

وارون سازی مقید سه بعدی داده های گرانی سنجی گنبد نمکی قم با استفاده از قیدهای مثبت بودن، هموار سازی، مدل مرجع و مدل کرانه ای

وحید جعفر زاده^۱، علی نجاتی کلاته^{۲*}، حمید آقاجانی^۲ و احمد واعظیان^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استادیار، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۳- دکتری اکتشاف معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۹/۲۶؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۱/۰۴

* نویسنده مسئول مکاتبات: nejati@shahroodut.ac.ir

واژگان کلیدی

وارون سازی مقید
روش لی و اولدنبرگ
هموار سازی
مدل مرجع
گنبد نمکی قم

چکیده

هدف از تحقیق حاضر، وارون سازی داده های گرانی سنجی گنبد نمکی قم با استفاده از برنامه Grav 3D مبتنی بر روش لی-اولدنبرگ و مقایسه نتایج حاصل از به کارگیری قیدهای مثبت بودن، هموار سازی، مدل مرجع و مدل کرانه ای است. مراحل به کار رفته در این روش را می توان شامل مراحل مدل سازی پیش رو، انتخاب تابع هدف مدل شامل وزن دهی عمقی مناسب، تعیین تابع عدم برازش بین داده های مشاهده ای و محاسبه ای، مشخص کردن ضریب تعیین کننده چگونگی تطابق داده ها با یکدیگر و سپس اعمال یک حصار لگاریتمی برای به دست آوردن جواب های مثبت برآورده شده حاصل از وارون سازی دانست. در این تحقیق، مراحل گام به گام مدل سازی با استفاده از قیود مذکور و مقایسه نتایج حاصل از آنها، بر روی یک مدل مصنوعی و داده های گرانی سنجی گنبد نمکی قم، مورد ارزیابی قرار گرفته و در هر مرحله نقاط قوت و ضعف این قیود بیان شده است. نتایج حاصل از وارون سازی نشان می دهد که گسترش عمودی گنبد نمکی قم، حداقل تا عمق ۴۵۰۰ متری ادامه دارد؛ در نتیجه منشأ گنبد نمکی قم، سازند قرمز زیرین است.

۱- مقدمه

مدل سازی داده های گرانی سنجی با روش های مختلفی انجام می شود که می توان آن ها را به دو دسته پیش رو و وارون تقسیم بندی کرد. فرآیند مدل سازی پیش رو، با انتخاب مدل فرضی اولیه آغاز و با استفاده از روابط ریاضی، پاسخ آن تعیین و با داده های اندازه گیری شده مقایسه می شود؛ در صورت برازش مناسب بین داده های محاسبه ای و مشاهده ای، مدل اولیه به عنوان مدل نهایی در نظر گرفته شده و در صورت عدم برازش کافی، با تغییر پارامترهای مدل، مدل اولیه بهینه شده و محاسبات تکرار می شود تا برازش مناسب بین داده های محاسبه ای و مشاهده ای حاصل گردد. در مدل سازی وارون، داده های اندازه گیری شده به عنوان ورودی به برنامه داده می شوند و سپس با اجرای محاسبات مربوط به نظریه ی وارون سازی بر روی آن ها، پارامترهای مدل در حکم خروجی سامانه دریافت می شوند (مرادزاده و همکاران، ۱۳۸۴). محققین زیادی از روش مدل سازی پیش رو در تفسیر داده های گرانی سنجی استفاده کرده اند (Hubbert, 1948; Talwani et al., 1959; Talwani and Ewing, 1960; Grant and West, 1965; Won and Bevis, 1987). در زمینه به کارگیری روش مدل سازی وارون، روش های بسیاری مانند وارون سازی هموار (Li and Oldenburg, 1996, 1998)، وارون سازی فشرده (Portniaguine and Zhadanov, 1999)، وارون سازی به کمک ترکیب مدل های ریاضی (Boulanger and Chouteau, 2002)، وارون سازی بر مبنای کوواریانس (Chasseriau and Chouteau, 2003)، وارون سازی بر مبنای سنگ شناسی متغیر (Guillen et al., 2004)، وارون سازی ساختاری با برنامه نویسی خطی (Van Zon and Roy-Chowdhury, 2006) و وارون سازی با استفاده از شبکه انطباقی (Fullagar et al., 2008)، مورد استفاده قرار گرفته است. در حل مسائل وارون، دو رویکرد عمده ی خطی و غیرخطی وجود دارد؛ که با توجه به خصوصیات موضوع مورد مطالعه، یکی از این دو انتخاب می شود. در روش خطی، هدف مدل سازی با هندسه ی ثابت است و رابطه ی بین داده ها و پارامترهای مدل (چگالی در هر بلوک)، رابطه ای خطی است. در روش غیرخطی، رابطه بین داده ها و پارامترهای مدل (که در اینجا همان پارامترهای هندسی مدل هستند)، به صورت غیرخطی است و معمولاً برای تبدیل این دستگاه به یک دستگاه معادلات خطی، باید از تقریب های متداول نظیر بسط تیلور استفاده کرد. در این روش، هندسه ی جسم مورد نظر به صورت آزمون و خطای خودکار، با تعدیل مدل اولیه به دست می آید (نجاتی و ابراهیم زاده اردستانی، ۱۳۸۴).

۲- نظریه ی روش

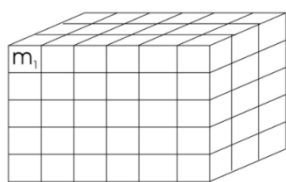
مؤلفه قائم میدان گرانی در نقطه مشاهده ای i ام که به فاصله r_i از جسم ناهنجار است، به صورت زیر تعریف می شود

(Li and Oldenburg, 1998):

$$g_z(r_i) = G \int_V \rho(r) \frac{z - z_i}{|r - r_i|^3} dv \quad (1)$$

که در آن $\rho(r)$ توزیع چگالی غیر متشابه و G ثابت جهانی گرانش می باشد. هدف از وارون سازی، محاسبه مستقیم چگالی ρ ، از داده های گرانی به دست آمده از g_z می باشد.

برای مدل سازی، زمین به تعداد زیادی سلول مکعبی که دارای ویژگی فیزیکی ثابتی هستند، تقسیم می شود. این سلول ها درون یک دستگاه مختصات متعامد، یک سیستم شبکه ای سه بعدی را تشکیل می دهند (شکل ۱).



شکل ۱: گسسته سازی زمین از طریق شبکه بندی سه بعدی عمودبرهم.

در این سیستم، زمین به وسیله یک بردار ستونی $m = (m_1, m_2, \dots, m_M)^T$ با طول M (تعداد سلول ها) معرفی می شود. هر درایه ی این بردار، مربوط به مقدار ویژگی فیزیکی هر سلول در مدل می باشد. بر اساس توزیع ویژگی فیزیکی زمین گسسته، جهت محاسبه پاسخ در هر نقطه ی مشاهده ای، حل مسئله پیش رو که شامل حل یک سیستم معادلات است، انجام می شود. برای یک سیستم معادلات خطی، داده ها از ضرب برداری ماتریسی حاصل می شوند. شکل ماتریسی مسئله پیش رو گسسته به صورت زیر بیان می شود:

$$d = Gm \quad (2)$$

که در آن، G ، ماتریس عملگر پیش رو، m ، بردار پارامترهای مدل شامل M آرایه و d ، بردار مقادیر داده های مشاهده ای شامل N داده است. در این مسائل، مقادیر معلوم در مسئله d و G هستند و در نهایت، هدف محاسبه ی m می باشد (Philips, 2002). وارون سازی مسائل ژئوفیزیکی معمولاً از نوع مسائل فروتخمینی (under determined) است، بدین معنی که تعداد پارامترهای مدل (M)، بسیار بیشتر از داده های مشاهده ای (N) است؛ بنابراین بی نهایت مدل حاصل می شود (Lelièvre, 2009) که از میان آن ها، جواب مطلوب مدلی است که با ساختارها و خصوصیات زمین شناسی مطابقت داشته باشد. مبنای برنامه Grav 3D، الگوریتم لی و اولدنبرگ می باشد که تابع هدف مدل به کاررفته در آن به صورت رابطه (۳) تعریف می شود (Williams, 2008):

$$\phi_m = \alpha_s \int_V w_s [W_r(z)(m - m_{ref})]^2 dV + \alpha_x \int_V w_x \left[\frac{\partial}{\partial x} (W_r(z)(m - m_{ref})) \right]^2 dV + \alpha_y \int_V w_y \left[\frac{\partial}{\partial y} (W_r(z)(m - m_{ref})) \right]^2 dV + \alpha_z \int_V w_z \left[\frac{\partial}{\partial z} (W_r(z)(m - m_{ref})) \right]^2 dV \quad (3)$$

