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی و لرزه‌نگاری در اکتشافات معدنی**» از نوع گروه سوم ابلاغ می‌شود.

رعایت مفاد این ضابطه برای دستگاه‌های اجرایی، مشاوران، پیمانکاران و سایر عوامل ذی‌نفع نظام فنی و اجرایی، در صورت نداشتن ضوابط معتبر بهتر، از تاریخ ۱۳۹۲/۵/۱ اجباری است.

بهروز مرادی

اصلاح مدارک فنی

خواننده گرامی:

امور نظام فنی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، با استفاده از نظر کارشناسان برجسته مبادرت به تهیه این نشریه نموده و آن را برای استفاده به جامعه مهندسی کشور عرضه نموده است. با وجود تلاش فراوان، این اثر مصون از ایرادهایی نظیر غلطهای مفهومی، فنی، ابهام، ایهام و اشکالات موضوعی نیست.

از این‌رو، از شما خواننده گرامی صمیمانه تقاضا دارد در صورت مشاهده هرگونه ایراد و اشکال فنی مراتب را به صورت زیر گزارش فرمایید:

۱- *شماره بند و صفحه موضوع مورد نظر را مشخص کنید.*

۲- *ایراد مورد نظر را به صورت خلاصه بیان دارید.*

۳- *در صورت امکان متن اصلاح شده را برای جایگزینی ارسال نمایید.*

٤- *نشانی خود را برای تماس احتمالی ذکر فرمایید.*

کارشناسان این امور نظرهای دریافتی را به دقت مطالعه نموده و اقدام مقتضی را معمول خواهند داشت.

پیشاپیش از همکاری و دقت نظر جنابعالی قدردانی می‌شود.

نشانی برای مکاتبه : تهران، میدان بهارستان، خیابان صفی علیشاه، معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، امور نظام فنی ، مرکز تلفن ۳۳۲۷۱

Email:info@nezamfanni.ir **web: http://nezamfanni.ir**

بسمه تعالی

پیشگفتار

نظام فنی و اجرایی کشور (مصوبه شماره۴۲۳۳۹/ ت ۳۳۴۹۷ ه مورخ ۱۳۸۵/۴/۲۰ هیات وزیران) به کارگیری معیارها، استانداردها و ضوابط فنی در مراحل تهیه و اجرای طرح و نیز توجه لازم به هزینه‌های نگهداری و بهره‌برداری در قیمت تمام شده طرح‌ها را مورد تاکید جدی قرار داده است و این امور به استناد ماده ۲۳ قانون برنامه و بودجه و نظام فنی اجرایی کشور وظیفه تهیه و تدوین ضوابط و معیارهای فنی طرحهای توسعه‌ای کشور را به عهده دارد. استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی در مشخص کردن بعضی از خصوصیات فیزیکی زمین از قبیل خواص الاستیکی و مغناطیسی سنگ‌ها و کانی‌ها، گرانش زمین و نظایر آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. مبنای ژئوفیزیک اکتشافی بر این است که وجود هر ماده معدنی در داخل زمین نوعی تفاوت در خاصیت فیزیکی آن نقطه با نقاط اطراف ایجاد می‌کند. با کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی، اطلاعاتی از ساختارهای مدفون زمین‌شناسی به دست می‌آید که می‌توان از آن‌ها به صورت مستقیم یا غیرمستقیم در اکتشاف مواد معدنی، هیدروکربورها، آب‌های زیرزمینی، بررسی‌های مهندسی، زیست‌محیطی و نظایر آن استفاده کرد. انتخاب نوع روش یا روش‌های ژئوفیزیکی به منظور موقعیت‌یابی یک ذخیره معدنی معین، وابسته به خواص فیزیکی ماده معدنی مربوطه است. بخش مهمی از مطالعات ژئوفیزیکی به مطالعه مغناطیس زمین معطوف می‌شود که شامل اندازه‌گیری پارامترهای مختلف مغناطیسی زمین مانند شدت میدان، زوایای میل و انحراف مغناطیسی است. روش مغناطیس‌سنجی برای اکتشاف فلزاتی مانند طلا و کانی‌های فلزی مانند منیتیت و ایلمنیت بیشترین کاربرد را دارد.در روش گرانی‌سنجی با توجه به جرم مخصوص مواد معدنی و اختلاف آن با سنگ‌های اطراف و اندازه‌گیری شتاب جاذبه زمین می‌توان ساختارهای زیرسطحی مانند تاقدیس‌ها، عناصر و کانی‌های سنگین و پلاسری و همچنین ناپیوستگی‌ها را تشخیص داد.در روش لرزه‌ای، مبنای عملیات اکتشافی، مطالعه رفتار امواج لرزه‌ای در لایه‌ها و سنگ‌های داخل زمین است. از روی نحوه عملکرد امواج لرزه‌ای و محاسبه زمان رفت و برگشت موج، سرعت حرکت امواج و پدیده‌هایی مانند انعکاس و یا انکسار موج، اکتشافات لرزه‌ای انجام می‌گیرد. لرزه‌نگاری، رفتار سنگ‌های داخل زمین را نسبت به عبور امواج الاستیک مورد مطالعه قرار می‌دهد.این نشریه با عنوان "راهنمای مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی و لرزه‌نگای در اکتشافات معدنی"، به شناسایی روش‌های مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی و لرزه‌نگاری در مطالعات اکتشافی مواد معدنی می‌پردازد و راهنمایی‌های لازم را برای استفاده از این روش‌ها ارایه می‌دهد.

با همه‌ی تلاش انجام شده قطعا هنوز کاستی‌هایی در متن موجود است که إن‌شاءا... کاربرد عملی و در سطح وسیع این نشریه توسط مهندسان موجبات شناسایی و برطرف نمودن آن‌ها را فراهم خواهد نمود.

در پایان، از تلاش و جدیت جناب آقای مهندس غلامحسین حمزه مصطفوی و کارشناسان امور نظام فنی همچنین جناب آقای مهندس وجیها... جعفری مجری محترم طرح تهیه ضوابط و معیارهای فنی بخش معدن کشور در وزارت صنایع و معادن، کارشناسان دفتر نظارت و بهره‌برداری معادن و متخصصان همکار در امر تهیه و نهایی نمودن این نشریه، تشکر و قدردانی می‌نماید. امید است شاهد توفیق روزافزون همه‌ی این بزرگواران در خدمت به مردم شریف ایران اسلامی باشیم.

معاون نظارت راهبردی

اسفند ۱۳۹۱

مجری طرح

آقای وجیها... جعفری	معاون امور معادن و صنایع معدنی – وزارت صنایع و معادن

تهیه پیش‌نویس اصلی

آقای جعفر کیمیاقلم	آقای مهندس امامقلی یوسفی

اعضای شورای عالی به ترتیب حروف الفبا

خانم فرزانه آقارمضانعلی	معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریاست جمهوری	کارشناس ارشد مهندسی صنایع
آقای بهروز برنا	سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور	کارشناس مهندسی معدن
آقای وجیه ا... جعفری	وزارت صنایع و معادن	کارشناس مهندسی معدن
اشرف خیاط آذری	معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور	کارشناس ارشد زمین‌شناسی
آقای عبدالعلی حقیقی	معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور	کارشناس ارشد زمین‌شناسی
آقای عبدالرسول زارعی	وزارت صنایع و معادن	کارشناس ارشد زمین‌شناسی
آقای ناصر عابدیان	سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور	کارشناس ارشد مهندسی معدن
آقای حسن مدنی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	کارشناس ارشد مهندسی معدن
آقای هرمز ناصرنیا	سازمان نظام مهندسی معدن	کارشناس ارشد مهندسی معدن

اعضای کارگروه اکتشاف به ترتیب حروف الفبا

آقای بهروز برنا	سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور	کارشناس ارشد مهندسی معدن
آقای محمد پریزادی	معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور	کارشناس ارشد مهندسی معدن
آقای نعمتا... رشیدنژادعمران	دانشگاه تربیت مدرس	دکترای پترولوژی
آقای ناصر عابدیان	سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور	کارشناس‌ارشد مهندسی معدن
آقای علیرضا غیاثوند	دانشگاه تربیت معلم	دکترای زمین‌شناسی اقتصادی
آقای عبدالمجید یعقوب‌پور	دانشگاه تربیت معلم	دکترای زمین‌شناسی اقتصادی

اعضای کارگروه تنظیم و تدوین به ترتیب حروف الفبا

آقای مهدی ایران‌نژاد	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مهندسی فرآوری مواد معدنی
آقای عبدالرسول زارعی	وزارت صنایع و معادن	کارشناس ارشد زمین‌شناسی
آقای مصطفی شریف‌زاده	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	دکترای مهندسی مکانیک سنگ
آقای حسن مدنی	دانشگاه صنعتی امیرکبیر	کارشناس ارشد مهندسی معدن
آقای بهزاد مهرابی	دانشگاه تربیت معلم	دکترای زمین‌شناسی اقتصادی

اعضای گروه هدایت و راهبری پروژه

خانم فرزانه آقارمضانعلی	رئیس گروه امور نظام فنی
آقای علیرضا فلسفی	کارشناس عمران امور نظام فنی
آقای علیرضا غیاثوند	رئیس گروه ضوابط و معیارهای معاونت امور معادن و صنایع معدنی

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول- کلیات

۱-۱- اصول و تعاریف ۳

۱-۲- روش‌های مختلف مطالعات ژئوفیزیکی ۶

۱-۳- تجهیزات مورد استفاده ۶

۱-۴- دستورالعمل اجرایی و جمع‌آوری اطلاعات ۷

فصل دوم- راهنمای مطالعات مغناطیس‌سنجی

۲-۱- آشنایی ۱۱

۲-۲- معیارهای مطالعات مغناطیس‌سنجی ۱۱

۲-۳- اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی ۱۱

۲-۴- آنومالی‌های مغناطیسی ۱۱

۲-۴-۱- پردازش داده‌ها ۱۱

۲-۴-۲- تفسیر آنومالی‌های مغناطیسی ۱۳

فصل سوم- راهنمای مطالعات گرانی‌سنجی

۳-۱- آشنایی ۱۷

۳-۲- معیارهای مطالعات گرانی‌سنجی ۱۷

۳-۳- اندازه‌گیری در گرانی‌سنجی ۱۸

۳-۳-۱- تصحیحات گرانی‌سنجی ۱۸

۳-۴- آنومالی‌های گرانی ۲۱

۳-۴-۱- تعیین چگالی سنگ‌ها ۲۱

۳-۴-۲- پردازش داده‌ها ۲۲

۳-۴-۳- تفسیرهای گرانی‌سنجی ۲۴

فصل چهارم- راهنمای مطالعات لرزه‌نگاری " شکست مرزی-بازتابی "

۴-۱- آشنایی ۲۷

۴-۲- معیارهای مطالعات لرزه‌نگاری ۲۷

۴-۲-۱- لرزه‌نگاری عمیق ۲۷
۴-۲-۲- لرزه‌نگاری ساختاری ۲۷
۴-۲-۳- لرزه‌نگاری اکتشافی نفت و گاز ۲۸
۴-۲-۴- لرزه‌نگاری اکتشافی کانسارها ۲۸
۴-۲-۵- لرزه‌نگاری مهندسی و آب‌شناسی ۲۸
۴-۳- اصول تئوری لرزه‌نگاری مرزی ۲۸
۴-۳-۱- روش اجرای لرزه‌نگاری شکست مرزی ۳۱
۴-۳-۲- اصول تفسیر داده‌های صحرایی شکست مرزی ۳۱
۴-۴- اصول تئوری لرزه‌نگاری بازتابی ۳۲
۴-۴-۱- روش اجرای لرزه‌نگاری بازتابی نقطه عمق مشترک ۳۳
۴-۴-۲- روش محاسبه نگاشت لرزه‌ای زمانی CDP ۳۴
۴-۵- پردازش داده‌ها ۳۴
۴-۵-۱- نتایج مطالعات شکست مرزی ۳۴
۴-۵-۲- نتایج مطالعات بازتابی ۳۴
فصل پنجم- ارایه گزارش و استاندارد نقشه‌ها
۵-۱- ساختار گزارش مطالعات ژئوفیزیکی ۳۹
۵-۲- استاندارد علامات و مشخصه‌های نقشه‌ها ۴۱
۵-۳- نقشه موقعیت ۴۱
۵-۴- نقشه‌های پربندی ۴۲
۵-۵- نمودارهای مدلسازی شده ۴۲
۵-۶- نقشه‌های تفسیری ۴۳
پیوست- چگالی و خودپذیری مغناطیسی برخی سنگ‌ها و کانی‌ها ۴۵

فصل ۱

کلیات

۱-۱- اصول و تعاریف

میدان مغناطیسی: به فضای اطراف یک جسم مغناطیسی که به اجسام آهنی دیگر نیرو وارد می‌کند، میدان مغناطیسی گفته می‌شود. میدان مغناطیسی با خطوطی نشان داده می‌شود که به آن‌ها شار یا فلوی مغناطیسی گفته می‌شود.

خودپذیری مغناطیسی: هرگاه جسمی در میدان مغناطیسی قرار گیرد، دارای خاصیت مغناطیسی می‌شود. شدت خاصیت مغناطیس شدن جسم با بردار $\vec{J}$ نشان داده می‌شود. بین میدان به‌وجود آورنده $\vec{F}$ و بردار $\vec{J}$ رابطه $\vec{J} = k\vec{F}$ برقرار است، ضریب k قابلیت مغناطیس شدن جسم یا خودپذیری مغناطیسی نامیده می‌شود.

قابلیت نفوذپذیری مغناطیسی: هرگاه جسمی تحت تاثیر میدان مغناطیسیF از خود خاصیت مغناطیسی نشان دهد، درون آن یک میدان ثانویه القا می‌شود. مطابق رابطه (۱-۱) میدان مغناطیسی اطراف جسم، جمع دو میدان F و میدان القا شده درون جسم است.

$$\vec{B} = \vec{F}(1 + 4k\pi) = \mu\vec{F} \qquad (۱-۱)$$

ضریب μ نفوذپذیری مغناطیسی است. کانی‌ها از نظر خاصیت مغناطیسی به سه دسته به شرح زیر تقسیم می‌شوند:

کانی‌های دیامغناطیس: کانی‌هایی که تاثیرپذیری مغناطیسی آن‌ها بسیار ناچیز است.

کانی‌های پارامغناطیس: کانی‌هایی که در میدان مغناطیسی با شدت زیاد جذب می‌شوند مانند ایلمنیت.

کانی‌های فرومغناطیس: کانی‌هایی که تاثیرپذیری مغناطیسی آن‌ها بسیار زیاد است مانند منیتیت و در یک میدان مغناطیسی با شدت کم جذب می‌شوند.

حدود تغییرات خودپذیری مغناطیسی سنگ‌ها: خودپذیری مغناطیسی سنگ‌ها به میزان مواد فرومغناطیس موجود در آن‌ها بستگی دارد. به همین دلیل خودپذیری مغناطیسی سنگ‌های آذرین و دگرگونی به دلیل وجود مقادیر زیادتر این مواد، بیشتر است. در پیوست (جدول پ-۱)، خودپذیری مغناطیسی برخی سنگ‌ها و کانی‌ها آورده شده است.

مولفه‌های میدان مغناطیسی زمین و موقعیت جغرافیایی قطب‌های مغناطیسی: هرگاه یک تیغه مغناطیسی به صورت آزاد حول یک نقطه دوران کند تیغه مغناطیسی وضعیت متعادلی در فضا به خود می‌گیرد که این وضعیت تعادل به جهت میدان مغناطیسی زمین در آن نقطه بستگی دارد. قطب‌های مغناطیسی زمین بر قطب‌های جغرافیایی آن منطبق نیستند و مختصات تقریبی آن‌ها به‌قرار زیر است :

{ ۷۳ درجه عرض شمال	{ ۶۸ درجه عرض جنوبی
قطب شمال مغناطیسی	قطب جنوب مغناطیسی
{ ۹۸ درجه طول غربی	{ ۱۴۵ درجه طول شرقی

ویژگی دیگر این قطب‌ها در این است که خطی که آن‌ها را به یکدیگر متصل می‌کند از مرکز زمین عبور نمی‌کند و در حدود ۱۲۰۰ کیلومتر با آن فاصله دارد.

