

تخمین و مدل‌سازی سه‌بعدی ضخامت رسوبات روی پی‌سنگ به منظور اکتشاف ذخایر هیدروکربن با استفاده از داده‌های ژئوفیزیکی منطقه جنوبی هلند

یاسر دهبان^۱، علی نجاتی کلاته^{۱*}، محمد رضایی^۲ و محمود میرزایی^۳

۱- دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، ایران

۲- دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ملایر، ایران

۳- دانشکده علوم، دانشگاه اراک، ایران

تاریخ دریافت: ۹۷/۴/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۷/۱۰/۲۹

چکیده

گرانی‌سنجی در شناسایی ساختارهای مستعد زمین‌شناسی برای تشکیل و ذخیره‌سازی مواد هیدروکربوری کاربرد زیادی دارد. که می‌توان به کمک گرانی‌سنجی گنبد‌های نمکی، چین‌خوردگی تاقدیسی، بالآمدگی‌های گنبدی شکل را شناسایی کرد. در این مقاله از مدل‌سازی وارون غیرخطی داده‌های گرانی‌سنجی جهت تعیین هندسه سنگ بستر استفاده می‌شود. در فرآیند مدل‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی، یک سنگ بستر عموماً به‌وسیله یک‌سری منشورهای کنار هم چیده شده تقریب زده می‌شود و سپس ضخامت آن‌ها محاسبه می‌شود. به‌منظور نشان دادن کارایی روش، درک چگونگی کارایی روش و جزئیات مربوط به آن، ابتدا مدل‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی بدون نوفه و نوفه‌دار صورت گرفت. در پایان مدل‌سازی روی داده‌های گرانی‌سنجی منطقه جنوبی کشور هلند انجام گرفت که نتایج به‌دست آمده با نتایج در پایان‌نامه میرزایی مطابقت خوبی دارند. کلیه برنامه‌های مورد استفاده در این مقاله توسط نگارندگان در محیط نرم‌افزار MATLAB تهیه شده است.

کلمات کلیدی: گرانی‌سنجی، سنگ‌بستر، مدل‌سازی، غیرخطی، ذخایر هیدروکربن

مقدمه

با استفاده از داده‌های گرانی‌سنجی مشاهده‌شده و اطلاعات زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه است. در وارون‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی با دو مسئله اساسی یعنی عدم یکتایی جواب‌ها و ناپایداری آن‌ها مواجه هستیم که با استفاده از اطلاعات اولیه مانند

هدف از وارون‌سازی داده‌های گرانی‌سنجی، تخمین پارامترهایی نظیر چگالی و هندسه جسم زیرسطحی

*مسئول مکاتبات
آدرس الکترونیکی
شناسه دیجیتال: (DOI: 10.22078/pr.2019.3398.2557) nejati@shahroodut.ac.ir

شوند. برای رسیدن به این هدف بیشتر از روش‌های گرادیان استفاده می‌شود ولی اگر در یک مسئله وارون‌سازی تعداد داده‌ها و پارامترهای مدل زیاد باشد این مسئله می‌تواند از روش زیرفضا حل شود که وارون‌سازی داده‌ها در یک فضای کوچک‌تر داده‌ها یا پارامترهای مدل صورت خواهد گرفت که در نتیجه، وارون‌سازی ماتریس‌ها با شرایط پایدارتری صورت خواهد گرفت [۱۳].

در این مقاله روش زیر فضا در وارون‌سازی داده‌های گرانی مصنوعی و واقعی مورد استفاده قرار می‌گیرد، این روش به دلیل قابلیت پایداری در برابر نوفه، روش مناسبی برای مدل‌سازی معکوس داده‌های ژئوفیزیکی که دارای درصد نوفه زیادی هستند به‌شمار می‌رود. در این روش می‌توان هم‌زمان دولایه را مدل‌سازی کرد. نوآوری مقاله این است که با انتخاب بردارهای پایه مناسب دولایه را هم‌زمان مدل‌سازی کنیم. این روش علاوه بر اینکه با انتخاب بردارهای پایه مناسب امکان مدل‌سازی دو لایه با یک دسته داده را به ما می‌دهد در مقابل نوفه پایداری بسیار زیادی دارد. این وارون‌سازی به‌منظور تعیین عمق رسوبات یا سنگ‌بستر مورد نظر صورت گرفته است. در این روش هندسه سنگ‌بستر با مجموعه‌ای از منشورهای کنار هم چیده شده تقریب زده می‌شود و در نهایت طول این منشورها عمق سنگ‌بستر را نشان می‌دهند.

روش شناسی

در مدل‌سازی با سه مفهوم کلی داده، پارامتر و مدل سروکار داریم. منظور از داده همان مقادیر گرانی که به وسیله دستگاه گرانی‌سنجی اندازه‌گیری شده است. منظور از پارامتر، چگالی یا هندسه زیرسطحی است که باید تخمین زده شود. مدل رابطه هندسی بین داده‌ها و پارامترها هست که ماتریس به کرنل معروف است و با رابطه زیر نمایش داده می‌شود [۷].

زمین‌شناسی، عمق تخمینی و اختلاف چگالی می‌توان جواب‌ها را محدود کرد. یکی از کاربردهای روش وارون‌سازی غیرخطی داده‌های گرانی‌سنجی، تخمین ویژگی‌های سنگ‌بستر حوضه‌های رسوبی است [۱-۳]. حوضه‌های رسوبی به‌عنوان یکی از مکان‌های مستعد وجود منابع هیدروکربنی همیشه مورد توجه بوده‌اند و مطالعه هندسه سنگ‌بستر این حوضه‌ها همواره از اهمیت خاصی برخوردار بوده است. سنگ‌بستر که یک اختلاف چگالی با سنگ‌های رسوبی روی خود دارد یکی از اهداف مهم در پروژه‌های نفتی و عمرانی که به‌راحتی می‌توان توسط همین اختلاف چگالی که با رسوبات روی خود دارد توسط روش گرانی‌سنجی شناسایی و مورد مطالعه قرار بگیرد. از جمله مطالعات انجام‌شده می‌توان به محاسبه امتداد سنگ‌بستر در اکتشافات نفت و گاز برای یافتن محل تله‌های چینه‌شناسی [۴]، مطالعات هیدروژئولوژی برای شناسایی ساختارهای آب زیرزمینی [۵-۶]، مطالعه یخچال‌ها و بررسی میزان ذوب‌شدگی آن‌ها [۷-۹] اشاره کرد. متولی و همکاران [۱۰] و متشرعی و همکاران [۱۱] با استفاده از روش گرانی‌سنجی در منطقه جنوب زاگرس و نجاتی و همکاران [۱۲] با استفاده از روش مارکوارت-لونیبرگ در منطقه مغان به مطالعه و مدل‌سازی سنگ‌بستر پرداختند.