مطلوب می‌شود (Philips, 2002):

$$\phi = \phi_d + \mu \phi_m \quad (7)$$

علاوه بر ضرایب هموارسازی در جهات مختلف و توابع وزنی عمقی، می‌توان با استفاده از قیدهای مدل مرجع (reference model) و مدل کرانه‌ای (bounded model)، اطلاعات به‌دست‌آمده از زمین‌شناسی، حفاری و دیگر روش‌های ژئوفیزیکی را وارد روند وارون‌سازی کرد. داده‌های استفاده‌شده از این طریق، از اهمیت و اعتماد بالایی برخوردارند و در نتیجه‌ی نهایی مدل‌سازی، بدون هیچ‌گونه تغییری باقی‌مانده و باعث بهبود مدل نهایی نسبت به حالت بدون قید آن می‌شوند. برای طراحی مدل مرجع، می‌توان از اطلاعات حفاری و دیگر فیلترهای متداول ژئوفیزیکی نظیر روش‌های تخمین عمق و مرز، جهت تعیین کردن عمق تقریبی و میزان گستردگی سطحی ساختار مورد مطالعه سود برد. در طراحی مدل کرانه‌ای، حد بالا و پایین تباین چگالی برای هر سلول تعریف می‌شود و اجازه نمی‌دهد که از این مقادیر خارج شود؛ با این روش، مدل به‌شدت مقید شده و نتایج مفیدتری ارائه می‌دهد (Williams, 2008).

فیلتر زاویه‌ی تمایل یکی از فیلترهای فاز محلی است که مبتنی بر نسبت مشتقات میدان‌گرانی است و در متعادل کردن دامنه‌ی آنومالی‌های عمیق نسبت به آنومالی‌های کم‌عمق مؤثر است؛ به‌عبارتی فیلتر زاویه‌ی تمایل، دامنه آنومالی‌های عمیق‌تر را نسبت به سطحی‌تر تقویت می‌کند. این فیلتر به‌صورت زیر تعریف می‌شود (Miller and Singh, 1994):

$$TA = \tan^{-1} \left(\frac{\partial g / \partial z}{\sqrt{(\partial g / \partial x)^2 + (\partial g / \partial y)^2}} \right) \quad (8)$$

در این راستا، فیلتر زاویه‌ی تمایل هایدربولیک نیز جهت تعیین موقعیت افقی بی‌هنجاری‌ها به کار می‌رود که به‌صورت زیر تعریف می‌شود (Cooper and Cowan, 2006):

$$HTA = \text{Real} \left(\tan^{-1} \left(\frac{\partial g / \partial z}{\sqrt{(\partial g / \partial x)^2 + (\partial g / \partial y)^2}} \right) \right) \quad (9)$$

که در دو معادله‌ی اخیر g ، میدان‌گرانی، TA ، زاویه‌ی تمایل و HTA ، زاویه‌ی تمایل هایدربولیک هستند.

۳- روش انجام کار

۳-۱- وارون‌سازی داده‌های مصنوعی

معمولاً در روش‌های گوناگون ژئوفیزیکی، برای بررسی کارایی یک

قسمت اول معادله‌ی ۳، معیار نزدیکی (closeness) مدل

به‌دست‌آمده به مدل مرجع (m_{ref}) می‌باشد، و ارات بعد، میزان همواری (smoothness) مدل را در جهات x ، y و z کنترل می‌کند. ضرایب α_s ، α_x ، α_y و α_z ، جهت وزن‌دهی قسمت‌های مختلف معادله است که تابع هدف مدل را قادر می‌سازد تا با تغییر یک یا دو پارامتر، موفق به بازسازی مدل‌هایی شود که به مدل مرجع نزدیک یا ترجیحاً در یک راستای خاص هموارتر باشد. توابع وزن‌دهی وابسته‌ی فضای w_s ، w_x ، w_y و w_z ، جهت وزن‌دهی اهمیت یک پارامتر مدل نسبت به دیگری است (Philips, 2002). تابع W_r نیز یک تابع وزن‌دهی تعمیم یافته است که هدف آن، خنثی کردن میرایی هندسی حساسیت با فاصله است (یوسفی و اسکویی، ۱۳۹۲). از طریق توابع وزن‌دهی و مدل مرجع، می‌توان اطلاعات اولیه قابل‌اعتماد که از زمین‌شناسی یا دیگر روش‌های ژئوفیزیکی حاصل می‌شوند را وارد روند وارون‌سازی کرد. نتیجه این کار، هدایت وارون‌سازی به سمت مدلی است که علاوه‌بر برازش نسبی بر داده‌ها، با ساختارهای زمین‌شناسی نیز انطباق دارد. شکل ماتریسی رابطه (۳)، به‌صورت زیر است:

$$\Phi_m = \|w_m(m - m_{ref})\|^2 \quad (4)$$

که در آن w_m ، یک ماتریس وزنی با ابعاد $M \times M$ است که تمام توابع مشتق و وزن‌دهی‌های تابع هدف مدل، درون آن جای می‌گیرند و $\| \cdot \|$ نرم l_2 است. جهت اندازه‌گیری میزان انطباق داده‌های پیش‌بینی‌شده با داده‌های مشاهده‌ای، یک تابع عدم برازش داده (data misfit)، به‌صورت زیر طراحی شده است:

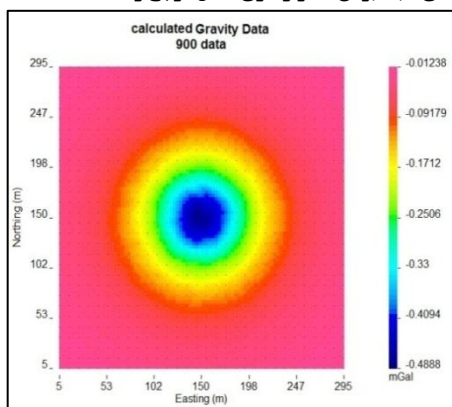
$$\phi_d = \sum_{i=1}^N \left(\frac{d_i^{obs} - d_i^{pre}}{\epsilon_i} \right)^2 \quad (5)$$

و شکل ماتریسی آن به‌صورت رابطه (۶) است:

$$\Phi_d = \|w_d(d - d^{pre})\|^2 \quad (6)$$

که در دو رابطه فوق، N تعداد داده‌ها، d_i^{obs} ، i امین داده مشاهده‌ای، d_i^{pre} ، i امین داده آمین‌بینی‌شده‌ی وسیله مدل و ϵ_i بیانگر انحراف معیار i امین داده آمین‌روند وارون‌سازی مانند مسائل بهینه‌سازی می‌باشد و هدف پیدا کردن مدلی است که تابع هدف مدل را کمینه کرده و داده‌های آن، تا مقدار ینی بر داده‌های مشاهده‌ای منطبق باشد. رابطه (۷)، تابع هدف را نشان می‌دهد که شامل عدم برازش داده‌ها (ϕ_d)، تابع هدف مدل (ϕ_m) و ضریب منظم‌سازی μ است؛ کمینه شدن این تابع هدف منجر به تولید مدل

جعفر زاده و همکاران، وارون سازی مقید سه بعدی داده های گرانی سنجی گنبد نمکی قم با استفاده از قیدهای مثبت بودن، هموار سازی، مدل مرجع و ...، صفحات ۳۳-۴۴.

