



وارون سازی غیرخطی داده های گرانی سنجی به منظور تعیین عمق، شعاع و شکل هندسی چشمه بی هنجاری، مطالعه موردی: گنبد نمکی آجی چای

عطا اسحق زاده* و ناهید سادات مرتضوی^۲

- ۱- کارشناسی ارشد، موسسه ژئوفیزیک، دانشگاه تهران
- ۲- کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد همدان

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۷/۲۲؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۵/۱۲/۰۳

* نویسنده مسئول مکاتبات: eshagh@alumni.ut.ac.ir

چکیده

در این مقاله با استفاده از یک روش وارون سازی غیرخطی داده های گرانی، پارامترهای عمق، شعاع، ضریب دامنه و عامل شکل چشمه بی هنجاری محاسبه می شود. با تعیین مقدار گرانی در مبدأ مختصات و نیز دو مقدار دیگر گرانی در روی پروفیل برداشت، عمق چشمه بی هنجاری با حل معادله غیرخطی $f(z)=0$ تخمین زده می شود. از آنجایی که در طبیعت، چشمه های بی هنجاری گرانی ناهمگن بوده و دارای شکل هندسی نامنظم می باشند؛ داده های گرانی پروفیلی معمولاً نسبت به نقطه مبدأ - که دارای مقدار گرانی بیشینه، بدون توجه به علامت مثبت و منفی آن، است و معرف مرکز چشمه بی هنجاری است- نامتقارن است و منحنی تغییرات میدان گرانی در راستای پروفیل ناهموار است. به همین دلیل در عمل از چندین داده در طول یک پروفیل برای تخمین پارامترهای عمق، ضریب دامنه و عامل شکل استفاده می شود. با دانستن مقدار عمق، سه پارامتر شعاع، ضریب دامنه و عامل شکل قابل محاسبه می باشند. روش پیشنهادی، برای چشمه هایی با شکل های هندسی استوانه عمودی، استوانه قائم و کروی مورد بررسی قرار می گیرد. کارایی روش مذکور با افزودن نوفه تصادفی به میدان گرانی محاسبه شده برای مدل های مصنوعی نیز تحلیل می شود. همچنین تأثیر عمق و اختلاف فاصله در تعیین نقطه مبدأ چشمه بی هنجاری گرانی بررسی خواهد شد. از روش وارون سازی غیرخطی برای تخمین عمق، شعاع و نیز تعیین شکل حدودی یک گنبد نمکی استفاده می شود. در این مطالعه گنبد نمکی آجی چای بررسی شده و طی آن عمق گنبد مذکور در حدود $64/63$ متر زمین و شعاع آن $34/8$ متر برآورد شده است. همچنین شکل هندسی این گنبد نمکی بر اساس عامل شکل که $1/43$ محاسبه شده است، به کره قابل تشبیه است.

واژگان کلیدی

ضریب دامنه
عامل شکل
گرانی
گنبد نمکی
وارون سازی غیرخطی

روش‌های عددی استاندارد (عبدالرحمن و همکاران، ۱۹۸۵؛ آگروال و سیواجی، ۱۹۹۲؛ عیسی، ۲۰۰۷) برای جدایش بی‌هنجاری‌های گرانی باقی‌مانده از داده‌های گرانی بوگه استفاده شود. همچنین، دقت نتایج روش ارائه شده وابسته به شباهت گسترش چشمه بی‌هنجاری در زیر زمین به یکی از شکل‌های هندسی فرضی است.

۲- تئوری روش

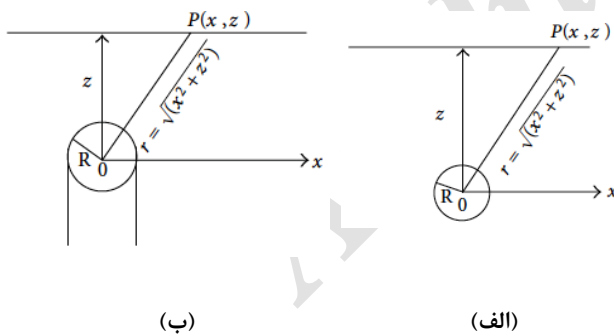
مؤلفه عمودی کل بی‌هنجاری گرانی تولید شده به وسیله یک کره (سه‌بعدی)، یک استوانه افقی طویل نامحدود (دو‌بعدی) و یک استوانه عمودی نیمه نامحدود (سه‌بعدی) به وسیله عبدالرحمن (۱۹۸۹) ارائه داده شده است (شکل ۱):

$$g(x_i, z, q) = A \frac{z^m}{(x_i^2 + z^2)^q} \quad (1)$$

به طوری که برای ضریب دامنه A کره، استوانه افقی و استوانه عمودی به ترتیب داریم:

$$A = \begin{cases} \frac{4}{3} \pi G \sigma R^3 \\ 2\pi G \sigma R^2 \\ \pi G \sigma R^2 \end{cases} m = \begin{cases} 1 \\ 1 \\ 0 \end{cases} \quad (2)$$

و مقدار عامل شکل q برای کره، استوانه افقی و استوانه عمودی به ترتیب برابر $1/5$ ، 1 و $0/5$ است.



شکل ۱: الف) مدل کره و استوانه افقی ب) مدل استوانه قائم.

عامل شکل q برای صفحات تقریب افقی به سمت صفر میل می‌کند و برای شکل‌های کاملاً کره‌ای $1/5$ است. در رابطه (۱)، z معرف عمق و x_i مختصات نقطه است. همچنین در رابطه (۲)، σ تباین چگالی، G ثابت جهانی گرانش و R شعاع است. در مبدأ مختصات ($x_i=0$) از رابطه (۱)، معادله زیر حاصل می‌شود (عیسی، ۲۰۱۲):

وارون‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی فرایندی غیر یکتاست؛ به طوری که می‌توان بی‌هنجاری‌های گرانی مشاهده‌ای در سطح اندازه‌گیری را با پخش‌هایی از تباین چگالی مختلف در زیر زمین توصیف نمود. یک روش که بتوان این ابهام را برطرف نمود، در نظر گرفتن یک شکل هندسی مناسب برای توده بی‌هنجاری، با یک چگالی ثابت در وارون‌سازی بی‌هنجاری‌های گرانی است (چاکراواری و ساندراراجان، ۲۰۰۴). هرچند ممکن است مدل‌های ساده معرف ساختار زمین‌شناسی نباشند؛ اما معمولاً در تحلیل چشمه‌های بی‌هنجاری مجزا و توده‌ای مفید و کافی می‌باشند (عبدالرحمن و العربی، ۱۹۹۳). تفسیر چنین بی‌هنجاری‌هایی ضرورتاً رسیدن به پارامترهای توده مانند شکل، عمق و شعاع است. چندین روش عددی و ترسیمی برای تفسیر بی‌هنجاری‌های گرانی که مولد آن‌ها دارای شکل هندسی ساده است، ارائه شده است. ساده‌ترین راه که برای تقریب زدن عمق توده مولد بی‌هنجاری از روی میدان گرانی باقی‌مانده ارائه شده، قانون نصف گرانی بیشینه ($half-g_{max}$) است (نتلتون، ۱۹۴۲؛ تلفورد و همکاران، ۱۹۷۶). با این حال، این روش تا حدود زیادی ذهنی و غیرواقعی است و خطای زیادی به همراه دارد (نتلتون، ۱۹۷۶). گوپتا (۱۹۸۳) یک روش عددی برای تعیین عمق مدل‌های استوانه‌ای و کره‌ای ناشی از داده‌های گرانی باقیمانده ارائه داد. عبدالرحمن (۱۹۹۰) استدلال کرد که وارد کردن مقادیر گرانی بیشینه به عنوان پارامتر معلوم در فرمول گوپتا ممکن است منجر به خطاهای بزرگی در محاسبه عمق در حضور نوفه شود. همچنین چندین روش محاسبه‌ای برگردان داده‌های گرانی برای تخمین پارامترهای مدل با سطح موفقیت مختلف ارائه شده است (لی و الدنبرگ، ۱۹۹۸؛ لی و چوتیو، ۱۹۹۸؛ بولانگر و چوتیو، ۲۰۰۱). یک روش ساده به وسیله عیسی (۲۰۰۷) پیشنهاد داده شده که برای تعیین عمق و عامل شکل اجسام هندسی ساده از بی‌هنجاری‌های گرانی باقی‌مانده در راستای پروفیل استفاده می‌کند. روش خودکار دیگر، روش کمترین مربعات است؛ که توسط اصفهانی و تلاس (۲۰۰۸) پیشنهاد شده است. این روش عمق و ضریب دامنه را محاسبه می‌نماید. مشکل اصلی روش‌های وارون‌سازی، عدم یکتایی ذاتی جواب‌ها است (لی و الدنبرگ، ۱۹۹۶)؛ بنابراین هنوز به روش‌های تفسیری نیاز است که عملگر قوی و سریع داشته و بتوانند پارامترهای توده‌ها را در موقعیت میدانی برآورد نمایند.

در این تحقیق یک روش وارون بر اساس معادله غیرخطی $Z=f(Z)$ برای تحلیل بی‌هنجاری‌های گرانی مربوط به ساختارهای ساده ارائه می‌شود. روش وارون‌سازی به صورت خودکار عمق، طبیعت چشمه (عامل شکل)، ضریب دامنه و شعاع ساختارهای مدفون را برآورد می‌کند. دقت نتایج به دست آمده با این روش وابسته به دقت بی‌هنجاری باقی‌مانده که می‌تواند از بی‌هنجاری گرانی بوگه جدا شود، است. در بیشتر موارد، روش‌های گرافیکی (نتلتون، ۱۹۷۶) یا

زیر محاسبه نمود:

$$q_c = \frac{q_1 + q_2}{2} \quad (12)$$

به طوری که

$$q_1 = \frac{\ln F}{\ln(z_c^2 / (N^2 + z_c^2))} \quad (13)$$

$$q_2 = \frac{\ln T}{\ln(z_c^2 / (M^2 + z_c^2))} \quad (14)$$

که در آن z_c عمق برآورد شده است. در نهایت با دانستن عامل شکل، ضریب دامنه A را می‌توان از رابطه زیر به دست آورد (عیسی، ۲۰۱۲):

$$A_c = g(0) z_c^{2q_c - m} \quad (15)$$

که q_c عامل شکل برآورد شده است. برای هر مقدار N و M مقادیر پارامترهای مدل (z, q, A) از رابطه‌های (۱۰، ۱۲ و ۱۵) محاسبه می‌شود. همچنین مقدار پارامتر شعاع R از رابطه (۲) به دست می‌آید.

از نظر تئوری، مقادیر بی‌هنجاری در مبدأ و در فواصل N و M برای تعیین پارامترهای مدل کفایت می‌کنند؛ با این حال توصیه می‌شود در عمل، از تمام ترکیب‌های ممکن مقادیر N و M استفاده شود؛ تا جواب‌های دقیق‌تری برای پارامترهای چشمه به دست آید؛ بنابراین بهترین انطباق بین داده‌های گرانی مشاهده‌ای و محاسبه‌ای برای هر مجموعه از محاسبات اندازه‌گیری شده است.

ساده‌ترین راه برای محاسبه دو پروفیل داده‌های گرانی (مشاهده‌ای و محاسبه‌ای)، محاسبه خطای استاندارد μ بین مقادیر مشاهده‌ای و محاسبه‌ای از مقادیر محاسبه شده‌ی z, q و A است. پارامترهای مدل که کمترین اختلاف مربعات مجموع میانگین ریشه را داشته باشند، به عنوان پارامترهای عامل شکل، ضریب دامنه و عمق پهنه در نظر گرفته می‌شوند. در این روش، می‌توان بهترین برازش پارامترهای چشمه را انتخاب نمود. خطای استاندارد نیز از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$$\mu = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [g(x_i) - g_c(x_i)]^2}{N}} \quad (16)$$

به طوری که $g(x_i)$ ، مقادیر گرانی مشاهده‌ای و $g_c(x_i)$ مقادیر گرانی محاسبه‌ای می‌باشند.

