

دانش اگر در ثریا هم باشد مردمانی از سرزمین پارس بر آن دست خواهند یافت.

پیامبر اعظم (ص)

شرح جامع و نمونه سوالات

(ژئوفیزیک ۱ و ۲)

«مهندسی معدن – مهندسی نفت»

مولف: مهدی بادل

انتشارات ارشد

پیشگفتار ناشر

خداوند بزرگ را شاکریم که فرصتی عنایت فرمود تا بتوانیم قدمی در جهت گسترش علم و فرهنگ کشور عزیزمان برداریم و مسیری هموار را در اختیار مخاطبان و داوطلبان علاقمند به ادامه تحصیل قرار دهیم. از آنجائی که درحوزه کتاب‌های درسی و کمک درسی کارشناسی ارشد کتاب‌های زیادی به رشته تحریر در آمده است با این حال وجود یک مجموعه جامع، دقیق، کامل و دارای رفرنس(منابع) مستند احساس می‌شود.

همیشه دغدغه داشتیم که ای کاش می‌شد تمامی منابع پراکنده و گاهاً دست نایافتنی کنکور در یک مجموعه به گونه‌ای جذاب و شیوا آماده می‌شد و همچنین سوالات دوره‌های قبل کنکور نیز به گونه‌ای تشریحی پاسخ داده می شدند، که خدشه‌ای بر آنها وارد نشود و خیال داوطلبان عزیز آنقدر آسوده باشد که اطلاعات مندرج در پاسخنامه‌ها را برای بهره‌گیری در آزمون خود بکار گیرند. این کار با یاری خداوند بزرگ و همکاری نخبه‌ترین دانشجویان و اساتید کشور در انتشارات ارشد هماهنگ گردید و در تمامی مقاطع تحصیلی از کاردانی به کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری در حوزهٔ آزمون‌های سراسری – آزاد و پیام نور بسته‌های آموزشی شامل کتاب‌های بانک سوالات و کتاب‌های شرح جامع درس آماده گردید. در تهیه مجموعه‌های فوق‌الذکر از فارغ‌التحصیلان کارشناسی ارشد و دکتری که حائز رتبه‌های تک رقمی کنکور می‌باشند، استفاده کرده‌ایم، تا شما عزیزان بتوانید در راستای افزایش توان علمی خود در جهت نیل به مقصود خویش نایل آیید. بدون تردید می‌توان گفت که برای اولین بار در نظام آموزشی کشور مجموعه‌ای به این سبک عرضه می‌شود که در کیفیت و کمیت بی‌نظیر بوده و تمامی نیازهای دانشجویان و داوطلبان عزیز را پوشش می‌دهد. امید است که استفاده از این مجموعه عزیزان را در جهت موفقیت در آزمون یاری رسانده باشد. در پایان لازم به ذکر است که بی نقصی محض از آن خداوند متعال می‌باشد، بنا براین از تمامی خوانندگان و داوطلبان عزیز خواهشمندیم نظرات سازنده خود را در مورد این کتاب به سایت انتشارات ارشد اعلام نمایند تا ما را در جهت هر چه بهتر آماده کردن این محصولات یاری رسانند.

با تشکر

ناشـــــر

www.arshadbook. ir

تقدیم به

پدرم مظهر مقاومت و تکیه‌گاه زندگیم

او که شمع وجودش روشنی بخش زندگیم است و

هستی‌ام در آرزوی احیای ذره‌ای از زحماتش تداوم دارد

پیشگفتار مؤلف

ز دانش به اندر جهان هیچ نیست تن مرده و جان نادان یکی است

(ابوالقاسم فردوسی)

ژئوفیزیک اکتشافی یکی از مباحث مهم در مهندسی معدن و نفت است. از عملیات‌های اکتشافی مغناطیسی، گرانی، لرزه‌ای و الکتریکی تا پردازش داده‌ها و نهایتاً مدلسازی ماده معدنی یا مخزنی نفتی در تمامی مراحل نیازمند متخصصین خبره و با معلومات در این زمینه می‌باشیم. مجموعه حاضر از گردآوری منابع بسیار شاخص و معتبری تهیه شده که به داوطلبین کنکور کارشناسی ارشد مجموعه مهندسی معدن و نفت کمک می‌کند تا آنچه را که باید از ژئوفیزیک اکتشافی بدانند تا آماده حضور در مقطع کارشناسی ارشد بشوند. این مجموعه همچنین چکیده‌ای از جزوات اینجانب از کلاس‌های ژئوفیزیک اکتشافی ۱ و ۲ در دانشگاه تهران که استاد گرامی و ارجمندم جناب آقا دکتر غلامحسین نوروزی تدریس آن را بر عهده دارند، را هم در بر دارد.

به عنوان داوطلب کنکور همواره در جستجوی منبعی بودم تا تمامی نکات و مطالب مهم درسی ژئوفیزیک اکتشافی را یکجا داشته باشد. از آنجا که هیچ وقت نتوانستم چنین منبعی را بیابم بر آن شدم تا پسش از پذیرفته شدن در کنکور سراسری مقطع کارشناسی ارشد از تمامی منابع ژئوفیزیک اکتشافی موجود خلاصه برداری کنم و نکات مهم و کلیدی آنها را که همواره مورد توجه طراحان سوالات کنکور کارشناسی ارشد می‌باشد را جمع‌آوری کنم. پس مطالعات فراوان برای پذیرفته شدن در آزمون کنکور کارشناسی ارشد و احراز رتبه ۲۰ در مجموعه مهندس معدن گرایش اکتشاف این مجموعه را که حاصل تلاش ۲ سال جستجو و گردآوری مطالب کنکوری ژئوفیزیک اکتشافی می‌باشد به دانشجویان علاقمند فراگیری این علم تقدیم می‌کنم. امیدوارم که با خلق این اثر بتوانم بار کوچکی را از دوش داوطلبین گرامی بردارم.

به داوطلبین گرامی اکیداً توصیه می‌کنم تا به فراگیری خط به خط این مجموعه بپردازند. در پاسخ‌های تشریحی یز مطالبی گنجاندم که گاهاً در متن درس به آن‌ها اشاره نکرده‌ام. پس توصیه اینجانب به شماست که حتی از فراگیری و مطالعه هر چه دقیق‌تر سوالات چهارگزینه‌ای به همراه پاسخ تشریحی آن‌ها، از هیچ کوششی دریغ نفرمائید.

به دانشجویان داوطلب مجموعه مهندسی نفت پیشنهاد می‌کنم تا بخش لرزه‌نگاری را با دقت زیادی مطالعه کنند و حتماً به کتاب اصول ژئوفیزیک اکتشافی تألیف آقای دکتر محمد کمال قاسم العسگری منتشر شده توسط نشر آییژ برای تکمیل اطلاعاتشان مراجعه کنند.

در انتها وظیفه خود می‌دانم که از تمامی کادر انتشارات ارشد به دلیل زحمات بی‌دریغ و دلسوزانه‌شان کمال تشکر و قدردانی را داشته باشم. از آنجا که این مجموعه خالی از اشکال نخواهد بود بسیار سپاس‌گذار دوستانی هستم که اشکالات و نقص‌های این مجموعه را با من از طریق پست الکترونیکی زیر در میان بگذارند.

badel@ut.ac.ir

موفق و پیروز باشید

مهدی بادل

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فصل اول: گرانی

۱- مقدمه ۱۱
۲- نظریه گرانی ۱۱
۳- جاذبه در روی یک شبه بیضی چرخان ۱۲
۴- گرانی نرمال ۱۳
۵- برداشت‌های گرانی ۱۴
۵-۱- تصحیح دستگاه ۱۴
۵-۲- تصحیح عرض جغرافیایی ۱۴
۵-۳- تصحیح ارتفاع ۱۴
۵-۴- تصحیح جزر و مد ۱۹
۵-۵- تصحیح اوت‌واش ۱۹
۶- گرانی‌سنجی در دریا ۱۹
۶-۱- اندازه‌گیری در کف اقیانوس ۱۹
۶-۲- اندازه‌گیری از روی عرشه کشتی ۲۰
۷- نقشه‌های گرانی بوگه ۲۱
۸- مشخصات گرانی بوگه منطقه‌ای ۲۱
۸-۱- اختلاف بین قاره و اقیانوس ۲۱
۸-۲- گرانی بوگه و ارتفاعات ۲۱
۸-۳- گرانی بوگه و ضخامت پوسته ۲۱
۹- جاذبه گرانی ساختمان‌های با اشکال مختلف ۲۳
۹-۱- کره ۲۳
۹-۲- استوانه عمودی ۲۴
۹-۳- استوانه افقی ۲۵
۹-۴- صفحه افقی نیمه بینهایت ۲۵
۱۰- جدا کردن طرح‌های گرانی بوگه منطقه‌ای و محلی ۲۶
۱۰-۱- هموار کردن به طریق گرافیکی ۲۷
نکات قابل توجه در گرانی سنجی ۲۹
تست‌های آخر فصل ۳۲
پاسخ تست های آخر فصل ۴۴

