

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

جداسازی بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل با استفاده از تجزیه
مد تجربی (EMD)

دانشجو:

احمد مرادی

استاد راهنما:

علی نجاتی کلاته

استاد مشاور:

امین روشندل کاهو

پایان‌نامه جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

۱۳۹۲

دانشگاه صنعتی شاهرود

دانشکده: مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

گروه: اکتشاف معدن

پایان نامه کارشناسی ارشد آقای احمد مرادی

تحت عنوان:

جداسازی بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل با استفاده از تجزیه مد تجربی (EMD)

در تاریخ.....توسط کمیته تخصصی زیر جهت اخذ مدرک کارشناسی ارشد مورد ارزیابی

و با درجهمورد پذیرش قرار گرفت.

امضاء	استاد مشاور	امضاء	استاد راهنما
	دکتر امین روشندل کاهو		دکتر علی نجاتی کلاته

امضاء	نماینده تحصیلات تکمیلی	امضاء	اساتید داور
			دکتر
			دکتر

تقدیم به

پدر، مادر و همسر مهربانم

و تمام معلمان و استادان دلسوزم

که با گذشت و دل‌سوزی‌هایشان روی دیگر هستی را برایم ملموس نمودند

و تقدیم به

همه کسانی که دوستشان دارم.....

تشکر و قدردانی

خداوند عزیز و بزرگوار را سپاس که توفیق نگارش این پایان‌نامه را به من عطا فرمود. همچنین بر خود واجب می‌دانم که مراتب تشکر و قدردانی فراوان را به اساتید گرامی جناب آقای دکتر علی نجاتی و دکتر امین روشندل به خاطر تمام راهنمایی‌ها و حمایت‌های بی دریغ خود چه از منظر علمی و چه از منظر اخلاقی اعلام نمایم. از تمامی اساتید دوره کارشناسی ارشد خود کمال تشکر و قدردانی را دارم. و نیز از داوران محترم این پایان‌نامه جناب دکتر حمید آقاجانی و دکتر علیرضا عرب امیری که با نظرات سازنده‌ی خود موجب اعتلای هرچه بیشتر این پایان‌نامه شدند. در پایان از آقای محمد رضایی دانشجوی دکتری تخصصی معدن دانشگاه شاهرود به خاطر در اختیار قرار دادن داده‌های صحرائی نهایت تقدیر و تشکر را دارم.

تعهد نامه

اینجانب احمد مرادی دانشجوی دوره‌ی کارشناسی ارشد رشته ژئوفیزیک گرایش گرانی-سنجی از دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان‌نامه کارشناسی ارشد تحت عنوان: **جداسازی بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل با استفاده از تجزیه مد تجربی (EMD)** تحت راهنمایی آقای دکتر علی نجاتی کلاته متعهد می‌شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می‌گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه‌های رایانه‌ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) مربوط به دانشگاه صنعتی شاهرود می‌باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی‌باشد.

چکیده

تجزیه مد تجربی یکی از ابزارهای جدید برای تجزیه و تحلیل سیگنال‌ها می‌باشد. از این روش جدید در روش‌های میدان پتانسیل به منظور جداسازی بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای از محلی استفاده می‌شود. از روش‌های متداول جداسازی می‌توان به روش پنجره میانگین متحرک و آنالیز روند اشاره کرد، که روش‌هایی نیمه‌خودکار می‌باشند. به عبارت دیگر نظر مفسر به طور مستقیم در نتایج تاثیرگذار است. اساس روش EMD (تجزیه مد تجربی) فیلتر کردن مکانی یا زمانی سیگنال بر حسب مشخصات نقاط اکستrema می‌باشد. مولفه‌های تجزیه به ترتیب شامل باندهای فرکانسی بالا تا پایین می‌باشد. بدین منظور از آنجایی که آنومالی‌های میدان پتانسیل به دو صورت فرکانس بالا و پایین که مربوط به ساختارهای عمیق و بزرگ مقیاس و بی‌هنجاری‌های مربوط به ساختارهای سطحی و کوچک مقیاس می‌باشد روش تجزیه مد تجربی می‌تواند روشی کارآمد در جداسازی این دو طیف فرکانسی باشد. در این پایان‌نامه از این تئوری برای جداسازی بی‌هنجاری‌های میدان پتانسیل استفاده خواهد شد. همچنین این روش با روش‌های متداول جداسازی مقایسه می‌شود. در این روش توابع مد ذاتی از داده‌ها استخراج شده و آخرین مد حاصله تحت عنوان باقیمانده، نشان‌دهنده بی‌هنجاری ناحیه‌ای می‌باشد. این روش خودکار بر روی داده‌های مصنوعی اعمال شد و نتایج قابل قبولی بدست آمد. پس از آن روش EMD بر روی داده‌های واقعی به منظور بررسی زمین‌شناسی زیرسطحی مناطق معدنی اعمال گردید. نتایج جداسازی با استفاده از این روش نسبت به روش متداول برازش چندجمله‌ای از دقت بالاتری برخوردار بوده و سازگاری زیادی با زمین‌شناسی مناطق مورد مطالعه دارد.