۳- بررسی مدل‌های مصنوعی

در ادامه، سه مدل مصنوعی استوانه افقی، استوانه عمودی و کره با پارامترهای مختلف تعریف کرده و میدان گرانی حاصل از این مدل‌ها را جهت مدل‌سازی وارون و محاسبه پارامترهای ضریب دامنه، عامل

$$g(0) = \frac{A}{z^{2q-m}} \quad (3)$$

با استفاده از رابطه (۱)، معادله نرمال شده زیر در $x_i = \pm N$ و $x_i = \pm M$ که $N, M = 1, 2, 3, \dots$ به دست می‌آید.

$$\frac{g(N)}{g(0)} = \left(\frac{z^2}{N^2 + z^2} \right)^q, \quad \frac{g(M)}{g(0)} = \left(\frac{z^2}{M^2 + z^2} \right)^q \quad (4)$$

اگر $F = (g(N)/g(0))$ و $T = (g(M)/g(0))$ باشد؛ با توجه به رابطه (۴) می‌توان روابط زیر را به دست آورد:

$$\ln F = \ln \left(\frac{g(N)}{g(0)} \right) = \ln \left(\frac{z^2}{N^2 + z^2} \right)^q = q \ln \left(\frac{z^2}{N^2 + z^2} \right) \quad (5)$$

$$\ln T = \ln \left(\frac{g(M)}{g(0)} \right) = \ln \left(\frac{z^2}{M^2 + z^2} \right)^q = q \ln \left(\frac{z^2}{M^2 + z^2} \right) \quad (6)$$

با تقسیم دو رابطه (۵) و (۶) داریم:

$$\frac{\ln F}{\ln T} = \frac{\ln \left(\frac{z^2}{N^2 + z^2} \right)}{\ln \left(\frac{z^2}{M^2 + z^2} \right)} \quad (7)$$

از رابطه (۷)، رابطه (۸) نتیجه می‌شود (عیسی، ۲۰۱۲):

$$\frac{[(\ln F / \ln T) \times (\ln(z^2 / (M^2 + z^2)))] + \ln(N^2 + z^2)}{2} = \ln z \quad (8)$$

و با استفاده از تعریف تابع نمایی برای هر دو سمت رابطه (۸) داریم:

$$e^{\ln z} = e^{\left(\frac{[(\ln F / \ln T) * (\ln(z^2 / (M^2 + z^2)))] + \ln(N^2 + z^2)}{2} \right)} \quad (9)$$

$$Z = e^{\left(\frac{[(\ln F / \ln T) * (\ln(z^2 / (M^2 + z^2)))] + \ln(N^2 + z^2)}{2} \right)}, \quad M \neq N \quad (10)$$

رابطه (۱۰) را می‌توان برای Z با استفاده از روش‌های استاندارد، جهت حل معادلات غیرخطی حل نمود (پرس و همکاران، ۱۹۸۶) و شکل تکرار آن را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$z_f = f(z_j), \quad (11)$$

که در آن z_j عمق اولیه و z_f عمق اصلاح شده است. z_f به عنوان z_j در تکرار بعدی استفاده خواهد شد. تکرار، زمانی که $|z_f - z_j| \leq e$ گردد، متوقف می‌شود. e یک عدد واقعی کوچک نزدیک به صفر است. عمق چشمه با حل معادله غیرخطی برای Z تعیین می‌شود. هرگونه حدس اولیه برای Z به خوبی عمل می‌کند، چراکه همیشه یک مقدار وجود دارد. از نظر تئوری، دو مقدار متفاوت N و M برای تعیین عمق کافی می‌باشند. در عمل، به دلیل وجود نوفه در داده‌های برداشت، بیشتر از دو مقدار از N و M به کار گرفته می‌شود.

چنان چه عمق معلوم باشد، عامل شکل q را می‌توان از معادله

حالت های بسیار زیادی را می توان برای مقادیر N و M در نظر گرفت. انتخاب حالت های زیاد زمان زیاد برای اجرای برنامه و حافظه بیشتری را اشغال می کند. برای این مدل ۱۱ مقدار مختلف برای M با اختلاف فاصله یک کیلومتر لحاظ شده است. مقدار N نیز ثابت فرض شده است (۲-). همچنین کمترین خطای دو عمق متوالی محاسبه شده 0.05 فرض شده است و نتایج در جدول ۱ آمده است. برای تمامی مقادیر M ، پارامترهای محاسبه شده کاملاً با فرض اولیه یکسان است؛ که نشانگر کارایی الگوریتم تهیه شده در محیط متلب است. لذا با این روش تنها یک مقدار M و N برای داده های گرانی بدون نوفه کافی است.

به منظور بررسی اثر نوفه، 10% نوفه تصادفی بر اساس رابطه زیر به داده گرانی مصنوعی شکل ۲ اضافه شد (شکل ۳):

$$g_{rand}(x_i) = g(x_i)[1 + (RAN_{(i)} - 0.5) \times 0.1] \quad (18)$$

در این معادله $g_{rand}(x_i)$ مقدار بی هنجاری نوفه دار در x_i و $RAN_{(i)}$ عدد شبه تصادفی با گستره (۱،۰) است. فاصله بین اعداد شبه تصادفی نامنظم است. جدول ۲ پارامترهای مدل محاسبه شده برای داده گرانی نوفه دار شکل ۳ را نشان می دهد.

با توجه به جدول ۲، مقدار میانگین حاصل شده به ترتیب برای پارامترهای عمق، ضریب دامنه و عامل شکل $3/72$ ، $211/48$ و $0/486$ است و درصد خطا برای مقادیر میانگین پارامترهای ذکر شده به ترتیب برابر $6/89\%$ ، $5/74\%$ و $2/82\%$ است.

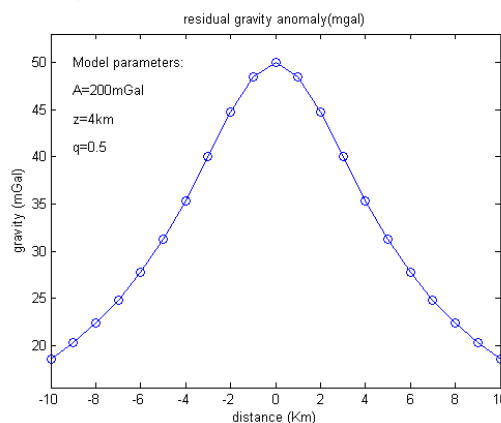
شکل ۴ درصد خطای محاسبه شده برای سه پارامتر عمق، ضریب دامنه و عامل شکل مربوط به هر مقدار از M را به صورت مجزا نشان می دهد. از نتایج تحلیل داده های گرانی نوفه دار مشخص است که برای دستیابی به بهترین پاسخ، لازم است از چندین مقدار برای M و یا N استفاده شود. چرا که برای هر فاصله از مقادیر M و N ممکن است پاسخی با خطای زیاد به دست آید.

شکل، عمق و شعاع با استفاده از روش شرح داده شده مورد تحلیل قرار می دهیم. همچنین تأثیر نوفه بر روی وارون سازی داده گرانی مورد بررسی قرار می گیرد. جهت تحلیل داده های گرانی، تأثیر انتخاب نقاط مبدأ مختلف یعنی $x_i \neq 0$ و نیز ترکیب دو مدل مختلف و تأثیر تغییرات عمق در محاسبه پارامترها مورد بررسی قرار خواهند گرفت.

۳-۱- مدل استوانه عمودی

شکل ۲ میدان گرانی یک استوانه عمودی واقع در عمق ۴ کیلومتری در راستای پروفیلی به طول ۲۰ کیلومتر با فاصله داده برداری یک کیلومتر و ضریب دامنه ۲۰۰ میلی گال را نشان می دهد. رابطه (۱) برای این مدل به صورت زیر است:

$$g_v(x_i) = \frac{200}{(x_i^2 + 4^2)^{0.5}} \quad (17)$$

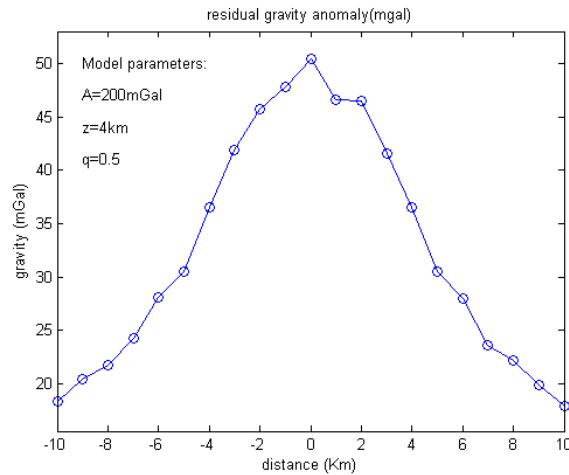


شکل ۲: میدان گرانی یک استوانه عمودی واقع در عمق ۴ کیلومتری در راستای پروفیلی به طول ۲۰ کیلومتر و ضریب دامنه ۲۰۰ میلی گال.

با استفاده از میدان گرانی شکل ۲ در رابطه های (۱۰، ۱۲ و ۱۵) عمق، ضریب دامنه و عامل شکل محاسبه شد. همان طور که قبلاً نیز بیان شد، معادلات را می توان برای N و M های مختلف که در واقع فاصله نقاط از مبدأ می باشند، حل نمود؛ بنابراین تعداد

جدول ۱: پارامترهای محاسبه شده برای میدان گرانی شکل ۲.

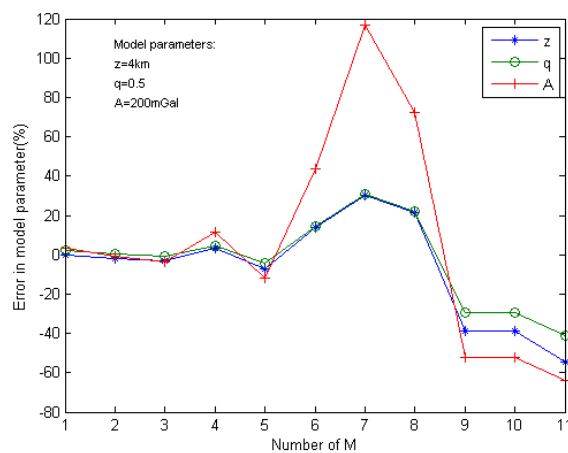
مقدار M (km)	عمق محاسبه شده (km)	عامل شکل محاسبه شده	ضریب دامنه محاسبه شده mGal
۱	۴	-۰/۵	۲۰۰
۲	۴	-۰/۵	۲۰۰
۳	۴	-۰/۵	۲۰۰
۴	۴	-۰/۵	۲۰۰
۵	۴	-۰/۵	۲۰۰
۶	۴	-۰/۵	۲۰۰
۷	۴	-۰/۵	۲۰۰
۸	۴	-۰/۵	۲۰۰
۹	۴	-۰/۵	۲۰۰
-۳	۴	-۰/۵	۲۰۰
-۴	۴	-۰/۵	۲۰۰
میانگین	۴	۰/۵	۲۰۰
درصد خطا	۰	۰	۰



شکل ۳: داده‌های گرانی شکل ۲ که ۱۰ درصد نوفه تصادفی به آن‌ها اضافه شده است.

جدول ۲: پارامترهای محاسبه شده برای میدان گرانی شکل ۲ که ۱۰٪ نوفه تصادفی به آن اضافه شده است.

مقدار M (km)	عمق محاسبه شده (km)	عامل شکل محاسبه شده	ضریب دامنه محاسبه شده mGal
۱	۳/۹۹	۰/۵۱	۲۰۷/۲۳
۲	۳/۹۲	۰/۵	۱۹۸/۹۲
۳	۳/۸۷	۰/۴۹	۱۹۲/۷۱
۴	۴/۱۲	۰/۵۲	۲۲۲/۵۴
۵	۳/۷	۰/۴۸	۱۷۶/۵۶
۶	۴/۵۵	۰/۵۷	۲۸۷/۱
۷	۵/۲	۰/۶۵	۴۳۳/۹
۸	۴/۸۵	۰/۶۱	۳۴۵/۲۵
۹	۲/۴۶	۰/۳۵	۹۵/۱۷
-۳	۲/۴۶	۰/۳۵	۹۵/۱۷
-۴	۱/۸۱	۰/۲۹	۷۱/۶۴
میانگین	۳/۷۲	۰/۴۸۶	۲۱۱/۴۸
درصد خطا	۶/۸۹	۲/۸۲	۵/۷۴



شکل ۴: درصد خطای محاسبه شده برای سه پارامتر عمق، ضریب دامنه و عامل شکل مربوط به هر مقدار از M برای مدل استوانه عمودی.