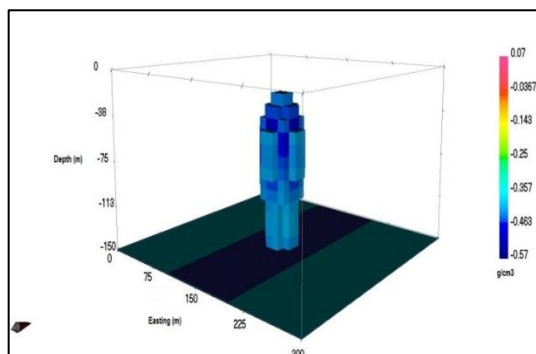


شکل ۴: شبکه‌ی حاصل از داده‌های نوفه‌دار.

در گام بعد با اعمال قید مثبت بودن (قابل ذکر است که این قید صرفاً به تباین چگالی مثبت اشاره ندارد بلکه در مواردی که تباین چگالی مورد نظر کاملاً مثبت و یا کاملاً منفی است، به کار برده می‌شود (Williams, 2008; Philips, 2002)) و در نتیجه کاهش محدوده چگالی مجاز سلول‌ها، از کشیدگی عمقی زیاد مدل جلوگیری شده است (شکل ۶).

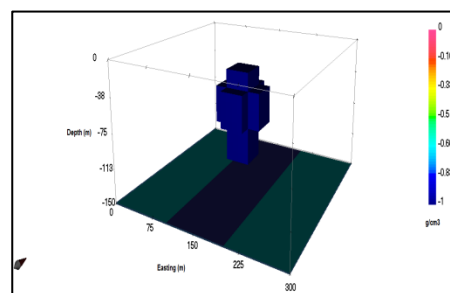
در گام سوم، علاوه بر قید مثبت بودن، با افزایش میزان همواری در راستای قائم، از تمرکز سطحی مدل کاسته و عمق پایین مدل بهتر شده است (شکل ۷). در گام آخر، نصف مدل مصنوعی را به عنوان مدل مرجع و مدل کرانه‌ای، به وارون سازی اعمال شده و نتایج آن در شکل‌های ۸ و ۹ آمده است (Philips, 2002).

هدف از این کار، مشخص کردن توانایی وارون سازی در بازسازی مدل‌هایی است که قبلاً اطلاعاتی در مورد قسمت‌هایی از آن به دست آمده است. این اطلاعات می‌تواند از دیگر روش‌های ژئوفیزیکی یا داده‌های حفاری و زمین‌شناسی به دست آید. با توجه به شکل حاصل از قید نصف مدل مرجع، نیمه بازسازی شده مدل به سمت عمق کشیدگی پیدا کرده است اما در شکل حاصل از قید نصف مدل کرانه‌ای، این کشیدگی وجود نداشته و همچنین تغییرات مدل به صورت هموار است.

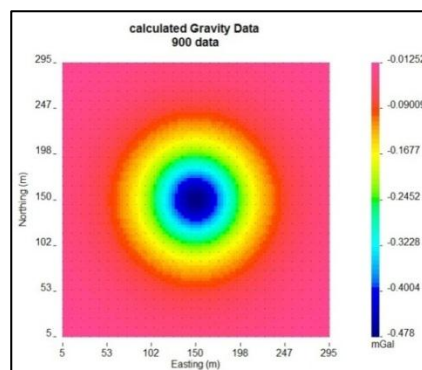


شکل ۵: وارون سازی بدون اعمال قید.

روش، ابتدا عملکرد آن بر روی داده‌های مصنوعی امتحان می‌شود. با توجه به این‌که داده‌های واقعی همواره دارای نوفه هستند، برای شبیه سازی بهتر، به داده‌های مصنوعی نیز مقداری نوفه اضافه می‌شود. بر اساس میزان تطابق نتایج با جواب اصلی، می‌توان کارایی روش به کار رفته را ارزیابی کرد (جهانداری و همکاران، ۱۳۹۱). در این مقاله، مدل مصنوعی به صورت شکل ۱ تعریف شده است؛ که در آن عمق بالا و پایین شکل مورد نظر به ترتیب ۲۰ و ۱۲۰ متر و تباین چگالی آن با محیط اطراف، ۱- گرم بر سانتی متر مکعب منظور شده است. داده‌های به دست آمده از این مدل، در یک شبکه مربعی به فواصل ۱۰ متر محاسبه شده؛ که حاصل آن، تعداد ۹۰۰ داده و میزان نوفه گوسی تصادفی اضافه شده به این داده‌ها، ۲ درصد است. شبکه‌ی حاصل از داده‌های خام و همراه با نوفه در شکل‌های ۳ و ۴ آمده است. هدف از این قسمت، مدل سازی گام به گام و مقایسه و بهبود بخشیدن مدل نهایی با اعمال قیدهای متفاوت است. در گام اول، وارون سازی بدون اعمال هیچ یک از قیود هموار سازی، مثبت بودن (positivity)، مدل مرجع و مدل کرانه‌ای انجام شد (شکل ۵). در این شکل با انتخاب باند تباین چگالی مثبت و منفی، جهت برآزش داده‌های محاسبه‌ای و مشاهده‌ای، مجموعه‌ای از سلول‌ها به انتهای مدل اضافه شده که این، باعث کشیدگی عمق پایین مدل شده است.



شکل ۲: نمای سه بعدی مدل مصنوعی مورد استفاده.



شکل ۳: شبکه‌ی حاصل از داده‌های خام بدون نوفه.

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۱، شماره ۱، ۱۳۹۴.

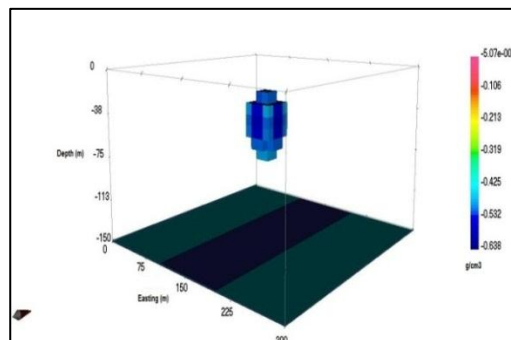
البرز و در دماغه غربی آن در سطح زمین به صورت یک برآمدگی مرتفع با مساحتی دایره‌ای شکل برون‌زدگی دارد و بلندترین نقطه در منطقه مورد مطالعه است (شکل ۱۰).

گنبد نمکی قم یکی از گنبدهای ایران مرکزی (مانند گنبدهای نمک کویر جنوب سمنان و شمال شرقی اردکان) است که اساساً از نمک با ناخالصی‌هایی از رس تشکیل شده است. سطح گنبد نمکی توسط رس‌های قرمز مایل به زرد پوشیده شده است.