عنوان..... صفحه

فصل دوم: مغناطیس

۱-مقدمه ۵۳
۲-طبیعت مغناطیس ۵۳
۳- میدان مغناطیسی اصلی ۵۸
۴-اندازه گیری آنومالی میدان مغناطیسی ۶۰
۵- برداشت گرادیان مغناطیسی.....۶۱
۶-تصحیحات ۶۱
۶-۱- تصحیحات وابسته زمانی.....۶۱
۶-۲- تصحیح میدان اصلی مغناطیسی ۶۱
۷- آنومالی‌های مغناطیسی و منابع زمین شناسی آنها.....۶۲
۷-۱- مغناطیس سنگ ۶۲
۸-تعبیر وتفسیر آنومالی مغناطیسی.....۷۰
۹ - روش الکترومغناطیس (ELECTROMAGNETIC METHOD) (EM) ۷۰
۹-۱- مقدمه ۷۰
۹-۳- ثبت میدان های EM ۷۲
۹-۴- روشهای زاویه شیب ۷۲
۹-۵- متد با فرکانس خیلی پائین رادیویی یا VLF.....۷۵
۹-۶- سیستم های اندازه گیری فاز ۷۶
۹-۷- محدودیت های روش الکترومغناطیس ۷۸
تست‌های آخر فصل.....۷۹
پاسخ تست های آخر فصل.....۹۷

فصل سوم: لرزه‌نگاری

۱- مقدمه ۱۰۹
۲- انواع موجهای لرزه‌ای ۱۰۹
۳- معادلات انتشار امواج ۱۱۰
۴- اصول انتشار امواج لرزه‌ای ۱۱۰
۴-۱- اصل هویگنس HUYGENS PRINCIPLE ۱۱۰
۴-۲- اصل فرما FERMAT'S PRINCIPLE.....۱۱۰
۴-۳- قانون اسنل SNELL'S LOW ۱۱۱
۵- کاهش دامنه و انرژی امواج در هنگام انتشار ۱۱۱
۵-۳- کاهش دامنه بر اثر افراز یا تقسیم انرژی در سطح مشترک دو محیط ۱۱۲
۶- هندسه مسیر امواج لرزه ای و منحنی های زمان- مسافت ۱۱۳
۶-۱- امواج شکست مرزی ۱۱۳
۶-۲- امواج بازتابی.....۱۱۹
۷- نقطه عمقی مشترک (CDP) و نقطه میانی مشترک (CMP).....۱۲۲
تست‌های آخر فصل.....۱۳۰
پاسخ تست های آخر فصل.....۱۴۶

عنوان ..... صفحه

فصل چهارم: ژئوالکترویک

۱- مقدمه ۱۶۱
۲- مقاومت ویژه ظاهری ۱۶۱
۳- آرایش های الکترودی ۱۶۲
۳-۱- آرایش ونر ۱۶۲
۳-۲- آرایش شولمبرژه ۱۶۳
۳-۳- آرایش سه نقطه یا گرادیان ۱۶۴
۳-۴- آرایش تقسیم لی (LEE PARTITIONING) ۱۶۵
۳-۵- آرایش های قطبی ۱۶۶
۴- مقایسه اندازه گیری های حاصله از آرایش های ونر، شولمبرژه و دوقطبی- دوقطبی ۱۶۷
۵- پارامترهای ژئوالکتریک ۱۶۸
۶- انواع منحنی های سونداژ الکتریکی در محیط های لایه ای افقی ۱۷۰
۶-۱- محیط ایزوتروپ و همگن ۱۷۰
۶-۲- محیط دولایه ای ۱۷۱
۶-۳- محیط سه‌لایه‌ای ۱۷۲
۶-۴- محیط چند لایه‌ای ۱۷۲
۶-۵- اثر ساختمان‌های مختلف زمین شناسی روی منحنی‌های سونداژ ۱۷۳
تست‌های آخر فصل ۱۷۶
پاسخ تست‌های آخر فصل ۱۹۱

فصل پنجم: قطبش القایی

۱- مقدمه ۲۰۱
۲- چشمه‌های قطبش القایی ۲۰۱
۲-۱- قطبش غشایی ۲۰۲
۲-۲- قطبش الکترودی ۲۰۲
۳- اندازه‌گیری قطبش القایی ۲۰۴
۳-۱- اندازه‌گیری زمان - حوضه‌ای ۲۰۴
۳-۲- اندازه‌گیری فرکانس - حوضه‌ای ۲۰۵
۳-۳- نمونه‌های پاسخ IP ۲۰۶
۴- مطالبی درباره عملیات صحرایی IP ۲۰۷
۵- چشمه‌های نویز ۲۰۷
تست‌های آخر فصل ۲۰۸
پاسخ تست های آخر فصل ۲۱۴
روش‌های الکتریکی با منبع انرژی طبیعی ۲۱۸

عنوان..... صفحه

فصل ششم: روش‌های الکتریکی با منبع انرژی طبیعی

۱- پتانسیل خودزا (SP)..... ۲۱۹
۱-۱ - مکانیزم پتانسیل خودزا..... ۲۱۹
۱-۲ -تعبیر و تفسیر آنومالی‌های SP..... ۲۲۰
۱-۳- معایب و مزایای روش SP..... ۲۲۱
۲- جریان‌های تلوریک و مگنتوتلوریک..... ۲۲۲
۲-۱- روش جریان تلوریک..... ۲۲۲
۲-۲- روش مگنتوتلوریک..... ۲۲۳
تست‌های آخر فصل..... ۲۲۶
پاسخ تست‌های آخر فصل..... ۲۲۹

فصل هفتم: سؤالات ترکیبی ژئوفیزیک اکتشافی

پاسخ تست‌های آخر فصل..... ۲۳۷
سؤالات ژئوفیزیک اکتشافی مهندسی نفت سال ۱۳۸۳..... ۲۴۳
پاسخنامه ژئوفیزیک اکتشافی مهندسی نفت سال ۱۳۸۳..... ۲۴۶
سؤالات ژئوفیزیک اکتشافی مهندسی نفت سال ۱۳۸۴..... ۲۴۷
پاسخنامه ژئوفیزیک اکتشافی مهندسی نفت سال ۱۳۸۴..... ۲۵۰
سؤالات ژئوفیزیک اکتشافی مهندسی نفت سال ۱۳۸۵..... ۲۵۱
سؤالات ژئوفیزیک اکتشافی مهندسی نفت سال ۱۳۸۵..... ۲۵۳
سؤالات ژئوفیزیک اکتشافی مهندسی نفت سال ۱۳۸۶..... ۲۵۴
سؤالات ژئوفیزیک اکتشافی مهندسی نفت سال ۱۳۸۶..... ۲۵۷
سؤالات ژئوفیزیک اکتشافی مهندسی نفت سال ۱۳۸۷..... ۲۵۸
پاسخنامه ژئوفیزیک اکتشافی مهندسی نفت سال ۱۳۸۷..... ۲۶۰
سؤالات ژئوفیزیک اکتشافی مهندسی نفت سال ۱۳۸۸..... ۲۶۱
پاسخنامه ژئوفیزیک اکتشافی مهندسی نفت سال ۱۳۸۸..... ۲۶۳

فصل اول

گرانی

فصل اول

گرانی

۱- مقدمه

گرانی سنجی شامل اندازه‌گیری نیرویی در زمین است که انسان نه قادر است آن را به وجود آورد و نه در آن تغییری ایجاد نماید. در بیشتر کارهای گرانی سنجی معمولاً مقدار واقعی شتاب جاذبه اندازه‌گیری نمی‌شود، بلکه تغییرات جانبی این شتاب مورد نظر می‌باشد. در حقیقت تغییرات این شتاب خود تابع تغییرات چگالی سنگ‌های داخل زمین می‌باشد.

در مقیاس کوچک، تغییرات شکل یک لایه (مانند برآمدگی یا فرورفتگی) باعث بی‌نظمی ثقلی می‌گردد. در مقیاس بزرگتر تغییرات منفی ثقلی به علت کاهش ناگهانی چگالی سنگ‌های نمکی (یا گنبدهای نمکی) است. در مقیاس بسیار بزرگتر چنین بی‌هنجاری‌های ثقلی (گرانی) در سنگ‌های رسوبی یک حوضه رسوبی به علت نفوذ سنگ‌های آذرین (مانند دایک، سیل و ...) به وجود می‌آید.

۲- نظریه گرانی

پایه و اساس روش گرانی قانون جاذبه نیوتن است که می‌گوید نیروی کششی اعمال شده بین دو جسم به جرم‌های m_1 و m_2 با مجذور فاصله دو جسم (r^2) نسبت معکوس دارد (قطرهای اجسام m_1 و m_2 باید کوچکتر از r باشند). در این صورت می‌توان نوشت:

$$F = G\frac{m_1 m_2}{r^2} \qquad (1-1)$$

که در آن G ثابت جاذبه جهانی نامیده می‌شود که مقدار آن:

$$G = 6/67\times10^{-11} \quad \frac{m^3}{kg.s^2}$$

اگر جرم و شعاع یک جسم کروی مانند زمین را (با فرض همگن و بدون حرکت بودن آن) به ترتیب با M و R نشان دهیم و تاثیر زمین بر جسمی به جرم m که روی سطح آن قرار گرفته را در نظر بگیریم به سادگی می‌توان فرض کرد که تاثیر این جسم کوچک (m) بر روی زمین کروی شکل تنها به مرکز آن وابسته است:

$$F = \overbrace{G\frac{M}{R^2}}^{g} m = g.m \qquad (۲-۱)$$

رابطه فوق نشان می‌دهد که نیروی کششی با جرم کوچک m و شتاب جاذبه زمین (g) متناسب است.