مشخصات میدان مغناطیسی زمین: میدان مغناطیسی زمین از دو میدان داخلی و خارجی به وجود آمده است. حدود ۹۴٪ میدان مغناطیسی زمین منشا داخلی دارد. این میدان با تعداد زیادی مغناطیس عبوری در امتدادهای مختلف به دست می‌آید. منشا خارجی میدان زمین جزیی است و در اثر حرکت ذرات باردار موجود در یونسفر جریان‌های الکتریکی در میدان مغناطیسی زمین ایجاد می‌شود که میدان‌های مغناطیسی القایی را به وجود می‌آورد.

تغییرات دایمی میدان مغناطیسی زمین[1]**:** میدان مغناطیسی زمین هرگز دایمی نیست و عناصر اصلی میدان در طول عمر زمین بارها تغییر کرده‌اند (تغییر زاویه میل مغناطیسی حدود ۱۵ درجه و زاویه انحراف حدود ۳۵ درجه است).

تغییرات روزانه میدان مغناطیسی زمین[2]**:** این تغییرات با دوره مساوی یک روزه و دامنه حدود ۲۵ نانوتسلا، در کاوش‌های مغناطیسی اهمیت بیشتری دارند. مقدار این تغییرات در بعضی روزها کمتر و بعضی روزها بیشتر می‌شود. دامنه این تغییرات در تابستان بیش از زمستان است.

طوفان‌های مغناطیسی[3]**:** آشفتگی‌های موقت و گذرایی هستند که دامنه آن‌ها تا ۱۰۰۰ نانوتسلا هم می‌رسد. تابع عرض جغرافیایی هستند و قابل پیش‌بینی نیستند. در تمام دنیا در یک زمان اتفاق می‌افتند و مدت چند روز ادامه دارند.

موج: هر نوع آشفتگی که توسط چشمه‌های ضربه‌ای، انفجاری یا ارتعاشی، در یک محیط در حال تعادل ایجاد شود و انتقال یابد، موج نامیده می‌شود.

موج طولی: اگر امتداد ارتعاش ذرات محیط با جهت انتشار موج هم سو باشد موج طولی یا تراکمی است.

موج برشی: اگر امتداد ارتعاش ذرات بر جهت انتشار موج عمود باشد موج عرضی یا برشی است.

امواج پیکری: امواج طولی و برشی امواج پیکری هستند، این امواج قسمتی از مسیر خود را در جهت شبه قائم طی می‌کنند.

موج سطحی: امواجی که در امتداد سطح زمین و یا در امتداد مرز مشترک لایه‌ها منتشر می‌شوند امواج سطحی نامیده می‌شوند. امواج رایلی و لاو امواج سطحی هستند.

موج رایلی: موج رایلی موج سطحی است و در امتداد سطح زمین حرکت می‌کند و ذرات محیط در مسیر بیضی شکل و به صورت پسگرد حرکت می‌کنند.

موج لاو: موج لاو موج سطحی است که در اثر تباین سرعت در بین دو لایه ایجاد می‌شود و انتشار می‌یابد. ذرات محیط در مرز دو لایه عمود بر جهت انتشار ارتعاش می‌کنند. این موج، موج پلاریزه افقی برشی نامیده می‌شود.

موج بازتابی: موج بازتابی موجی است که در اثر برخورد موج به سطح تماس دو لایه که دارای تفاوت صوتی متفاوت است، بازتاب می‌شود.

موج شکست مرزی: موج شکست مرزی موجی است که در اثر برخورد موج با زاویه تابش حدی در سطح تماس دو لایه ایجاد می‌شود.

1- Secular Variation
2- Diurnal Variation
3- Magnetic Storm

لرزه‌نگاری شکست مرزی: بر پایه شکست موج از مرز مشترک لایه‌ها استوار است و در مطالعات عمیق و کم‌عمق تا چندین‌ده متر نیز به کار می‌رود.

لرزه‌نگاری بازتابی: بر پایه بازتاب موج از مرز مشترک لایه‌ها استوار است و در مطالعات کم‌عمق و عمیق به‌کار می‌رود.

لرزه‌نگار: ابزاری است که برای ثبت و آشکارسازی امواج لرزه‌ای به کار می‌رود.

ژئوفون: حسگری که در زمین کار گذاشته می‌شود و حرکات و ارتعاشات مکانیکی را به سیگنال الکتریکی تبدیل می‌کند.

نیمرخ لرزه‌ای: خطی است که در آن امتداد ژئوفون‌ها چیده شده و ثبت داده‌ها انجام می‌شود.

دور افت: فاصله بین چشمه لرزه‌ای نسبت به ژئوفون اول یا آخر است که با افزایش آن، محدوده مورد مطالعه در عمق بیشتری مطالعه و ردیابی می‌شود.

رد لرزه‌ای: لرزه نگاشت و یا داده‌هایی است که در هر ژئوفون نسبت به زمان ثبت می‌شود.

نگاشت لرزه‌ای: مجموعه رد لرزه‌ای در هر برداشت، یک نگاشت لرزه‌ای است.

نقطه عمق مشترک: لرزه‌نگاری بازتابی بر اساس جابه‌جایی متقارن چشمه و دریافت نسبت به نقطه ثابت مرکز است.

چشمه مشترک: لرزه‌نگاری بازتابی که پرتوهای لرزه‌ای از یک چشمه انفجاری در امتداد نیمرخ از عمق‌های مختلف در ژئوفون‌ها ثبت می‌شود.

امواج مفید: امواجی که اطلاعات مرتبط با نیمرخ لرزه‌ای را دارند، امواج مفید نامیده می‌شوند. در روش بازتابی موج یک بار بازتاب شده و در روش شکستی، موج شکست مرزی امواج مفید هستند.

امواج مزاحم: امواجی که به طور اتفاقی ایجاد می‌شوند و فاقد اطلاعات مفید هستند که باید اثر آن‌ها تضعیف و یا حذف شود.

محیط همسانگرد و ناهمسانگرد: در محیط همسانگرد خواص کشسانی در تمام جهات یکسان و در محیط‌های ناهمسانگرد متفاوت است.

محیط لایه‌ای: مجموعه‌ای از لایه‌های نازک (با ضخامت کمتر از یک‌چهارم طول موج ظاهری) که چگالی، ضرایب کشسان و سرعت آن‌ها در طیف متوسطی تغییر می‌کند، لایه لرزه‌ای نامیده می‌شود. در مجموعه لایه‌های ضخیم، میزان سرعت و چگالی در هر لایه مقدار ثابتی است. لایه‌بندی افقی ساده‌ترین مدل محیط‌های لایه‌ای است.

محیط پیوسته: در محیط‌های پیوسته سرعت انتشار امواج به تدریج در جهت خاصی تغییر می‌کند (مانند زون‌های هوازده سطحی و سنگ‌های دگرگونی). در بیشتر موارد تغییرات سرعت در جهت افقی کمتر از جهت قائم (عمق) است و از مدلی که در آن سرعت فقط با عمق تغییر می‌کند استفاده می‌شود.

محیط لایه‌ای-پیوسته: در این مدل، محیط شامل چند لایه دارای سرعت‌های متغیر است. در مطالعه سطح بالایی پوسته زمین، در مواردی سرعت انتشار امواج لرزه‌ای به طور پیوسته تغییر می‌کند که این محیط پیوسته یا گرادیانی است. اگر ضخامت لایه‌بندی در یک محیط در مقایسه با یک‌چهارم طول موج عبوری کوچکتر باشد، می‌توان چنین محیطی را معادل محیطی دانست که در آن سرعت به طور پیوسته با عمق تغییر می‌کند. در محیط‌های گرادیانی در مرز لایه‌های نازک مسیر پرتوهای لرزه‌ای انحنا می‌یابد.

۱-۲- روش‌های مختلف مطالعات ژئوفیزیکی

روش‌های ژئوفیزیکی عمدتا برای مطالعات زیر مورد استفاده قرار می‌گیرند:

۱- اکتشاف هیدروکربن‌ها (زغال‌سنگ، گاز، نفت)

۲- مطالعات زمین‌شناسی ناحیه‌ای (مساحت بیش از ۱۰۰ کیلومتر مربع)

۳- اکتشاف کانسارهای معدنی

۴- مطالعات مهندسی

۵- مطالعات زمین‌آب‌شناسی

۶- کاوش فضاهای خالی (طبیعی یا مصنوعی)

۷- تعیین لکه‌های آلودگی و خورندگی خاک

روش‌های گوناگون مطالعات ژئوفیزیکی در جدول ۱-۱ ارایه شده است.

جدول شماره ۱-۱- کاربرد روش‌های مختلف ژئوفیزیکی در مطالعات گوناگون

روش ژئوفیزیکی	پارامتر فیزیکی وابسته	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
گرانی‌سنجی	چگالی	p	p	s	s	s	s	-
مغناطیس‌سنجی	خودپذیری مغناطیسی	p	p	p	s		m	-
لرزه‌نگاری شکست مرزی	خواص کشسانی چگالی	p	p	m	p	s	s	-
لرزه‌نگاری بازتابی	خواص کشسانی، چگالی	p	p	m	s	s	m	-
مقاومت ویژه	مقاومت ویژه	m	m	p	p	p	p	p
پتانسیل خودزا	اختلاف پتانسیل	-	-	p	m	p	m	m
پلاریزاسیون القایی	مقاومت ویژه، ظرفیت الکتریکی	m	m	p	m	s	m	m
الکترومغناطیس	رسانایی-خودالقایی	s	p	p	p	p	p	p
فرکانس بسیار پایین	رسانایی	m	m	p	m	s	s	s
رادار نفوذی زمین	ضریب دی‌الکتریکی	m	m	p	m	s	s	s
مگنتوتلوریک	مقاومت ویژه	s	p	p	m	m	-	-
پرتوزایی	پرتو گاما (به طور معمول)	m	s	p	-	-		
دماسنجی	رسانندگی حرارتی	s	s		-	P*	s	-

P: روش اصلی (اولیه)، S: روش مکمل (ثانویه)، m: دارای کاربرد بدون بسط،*P: منحصر به این کاربرد است، - : نامناسب (اعداد ۱ تا ۷ معرف کاربردهای ذکر شده در متن است.)

۱-۳- تجهیزات مورد استفاده

جدول ۱-۲ تجهیزات مورد استفاده در روش‌های ژئوفیزیکی مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی و لرزه‌نگاری را ارایه می‌دهد.

جدول ۱-۲- تجهیزات مورد استفاده در روش‌های ژئوفیزیکی

سنجی‌مغناطیس	– دستگاه مغناطیس‌سنج ثابت که در ایستگاه مبنا بر پا می‌شود و تغییرات روزانه شدت میدان کل را در طول زمان برداشت‌ها به صورت مداوم یا هر ۵ دقیقه یک‌بار همراه با زمان ثبت می‌کند. – دستگاه مغناطیس‌سنج برای اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی در ایستگاه‌ها (دستگاه PROTON PRECESSION با حساسیت یک‌دهم نانوتسلا و دستگاه CESIUM VAPOUR با حساسیت یک‌صدم نانوتسلا) – دستگاه‌های G.P.S برای شماره‌گذاری و پیاده کردن خط مبنا و ایستگاه‌ها
سنجی‌گرانی	دستگاه‌هایی که تغییرات g را بین ایستگاه‌های مختلف مشخص می‌کنند، گرانی‌سنج از نوع CG-M3 و CG3 و CG5 و LACOSTE ROMERG و LACOSTE-SCINTREX با حساسیت حدود یک‌صدم میلی‌گال
نگاری‌لرزه	سیستم دریافت: دستگاه لرزه‌نگار رقومی و یا آنالوگ، کابل مرکزی رابط بین ژئوفون‌ها و لرزه‌نگار، کابل رابط با سیستم رادیویی برای انتقال زمان صفر به لرزه‌نگار، ژئوفون‌های نوع S و P سیستم چشمه: چشمه غیرانفجاری شامل چشمه ضربه‌ای، چشمه ضربه‌ای با هوای فشرده، چشمه ارتعاشی، سیستم تخلیه الکتریکی در محیط سیال و چشمه انفجاری، دستگاه G.P.S

۱-٤- دستورالعمل اجرایی و جمع‌آوری اطلاعات

در هر مطالعه اکتشافی باید برداشت‌های فاکتور فیزیکی مورد نظر، در یک شبکه‌بندی منظم انجام گیرد. وسعت این شبکه‌بندی بر حسب فاز مطالعاتی و وسعت محدوده زیر پوشش متفاوت است. در جدول ۱-۳ روش‌های جمع‌آوری اطلاعات و طرح‌های مختلف شبکه‌بندی روش‌های ژئوفیزیکی آورده شده است. همچنین پس از مشخص شدن فاز مطالعات اکتشافی و انتخاب شبکه‌بندی مناسب، عملیات برداشت‌های صحرایی مطابق دستورالعمل ارایه شده در جدول ۱-۴ انجام می‌گیرد.

جدول۱-۳- جمع‌آوری اطلاعات و شبکه‌بندی برداشت روش‌های ژئوفیزیکی

	آوری اطلاعات‌جمع	**ای‌های لرزه‌بندی) و طراحی نیمرخ‌بندی برداشت (ابعاد شبکه‌طراحی و شبکه**		
		اکتشافات معدنی		
		جویی‌شناسایی و پی	عمومی	تفصیلی
سنجی‌مغناطیس	بانک‌های اکتشافی موجود در کشور، نقشه‌های ژئوفیزیک هوابردی	۲۰×۱۰۰ متر	۱۰×۱۰۰ متر	۱۰×۵۰ متر در مواردی ۵×۲۵متر
سنجی‌گرانی	نقشه‌های زمین‌شناسی، نقشه‌های ژئوفیزیک هوابردی، نقشه‌های ژئوشیمیایی، اطلاعات ژئوفیزیکی موجود	۲۰×۲۰۰ متر	۲۰×۱۰۰ متر	۱۰×۵۰ متر در مواردی ۵×۲۵ متر
نگاری‌لرزه	ای کشورهای لرزه‌بانک	مطالعات تکتونیکی عمیق روش بازتابی به صورت نیمرخ خطی دوبعدی (2D) در مطالعات اکتشافی نفت و گاز، نیمرخ‌های لرزه‌ای بازتابی به صورت دوبعدی (2D) یا مساحتی سه‌بعدی (3D) در مطالعات ساختمانی و اکتشاف معدنی روش شکست مرزی و یا بازتابی به صورت خطی یا دوبعدی (2D) در مطالعات کم عمق و مهندسی نیمرخ‌ها خطی و اغلب شکست مرزی		

جدول ۱-٤- دستورالعمل اجرایی روش‌های ژئوفیزیکی

	دستورالعمل اجرایی	
	گیری‌پیاده کردن نقاط اندازه	**برپایی ایستگاه مبنا**
مغناطیس‌سنجی	- مشخص کردن محدوده زون‌های معدنی و در نظر گرفتن خط مبنا در جهت گسترش کانسار – پیاده کردن نقاط برداشت بر روی زمین با استفاده از G.P.S و رسم نیمرخ‌ها عمود بر خط مبنا – برداشت مختصات نقاط ویژه نظیر ترانشه‌ها، رخنمون مواد معدنی، محدوده عملیات قدیمی و نظایر آن – تهیه نقشه موقعیت	ایستگاه مبنا در نقطه‌ای دور از آلودگی مغناطیسی بر پا می‌شود و میدان مغناطیسی هر ۵ دقیقه و یا به صورت مداوم برداشت می‌شود تا تغییرات روزانه با رسم دیاگرام مشخص شود. در اثر طوفان‌های مغناطیسی اندازه‌گیری دو بار انجام می‌گیرد.
گرانی‌سنجی	– مشخص کردن محدوده زون‌های معدنی و در نظر گرفتن خط مبنا در جهت گسترش کانسار – پیاده کردن نقاط برداشت بر روی زمین با استفاده از G.P.S و رسم نیمرخ‌ها عمود بر خط مبنا – برداشت مختصات نقاط ویژه نظیر ترانشه‌ها، رخنمون مواد معدنی، محدوده عملیات قدیمی و نظایر آن – تهیه نقشه موقعیت	هر دو ساعت یک بار مقدار گرانی در ایستگاه مبنا خوانده می‌شود و تغییرات دریفت در فاصله دو ساعت را خطی فرض کرده و مقادیر قرائت شده در ایستگاه‌ها تصحیح می‌شود. در مناطق وسیع شبکه‌ای از ایستگاه‌های مبنا به جای یک ایستگاه در نظر گرفته می‌شود.
نگاری‌لرزه	بعد از طراحی خطوط لرزه‌ای در نقشه، موقعیت نیمرخ‌های لرزه‌ای با کمک G.P.S به زمین منتقل می‌شود.	