مسائل وارون به دو دسته مسائل وارون خطی و غیرخطی تقسیم می‌شوند. در مسائل وارون غیرخطی رابطه‌ای غیرخطی میان مقادیر مشاهده‌ای و پارامترهای مدل وجود دارد. برای حل مسائل وارون غیرخطی، استفاده از یک بسط خطی در همسایگی یک مدل مرجع استفاده می‌شود. در هر تکرار، از مدل به‌روز شده بعد از اعمال تغییراتی که از تکرار قبل به‌دست آمده است، در حکم مدل مرجع استفاده می‌کنیم. این روند را تا زمانی که به هم‌گرایی مطلوب برسیم ادامه می‌دهیم. بیشتر مسائل وارون غیرخطی می‌توانند براساس تعیین نقطه کمینه که تابع هدف در فضای برداری تعریف

پارامترهای مدل ضخامت هر بلوک است و جهت انجام وارون سازی غیرخطی بایستی مشتق گیری نسبت به پارامترهای مدل انجام شود بنابراین با توجه به این که پارامترهای مدل در این مسئله عمق یا ضخامت بلوکها است بنابراین مشتق گیری از رابطه ۲ نسبت به Z صورت می گیرد که نتیجه آن به صورت رابطه زیر است [۱۴].

$$\frac{\partial g}{\partial z_k} = \gamma \rho \sum \sum \left[\tan^{-1} \frac{x_i y_j}{z_k R_{ijk}} - \frac{x_i y_j z_k (R_{ijk}^2 + z_k^2)}{R_{ijk} ((z_k R_{ijk})^2 + (x_i y_j)^2)} - \frac{x_i z_k}{R_{ijk} (R_{ijk} + y_j)} - \frac{z_k y_j}{R_{ijk} (R_{ijk} + x_i)} \right] \quad (3)$$

برای حل مسائل وارون سازی غیرخطی می توان یک تابع هدف را دقیقه کرد که این تابع هدف وابسته به داده های مشاهده ای شده و داده های پیش بینی شده است و به صورت رابطه ۴ تعریف می شود [۱۵].

$$\phi(x) = \frac{1}{2} \phi_d(x) + \frac{\alpha}{2} \phi_x(x) \quad (4)$$

در صورتی که تابع $\phi(x)$ یک تابع هموار برای پارامترهای مدل باشد، می توان با استفاده از تقریب درجه دوم از تابع هدف و بسط تیلور محدود شده برای این تابع روابط زیر را نوشت [۱۶].

$$\phi(x + \delta x) = \phi(x) + \gamma^T \delta x + \frac{1}{2} \delta x^T H x \quad (5)$$

در رابطه ۵؛ γ بردار گرادیان و H ماتریس هسین هستند؛ که با استفاده از روابط زیر محاسبه می شوند [۱۵]. علامت T علامت ترانپوز می باشد.

$$\gamma = -G^T (d_0 - d(x)) \quad (6)$$

$$H = G^T G + \alpha I - \nabla_x G^T (d_0 - d(x)) \quad (7)$$

$$G_{ij} = \frac{\partial d_i(x)}{\partial x_j} \quad (8)$$

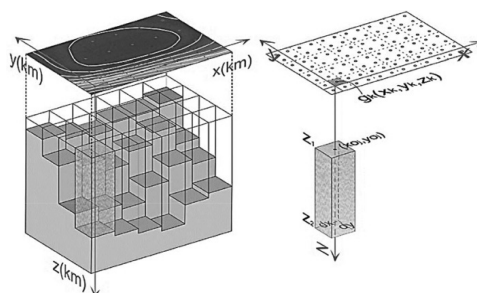
$$\bar{d} = \overline{Gx} \quad (1)$$

در رابطه (۱)، d بردار داده ها، x بردار پارامترهای مدل و G ماتریس کرنل است. مدل جمع منشوری سه بعدی که توسط پلوف [۱۴] معرفی شد یکی از پرکاربردترین مدل های هندسی ریاضی برای مدل سازی سه بعدی سنگ بستر است. در این مدل زیر زمین به صورت منشورهای مستطیل شکل در نظر گرفته می شوند. ابعاد این منشورها ثابت و فقط عمق منشورها متغیر هستند. در وارون سازی غیرخطی خصوصیات فیزیکی ثابت و فقط خصوصیات هندسی متغیر هستند. بنابراین در انجام مدل سازی سه بعدی داده های گرانی سنجی از این مدل استفاده شده است. مدل سه بعدی حوضه رسوبی در شکل ۱ آمده است. با توجه به این شکل به منظور تشکیل ساختار مورد نظر بلوک های راست گوشه در یک سیستم مختصات کارتزین با محور z رو به پایین مشخص می شوند. ابعاد افقی بلوک های مکعبی برابر با ابعاد شبکه بندی است. مؤلفه قائم جاذبه گرانش ناشی از بلوک های سه بعدی راست گوشه آنچه گرانی سنج اندازه می گیرد به صورت زیر تعریف می شود [۱۴]:

$$g = \gamma \rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \left[z_k \tan^{-1} \frac{x_i y_j}{z_k R_{ijk}} - x_i \ln(R_{ijk} + y_j) - y_j \ln(R_{ijk} + x_i) \right] \quad (2)$$

در رابطه بالا γ ثابت جهانی گرانش، ρ چگالی هر بلوک، $R_{ijk} = \sqrt{x_i^2 + y_j^2 + z_k^2}$ و $s = s_i + s_j + s_k$ که $s_1 = -1$ و $s_2 = +1$ است.