واحد اساسی شتاب جاذبه زمین، استفاده شده در تشریح جاذبه در دستگاه cgs، گال می‌باشد، در زیر به تعدادی از واحدهای گرانی اشاره شده است:

۱ گال = ۱ $\frac{Cm}{S^2}$ و $۱\frac{m}{s^2} = ۱۰^5$ mgal (میلی گال)

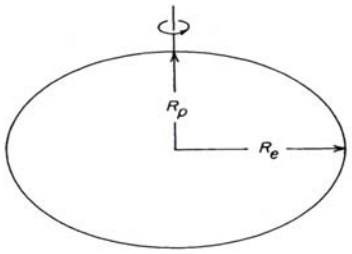
۱ گال = ۱۰۰۰۰ واحد گرانی و واحد گرانی $۱\frac{m}{s^2} = ۱۰^6$

۱ واحد گرانی = ۱ $\frac{\mu m}{S^2}$ $\frac{\text{میکرومتر}}{\text{مجذورثانیه}}$

۳- جاذبه در روی یک شبه بیضی چرخان

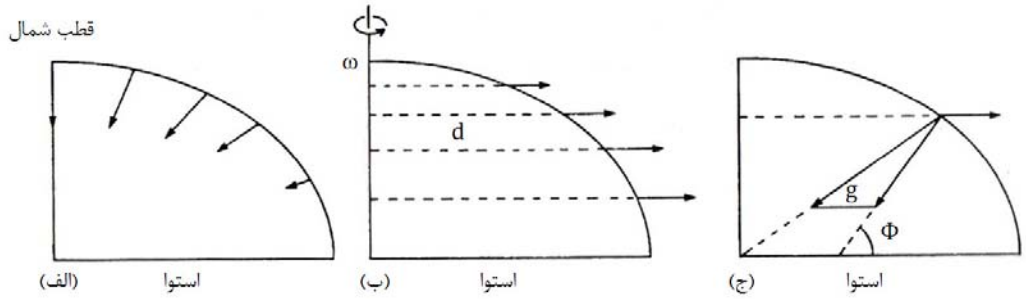
کره‌ای مانند زمین یک کره کامل نیست، در عین حال ساکن هم نیست. به خاطر این که حول محوری که از قطبین شمال و جنوب می‌گذرد چرخش نموده، هر ذره از جرم آن تحت تاثیر نیروی گریز از مرکز و همین طور جاذبه کشش همه ذرات دیگر قرار دارد. تعادل نیروهای جاذبه و گریز از مرکز به کره شکلی به صورت شبه بیضی که یک کره پخ شده است، داده است (شکل ۱-۱). حدی که کره پخ می‌شود به سرعت چرخش و خصوصیات فیزیکی جرم آن بستگی دارد. تعریف دیگری از شبه بیضی، پخی f است:

$$f = \frac{Re - Rp}{Re} \qquad (۳-۱)$$



شکل (۱- ۱) - شبه بیضی دوار با شعاع استوایی R_e و شعاع کوتاهتر قطبی R_p. این شکل در حال تعادل تولید شده با جاذبه کششی متقابل ذرات تشکیل دهنده جرم بعلاوه نیروی گریز از مرکزی است که بر این ذرات چون جرم چرخش می نماید، عمل می کند.

یک جسم واقع بر روی سطح شبه بیضی چرخان جاذبه کششی کل جرم آن را احساس خواهد کرد. این جاذبه به طرف مرکز جرم جهت داشته، اما در قطب چرخشی قوی‌تر از استوا است. افزایش شدت جاذبه کششی روی سطح شبه بیضی در شکل (۱-۲) نشان داده شده که با افزایش عرض جغرافیایی طویل‌تر می‌شود. رابطه $g = \frac{GM}{R^2}$ به ما کمک می‌کند که چرا این موضوع صحیح است؛ به این خاطر که نیروی جاذبه با کاهش فاصله از مرکز جرم افزایش می‌یابد، انتظار می‌رود که در قطب، جایی که شعاع شبه بیضی، کوتاه‌ترین است، شتاب گرانی قوی‌ترین مقدار را داشته باشد.



شکل (۱- ۲) - بردارها (الف) نیروی جاذبه توده روی سطح بیضی را؛ (ب) شتاب جانب مرکز روی سطح بیضی چرخش و (ج) جاذبه کل که حاصل جمع دو بردار جاذبه توده و شتاب جانب مرکز بوده روی ذره ای که در سطح بیضی چرخش قرار گرفته است را نشان می دهد. دقت کنید که بردارها بدون مقیاس رسم شده اند.

فاصله از مرکز تنها دلیل برای قوی‌تر بودن جاذبه در سطح شبه بیضی نزدیک قطب چرخشی آن نیست. همچنین اثر گریز از مرکز که بر روی جسم واقع در سطح آن عمل می‌کند بایستی در نظر گرفته شود. به این دلیل که کره می‌چرخد، این جسم در امتداد مسیر دایره‌ای حول محور چرخش می‌کند. دوباره به شکل (۱-۱) نگاه کنید. مشاهده کنید که اثر گریز از مرکز جهتش به طرف خارج از مرکز کره نبوده، بلکه آن به طرف خارج از مرکز مسیر دایره‌ای جسم متحرک است. شدت شتاب گریز از مرکز از طریق $a_c = \omega^2 d$ محاسبه می‌شود، که ω سرعت زاویه‌ای چرخش و d فاصله از مرکز مسیر دایره‌ای آن است. می‌توانیم ببینیم که اثر گریز از مرکز بر روی جسم واقع در استوا، قوی‌ترین است. در اینجا مقدار d بزرگترین بوده و معادل Re است. اما d با افزایش عرض جغرافیایی کوتاهتر گشته و در قطب به صفر می‌رسد.

لازم به ذکر است که جاذبه کششی جرم خیلی قوی‌تر از اثرات گریز از مرکز است. توجه کنید که در استوا جهتهای این دو اثر مخالف هم بوده، به طوری که g مستقیماً به طرف مرکز شبه بیضی می‌باشد. در قطبین جایی که اثر گریز از مرکز نیست g نیز به طرف مرکز است.

۴- گرانی نرمال

پس از تعاریف فوق، حالا می‌توانیم گرانی نرمال را تعریف کنیم. این گرانی در واقع پس از اصلاح میزان پخی و در نظر گرفتن نیروهای گریز از مرکز و جاذبه زمین در یک شبه بیضی چرخان بدست آمده است. البته این گرانی تنها تابعی از عرض جغرافیایی (ϕ) می‌باشد؛ زیرا تنها با تغییر این متغیر است که میزان گرانی نرمال تغییر می‌کند.

فرمول گرانی نرمال با در نظر گرفتن تمامی موارد فوق بصورت زیر است:

$$g_N = ۹۷۸/۰۳ \,(۱+۰/۰۰۵۲ \,\mathrm{Sin}^2\phi + ۰/۰۰۰۰۲۳ \,\mathrm{Sin}^4\phi) \qquad (۴-۱)$$

تمامی اندازه‌گیری‌های گرانی انجام شده، با این مقدار مقایسه می‌شوند و تمامی اصلاحاتی که در بخش‌های بعدی به آن اشاره می‌شود، نسبت به گرانی نرمال انجام می‌شود.

۵- برداشت‌های گرانی

پدیده‌های زمین‌شناسی روی میدان گرانی زمین اثر می‌گذارند. می‌توانیم این اثرات را با مقایسه اندازه‌گیری‌های گرانی با مقادیر مربوطه گرانی نرمال که به خاطر پخ‌شدگی و چرخش زمین اصلاح شده است تشخیص دهیم. قبل از انجام این مقایسه بایستی ابتدا بعضی تصحیحات برای ارتفاع و شکل توپوگرافی جایی که گرانی اندازه‌گیری شده و ظاهراً از سطح بیضوی نرمال، که گرانی آن را در بخش قبل محاسبه کردیم، متفاوت است را معرفی نماییم. سپس می‌توانیم از گرانی اندازه گرفته شده گرانی نرمال تصحیح شده را کم کرده تا مقداری بدست آوریم که آنومالی گرانی نامیده می‌شود.

پس از اندازه‌گیری گرانی در خشکی و یا در دریا، تصحیحاتی روی داده‌ها باید صورت گیرد که این تصحیحات به قرار زیرند:

۱- تصحیح دستگاه (دریفت یا جابه‌جایی)

۲- تصحیح عرض جغرافیایی

۳- ارتفاع (که شامل تصحیح هوای آزاد، تصحیح بوگه و تصحیح توپوگرافی است)

۴- تصحیح جذر و مد

۵- تصحیح اوت‌واش

۵-۱- تصحیح دستگاه

با قرائت دستگاه در طول روز خطاهایی در اندازه‌گیری به وجود می‌آید که باید مقدار آن تعیین و از داده‌ها کسر شود.

۵-۲- تصحیح عرض جغرافیایی

به علت اینکه شکل زمین بیضوی نامنظم است و همانگونه که گفته شد، شدت جاذبه گرانش از قطب به استوا کاهش یافته و در عوض نیروی گریز از مرکز افزایش می‌یابد از این رو گرانی نیاز به تصحیح در مناطق بین استوا و قطبین دارد. در فرمول (۱-۴) این تصحیح صورت گرفته و وقتی ما از گرانی نرمال استفاده می‌کنیم، از تصحیح عرض جغرافیایی مبری هستیم. به هر حال در صورتی که این تصحیح انجام نشده بود باید به این طریق عمل کنیم:

در صورتی که از استوا به سمت قطبین حرکت می‌کنیم، به دلیل اینکه به میزان گرانی افزوده می‌شود، بایستی همان مقدار که به گرانی افزوده می‌شود، از گرانی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه، بکاهیم. در این صورت گرانی بدست آمده نسبت به عرض جغرافیایی تصحیح شده و عرض جغرافیایی دیگر تاثیری روی اندازه گرانی بدست آمده، ندارد.