کلیدواژه: جداسازی، میدان پتانسیل، بی‌هنجاری ناحیه‌ای، بی‌هنجاری باقیمانده، برازش

چند جمله‌ای، تجزیه مد تجربی.

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

مقالات پذیرفته شده کنفرانسی:

مرادی، ا.، نجاتی کلاته، ع.، روشندل کاهو، ا.، ۱۳۹۲، مقایسه نتایج حاصل از جداسازی بی-هنجاری میدان گرانی توسط روش EMD با نتایج حاصل از وارون سازی: پنجمین همایش انجمن زمین شناسی اقتصادی ایران.

مرادی، ا.، نجاتی کلاته، ع.، روشندل کاهو، ا.، ۱۳۹۲، جداسازی بی-هنجاری های میدان پتانسیل با استفاده از روش های نوین: سی و دومین گردهمایی علوم زمین.

مقالات علمی-پژوهشی در حال بررسی:

مرادی، ا.، نجاتی کلاته، ع.، روشندل کاهو، ا.، ۱۳۹۲، جداسازی بی-هنجاری های میدان مغناطیسی با استفاده از روش های آنالیز طیفی : مجله ژئوفیزیک ایران.

فهرست مطالب

۲	کلیات	۱
۲	روش گرانی سنجی	۱-۱
۶	تعریف گرانی	۲-۱
۸	گرانی زمین و عبارات ریاضی آن	۱-۲-۱
۸	نیروی جاذبه زمین	۱-۱-۲-۱
۸	نیروی گریز از مرکز	۲-۱-۲-۱
۹	جاذبه گرانی و پتانسیل	۳-۱
۱۰	گرانی نرمال	۴-۱
۱۲	تاریخچه‌ی مغناطیس‌سنجی	۵-۱
۱۲	مگنتوسفر، خطوط میدان مغناطیسی زمین و منشاء آن	۶-۱
۱۴	اجزاء میدان مغناطیسی زمین	۷-۱
۱۵	بی‌هنجاری میدان کل	۸-۱
۱۷	مغناطیس‌شوندگی و خودپذیری مغناطیسی	۹-۱
۱۸	مغناطیس‌شوندگی مواد مختلف	۱۰-۱
۱۹	ضرورت انجام تحقیق	۱۱-۱
۱۹	هدف از انجام پایان نامه	۱۲-۱
۲۲	تصحیح داده‌های میدان پتانسیل	۲

۲۲.....	مقدمه	۱-۲
۲۲.....	بی‌هنجاری گرانی	۲-۲
۲۵.....	تصحیح هوای آزاد	۳-۲
۲۷.....	تصحیح جزر و مد	۴-۲
۲۷.....	تصحیح اتووش	۵-۲
۲۸.....	تصحیح بوگه	۶-۲
۳۲.....	معرفی روش‌های متداول در جداسازی بی‌هنجاری‌های منطقه‌ای از محلی	۳
۳۲.....	مقدمه	۱-۳
۳۲.....	تفکیک بی‌هنجاری	۲-۳
۳۳.....	روش‌های کیفی	۳-۳
۳۳.....	روش متوسط‌گیری ریاضی	۱-۳-۳
۳۶.....	روش مشتق‌گیری‌های اول و دوم	۲-۳-۳
۳۸.....	روش گسترش بی‌هنجاری‌ها به سمت پایین	۳-۳-۳
۳۹.....	روش گسترش بی‌هنجاری به سمت بالا	۴-۳-۳
۳۹.....	روش‌های کمی	۴-۳
۳۹.....	روش تقریب کمترین مربعات	۱-۴-۳
۴۴.....	معرفی روش EMD	۴
۴۴.....	مقدمه	۱-۴
۴۴.....	توابع مد ذاتی یا IMF	۲-۴