فصل ۲

راهنمای مطالعات مغناطیس‌سنجی

۲-۱- آشنایی

از روش مغناطیس‌سنجی بیشتر در اکتشاف معادن فلزی، توده‌های آذرین و محدوده‌های دارای پتانسیل معدنی فلزی استفاده می‌شود. پس از بررسی‌های زمین‌شناسی در یک ناحیه و مشخص کردن اندیس‌ها و زون‌های کانی‌سازی و احتمال وجود ذخایر معدنی، اکتشاف مغناطیس‌سنجی مناسب با هدف پروژه و کانسار مورد نظر انجام می‌گیرد که بر مبنای آن،شبکه‌بندی اندازه‌گیری‌ها مشخص و برداشت‌ها انجام می‌شود.

۲-۲- معیارهای مطالعات مغناطیس‌سنجی

مطالعات مغناطیس‌سنجی به شیوه مستقیم و غیرمستقیم انجام می‌شود. در کاربرد مستقیم کلیه کانی‌های آهنی مانند منیتیت، پیروتیت، تیتانومنیتیت مورد اکتشاف قرار می‌گیرند. خاصیت مغناطیسی سنگ‌ها و کانی‌های مبنای اکتشاف مستقیم و تعیین‌کننده محدوده آنومالی‌های مغناطیسی است. کاربرد مغناطیس‌سنجی به صورت غیرمستقیم برای اکتشاف کانی‌هایی مانند مس و کرومیت که کانی‌های همراه آن‌ها خاصیت مغناطیسی دارند، استفاده می‌شود. همچنین مشخص کردن گستره سنگ‌های آذرین از سنگ‌های رسوبی و ردیابی همبری‌ها و گسل‌ها که در اکتشافات معدنی اهمیت دارند نیز از کاربردهای غیرمستقیم این روش است.

۲-۳- اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی

اندازه‌گیری شدت میدان مغناطیسی با دستگاه‌های مغناطیس‌سنج انجام می‌گیرد. اندازه‌گیری میدان مغناطیسی در امتداد نیمرخ‌ها و از ایستگاه مبنا شروع و یادداشت می‌شود. در مواردی که تغییرات شدت میدان زیاد است، اندازه‌گیری بین ایستگاه‌ها در فواصل کم تکرار می‌شود.

۲-٤- آنومالی‌های مغناطیسی[1]

به اختلاف بین شدت میدان مغناطیسی متعارف و شدت میدان مغناطیسی برداشت شده، آنومالی مغناطیسی گفته می‌شود. اگر جسمی با خاصیت مغناطیسی بیشتری نسبت به اطراف خود، در نزدیکی سطح زمین مدفون باشد، بردار میدان مغناطیسی زمین در اثر نفوذ به این توده ایجاد میدان القایی می‌کند. میدان کلی حاصل که در نقطه‌ای در روی سطح زمین اندازه‌گیری می‌شود از مجموع دو میدان مغناطیسی زمین و میدان مغناطیسی القایی تشکیل می‌شود. بنابراین با اندازه‌گیری میدان کلی و داشتن مغناطیس زمین در هر نقطه می‌توان میدان آنومالی مغناطیسی را به دست آورد. با کسر میدان مغناطیسی از میدان متعارف زمین، پس از انجام تصحیحات، آنومالی باقی‌مانده محاسبه و به این ترتیب، می‌توان نقشه میدان مغناطیس باقی‌مانده را تهیه کرد.

۲-٤-۱- پردازش داده‌ها

1- Magnetic Anomalies

پس از برداشت‌های صحرایی و انجام تصحیحات لازم نقشه‌های مختلفی با مقیاس‌مناسب تهیه و پربندی می‌شوند و بر اساس نتایج به دست آمده خصوصیات منشا آنومالی‌ها تفسیر می‌شوند. نقشه‌های تهیه شده عبارتند از:

الف- نقشه تغییرات شدت کل میدان مغناطیسی[۱]

پس از برداشت شدت میدان مغناطیسی در شبکه اندازه‌گیری و انجام تصحیحات روزانه، مقدار شدت میدان برای هر ایستگاه مشخص و نقشه تغییرات شدت میدان کل مغناطیسی محدوده مورد اکتشاف با پربندی و مقیاس مناسب ترسیم می‌شود. در این نقشه دو نوع آنومالی منطقه‌ای و آنومالی محلی مشخص می‌شود. در سازندهای زمین‌شناسی متجانس و لایه‌ای، تغییرات میدان آرام و خطوط پربندی هموار است. وجود سنگ‌ها با ضریب خودپذیری متغیر، شدت میدان مغناطیسی را تغییر می‌دهد و همبری این سازندها از خطوط پربندی مشخص می‌شود. در مواردی که زون‌های کانی‌سازی، کانی‌های آهنی دارند آنومالی‌های محلی ایجاد می‌شود.

ب- نقشه آنومالی باقی‌مانده مغناطیسی[۲]

آنومالی باقی‌مانده با حذف آنومالی منطقه‌ای از شدت میدان کل حاصل می‌شود. آنومالی منطقه‌ای را می‌توان از نقشه‌های جهانی که برای هر منطقه از جهان تهیه شده‌اند، به دست آورد و از مقادیر شدت میدان اندازه‌گیری شده کم کرد. بدین ترتیب نقشه آنومالی باقی‌مانده، به صورت بارزتر آنومالی‌های با مراکز مثبت و مراکز منفی را نشان می‌دهد.

پ- نقشه برگردان به قطب[۳]

آنومالی‌های مغناطیسی علاوه بر خاصیت مغناطیسی شدن سنگ‌ها، با جهت میدان مغناطیسی زمین در آن نقطه نیز ارتباط دارند. آنومالی‌های مغناطیسی با موقعیتی که زاویه میل میدان مغناطیسی ۹۰ درجه باشد محاسبه می‌شوند که این روش برگردان به قطب نامیده می‌شود. با این روش مراکز آنومالی‌های مغناطیسی درست در محل اصلی زون‌های کانی‌سازی قرار می‌گیرند. با تهیه این نقشه می‌توان محل دقیق حفاری‌های اکتشافی را مشخص کرد.

ت- نقشه‌مشتق اول و دوم[۴]

مشتق دوم میدان مغناطیسی یا "T عبارت از اندازه‌گیری انحنای میدان مغناطیسی، در اثر وجود یک آنومالی مغناطیسی است که به صورت آنومالی محلی و یا باقی‌مانده در نقشه ظاهر می‌شود. با توجه به اینکه شدت میدان مغناطیسی با عکس مجذور فاصله متناسب است لذا تغییرات شدت میدان برای دو جرم مغناطیسی که در دو فاصله متفاوت از سطح زمین قرار گرفته‌اند برای مشتق دوم زیادتر از مشتق اول است به طوری که مشتق دوم، اثرات مغناطیسی جرمی را که نزدیک به سطح زمین قرار دارد، گویاتر نشان می‌دهد. این نقشه در تفسیر نتایج مطالعات بسیار موثر است و برای نشان دادن آلودگی‌های سطحی به صورت پارازیت در اندازه‌گیری‌ها و نیز محل رخنمون زون‌های کانی‌سازی به کار می‌رود.

ث- نقشه‌فراسو و یا فروسو[۵]

با توجه به این که تغییرات شدت میدان متناسب با عکس مجذور فاصله از منشا آنومالی است، می‌توان میدان مغناطیسی اندازه‌گیری شده را به افق‌های بالاتر و یا پایین‌تر نسبت داد و با محاسبه مقادیر آن‌ها نقشه‌های جدیدی از تغییرات میدان کل

1- Total Intensity Map
2- Residual Magnetic Map
3- Reduction to Pole Map
4- First & Second Derivative Map
5- Upward Continuation or downward Continuation Map

مغناطیسی ارایه کرد. این نقشه‌ها به نام نقشه‌های فراسو و فروسو نامیده می‌شوند. با تهیه نقشه‌های فراسو اثر آنومالی‌های محلی و سطحی کمتر شده و آنومالی‌های منطقه‌ای با خطوط پربندی هموارتر ظاهر می‌شوند. تهیه نقشه‌های مختلف برای سطوح متفاوت و بالاتر، آنومالی‌های سطحی و محلی را از آنومالی‌های منطقه‌ای و عمیق جدا می‌کند و منشا آنومالی‌ها را آشکار می‌سازد. با تهیه نقشه‌های فروسو، اندازه‌گیری‌ها به سطوح نزدیک منشا آنومالی نسبت داده می‌شوند. اگر ادامه فروسو بیشتر از عمق منشا آنومالی‌ها باشد تغییرات اندازه‌گیری شدیدتر می‌شود و در بعضی مواقع می‌توان با انجام این عمل و مشخص کردن حداکثر تغییرات شدت میدان مغناطیسی، تخمینی از عمق راس منشا آنومالی‌ها را به دست آورد.

ج- نقشه تفسیر و موقعیت[1]

در این نقشه علاوه بر ارایه موقعیت خط مبنا و ایستگاه‌های اندازه‌گیری، اطلاعات دیگری مانند نتایج تفسیرها شامل محدوده‌های آنومالی و گستره آن‌ها، همبری‌ها، گسل‌ها، محل حفاری‌های اکتشافی و نظایر آن نشان داده می‌شود.

چ- پروفیل‌های مدلسازی شده

این نیمرخ‌ها از محدوده آنومالی‌ها تهیه می‌شود و با مدلسازی با نرم‌افزارهای مختلف، مشخصات منشا از جمله گستره، شیب و عمق آن‌ها محاسبه می‌شود.

۲-٤-۲- تفسیر آنومالی‌های مغناطیسی

تعبیر و تفسیر نقشه‌های مغناطیس‌سنجی بر مبنای تغییرات ضریب القا مغناطیسی سنگ‌ها و کانی‌ها است. سنگ‌های رسوبی دارای اختلاف ضریب القا مغناطیسی زیاد نیستند و آنومالی‌های مغناطیسی قابل توجهی را ایجاد نمی‌کنند. در بیشتر موارد وجود سنگ‌های آذرین در زیر سنگ‌های رسوبی بر اندازه‌گیری‌ها تاثیر می‌گذارد که از تفسیر آن‌ها می‌توان ضخامت لایه‌های رسوبی را مشخص‌کرد. این روش برای اکتشاف کانی‌های آهنی و کانی‌هایی که دارای خاصیت مغناطیسی هستند، استفاده می‌شود. پس از مشخص کردن آنومالی‌ها، تفسیرهای کمی و کیفی در مورد آن‌ها انجام می‌گیرد. تفسیرهای کیفی اغلب با مقایسه آنومالی‌ها با میدان‌های به وجود آمده از توده‌های مغناطیسی که دارای اشکال هندسی منظم مانند کره و استوانه هستند انجام می‌گیرد. برای تفسیر کمی، از دیاگرام تغییرات میدان در مقطعی که از مرکز آنومالی‌عبور می‌کند و از روش نصف عرض[2] استفاده می‌شود.

از مدل‌ریاضی نیز برای تعیین مشخصات توده‌های مغناطیسی استفاده می‌شود. در این روش با استفاده از میدان ایجاد شده از یک توده، تغییرات میدان با تغییرات نمودار و تغییرات آنومالی مورد نظر مقایسه می‌شود. اگر نتایج فاصله یکسان باشد، شکل و مشخصات توده مغناطیسی در نظر گرفته شده برای آنومالی تایید می‌شود و در غیر این صورت مشخصات توده تغییر داده می‌شود و محاسبات به تعداد دفعات لازم با کامپیوتر تکرار می‌شود. با قطبی کردن نقشه میدان کل و تبدیل آن به یک نقشه مجازی، راس منشا آنومالی مشخص می‌شود.

1- Location & Interpretation Map
2- Half Width

فصل ۳

راهنمای مطالعات گرانی‌سنجی

۳-۱- آشنایی

گرانی‌سنجی یکی از روش‌های متداول در اکتشافات ژئوفیزیکی است که مبنای آن تغییرات میدان گرانی در نقاط مختلف زمین برای سازندهای مختلف و با چگالی متفاوت است. پس از بررسی‌های زمین‌شناسی در یک ناحیه و مشخص شدن اندیس‌ها و زون‌های کانی‌سازی و احتمال وجود ذخایر معدنی با استفاده از روش گرانی‌سنجی می‌توان برخی از کانسارها از جمله کرومیت، باریت، اکسیدهای برخی از فلزات و همچنین سولفیدهای توده‌ای فلزات پایه را مورد اکتشاف قرار داد. در پیوست (جدول پ-۲) چگالی برخی سنگ‌ها و کانی‌های آورده شده است.

۳-۲- معیارهای مطالعات گرانی‌سنجی

به طور کلی بررسی و مطالعه جاذبه زمین به دو منظور مطالعات زمین‌شناسی و ژئودزی انجام می‌شود. در مورد مطالعات زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی مبنای اکتشاف، تغییرات گرانی در اثر اختلاف ناشی از تغییر وزن مخصوص سنگ‌ها و تغییر جنس آن‌ها است و در موارد زیر کاربرد دارد:

- مطالعات زمین‌شناسی و منطقه‌ای شامل تعیین ساختارهایی نظیر گنبدهای نمکی، تاقدیس‌ها و ناودیس‌ها، گسل‌ها و زون‌های خرد شده

- اکتشافات معدنی به منظور اکتشاف کانسارهایی مانند باریت، کرومیت، نمک، گالن، منیتیت و به طور کلی کانی‌هایی که چگالی آن‌ها تفاوت نسبتا زیادی با سنگ میزبان دارد.

- مطالعات ژئوتکنیکی و مهندسی شامل تعیین محل کارست‌ها و حفرات طبیعی و مصنوعی، بررسی مسیر تونل‌ها، تعیین زون‌های فرونشستی و فروچاله‌ها در مناطق معدنی با استفاده از روش میکروگرانی‌سنجی

- تعیین عمق سنگ کف در مناطق آبرفتی

در جدول ۳-۱ کاربردهای مطالعات گرانی‌سنجی ارایه شده است.