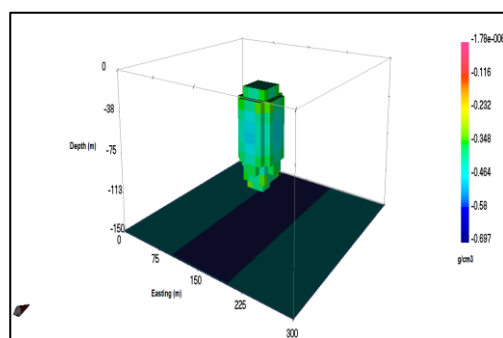
در زمینه‌ی منشأ این گنبد نمکی تحقیقات کافی به عمل نیامده و نظر واحدی ابراز نشده است. به‌طور کلی در حوضه مرکزی ایران، دو منشأ برای گنبدهای نمکی می‌توان ذکر نمود؛ یکی سازند قرمز زیرین (زیر سازند قم) و دیگری واحد تبخیری قاعده سازند قرمز بالایی است (امیدی، ۱۳۶۹). آقاشاهی و زمردیان، با مطالعات گرانی‌سنجی گنبد نمکی قم نتیجه گرفتند که گنبد مذکور ریشه‌ای عمیق ندارد (Aghashahi and Zomorodian, 1981).

عبایی و همکاران که سازند قرمز زیرین را به دو بخش تبخیری زیرین و لایه‌های قرمز بالایی تقسیم می‌کنند، به استناد سن‌یابی به روش رادیواکتیو و گرده‌شناسی، اعتقاد دارند که گنبد نمکی قم از واحد تبخیری زیرین مشتق شده و در امتداد یک منطقه گسلی (شکل ۱۱)، به سمت بالا حرکت نموده است (Abaie et al., 1964). همچنین نقشه تراز ساختاری رأس سازند قرمز زیرین، حاکی از وجود یک ساختمان گنبدی در این سازند در زیر زمین می‌نماید. بنابراین بر اساس داده‌های موجود می‌توان استنباط نمود که گنبد نمکی قم از واحدهای تبخیری قبل از سازند قم مشتق شده است و نظر آقاشاهی و زمردیان در این زمینه که گنبد نمکی قم دارای ریشه‌ای عمیق نیست چندان به واقعیت نزدیک نیست، ولی هنوز به درستی مشخص نشده است (امیدی، ۱۳۶۹).

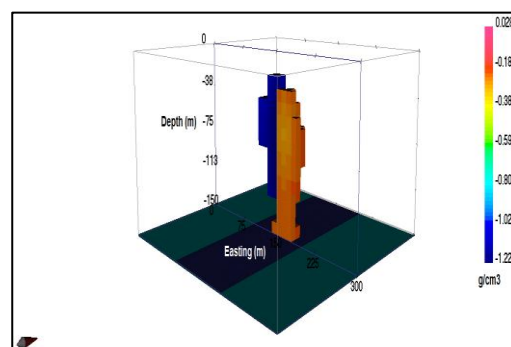
آقاجانی (۱۳۸۸)، با توجه به تحلیل داده‌های گرانی منطقه به روش گرادیان کل نرمال شده، عمق زیرین گنبد نمکی را حداقل بیش از ۴۰۰۰ متر تعیین کرده است. در این تحقیق، با توجه به دامنه تغییرات چگالی برای سنگ‌های منطقه که حدود ۲/۵۵ تا ۲/۷۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و برای گنبد نمکی ۱/۹۵ تا ۲/۱۵ است، مقدار اختلاف چگالی مطلوب، ۰/۶- گرم بر سانتی‌متر مکعب است. داده‌های گرانی‌سنجی مورد استفاده، در یک شبکه منظم به فواصل ایستگاه‌ها و خطوط برداشت ۵۰۰ متری برداشت شده است که حاصل آن، تعداد ۱۵۵۱ داده است. بر اساس روش روند سطحی مرتبه سه، بی‌هنجاری‌های باقیمانده گرانی در ناحیه قم از بی‌هنجاری‌های ناحیه‌ای تفکیک گردید (آقاجانی، ۱۳۸۸). نقشه بوگه کامل و حذف روند سطحی درجه ۳، در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ ارائه شده است.



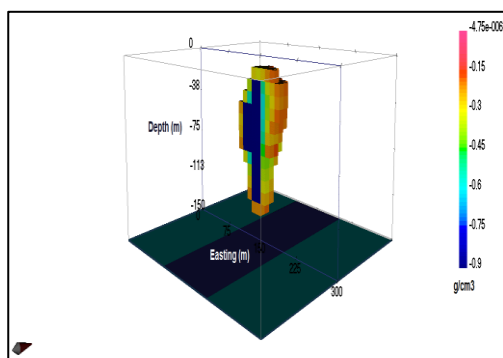
شکل ۶: وارون‌سازی با اعمال قید مثبت بودن.



شکل ۷: مدل حاصل از قیود مثبت بودن و هموارسازی.



شکل ۸: اعمال مدل مرجع به وارون‌سازی.

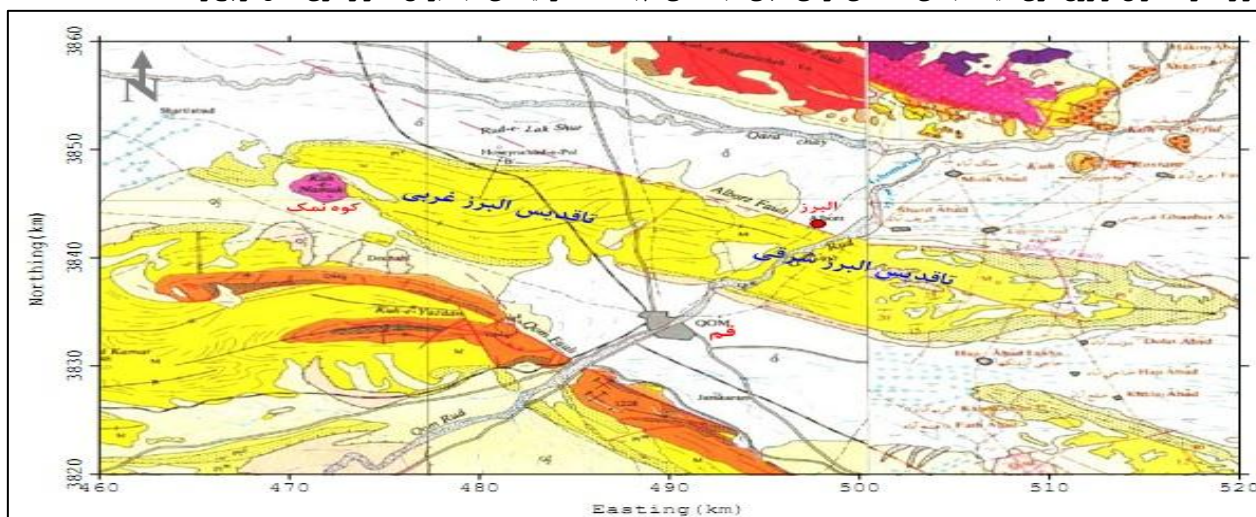


شکل ۹: اعمال مدل کرانه‌ای به وارون‌سازی.