۲-۳- مدل استوانه افقی

شکل ۵ میدان گرانی مربوط به یک استوانه افقی واقع در عمق ۵ کیلومتری در راستای پروفیلی به طول ۲۰ کیلومتر با فاصله داده برداری یک کیلومتر و ضریب دامنه ۲۵۰ میلی گال در کیلومتر را نشان می دهد. رابطه (۱) برای این مدل به صورت زیر تصحیح می شود:

$$g_v(x_i) = \frac{1250}{(x_i^2 + 5^2)} \quad (19)$$

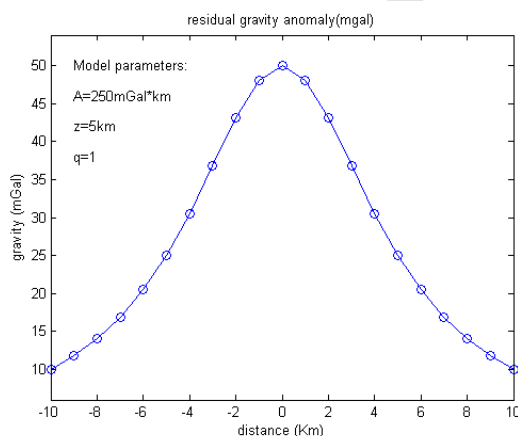
پارامترهای مدل استوانه افقی با استفاده از روش وارون سازی توضیح داده شده از روی داده های گرانی شکل ۵ محاسبه شد. برای این مدل ۱۰ مقدار مختلف برای M با اختلاف فاصله یک کیلومتر در نظر گرفته شد و مقدار N نیز ثابت فرض شد (نخستین مقدار روی پروفیل، یعنی ۱۰ km-). همچنین کمترین خطای دو عمق متوالی محاسبه شده ۰/۰۰۵ فرض شده است. نتایج در جدول ۳ آمده است. برای تمامی مقادیر M، پارامترهای محاسبه شده کاملاً با فرض اولیه یکسان می باشند.

به منظور بررسی اثر نوفه بر روی این روش، ۱۰٪ نوفه تصادفی

بر اساس رابطه (۱۷) به داده های گرانی مصنوعی شکل ۵ اضافه شد (شکل ۶).

جدول ۴ پارامترهای مدل محاسبه شده برای داده های گرانی نوفه دار شکل ۶ را نشان می دهد.

با توجه به جدول ۴، مقدار میانگین حاصل شده به ترتیب برای پارامترهای عمق، ضریب دامنه و عامل شکل ۴/۲۶، ۱۷۵/۸ و ۰/۸۷ است و درصد خطا برای مقادیر میانگین پارامترهای ذکر شده به ترتیب برابر ۱۴/۷٪، ۲۹/۶٪ و ۱۳/۵٪ است. شکل ۷ مقدار درصد خطای محاسبه شده برای سه پارامتر عمق، ضریب دامنه و عامل شکل مربوط به هر مقدار از M را به صورت مجزا نشان می دهد. از نتایج تحلیل داده های گرانی نوفه دار مربوط به استوانه افقی نیز مشخص است که برای دستیابی به بهترین جواب، لازم است از چندین مقدار برای M و یا N استفاده شود. چرا که برای هر فاصله از مقادیر M و N ممکن است باعث تولید پاسخ هایی با خطای زیاد شود. تغییرات ضریب دامنه محاسبه شده برای مدل استوانه افقی بسیار بیشتر از دو پارامتر دیگر است.



شکل ۵: میدان گرانی یک استوانه افقی واقع در عمق ۵ کیلومتری در راستای پروفیلی به طول ۲۰ کیلومتر و ضریب دامنه ۲۵۰ میلی گال در کیلومتر.

جدول ۳: پارامترهای محاسبه شده برای میدان گرانی شکل ۵.

مقدار M (km)	عمق محاسبه شده (km)	عامل شکل محاسبه شده	ضریب دامنه محاسبه شده mGal*km
۱	۵	۱	۲۵۰
۲	۵	۱	۲۵۰
۳	۵	۱	۲۵۰
۴	۵	۱	۲۵۰
۵	۵	۱	۲۵۰
۶	۵	۱	۲۵۰
۷	۵	۱	۲۵۰
۸	۵	۱	۲۵۰
۹	۵	۱	۲۵۰
۱۰	۵	۱	۲۵۰
میانگین	۵	۱	۲۵۰
درصد خطا	۰	۰	۰

نشان می‌دهد.

جدول ۶ پارامترهای عمق، ضریب دامنه و عامل شکل محاسبه شده برای داده گرانی نوفه‌دار شکل ۹ را نشان می‌دهد. با توجه به جدول ۶، مقدار میانگین حاصل شده به ترتیب برای پارامترهای عمق، ضریب دامنه و عامل شکل ۵/۱۵، ۴۲۵/۹۱ و ۱/۵۳ و درصد خطای حاصل شده برای مقادیر میانگین پارامترهای ذکر شده به ترتیب برابر ۳/۱٪، ۲/۲۳٪ و ۶/۴۸٪ است. شکل ۱۰ مقدار درصد خطای محاسبه شده برای سه پارامتر عمق، ضریب دامنه و عامل شکل مربوط به هر مقدار از M را به صورت مجزا نشان می‌دهد. مشابه تحلیل دو مدل قبلی، از نتایج تحلیل داده‌های گرانی نوفه‌دار کره مشخص است؛ که در این حالت نیز برای دست‌یابی به بهترین جواب، لازم است از چندین مقدار برای M و یا N استفاده شود. چرا که برای هر فاصله از مقادیر M و N ممکن است جواب‌هایی با خطای زیاد حاصل گردد. تغییرات پارامترهای محاسبه شده برای مدل استوانه عمودی و کروی کمتر از تغییرات پارامترهای محاسبه شده برای مدل استوانه افقی است. دلیل این موضوع پخش تصادفی نوفه روی داده‌های گرانی است.

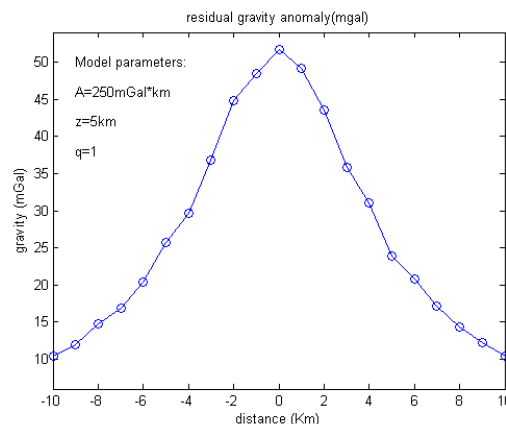
۳-۳- مدل کروی

شکل ۸ میدان گرانی یک کره واقع در عمق ۵ کیلومتری در راستای پروفیلی به طول ۲۰ کیلومتر با فاصله داده‌برداری یک کیلومتر و ضریب دامنه ۴۰۰ میلی گال در کیلومترمربع را نشان می‌دهد. رابطه (۱) برای این مدل به صورت زیر اصلاح شده است:

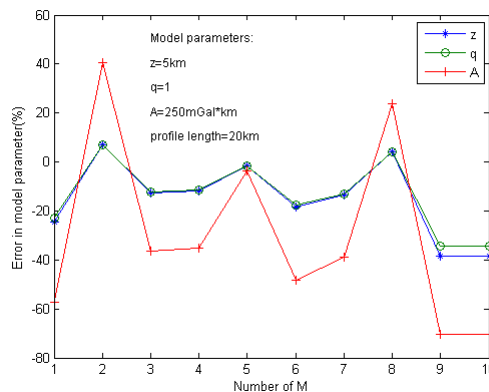
$$g_v(x_i) = \frac{2000}{(x_i^2 + 5^2)^{1.5}} \quad (20)$$

پارامترهای مدل کروی را با استفاده از روش وارون‌سازی توضیح داده شده از روی داده گرانی شکل ۸ محاسبه نموده‌ایم. برای این مدل ما ۹ مقدار مختلف برای M با اختلاف فاصله یک کیلومتر در نظر گرفتیم. مقدار N نیز ثابت فرض شده است (نخستین مقدار روی پروفیل، یعنی ۱۰ km-). همچنین کمترین خطای دو عمق متوالی محاسبه شده ۰/۰۰۲ فرض شده است. نتایج در جدول ۵ آمده است. برای تمامی مقادیر M ، پارامترهای محاسبه شده کاملاً با فرض اولیه یکسان است.

به منظور بررسی اثر نوفه بر روی داده‌های گرانی مدل کروی، ۱۰٪ نوفه تصادفی بر اساس رابطه (۱۷) به داده‌های گرانی مصنوعی مدل کروی اضافه شد. شکل ۹ داده‌های گرانی نوفه‌دار شده شکل ۸ را



شکل ۵: داده‌های گرانی شکل ۵ که ۱۰ درصد نوفه به آن اضافه شده است.

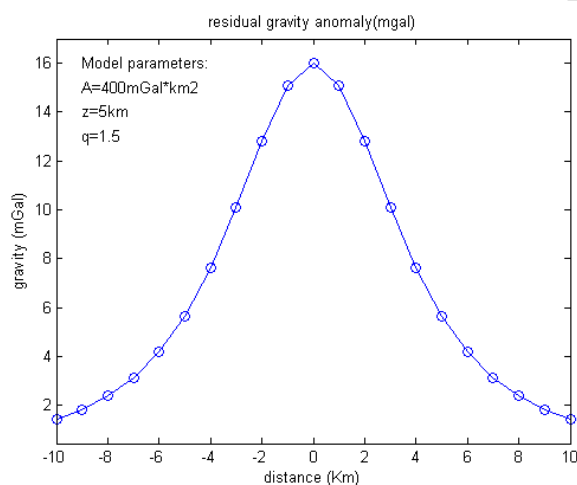


شکل ۶: درصد خطای محاسبه شده برای سه پارامتر عمق، ضریب دامنه و عامل شکل مربوط به مقادیر مختلف M برای مدل استوانه افقی.

اسحق زاده و مرتضوی، وارون سازی غیرخطی داده های گرانی سنجی به منظور تعیین عمق، شعاع و شکل هندسی چشمه ...، صفحات ۸۶-۶۵.

جدول ۴: پارامترهای محاسبه شده برای میدان گرانی شکل ۶.

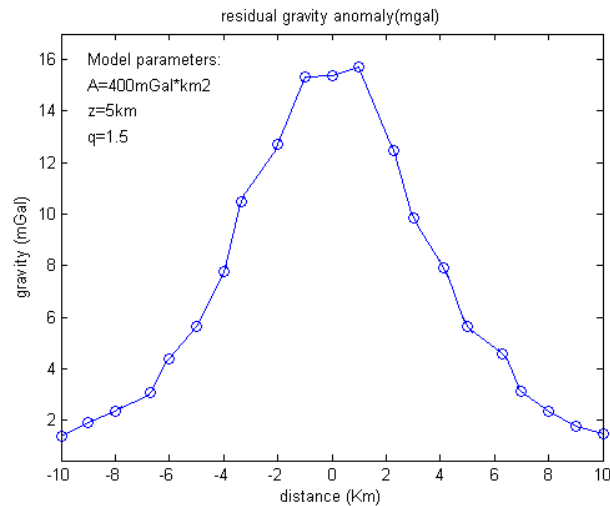
مقدار M (km)	عمق محاسبه شده (km)	عامل شکل محاسبه شده	ضریب دامنه محاسبه شده mGal*km
۱	۳/۷۷	۰/۷۷	۱۰۶/۳۳
۲	۵/۳۶	۱/۰۷	۳۵۱/۷۵
۳	۴/۳۸	۰/۸۸	۱۵۸/۵
۴	۴/۴	۰/۸۸۵	۱۶۲
۵	۴/۹	۰/۹۸	۲۴۰/۵۸
۶	۴/۱	۰/۸۳	۱۲۹/۱۷
۷	۴/۳۳	۰/۸۷	۱۵۳
۸	۵/۲	۱/۰۴	۳۰۹
۹	۳/۱	۰/۶۶	۷۳/۸۸
۱۰	۳/۱	۰/۶۶	۷۳/۸۸
میانگین	۴/۲۶	۰/۸۷	۱۷۵/۸
درصد خطا	۱۴/۷	۱۳/۵	۲۹/۶



شکل ۸: میدان گرانی یک کره واقع در عمق ۵ کیلومتری در راستای پروفیلی به طول ۲۰ کیلومتر و ضریب دامنه ۴۰۰ میلی گال در کیلومترمربع.