با توجه به اینکه در این مسئله وارون سازی



شکل ۱ مدل سه بعدی حوضه رسوبی [۳]

انتخاب پارامتر منظم‌سازی

انتخاب مقدار مناسب پارامتر منظم‌سازی، یکی از مسائل مهم در روش‌های منظم‌سازی، از جمله روش تیخونوف، است [۱۹-۲۰]. روش‌های متعددی برای انتخاب پارامتر منظم‌سازی در مسائل وارون‌سازی غیرخطی داده‌های ژئوفیزیکی وجود دارد که این روش‌ها تحت شرایط مختلف امکان دارد جواب مطلوب و نامطلوبی بدهند [۲۱]. پارامتر منظم‌سازی است که پارامتر متعادل‌ساز نیز نامیده می‌شود. در رابطه ۴ این پارامتر وزن نسبی بین تابع عدم برآزش و تابع ثابت‌ساز را کنترل می‌کند. اگر α به صفر میل کند، تابعی که حداقل می‌شود فقط شامل عدم برآزش خواهد بود. در نتیجه مدل به‌دست‌آمده، به‌گونه‌ای ساخته می‌شود که داده‌های حاصل از مدل کاملاً بر داده‌های مشاهده‌ای برآزش پیدا کند. اگر مقدار α بزرگ انتخاب شود، مقدار تابع عدم برآزش کوچک خواهد شد و فقط تابع ثابت‌ساز حداقل می‌شود. کمینه کردن هر دو مقدار تابع عدم برآزش و تابع ثابت‌ساز برای حل مسئله وارون لازم است و در واقع نقش پارامتر منظم‌سازی متعادل کردن اهمیت نسبی بین دو تابع عدم برآزش و تابع ثابت‌ساز است [۲۲]. پارامتر منظم‌سازی باید به‌گونه‌ای انتخاب شود که اختلاف بین داده‌های مشاهده‌ای و داده‌های حاصل از مدل ساخته‌شده با توجه به نوفه موجود در داده‌های مشاهده‌ای، قابل توجه باشد [۲۰]. بنابراین می‌توان گفت که هدف اصلی از تعیین پارامتر منظم‌سازی تعیین مقدار عدم برآزش مناسب در وارون‌سازی داده‌ها است [۲۲].

وارون‌سازی داده‌های مصنوعی

به‌منظور نشان دادن کارایی روش، درک چگونگی کارایی روش و جزئیات مربوط به آن، به مدل‌سازی داده‌های بدون نوفه و نوفه‌دار گرانی‌سنجی می‌پردازیم.

G_{ij} ماتریس ژاکوبین است که با روش‌های عددی قابل محاسبه است. در رابطه ۷ مقدار $\nabla_x G^T$ وابستگی غیرخطی داده‌ها و پارامترهای مدل را بیان می‌کند و در مقایسه با عبارت اول رابطه ۷ مقدار قابل توجهی نیست، بنابراین در محاسبه ماتریس H قابل صرف‌نظر کردن است [۱۷].

با ترکیب روابط بالا مقدار تغییرات پارامترهای مدل در هر تکرار (δx) با استفاده از رابطه ۹ قابل محاسبه است [۱۷].

$$\delta x = -V (V^T H V)^{-1} V^T \gamma \quad (9)$$

در هر تکرار مقدار تغییرات پارامتر مدل با استفاده از رابطه ۹ محاسبه‌شده و بر روی مدل اولیه اعمال می‌شود و یک مدل جدید به‌دست می‌آید، این مدل جدید به‌عنوان مدل اولیه در تکرار بعدی در نظر گرفته می‌شود و تکرارها تا زمانی که مدل به یک هم‌گرایی مطلوب برسد ادامه می‌یابد.

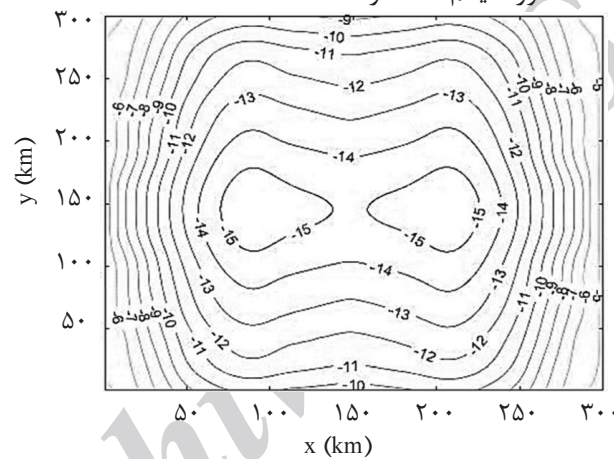
انتخاب بردارهای پایه

در هر تکرار تغییرات پارامترهای مدل با استفاده از کمینه‌سازی و تغییرات به‌دست می‌آید، بنابراین بردارهایی که در تغییرات این توابع در تکرارهای متوالی نقش اساسی دارند، بردارهای پایه V هستند. به‌منظور انتخاب بردارهای پایه از تفکیک تابع هدف و گرادبان‌های توابع تشکیل‌دهنده آن بهره گرفته می‌شود. بردارهای پایه (V) طوری انتخاب می‌شوند که به‌آسانی قابل محاسبه بوده و حاوی اطلاعاتی از هر دو فضای داده‌ها و پارامترهای مدل است. بردارهای ویژه از ماتریس مربعی و متقارن H که توسط روش تجزیه به مقادیر تکین (SVD) به‌دست می‌آیند به‌عنوان بردارهای پایه برای ساختن V انتخاب شده‌اند. بردارهای پایه V فقط برای یک‌بار از مدل اولیه ساخته می‌شوند و در طول وارون‌سازی ثابت در نظر گرفته می‌شوند از این‌رو بردارهای پایه تنها از تعداد محدودی از بردارهای ویژه که مربوط به بزرگ‌ترین مقادیر منفرد که بیش‌ترین اثر را روی داده‌های پیش‌بینی شده دارند انتخاب می‌شوند [۱۸].