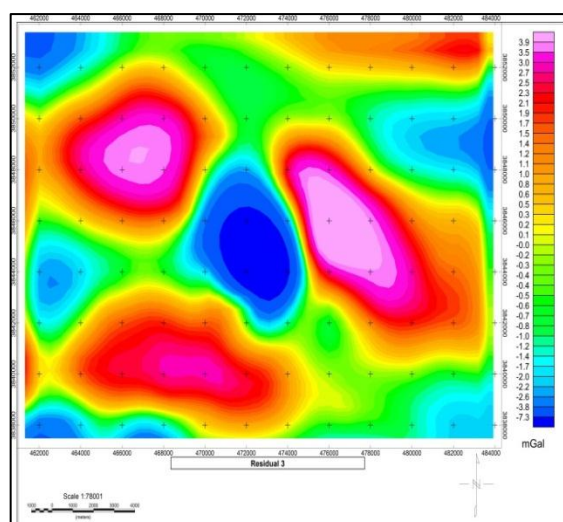
۳-۲- وارون‌سازی داده‌های واقعی

گنبد نمکی قم معروف به کوه نمک، در انتهای شمال غربی تاق‌دیس

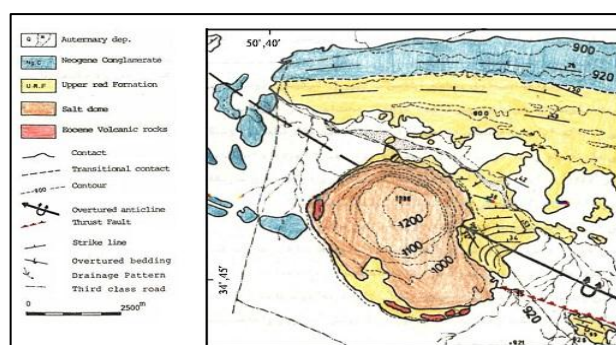
جعفر زاده و همکاران، وارون سازی مقید سه بعدی داده های گرانی سنجی گنبد نمکی قم با استفاده از قیدهای مثبت بودن، هموار سازی، مدل مرجع و ...، صفحات ۳۳-۴۴.



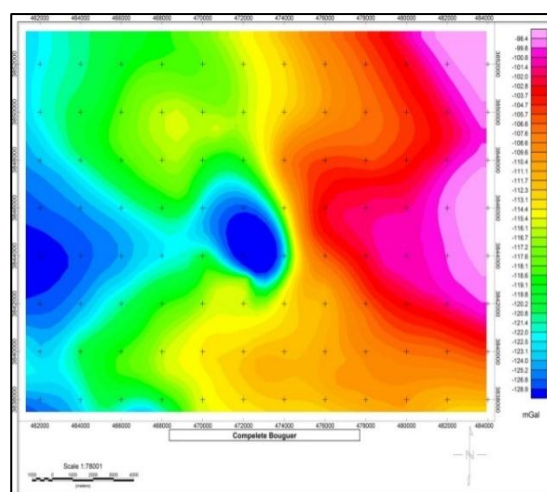
شکل ۱۰: زمین شناسی حوضه نفتی البرز - سراج، نیمه شرقی برگرفته از نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ آران (امامی، ۱۳۷۱) و نیمه غربی آن از نقشه ۱/۲۵۰۰۰۰ قم است (امامی و حاجیان، ۱۹۸۱).



شکل ۱۳: نقشه بی‌هنجاری‌های باقیمانده حاصل از حذف اثرات بی-هنجاری ناحیه‌ای به روش روند سطحی با مرتبه سه.

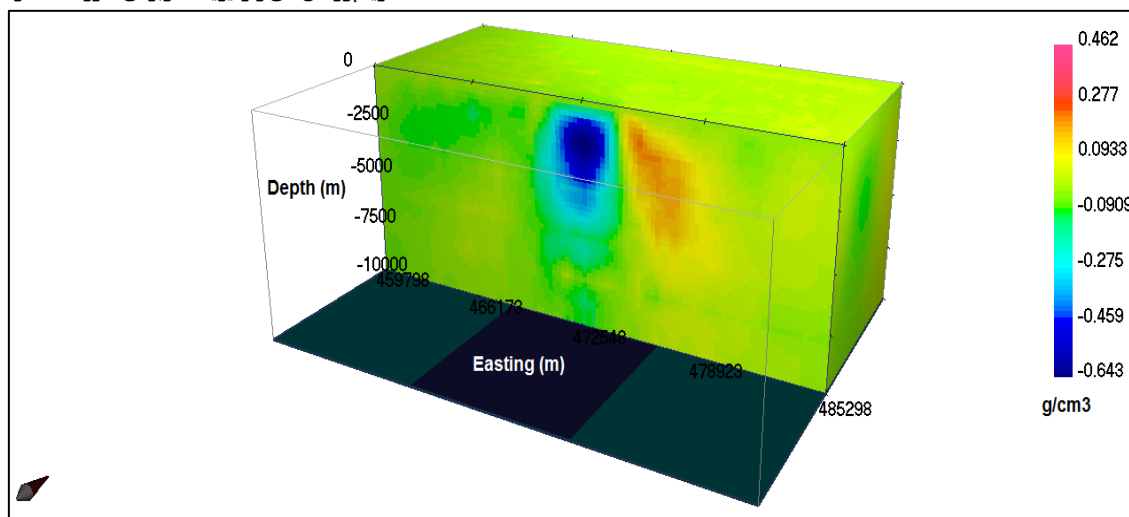


شکل ۱۱: موقعیت گنبد نمکی قم در ساختمان چین خورده البرز (امیدی، ۱۳۶۹).

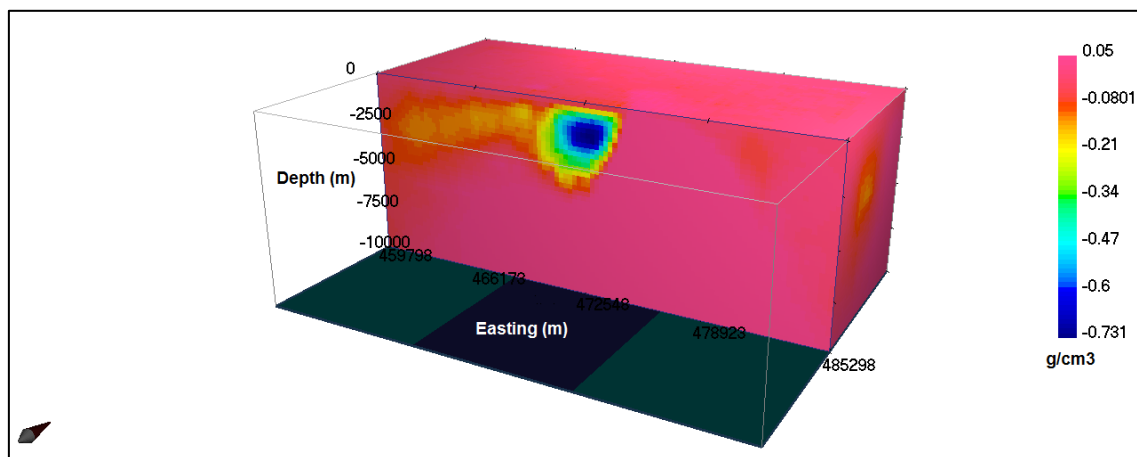


شکل ۱۲: نقشه بوگه کامل منطقه مورد مطالعه.

پس از حذف اثرات ناحیه‌ای و مشخص شدن آنومالی محلی، با توجه به روند مدل سازی داده‌های مصنوعی، در ادامه کار مدل سازی گام به گام با تأثیر قیود فوق صورت گرفته است. برای این منظور ابتدا مسئله بدون اعمال هیچ گونه قیدی حل شده است که نتیجه آن در شکل ۱۴ آورده شده است. با توجه به اطلاعات زمین شناسی منطقه مورد مطالعه، مشخص شد که گنبد نمکی قم در سطح زمین برون زدگی دارد، اما همان طور که در شکل ۱۴ مشخص است، عمق بالای مدل به سطح زمین نرسیده است. در گام بعد با اعمال قید مثبت بودن مدل جمع تری حاصل شد اما عمق بالای مدل هنوز تصحیح نشده است (شکل ۱۵).



شکل ۱۴: وارون‌سازی بدون اعمال قید.



شکل ۱۵: وارون‌سازی با اعمال قید مثبت بودن.