جدول ۵: پارامترهای محاسبه شده برای میدان گرانی شکل ۸.

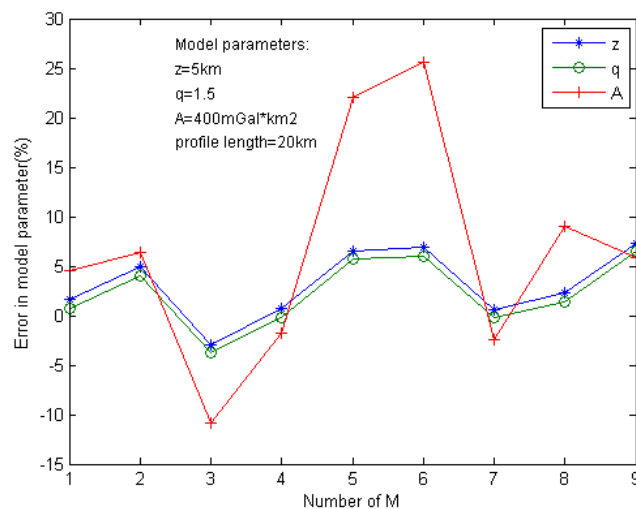
مقدار M (km)	عمق محاسبه شده (km)	عامل شکل محاسبه شده	ضریب دامنه محاسبه شده mGal *km ²
۱	۵	۱/۵	۴۰۰
۲	۵	۱/۵	۴۰۰
۳	۵	۱/۵	۴۰۰
۴	۵	۱/۵	۴۰۰
۵	۵	۱/۵	۴۰۰
۶	۵	۱/۵	۴۰۰
۷	۵	۱/۵	۴۰۰
۸	۵	۱/۵	۴۰۰
۹	۵	۱/۵	۴۰۰
میانگین	۵	۱/۵	۴۰۰
درصد خطا	۰	۰	۰



شکل ۹: داده گرانی شکل ۸ که ۱۰ درصد نوفه به آن اضافه شده است.

جدول ۶: پارامترهای محاسبه شده برای میدان گرانی شکل ۹.

مقدار M (km)	عمق محاسبه شده (km)	عامل شکل محاسبه شده	ضریب دامنه محاسبه شده $mGal^*km^2$
۱	۵/۰۸	۱/۵۱	۴۱۸/۱۲
۲	۵/۲۵	۱/۵۶	۴۲۵/۳۱
۳	۴/۸۵	۱/۴۴	۳۵۶/۶۶
۴	۵/۰۴	۱/۵	۳۹۲/۷۷
۵	۵/۳۳	۱/۵۸	۴۸۸/۰۲
۶	۵/۳۴	۱/۵۹	۵۰۲/۶۳
۷	۵/۰۳	۱/۵	۳۹۰/۴۹
۸	۵/۱۱	۱/۵۲	۴۳۵/۸۹
۹	۵/۳۷	۱/۶	۴۲۳/۳۴
میانگین	۵/۱۵	۱/۵۳	۴۲۵/۹۱
درصد خطا	۳/۱	۲/۲۳	۶/۴۸



شکل ۱۰: درصد خطای محاسبه شده برای سه پارامتر عمق، ضریب دامنه و عامل شکل مربوط به مقادیر مختلف M برای مدل کروی.

۳-۴- بررسی تأثیر عمق در تعیین پارامترها

در این بخش میدان گرانی را برای هر کدام از مدل‌های استوانه افقی، استوانه عمودی و کروی با در نظر گرفتن عمق‌های مختلف در طول پروفیل ۲۰ کیلومتری با فاصله بین داده‌ای یک کیلومتر محاسبه کرده و بر اساس رابطه زیر به داده‌های گرانی، نوفه اضافه نموده‌ایم:

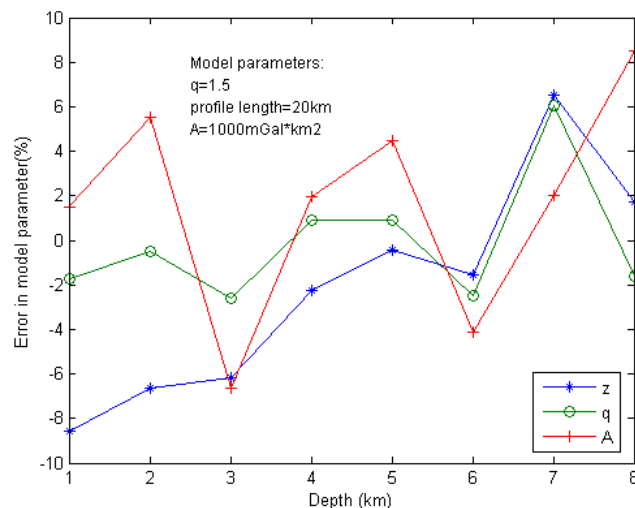
$$g_{rand}(x_i) = g(x_i) + W(RAN_{(i)} - 0.5) \quad (21)$$

W سطح نوفه به میلی‌گال است. برای هر سه این مدل‌ها W را ۲ میلی‌گال و ضریب دامنه ۱۰۰۰ mGal*unit در نظر گرفته شده است. جهت بررسی تغییرات عمقی در محاسبه پارامترهای عمق، ضریب دامنه و عامل شکل، هشت عمق یک تا هشت کیلومتر فرض شده است. همچنین هشت مقدار برای M در نظر گرفته شده است. برای هر عمق، درصد خطای سه پارامتر را مشابه بخش‌های قبلی تعیین می‌نماییم. شکل‌های ۱۱، ۱۲ و ۱۳ تغییرات درصد خطای سه

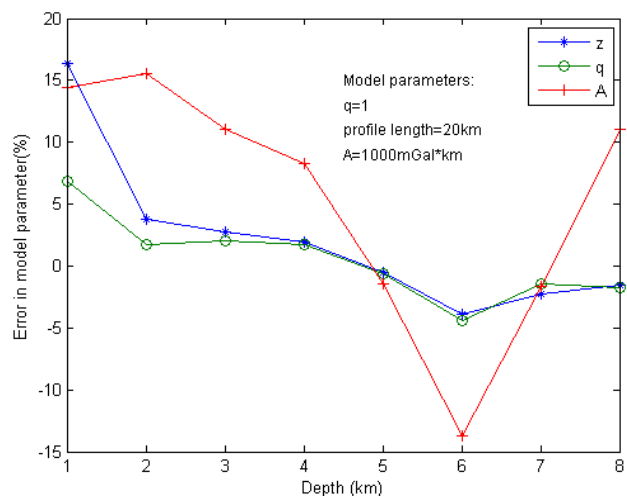
پارامتر در مقابل عمق‌های مختلف به ترتیب برای مدل‌های کروی، استوانه افقی و استوانه عمودی را نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۱۱، برای مدل کروی بیشترین و کمترین درصد خطای محاسبه ضریب دامنه ۸/۳٪ و ۶/۸٪، خطای محاسبه عمق ۶/۷٪ و ۸/۶٪ و خطای محاسبه عامل شکل ۶٪ و ۲/۵٪ است.

با توجه به شکل ۱۲، برای مدل استوانه افقی بیشترین و کمترین درصد خطای محاسبه ضریب دامنه ۱۵/۲٪ و ۱۴٪، خطای محاسبه عمق ۱۶/۵٪ و ۳/۸٪ و خطای محاسبه عامل شکل ۷٪ و ۴/۵٪ است.

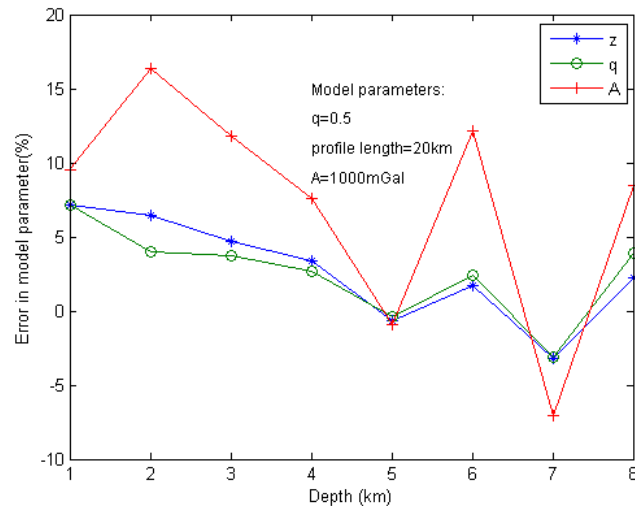
با توجه به شکل ۱۳، برای مدل استوانه عمودی بیشترین و کمترین درصد خطای محاسبه ضریب دامنه ۱۶/۵٪ و ۷٪، خطای محاسبه عمق ۷٪ و ۳٪ و خطای محاسبه عامل شکل ۷٪ و ۳٪ است.



شکل ۱۱: تغییرات خطای پارامترهای محاسبه شده با افزایش عمق برای مدل کروی.



شکل ۱۲: تغییرات خطای پارامترهای محاسبه شده با افزایش عمق برای مدل استوانه افقی.



شکل ۱۳: تغییرات درصد خطای پارامترهای محاسبه شده با افزایش عمق برای مدل استوانه عمودی.

کروی، چشمه بی‌هنجاری هدف جهت بررسی و تخمین پارامترها است؛ که مرکز آن در مبدأ پروفیلی به طول ۶۰ کیلومتر قرار دارد. شکل ۱۵ میدان گرانی حاصل از مدل کروی با ضریب دامنه ۸۰۰ میلی‌گال در کیلومتر مربع واقع در عمق ۴ کیلومتری، میدان گرانی حاصل از یک استوانه افقی با ضریب دامنه ۱۰۰ میلی‌گال در کیلومتر واقع در عمق ۸ کیلومتری که محور آن در نقطه ۲۵- کیلومتری از مبدأ واقع شده است و میدان گرانی حاصل از یک استوانه عمودی با ضریب دامنه ۱۵۰ میلی‌گال واقع در عمق ۷ کیلومتری که محور آن در نقطه ۲۷ کیلومتری از مبدأ واقع شده است را نشان می‌دهد. میدان کل حاصل از این سه مدل بر اساس رابطه زیر را قابل محاسبه است.

$$\Delta g(x_i) = \frac{3200}{(x_i^2 + 16)^{1.5}} (2D \text{ sphere}) + \frac{800}{(x_i^2 + 64)} (2D \text{ horizontal cylinder}) + \frac{150}{(x_i^2 + 49)^{0.5}} (3D \text{ vertical cylinder}) \quad (23)$$

فاصله داده‌برداری یک کیلومتر است. نتایج حاصل از تخمین پارامترهای عمق، عامل شکل و ضریب دامنه برای میدان گرانی کل شکل ۱۵ و نیز در حالتی که ۵٪ نوفه به آن اضافه شده است، در جدول ۸ آمده است. پارامترهای محاسبه شده، خطای قابل قبولی را نسبت به مقادیر اولیه فرض شده برای مدل کروی نشان می‌دهند. این نتایج نشان از کارایی روش و درستی الگوریتم نوشته شده در محیط متلب - برای حالتی که اثر گرانی یک یا چند چشمه بی‌هنجاری بر روی میدان گرانی چشمه مورد مطالعه تأثیرگذار است دارد.

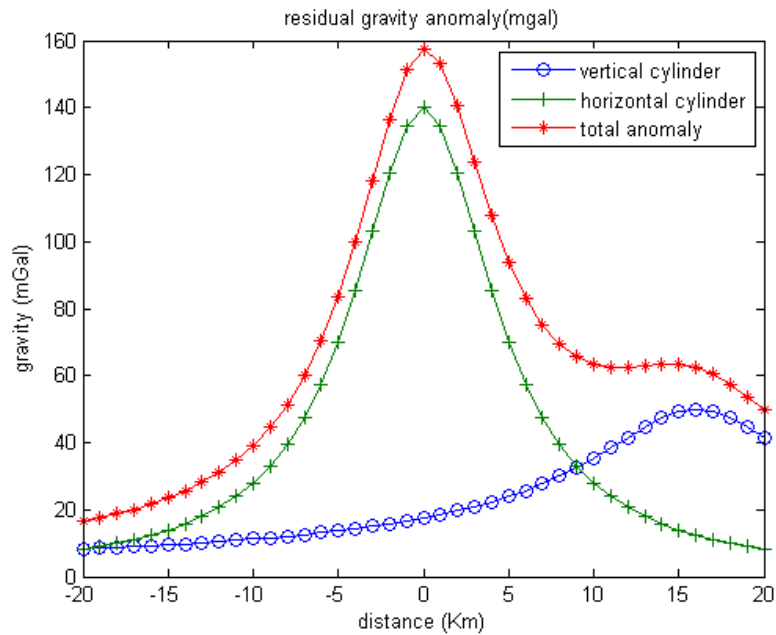
۳-۵- مدل ترکیبی

شکل ۱۴ میدان گرانی حاصل از یک استوانه عمودی با ضریب دامنه ۳۰۰ میلی‌گال واقع در عمق ۶ کیلومتری که محور استوانه در نقطه ۱۶ کیلومتری از مبدأ بر روی پروفیلی به طول ۴۰ کیلومتر قرار دارد و نیز میدان گرانی حاصل از یک استوانه افقی با ضریب دامنه ۷۰۰ میلی‌گال در کیلومتر، واقع در عمق ۵ کیلومتری که محور استوانه در مبدأ قرار دارد را نشان می‌دهد. میدان گرانی کل حاصل از این دو مدل بر اساس رابطه زیر به دست می‌آید.