۴۷.....	۱-۲-۴	روش تجزیه‌ی مد تجربی، فرآیند الک کردن:
۵۸.....	۵	اعمال روش جدید بر روی داده‌های مصنوعی و واقعی میدان پتانسیل
۵۸.....	۱-۵	مقدمه
۵۸.....	۲-۵	اعمال الگوریتم معرفی شده بر روی مثال‌های مصنوعی
۶۶.....	۳-۵	اعمال الگوریتم بر روی مثال‌های واقعی
۶۶.....	۱-۳-۵	مقدمه
۶۶.....	۲-۳-۵	شبکه‌بندی داده‌ها و موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی بی‌هنجاری‌های گرانی
۷۲.....	۳-۳-۵	موقعیت جغرافیایی و زمین‌شناسی منطقه‌ی بی‌هنجاری‌های مغناطیس
۸۰.....	۶	نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۸۰.....	۱-۶	نتیجه‌گیری
۸۱.....	۲-۶	پیشنهادات

فهرست اشکال

۶.....	شکل ۱-۱:	نیروهای وارد شده بر روی نقطه‌ای واقع در روی کره‌ی زمین (اردستانی، ۱۳۸۹).....
۲-۱:	جرم‌های m و m_0 تحت اثر نیروی جاذبه متقابلی قرار می‌گیرند که با جرم‌های m و m_0 و r^{-2}	متناسب است. به طور قراردادی جهت بردار واحد \hat{r} از منشاء جاذبه به طرف نقطه مشاهده کشیده می‌شود،
۹.....	که در این حالت در نقطه جرم آزمایشی m_0 قرار دارد (بلیکلی، ۱۹۹۵).....	
۱۳۸۵ (رشوند،)	شکل ۳-۱:	مگنتوسفر، فشرده‌شدگی سمت رو به خورشید و قسمت‌های مختلف آن (رشوند، ۱۳۸۵)
۱۴.....		
۱۵.....	شکل ۴-۱:	اجزاء میدان مغناطیسی زمین (رشوند، ۱۳۸۵).....
۱۶.....	شکل ۵-۱:	بی‌هنجاری میدان کل (بلیکلی، ۱۹۹۵).....

- شکل ۱-۲: گرانی مشاهده‌ای خام حاصل از یک مدل ساده بدون انجام هیچ گونه تصحیح گرانی (اردستانی، ۱۳۸۹). ۲۴
- شکل ۲-۲: مقطع پوسته‌ای شکل ۱-۲ بعد از کم کردن گرانی تئوری (اردستانی، ۱۳۸۹). ۲۵
- شکل ۳-۲: سطح مقطع پوسته‌ای از شکل ۱-۲ بعد از تصحیح هوای آزاد (اردستانی، ۸۹). ۲۶
- شکل ۴-۲: تصحیح‌های ساده بوگه کامل و منطقه‌ای برای گرانی اندازه‌گیری شده (بلیکلی، ۱۹۹۵) ۲۹
- شکل ۵-۲: بی‌هنجاری بوگه‌ی ساده و بوگه‌ی کامل در روی سطح مقطع پوسته‌ای شکل ۲-۲ ۳۰
۱. (بلیکلی، ۱۹۹۵) ۳۰
- شکل ۱-۳: جداسازی بی‌هنجاری‌ها به روش گریفین (نوروزی، ۱۳۸۸) ۳۴
- شکل ۲-۳: جداسازی بی‌هنجاری با استفاده از مشتقات و کامپیوتر ۳۷
- شکل ۱-۴: نمودار گردش تجزیه‌ی یک سیگنال به مدهای تجربی (تعمیم‌یافته از هوانگ و همکاران، ۱۹۸۸) ۴۶
- شکل ۲-۴: تشریح فرآیند الک کردن: (a) داده اصلی (b) داده اصلی (آبی) به همراه پوش بالایی و پایینی آن که با رنگ سبز و میانگین دو پوش با رنگ قرمز نشان داده شده است. (c) تفاوت بین داده اصلی (مشکی) و h_1 (قرمز). به دلیل وجود ماکزیمم‌های محلی منفی و مینیمم‌های محلی مثبت این سیگنال هنوز یک IMF نیست. ۵۰
- شکل ۳-۴: تشریح تکرار شدن فرآیند الک کردن. (a) یک بار دیگر الک کردن h_1 و m_2 نتیجه همچنان نامتقارن است و IMF نمی‌باشد. (b) بعد از سه بار الک کردن h_2 و m_3 نتیجه بهتر شده ولی هنوز نامتقارن است، نشان داده شده است. ۵۲
- شکل ۴-۴: یک تابع مد ذاتی IMF (C1)، حاصل ۱۲ بار تکرار فرآیند الک کردن ۵۳
- ۵-۴: داده‌ی اصلی (آبی) و باقیمانده (قرمز). ۵۴
- شکل ۶-۴: IMF_s استخراج شده از $X(t)$ با استفاده از EMD. ۵۶
- شکل ۱-۵: مدل مصنوعی و داده‌های حاصل از مدل بدون روند ناحیه‌ای (رنگ آبی نشان‌دهنده تباین