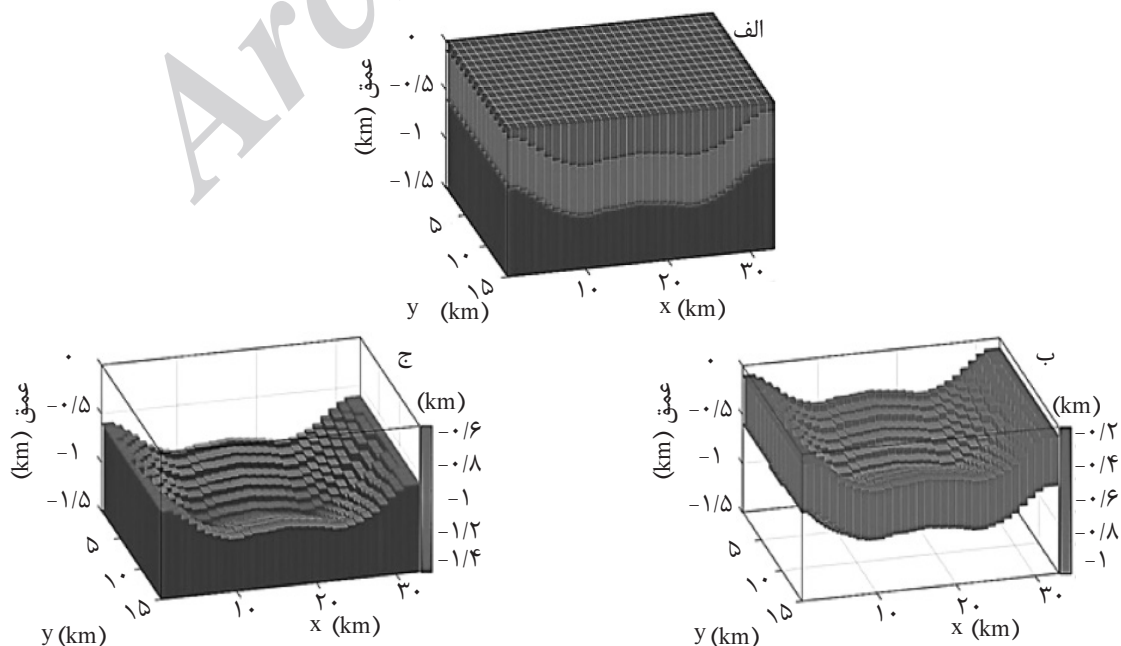
مدل مصنوعی بدون نوفه

پارامتر منظم‌سازی ۱۰۰ انتخاب شده است و در هر تکرار نصف مقدار پارامتر منظم‌سازی در تکرار قبل به‌عنوان پارامتر منظم‌سازی جدید در نظر گرفته می‌شود. در شکل ۲ داده‌های حاصل از مدل مصنوعی و در شکل ۳ مدل مصنوعی ساخته‌شده نشان داده‌شده است. نتایج وارون‌سازی این داده‌ها که بعد از ۹ تکرار به هم‌گرایی خوبی با مدل مصنوعی رسیده است، در شکل ۴ آورده شده است. در جدول ۱ میزان خطای RMS نمایش داده‌شده است که مقدار خطا در تکرار اول از ۲/۸۳۸۱ mGal به ۰/۰۰۱۹ mGal در تکرار نهم رسیده است.

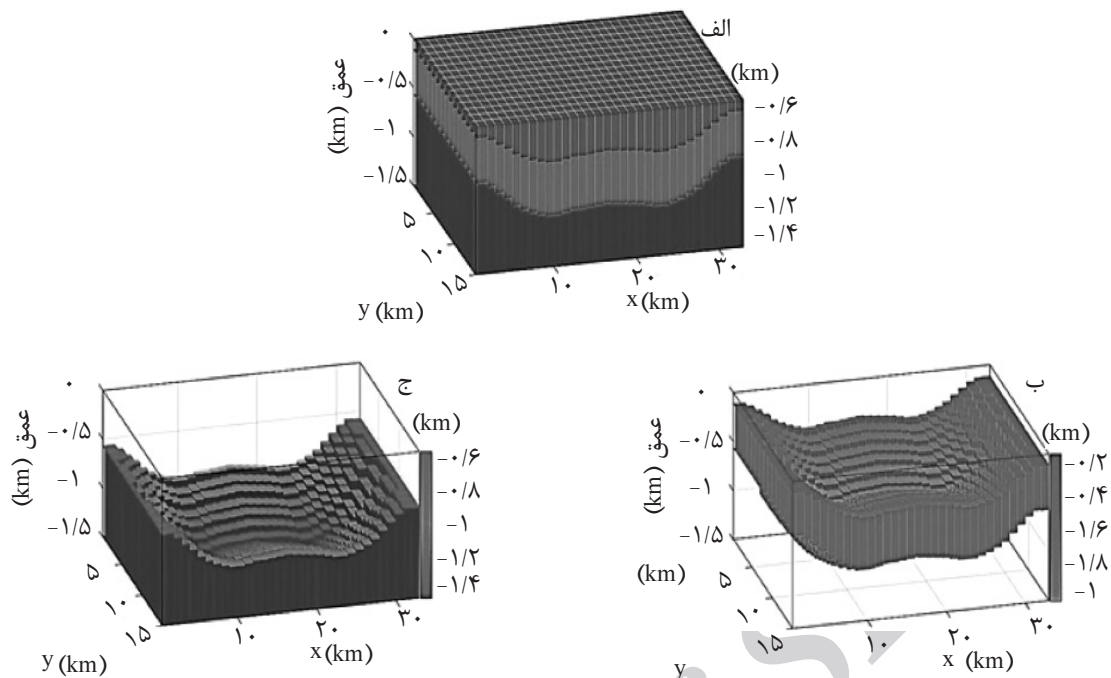
از آنجاکه در پیمایش‌های نفتی، فواصل نمونه‌برداری معمولاً در حد چند ۱۰۰ m هستند و لایه‌های نظیر سنگ‌بستر را باید در ابعادی چند هزار متر جستجو کرد، فواصل نمونه‌برداری را ۱۰۰۰ m در نظر گرفته‌ایم. بنابراین، در این قسمت برای آزمون روش وارون‌سازی از یک مدل مصنوعی دولایه‌ای با ابعاد $33000 \text{ m} \times 15000 \text{ m}$ و با تباین چگالی 0.2 g/cc ، برای لایه دوم و 0.4 g/cc ، برای لایه اول استفاده کرده‌ایم. برای به‌دست آوردن مدل اولیه، از رابطه بوت استفاده‌شده است و دولایه برای مدل اولیه با استفاده از داده‌های گرانی به‌دست آورده‌ایم. مقدار



شکل ۲ داده‌های حاصل از مدل مصنوعی با ۰٪ نوفه



شکل ۳ مدل مصنوعی سه‌بعدی داده‌شده به برنامه (الف) مدل سه لایه، (ب) مدل لایه دوم و (ج) مدل لایه سوم



شکل ۴ مدل سه‌بعدی حاصل از وارون‌سازی با ۰٪ نوفه (الف) مدل سه لایه، (ب) مدل لایه دوم و (ج) مدل لایه سوم