جدول ۳-۱- کاربرد گرانی‌سنجی در اکتشافات ژئوفیزیکی

کاربردها	نوع دستگاه‌های مورد استفاده	دقت عملیات	طراحی عملیات	نتایج
اکتشافات معدنی: به طور کلی برای اکتشاف هر کانی که چگالی آن با سنگ میزبان دارای تفاوت قابل تشخیص باشد مانند کرومیت، باریت، نمک و نظایر آن‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد.	گراوی‌متر: لاکوست‌رومبرگ CG3 نقشه‌برداری: توتال‌استیشن	- ۵ میکروگال - ۱ تا ۵ سانتی‌متر	- نیمرخ و یا شبکه - فواصل نیمرخ‌ها و نقاط نصف حداقل عمق مورد نظر	- محل کانسارها - عمق حداقل - عمق حداکثر - شکل سه‌بعدی - تخمین ذخیره احتمالی
زمین‌شناسی: - محل و عمق گسل‌ها - بررسی تاقدیس‌ها و ناودیس‌های زیرسطحی -ناپیوستگی‌های زمین‌شناسی -توپوگرافی سنگ کف (ضخامت آبرفت)	گراوی‌متر: -لاکوست‌رومبرگ - CG3 نقشه‌برداری: - توتال‌استیشن	- ۵ تا ۱۰ میکروگال - ۵ تا ۱۰ سانتی‌متر	- نیمرخ و یا شبکه - فواصل نیمرخ‌ها و نقاط نصف حداقل عمق مورد نظر	- محل و عمق گسل‌ها - محل و عمق ناپیوستگی‌ها - ضخامت آبرفت - تعیین ساختار لایه‌های چین خورده زیر سطحی

ادامه جدول ۳-۱- کاربرد گرانی‌سنجی در اکتشافات ژئوفیزیکی

کاربردها	نوع دستگاه‌های مورد استفاده	دقت عملیات	طراحی عملیات	نتایج
ژئوتکنیک: - حفرات کارستی - زمین‌لغزش‌ها - تعیین زون‌های خرد شده و ریزشی در معادن و شفت‌های حفر شده در ساختگاه سدها و تونل‌ها	گراوی‌متر: -لاکوست‌رومبرگ - CG3 نقشه‌برداری: - توتال‌استیشن	- ۱ تا ۵ میکروگال - ۱ تا ۲ سانتی‌متر	- نیمرخ و یا شبکه - فواصل نیمرخ‌ها و نقاط نصف حداقل عمق مورد نظر - برداشت زمانی داده میکروگرانی‌سنجی	- تعیین محل و عمق حفرات کارستی - تعیین محل و عمق زون‌های ریزشی در معادن - تعیین مقدار نشست و پیش‌بینی زمین‌لغزش‌ها با برداشت داده‌های میکروگرانی‌سنجی در مکان‌های خاص و در یک بازه زمانی

۳-۳- اندازه‌گیری در گرانی‌سنجی

اندازه‌گیری در گرانی‌سنجی به صورت مطلق و نسبی انجام می‌شود. در روش مطلق، گرانی از طریق رابطه $g = \frac{4L\pi^2}{T^2}$ و با اندازه‌گیری کمیت‌های طول و زمان محاسبه می‌شود که در آن L طول و T زمان تناوب است. اندازه‌گیری‌نسبی به مراتب آسان‌تر از اندازه‌گیری مطلق است و با توجه به رابطه ۳-۱ که مقادیر g_1 و g_2 برای دو نقطه متفاوت است، Δg محاسبه می‌شود:

$$g_2 - g_1 = \Delta g = \frac{-2g(T_2 - T_1)}{T_1} \qquad (۱-۳)$$

در عملیات اکتشافی از دستگاه گراوی‌متر استفاده می‌شود. از معایب این دستگاه‌تعیین مقدار دریفت یا تغییرات خودبه‌خودی است. به همین منظور، با برپایی ایستگاه مبنا و تکرار اندازه‌گیری‌ها، برای یک شبکه برداشت مقدار دریفت مشخص شده و از مقادیر اندازه‌گیری حذف می‌شود.

۳-۳-۱- تصحیحات گرانی‌سنجی

در ایستگاه‌های گرانی‌سنجی مقدار شتاب جاذبه واقعی را نمی‌توان برداشت کرد، زیرا داده‌های گرانی‌سنجی علاوه بر وضع زمین‌شناسی طبقات و اختلاف چگالی آن‌ها، تحت تاثیر عوامل دیگری از قبیل عرض جغرافیایی، ارتفاع ایستگاه‌ها نسبت به سطح مبنا، اثرات توپوگرافی نزدیک ایستگاه‌های گرانی، تاثیرات نیروی کششی حاصل از ماه و خورشید و تغییرات چگالی سنگ‌ها قرار می‌گیرند. در برداشت‌های گرانی باید اثر این پارامترها از مقادیر اندازه‌گیری شده کم و یا به آن‌ها اضافه شود. تصحیحات لازم در عملیات گرانی‌سنجی شامل تصحیح عرض جغرافیایی، تصحیح ارتفاعی، تصحیح هوای آزاد، تصحیح بوگه، تصحیح زمینگان، تصحیح جزر و مد و تصحیح ایزوستازی است.

الف- تصحیح عرض جغرافیایی[1]

1- Latitude Correction

در این مورد اثرات گردش زمین به دور محور خود و پهن‌شدگی ناشی از آن، مورد توجه قرار می‌گیرد. مقدار شتاب گرانی در فاصله بین استوا تا قطب به علت زیاد بودن شعاع زمین در استوا (۹۷۸ گال) و کمتر بودن آن در قطب‌ها (۹۸۳ گال) تغییر می‌کند. برای تعیین شکل زمین از شکلی به نام کره‌وار[1] که عبارت از سطح تعادل دریاها است، استفاده می‌شود. در صورتی که حرکت دورانی

زمین یکنواخت فرض شود و زمین از طبقات یکنواخت و متحدالمرکزی تشکیل شده باشد، محاسبه تغییرات بر حسب عرض جغرافیایی در روی این سطح به صورت رابطه ۳-۲ است:

$$g = g_e(1 + K_1 sin\varphi^2 + K_2 sin^2 2\varphi) \qquad (۳-۲)$$

در این رابطه g_e میزان گرانی در استوا، φ عرض جغرافیایی و K_1 و K_2 مقادیر ثابت که به ترتیب معادل K_1=۰/۰۰۵۲۸۸۴ و K_2=-۰/۰۰۰۰۰۵۹ هستند. در عمل از فرمول بالا استفاده نمی‌شود و اگر ناحیه وسعت چندانی در امتداد شمال و جنوب نداشته باشد تغییرات شتاب گرانی را در این امتداد ثابت فرض می‌کنند و مقدار متوسطی درحدود نیم‌میلی‌گال در هر کیلومتر شمالی- جنوبی برای آن در نظر می‌گیرند.

ب- تصحیح ارتفاع[2]

این تصحیح به دلیل پستی و بلندی‌های زمین است. ایستگاه‌های اندازه‌گیری در یک ارتفاع واقع نیستند و به دلیل تغییرات فاصله آن‌ها نسبت به مرکز زمین تغییراتی در اندازه‌گیری گرانی ایجاد می‌شود که باید این تغییرات محاسبه و حذف شوند. این تصحیح خود از دو تصحیح زیر تشکیل شده است.

- تصحیح هوای آزاد[3]

این تصحیح مربوط به تغییرات گرانی در اثر اختلاف ارتفاعی است که بین نقطه اندازه‌گیری s و نقطه مبنای B وجود دارد. در این حالت اگر فرض کنیم که نقطه s در نقطه B´ و در امتداد قائم نقطه B قرار داشته باشد و در صورتی که زمین کروی و جرم آن متمرکز در مرکز آن باشد، تغییرات گرانی بر حسب فاصله z از آن مرکز به صورت رابطه ۳-۳ است.

$$\frac{\partial_g}{\partial_z} = \frac{-2g}{z} = -0.3086\frac{m\Sigma ai}{m} \qquad (۳-۳)$$

علامت منها در فرمول نشان می‌دهد که تصحیح هوای آزاد در صورتی که ایستگاه در بالای سطح مبنا قرار داشته باشد به قرائت انجام شده اضافه و چنانچه در زیر این سطح باشد از آن کم می‌شود.

- تصحیح بوگه[4]

در تصحیح هوای آزاد فرض بر این است که ایستگاه s در امتداد قائم نقطه B و در نقطه B´ در هوای آزاد واقع شده است. ولی این فرض صحیح نیست و نقاط s و B هر دو روی سطح زمین واقع شده‌اند. لازم است تاثیر جاذبه طبقاتی را که بین نقاط s و B

1- Spheroid
2- Elevation Correction
3- Free Air Correction
4- Bouguer Correction

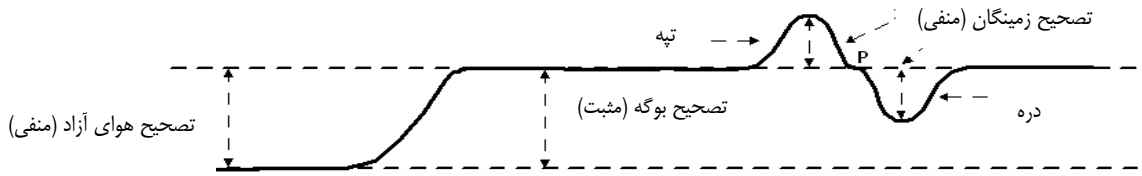
واقع شده‌اند در نظر گرفت. برای این منظور جاذبه یک لایه افقی به ضخامت h و چگالی σ که گسترش نامحدودی داشته باشد در نقطه‌ای واقع در خارج آن به صورت $2\pi\sigma h$ و از رابطه ۳-۴ محاسبه می‌شود.

$$\Delta g_{max} = 0.04188\sigma h \ mgal \qquad (۴-۳)$$

در صورتی‌که تصحیح نسبت به سطح مبنا انجام گیرد مقدار تصحیحی که برای هر نقطه باید در نظر گرفته شود معادل [0.04188σh(m)] است. علامت منفی به این دلیل است که با آوردن نقطه اندازه‌گیری به سطح مبنا اثر جاذبه طبقاتی را که در این فاصله قرار داشته‌اند باید از مقادیر اندازه‌گیری شده کم کرد تا مقدار شتاب گرانی در روی سطح مبنا به دست آید. در رابطه‌تصحیح بوگه معمولا به جای σ مقدار چگالی طبقات سطحی را در رابطه قرار می‌دهند. تصحیحاتی که به نام هوای آزاد و بوگه انجام می‌گیرند همیشه دارای علامت مخالف هستند. مقدار این تصحیح قابل ملاحظه است و برای اینکه دقت کار معادل میلی‌گال باشد باید ارتفاع نقاط را با دقتی در حدود سانتی‌متر برداشت کرد و این کار مستلزم دقت زیاد و داشتن دستگاه‌های دقیق است.

پ- تصحیح زمینگان[1]

شتاب جاذبه اندازه‌گیری شده در ایستگاه‌ها تحت تاثیر جرم‌های ناشی از توپوگرافی اطراف قرار دارد. وجود تپه‌های بالاتر از ایستگاه اندازه‌گیری سبب تمایل مولفه شتاب به سمت بالا می‌شود و وجود دره‌های پایین‌تر از ایستگاه و تهی بودن مواد در این قسمت‌ها سبب کاهش مقدار شتاب جاذبه قرائت شده می‌شود. با انجام این تصحیح فرض می‌شود که کلیه تپه‌های بالاتر از ایستگاه‌ها برداشته می‌شود و کلیه دره‌های گودتر، از همان مواد پر می‌شود. با انجام این کار یک وضعیت مسطح حاصل می‌شود. تصحیح توپوگرافی همیشه مثبت بوده و به جاذبه قرائت شده در هر ایستگاه اضافه می‌شود. در شکل ۳-۱ تصحیح هوای آزاد، بوگه و زمینگان نسبت به یک سطح مبنا آورده شده است.



شکل ۳-۱- نشان دهنده اثرات دره‌ها و تپه‌ها در یک ایستگاه اندازه‌گیری

برای محاسبه تصحیح زمینگان متداول‌ترین روش‌ها، روش ترسیمی هامر است و نیاز به یک نقشه توپوگرافی دارد که علاوه بر پوشش دادن منطقه عملیاتی، تا شعاع حداکثر ۲۳ کیلومتر از اطراف منطقه عملیاتی را نیز شامل می‌شود. الگوی هامر شامل یک سری دوایر متحدالمرکز با خطوط شعاعی است که یک سری قطاع‌هایی را به وجود می‌آورد، این قطاع‌ها شکل ذوزنقه‌ای داشته و مساحت آن‌ها با فاصله از مرکز افزایش می‌یابد، اثر گرانی هر یک از قطاع‌ها از رابطه ۳-۵ به دست می‌آید.

1- Terrain Correction

$$d_{gT} = \gamma\sigma\theta\left[(r_2 - r_1) + \sqrt{(r_1^2 + h^2)} - \sqrt{(r_2^2 + h^2)}\right] \quad (۵-۳)$$

در این رابطه:

d_{gT}: اثر گرانی هر قطاع

σ: چگالی سنگ‌ها و خاک‌های سطحی

r_2: شعاع خارجی

r_1: شعاع خارجی

h: اختلاف ایستگاه با ارتفاع میانگین قطاع که از روی نقشه توپوگرافی محاسبه می‌شود.

θ: زاویه مرکزی هر قطاع بر حسب رادیان است.

با در دست داشتن ارتفاع ایستگاه اندازه‌گیری و قطاع و اختلاف آن‌ها و با مراجعه به جداول می‌توان اثر گرانی هر یک از قطاع‌ها را محاسبه کرد. پس از محاسبه اثر گرانی هر یک از قطاع‌های اطراف ایستگاه، اثر گرانی کل یا تصحیح توپوگرافی هر ایستگاه از جمع اثرات گرانی قطاع‌های مورد بحث به دست می‌آید. در مناطق اکتشافی مسطح این تصحیح انجام نمی‌گیرد.

ت- تصحیح ایزوستازی[1]

این تصحیح ناشی از برقراری تعادل در پوسته زمین و نتیجه تغییرات جانبی چگالی است. بر طبق این فرضیه، وزن مخصوص مواد تشکیل دهنده زیر کوه‌ها و پوسته قاره‌ای کمتر از وزن مخصوص مواد زیر اقیانوس‌ها است. این روش در کاوش‌های گرانی به ویژه در اکتشافات معدنی در درجه دوم اهمیت قرار دارد، زیرا مناطق اندازه‌گیری خیلی وسیع نبوده و تغییرات چگالی بسیار ناچیز است.

ث- تصحیح جزر و مد[2]

کشش خورشید و ماه در حدی است که می‌تواند بر گرانی اندازه‌گیری شده تا حد ۰/۳ میلی‌گال تاثیر داشته باشد. تصحیح جزر و مد تابعی از طول و عرض جغرافیایی و تطابق زمانی[3] است که به روش‌های متفاوتی قابل محاسبه است. دستگاه‌های گرانی‌سنجی جدید به طور خودبه‌خود مقدار تصحیح مربوط به کشش جزر و مد ماه را از مقادیر اندازه‌گیری شده حذف می‌کنند.

۳-٤- آنومالی‌های گرانی

۳-٤-۱- تعیین چگالی سنگ‌ها

انجام تصحیحات پستی، بلندی و بوگه مستلزم داشتن چگالی سنگ‌های محدوده مورد مطالعه است. در بعضی مناطق که لیتولوژی سازندها تغییرات چندانی را ندارد با تعیین چگالی چند نقطه می‌توان چگالی متوسط برای انجام تصحیحات را به دست آورد. ولی در پاره‌ای از مناطق تغییرات لیتولوژی به اندازه‌ای شدید است که کاربرد چگالی معین باعث ایجاد خطای قابل ملاحظه‌ای می‌شود.

1- Isostatic Correction
2- Tidal Correction
3- Universal Cordinate Time

الف- تعیین چگالی از طریق نمونه‌برداری

در این روش چگالی بر مبنای نمونه‌برداری از سطح زمین و از سنگ‌های مختلف است. نمونه‌ها روی زمین تحت تاثیر عوامل جوی از وضعیت اولیه خود خارج می‌شوند. همچنین این سنگ‌ها از لحاظ دما و منشا در شرایط سنگ‌های مشابه خود در زیر زمین نیستند و اندازه‌گیری‌های مختلف در سطح و در عمق نشان از تفاوت وزن مخصوص این سنگ‌ها دارد که سبب ایجاد نتیجه‌گیری غلط می‌شود.

ب- تعیین چگالی از روی مغزه

از طریق حفاری‌های اکتشافی و مغزه‌گیری، می‌توان چگالی لایه‌ها را در اعماق مختلف با دقت مناسبی تعیین کرد.