- چگالی منفی و رنگ قهوه‌ای نشان‌دهنده تباین چگالی مثبت می‌باشد). ۵۹
- شکل ۲-۵: (الف) داده‌های مصنوعی با روند غیر خطی، (ب)، (د) و (و) بترتیب بی‌هنجاری‌های باقیمانده‌ی بدست آمده با روش EMD و آنالیز برازش غیرخطی درجه ۲ و ۳ (آبی توپر) و داده‌های حاصل از مدل بدون روند ناحیه‌ای (خط چین قرمز) و (ج)، (هـ) و (ز) روندهای ناحیه‌ای بدست آمده با روش EMD و آنالیز برازش غیرخطی درجه ۲ و ۳ (آبی توپر) روند اضافه شده (خط چین قرمز) ۶۰
- شکل ۳-۵: مدل مصنوعی مغناطیسی و داده‌های حاصل از مدل بدون روند ناحیه‌ای. ۶۱
- شکل ۴-۵: (الف) روند اضافه شده به داده (ب) داده به همراه روند اضافه شده و (ج) داده به همراه ۵ دسیبل نوفه اضافه شده. ۶۲
- شکل ۵-۵: داده به همراه روند اضافه شده و نوفه. ۶۳
- شکل ۶-۵: (الف)، (ب)، (ج)، (د)، (و) بترتیب روندهای جداشده به روش آنالیز برازش چندجمله‌ای برای درجات یک تا پنج (خطوط خط چین قرمز)، خط آبی توپر روند اضافه شده اولیه می‌باشد. و (هـ)، روند جداشده به روش EMD. ۶۴
- ۷-۵: نمایش شکل ۵-۵ بعد از حذف نوفه به روش EMD. ۶۵
- شکل ۸-۵: بی‌هنجاری باقیمانده در ناحیه‌ی مورد مطالعه در استان هرمزگان، شبکه‌ی برداشت نقاط با فواصل ۱۰ متر در ۸ نیمرخ و شبکه‌ی نقاط با فواصل برداشت ۵ متر به همراه نقاط برداشت نشان داده شده‌اند. ناحیه‌ی نشان داده شده در شکل (مربع) برای جداسازی استفاده شده است. ۶۷
- شکل ۹-۵: موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه واقع در استان هرمزگان ۶۸
- ۱۰-۵: موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد مطالعه واقع در استان هرمزگان ۶۸
- شکل ۱۱-۵: بی‌هنجاری برداشت شده در پروفیل شماره ۱ و نتایج وارون‌سازی (نجاتی، ۱۳۸۴). ۶۹
- شکل ۱۲-۵: نتیجه‌ی جداسازی با روش EMD (بی‌هنجاری محلی) ۶۹
- شکل ۱۳-۵: نتیجه‌ی جداسازی با روش EMD (بی‌هنجاری منطقه‌ای) ۷۰
- شکل ۱۴-۵: بی‌هنجاری برداشت شده در پروفیل ۲ و نتایج وارون‌سازی داده‌ها بعد از ۱۳ بار تکرار