به همین صورت اگر از قطبین به استوا حرکت کنیم، به دلیل کاسته شدن از میزان گرانی، بایستی همان مقدار که از گرانی کاسته می‌شود، به گرانی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه، اضافه کنیم تا اثر عرض جغرافیایی را از روی اندازه‌گیری‌ها برداریم.

$$\Delta g_{obs} = g_{obs} - g_N \qquad (۵-۱)$$

g_{obs} مقدار گرانی اندازه‌گیری شده توسط دستگاه می‌باشد و g_N مقدار گرانی نرمال است که تصحیحات پخی زمین و چرخش آن، در فرمول (۱-۴) اعمال شده است.

۵-۳- تصحیح ارتفاع

در گرانی سنجی تصحیح برای ارتفاع در ۳ مرحله صورت می‌گیرد:

۵-۳-۱- تصحیح هوای آزاد (FAC-Free Air Correction)

اگر زمین کره کامل غیرچرخانی بود، گرانی روی سطح آن با رابطه (۱-۶) محاسبه می‌شد:

$$g = \frac{GM}{R^2} \qquad (۱-۶)$$

با انتخاب R و M که به ترتیب شعاع کره زمین و جرم آن است مقدار $g = ۹۸۱/۷۸۵۴۵$ گال می‌شود. حالا اجازه دهید که ۱ متر بالای سطح که ما را کمی دورتر از مرکز زمین قرار می‌دهد برویم. به علت اینکه فاصله تا مقدار اندکی افزوده شده، مقدار g کمتر از آنچه در بالا آمده بدست می‌آید (همانگونه که از رابطه (۱-۶) نیز قابل درک است، با افزایش R، g کاهش می‌یابد). با ادامه حرکت به سمت بالا و بالاتر تغییر در گرانی دقیقاً به همان مقدار ۱ متر افزایش در ارتفاع باقی نخواهد ماند، اما مادامی که هنوز کاملاً نزدیک کره قرار داریم، این مقدار تغییر خیلی نزدیک به $۰/۳۱ \frac{\text{میلی‌گال}}{\text{متر}}$ باقی می‌ماند.

به بیان دیگر با حرکت به سمت ارتفاع بالاتر از سطح اساس (سطح بیضوی کره زمین)، به ازای هر ۱ متر، به مقدار ۰/۳۱ میلی‌گال از گرانی کاسته می‌شود. بنابراین این مقدار کاسته شده از گرانی بایستی به اندازه‌گیری‌های انجام شده در آن ارتفاع افزوده شود.

اگر به سمت ارتفاع کمتر از سطح اساس حرکت کنیم (R کوچکتر شود) به مقدار گرانی افزوده می‌شود، بنابراین بایستی از مقادیر اندازه‌گیری شده در ارتفاع زیر سطح اساس، به ازای هر ۱ متر ۰/۳۱ میلی‌گال کاسته شود.

در نهایت رابطه (۱-۷) برای تصحیح هوای آزاد تعریف می‌شود:

$$\Delta g_{FA} = g_{obs} - (g_N - ۰/۳۰۸۶h) \qquad (۱-۷)$$

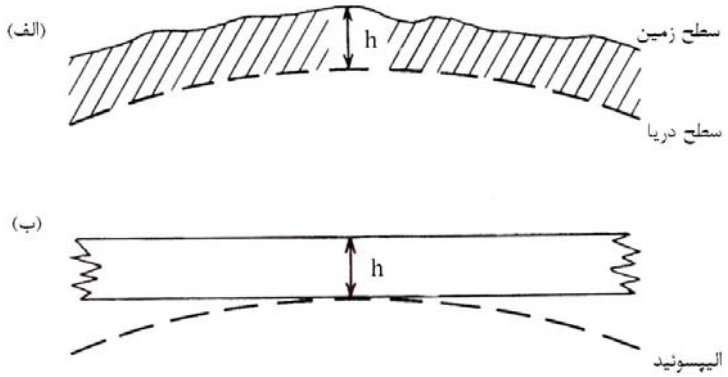
از فرمول فوق درمی‌یابیم که به میزان تصحیح هوای آزاد، با حرکت به سمت بالا به میزان گرانی افزوده می‌شود و برعکس با حرکت به سمت پائین از میزان آن کاسته می‌شود (منظور از حرکت به سمت بالا و پائین، نسبت به سطح مبنی یا سطح دریاهای آزاد که ارتفاع در آن صفر است می‌باشد).

حالا وقتی که مقادیر Δg_{FA} را از ایستگاه‌های مشاهده‌ای مختلف مقایسه کنیم می‌دانیم که مقادیر متفاوت نمی‌تواند از اختلاف ارتفاع ایستگاه‌های مشاهده‌ای ناشی شده باشد و آنها از اثرات پخی و چرخشی وابسته به عرض جغرافیایی نیز نمی‌تواند نتیجه شده باشد. هم اکنون هر مقدار گرانی هوای آزاد برای این اثرات اصلاح شده است.

۵-۳-۲- تصحیح بوگه (تصحیح جرم اضافی یا تصحیح لوح سنگی)

ما بایستی به سطح بیضوی نرمال موادی معادل آن قسمت از زمین که از سطح دریا به سطح زمین در ایستگاه مشاهده شده می‌رسد، اضافه نماییم. جاذبه گرانی این قسمت بالای سطح دریا، سپس بایستی به مقدار گرانی بیضوی نرمال در ارتفاع h که قبلاً محاسبه شده است، اضافه شود.

توده بالای سطح دریا با توجه به شکل (۱-۳ الف) می‌تواند با یک صفحه افقی در شکل (۱-۳ ب) معرفی شود که در محل ایستگاه مشاهده به بیضوی نرمال مماس است. جاذبه گرانی یک صفحه مسطح که دارای ضخامت h و چگالی ρ بوده و بینهایت امتداد داشته باشد از رابطه (۱-۸) محاسبه می‌شود:



شکل (۱- ۳) - معرفی (الف) خشکی بالای سطح دریا به وسیله (ب) یک صفحه مسطح قرار داده شده روی بیضوی نرمال برای محاسبه گرانی. جاذبه گرانی برای چنین صفحه ای خیلی نزدیک به جاذبه توده خشکی واقع بالای سطح دریا در یک ایستگاه مشاهده ای مشابه در منطقه ای با توپوگرافی ناچیز می باشد.

$$\text{جاذبه یک صفحه} = 2\pi G\rho h \qquad (۱-۸)$$

که وقتی ضخامت برحسب متر و چگالی برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب باشد گرانی صفحه برحسب میلی‌گال خواهد بود.

$$\text{گرانی صفحه} = ۰/۰۴۱۹۳\rho h \text{ میلی گال} \qquad (۱-۸\text{-الف})$$

این تخمین صفحه بینهایت همه آن چیزی است که برای تصحیح اندازه‌های گرانی توده بالای سطح دریا، اگر که منطقه برداشت توپوگرافی کمی داشته باشد، نیاز داریم. در هر ایستگاه مشاهده این تصحیح و همچنین تصحیحات هوای آزاد، پخشدگی وابسته به عرض جغرافیایی و چرخش را انجام داده تا عددی که آنومالی گرانی بوگه یا به طور ساده گرانی بوگه Δg_B است، به دست آید.

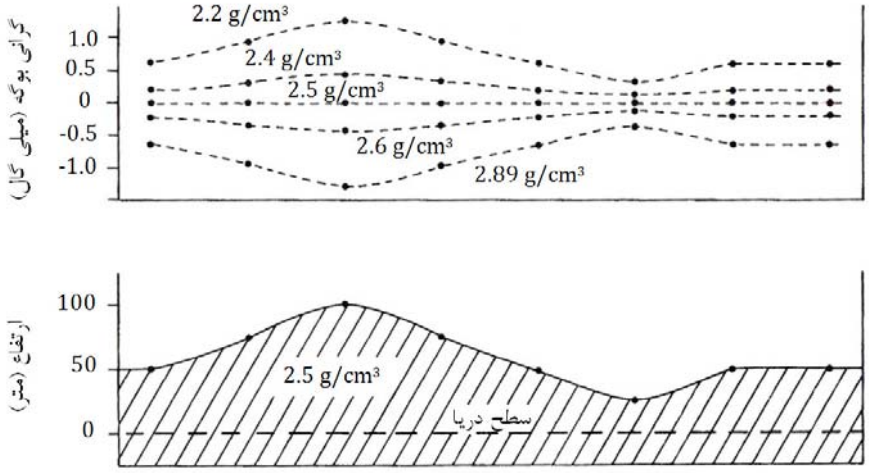
برای مقادیر مشاهده g_N و g_{obs} داده شده برحسب میلی‌گال، چگالی برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعب، ارتفاع داده شده برحسب متر، گرانی بوگه برحسب میلی‌گال از فرمول ذیل خواهد بود:

$$\Delta g_B = g_{obs} - (g_N - ۰/۳۰۸۶h + ۰/۰۴۱۹۳\rho h) \qquad (۱-۹)$$

حال بایستی برای چگالی انتخاب شده جهت محاسبه جاذبه گرانی توده بالای سطح دریا فکری بشود. مقدار یکسان معمولاً برای تصحیح همه اندازه‌های گرانی در برداشت به کار می‌رود. بهترین راه انتخاب مقداری نزدیک به چگالی متوسط این توده است.