پ- تعیین چگالی به روش نتلتون

روش نتلتون بر اساس اندازه‌گیری گرانی و تهیه یک مقطع تغییرات گرانی است. با انتخاب یک مقطع با توپوگرافی آرام از منطقه، دیاگرام تغییرات گرانی با اندازه‌گیری گرانی در طول آن مقطع تهیه می‌شود. با تغییر دادن ارقام مختلفی که به چگالی نسبت داده می‌شود، تصحیحات بوگه انجام می‌گیرد و مقاطع تغییرات گرانی رسم می‌شود. با مقایسه مقاطع تغییرات گرانی و مقطع توپوگرافی، چگالی به کار برده شده در محاسبه آن مقطع گرانی که حداقل تشابه با تغییرات توپوگرافی را دارد، به عنوان چگالی مورد قبول برای محاسبات در نظر گرفته می‌شود. در این روش باید شناسایی کافی از زمین‌شناسی منطقه انجام بگیرد. در انتخاب مقطع مورد نظر باید دقت کرد که مقطع در محلی انتخاب شود که آنومالی خاصی وجود نداشته باشد، همبری سازندهای مختلف زمین‌شناسی را قطع نکند و مقطع از محل‌هایی که رسوبات آبرفتی گسترش دارند عبور داده نشود.

۳-٤-۲- پردازش داده‌ها

پس از تعیین چگالی سازندهای زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه و انجام کلیه تصحیحات برای هر ایستگاه، مقادیر تصحیح شده میدان گرانی محاسبه می‌شود. برای پردازش داده‌ها بر مبنای میدان گرانی اندازه‌گیری شده، نقشه‌ها و دیاگرام‌های متعددی تهیه می‌شود که عبارتند از:

الف- نقشه آنومالی بوگه و آنومالی باقیمانده

این نقشه بر مبنای میدان گرانی اندازه‌گیری شده برای هر ایستگاه و اعمال تصحیحات لازم، تهیه می‌شود و مبنای تعبیر و تفسیرهای گرانی است و باید با پربندی و با مقیاس مناسب تهیه شود. در جدول ۳-۲ فاصله ایستگاه‌ها از یکدیگر، فاصله خطوط پربندی و تعداد ایستگاه‌ها در هر کیلومتر مربع برای نقشه‌هایی با مقیاس مختلف ارایه شده است.

جدول ۳-۲- فاصله ایستگاه‌ها از یکدیگر، فاصله خطوط پربندی و تعداد ایستگاه‌ها در هر کیلومترمربع در مقیاس‌های متفاوت

تعداد ایستگاه‌ها در هر کیلومتر مربع	فاصله خطوط پربندی (میلی‌گال)	فاصله ایستگاه‌ها (متر)	مقیاس نقشه
۰/۰۴-۰/۱	۲-۵	۲۵۰۰-۵۰۰۰	۱:۵۰۰،۰۰۰ تا ۱:۱۰۰۰،۰۰۰
۰/۱-۰/۲۵	۱-۲	۱۰۰۰-۲۰۰۰	۱:۲۰۰،۰۰۰
۰/۲۵-۱	۰/۵-۱	۵۰۰-۱۰۰۰	۱:۱۰۰،۰۰۰
۲-۳۰	۰/۵-۱	۱۰۰-۵۰۰	۱:۵۰،۰۰۰
۴-۵۰	۰/۲۵-۰/۵	۵۰-۲۵۰	۱:۲۵۰۰۰
۲۰-۲۰۰	۰/۱-۰/۲	۲۰-۵۰	۱:۱۰،۰۰۰
۱۰۰-۵۰۰	۰/۰۵-۰/۱	۱۰-۵۰	۱:۵۰۰۰

۱:۲۰۰۰	۱۰-۲۰	۰/۰۲-۰/۵	۲۰۰۰-۱۰۰۰۰

از نقشه آنومالی بوگه، دو آنومالی منطقه‌ای و باقیمانده نتیجه‌گیری می‌شود. نقشه آنومالی بوگه شامل تغییرات گرانی بر اساس اطلاعات حاصل ازتغییرات چگالی سنگ‌ها است. برای مشخص کردن اثرات تغییرات چگالی محلی که در مطالعات اکتشافی مورد توجه است، باید مقادیر آنومالی منطقه‌ای را از آنومالی بوگه جدا کرد و بدین ترتیب آنومالی باقیمانده معلوم می‌شود.

آنومالی منطقه‌ای – آنومالی بوگه = آنومالی باقیمانده

تفسیرهای مقدماتی برای مشخص کردن آنومالی‌هایی است که منشا آن‌ها در ساختمان‌های زیرزمینی قرار دارد. هر چه بیشتر این ساختمان‌ها عمیق باشند اثر تغییرات آن‌ها در پربندی نقشه بوگه هموار می‌شود. بدین ترتیب با کم کردن تغییرات آرام و منظم که در رابطه با ساختمان‌های زمین‌شناسی است آنومالی باقیمانده به دست می‌آید. برای مشخص کردن آنومالی‌های منطقه‌ای روش‌های زیر را می‌توان به کار گرفت:

– مقدار آنومالی منطقه‌ای برای یک نقطه را می‌توان به وسیله آنومالی بوگه مشاهده شده در تعدادی از ایستگاه‌های مجاور این نقطه در محدوده یک دایره در نظر گرفت. این مورد را می‌توان در وسعت زیادی اعمال کرد و مقادیر آنومالی منطقه‌ای را به دست آورد.

– بررسی خطوط هم‌گرانی و رسم منحنی‌های هموار شده و رفع آنومالی‌های قابل حذف، که در این صورت آنومالی باقیمانده به صورت گویاتری در نقشه ظاهر می‌شود.

– با در نظر گرفتن مقاطعی تغییرات گرانی ایستگاه‌های آن رسم می‌شود. در مقاطعی که آنومالی وجود دارد با توجه به گرادیان آنومالی منطقه‌ای که تقریبا ثابت است، می‌توان تراز آنومالی منطقه‌ای را رسم کرد که در نیمرخ‌ها تغییرات آنومالی منطقه‌ای عموما به صورت خطی است.

ب– نقشه تغییرات مشتق اول و دوم

مشتق دوم میدان گرانی "g یا $\frac{\partial g}{\partial z}$ اندازه‌گیری انحنای میدان گرانی به دلیل تغییر چگالی سنگ‌ها است و برای نشان دادن ارتباط بین "g و نقشه آنومالی باقیمانده تهیه می‌شود. اثر میدان گرانی در مشتق دوم بیشتر است و با تهیه نقشه تغییرات مشتق دوم آنومالی‌های سطحی مشخص‌تر می‌شود.

پ– نقشه‌فراسو و فروسو

با محاسبات ریاضی می‌توان تغییرات میدان گرانی اندازه‌گیری شده را به افق‌های بالاتر و یا پایین‌تر نسبت داد و نقشه‌های تغییرات میدان گرانی را تهیه کرد که نقشه‌های فراسو و فروسو نامیده می‌شوند. با تهیه نقشه‌های فراسو اثر آنومالی‌های سطحی کمتر شده و آنومالی‌ها به صورت هموارتر ظاهر می‌شوند. تهیه نقشه‌های مختلف برای سطوح متفاوت و یا به عبارتی ادامه فراسو روشی است که آنومالی‌های سطحی و محلی را از آنومالی‌های عمیق‌تر جدا می‌کند و منشا آنومالی مشخص‌تر می‌شود. با تهیه نقشه‌های فروسو اندازه‌گیری‌ها به سطوح نزدیک‌تر منشا آنومالی نسبت داده می‌شوند. اگر ادامه فروسو بیشتر از عمق منشا آنومالی‌ها باشد تغییرات اندازه‌گیری شدیدتر می‌شود و در بعضی مواقع می‌توان با انجام این عمل و مشخص کردن حداکثر تغییرات میدان، تخمینی از عمق راس منشا آنومالی به دست آورد.

ت– پروفیل‌های مدلسازی

پس از مشخص کردن محدوده آنومالی‌ها و تفسیرهای کیفی با انتخاب تعدادی از مقاطع که از مرکز آنومالی‌عبور می‌کند و با استفاده از نرم‌افزارهای موجود، آنومالی‌گرانی مدلسازی شده و اطلاعات بیشتری از منشا آنومالی در ارتباط با گستره و عمق آن‌به دست می‌آید.

ث– نقشه موقعیت و تفسیر

در این نقشه علاوه بر محل ایستگاه‌ها، مقاطع و ایستگاه مبنا، اطلاعات کلی دیگر از قبیل محل حفاری‌های اکتشافی انجام شده، ترانشه‌ها و غیره آورده می‌شود. همچنین محدوده آنومالی‌ها، گستره آن‌ها و محل حفر گمانه‌های اکتشافی نیز ارایه می‌شود.

۳–٤–۳- تفسیرهای گرانی‌سنجی

در تفسیرهای گرانی‌سنجی در مرحله اول کلیه داده‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند و با تعیین چگالی سنگ‌ها، تصحیحات لازم بر روی داده‌ها اعمال می‌شود. سپس نقشه آنومالی بوگه تهیه می‌شود. تعبیر و تفسیر نتایج همراه با اطلاعات زمین‌شناسی، حفاری، چگالی سنگ‌ها و هر نوع اطلاعات دیگر منطقه به عمل می‌آید. سپس مناطق وقوع آنومالی‌ها زون‌بندی می‌شوند. آنومالی‌های مثبت (اضافه شدن گرانی) را می‌توان به دلیل وجود زون‌های با چگالی زیاد تفسیر کرد. در مناطقی با آنومالی منفی، موادی مانند نمک به صورت گنبد نمکی و یا زون‌های خرد شده و کارست و نظایر آن وجود دارد، انجام تفسیرهای کمی در مورد نتایج گرانی‌سنجی مشکل است و نمی‌توان ارقام و درصدی در مورد مواد معدنی ارایه کرد. با استفاده از الگوهای مختلف که نشان دهنده توزیع مختلف جرم هستند آنومالی‌ها مقایسه می‌شوند و تفسیرهای کیفی در مورد آن‌ها انجام می‌گیرد و بالاخره با انجام مدلسازی بر روی مقاطع گرانی مشخصات منشا آنومالی‌ها از جمله گستره و عمق آن‌ها شناسایی می‌شوند.

فصل ۴

راهنمای مطالعات لرزه‌نگاری

"شکست مرزی–بازتابی"

٤-١- آشنایی

لرزه‌نگاری یکی از روش‌های مهم مطالعات اکتشافات ژئوفیزیکی است. این روش بر اساس ایجاد امواج الاستیک (لرزه‌ای) مصنوعی در نزدیکی سطح زمین با استفاده از چشمه‌های انفجاری یا غیرانفجاری پایه‌گذاری شده است. از امواج طبیعی زلزله نیز در مواردی برای اهداف اکتشافی استفاده می‌شود. در این روش خصوصیات سینماتیکی و دینامیکی محیطی که امواج لرزه‌ای مختلف در آن از چشمه تا نقطه ثبت حرکت می‌کنند، مورد مطالعه قرار می‌گیرد. این امواج ضمن حرکت در محیط، در برخورد با مرزهای زمین‌شناسی دچار بازتاب، شکست و پراکندگی می‌شوند. حرکت امواج در محیط باعث ارتعاش ذرات محیط می‌شود که در سطح زمین و یا درون گمانه توسط گیرنده‌ها (ژئوفون) به سیگنال‌های ضعیف الکتریکی تبدیل می‌شود. این سیگنال‌ها بعد از تقویت در لرزه‌نگار به صورت رقومی ثبت می‌شود. مدت زمان لازم برای ثبت امواج لرزه‌ای در مدل هندسی محیط بستگی به عمق، ضرایب کشسان و سرعت انتشار موج در سنگ دارد. با استفاده از رابطه بین زمان دریافت امواج با عمق و سرعت سنگ‌ها، می‌توان ساختارهای زمین‌شناسی نظیر خصوصیات و نحوه چینه‌بندی ساختمان‌های طاقدیسی و زون‌های گسلی را مورد مطالعه قرار داد.

٤-٢- معیارهای مطالعات لرزه‌نگاری

مطالعات لرزه‌نگاری چه با روش شکست مرزی و چه با روش بازتابی برای تعیین ساختار هندسی محیط زمین‌شناسی و تعیین معیارهای کشسان محیط به کار می‌رود. معیار مطالعات لرزه‌نگاری بر پایه معیارهای ساختاری استوار است که به صورت زیر بیان می‌شود.

٤-٢-١- لرزه‌نگاری عمیق

لرزه‌نگاری عمیق برای مطالعات ۵ تا ۱۰ کیلومتر تا چند ده کیلومتر به کار می‌رود که با روش سونداژ لرزه‌ای عمیق یا پروفیلی با امواج شکست مرزی و در مواردی امواج بازتابی اجرا می‌شود. چشمه امواج در بیشتر موارد انفجاری است. ثبت ارتعاشات با فرکانس‌های خیلی پایین (HZ ۲۰-۱) در فواصل ۵۰ تا ۳۰۰ کیلومتر از محل انفجار انجام می‌گیرد. زمین بر اساس داده‌های لرزه‌نگاری عمیق، به مناطقی مختلف از نظر سرعت امواج تراکمی و برشی تقسیم شده است. لرزه‌نگاری عمیق برای موارد زیر کاربرد دارد:

- تقسیم‌بندی زمین به بلوک‌های مختلف
- برداشت مرز پوسته زمین (سطح موهو)
- تفکیک مرزهای پوسته زمین، گسل‌های عمیق و انواع مختلف پوسته زمین
- مطالعه سطح پی‌سنگ بلورین

٤-٢-٢- لرزه‌نگاری ساختاری

لرزه‌نگاری ساختاری برای برطرف شدن ابهام‌های زمین‌شناسی ساختاری و در مواردی برای تفکیک سطح پی‌سنگ و لایه‌های پرسرعت حوزه‌های رسوبی استفاده می‌شود.

٤-٢-٣- لرزه‌نگاری اکتشافی نفت و گاز

با اجرای لرزه‌نگاری به روش بازتابی ساختاری، مناطق مستعد دارای نفت و گاز در خشکی و آب تعیین می‌شود.

٤-٢-٤- لرزه‌نگاری اکتشافی کانسارها

با استفاده از روش شکست مرزی می‌توان تغییرات عمق، سرعت مرزی، زون‌های شکسته و خرد شده را تعیین کرد. استفاده از لرزه‌نگارهای فرکانس بالا (فرکانس ارتعاشی از ۱۰۰ تا ۴۰۰ هرتز) تفکیک‌پذیری نگاشت لرزه‌ای را افزایش می‌دهد. اهداف لرزه‌نگاری در اکتشاف کانسارها به شرح زیر است:

- تعیین ضخامت روباره، تعیین سطح سنگ‌های درجا و ضخامت زون‌های هوازده
- پیدا کردن ساختارهای مستعد تشکیل کانسار
- تعیین لایه‌های پرشیب درسنگ‌های دگرگونی و نفوذی مدفون
- مسیریابی خطوط گسلی و تکتونیزه، زون‌های خرد شده و درزه‌ها

٤-٢-٥- لرزه‌نگاری مهندسی و آب‌شناسی

این روش برای عمق‌های کم و با هدف مطالعه خواص فیزیکی، مکانیکی و مقاومت سنگ‌ها انجام می‌شود.

٤-٣- اصول تئوری لرزه‌نگاری مرزی

الف- امواج لرزه‌ای

امواجی که باعث تغییر شکل الاستیک در جسم می‌شود و می‌تواند از انفجار مواد ناریه، ضربه‌های پتک، سقوط آزاد وزنه و نظایر آن‌ها ایجاد شود. امواج لرزه‌ای به صورت پیکری (طولی و برشی) و یا سطحی (رایلی و لاو) هستند. سرعت انتشار امواج پیکری از رابطه‌های (۴-۱) و (۴-۲) محاسبه می‌شود:

$$V_s = \sqrt{\mu / \rho} \qquad (۴-۱)$$

$$V_p = \sqrt{(\lambda + 2\mu)/\rho} \qquad (۴-۲)$$

در آن‌ها λ ضریب لامه، μ مدول برشی، ρ چگالی سنگ، V_s سرعت موج رایلی و V_p سرعت موج برشی است.