- ۷۰..... (نجاتی، ۱۳۸۴).
- شکل ۵-۱۵: نتیجه‌ی جداسازی بر روی پروفیل دوم با روش EMD (بی‌هنجاری باقی‌مانده)..... ۷۱
- شکل ۵-۱۶: نتیجه‌ی جداسازی بر روی پروفیل دوم با روش EMD (بی‌هنجاری منطقه‌ای)..... ۷۱
- شکل ۵-۱۷: نقشه‌ی زمین‌شناسی منطقه‌ی مورد مطالعه (شمال محلات)..... ۷۲
- شکل ۵-۱۸: نقشه همپوشانی زمین‌شناسی و کنتورهای مغناطیسی ناحیه محلات..... ۷۴
- شکل ۵-۱۹: داده‌های مغناطیس‌سنجی مربوط به ناحیه محلات..... ۷۵
- شکل ۵-۲۰: داده‌های مغناطیس‌سنجی پروفیل A-B. (ب)، (ج) و (د) به ترتیب آنومالی باقیمانده بدست آمده از روش آنالیز برازش چند جمله‌ای درجه ۲، ۳ و ۴. (و) و (ه) آنومالی باقیمانده‌ی بدست آمده از فیلتر ادامه فراسو و EMD..... ۷۵
- ۵-۲۱: بی‌هنجاری ناحیه‌های بدست آمده از روش EMD (منحنی قرمز، ۱) و روش برازش چندجمله‌ای با درجه ۲، ۳ و ۴ (منحنی سبز، ۳، زرد، ۴ و قهوه‌ای، ۵) و آنومالی ناحیه‌های بدست آمده با استفاده از روش ادامه‌ی فراسو (منحنی آبی ۲)..... ۷۶
- ۵-۲۲: اعمال فیلتر ادامه فراسو با ارتفاع‌های مختلف بر روی داده‌های مغناطیسی منطقه و پروفیل AB بر روی فیلتر ادامه فراسو با ارتفاع ۷۰۰۰ متر..... ۷۷

فصل اول

کلیات

۱ کلیات

۱-۱ روش گرانی سنجی

هر جسم زمینی تحت تاثیر نیروی جاذبه گرانشی زمین قرار دارد و این نیرو شتاب گرانی را ایجاد می کند. مقدار شتاب گرانی با زمان و مکان تغییر می کند و به طور کلی وابسته به شکل و توزیع جرم داخل زمین و همچنین جاذبه اجرام سماوی دیگر به ویژه ماه و خورشید است.

گرانی سنجی به عنوان شاخه ای قدیمی از علوم کلاسیک، برای مطالعه نظری و تجربی میدان جاذبه اطراف زمین است، که شامل ابداع روش های اندازه گیری تغییرات شتاب گرانی به طور دقیق در زمان و مکان است. گالیله که در اوایل سده شانزدهم میلادی (۱۶۴۲-۱۵۶۴) قانون سقوط آزاد اجسام را کشف کرد، برای اولین بار شتاب گرانی را اندازه گرفت (اردستانی، ۱۳۸۹).

گرانی سنجی در زمین شناسی نخستین بار توسط اتووش^۱ در سال ۱۸۹۶ به کار برده شد. در سال ۱۹۰۸ به امکان استفاده از داده های اندازه گیری شده توسط ترازوی کششی^۲ برای مطالعه زمین شناسی پوسته بالایی اشاره کرد. تجهیزات قدیمی برای اندازه گیری شتاب گرانی نظیر پاندول ها و یا ترازوی کششی امروزه از نظر دقت و سرعت قابل استفاده نیستند. با پیشرفت فناوری، گرانی سنج های سبکتر و دقیق تری در دهه های ۱۹۲۰ و ۱۹۳۰ برای اکتشاف های معدنی و زمین شناسی ساخته شد. اهداف زمین شناسی و معدنی و یا در واقع بی هنجاری های چگالی مورد مطالعه در روش گرانی سنجی، با استفاده از این ابزار دقیق حتی می توانند در ابعاد بسیار کوچک و در اعماق زیاد هم مطالعه شوند.