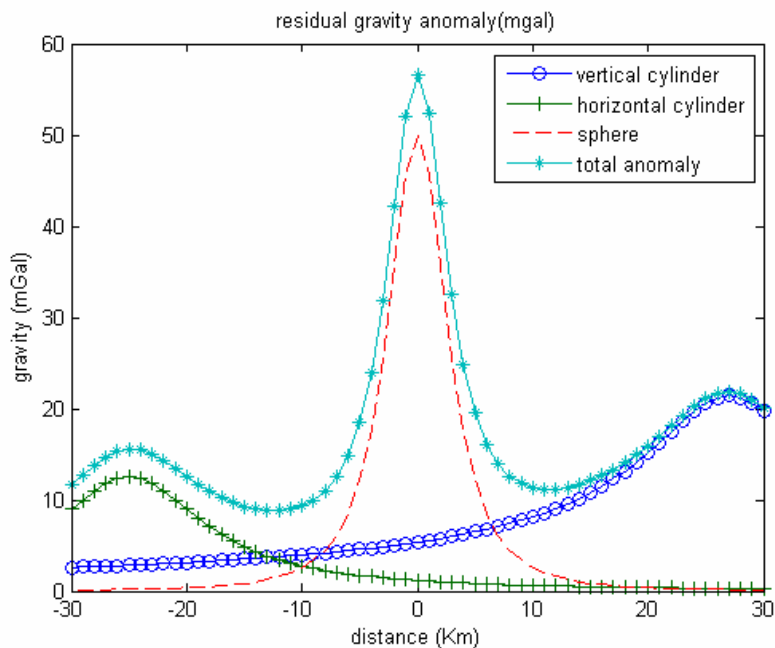
$$\Delta g(x_i) = \frac{3500}{(x_i^2 + 25)} (2D \text{ horizontal cylinder}) + \frac{300}{(x_i^2 + 36)^{0.5}} (3D \text{ vertical cylinder}) \quad (22)$$

فاصله داده‌برداری یک کیلومتر است. مقدار N ، ۱۸- کیلومتر؛ یعنی نقطه دوم روی پروفیل گرانی فرض شده است. همچنین مقدار M از نقطه سه شروع می‌شود که برای ده نقطه محاسبه صورت گرفته است. در این مدل استوانه افقی، بی‌هنجاری مورد نظر نگارندگان است؛ که قرار است تا با استفاده از میدان گرانی کل که اثر گرانی یک ساختار جانبی یعنی استوانه عمودی را نیز شامل می‌شود، پارامترهای عمق، عامل شکل و ضریب دامنه محاسبه شود. در ادامه به داده‌های گرانی کل ۵٪ نوفه اضافه کرده و پارامترها با استفاده از داده نوفه‌دار نیز محاسبه شده‌اند. نتایج حاصل در جدول ۷ آمده است. نتایج به دست آمده تطابق خوبی با پارامترهای اولیه فرض شده برای مدل استوانه افقی یعنی ضریب دامنه ۷۰۰ میلی‌گال در کیلومتر، عمق ۵ کیلومتر و عامل شکل ۱ دارد.

به منظور بررسی بیشتر تأثیر میدان گرانی چشمه‌های موجود در اطراف چشمه گرانی هدف، مدلی شامل هر سه شکل هندسی استوانه عمودی و افقی و کره در نظر گرفته شد؛ به طوری که مدل



شکل ۱۴: پروفیل قرمز رنگ میدان گرانی کل حاصل از میدان گرانی یک استوانه عمودی با ضریب دامنه ۳۰۰ میلی گال واقع در عمق ۶ کیلومتری (پروفیل آبی رنگ) و میدان گرانی حاصل از یک استوانه افقی با ضریب دامنه ۷۰۰ میلی گال در کیلومتر واقع در عمق ۵ کیلومتری (پروفیل سبز رنگ) را نشان می دهد. محور استوانه افقی در مبدأ و محور استوانه عمودی در نقطه ۱۶ کیلومتری از مبدأ بر روی پروفیلی به طول ۴۰ کیلومتر واقع شده است.



شکل ۱۵: میدان گرانی حاصل از یک کره با ضریب دامنه ۸۰۰ میلی گال در کیلومتر مربع واقع در عمق ۴ کیلومتری، یک استوانه افقی با ضریب دامنه ۱۰۰ میلی گال در کیلومتر واقع در عمق ۸ کیلومتری و یک استوانه عمودی با ضریب دامنه ۱۵۰ میلی گال واقع در عمق ۷ کیلومتری که محور آن ها به ترتیب در نقاط صفر، ۲۵- و ۲۷ کیلومتری از مبدأ در روی پروفیلی به طول ۶۰ کیلومتر واقع شده است. همچنین میدان گرانی کل حاصل از مجموع گرانی سه مدل ذکر شده در شکل نشان داده شده است.

جدول ۷: نتایج حاصل از وارون داده‌های گرانی کل شکل ۱۴.

نتایج برای داده‌های گرانی بدون نوفه				نتایج برای داده‌های گرانی با نوفه ۰.۵٪			
ضریب دامنه محاسبه شده (mGal)	عامل شکل محاسبه شده	عمق محاسبه شده (km)	مقدار M (km)	ضریب دامنه محاسبه شده (mGal)	عامل شکل محاسبه شده	عمق محاسبه شده (km)	مقدار M (km)
۱۱۳۴/۱	۱/۰۲۱	۶/۶۶	۳	۱۱۲۱/۱	۱/۰۲۱	۶/۲۵	۳
۷۷۵	۰/۸۸	۵/۸۸	۴	۷۷۳/۶۹	۰/۸۸	۵/۶۸	۴
۷۳۶/۷	۰/۸۲	۴/۹۴	۵	۷۲۴/۸	۰/۸۲	۴/۷۲	۵
۶۷۹/۶۳	۰/۷۹	۴/۶۵	۶	۶۶۳	۰/۷۹	۴/۵	۶
۶۵۰/۸۵	۰/۷۷	۴/۴۸	۷	۶۴۰/۸۴	۰/۷۷	۴/۴۴	۷
۷۳۵/۱۵	۰/۷۵۵	۴/۳۷	۸	۷۲۷/۲۱	۰/۷۵۵	۴/۲۷	۸
۷۲۹/۶۸	۰/۷۵	۴/۳۲	۹	۷۱۳/۶۷	۰/۷۵	۴/۱۵	۹
۶۲۲/۷	۰/۷۴۶	۴/۲۹	۱۰	۶۱۲/۶	۰/۷۴۶	۴/۱۱	۱۰
۶۲۱/۸	۰/۷۴۵	۴/۲۸	۱۱	۵۸۰/۷	۰/۷۴۵	۴	۱۱
۵۲۳/۱۳	۰/۷۴۶	۴/۲۹	۱۲	۵۳۶/۲	۰/۷۴۶	۳/۸۹	۱۲
۷۲۰/۵۷	۰/۸	۴/۸۲	میانگین	۷۰۹	۰/۷۸	۴/۶	میانگین

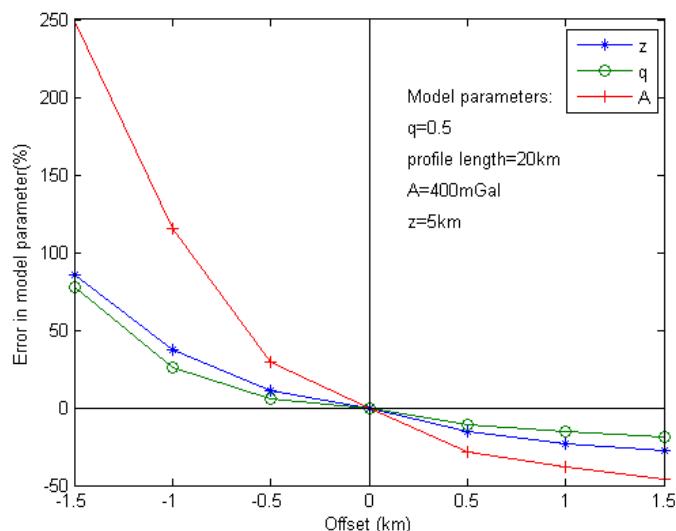
جدول ۸: نتایج حاصل از وارون داده‌های گرانی کل شکل ۱۵.

نتایج برای داده‌های گرانی بدون نوفه				نتایج برای داده‌های گرانی با نوفه ۰.۵٪			
ضریب دامنه محاسبه شده (mGal)	عامل شکل محاسبه شده	عمق محاسبه شده (km)	مقدار M (km)	ضریب دامنه محاسبه شده (mGal)	عامل شکل محاسبه شده	عمق محاسبه شده (km)	مقدار M (km)
۸۲۴/۴	۱/۵۲	۴/۳۴	۵	۹۳۶	۱/۴۵	۴/۲۷	۵
۸۱۴/۶	۱/۴۳	۴/۱۵	۸	۸۵۲/۷	۱/۴۲	۴/۴۱	۸
۷۸۲	۱/۵۷	۳/۷۴	۱۰	۸۲۸/۳	۱/۵۲	۴/۵	۱۰
۸۳۱/۷	۱/۶۳	۳/۸۵	۱۲	۷۸۴/۵	۱/۳۸	۴/۴۶	۱۲
۸۲۶/۵	۱/۲۹	۴/۸۴	۱۵	۸۲۵/۳	۱/۴۶	۴/۳۹	۱۵
۸۴۲/۸	۱/۷۱	۵/۱۴	۲۰	۷۷۰	۱/۲۸	۴/۸۳	۲۰
۷۹۳	۱/۵۴	۴/۲۳	-۵	۷۹۱/۲	۱/۵۸	۳/۸۶	-۵
۷۸۹/۴	۱/۴۲	۴/۳۱	-۷	۸۴۲/۸	۱/۳۷	۴/۶۴	-۷
۸۴۵	۱/۳۷	۳/۶۸	-۱۰	۷۸۴/۹	۱/۴۳	۴/۱۸	-۱۰
۸۵۱/۳	۱/۳۵	۴/۶۴	-۱۲	۸۵۵	۱/۴	۳/۷۲	-۱۲
۸۲۰/۰۷	۱/۴۸	۴/۲۹	میانگین	۸۲۷/۱	۱/۴۲۹	۴/۳۲	میانگین

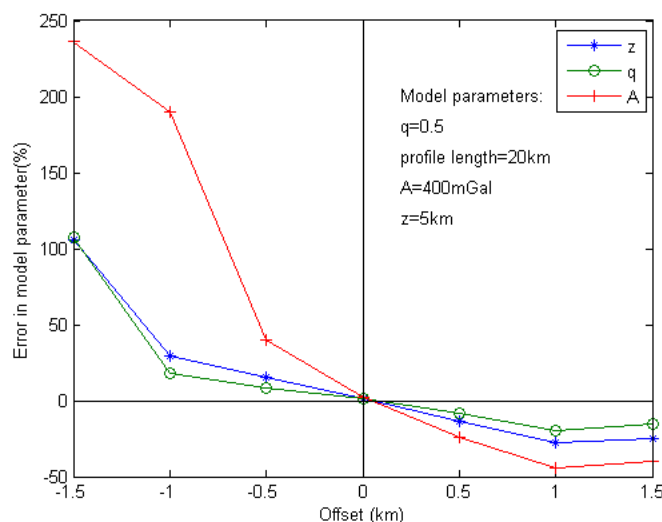
فاصله‌ی اختلاف ۲ کیلومتر تعیین شد. همچنین مقادیر پارامترها، برای داده‌های گرانی که ۰.۵٪ نوفه تصادفی به آن اضافه شده، نیز محاسبه گردید. شکل‌های ۱۶ و ۱۷ درصد خطای پارامترهای محاسبه شده برای مقادیر خطای در نظر گرفته شده برای مبدأ را نشان می‌دهند. برای داده‌های گرانی بدون نوفه، درصد خطاهای پارامترهای مورد بررسی در مبدأ مختصات صفر است. بیشترین مقدار خطا برای پارامترهای عمق، ضریب دامنه و عامل شکل به ترتیب برای داده‌های بدون نوفه ۰.۸۵٪، ۰.۲۵٪ و ۰.۸۰٪ است. برای داده‌های نوفه‌دار (شکل ۱۶) نیز مقدار خطای محاسبه شده برای پارامترهای عمق، ضریب دامنه و عامل شکل به ترتیب در مبدأ مختصات ۰.۱/۳۴٪، ۰.۲/۵۷٪ و ۰.۰/۹۹٪ است. لذا می‌توان گفت که در روش وارون مورد استفاده، هر چقدر خطای انتخاب مبدأ کمتر باشد، عملکرد بهتر و نتایج قابل قبول‌تری را نشان می‌دهد.