سرعت انتشار موج رایلی کمتر از موج برشی ($V_R \approx 0.9V_S$) است. در جدول‌های ۴-۱ و ۴-۲ سرعت انتشار امواج تراکمی برای سنگ‌های مختلف ارایه شده است.

جدول ٤-١- مقادیر سرعت امواج طولی و عرضی در سنگ‌های رسوبی

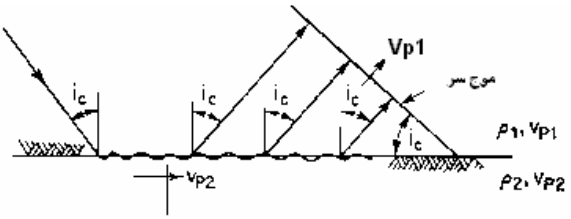
سنگ‌شناسی	Vs	Vp	سنگ‌شناسی	Vs	Vp
شیل رسی	-	۱/۷۸-۴/۷۴	برش	-	۱/۴۵-۵/۶
اسلیت	۲/۸۶	۲/۳-۶/۶۵			
گچ	> ۳	۱/۷-۴/۲	کنگلومرا	-	۱/۴۵-۵/۶
سنگ آهک ارگانیکی	-	۳-۳/۳	گراول	-	۱/۷-۵/۴
سنگ آهک	۲/۷۵-۳/۵۹	۱-۷	شن	-	۰/۲-۲
دولومیت		۰/۹-۷/۶	ماسه سنگ	-	۰/۸-۴/۵
مارن		۱/۳-۴/۵	شیل	-	۱/۴۵-۵/۱۸
انیدریت	-	۱/۵-۶	کوارتزیت	-	۵/۳-۶/۳۵
سنگ گچ	-	۱/۵-۴/۶	گل رقیق	-	۱/۴۶-۱/۶۸
سنگ نمک	-	۳/۵-۵/۵	گل رسی		۱/۵-۱/۵۴
کارنالیت	-	۴/۴-۶/۵	گل رسی گل آهکی رسی		۱/۴۹-۱/۵۱ ۱/۴۴-۱/۵
سیلویت	-	۴/۴-۶/۵	رس مرطوب		۱/۱-۲/۵
منیتیت	۳/۳۶	۵/۹۶	رس آرژیلیکی	۰/۵۹	۰/۳-۳
هماتیت	۳/۱۲-۳/۴۲	۷/۰۴		—	۰/۹-۴/۸
زغال قهوه‌ای	-	۲/۶-۲/۷			
زغال سخت	-	۱/۷-۲/۶			
آنتراسیت	-	۲/۵-۳/۵			

جدول ٤-٢- مقادیر سرعت امواج طولی و عرضی در سنگ‌های آذرین و دگرگونی

سنگ‌ها و کانی‌های متامورفیکی ماگمایی و مشتق شده					
سنگ‌شناسی	Vs	Vp	سنگ‌شناسی	Vs	Vp
بازالت	۲/۷۲-۳/۲	۲/۵۲-۶/۴	دونیت	۳/۶۸-۴/۸۳	۶-۸/۷۷
آندزیت	۲/۷۳	۵/۱۹	پریدوتیت		۷/۸-۸/۷
دیاباز	۳/۴۹-۳/۸۴	۶/۱۴-۶/۹۴	پیروکسنیت	–	۷/۸-۸/۷
توف	–	۱/۸۹-۲/۳۸	سرپانتینیت	۲/۷۱-۳/۸۳	۳/۷-۶/۸۴
توف خاکستری	۰/۸۳	۲/۱۶	گابرو	۳/۴۲-۳/۸۴	۵/۸-۷/۴
شیست کوارتزی	-	۴/۸-۶/۹۷	آنورتوزیت	۳/۵۶-۳/۸۱	۵/۷-۷/۲۱
آمفیبولیت	۳/۹-۴/۳	۶/۵-۷/۳۵	لابرادوریت	–	۶/۱۷-۷/۰۵
هورنبلندیت	> ۳	۵/۹۹-۶/۲۱	دیوریت	۳/۰۶-۳/۵۵	۵/۷۸-۶/۱۳
اکلوژیت	-	۵/۲-۸	کوارتز دیوریت	۳/۴-۳/۸	۵/۱۳-۶/۷
گنایس (مسکویت-بیوتیت)		۵/۲-۶/۳۵	سینیت	۳-۵/۴	۵/۸-۶/۴۵
پارا و ارتوگنیس	۳/۴۳-۳/۶۱	۳/۵-۷/۵	گرانیت	۲/۷-۳/۸	۳/۷-۶/۵۱
سنگ مرمر	۲/۰۲-۳/۸۶	۳/۷۵-۶/۹۴	نفلین‌سینیت	۲/۶-۳/۴۵	۵/۵-۶/۴۵

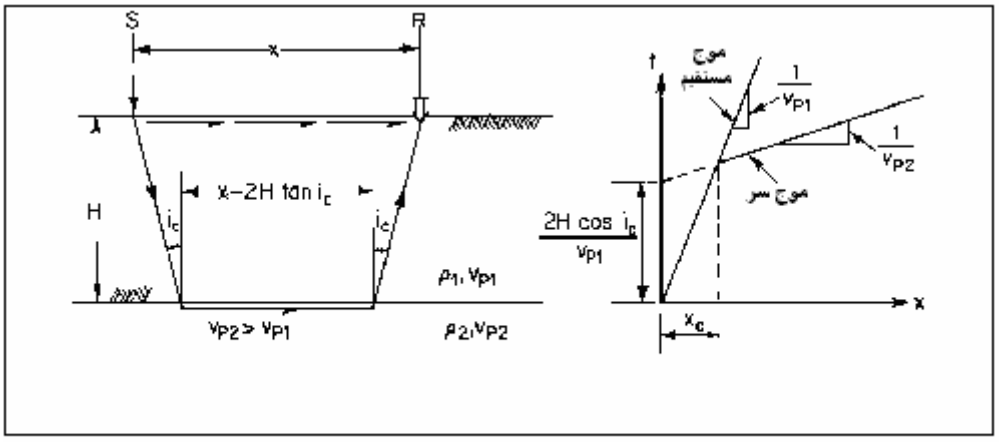
ب- شکست مرزی

اصول فیزیکی لرزه‌نگاری شکست مرزی، شکست امواج از لایه‌های شبه‌افقی است. اگر سرعت در لایه زیرین (V_{i+1} ، $V_{i+1} > V_i$) بیشتر از لایه فوقانی (V_i) باشد در مرز لایه‌ها موج شکست مرزی یا موج سر[1] ایجاد می‌شود. این موج در مرز بین دو لایه به موج غلطشی تبدیل می‌شود و جبهه موج آن سریع‌تر از جبهه موج در لایه اول حرکت می‌کند. بعد از مدتی این ارتعاشات به سطح زمین می‌رسد. فاصله بین محل ضربه یا انفجار و اولین نقطه خروج موج شکست مرزی در سطح زمین قابل اندازه‌گیری است و تابع ضخامت لایه و سرعت مرزی لایه‌های دو طرف مرز است. با روش شکست مرزی علاوه بر تعیین مرز لایه‌بندی می‌توان سرعت انتشار موج در طول مرز لایه‌ها را نیز تعیین کرد. از داده‌های ثبت شده که نگاشت لرزه‌ای نامیده می‌شود، زمان دریافت اولین موج در ردهای لرزه‌ای استخراج شده و منحنی زمان- فاصله یعنی $t = f(x)$ رسم می‌شود. x فاصله بین چشمه موج و نقطه ثبت و t زمان است. منحنی زمان-فاصله در حل روش وارون برای تعیین موقعیت و شکل مرز لایه‌ها و تعیین سرعت انتشار امواج در لایه‌ها استفاده می‌شود. شکل ۴-۱ موج انکساری سر از دو انکسار متوالی و شکل۴-۲ مسیر پرتوها و منحنی‌های فاصله- زمان موج مستقیم و سر را نشان می‌دهند.



شکل ٤-١- موج انکساری سر از دو انکسار متوالی با زاویه بحرانی ایجاد شده است.

1- Head wave

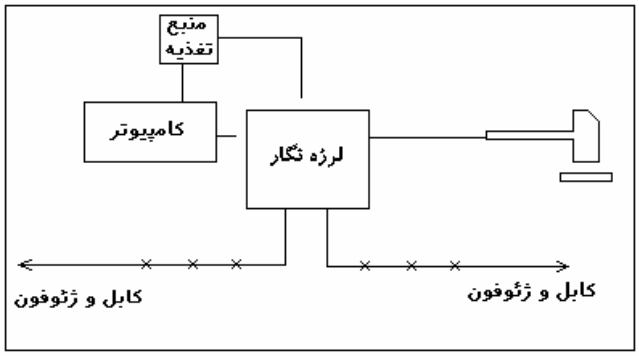


های فاصله- زمان موج مستقیم و موج سرشکل ٤-۲- مسیر پرتوها و منحنی

٤-۳-۱- روش برای لرزه‌نگاری شکست مرزی

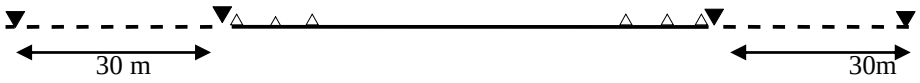
در اکتشاف با ر ں شکست مرزی آرایش برداشت معمولا به صورت نیمرخ‌های طولی در امتداد خط راست اجرا می‌شود. چشمه امواج با ضربات متو ، پتک ایجاد می‌شود. ارتعاشات توسط ژئوفون‌ها به سیگنال‌های ضعیف الکتریکی تبدیل می‌شود و بعد از تقویت در لرزه‌نگار به صورت رقومی ثبت می‌شود. در بیشتر موارد اندازه‌گیری و ثبت امواج شکست مرزی با سیستم Z-Z یعنی جهت ارتعاشات به صورت عمودی و ثبت با ژئوفون‌ها نیز در وضعیت قائم انجام می‌گیرد. در مطالعات کم عمق از ۲۵-۱۵ متری، برای حصول دقت و جزییات، فواصل ژئوفون‌ها تا ۲ متر نیز انتخاب می‌شود. برای مطالعات عمیق با چشمه انفجاری، فاصله ژئوفون‌ها چندین ۱۰ متر انتخاب می‌شود. معمولا برای مقاطع نامعلوم حداقل ۵ نگاشت لرزه‌ای لازم است. این نگاشت‌ها از چشمه‌های امواج در ابتدا، وسط، انتها و در فواصل معینی از ابتدا و انتهای نیمرخ که دورافت[1] نامیده می‌شود، حاصل می‌شود. هدف از ایجاد دورافت افزایش دادن عمق نفوذ امواج لرزه‌ای در محدوده نیمرخ و کسب نشانه‌هایی از لایه‌های عمیق‌تر است.

شکل ۴-۳طرح‌واره اجرای لرزه‌نگاری شکست مرزی به روش ضربه‌ای را نشان می‌دهد. شکل ۴-۴ آرایش ژئوفون‌ها و چشمه‌های موج در امتداد نیمرخ را ارایه می‌کند.



نگاری شکست مرزی‌واره سیستم اجرای لرزه‌شکل ٤-۳- طرح

1- Offset

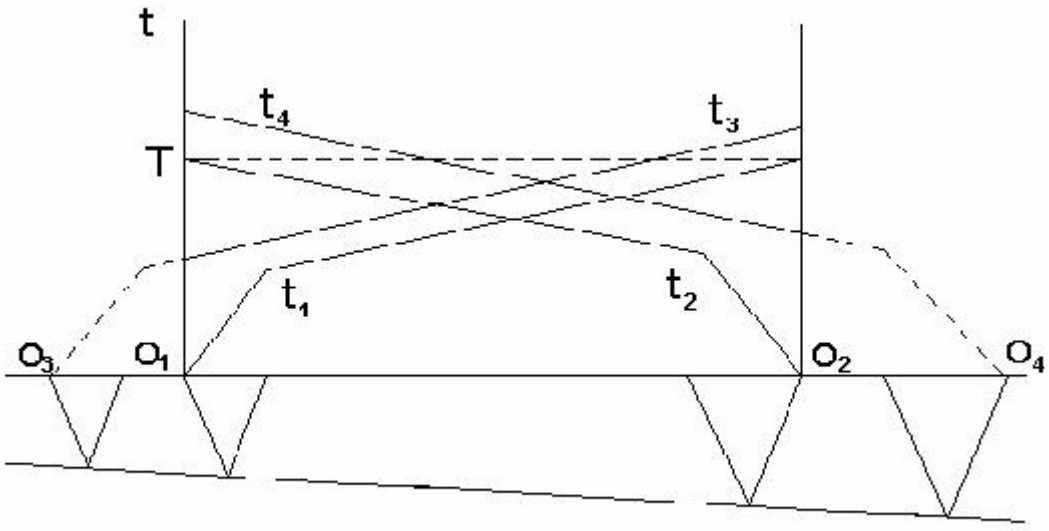


شکل ٤-٤- آرایش ژئوفون‌ها و چشمه‌های امواج در امتداد نیمرخ
▼ محل چشمه‌های امواج (ضربه پتک)

٤-٣-٢- اصول تفسیر داده‌های صحرایی شکست مرزی

مراحل تفسیر داده‌های لرزه‌ای شکست مرزی به شرح زیر است:

- بعد از اتمام برداشت صحرایی، زمان‌های دریافت اولین موج در نگاشت‌های لرزه‌ای استخراج می‌شود.
- منحنی‌های زمان- فاصله در امتداد نیمرخ در یک نمودار (مطابق شکل۴-۵) رسم می‌شود.
- از روی منحنی‌ها وضعیت لایه‌بندی مقطع به صورت کیفی تعیین می‌شود. تغییر شیب منحنی‌های زمان- فاصله نشان دهنده لایه‌های مختلف است.
- اگر منحنی‌های مستقیم[1] و وارون[2] متقارن باشند لایه‌بندی افقی است و یکی از این منحنی‌ها برای تعیین ضخامت لایه‌ها کافی است.
- اگر منحنی‌های مستقیم و وارون متقارن نباشند وضعیت لایه‌بندی در منطقه به صورت شیب‌دار است.



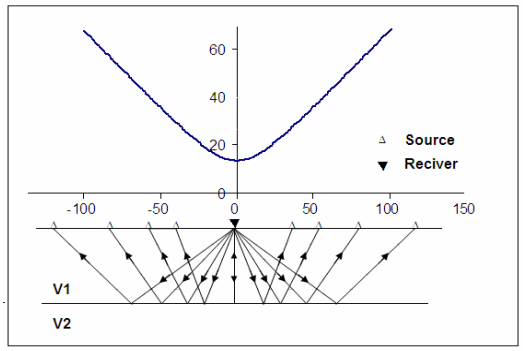
نگاری انکساری‌ای اجرای عملیات لرزه‌شکل ٤-٥- سیستم ٤ نقطه

1-Direct
2- Back

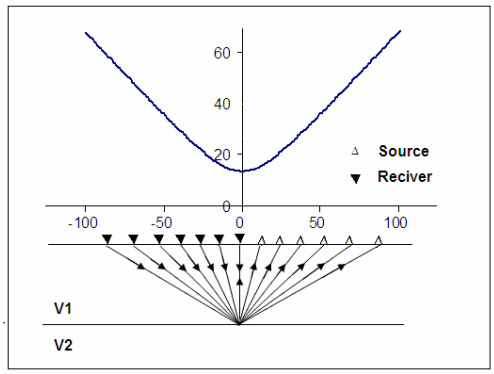
- اگر شکل منحنی‌های زمان- فاصله مستقیم نباشد ممکن است سرعت لایه‌ها به طور جانبی تغییر کند و یا ضخامت آن‌ها متغیر باشد. در این حالت می‌توان مقطع و تغییرات ضخامت لایه‌ها را با روش‌هایی مانند $t^{\pm}$ تعیین کرد.
- اگر منحنی‌های زمان- فاصله خطی نباشد ممکن است محیط پیوسته باشد و سرعت موج در محیط با عمق تغییر می‌کند. در این حالت برای محاسبه تغییرات سرعت از روش Herglots-Wiechert استفاده می‌شود.