جدول ۱ خطای RMS برای ۹ تکرار متوالی با ۰٪ نوفه

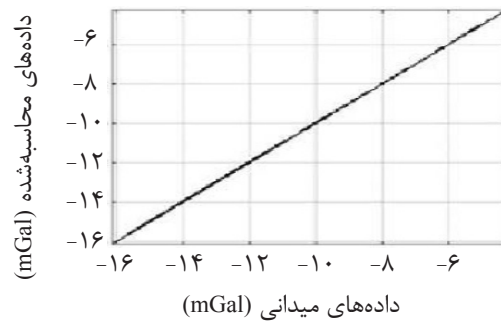
| تکرار | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| RMS | ۲/۸۳۸۱ | ۱/۶۰۰۳ | ۰/۸۷۶۴ | ۰/۳۳۷۷ | ۰/۱۲۷۵ | ۰/۰۴۳۶ | ۰/۰۱۴۲ | ۰/۰۰۴۸ | ۰/۰۰۱۹ |

در شکل ۵ برازش داده‌های اولیه حاصل از مدل مصنوعی و داده‌های محاسبه‌شده در فرآیند وارون‌سازی نمایش داده‌شده است که برازش بسیار خوبی با یکدیگر دارند. مدل مصنوعی همراه با نوفه این مدل مانند مدل مصنوعی بدون نوفه است با این تفاوت که به داده‌ها ۰.۵٪ نوفه اضافه کرده‌ایم. نوفه همراه با داده‌های ژئوفیزیکی به‌طور معمول توزیع گوسی یا عددی دارند، بر همین اساس یک منحنی با توزیع گوسی یا عددی با میانگین صفر در نظر می‌گیریم و با توجه به درصد نوفه به سیگنال واریانس منحنی گوسی تعیین می‌شود. بر همین اساس دامنه به‌دست‌آمده از این منحنی به‌صورت تصادفی به داده‌ها اضافه می‌شود. به داده‌های حاصل از مدل مصنوعی ۰.۵٪ نوفه اضافه‌شده است، داده‌های همراه با نوفه در شکل ۶ نمایش داده‌شده است. مقدار پارامتر منظم‌سازی

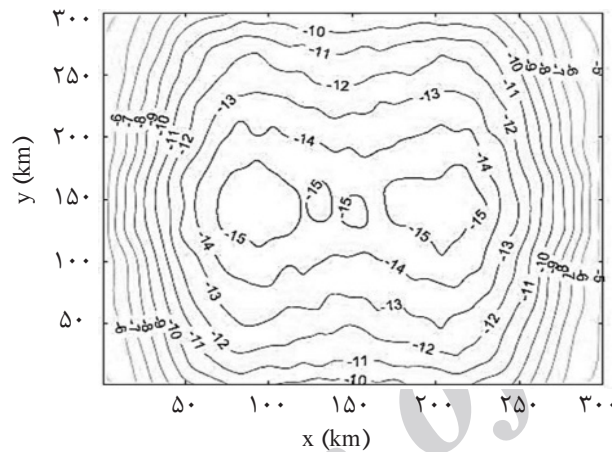
۱۰۰ انتخاب شده است و در هر تکرار نصف مقدار پارامتر منظم‌سازی در تکرار قبل به‌عنوان پارامتر منظم‌سازی جدید در نظر گرفته می‌شود. نتایج وارون‌سازی این داده‌ها که بعد از ۶ تکرار به هم‌گرایی خوبی با مدل مصنوعی رسیده است، در شکل ۷ آورده شده است. در جدول ۲ میزان خطای RMS نمایش داده‌شده است که مقدار خطا در تکرار اول از ۲/۸۴ mGal به ۰/۰۵۷۳ mGal در تکرار ششم رسیده است. در شکل ۸ برازش داده‌های اولیه حاصل از مدل مصنوعی با ۰.۵٪ نوفه و داده‌های محاسبه‌شده در فرآیند وارون‌سازی نمایش داده‌شده است که برازش بسیار خوبی با یکدیگر دارند. نتایج به‌دست‌آمده از وارون‌سازی داده‌های بدون نوفه و داده‌های همراه با نوفه تأییدکننده صحت الگوریتم و برنامه رایانه‌ای نوشته‌شده است.

مدل مصنوعی همراه با نوفه

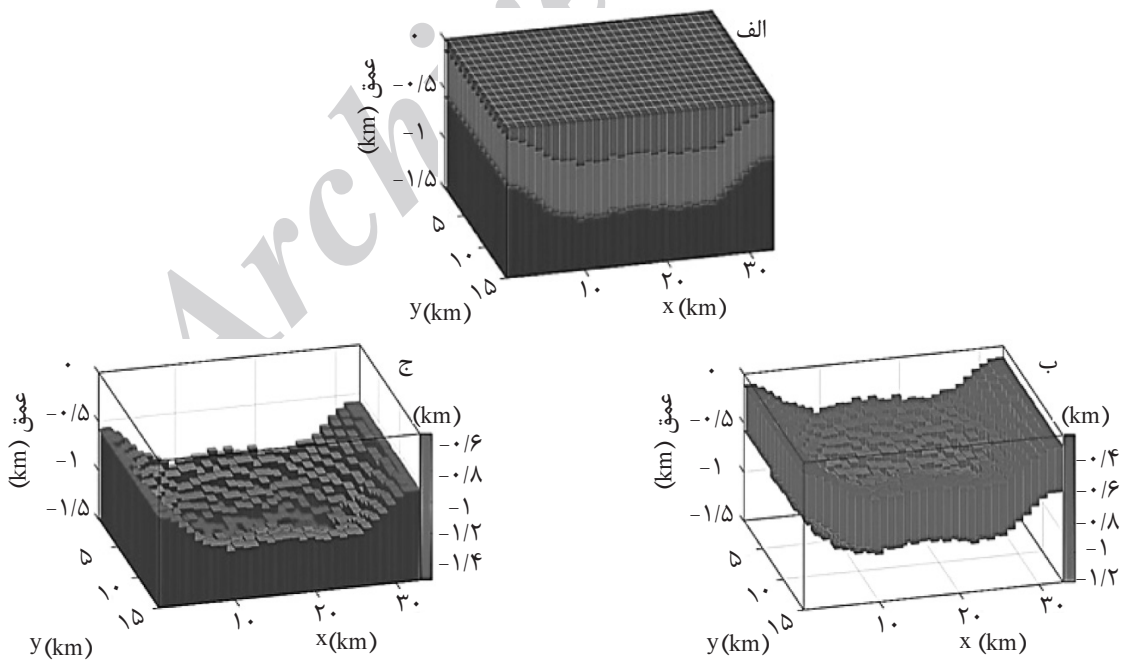
در شکل ۵ برازش داده‌های اولیه حاصل از مدل مصنوعی و داده‌های محاسبه‌شده در فرآیند وارون‌سازی نمایش داده‌شده است که برازش بسیار خوبی با یکدیگر دارند. مدل مصنوعی همراه با نوفه این مدل مانند مدل مصنوعی بدون نوفه است با این تفاوت که به داده‌ها ۰.۵٪ نوفه اضافه کرده‌ایم. نوفه همراه با داده‌های ژئوفیزیکی به‌طور معمول توزیع گوسی یا عددی دارند، بر همین اساس یک منحنی با توزیع گوسی یا عددی با میانگین صفر در نظر می‌گیریم و با توجه به درصد نوفه به سیگنال واریانس منحنی گوسی تعیین می‌شود. بر همین اساس دامنه به‌دست‌آمده از این منحنی به‌صورت تصادفی به داده‌ها اضافه می‌شود. به داده‌های حاصل از مدل مصنوعی ۰.۵٪ نوفه اضافه‌شده است، داده‌های همراه با نوفه در شکل ۶ نمایش داده‌شده است. مقدار پارامتر منظم‌سازی