بنابراین حوزه عمل گرانی سنجی از ابعاد بزرگ بی هنجاری (چند صد متر تا چند کیلومتر) که بیشتر بررسی های زمین شناسی و نفتی است، تا ابعاد کوچک (چند ده متر) در مطالعات معدنی و ابعاد بسیار کوچک (چند متر) در کاربردهای زمین شناسی سطحی و مهندسی عمران است.

^۱ Roldand Von Eotvos

^۲ Tension Balance

البته باید این نکته را در نظر داشت که بررسی بی‌هنجاری‌های خرد و کوچک نظیر گسل-های سطحی و یا حفره‌های کم عمق با ساخته شدن گراویمترهای جدید با دقت بالاتر از ۰,۰۱ میلی گال، از دهه ۱۹۷۰ به بعد رواج یافت (نوروزی، ۱۳۸۸).

از این سال به بعد، با گرانی‌سنج‌های جدید نظیر لاکوست^۳-رومبرگ و سینترکس^۴ بسیاری از مسائل نظیر درز و شکاف‌ها، حفره‌های موجود در سنگ‌ها و فونداسیون‌های سازه‌های سنگین نظیر آسمان خراش‌ها، نیرگاه‌ها و سدها از طریق بررسی داده‌های میکروگرانی‌سنجی قابل اکتشاف هستند. همچنین مطالعه‌ی حفره‌های کارستی در مسیر تونل‌های زیرزمینی، مناطق با پتانسیل زمین لغزش، غارها یا تونل‌های ساخت دست بشر و لوله‌های زیرزمینی نیز با استفاده از این روش قابل اکتشاف هستند. گرانی‌سنجی همچنین در اکتشاف‌های گاز و نفت نیز به طور گسترده‌ای کاربرد دارد. علاوه بر موارد ذکر شده در مورد آبخوان‌های موجود در کارست‌های سنگ‌های آهکی نیز می‌توان از این روش استفاده کرد (اردستانی، ۱۳۸۸).

تغییرات گرانی با زمان نیز پایه‌ی مهم دیگری برای نشان دادن مهاجرت جرم‌های زیرزمینی و یا تغییرات توپوگرافی قبل از زمین لرزه است که با اندازه‌گیری‌های پیوسته زمانی گرانی در ایستگاه‌های ثابت میسر می‌شود. همچنین از تغییرات زمانی گرانی می‌توان برای تعیین تغییرات محلی زمین که در اثر ذخیره شدن و خالی شدن از آب ایجاد شده و یا برآورد خطر ترکیدن و تغییر سنگ در تونل‌های معدنی استفاده کرد. علاوه بر این مبنای محاسبات ژئودزی نیز گرمی-سنجی می‌باشد (گرکنز، ۱۹۸۹).

در جدول صفحه بعد روش و کاربردهای گرانی‌سنجی و دقت مورد نظر در هر مورد آمده است.

³ Lacoste-Romberg

⁴ Sintrex(CG3,CG5)

جدول ۱-۱: کاربردهای گرانی سنجی و دقت آن (اردستانی، ۱۳۸۹)

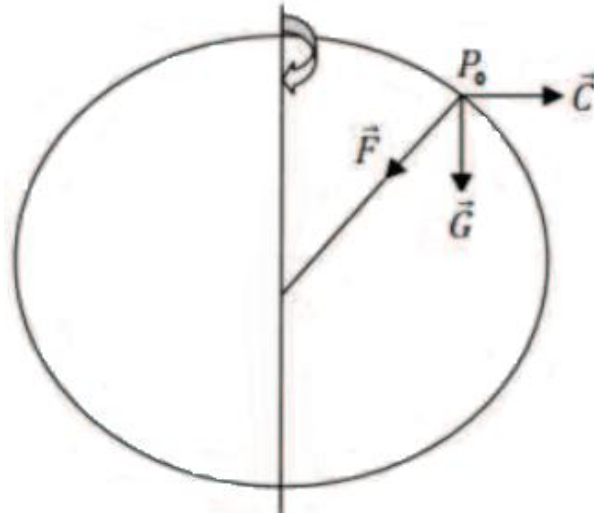
اکتشافات معدنی				
نتایج	طراحی	دقت	نوع دستگاه‌های مورد استفاده	کاربرد
-محل کانسارها -عمق حداقل -عمق حداکثر -شکل سه‌بعدی -برآورد ذخیره احتمالی	نیمرخ یا شبکه	۵ میکروگال ۱ تا ۵ سانتیمتر	-گرانی سنجی لاکوسترومبرگ -نقشه برداری توتال استیشن	-کرومیت -باریت -سنگ آهن -گنبد نمکی -کانسارهای سولفوری
زمین‌شناسی تحت‌الارضی				
نتایج	طراحی	دقت	نوع دستگاه‌های مورد استفاده	کاربرد
-محل و عمق گسل‌ها -ضخامت آبرفت -محل و عمق -تعیین ساختار لایه‌های چین خورده	نیمرخ یا شبکه	۵ میکروگال ۱ تا ۵ سانتیمتر	-گرانی سنجی لاکوسترومبرگ -نقشه برداری توتال استیشن	- محل و عمق گسل‌ها -بررسی تاقدیس‌ها و ناودیس‌های زیرسطحی -توپوگرافی سنگ‌کف