۳-۶- تأثیر اختلاف فاصله از نقطه مبدأ در محاسبات

هنگام تفسیر داده‌های گرانی واقعی، انتخاب نادرست نقطه مبدأ روی پروفیل باعث به وجود آمدن خطا در محاسبات می‌شود. به منظور بررسی این اثر، چندین خطای متوالی (δx) از ۰، ۰/۵، ± 1 و $\pm 1/5$ کیلومتر نسبت به مبدأ محور مختصات در محاسبه مدل‌سازی پیشرو گرانی در رابطه (۱) برای x در نظر گرفته شد. بدین منظور، مجموعه داده‌های گرانی متناظر با استوانه عمودی نیمه نامحدود با عمق ۵ کیلومتر و ضریب دامنه ۵۰۰ میلی گال در طول یک پروفیل ۲۰ کیلومتری و فاصله داده‌برداری یک کیلومتر پیش‌بینی شد. حال بر اساس خطاهای در نظر گرفته شده، هفت پروفیل داده گرانی در اختیار است؛ که نقطه گرانی بیشینه روی پروفیل، متناظر با مرکز استوانه عمودی نیست. درصد خطای مقادیر پارامترهای عمق، ضریب دامنه و عامل شکل برای هر پروفیل داده برای ۸ مقدار مختلف M با



شکل ۱۶: خطای پارامترهای محاسبه شده برای مقادیر خطای ۰، $\pm 0/5$ و $\pm 1/5$ کیلومتر نسبت به مبدأ محور مختصات، برای داده های گرانی بدون نوفه.



شکل ۱۷: درصد خطای پارامترهای محاسبه شده برای مقادیر خطای ۰، $\pm 0/5$ و $\pm 1/5$ کیلومتر نسبت به مبدأ محور مختصات برای داده های گرانی با ۵٪ نوفه

۴- منطقه مورد مطالعه

حوضه آبی چای در آذربایجان شرقی، به وسیله ارتفاعات و توده های پلوتونی - ولکانیکی احاطه شده و در واقع یک حوضه کوهستانی است؛ که در مجموعه ای از قوس های ماگمایی مربوط به اواخر ترشیر، قرار گرفته است. گنبد نمکی آبی چای، در جنوب غرب شهرستان میانه و شمال شهر ماهنشان، در زون ساختاری ایران مرکزی و در نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ میانه قرار دارد.

این منطقه شامل رسوبات مارنی، ماسه سنگی و کنگلومرایی به همراه رسوبات تبخیری است؛ که به علت داشتن رخساره های سست در معرض فرسایش زیادی قرار گرفته و مورفولوژی پست با دره های

کم ژرفا و ملایم را ساخته است. این گنبدها در زون ساختاری تکتونیکی ایران مرکزی و در داخل سازند قرمز بالایی به سن میوسن میانی تا بالایی قرار دارند (آقاباتی، ۱۳۸۳).

گنبد های نمکی آذربایجان معمولاً از نظر حجمی، کوچک و نزدیک به سطح زمین بوده و از نظر ذخایر پتاس قابل توجه می باشند. شکل ۱۸ مراحل تشکیل گنبد های نمکی و شکل ۱۹ نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می دهند. نقاط برداشت داده های گرانی، به وسیله مستطیل های سفید رنگ بر روی شکل ۱۹ مشخص شده است. واحدهای زمین شناسی محدوده شامل موارد ذیل است:

معیار شکل، عمق و شعاع چشمه بی‌هنجاری استفاده شد. نتایج حاصل شده برای مقادیر متفاوت N و M در جدول ۹ آمده است. لازم به ذکر است که از مقادیر عمقی محاسبه شده، ۱۰ متر ارتفاع فراسو شده کاسته شده است؛ تا عمق مرکز چشمه بی‌هنجاری (گنبد نمکی) از سطح زمین حاصل گردد. با توجه به جدول ۹، کمترین خطای استاندارد محاسبه شده برابر ۰/۰۱۶۹ میلی‌گال و مربوط به مقادیر:

$N = 40$ متر، $M = 60$ متر، ضریب دامنه $= 472$ - میلی گال \times مترمربع، عامل شکل $= 1/43$ ، عمق $= 64/63$ متر است؛ که در جدول ۹ به صورت پررنگ و زیرخط دار برجسته شده‌اند.

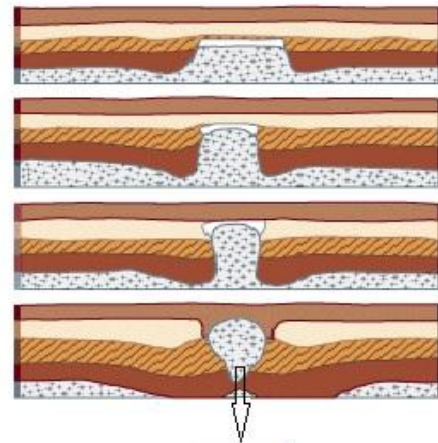
با توجه به این که مقدار عامل (معیار) شکل $1/43$ تخمین زده شده است، بنابراین گنبد نمکی از نظر هندسی به شکل کره نزدیک تر است. میدان گرانی مطابق با پارامترهای تخمین زده شده، متناسب با کمترین خطای استاندارد، محاسبه شده است. شکل ۲۲ میدان گرانی اندازه‌گیری شده و میدان گرانی محاسبه شده در طول پروفیل A را نشان می‌دهد. از آنجا که شکل گنبد نمکی، کره تخمین زده شده؛ با در نظر گرفتن ضریب ساختاری ۲، عمق سطح بالای گنبد نمکی با روش اویلر توسط نرم‌افزار Geosoft برآورد گردید. نتایج تخمین‌های عمقی در شکل ۲۴ نشان داده شده است. به طور میانگین می‌توان گفت که عمق سطح بالای گنبد نمکی در حدود ۳۰ متر است.

اگر تباین چگالی نمک با محیط اطراف آن در حدود ۴۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب فرض شود (چگالی نمک در حدود ۲۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب است)؛ چون مقدار ضریب دامنه 472 - میلی‌گال در مترمربع یا $0/00472$ - مترمکعب بر مجذور ثانیه محاسبه شده است؛ بنابراین بر اساس رابطه (۱) داریم:

$$f = \frac{4}{3} \pi G \rho = 1.12 \times 10^{-7} \text{ s}^{-2}$$

$$R = \sqrt[3]{\frac{0.00472}{f}} = 34.8 \text{ m}$$

بنابراین شعاع گنبد نمکی $34/8$ متر است. با کم کردن این مقدار از عمق تخمین زده شده، عمق سطح بالای گنبد در راستای پروفیل $29/83$ متر حاصل می‌گردد؛ که با نتایج حاصل از تخمین عمق اویلر مطابقت دارد. همچنین با به کارگیری نرم‌افزار Modelvision، مدل‌سازی از گنبد نمکی با استفاده از تغییرات میدان گرانی در طول پروفیل B که در روی شکل ۲۳ مشخص شده است، صورت پذیرفت. با توجه به این که روش وارون سازی به کار گرفته شده در این مقاله، شکل حدودی گنبد نمکی را کره پیش‌بینی کرده؛ بنابراین شکل مدل اولیه معرفی شده به نرم‌افزار Modelvision، کره است. همچنین چگالی متوسط گنبد نمکی، $2/2$ گرم بر سانتیمتر مکعب در نظر گرفته شده است. مقطع افقی مدل تخمین زده شده از گنبد نمکی روی شکل ۲۵ مشخص شده است. همچنین مقطع عمودی مدل برآورد شده برای گنبد نمکی، در شکل ۲۶ نشان داده شده است. بر اساس نتایج مدل‌سازی وارون نرم‌افزار



گنبد نمکی

شکل ۱۸: مراحل تشکیل گنبد نمکی در منطقه آذربایجان (رجبی، ۱۳۸۸).

۵- تحلیل داده گرانی منطقه آجی چای

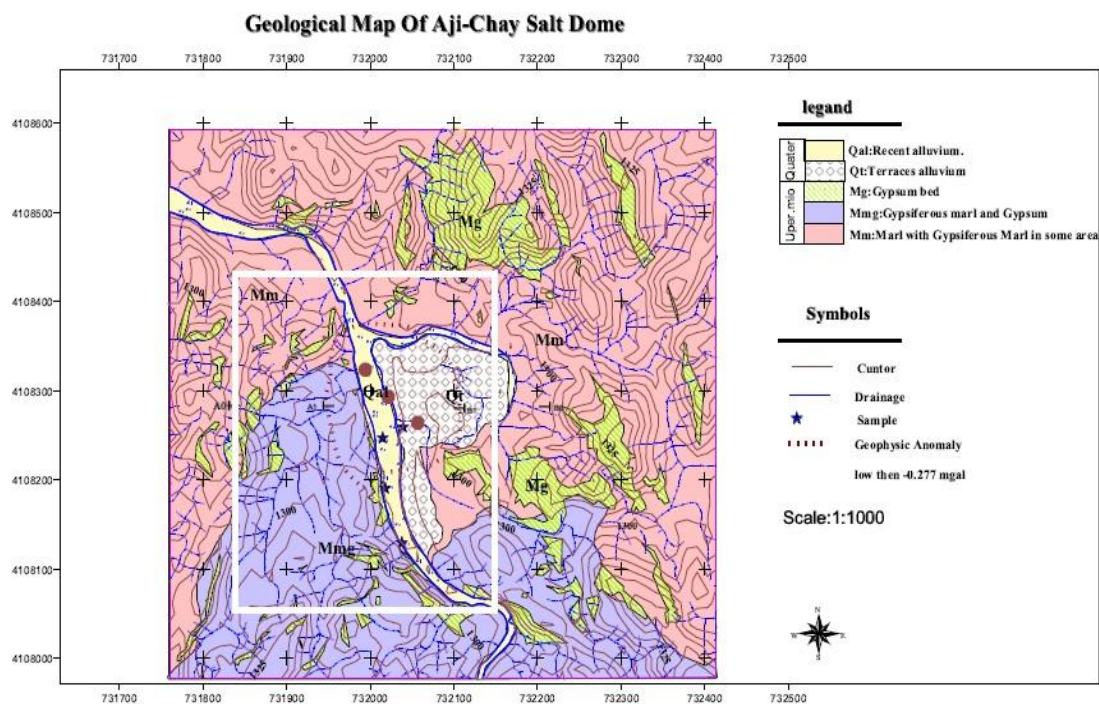
شکل ۲۰ نقشه میدان گرانی کل (بوگه) منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. مکان ایستگاه‌های داده‌برداری گرانی روی نقشه بی‌هنجاری بوگه مشخص شده است. در مجموع در ۱۱۰ نقطه، داده گرانی قرائت گردید که کمترین فاصله بین نقاط اندازه‌گیری حدود ۲۰ متر و بیشترین فاصله حدود ۴۰ متر روی پروفیل برداشت است. داده‌برداری در طول ۱۰ پروفیل در منطقه‌ای به ابعاد 375×320 متر انجام شد. هدف از انجام این عملیات، اکتشاف گنبد نمکی منطقه آجی‌چای است. نخستین مرحله پردازش داده‌های گرانی بعد از تصحیح داده‌ها، جدایش میدان گرانی منطقه‌ای از میدان گرانی محلی است. شکل ۲۱ نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده حاصل با استفاده از روند سطحی درجه دو را نشان می‌دهد. گنبد‌های نمکی به دلیل دارا بودن چگالی کمتر نسبت به محیط اطراف خود، دارای تباین چگالی منفی بوده و در نقشه‌های گرانی به صورت بی‌هنجاری منفی نمود پیدا می‌کنند. در روی شکل ۲۱ محدوده مشخص شده با مستطیل سیاه رنگ، بی‌هنجاری گرانی منفی متعلق به گنبد نمکی را نشان می‌دهد.