فرض کنید ما چگالی‌های متفاوتی برای محاسبه گرانی بوگه انتخاب کرده‌ایم. در شکل (۱-۴) نشان داده‌ایم که با استفاده از چگالی‌های متفاوت، چگونه پروفیل‌های متفاوتی از گرانی بوگه خواهیم داشت. مشاهده می‌کنید که با انتخاب چگالی بزرگتر از مقدار صحیح، مقادیر گرانی بوگه با افزایش ارتفاع از سطح، کاهش می‌یابد.

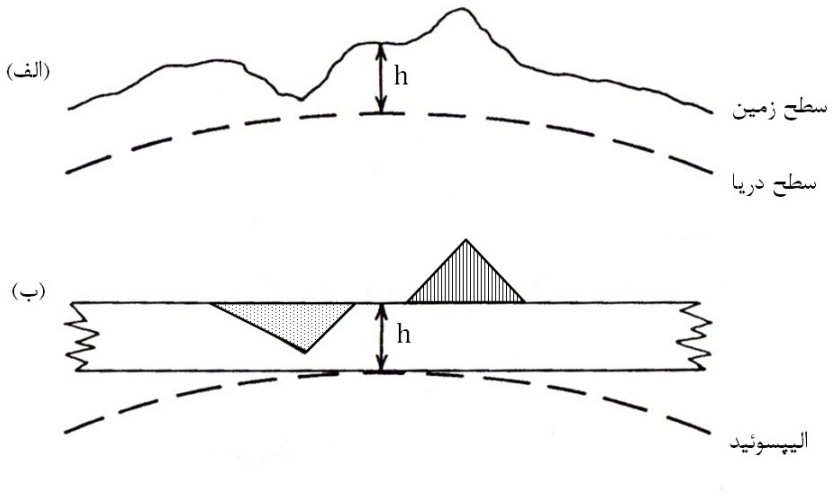
با توجه به شکل (۱-۴) در می‌یابیم که چگالی $۲/۵ \frac{gr}{Cm^۳}$ مقادیر گرانی بوگه‌ای تولید می‌کند که در پاسخ نسبت به تغییر ارتفاع سطح زمین، در طول پروفیل ثابت می‌ماند. بنابراین بایستی پروفیلی انتخاب شود که نسبت به ارتفاع حساس نباشد.



شکل (۱- ۴) - نمودار نشان دهنده روش نتلتون برای تخمین چگالی. منحنی های خط چین گرانی بوگه محاسبه شده برای چند مقدار گرانی آزمایش شده را نشان می‌دهند.

۵-۳-۳- تصحیح توپوگرافی

تا اینجا تصحیح برای توده خشکی بالای سطح دریا در منطقه برداشتی که توپوگرافی ملایمی دارد بحث کردیم. حال به تصحیح مواردی می‌پردازیم که در مناطق کوهستانی با توپوگرافی خشن روبرو می‌شویم. به شکل (۱-۵ الف) توجه کنید، یک گرانی سنج در یک ایستگاه مشاهده‌ای که به وسیله جرم زمین زیر آن جذب می‌شود، قرار گرفته است. برای اینکه این توپوگرافی را به حساب آوریم در شکل (۱-۵ ب) همان جرم مشابه را روی صفحه مسطح که قبلاً بر روی بیضوی نرمال قرار داده‌ایم اضافه می‌کنیم. جاذبه گرانی این توپوگرافی در ایستگاه مشاهده می‌تواند با TC معرفی شود که نمایانگر تصحیح توپوگرافی است.



شکل (۱- ۵) - معرفی (الف) پدیده های توپوگرافی به وسیله (ب) جرم افزایشی اضافه شده یا برداشته شده از یک صفحه مسطح قرار داده شده روی بیضوی نرمال به منظور محاسبه مقدار گرانی بوگه. جاذبه گرانی یک صفحه مسطح اصلاح شده به این ترتیب به طور نزدیکتری جاذبه یک توده خشکی واقعی بالای سطح دریا را در مقایسه با جاذبه یک صفحه مسطح منفرد دوباره سازی می نماید.

مشاهده کنید که کوه یک جاذبه به طرف بالا بوده که مخالف جاذبه بـه طـرف پـایین صـفحه مـسطح اسـت. بنـابراین، مقدارش بایستی از اثر صفحه برای تعیین جاذبه گرانی توده خشکی بالای سطح دریا کم شود.

حالا به دره نزدیک ایستگاه مشاهده در شکل توجه کنید. برای این که این پدیده توپوگرافی را به حساب آوریم بایـستی دره مشابه‌ای با برداشتن مقداری جرم از صفحه مسطح بوجود آوریم. با کم کردن آن از جاذبـه صـفحه، جاذبـه گرانـی تـوده خشکی بالای سطح دریا را به دست می‌آوریم.

برای معرفی یک توپوگرافی خشن روی خشکی بالای سطح دریا می‌توانیم توپوگرافی را بـا اضـافه کـردن جـرم بـر روی صفحه مسطح و در مورد دره با برداشتن جرم از صفحه مسطح به وجود آوریم. اثر هر دو نوع توپوگرافی کـوه یـا دره کـاهش دادن جاذبه گرانی بیان شده با رابطه (۱-۸) است. حال اجازه دهید کـه TC یـا تـصحیح توپـوگرافی را بـرای جاذبـه گرانـی مجموعه تپه‌ها و دره‌های نزدیک بالای ایستگاه مشاهده معرفی نمائیم. آن وقت گرانی بوگه با فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta g_B = g_{obs} - (g_N - ۰/۳۰۸۶h + ۰/۴۱۹۳\rho h - TC) \qquad (۱۰-۱)$$

که در آن Δg_B، g_{obs}، g_N و TC برحسب میلی‌گال، h برحسب متر و ρ برحسب گرم بر سانتی‌متر مکعـب اسـت (نحوه محاسبه TC را می‌توانید از کتب مرجع ژئوفیزیکی مطالعه کنید).

ملاحظه شد هر دو مورد کوه و دره از میزان گرانی نرمال کم می‌کنند، که در تصحیح این مقدار به میزان مشاهده شـده اضافه می‌شود. پس تصحیح توپوگرافی در هر دو مورد به میزان اندازه‌گیری شده افزوده می‌شود.

۵-۴- تصحیح جزر و مد

به بی‌هنجاری‌هایی که تحت تاثیر خورشید و ماه قرار می‌گیرند تصحیحات جزر و مدی گفته می‌شود. جزر یا مد باعث تغییرات ارتفاع ایستگاه در موقع اندازه‌گیری می‌شود. در بعضی موارد میزان تغییرات ارتفاع حتی به چند سانتی‌متر می‌رسد که در گرانی سنجی باید این گونه تغییرات از روی داده‌ها برداشته شود.

۵-۵- تصحیح اوت‌واش

تصحیح داده‌های دریایی را اوت‌واش می‌گویند. این نوع تصحیح به جهت حرکت کشتی بستگی دارد. در عرض جغرافیایی متوسط میزان تصحیح برابر ۷۵+ واحد گرانی برای هر نات (ساعت/مایل = knot) از شرق به غرب آورده شده بنابراین خواهیم داشت:

$$\Delta g_B = g_{obs} - (g_N - ۰/۳۰۸۶h + ۰/۴۱۹۳\rho h - TC \pm EC) \qquad (۱۱-۱)$$

EC+ برای زمانی که کشتی از غرب به شرق حرکت می‌کند و EC- برای زمانی است که کشتی از شرق به غرب حرکت می‌کند. بایستی توجه داشت که روی سطح دریا تصحیح توپوگرافی و هوای آزاد صفر هستند. این تصحیح معمولاً بزرگترین محدودیت برای دقت گرانی بوگه است.

۶- گرانی‌سنجی در دریا

گرانی‌سنجی در دریا می‌تواند به دو طریق در کف اقیانوس و بر روی عرشه کشتی انجام شود. اما دقیق‌ترین و وقت‌گیرترین اندازه‌گیری با گرانی‌سنج‌های کم و بیش متداول که در پوشش مخصوصی محافظت شده و بوسیله کنترل الکترونیکی از راه دور کار می‌کند، در کف اقیانوس انجام شده است.

۶-۱- اندازه‌گیری در کف اقیانوس

گسترده‌ترین گرانی‌سنج مدرن مورد استفاده در کف اقیانوس دستگاه لکوست - رمبرگ است.

حال به بررسی این موضوع می‌پردازیم، که پس از اندازه‌گیری گرانی در کف اقیانوس چه تصحیحاتی بایستی روی آن انجام داد.

ما از گرانی اندازه گرفته شده (g_{obs}) مقدار گرانی بیضوی نرمال را که به خاطر اثرات ارتفاع و جرم لایه آب اصلاح شده کم می‌کنیم. بنابراین اولین اصلاح شامل کم کردن جاذبه لایه‌ای به ضخامت عمق اقیانوس از گرانی نرمال می‌باشد. دومین اصلاح شامل اضافه کردن گرانی ایجاد شده به دلیل حرکت به سمت پائین سطح اساس می‌باشد. اصلاح نهایی برای جاذبه گرانی به طرف بالای لایه آب بر گرانی سنج بوده که مخالف جاذبه به طرف پائین زمین جامد زیری است که بایستی به حساب آید.