شکل ۵ برآزش بین داده های اولیه و داده های محاسبه شده از وارون سازی با ۰٪ نوفه



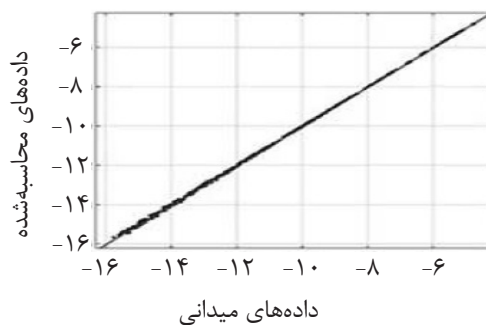
شکل ۶ داده های حاصل از مدل مصنوعی با ۵٪ نوفه



شکل ۷ مدل سه بعدی حاصل از وارون سازی با ۵٪ نوفه (الف) مدل سه لایه، (ب) مدل لایه دوم و (ج) مدل لایه سوم

جدول ۲ خطای RMS برای ۶ تکرار متوالی با ۵٪ نوفه

| | | | | | | |
|--------|-------|--------|--------|--------|------|-------|
| ۶ | ۵ | ۴ | ۳ | ۲ | ۱ | تکرار |
| ۰/۰۵۷۳ | ۰/۱۳۶ | ۰/۳۴۲۹ | ۰/۷۸۹۷ | ۱/۶۰۲۷ | ۲/۸۴ | RMS |



شکل ۸ برآزش بین داده‌های اولیه و داده‌های محاسبه‌شده از وارون‌سازی با ۵٪ نوفه

وارون‌سازی داده‌های واقعی

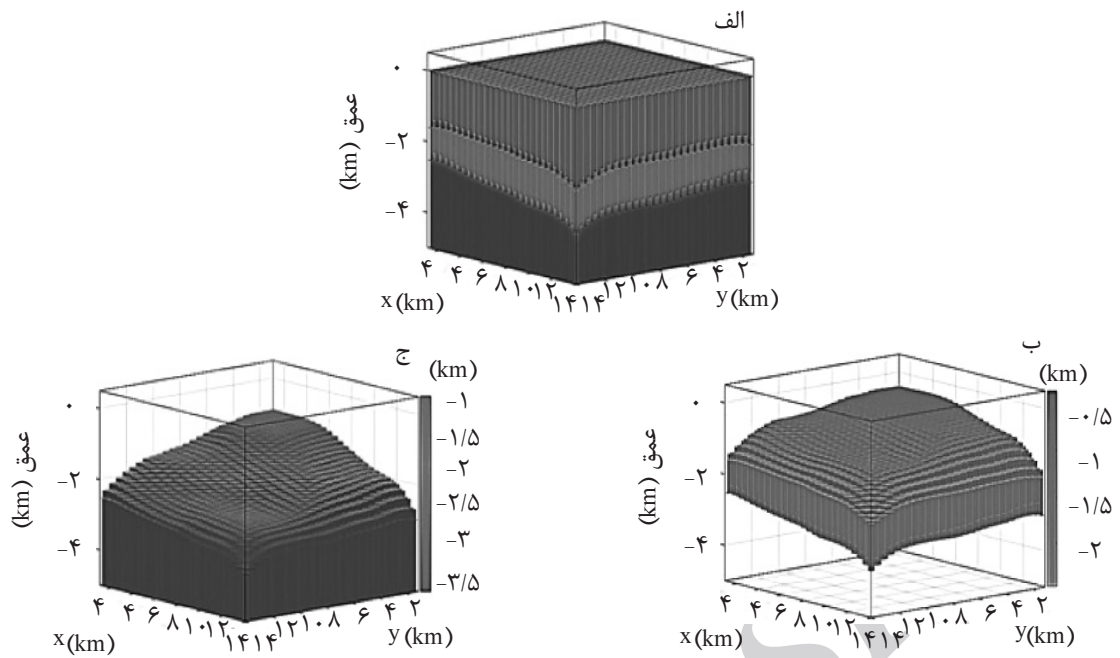
در این مقاله داده‌های گرانی‌سنجی مربوط به یک مخزن نفتی در جنوب کشور هلند که در لایه ماسه‌سنگی قرار دارد استفاده شده است. هدف از وارون‌سازی این داده‌ها مدل‌سازی عمق بالا و پایین این لایه که به‌وسیله داده‌های لرزه‌ای به‌خوبی حل نشده‌اند، است [۲۳]. نتایج وارون‌سازی این داده‌ها که بعد از ۵ تکرار به هم‌گرایی خوبی با داده‌های اولیه رسیده است، در شکل ۹ آورده شده است. این داده‌ها در یک شبکه منظم $14000 \text{ m} \times 14000 \text{ m}$ در ۲۷ نیم‌رخ و در هر نیم‌رخ ۲۷ نقطه نمونه‌برداری شده است، در شکل ۱۰ نمایش داده شده است. براساس اطلاعات لرزه‌ای موجود در منطقه چهار لایه شناسایی شده است:

- ۱- لایه‌ای با چگالی $2/1 \text{ g/cc}$ (Tertiary and Quaternary)
- ۲- لایه‌ای با چگالی $2/45 \text{ g/cc}$ (Upper Mesozoic)
- ۳- لایه‌ای با چگالی $2/54 \text{ g/cc}$ (Bunter formation)
- ۴- لایه‌ای با چگالی $2/67 \text{ g/cc}$ (Carboniferous) [۲۳]. اولین پارامتر موردنیاز برای ورود به برنامه اختلاف چگالی بین سنگ‌بستر و رسوبات بالای آن است. طبق اطلاعات به‌دست‌آمده از داده‌های لرزه‌نگاری و حفاری‌های موجود در منطقه اختلاف چگالی لایه‌ها، به‌عنوان ورودی برنامه برای لایه اول $0/212 \text{ g/cc}$ و برای لایه دوم $0/130 \text{ g/cc}$ در نظر گرفته می‌شود. مقدار پارامتر منظم‌سازی ۴۵ انتخاب شده است و در هر تکرار نصف مقدار پارامتر منظم‌سازی در تکرار قبل به‌عنوان پارامتر منظم‌سازی جدید در نظر گرفته می‌شود. در جدول ۳ میزان خطای RMS نمایش داده شده است که مقدار خطا در تکرار اول از $2/7132 \text{ mGal}$ به $1/4678 \text{ mGal}$ در تکرار پنجم رسیده است. در شکل ۱۱

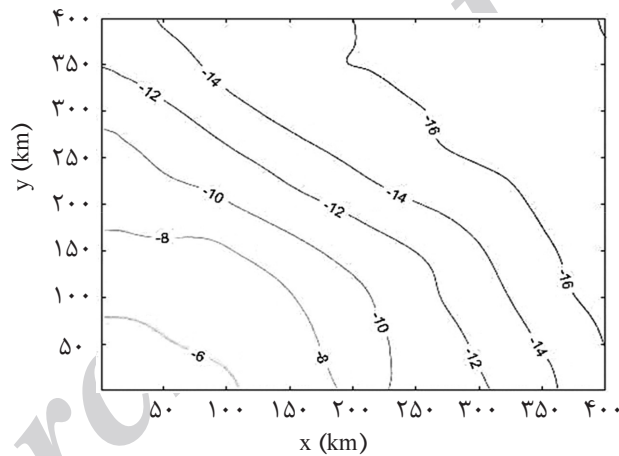
برآزش داده‌های اولیه و داده‌های محاسبه‌شده در فرآیند وارون‌سازی نمایش داده شده است که برآزش بسیار خوبی با یکدیگر دارند.

بحث و ارزیابی

در این روش می‌توان هم‌زمان دو لایه را مدل‌سازی کرد. یکی از دلایل استفاده کردن از روش زیر فضا این است که به ما این اجازه را می‌دهد که بردارهای پایه‌ای انتخاب کنیم که در لایه دوم اثر می‌کنند، اگر همه بردارهای پایه را انتخاب کنیم مدل ما هم‌گرا نمی‌شود. دلیل دیگر انتخاب روش زیر فضا این است که مسائل بزرگ‌مقیاس را حل کند، اما دلیل اصلی آن این است که ما بتوانیم هم‌زمان دو لایه را با یک دسته داده مدل‌سازی کنیم. نوآوری مقاله این است که با انتخاب بردارهای پایه مناسب دو لایه را هم‌زمان مدل‌سازی کنیم. این روش علاوه بر اینکه با انتخاب بردارهای پایه مناسب امکان مدل‌سازی دو لایه با یک دسته داده را به ما می‌دهد در مقابل نوفه پایداری بسیار زیادی دارد. مقایسه نتایج به‌دست‌آمده از وارون‌سازی داده‌های بدون نوفه و داده‌های همراه با نوفه و مقایسه نتایج مدل‌سازی و اطلاعات لرزه‌نگاری استفاده شده توسط میرزایی [۲۳] که در شکل ۱۲ آورده شده است و نتایج حاصل از مدل‌سازی انجام گرفته شده توسط الگوریتم نوشته شده می‌توان صحت الگوریتم و برنامه نوشته شده را تایید کرد.



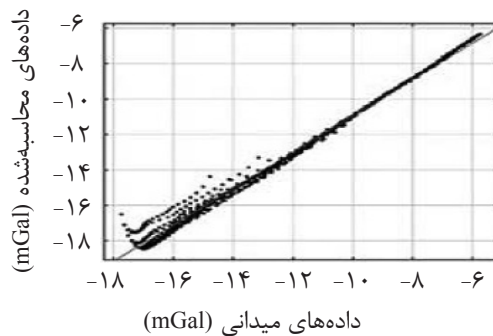
شکل ۹ مدل سه بعدی حاصل از وارون سازی داده های منطقه مورد مطالعه. الف) مدل سه لایه، ب) مدل لایه دوم و ج) مدل لایه سوم



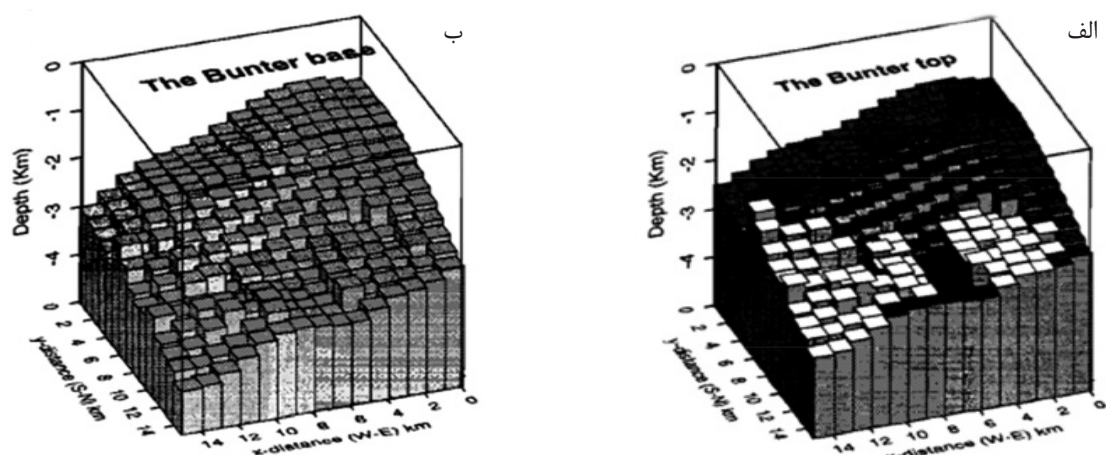
شکل ۱۰ داده های نمونه برداری شده منطقه مورد مطالعه

جدول ۳ خطای RMS برای ۵ تکرار متوالی

| تکرار | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ |
|-------|--------|--------|--------|--------|--------|
| RMS | ۲/۷۱۳۲ | ۲/۴۸۸۸ | ۲/۱۶۴۷ | ۱/۷۹۱۵ | ۱/۴۶۷۸ |