از آنجا که روش تفسیری مورد استفاده در این مقاله تا حدودی به نوبه حساس است؛ میدان گرانی به اندازه ۱۰ متر به سمت بالا گسترش داده شده است (شکل ۲۲). فیلتر فراسو باعث می‌شود تا طول موج‌های کوچک حذف شده و نقشه میدان گرانی یکنواخت‌تر گردد و در نتیجه پروفیل داده‌های گرانی برای تحلیل میدان گرانی نیز هموارتر گردد. بر روی بی‌هنجاری گرانی گنبد نمکی در روی نقشه فراسو شده، داده‌برداری در طول پروفیل A صورت پذیرفت. از ۱۲ نقطه برداشت داده‌های گرانی در تعیین پارامترهای ضریب دامنه،

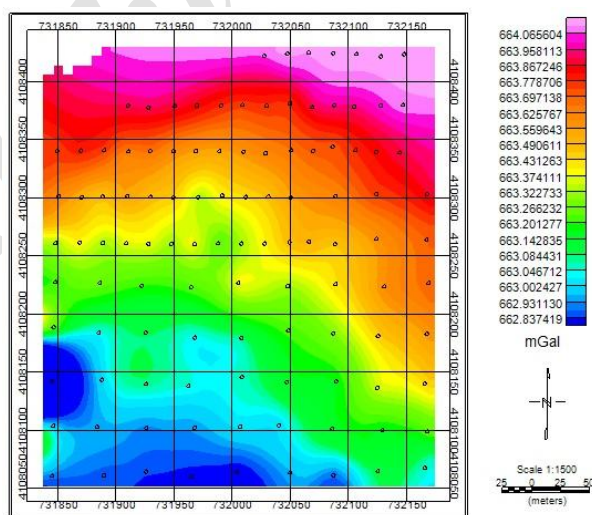
اسحق زاده و مرتضوی، وارون سازی غیرخطی داده های گرانی سنجی به منظور تعیین عمق، شعاع و شکل هندسی چشمه ...، صفحات ۸۶-۶۵.

کشور برای تخمین عمق و محدوده گنبد نمکی آجی چای به عنوان معدن پتاس صورت پذیرفت (رضوی و جعفری، ۱۳۸۷). در گزارش مربوطه، عمق سطح بالای گنبد نمکی بین ۲۰ تا ۶۰ متر تخمین زده شده است.

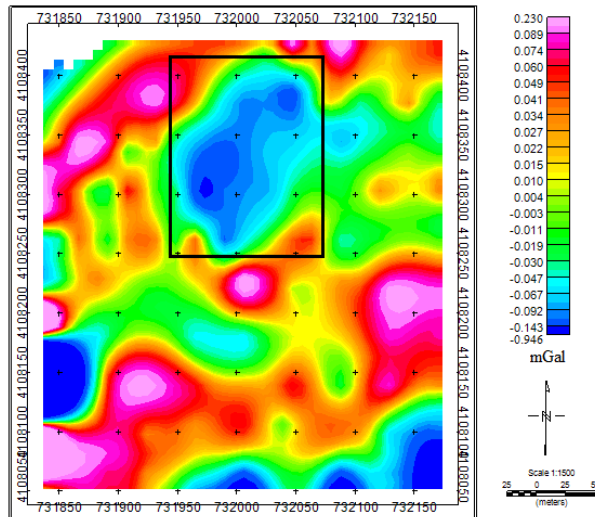
مدل ویژن، عمق سطح بالا و پایین گنبد نمکی در حدود ۳۲ متر و ۶۷ متر حاصل شده است؛ که با نتایج حاصل از روش وارون غیرخطی و نیز روش اویلر انطباق نسبی دارد. در سال ۱۳۸۷ مطالعات گرانی سنجی و مغناطیس سنجی در منطقه آجی چای توسط سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی



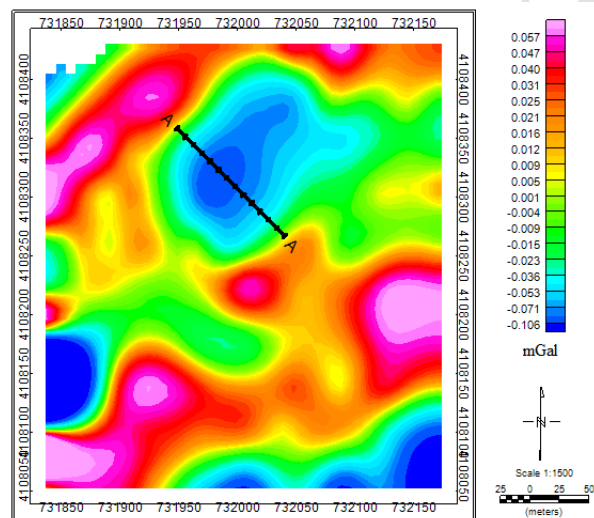
شکل ۱۹: نقشه زمین شناسی منطقه آجی چای. محدوده داده برداری گرانی با مستطیل سفید رنگ مشخص شده است.



شکل ۲۰: نقشه بی هنجاری بوگه. دایره های سیاه رنگ ایستگاه های برداشت گرانی را نشان می دهند. منطقه در زون 38N واقع شده است.



شکل ۲۱: میدان گرانی باقی مانده منطقه مورد مطالعه. مستطیل سیاه رنگ محدوده متعلق به گنبد نمکی با بی‌هنجاری منفی را مشخص کرده است.

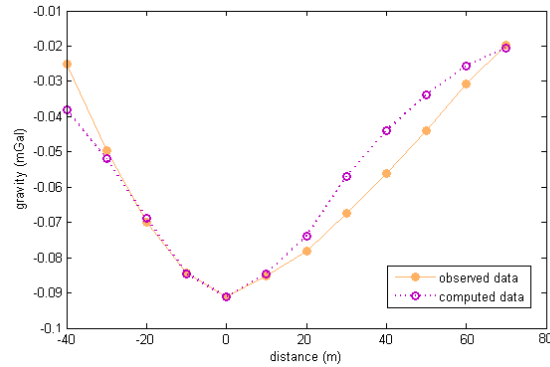


شکل ۲۲: میدان گرانی باقی مانده فراسو شده تا ارتفاع ۱۰ متر. موقعیت پروفیل برداشت داده گرانی A روی بی‌هنجاری منفی، برای محاسبه پارامترهای گنبد نمکی در شکل نشان داده شده است.

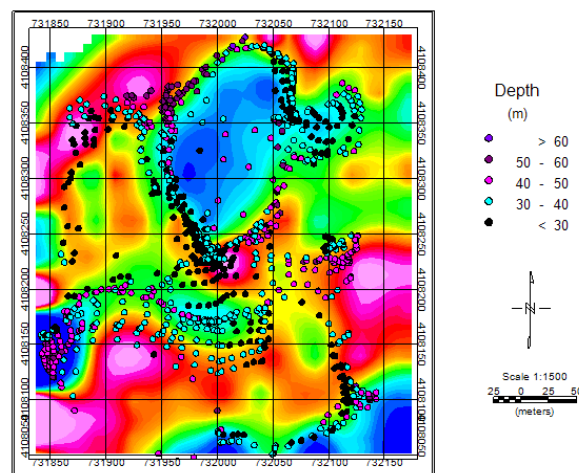
جدول ۹: پارامترهای محاسبه شده برای مقادیر مختلف N و M با استفاده از داده‌های گرانی پروفیل A.

N (متر)	M (متر)	ضریب دامنه (میلی گال × متر مربع)	عامل شکل q	Z عمق (متر)	خطای استاندارد (میلی گال)
۱۰	۲۰	-۱۰۶	۱/۲۶	۶۳/۳۵	۰/۰۱۹۲
۱۰	۴۰	-۳۹۴	۱/۷۳	۶۵/۷۳	۰/۰۱۷۴
۲۰	۳۰	-۲۹۴	۱/۵۴	۶۲/۶	۰/۰۱۸۵
۳۰	۴۰	-۱۰۳۵	۱/۳۸	۶۹/۷۶	۰/۰۲۱۸
۳۰	۵۰	-۵۱۴	۱/۷۵	۶۰/۸۵	۰/۰۱۸۱
۳۰	۶۰	-۱۸۳	۱/۲	۶۹/۴۷	۰/۰۱۷۷
<u>۴۰</u>	<u>۶۰</u>	<u>-۴۷۲</u>	<u>۱/۴۳</u>	<u>۶۴/۶۳</u>	<u>۰/۰۱۶۹</u>
۴۰	۷۰	-۷۷۱	۱/۱۲	۶۲/۲۷	۰/۰۱۷۵
-۱۰	-۲۰	-۱۴۱	۱/۶۳	۶۳/۵۸	۰/۰۲۰۴
-۱۰	-۳۰	-۱۷/۰۹	۱/۴۴	۶۰/۶۲	۰/۰۱۸۹
-۲۰	-۳۰	-۴۲/۸۸	۱/۳۴	۶۱/۸۴	۰/۰۱۸۳
-۲۰	-۴۰	-۲۴۵	۱/۲۷	۶۹/۵۵	۰/۰۱۷۲

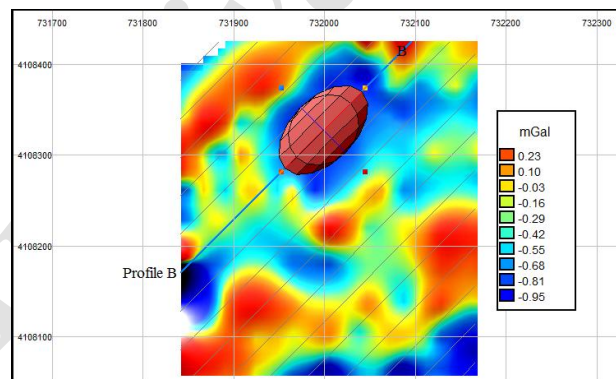
اسحق زاده و مرتضوی، وارون سازی غیرخطی داده های گرانی سنجی به منظور تعیین عمق، شعاع و شکل هندسی چشمه ...، صفحات ۸۶-۶۵.



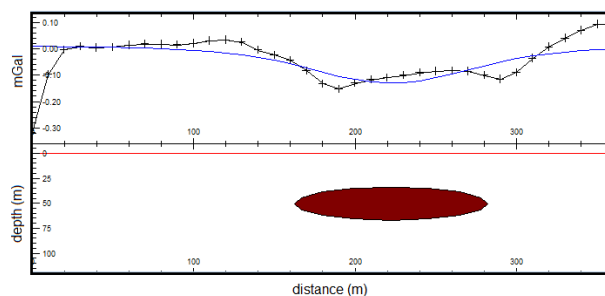
شکل ۲۳: میدان گرانی اندازه گیری شده و میدان گرانی محاسبه شده در طول پروفیل A.



شکل ۲۴: تخمین عمق اویلر برای نقشه بی هنجاری باقی مانده.



شکل ۲۵: مقطع افقی مدل تخمین زده شده از گنبد نمکی با استفاده از نرم افزار Modelvision. پروفیل B روی شکل مشخص است.



شکل ۲۶: مقطع عمودی مدل تخمین زده شده از گنبد نمکی با استفاده از نرم افزار Modelvision. پروفیل آبی رنگ، میدان گرانی محاسبه شده و پروفیل سیاه رنگ میدان گرانی اندازه گیری شده (تغییرات میدان گرانی در راستای پروفیل B) است.