سه اصلاحی را که هم‌اکنون شرح دادیم در فرمول زیر برای محاسبه گرانی بوگه Δg_B در کف اقیانوس ترکیب شده است:

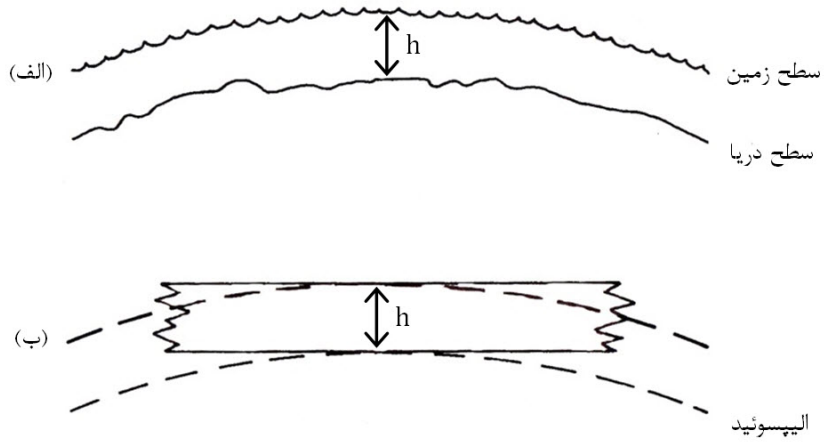
$$\Delta g_B = g_{obs} - (g_N - ۰/۰۴۱۹۳\rho_r d + ۰/۳۰۸۶d - ۰/۰۴۱۹۳\rho_\omega d) \qquad (۱۲-۱)$$

ρ_r چگالی لایه خارجی بیضوی نرمال کـه آب اقیـانوس جـایگزین آن شـده، برحـسب $\frac{gr}{Cm^3}$، ρ_ω چگـالی آب دریـا برحسب $\frac{gr}{Cm^3}$، d عمق آب دریا برحسب متر و Δg_B، g_{obs}، g_N برحسب میلی‌گال است.

می‌توان اضافه کرد، چون گرانی نرمال در روی سطح بیضوی محاسبه می‌شود، وقتی در کف اقیانوس قرار داشـته باشـیم گرانی لوح سنگی با چگالی ρ_r از مقدار گرانی نرمال کاسته می‌شود. همچنین میزان کششی که آب دریا به سمت بـالا دارد نیز مانند لایه‌ای با چگالی ρ_ω عمل می‌کند که این گرانی هم از گرانی نرمال کاسته می‌شود. اما بـه دلیـل حرکـت بـه زیـر سطح اساس (سطح آبهای آزاد)، تصحیح ارتفاع بایستی به گرانی نرمال اضافه شود.

۶-۲- اندازه‌گیری از روی عرشه کشتی

آنومالی‌های گرانی از اندازه‌گیری‌های روی کشتی به طریق ذیل محاسبه می‌شوند. به خاطر اینکه کشتی در روی سطح دریـا قرار دارد تصحیح ارتفاع نیازی نیست. برای بدست آوردن گرانی بوگه بایستی تصحیحی برای به حساب آوردن آب زیر کشتی انجام دهیم. به شکل (۱-۶) دقت کنید، بیضوی طبیعی جامد تصور می‌شود. جاذبه گرانی لایه خارجی آن تـا عمقـی معـادل عمق d اقیانوس از جاذبه آب دریا متفاوت است بنابراین، می‌بایست از گرانی نرمال g_N جاذبه یک صفحه جامد با ضخامت d و چگالی ρ_r را کم کرده و سپس یک صفحه از آب با همان ضخامت و چگالی ρ_ω را به آن اضافه کنیم.



شکل (۱- ۶) - معرفی (الف) لایه آب اقیانوس به وسیله؛ (ب) یک صفحه مسطح قرار داده شده پائین بیضوی طبیعی به منظور محاسبه مقدار گرانی بوگه از اندازه گیری های روی عرشه کشتی.

این اصلاحات در فرمول زیر برای بدست آوردن مقدار گرانی بوگه ترکیب شده است:

$$\Delta g_B = g_{obs} - (g_N - ۰/۰۴۱۹۳d\,(\rho_r - \rho_\omega)) \qquad (۱۳-۱)$$

که در آن Δg_B، g_{obs}، g_N برحسب میلی‌گال، ρ_r و ρ_ω برحسب $\frac{gr}{Cm^3}$ و d برحسب متر است. (بایستی بـه ایـن نکته توجه شود که روی سطح مبنی، تصحیح ارتفاع نداریم).

۷- نقشه‌های گرانی بوگه

مقادیر گرانی بوگه قبلاً برای اثبات عرض جغرافیایی وابسته به پخی و چرخش زمین، ارتفاع و توده خشکی بالای سطح دریا اصلاح شده است. بنابراین، هر اختلافی بین گرانی بوگه از جایی به جای دیگر بایستی بر اثر نامنظمی چگالی همراه با ساختمان‌های زمین‌شناسی ایجاد شده باشد.

طرح تغییرات گرانی بوگه معمولاً بوسیله نقشه‌های منحنی میزان نمایش داده می‌شود. یک نقشه منحنی میزان گرانی بوگه به همان ترتیب نقشه توپوگرافی تهیه شده بجز اینکه بجای ارتفاع مقادیر گرانی بوگه منحنی میزان‌بندی (کنتوربندی) شده است.

منحنی میزان‌ها نشان می‌دهند که چگونه مقادیر گرانی بوگه از جایی به جای دیگر در منطقه برداشت تغییر می‌کند. این طرح تغییرات اساساً تغییرات چگالی را می‌رسانند. گرانی بوگه در مناطقی که چگالی متوسط سنگ‌ها نسبتاً پائین می‌باشد، کم است. مقادیر بالا مناطقی را نشان می‌دهد که در آنجا متوسط چگالی سنگ‌ها نسبتاً بالاست.

۸- مشخصات گرانی بوگه منطقه‌ای

۸-۱- اختلاف بین قاره و اقیانوس

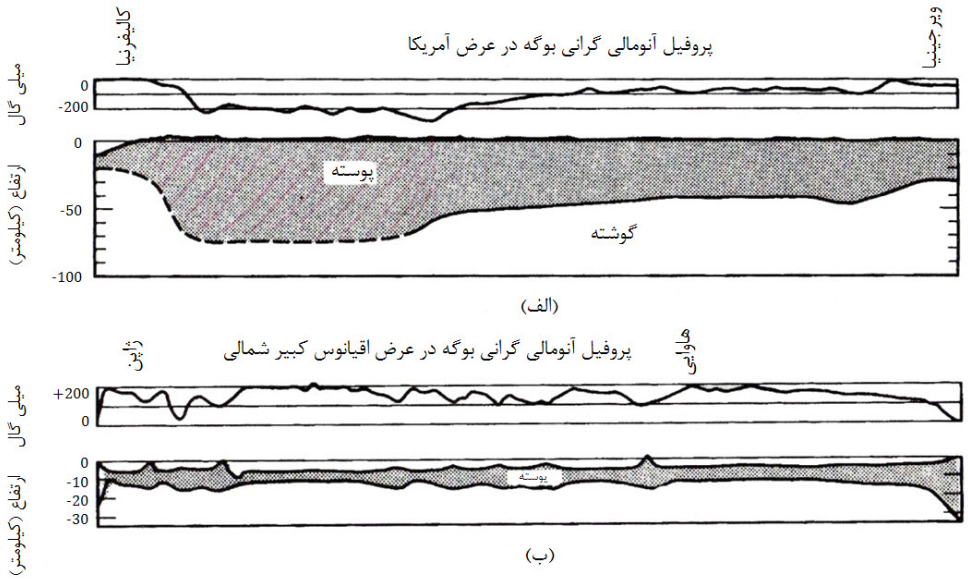
معمولاً به طرح‌های گرانی بوگه که امتداد چندین ده یا صدها کیلومتر دارند به عنوان آنومالی منطقه‌ای اتلاق می‌کنیم. بر روی این آنومالی‌های منطقه‌ای، آنومالی‌های محلی قرار گرفته که کمتر از چند یا چند ده کیلومتر وسعت دارند. از همه چشمگیرتر اختلاف بین طرح‌های گرانی بوگه روی قاره‌ها و حوضه‌های رسوبی حاشیه اقیانوس‌هاست. تقریباً همه جا روی قاره‌ها مقادیر گرانی بوگه منفی است. روی اقیانوس‌ها مقادیر مثبت هستند. نزدیک سواحل این مقادیر نزدیک صفر هستند. مقادیر گرانی بوگه منفی روی اکثر مناطق قاره‌ای و مقادیر مثبت روی حوضه‌های اقیانوسی جهان اندازه‌گیری می‌شود.

۸-۲- گرانی بوگه و ارتفاعات

کمترین گرانی بوگه، یعنی بیشترین مقادیر منفی، مخصوص مناطق با بزرگترین ارتفاعات است. بطور مثال در قلل مرتفع کوه‌های راکی گرانی بوگه به حدود بین ۲۰۰- تا ۳۰۰- میلی‌گال کاهش می‌یابد. در مناطق پست در حاشیه سواحل و در دره می‌سی‌سی‌پی مقادیر گرانی بوگه بالاتر از ۳۰- تا صفر میلی‌گال متداول است (شکل ۱-۷). در روی حوضه‌های اقیانوسی آنجا که سطح زمین خیلی به پائین سطح دریا می‌رود گرانی بوگه تا بیشتر از ۲۰۰+ میلی‌گال افزایش می‌یابد.