نمکی دارد؛ همچنین با توجه به وجود رخنمون‌های سطحی این ساختار و تحقیقات آفاجانی (۱۳۸۸) مبنی بر کشیدگی عمودی گنبد نمکی مذکور تا عمق ۴۰۰۰ متری، اقدام به طراحی دو لایه از سلول‌ها با کشیدگی سطحی ۲ کیلومتر در سطح و عمق ۴۰۰۰ متری زمین شده است (شکل ۱۹).

در گام آخر، قیود مدل مرجع و مدل کرانه‌ای به وارون‌سازی اعمال شد که نتایج آن در شکل‌های ۲۰ و ۲۱ آورده شده است. همان‌طور که در کادر قرمز رنگ شکل ۲۰ مشاهده می‌شود، قید مدل مرجع نتوانسته است مدل را در نزدیکی سطح زمین بازسازی کند اما در شکل ۲۱، رخنمون‌های گنبد نمکی قم تأیید شده است.

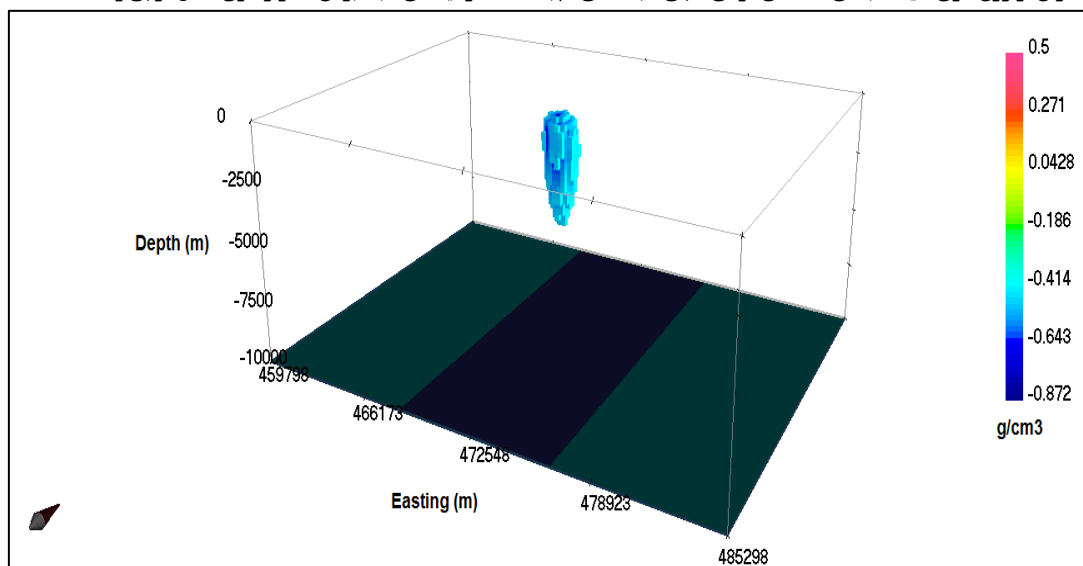
در گام سوم با افزایش وزن سلول‌های سطحی‌تر و افزایش همواری در راستای قائم، مدلی به دست آمد که علاوه بر کشیدگی عمقی مناسب، بر سطح زمین نیز رخنمون دارد (شکل ۱۶).

جهت طراحی مدل مرجع و مدل کرانه‌ای و وارد کردن داده‌های مورد اعتماد اولیه به روند وارون‌سازی، از پژوهش‌های علمی انجام شده در این زمینه و همچنین فیلترهای تعیین مرز مانند فیلتر زاویه تمایل و زاویه‌ی تمایل هایدرولیک که با استفاده از بسته کد Potensoft

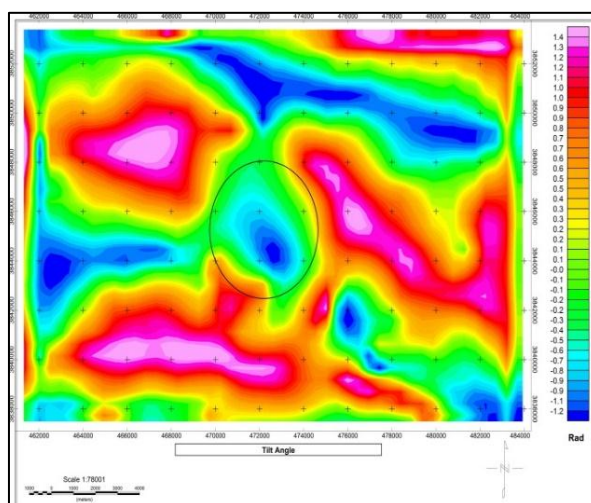
(Arisoyand Dikmen, 2011) انجام شد، استفاده شده است.

نتایج حاصل از فیلترهای تعیین مرز (شکل‌های ۱۷ و ۱۸)، نشان‌دهنده‌ی کشیدگی سطحی متوسط ۲ کیلومتری این گنبد

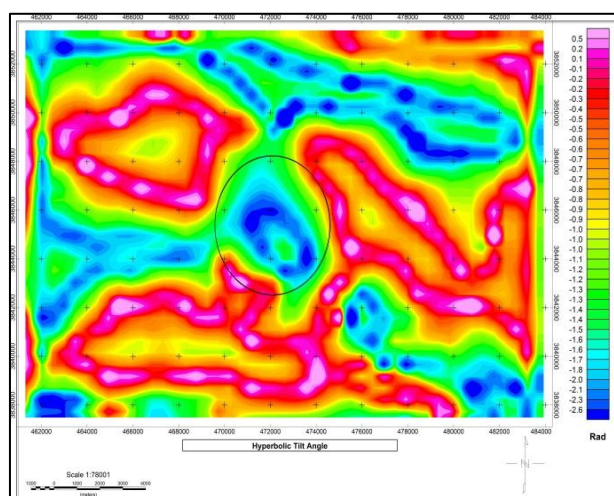
جعفر زاده و همکاران، وارون سازی مقید سه بعدی داده های گرانی سنجی گنبد نمکی قم با استفاده از قیدهای مثبت بودن، هموار سازی، مدل مرجع و ...، صفحات ۳۳-۴۴.



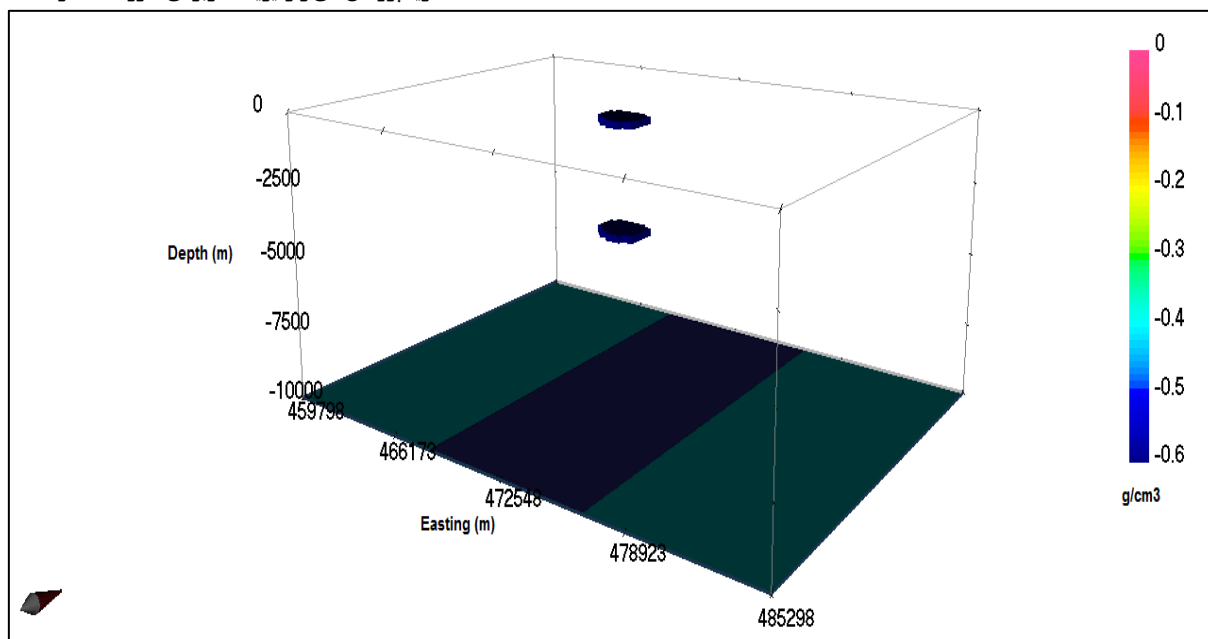
شکل ۱۶: مدل حاصل از اعمال قید هموار سازی.