۶- نتیجه گیری

به دلیل ناهمگنی‌های زمین و عدم تطابق دقیق توده‌های زیر زمینی با شکل‌های هندسی، وجود خطا در تحلیل‌های کیفی و کمی میدان گرانی انکارناپذیر است. در این مقاله یک روش وارون‌سازی غیرخطی دوبعدی برای چشمه‌های بی‌هنجاری گرانی با شکل هندسی استوانه افقی، استوانه عمودی و کروی مورد بررسی قرار گرفت. روش پیشنهادی در گام نخست عمق چشمه بی‌هنجاری را برآورد می‌نماید. سپس با استفاده از عمق به دست آمده، عامل شکل محاسبه می‌گردد. پارامتر عامل شکل، شکل هندسی تقریبی چشمه بی‌هنجاری را تعیین می‌نماید. با در اختیار داشتن مقدار عمق و عامل شکل، ضریب دامنه تخمین زده می‌شود. شعاع عامل بی‌هنجاری از روی ضریب دامنه محاسبه شده، قابل برآورد است. با به کارگیری روش ارائه شده برای میدان‌های گرانی مصنوعی حاصل از سه شکل هندسی استوانه افقی، استوانه عمودی و کروی، با و بدون نوفه تصادفی، نتایج قابل قبولی حاصل شده است. بزرگ‌ترین خطاهای محاسبه شده برای پارامترهای مدل، مربوط به بررسی اثر اختلاف فاصله از نقطه مبدأ است (شکل‌های ۱۶ و ۱۷). هرچه نقطه گرانی پیشینه که به عنوان مبدأ محور در نظر گرفته می‌شود، به مرکز چشمه بی‌هنجاری نزدیک‌تر باشد، خطای محاسبات کاهش می‌یابد؛ بنابراین هرچه منحنی تغییرات میدان گرانی در طول پروفیل، متقارن‌تر باشد، دقت نتایج افزایش می‌یابد. با توجه به دو شکل ۱۶ و ۱۷ مشخص است که خطای محاسبه شده پارامترها، برای مقادیر منفی اختلاف فاصله تا مبدأ، بیشتر از مقادیر مثبت آن است. به دلیل پخش غیریکنواخت چشمه بی‌هنجاری در زیر زمین و وجود نوفه در داده‌های گرانی، معمولاً میدان گرانی اندازه‌گیری شده در راستای پروفیل‌ها، متقارن نیست. به همین دلیل برای محاسبه عامل شکل، از میانگین عامل شکل‌های محاسبه شده با مقادیر دو نقطه داده گرانی و مختصات آن‌ها استفاده شده است (رابطه ۱۱). تحلیل داده‌های گرانی گنبد نمکی آجی‌چای با استفاده از روش وارون‌سازی غیرخطی، عمق آن را در حدود ۶۴/۶۳ متر برآورد کرده است. همچنین عامل شکل محاسبه شده ۱/۴۳ نشان می‌دهد که گنبد نمکی را می‌توان به شکل کره تشبیه نمود؛ بنابراین با توجه به شکل ۱۸، این گنبد نمکی در مراحل آخر شکل‌گیری خود قرار دارد. با توجه به شعاع محاسبه شده برای این گنبد نمکی (۳۴/۸ متر) حجم حدودی این گنبد نمکی در حدود ۱۷۶۰۰۰ متر مکعب تخمین زده می‌شود. قابل ذکر است که مقادیر عددی محاسبه شده بر مبنای تحلیل میدان گرانی یک پروفیل است. با تحلیل داده‌های گرانی در راستای چندین پروفیل، تفسیرهایی با دقت بالاتر به دست خواهد آمد.

با توجه به تمامی نتایج حاصل شده از تحلیل و تفسیر میدان‌های گرانی دوبعدی مصنوعی و واقعی، می‌توان گفت که روش وارون‌سازی غیرخطی ارائه شده، یک روش کارآمد برای مدل‌سازی وارون میدان گرانی است و ابهامات موجود در شکل و عمق

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۳، شماره ۱، ۱۳۹۶.

پخش‌شدگی چشمه بی‌هنجاری در زیر زمین را تا حد زیادی کاهش می‌دهد.

۷- منابع

آفانباتی، ع.، ۱۳۸۳، زمین‌شناسی ایران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

رجبی، م. و شیرازی طرزم، ع.، ۱۳۸۸، تکتونیک نمکی و آثار ژئومورفولوژیکی آن در آذربایجان، مطالعه موردی: گنبد‌های نمکی شمال غرب تبریز، جغرافیا و توسعه، ۷ (۱۶)، ۴۷-۷۰.

رضوی، س.ا. و جعفری، ف.، ۱۳۸۷، اکتشاف پتاس با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی و گرانی‌سنجی در منطقه آجی‌چای و قره‌آغاچ، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

Abdelrahman E.S.M. and El-Araby, T.M., 1993, A least-squares minimization approach to depth determination from moving average residual gravity anomalies, *Geophysics*, 58 (12), 1779-1784.

Abdelrahman, E.M., 1990, Discussion on: a least-squares approach to depth determination from gravity data by O. P. Gupta, *Geophysics*, 55 (3), 376-378.

Abdelrahman, E.M., Bayoumi, A.I., Abdelhady, Y.E., Gobashy, M.M. and El-Araby, H.M., 1989, Gravity interpretation using correlation factors between successive least-squares residual anomalies, *Geophysics*, 54 (12), 1614-1621.

Abdelrahman, E.S.M. and El-Araby, H.M., 1993, Shape and depth solutions from gravity data using correlation factors between successive least-squares residuals, *Geophysics*, 58 (12), 1785-1791.

Abdelrahman, E.S.M., Riad, S., Refai, E. and Amin, Y., 1985, On the least-squares residual anomaly determinations, *Geophysics*, 50 (3), 473-480.

Agarwal, B.N.P. and Sivaji, C., 1992, Separation of regional and residual anomalies by least-squares orthogonal polynomial and relaxation techniques: a performance evaluation, *Geophysical Prospecting*, 40 (2), 143-156.

Asfahani, J. and Tlas, M., 2008, An automatic method of direct interpretation of residual gravity anomaly profiles due to spheres and cylinders, *Pure and Applied Geophysics*, 165 (5), 981-994.

Boulanger, O. and Chouteau, M., 2001, Constraints in 3D gravity inversion, *Geophysical Prospecting*, 49 (2), 265-280.

Chakravarthi, V. and Sundararajan, N., 2004, Ridge regression algorithm for gravity inversion of fault structures with variable density, *Geophysics*, 69,

- Li, Y. and Oldenburg, D.W., 1998, 3-D inversion of gravity data, *Geophysics*, 63 (1), 109-119.
- Nettleton, L.L., 1942, Gravity and magnetic calculation, *Geophysics*, 7, 293-310.
- Nettleton, L.L., 1976, Gravity and Magnetic in Oil Prospecting, McGraw-Hill Book.
- Press, W.H., Flannery, B.P., Teukolsky, S.A. and Vetterling, W.T., 1986, Numerical Recipes, The Art of Scientific Computing, Cambridge University Press.
- Roy, A., 1962, Ambiguity in geophysical interpretation, *Geophysics*, 27, 90-99.
- Roy, L., Agarwal, B.N.P. and Shaw, R.K., 2000, A new concept in Euler deconvolution of isolated gravity anomalies, *Geophysical Prospecting*, 48 (3), 559-575.
- Skeels, D.C., 1947, Ambiguity in gravity interpretation, *Geophysics*, 12, 43-56.
- Thompson, D.T., 1982, EULDPH: A new technique for making computer assisted depth estimates from magnetic data, *Geophysics*, 47, 31-37.
- Essa, K.S., 2007, A simple formula for shape and depth determination from residual gravity anomalies, *Acta Geophysica*, 55 (2), 182-190.
- Essa, K.S., 2007, Gravity data interpretation using the s-curves method, *Journal of Geophysics and Engineering*, 4 (2), 204-213.
- Essa, K.S., 2012, A Fast Interpretation Method for Inverse Modeling of Residual Gravity Anomalies Caused by Simple Geometry, *Journal of Geological Research*, Vol. 2012, Article ID 327037, 10 pages, doi: 10.1155/2012/327037.
- Grant, F.S. and West, G.F., 1965, Interpretation Theory in Applied Geophysics, McGraw-Hill Book.
- Gupta, O.P., 1983, A least-squares approach to depth determination from gravity data, *Geophysics*, 48 (3), 357-360.
- Li, X. and Chouteau, M., 1998, Three-dimensional gravity modeling in all space, *Surveys in Geophysics*, 19 (4), 339-368.
- Li, Y. and Oldenburg, D.W., 1996, 3-D inversion of magnetic data, *Geophysics*, 61 (2), 394-408.



Nonlinear inversion of gravity profile data for depth, radius and geometry determination of anomaly source, a case study: Aji Chai salt dome

Ata Eshaghzadeh^{1*} and Nahid Sadat Mortezaei²

1- M.Sc. Graduated, Institute of Geophysics, University of Tehran, Tehran, Iran

2- M.Sc. Graduated, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

Received: 13 October 2016; Accepted: 21 February 2017

Corresponding author: eshagh@alumni.ut.ac.ir

Keywords

Amplitude Coefficient
Shape Factor
Gravity
Salt Dome
Nonlinear Inversion

Extended Abstract

Summary

A nonlinear inversion technique using a fast method is developed to estimate successively the depth, shape factor and amplitude coefficient of a buried structure using residual gravity anomalies along a survey line. By defining the anomaly value at the origin and the anomaly value at different points on the survey line, the problem of depth estimation is transformed into a problem of solving a nonlinear equation of the form $f(z) = 0$. Knowing the depth of the

anomaly source, we can estimate the shape factor, and finally, the amplitude coefficient of the anomaly. Using the amplitude coefficient, we can also compute the radius of the anomaly. This technique is applicable for a class of geometrically simple anomalous bodies, including semi-infinite vertical cylinder, infinitely long horizontal cylinder, and sphere. The efficiency of this technique is demonstrated using the gravity anomaly due to a theoretical model with and without random errors. Finally, the applicability of the technique is illustrated using the residual gravity anomaly of a salt dome, situated near Miyaneh, northeast of Iran. The interpreted depth and other model parameters are in good agreement with the known actual values of the parameters. The estimated depth, radius, shape factor and the amplitude coefficient values of the salt dome are 64.63 m, 34.8 m, 1.43 and -472 mGal, respectively.

Introduction

Gravity data interpretation is always subject to ambiguity. Different geometrical distributions of the subsurface mass can yield the same gravity field at the surface (Skeels, 1947). However, Roy (1962) describes how a mathematically unique solution can be achieved directly from gravity data when the density contrast is constant and the bounding surface of the body is known. Simple geometrically shaped models can be very useful in quantitative interpretation of gravity data acquired in a small area over the buried structures. The models may not be geologically realistic, but usually approximate equivalence is sufficient to determine whether the form and magnitude of the calculated gravity effects are close enough to the observed gravity data to make the geological postulate reasonable.

In this paper, an inversion technique based on nonlinear equation $z = f(z)$ is applied to analyze gravity anomalies due to simple structures. The inversion technique simultaneously estimates the depth (z), nature of the source (shape factor (q)), amplitude coefficient (A) and radius (R) of the buried structures. The accuracy of the results obtained by this procedure depends on the accuracy to which the residual anomaly can be separated from the Bouguer anomaly. Moreover, the accuracy of the results of the present method depends on the extent to which the source body conforms to one of the assumed geometries.

Methodology and Approaches

The general vertical component of the gravity anomaly expression produced by a sphere (3D), an infinite long horizontal cylinder (2D), and a semi-infinite vertical cylinder (3D) is given in Abdelrahman et al (1989). The depth of the anomaly is determined by solving a nonlinear equation for z using standard methods. Iteration form of the solution can be expressed as $z_f = f(z_j)$, where z_j is the initial depth and z_f is the revised depth; z_f will be used as the z_j for the next iteration. The iteration stops when $|z_f - z_j| \leq e$, where e is a small predetermined real number close to zero. Any initial guess for z works well because there is always one global minimum. Theoretically, two different values of N and

M are enough to determine the depth. In practice, more than two values of N and M are preferable because of the presence of noise in the data ($x_i = \pm N$ and $x_i = \pm M$ where $N = 1, 2, 3, \dots$ and $M = 1, 2, 3, \dots$, and x_i is the position coordinate). For each value of N and M , we compute the values of the model parameters (i.e., z, q, A and R).

Results and Conclusions

A simple and rapid inversion approach was formulated to use the anomaly values at the origin and two pairs of measured data points ($\pm N$ and $\pm M$). The results of the synthetic and real 2D gravity data analysis showed the proficiency the proposed method. The computed depth of the salt dome was obtained as 64.63 m and the salt dome shape was obtained as sphere approximately.

Archive of SID