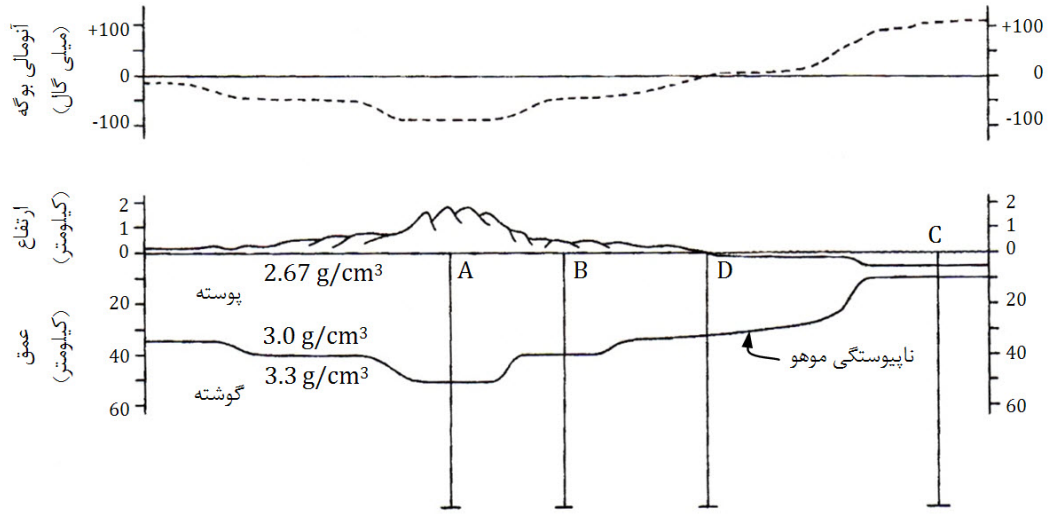
۸-۳- گرانی بوگه و ضخامت پوسته

یک پدیده مهم پوسته، انطباق بین متوسط ضخامت آن و متوسط ارتفاع سطح زمین است. این مسئله در شکل (۱-۷) واضح بوده که پوسته ضخیمی را در مناطق مرتفع نشان می‌دهد. پوسته تاحدودی در مناطق پست نازک‌تر بوده و زیر اقیانوس‌ها خیلی نازک‌تر شده؛ جایی که سطح زمین چندین کیلومتر پائین سطح آب قرار می‌گیرد.



شکل (۱- ۷) - پروفیل تغییرات گرانی بوگه و ضخامت پوسته در عرض (الف) ایالات متحده آمریکا و (ب) اقیانوس کبیر شمالی.

حال به توضیح این مطلب می‌پردازیم که چگونه گرانی بوگه با تغییرات ضخامت پوسته تحت تاثیر قرار می‌گیرد. در شکل (۱-۸) واضح است که گرانی بوگه پائین (مقادیر بزرگ منفی) در مناطقی قرار دارد که در آنجا پوسته ضخیم است. مقادیر بالاتر که خیلی نزدیک‌تر به صفر میلی‌گال است در مناطق پست و نزدیک به سواحل است. مقادیر خیلی مثبت مشخصه مناطق اقیانوسی بوده که در آنجا پوسته خیلی نازک است.



شکل (۱- ۸)- پروفیل ایده آل نشان دهنده رابطه بین گرانی بوگه، ارتفاع و سطح زمین و ضخامت پوسته است که در یک منطقه بزرگ تمایل به تغییر گرانی بوگه به طور معکوسی نسبت به ارتفاع و ضخامت پوسته نشان می دهد.

پروفیل ایده‌آل شکل (۱-۸) کمک می‌کند تا توضیح بدهد که چرا، گرانی بوگه بطور معکوس با ضخامت پوسته تغییر می‌کند. در اینجا پوسته به عنوان یک لایه‌ای نشان داده شده که در آن چگالی از $۲/۶۷ \frac{gr}{Cm^3}$ در سطح زمین تا

$\frac{gr}{Cm^3}$ ۳ در ناپیوستگی موهورویچ (مرز پوسته و گوشته) افزایش می‌یابد. پوسته بر روی گوشته همگن با چگالی $\frac{gr}{Cm^3}$ ۳/۳ قرار گرفته است.

در اندازه‌گیری‌های محاسبه شده تصحیحات گرانی همگی انجام شده است. خطوط عمودی به طرف پائین از محل‌های A و B به عمق مساوی پائین سطح دریا در داخل گوشته کشیده شده است. قسمت بزرگتری از خط از میان سنگ‌های پوسته در A نسبت به B امتداد یافته که نشان دهنده متوسط چگالی پائین‌تر در زیر A است. این پیشنهاد می‌کند که جاذبه گرانی مجموعه پوسته و گوشته بایستی در A کوچکتر از B باشد. برای این دلیل گرانی بوگه در A پائین‌تر از مقدار آن در B است.

سپس به محل C روی قسمت اقیانوسی پروفیل در شکل (۱-۸) نگاه کنید. به خاطر اینکه پوسته نسبتاً نازک است خط عمودی از میان نسبت بسیار بزرگتری از گوشته با چگالی بالا امتداد می‌یابد. چگالی متوسط بالای این ترکیب پوسته - گوشته جاذبه گرانی بالاتری تولید نموده و گرانی بوگه بالاتری در مقایسه با محل‌های قاره‌ای A و B دارد.

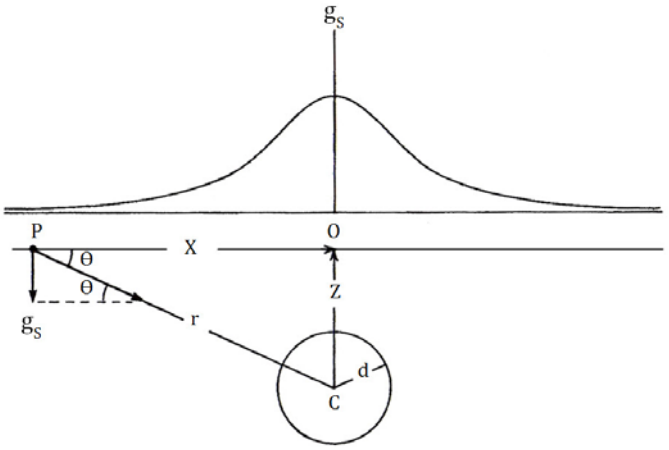
در نهایت D، در سواحل قرار داشته که در آنجا ضخامت پوسته حدود ۳۲ کیلومتر است. دلیل اینکه گرانی بوگه در این منطقه صفر است، به این خاطر است که سطح زمین در سواحل به سطح دریا می‌رسد و جملات ارتفاع و جرم از رابطه (۱-۸) حذف می‌شود. علاوه بر این، برای اینکه آنومالی بوگه صفر شود گرانی نرمال g_N بایستی مساوی گرانی مشاهده‌ای (اندازه‌گیری شده) g_{obs} باشد.

۹- جاذبه گرانی ساختمان‌های با اشکال مختلف

۹-۱- کره

اگرچه که توده معدنی ممکن است خودش یک شکل کاملاً نامنظم داشته باشد، شکل کره یک تقریب رضایت‌بخش از حجم و محل آن است. پس کره می‌تواند به عنوان یک مدل از توده معدنی به منظور محاسبه جاذبه گرانی استفاده شود.

کره‌ای با چگالی ρ_1 و شعاع d در سنگهایی با چگالی ρ_0 در نظر بگیرید (شکل ۱-۹). مرکز این کره در عمق Z از سطح قرار گرفته است. وجود کره سبب می‌شود قرائتهای گرانی‌سنج در طول خط مشاهده تغییر نماید. g_S را آنومالی گرانی ایجاد شده به وسیله کره که تغییر در گرانی است و به وسیله گرانی‌سنج دریافت می‌شود در نظر بگیرید. g_S آنومالی ایجاد شده توسط کره‌ای به شعاع d در عمق Z بصورت زیر محاسبه می‌شود:



شکل (۱- ۹)- مسافت ها و زوایای استفاده شده برای محاسبه آنومالی گرانی قائم g_S تولید شده به وسیله یک کره مدفون.

$$\left.\begin{aligned} &\Delta m = \frac{۴}{۳}\pi d^{۳}\underbrace{(\rho - \rho_{\circ})}_{\Delta\rho} \\ &Sin\theta = \frac{g_S}{g} \qquad g_S = g Sin\theta \\ &g = \frac{Gm}{r^{۲}} \quad , \quad Sin\theta = \frac{Z}{r} \end{aligned}\right\} \Rightarrow g_S = \frac{G\Delta m}{r^{۲}} Z \qquad (۱۴-۱)$$

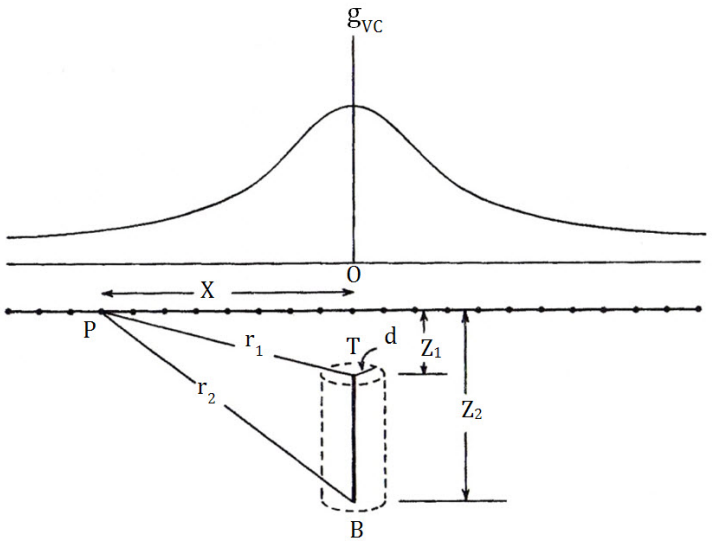
g_S برحسب میلی‌گال، چگالی برحسب $\frac{gr}{Cm^{۳}}$ و شعاع d، فاصله r و عمق Z برحسب متر می‌باشند.