٤-٤- اصول تئوری لرزه‌نگاری بازتابی

لرزه‌نگاری بازتابی معمولا به صورت چشمه مشترک و یا نقطه عمقی مشترک[1] اجرا می‌شود. در شکل‌های ۴-۶ و ۴-۷ اصول هر دو روش نشان داده شده است. منحنی زمان- فاصله هر دو روش هذلولی است.



شکل ٤-٦- پرتوهای موج بازتابی و منحنی زمان- فاصله با چشمه مشترک



شکل ٤-٧- پرتوهای موج بازتابی و منحنی زمان- فاصله با روش CDP

امروزه عموما در اکتشافات عمیق از روش CDP استفاده می‌شود. نتیجه لرزه بازتابی CDP به صورت مقطع زمانی در امتداد نیمرخ ارایه می‌شود. در مقطع زمانی CDP مرز لایه‌ها و چینه‌بندی محیط به صورت محورهای هم‌فاز ظاهر می‌شوند.

٤-٤-١- روش اجرای لرزه‌نگاری بازتابی نقطه عمق مشترک

1- Common Deep Point (CDP)

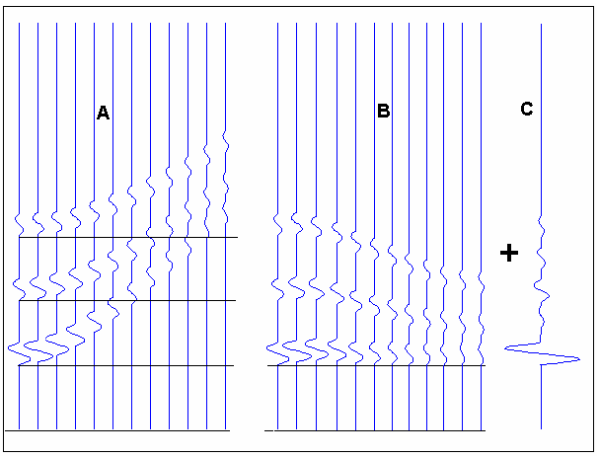
برای اجرای روش CDP از سیستمی استفاده می‌شود که بتوان از هر نقطه در مرز لایه، موج بازتابی با فولد زیاد ثبت کرد. روش CDP بیشتر دوبعدی و در امتداد نیمرخ‌های طولی اجرا می‌شود. در مواردی که تعداد فولد کمتر از ۱۲ باشد ($n \leq 12$) از سیستم ۲۴ کاناله استفاده می‌شود. فاصله بین چشمه‌های لرزه‌ای (Δl) مضربی از فاصله بین ژئوفون‌ها (Δx) انتخاب می‌شود. فاصله بین چشمه‌ها بر حسب تعداد فولد، (n) از رابطه ۴-۳ محاسبه می‌شود که در این رابطه S تعداد کانال است.

$$\Delta l = s \times \Delta x \ / \ 2n \qquad (۳-۴)$$

برای تامین ۲۴ فولد، از لرزه‌نگار ۴۸ کاناله استفاده می‌شود. برای هر نقطه در مرز بازتاب، یک نگاشت لرزه‌ای[1] CDP حاصل می‌شود که از رد لرزه‌ای[2] امواج یک بار بازتاب از نقطه عمق مشترک تشکیل شده است. هر نگاشت لرزه‌ای CDP از مجموع رد لرزه‌ای نیمرخ لرزه‌ای (از هر نیمرخ یک رد لرزه) حاصل می‌شود.

٤-٤-۲- روش محاسبه نگاشت لرزه‌ای زمانیCDP

ردهای نگاشت لرزه‌ای چشمه مشترک از نقاط مختلف در عمق بازتاب می‌یابد. مجموعه نگاشت‌های مربوط به هر عمق نگاشت CDP نامیده می‌شود. سپس روی نگاشت CDP تصحیح استاتیکی مربوط به زون کم سرعت و جابه‌جایی نرمال[3] اعمال می‌شود. ردهای لرزه‌ای هر عمق انبارش[4] می‌شوند. بعد از این کار برای هر نقطه در مرز، یک رد لرزه‌ای حاصل می‌شود. از کنار هم قرار دادن مجموعه ردهای CDP هر نقطه، مقطع زمانی CDP به دست می‌آید. شکل ۴-۸ مراحل مختلف این روش را نشان می‌دهد.



شکل٤-۸-A- نگاشت CDP در یک نقطه، B- نگاشت CDP بعد از تصحیح NMO، C- رد CDP

٤-٥- پردازش داده‌ها

1- Seismogram
2- Trace
3- NMO
4- Stack

پس از اتمام عملیات صحرایی و انجام کلیه پردازش‌های لازم برای تفسیر داده‌ها، نتایج قابل استفاده از مطالعات لرزه‌نگاری شکست مرزی و بازتابی به شرح زیر است:

٤-٥-١- نتایج مطالعات شکست مرزی

- مقطع لرزه‌ای که در آن لایه‌های موجود در محدوده عمق مورد مطالعه رسم شده است.
- مقاطع لرزه‌ای با اطلاعات زمین‌شناسی منطقه و نقشه‌های موجود تلفیق می‌شود و مقطع زمین‌شناسی ارایه می‌شود.
- سرعت امواج طولی و برشی هر لایه در مقطع لرزه‌ای- زمین‌شناسی نوشته می‌شود.
- تغییرات ضخامت و عمق لایه‌ها در هر مقطع همراه با مقادیر سرعت و مدول‌های دینامیکی در جدول ارایه می‌شود.

٤-٥-٢- نتایج مطالعات بازتابی

نتایج مطالعات لرزه‌نگاری بازتابی به صورت نقشه‌های زیر ارایه می‌شود:

- مقطع لرزه‌ای- زمانی CDP
- نقشه‌های ساختاری بر اساس افق‌های بازتاب قوی همراه با موقعیت گسل‌ها
- نقشه ضخامت تشکیلات زمین‌شناسی هم‌سن

موارد زیر باید در نقشه‌هایی که با استفاده از داده‌های لرزه‌ای تهیه می‌شود مشخص باشد:

- محدوده‌هایی که لایه‌های جابه‌جا در آن واقع شده است.
- زون‌هایی که لایه‌ها در آن به صورت گوشه‌دار و شیب‌دار قرار گرفته‌اند.
- سطوحی که دارای مورفولوژی و منشا مختلف هستند.
- نقشه‌های ساختمانی که با استفاده از نقشه‌های هم‌ضخامت و اطلاعات حفاری تهیه شده است.
- نقشه پیش‌بینی نفت و گازخیزی در افق‌های مختلف
- نقشه اولویت‌بندی برای مطالعات بعدی

مقیاس نقشه‌ها به مرحله مطالعات اکتشافی بستگی دارد و از ۱:۲۵،۰۰۰ تا ۱:۱۰،۰۰۰ تغییر می‌کند.

فصل ۵

ارایه گزارش و استاندارد نقشه‌ها

۵-۱- ساختار گزارش مطالعات ژئوفیزیکی

سرفصل‌ها و بخش‌های گزارش مطالعات ژئوفیزیکی به روش‌های مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی و لرزه‌نگاری به شرح زیر توصیه می‌شود.

چکیده

فهرست مطالب

کلیات

در این بخش موارد زیر آورده می‌شود:

- مشخصات قرارداد، کارفرما و مشاور، تاریخ شروع و خاتمه عملیات صحرایی، اسامی تکنسین‌ها، کارشناس و یا کارشناسان، مسوول گروه و نویسنده گزارش
- موقعیت جغرافیایی محدوده مطالعاتی و هرگونه اطلاعات در مورد آن از جمله راه‌های دسترسی
- خلاصه‌ای از زمین‌شناسی منطقه
- هدف از مطالعات

روش مورد استفاده در مطالعات ژئوفیزیکی

مطالعات ژئوفیزیک به روش مغناطیس‌سنجی

در این بخش به موارد زیر پرداخته می‌شود:

- ارایه اطلاعات کلی از روش مغناطیس‌سنجی
- دستگاه‌های مورد استفاده
- نحوه اجرای عملیات صحرایی و حجم برداشت‌ها
- نحوه پردازش تفسیرها و نرم‌افزارهای مورد استفاده

مطالعات ژئوفیزیک به روش گرانی‌سنجی

در این بخش به موارد زیر پرداخته می‌شود:

- ارایه اطلاعات کلی از روش گرانی‌سنجی
- دستگاه‌های مورد استفاده
- نحوه اجرای عملیات صحرایی و حجم برداشت‌ها
- نحوه پردازش تفسیرها و نرم‌افزارهای مورد استفاده

بررسی نتایج و تعبیر و تفسیر داده‌ها

بررسی نتایج و تعبیر و تفسیر داده‌های مغناطیس‌سنجی

در این بخش نتایج مطالعات که شامل تفسیر و بررسی نقشه‌های مختلف زیر است ارایه می‌شود:

- نقشه شدت کل مغناطیسی
- نقشه باقیمانده مغناطیسی
- نقشه‌های برگردان به قطب
- نقشه‌های مشتق اول و دوم
- نقشه‌های فراسو و فروسو
- دیاگرام‌های مدلسازی شده
- نقشه تفسیر و موقعیت
- نتیجه‌گیری کلی و پیشنهادها

بررسی نتایج و تعبیر و تفسیر داده‌های گرانی‌سنجی

در این بخش نتایج مطالعات که شامل تفسیر و بررسی نقشه‌های مختلف زیر است ارایه می‌شود:

- نقشه آنومالی بوگه
- نقشه آنومالی باقیمانده
- دیاگرام‌های مدلسازی شده
- نقشه موقعیت و تفسیر
- نتیجه‌گیری کلی و پیشنهادها

بررسی نتایج و تعبیر و تفسیر داده‌های لرزه‌نگاری

در این بخش موارد زیر ارایه می‌شود.

- مشخصات سیستم برداشت، حجم کار، نقشه موقعیت مقاطع، جدول
- بحث و بررسی نقشه‌های زیر و ارایه تفسیر و ارتباط آن‌ها با داده‌های زمین‌شناسی
- نقشه موقعیت
- مقاطع لرزه‌ای شکست مرزی (روش شکست مرزی)
- مقاطع لرزه‌ای– زمانی CDP دوبعدی 2D (در روش بازتابی)
- مشخصات و لاگ گمانه‌ها همراه با تغییرات سرعت با عمق (در صورت وجود)
- مقاطع لرزه‌ای عمقی CDP (در روش بازتابی)
- نقشه منحنی‌های تراز سرعت مقاطع لرزه‌ای (در محیط‌های پیوسته و گرادیانی)
- مقاطع مدلسازی شده در صورت نیاز
- نقشه موقعیت و تفسیر
- جدول تغییرات سرعت امواج در سنگ‌های موجود در محدوده مطالعات لرزه‌ای
- جدول تغییرات مدول‌های دینامیکی نظیر مدول یانگ، ضریب پواسون، مدول برشی و غیره

پیوست‌های گزارش

در این بخش کلیه داده‌های صحرایی به تفکیک برای هر منطقه و همچنین مختصات نقاط خط مبنا و ایستگاه‌های اندازه‌گیری و منحنی‌های زمان- فاصله، نگاشت‌های لرزه‌ای با ذکر موقعیت آن‌ها در نقشه موقعیت ارایه می‌شود.

۵-۲- استاندارد علامات و مشخصه‌های نقشه‌ها

راهنمای نقشه‌ها

توضیح علامت‌ها و اطلاعات نقشه‌های ژئوفیزیکی، در قسمت راهنمای نقشه آورده می‌شود. صفحه راهنما در اندازه A4 و در گوشه‌ای از نقشه بر حسب مورد آورده می‌شود تا پس از تا کردن نقشه، صفحه راهنما در رو قرار گیرد. صفحه راهنما شامل سه بخش بالایی، میانی و پایینی به شرح زیر است.

الف- بخش بالایی

بالای صفحه و در وسط، عنوان پروژه به فارسی و در زیر آن به انگلیسی آورده می‌شود.

ب- بخش میانی

شامل علامت‌های ژئوفیزیکی به کار رفته در نقشه به شرح زیر است:

شرح علامت‌ها به فارسی در سمت راست و معادل آن‌ها به انگلیسی در سمت چپ و خود علامت در وسط. علامت‌های ژئوفیزیکی بر اساس استاندارد روش‌ها شامل: محل ایستگاه‌های اندازه‌گیری، منحنی‌های پربندی با مقادیر کمی، گسل‌ها، محدوده‌ها و محورهای آنومالی، محل حفاری‌های اکتشافی پیشنهادی

پ- بخش پایینی

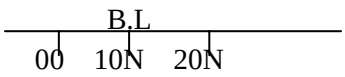
در پایین صفحه، راهنما به صورت جدول مشخصات شامل اطلاعات زیر به فارسی و انگلیسی قرار می‌گیرد:

- کارفرما (وزارت، سازمان‌ها و ...)
- عبارت"بررسی‌های ژئوفیزیکی"
- نوع بررسی و عنوان نقشه
- منطقه مورد مطالعه
- شماره نقشه و تاریخ
- مقیاس نقشه
- کنترل (امضای مسوول تهیه نقشه)

۵-۳- نقشه موقعیت

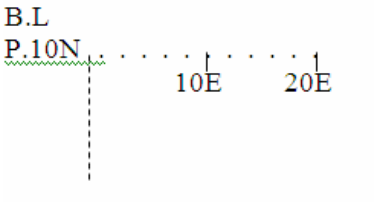
این نقشه علاوه بر اینکه نشان دهنده عارضه‌های طبیعی و مصنوعی و همچنین زمین‌شناسی محدوده مطالعه است باید شامل اطلاعات زیر باشد:

- خط مبنا که اغلب موازی امتداد زمین‌شناختی، عمود بر راستای نیمرخ‌های برداشت است با علامت B.L و همچنین شماره‌بندی مقاطع (شکل۵-۱)



شکل ۵-۱- خط مبنا

- نیمرخ‌های برداشت که ایستگاه‌های اندازه‌گیری در روی آن مشخص است و شماره مقطع در انتهای مقاطع نوشته می‌شود (شکل ۵-۲)، اگر طول مقاطع زیاد باشد هر ۱۰۰ یا ۲۰۰ متر فاصله آن‌ها از خط برداشت همراه با جهت برداشت نوشته می‌شود.



شکل ۵-۲- نیمرخ‌های برداشتی

۵-۴- نقشه‌های پربندی

الف- مغناطیس‌سنجی

شامل اطلاعات کلی استاندارد شده نقشه‌های پربندی و اطلاعات اختصاصی زیر است:

- نوع کمیت اندازه‌گیری شده (مولفه)، در راهنمای نقشه مشخص می‌شود.
- واحد مقادیر پربندی در راهنمای نقشه، اغلب بر حسب نانوتسلا مشخص می‌شود.
- مناطق بیشینه با علامت H و مناطق کمینه با علامت L نشان داده می‌شود.

ب- گرانی‌سنجی

شامل اطلاعات کلی استاندارد شده نقشه‌های پربندی و اطلاعات اختصاصی زیر است:

- نوع کمیت نشان داده می‌شود.
- نوع کمیت نشان داده شده در نقشه (گرانی، آنومالی بازماند، منطقه‌ای و نظایر آن) در راهنمای نقشه مشخص می‌شود.
- واحد مقادیر پربندی (اغلب بر حسب میلی‌گال) و با خطوط رنگی در راهنمای نقشه مشخص می‌شود.
- در مواقع لزوم، خط مبنا نیز روی این نقشه مشخص می‌شود.
- محدوده مناطق (زون‌های) آنومالی روی نقشه با خطچین ضخیم مشخص می‌شود.
- نقشه‌های سه‌بعدی برای هر یک از نقشه‌های پربندی شده تهیه می‌شود.