شکل ۱۱ برازش بین داده های منطقه مورد مطالعه و داده های محاسبه شده از وارون سازی



شکل ۱۲ الف) مدل سه‌بعدی لایه دوم (قسمت سفید رنگ نتایج حاصل از اطلاعات لرزه‌نگاری) و ب) مدل سه‌بعدی لایه سوم [۲۳]

بردارهای پایه‌ای انتخاب کنیم که در لایه دوم اثر می‌کنند و اگر همه بردارهای پایه را انتخاب کنیم مدل ما هم‌گرا نمی‌شود. این روش بدون استفاده از داده‌های کمکی و با یک نوع داده می‌توان هم‌زمان دو لایه را مدل‌سازی کرد. در این الگوریتم به‌خاطر استفاده از بردارهای پایه ابعاد ماتریس حساسیت (H) کوچک‌تر شده و در نتیجه ابعاد ماتریس معکوس کوچک‌تر می‌شود، به همین خاطر سرعت مدل‌سازی افزایش می‌یابد.

در شکل ۱۲- الف نتایج حاصل از لرزه‌نگاری در منطقه مورد مطالعه آورده شده است که عمق لایه به‌درستی محاسبه نشده است. در شکل ۹ نتایج مدل‌سازی نشان‌دهنده این است که الگوریتم و برنامه نوشته شده عمق لایه را به‌خوبی تعیین کرده است که با نتایج حاصل از مدل‌سازی میرزایی [۲۳] هم‌خوانی دارد.

نتیجه‌گیری

روش زیر فضا به ما این اجازه را می‌دهد که

مراجع

- [1]. Barbosa V. C. F., Silva J. B. and Medeiros W. E., "Gravity inversion of basement relief using approximate equality constraints on depths," *Geophysics*, Vol. 62, No. 6, 1745-1757, 1997.
- [2]. Blakely R. J., "Potential theory in gravity and magnetic applications," Cambridge university press, 1996.
- [3]. Chakravarthi V. and Sundararajan N., "3D gravity inversion of basement relief—A depth-dependent density approach," *Geophysics*, Vol. 72, No. 2, pp. 123-132, 2007.
- [4]. Silva J. B., Oliveira A. S. and Barbosa V. C., "Gravity inversion of 2D basement relief using entropic regularization," *Geophysics*, Vol. 75, No. 3, pp. 129-135, 2010.
- [5]. Adema G. W., Breckenridge R. M. and Sprenke K. F., "Gravity, morphology, and bedrock depth of the rathdrum prairie, idaho," Idaho Geological Survey, 2007.
- [6]. Bohidar R. N., Sullivan J. P. and Hermance J. F., "Delineating depth to bedrock beneath shallow unconfined aquifers: a gravity transect across the Palmer river basin," *Groundwater*, Vol. 39, No. 5, pp. 729-736, 2001.
- [7]. Kimmel R. M., "Gravimetric ice thickness determination, South cascade glacier, washington," Northwest

Science, Vol 44, No 3, pp. 147-153, 1970.

[8]. Stern T. A., "Gravity survey of the Taylor glacier, Victoria land, Antarctica," Antarctic Research Centre, Victoria University of Wellington, 1978.

[9]. Venteris E. and Miller M., "Gravitational profiles on the Taku glacier system," Glaciological and Arctic Sciences Institute, University of Idaho, Open File Report, 1993.

[۱۰]. متشرعی آ. و زمردیان ح.، "تعیین عمق سنگ‌بستر با استفاده از روش گرانی‌سنجی در منطقه جنوب زاگرس"، مجله ژئوفیزیک ایران، جلد ۱، شماره ۱۰، صفحات ۶۱-۶۹، ۱۳۸۶.

[۱۱]. متولی عنبران س. ه.، ابراهیم‌زاده اردستانی و.، "تعیین عمق سنگ‌بستر با استفاده از وارون‌سازی غیرخطی دوبعدی داده‌های گرانی‌سنجی"، مجله فیزیک زمین و فضا، دوره ۳۴، شماره ۳، صفحات ۱-۱۹، ۱۳۸۶.

[۱۲]. نجاتی کلاته ع.، ابراهیم‌زاده اردستانی و.، متولی عنبران س. ه.، قمی ش. و جوان ا.، "مدل‌سازی وارون دوبعدی غیرخطی داده‌های گرانی‌سنجی منطقه مغان با استفاده از روش مارکوارت-لونیبرگ"، مجله علوم زمین، دوره ۷۴، شماره ۱۹، صفحات ۱۳-۲۰، ۱۳۸۸.

[13]. Kennett B. L. N. and Williamson P. R., "Subspace methods for large-scale nonlinear inversion," In Mathematical Geophysics, pp. 139-154, Springer, Dordrecht, 1988.

[14]. Plouff D., "Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections," Geophysics, Vol. 41, No. 4, pp. 727-741, 1976.

[15]. Lelievre P. G. and Oldenburg D. W., "Magnetic forward modelling and inversion for high susceptibility," Geophysical Journal International, Vol. 166, No. 1, pp. 76-90, 2006.

[16]. Sambridge M. S., "Non-linear arrival time inversion: constraining velocity anomalies by seeking smooth models in 3-D," Geophysical Journal International, Vol. 102, No. 3, pp. 653-677, 1990.

[17]. Wang Y. and Houseman G. A., "Inversion of reflection seismic amplitude data for interface geometry," Geophysical Journal International, Vol. 117, No. 1, pp. 92-110, 1994.

[18]. Mirzaei M. and Bredewout J. W., "3-D Microgravity data inversion for detecting cavities," Eur. J. Environ. Eng. Geophys, Vol. 1, No. 3, pp. 249-270, 1996.

[19]. Li Y. and Oldenburg D. W., "3-D inversion of gravity data," Geophysics, Vol. 63, No. 1, pp. 109-119, 1998.

[20]. Farquharson C. G. and Oldenburg D. W., "A comparison of automatic techniques for estimating the regularization parameter in non-linear inverse problems," Geophysical Journal International, Vol. 156, No. 3, pp. 411-425, 2004.

[21]. Hansen P. C., "Discrete inverse problems: insight and algorithms," Vol. 7, Siam, 2010.

[22]. Oldenburg D. W. and Li Y., "Inversion for applied geophysics: A tutorial," I. Investigations in Geophysics, Vol. 13, pp. 89-150, 2005.

[23]. Mirzaei M., "Inversion of potential field data: theory and applications in gravimetry and magnetometry," Faculteit Aardwetenschappen, 1996.