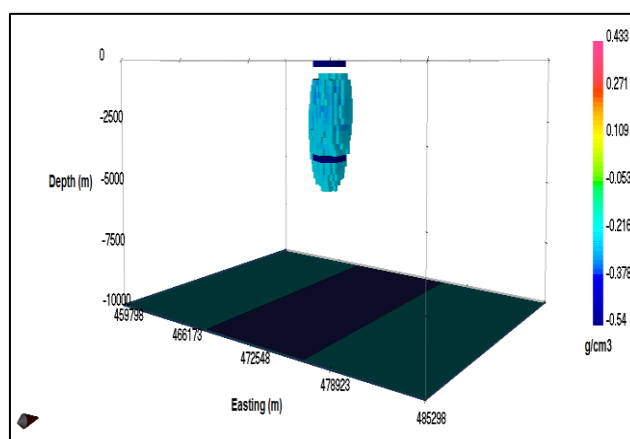
شکل ۱۷: نقشه حاصل از فیلتر زاویه تمایل (مقدار متوسط کشیدگی سطحی ۲۲۵۰ متر).



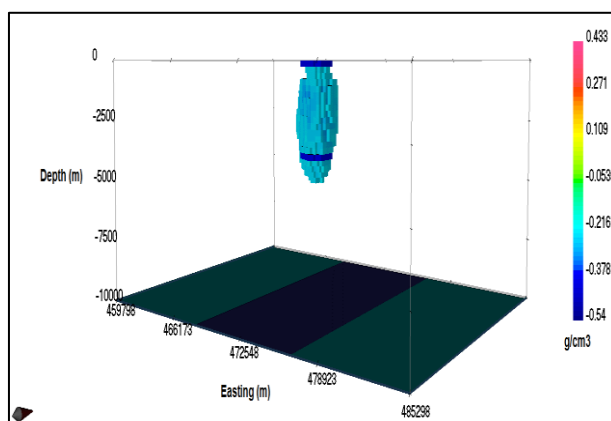
شکل ۱۸: نقشه حاصل از فیلتر زاویه تمایل هایپربولیک (مقدار متوسط کشیدگی سطحی ۲۲۵۰ متر).



شکل ۱۹: مدل طراحی شده قیود مدل مرجع و مدل کرانه‌ای.



شکل ۲۰: اعمال مدل مرجع به وارون‌سازی.



شکل ۲۱: اعمال مدل کرانه‌ای به وارون‌سازی.

۴- نتیجه گیری

هدف از این پژوهش، وارون سازی داده های بی هنجاری گرانی به روش لی و اولدنبرگ و مقایسه نتایج حاصل از اعمال قیدهای مثبت بودن، هموار سازی، مدل مرجع و مدل کرانه ای بود که در آن وارون سازی گام به گام بر روی یک مدل مصنوعی و داده های گرانی سنجی گنبد نمکی قم انجام شد. با مقایسه شکل های حاصل از داده های مصنوعی، مشخص شد که در صورت عدم استفاده از قیود مذکور، کف زیرین مدل زیادی به سمت عمق کشیده می شود (شکل ۵). با استفاده از قید مثبت بودن، می توان از کشیدگی عمقی جلوگیری کرد اما باعث متمرکز شدن مدل در نزدیکی سطح خواهد شد (شکل ۶). با اعمال صحیح قید هموار سازی، می توان از کشیدگی عمقی زیاد و متمرکز شدن مدل در سطح جلوگیری کرد (شکل ۷). کشیدگی عمقی شکل حاصل از قید مدل مرجع (شکل ۸)، زیاده تر از عمق کف مدل مصنوعی است اما در شکل حاصل از قید مدل کرانه ای (شکل ۹)، این کشیدگی اضافی وجود ندارد؛ پس قید مدل کرانه ای عملکرد بسیار بهتری نسبت به قید مدل مرجع داشته است. با مقایسه شکل های حاصل از داده های واقعی نیز مشخص شد که استفاده از قید مثبت بودن باعث متمرکز شدن مدل در نزدیکی سطح می شود (شکل ۱۵)، اما با کمک قید هموار سازی مناسب، از این امر جلوگیری می شود (شکل ۱۶). جهت طراحی و مقایسه قیدهای مدل مرجع و کرانه ای، از فیلترهای تعیین مرز و پژوهش های قبلی در این زمینه استفاده شد (شکل ۱۹). در شکل حاصل از قید مدل مرجع (شکل ۲۰)، مشخص شد که این قید به خوبی نتوانسته است عمق بالای مدل را به سطح زمین نزدیک کند اما در شکل حاصل از قید مدل کرانه ای (شکل ۲۱)، بالای مدل در سطح زمین مشاهده می شود؛ پس در این قسمت هم قید مدل کرانه ای عملکرد بسیار بهتری نسبت به قید مدل مرجع داشته است. با توجه به شکل های ۱۶، ۲۰ و ۲۱ نیز مشخص شد که گسترش عمودی گنبد نمکی قم حداقل تا عمق ۴۵۰۰ متری ادامه دارد؛ از این رو منشأ گنبد نمکی قم سازند قرمز زیرین است.

۵- منابع

آقاجانی، ح.، ۱۳۸۸، بررسی قابلیت روش گرادیان کل نرمال داده های گرانی در تعیین پتانسیل هیدروکربوری تله های نفتی، رساله دکتری، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران.

امامی، م. ه. و حاجیان، ج.، ۱۹۸۱، نقشه زمین شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ قم، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

امامی، م. ه.، ۱۳۷۱، نقشه زمین شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ آران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

امیدی، پ.، ۱۳۶۹، تحلیل خمیدگی ساختاری تاقدیس البرز- شمال

قم، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس تهران، ایران.

جهانداری، ه.، اسکویی، ب. و ابراهیم زاده اردستانی، و.، ۱۳۹۱، وارون سازی سه بعدی داده های مغناطیسی منطقه آهن دار سرخه- دیزج زنجان با استفاده از الگوریتم غیرخطی مارکوارت- لونبرگ، م. فیزیک زمین و فضا، ۳۸ (۳)، ۱۲۹-۱۴۶.

مرادزاده، ع.، دولتی ارده جانی، ف.، آگاه، آ. و طباطبایی رئیسی، س. ه.، ۱۳۸۴، اکتشاف تله های هیدروکربوری طبس با روش جدید وارون سازی سه بعدی داده های گرانی، م. فیزیک زمین و فضا، ۳۱ (۲)، ۲۳-۳۴.

نجاتی کلاته، ع. و ابراهیم زاده اردستانی، و.، ۱۳۸۴، مدل سازی وارون دویعدی داده های گرانی، م. فیزیک زمین و فضا، ۳۱ (۱)، ۲۷-۳۷.