جدول ۲-۱: کاربردهای میکروگرانی سنجی و دقت آن (اردستانی، ۱۳۸۹)

زمین‌شناسی مهندسی				
کاربرد	نوع دستگاه‌های مورد استفاده	دقت	طراحی	نتایج
حفرات کارستی	-گرانی سنجی	۱ تا ۵	نیمرخ و یا شبکه	-تعیین محل و عمق
تونل‌های قدیمی مربوط به معادن	لاکوست رومبرگ CG3,CG5	میکروگال		حفره‌های کارستی
چاه‌هایی قدیمی	-نقشه‌برداری	۱ تا ۲	-برداشت زمانی داده‌های	-تعیین محل و عمق
فروچاله‌ها	توتال استیشن	سانتیمتر	میکروگرانی سنجی	فروچاله‌ها
زمین لغزش	GPS دوفرکانسه			-تعیین مقدار نشست
باستان‌شناسی				
کاربرد	نوع دستگاه‌های مورد استفاده	دقت	طراحی	نتایج
شهرهای باستانی مدفون شده	-گرانی سنجی	۱- تا ۵	پروفیل و یا شبکه	تعیین محل و عمق
-کوره‌های ذوب قدیمی	لاکوست رومبرگ			مقبره‌ها، تونل‌ها، دیوارها
تونل‌های زیر سطحی	CG3,CG5	میکروگال		
	-نقشه‌برداری	۱- تا ۲	-برداشت زمانی داده‌های	و پدیده‌های مشابه مدفون
	توتال استیشن	سانتیمتر	میکروگرانی سنجی	
	GPS دوفرکانسه			

۲-۱ تعریف گرانی

آشکار است که تمام مواد روی سطح زمین و یا فضای مجاور آن توسط نیروی گرانشی جذب شده و دارای وزن می‌شوند. ذره‌ای به جرم m_0 را در نقطه‌ی p_0 روی سطح زمین در نظر بگیرید.



شکل ۱-۱: نیروهای وارد شده بر روی نقطه‌ای واقع در روی کره‌ی زمین (اردستانی، ۱۳۸۹)

نیروی گرانشی حاصل از جرم M زمین روی این ذره \vec{F} است که با مقدار نیروی گریز از مرکز حاصل از حرکت چرخشی زمین \vec{C} در مجموع نیروی گرانی \vec{G} را ایجاد می‌کنند (کیانشن و همکاران^۵، ۱۹۹۵)،

$$\vec{G}(M, m_0) = \vec{F}(M, m_0) + \vec{C}(m_0) \quad 1-1$$

جهت نیروی گرانی \vec{G} از مکانی به مکان دیگر متفاوت است.

از آنجایی که $\vec{C}(m_0) \gg |\vec{F}(M, m_0)|$ است، بنابراین جهت بردار $\vec{G}(M, m_0)$ به تقریب به سمت مرکز کره‌ی زمین است. همچنین هر جسم واقع در روی سطح زمین نه تنها توسط جرم زمین، بلکه توسط اجرام سماوی دیگر به ویژه ماه و خورشید جذب می‌شود. بنابراین اثر جاذبه این اجرام سماوی به طور جزئی با زمان هم تغییر می‌کند.

⁵ Qianshen et all.