۹-۲- استوانه عمودی

یک مدل مفید دیگر برای معرفی بعضی ساختمان‌های زمین، استوانه عمودی است. گنبد نمکی تقریباً به شکل استوانه است. در یک نقطه روی محور یک استوانه مدفون آنومالی گرانی g_{VC} می‌تواند از فرمول زیر محاسبه شود:

$$g_{VC} = ۲\pi G\Delta\rho\,(Z_۲ - Z_۱ + \sqrt{Z_۱^{۲} + d^{۲}} - \sqrt{Z_۲^{۲} + d^{۲}}) \qquad (۱۵-۱)$$

که در آن $Z_۱$ و $Z_۲$ عمق‌های بالا و پائین استوانه و d شعاع آن است (شکل ۱-۱۰). این فرمول می‌تواند برای پیدا کردن g_{VC} در نقطه مشاهده o که مستقیماً روی مرکز استوانه است استفاده شود؛ اما نمی‌تواند برای محاسبه جاذبه گرانی در هیچ جای دیگر به طور مثال در نقطه P استفاده شود. فرمول ساده‌ای برای انجام این کار وجود ندارد، اما می‌توانیم از فرمول زیر که تقریب نسبتاً خوبی است برای نقاطی مشابه P استفاده کنیم:



شکل (۱- ۱۰)- پروفیل آنومالی گرانی روی یک استوانه قائم محاسبه شده با فرض این که همه جرم آن در خط محور TB متمرکز شده باشد.

$$g_{VC} \cong \frac{\pi G d^{۲} \Delta\rho}{r_{۲} - r_{۱}} \qquad (۱۶-۱)$$

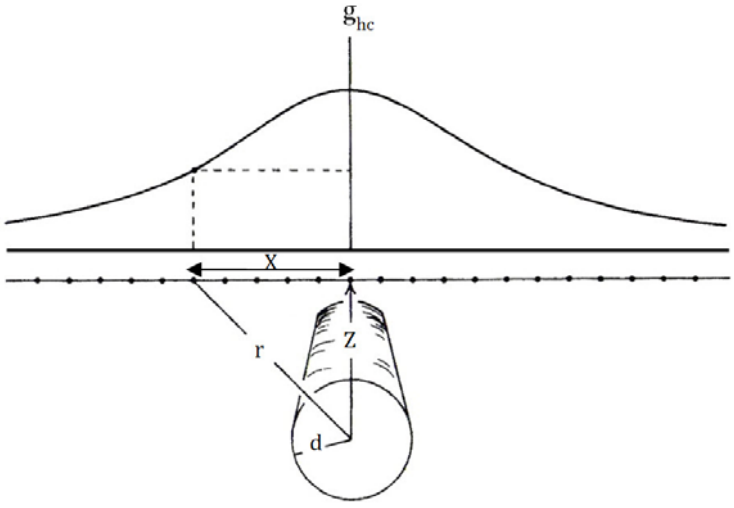
که در آن g_{VC} برحسب میلی‌گال، $\Delta\rho$ برحسب $\frac{gr}{Cm^{۳}}$ و d و $r_{۱}$ و $r_{۲}$ برحسب متر می‌باشند.

۹-۳- استوانه افقی

یک مدل دیگر استوانه افقی بوده که برای توضیح طرحهای تغییرات طویل و باریک دیده شده در نقشه‌های منحنی میزان گرانی بوگه، مفید واقع شده است. برای بدست آوردن یک فرمول ساده برای محاسبه آنومالی گرانی بر روی این ساختمان فرض خواهیم کرد که چنین ساختمانی بی‌نهایت طویل است. پس از محاسبات ریاضی اولیه به فرمول زیر برای محاسبه گرانی استوانه افقی دست می‌یابیم:

$$g_{hc} = \frac{۲\pi G d^{۲} \Delta\rho Z}{r^{۲}} \qquad (۱۷-۱)$$

که در آن Z عمق محور استوانه و فاصله آن r از نقطه مشاهده است (شکل ۱-۱۱). g_{hc} برحسب میلی‌گال، اختلاف چگالی $\Delta\rho$ برحسب $\frac{gr}{Cm^{۳}}$ و شعاع استوانه d و عمق Z و r برحسب متر می‌باشند.

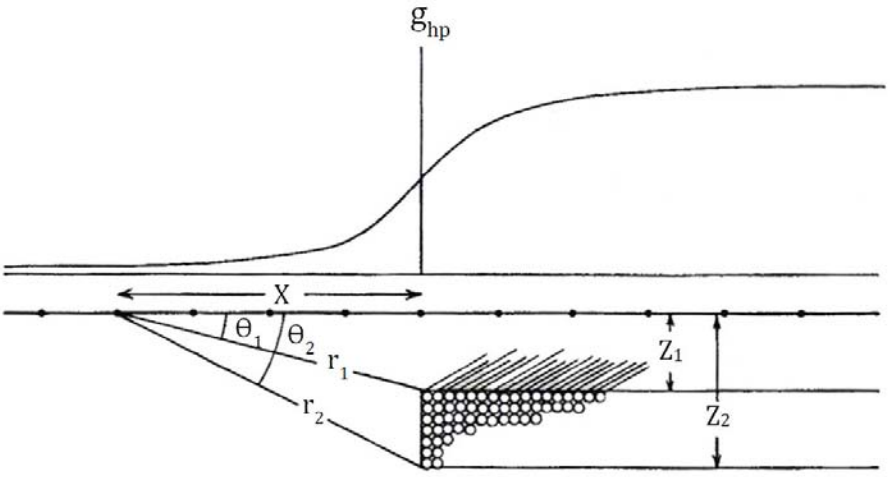


شکل (۱- ۱۱)- پروفیل آنومالی گرانی روی یک استوانه افقی مدفون با طول بینهایت.

۹-۴- صفحه افقی نیمه بینهایت

مدل ساده دیگری که باید مورد نظر قرار گیرد یک صفحه افقی مدفون با یک حاشیه عمودی است. آن برای توضیح تغییرات گرانی بوگه تولید شده بوسیله لایه‌های سنگ به کار برده شده که در طول یک گسل جابه‌جا شده است. در اینجا از ذکر

فرمول محاسبه آنومالی گرانی آن، بدلیل پیچیدگی زیاد صرف نظر می‌کنیم و تنها به ذکر محاسبه گرانی دقیقاً در بالای لبه قائم صفحه اکتفا می‌کنیم (شکل ۱-۱۲).



شکل (۱-۱۲)- پروفیل آنومالی گرانی روی یک صفحه افقی مدفون با لبه قائم. چنین صفحه‌ای می‌تواند با تعداد زیادی میله باریک موازی که به طور افقی در کنار هم دسته شده معرفی شود.

$$g_{hp} = \pi G \Delta \rho h \qquad (۱۸-۱)$$

$\Delta\rho$ برحسب $\frac{gr}{Cm^3}$ و g_{hp} برحسب میلی‌گال و h برحسب متر است. لازم به ذکر است که h ضخامت صفحه مدنظر است.

آنومالی‌های گرانی تولید شده به وسیله این مدلهای ساده مختلف دارای دو پدیده‌ی مهم هستند: (۱) بزرگترین مقدار در نزدیکترین نقطه مشاهده اتفاق می‌افتد؛ (۲) مقدار آنومالی با فاصله کاهش یافته اما آنها در فاصله فقط بینهایت به صفر می‌رسند. این پدیده‌ها نشان می‌دهد که منابع آنومالی محلی قوی‌ترین تاثیر بر روی میدان گرانی زمین در نقاط مشاهده‌ای نزدیک می‌گذارند. در فواصل دورتر آنها اثرات خفیف‌تر داشته، لیکن احتمالاً اثر آنها هنوز مهم است.

۱۰- جدا کردن طرح‌های گرانی بوگه منطقه‌ای و محلی

اثرات پدیده‌های زمین‌شناسی زیادی در مقدار گرانی بوگه جمع شده است. هر الگوی تغییر دیده شده در نقشه گرانی بوگه مجموع جاذبه های منابع محلی و منابع منطقه‌ای وسیع‌تر یا دورتر است. در هیچ جا نمی‌توانیم آنومالی از یک منبع را اندازه بگیریم که با آنومالی‌هایی از منابع دیگر پوشیده نشده باشد. مسلماً در بعضی جاها یک منبع آن قدر تفوق دارد که تغییر آنومالی آن به وسیله آنومالی‌های دیگر ناچیز است. اما در بعضی جاهای دیگر آنومالی‌های ساختمان‌های مورد علاقه، تقریباً کاملاً مخفی شده است.

راه‌هایی که می‌توان آنومالی‌های منفرد مورد علاقه را از الگوهای تغییر گرانی بوگه دیده شده در یک نقشه یا پروفیل جدا کرد شامل:

۱) هموار کردن به طریق گرافیکی؛ ۲) شبکه‌بندی یا عددی کردن داده‌ها؛ ۳) هموار کردن با متوسط‌گیری؛ ۴) متوسط‌گیری وزن‌دار؛ ۵) گسترش به بالا؛ ۶) جدا کردن طول موجی؛ و ۷) محاسبه آنومالی‌هایی که بوسیله منابعی ایجاد شده‌اند که پیش از این آنها را می‌شناسیم.

در اینجا تنها به هموار کردن به طریق گرافیکی می‌پردازیم و باقیمانده موارد در مقاطع بالاتر مورد بررسی قرار می‌گیرند.