یوسفی، ب. و اسکویی، ب.، ۱۳۹۲، استفاده از روش لی- اولدنبرگ در برگردان سه بعدی داده های مغناطیسی زمینی منطقه گزستان (استان یزد)، مجله فیزیک زمین و فضا، ۳۹ (۱)، ۷۳-۸۸.

Abaie, I., Ansari, H.J., Badakhshan, A. and Jaafari, A., 1964, History and development of the Alborz and Sarajeh fields of Central Iran, Bulletin of Iranian Petroleum Institute, 15, 561-574.

Aghashahi, E. and Zomorodian, H., 1981, Gravity study of Qum salt dome in Iran, Journal of Earth and Space Physics, 10, 21-24.

Arisoy, M.O. and Dikmen, U., 2011, Potensoft: MATLAB-based software for potential field data processing, modeling and mapping, Computers & Geosciences, 37, 935-942.

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

Chasseriau, P. and Chouteau, M., 2003, 3D gravity inversion using a model of parameter covariance, Journal of applied geophysics, 52 (1), 59-74.

Cooper, G.R.J. and Cowan, D.R., 2006, Enhancing potential field data using filters based on the local phase, Computers & Geosciences, 32 (10), 1585-1591.

Fullagar, P.K., Pears, G.A. and McMonnies, B., 2008, Constrained inversion of geologic surfaces-pushing the boundaries, The Leading Edge, 27 (1), 98-105.

- Portniaguine, O. and Zhdanov, M.S., 1999, Focusing geophysical inversion images, *Geophysics*, 64 (3), 874-887.
- Portniaguine, O. and Zhdanov, M.S., 2002, 3-D magnetic inversion with data compression and image focusing, *Geophysics*, 67 (5), 1532-1541.
- Saunders, M.A., 1995, Cholesky-based methods for sparse least squares: The benefits of regularization Linear and Nonlinear Conjugate Gradient-Related Methods, 92-100.
- Talwani, M., Worzel, J.L. and Landisman, M., 1959, Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocino submarine fracture zone, *Journal of Geophysical Research*, 64 (1), 49-59.
- Talwani, M. and Ewing, M., 1960, Rapid computation of gravitational attraction of three-dimensional bodies of arbitrary shape, *Geophysics*, 25, 203-225.
- Van Zon, T. and Roy-Chowdhury, K., 2006, Structural inversion of gravity data using linear programming, *Geophysics*, 71 (3), J41-J50.
- Williams, N.C., 2008, Geologically-constrained UBC-GIF gravity and magnetic inversions with examples from the Agnew-Wiluna greenstone belt, Western Australia.
- Won, I.J. and Bevis, M., 1987, Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines, *Geophysics*, 52 (2), 232-238.
- Wright, S.J., 1997, Primal-dual interior-point methods, SIAM, Philadelphia, PA.
- Gill, P.E., Murray, W., Ponceleon, D.B. and Saunders, M.A., 1991, Solving reduced KKT systems in barrier methods for linear and quadratic programming, Stanford Univ Ca Systems Optimization Lab.
- Grant, F.S. and West, G.F., 1965, Interpretation theory in applied geophysics. McGraw-Hill Book Co.
- Guillen, A., Courrioux, G., Calcagno, P., Lane, R., Lees, T. and McInerney, P., 2004, Constrained gravity 3D litho-inversion applied to Broken Hill, ASEG Extended Abstracts, 1, 1-6.
- Hubbert, M.K., 1948, A line-integral method of computing the gravimetric effects of two-dimensional masses, *Geophysics*, 13 (2), 215-225.
- Lelièvre, P.G., Oldenburg, D.W. and Williams, N.C., 2009, integrating geological and geophysical data through advanced constrained inversions, *Exploration Geophysics*, 40 (4), 334-341.
- Li, Y. and Oldenburg, D.W., 1996, 3-D inversion of magnetic data, *Geophysics*, 61 (2), 394-408.
- Li, Y. and Oldenburg, D.W., 1998, 3-D inversion of gravity data, *Geophysics*, 63 (1), 109-119.
- Li, Y. and Oldenburg, D.W., 2003, Fast inversion of large-scale magnetic data using wavelet transforms and a logarithmic barrier method, *Geophysical Journal International*, 152 (2), 251-265.
- Miller, H.G. and Singh, V., 1994, Potential field tilt-a new concept for location of potential field sources, *Journal of Applied Geophysics*, 32 (2), 213-217.
- Phillips, N.D., 2002, Geophysical inversion in an integrated exploration program: Examples from the San Nicolas deposit.



3-D Constrained Inversion of Gravity Data Acquired from Qom Salt Dome using Positivity, Smoothness, Reference Model and Bounded Model Constraints

Vahid Jafarzadeh¹, Ali Nejati Kalateh^{*2}, Hamid Aghajani² and Ahamd Vaezian³

1- M.Sc. Student, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Assistant Professor, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

3- Ph.D. of Mine Exploration, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 17 December 2015; Accepted: 24 January 2016

Corresponding author: nejati@shahroodut.ac.ir

Keywords

Constrained inversion
Li-Oldenburg method
Smoothness
Reference model
Bounded model
Qom salt dome

Extended Abstract

Summary

Nowadays attempts to detect and achieve buried structures and underground resources have developed widely and geophysics is a means of identifying these structures. One of the main goals of geophysical data interpretations, is to incorporate additional information to the process of inversion in order to define the characteristics of geological structures as precisely as possible. In this paper, a three-dimensional (3-D) constrained inversion of gravity data acquired from

Qom salt dome using Grav3D program is presented, and then, the results are compared with the results of 3-D constrained inversion of the data using constraints including smoothness, positivity, reference model and bounded model. For testing the algorithm, a step by step constraint inversion including smoothness, positivity, reference model and bounded model has been performed on an artificial model, and then, the algorithm has been used for modeling the gravity data acquired from Qom salt dome.

Introduction

The recent ability to produce 3-D models of the sub-surface, coupled with an increasing need to explore concealed resources, results from geophysical inversions that provide more and more significant information to the explorers. Since our country is rich in mineral resources, the use of optimized modern and efficient methods to prevent additional costs in exploring these resources is very important. Thus, in the first step of this exploration procedure, we should try to collect as much information as possible about the underground structures. In this direction, 3-D modeling of geophysical data can lead to successfully interpreting the data. The outcome of modeling is to have a better understanding of target such as the shape and depth of source. Finding these specifications of the source directly influences the subsequent decisions for management of major costs.

Methodology and Approaches

The inversion method, used in this paper, is based on the inversion algorithm developed by Li and Oldenburg. As a result of inversion of gravity data, the geometry of source or anomaly and also density contrast between the anomaly and the background are determined. In the inversion algorithm used in this research, the earth is modeled using a large number of rectangular cells of constant density, and the final density distribution is obtained by minimizing a model objective function subject to fitting the observed data. The model objective function has the flexibility to incorporate prior information, and thus, the constructed model not only fits the data but also agrees with additional geophysical and geological constraints. A depth weighting is applied in the objective function to counteract the natural decay of the kernels so that the inversion yields depth information. Incorporating additional information to the process of inversion is the strength of this algorithm which can be done with different constraints such as smoothness, positivity, reference model and bounded model. Constrained modeling leads inversion towards the production of logical models and as a result, the validity and reliability of the final model will increase.

Results and Conclusions

For optimized use of the algorithm, at first, it has been tested on synthetic models in which the synthetic gravity data have been contaminated with noise. Then, according to the accommodation of the results with the right model, the algorithm has been used for inversion of real gravity data, acquired from Qom salt dome, and then, the final results have been visualized. The inversion results indicate that Qom salt dome has lengthened to the depth of at least 4500 meters beneath the earth surface.