۵-۵- نمودارهای مدلسازی شده

الف-مغناطیس‌سنجی

شامل اطلاعات کلی استاندارد شده نمودارها و اطلاعات اختصاصی زیر است:

- نمودار مقدارهای اندازه‌گیری شده با خط ممتد با رنگ قرمز
- نمودارهای محاسبه شده با خطچین و با همان مقیاس منحنی اندازه‌گیری شده با رنگ آبی

ب-گرانی‌سنجی

- شامل اطلاعات کلی استاندارد شده نمودارها و اطلاعات اختصاصی زیر است:

- منحنی مقادیر اندازه‌گیری شده با خط ممتد با رنگ قرمز
- منحنی‌های محاسبه شده با خط‌چین و با مقیاس منحنی مقادیر اندازه‌گیری شده، با رنگ آبی
- مشخصات و اطلاعات به دست آمده از مدلسازی و مشخصات محل حفاری پیشنهاد شده

۵-٦- نقشه‌های تفسیری

الف- مغناطیس‌سنجی

بر اساس استاندارد روش پیمایش مغناطیس‌سنجی مشخصات و علایم عمومی و اختصاصی نقشه‌های تفسیری که بر مبنای اطلاعات مغناطیسی تهیه می‌شوند، به صورت زیر است:

- گسل‌ها و همبری‌ها
- محدوده‌هایی با شدت مغناطیسی زیاد
- مقاطع تغییرات شدت مغناطیسی برای تهیه دیاگرام‌ها
- محل حفاری‌های اکتشافی پیشنهادی با ذکر شماره آن

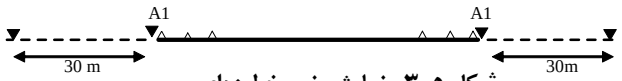
ب- گرانی‌سنجی

مشخصه‌ها و علامت‌های عمومی و اختصاصی نقشه‌های تفسیری تهیه شده بر مبنای اطلاعات گرانی، به شرح زیر است :

- گسل‌های ردیابی شده با شماره F1، F2 و ...
- محدوده آنومالی‌ها
- مقاطعی که از آن‌ها نمودارهای تفسیری تهیه شده است.
- محل حفاری‌های پیشنهادی با شماره و بر حسب اولویت

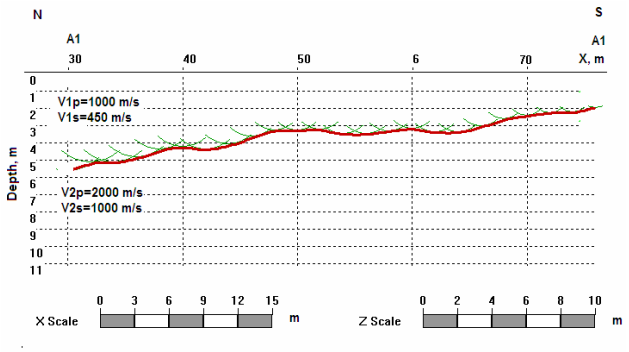
پ- لرزه‌نگاری

برای نشان دادن نیمرخ لرزه‌ای مطابق شکل ۵-۳ عمل می‌شود:



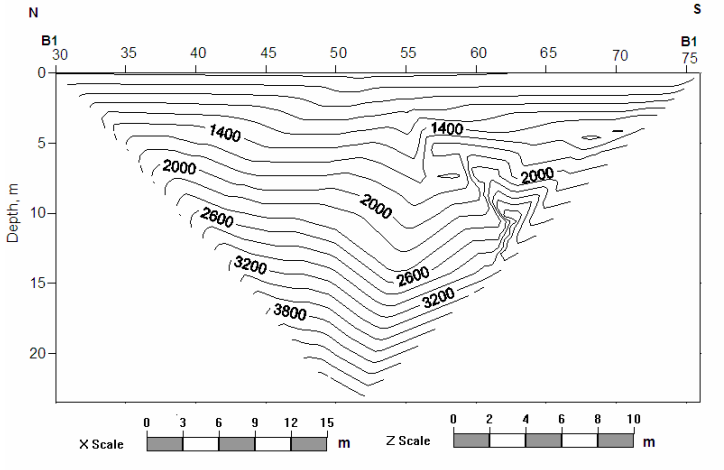
شکل ۵-۳- نمایش نیمرخ لرزه‌ای

- علامت▼ برای نشان دادن چشمه و △ برای نشان دادن ژئوفون‌ها به کار می‌رود.
- نیمرخ لرزه‌ای عموما به صورت خط راست پیوسته مشخص می‌شود (A1-A1).
- برای بیان دور افت از خط بریده استفاده می‌شود.
- نیمرخ‌های لرزه‌ای روی نقشه موقعیت بزرگ‌مقیاس، به صورت خط راست در راستای برداشت مشخص می‌شود.
- نیمرخ‌های لرزه‌ای روی نقشه موقعیت کوچک‌مقیاس، به صورت نقطه‌ای با ترکیبی از حروف بزرگ لاتین به صورت خط راست در راستای برداشت مشخص می‌شود.
- مختصات ابتدا و انتهای نیمرخ‌ها در سیستم UTM در جدولی آورده می‌شود.
- مقاطع لرزه‌ای شکست مرزی در محیط لایه‌ای مطابق شکل ۵-۴ تفسیر شده و ارایه می‌شود.



شکل ٥-٤- مقاطع لرزه‌ای شکست مرزی در محیط لایه‌ای

- مقاطع لرزه‌ای شکست مرزی در محیط پیوسته بعد از تفسیر به صورت منحنی‌های میزان تغییرات سرعت با عمق بیان می‌شود (شکل ٥-٥).



شکل ٥-٥- منحنی‌های میزان تغییرات سرعت با عمق

مقطع منحنی میزان لرزه‌ای دارای مقیاس خطی یا رقومی در امتداد افقی و قائم است و در زیر مقطع نوشته می‌شود.

- سرعت امواج طولی به صورت (V1p, V2p,...) و امواج عرضی به صورت (V1s, V2s,...) مطابق شکل در هر لایه نوشته می‌شود.

- جهت‌های جغرافیایی در سمت چپ و راست مقطع به صورت (N-S, NW-SE,....) نوشته می‌شود.

پیوست

چگالی و خودپذیری

مغناطیسی برخی کانی‌ها

جدول پ-۱- خودپذیری مغناطیسی برخی از سنگ‌ها و کانی‌ها

بر حسب (k× 10^{-6} "SI)

گرانیت	۲۰-۴۰۰۰
اسلیت	۰-۱۲۰۰
گابرو	۸۰۰-۷۶۰۰
بازالت	۵۰۰-۸۰۰۰
بازالت‌های اقیانوسی	۳۰۰-۳۶۰۰
سنگ آهک (با مگنتیک)	۱۰-۲۵۰۰
گنایس	۰-۳۰۰
ماسه‌سنگ	۳۵-۹۵۰
پیریت (کانه)	۱۰۰-۵۰۰
هماتیت (کانه)	۴۲۰-۱۰۰۰
منیتیت (کانه)	۱۰×۷-۱۰×۱۴
سرپانتین	۳۱۰۰-۷۵۰۰
گرافیت (دیامغناطیس)	-۸۰ تا -۲۰۰
کوارتز (دیامغناطیس)	-۱۵
گچ (دیامغناطیس)	-۱۳
سنگ نمک (دیامغناطیس)	-۱۰

جدول پ-۲- چگالی مرطوب برخی سنگ‌ها و کانی‌ها (gr/cm^3)

نوع سنگ	کانی یا سنگ		چگالی	چگالی متوسط
رسوبی (مرطوب)	روباره		-	۱/۹۲
	خاک		۱/۲-۲/۴	۱/۹۲
	خاک رس		۱/۶۳-۲/۶	۲/۲۱
	گراول		۱/۷-۲/۴	۲
	ماسه		۱/۷-۲/۳	۲
	ماسه‌سنگ		۱/۶۱-۲/۷۶	۲/۳۵
	شیل		۱/۷۷-۳/۲	۲/۴
	سنگ آهک		۱/۹۳-۲/۹	۲/۵۵
	دولومیت		۲/۲۸-۲/۹	۲/۷
	سنگ‌های رسوبی		-	۲/۵
سنگ‌های آذرین	ریولیت		۲/۳۵-۲/۷	۲/۵۲
	آندزیت		۲/۴-۲/۸	۲/۶۱
	گرانیت		۲/۵-۲/۸۱	۲/۶۴
	گرانودیوریت		۲/۶۷-۲/۷۹	۲/۷۳
	پورفیری		۲/۶-۲/۸۹	۲/۷۴
	کوارتزدیوریت		۲/۶۲-۲/۹۶	۲/۷۹
	دیوریت		۲/۷۲-۲/۹۹	۲/۸۵
	گدازه‌ها		۲/۸-۳	۲/۹
	دیاباز		۲/۵-۳/۲	۲/۹۱
	بازالت		۲/۷-۳/۳	۲/۹۹
	گابرو		۲/۷-۳/۵	۳/۰۳
	پریدوتیت		۲/۷۸-۳/۳۷	۳/۱۵
	آذرین اسیدی		۲/۳-۳/۱۱	۲/۶۱
	آذرین بازی		۲/۰۹-۳/۱۷	۲/۷۹
کانی‌های فلزی	اکسیدها و کربنات‌ها	بوکسیت	۲/۳-۲/۵۵	۲/۴۵
		لیمونیت	۳/۵-۴	۳/۷۸
		سیدریت	۳/۷-۳/۹	۳/۸۳
		ریولیت	۴/۱۸-۴/۳	۴/۲۵

ادامه جدول پ-۲- چگالی مرطوب برخی سنگ‌ها و کانی‌ها (gr/cm^3)

نوع سنگ	کانی یا سنگ		چگالی	چگالی متوسط
کانی‌های فلزی	اکسیدها و کربنات‌ها	منگنز	۴/۲-۴/۴	۴/۳۲
		کرومیت	۴/۳-۴/۶	۴/۳۶
		ایلمنیت	۴/۳-۵	۴/۶۷
		پیرولوسیت	۴/۷-۵	۴/۸۲
		مگنتیت	۴/۹-۵/۲	۵/۱۲
		فرانکلینیت	۵-۵/۲۲	۵/۱۲
		هماتیت	۴/۹-۵/۳	۵/۱۸
		کوپریت	۵/۷-۶/۱۵	۵/۹۲
		کاسیتریت	۶/۸-۷/۱	۶/۹۲
		ولفرامیت	۷/۱-۷/۵	۷/۳۲
	سولفیدها و آرسنیدها	اسفالریت	۳/۵-۴	۳/۷۵
		مالاکیت	۳/۹-۴/۰۳	۴
		کالکوپیریت	۴/۱-۴/۳	۴/۲
		استانیت	۴/۳-۴/۵۲	۴/۴
		استیبنیت	۴/۵-۴/۶	۴/۶
		پیروتیت	۴/۵-۴/۸	۴/۶۵
		مولیبدنیت	۴/۴-۴/۸	۴/۷
		مارکاسیت	۴/۷-۴/۹	۴/۸۵
		پیریت	۴/۹-۵/۲	۵
		برنیت	۴/۹-۵/۴	۵/۱
		کالکوسیت	۵/۵-۵/۸	۵/۶۵
		کبالتیت	۵/۸-۶/۳	۶/۱
		آرسنوپیریت	۵/۹-۶/۲	۶/۱
		بیسموتینیت	۶/۵-۶/۷	۶/۵۷
		گالن	۷/۴-۷/۶	۷/۵
		سینابر	۸-۸/۲	۸/۱
کانی‌های متامورفیکی	کوارتزیت		۲/۵-۲/۷	۲/۶
	شیست		۲/۳۹-۲/۹	۲/۶۴
	گریواک		۲/۶-۲/۷	۲/۶۵
	مرمر		۲/۶-۲/۹	۲/۷۵
	سرپانتین		۲/۴-۳/۱	۲/۷۸
	اسلیت		۲/۷-۲/۹	۲/۷۹
	گنایس		۲/۵۹-۳	۲/۸
	آمفیبولیت		۲/۹-۳/۰۴	۲/۹۶
	اکلوژیت		۳/۲-۳/۵۴	۳/۳۷

ادامه جدول پ-۲- چگالی مرطوب برخی سنگ‌ها و کانی‌ها (gr/cm^3)

نوع سنگ	کانی یا سنگ	چگالی	چگالی متوسط
کانی‌های غیرفلزی	نفت	۰/۶-۰/۹	-
	یخ	۰/۸۸-۰/۹۲	-
	آب دریا	۱/۰۱-۱/۰۵	-
	لیگنیت	۱/۱-۱/۲۵	۱/۱۹
	زغال‌سنگ نرم	۱/۲-۱/۵	۱/۳۲
	آنتراسیت	۱/۳۴-۱/۸	۱/۵
	گچ	۱/۵۳-۲/۶	۲/۰۱
	گرافیت	۱/۹-۲/۳	۲/۱۵
	سنگ نمک	۲/۱-۲/۶	۲/۲۲
	ژیپس	۲/۲-۲/۶	۲/۳۵
	کائولینیت	۲/۲-۲/۶۳	۲/۵۳
	ارتوکلاز	۲/۵-۲/۶	-
	کوارتز	۲/۵-۲/۷	۲/۶۵
	کلسیت	۲/۶-۲/۷	-
	انیدریت	۲/۲۹-۳	۲/۹۳
	بیوتیت	۲/۷-۳/۲	۲/۹۲
	منیزیت	۲/۹-۳/۱۲	۳/۰۳
	فلوریت	۳/۰۱-۳/۲۵	۳/۱۴
	باریت	۴/۳-۴/۷	۴/۴۷

خواننده گرامی

امور نظام فنی معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی ریـیس جمهـور، بـا گذشـت بـیش از سـی سـال فعالیـت تحقیقاتی و مطالعاتی خود، افزون بر پانصد عنوان نشریه تخصصی- فنی، در قالب آیـین‌نامـه، ضـابطه، معیـار، دستورالعمل، مشخصات فنی عمومی و مقاله، به صورت تالیف و ترجمه، تهیه و ابلاغ کرده است. نشریه حاضـر در راستای موارد یاد شده تهیه شده، تا در راه نیل به توسعه و گسترش علوم در کـشور و بهبـود فعالیـت‌هـای عمرانی به کار برده شود. فهرست نشریات منتشر شده در پایگاه اطلاع‌رسانی **nezamfanni.ir** قابل دسـتیابی می‌باشد.

امور نظام فنی

Islamic Republic of Iran
Vice Presidency for Strategic Planning and Supervision

A Guide to Magnetic, Gravity & Seismic Survey in Mineral Exploration

No. 594

Office of Deputy for Strategic Supervision
Department of Technical Affairs

nezamfanni.ir

Ministry of Industry, Mine and Trade
Deputy of Mine Affairs and Mineral Industries
Office for Mining Supervision and Exploitation
http://mimt.gov.ir

2013

این نشریه

راهنمایی برای مطالعات ژئوفیزیکی در اکتشافات معـدنی با استفاده از روش‌های مغناطیس‌سـنجی، گرانـی‌سـنجی و لرزه‌نگاری است و اطلاعات لازم را در مورد نحوه اسـتفاده و کاربرد این روش‌ها در اکتشافات ژئوفیزیکی ارایه می‌کند.

تمام 63 صفحه این سند مهر شده توسط:
[national cartoghraphic center [Stamp
شناسه ملی:14000193436
زمان مهر: 1400/11/13 14:02:52

تمام 63 صفحه این سند مهر شده توسط:
[national cartoghraphic center [Stamp
شناسه ملی:14000193436
زمان مهر: 1400/11/13 14:02:48