

وارون‌سازی دوبعدی داده‌های گرانی با تعریف نقطه یا امتدادی از بی‌هنجاری زیرسطحی

بهنام مهدی اوغلی لاهرودی و وحید ابراهیم‌زاده اردستانی*

موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۲/۱، تاریخ پذیرش: ۱۳۹۳/۸/۱۸)

چکیده

با توجه به گسترش روش‌های گوناگون مدل‌سازی وارون، کاربران به دنبال روش‌هایی هستند که بتوانند اولاً مدل‌های پیچیده زمین‌شناسی را مدل‌سازی کنند، ثانیاً نحوه پردازش مدل‌سازی طوری باشد که کاربر در کمترین زمان بتواند مدل موردنظر را بیابد و نیازی به کار خسته‌کننده آزمون و خطا نباشد. سعی ما در این مقاله تحقق این دو مورد در برگردان داده‌های گرانی حاصل از منابع دوبعدی گرانشی با کمک گرفتن از اطلاعات کاربر است. در واقع روشی برای برآورد موقعیت و هندسه بی‌هنجاری‌هایی با چند چگالی که میدان گرانشی پیچیده‌ای را ایجاد می‌کنند، مورد بررسی قرار می‌گیرد. کاربر نقاط و پاره‌خط‌هایی از موقعیت تقریبی بی‌هنجاری تعریف می‌کند و چگالی تقریبی به آن نقاط و پاره‌خط‌ها نسبت می‌دهد و با این روش منابعی را که به این فرضیات نزدیک‌ترند، برآورد می‌کند (نگارندگان این الگوریتم را در محیط مت‌آلب (MATLAB) نوشته‌اند).

واژه‌های کلیدی: مدل‌سازی وارون دوبعدی، نقاط و پاره‌خط‌ها، هندسه و تباین چگالی، گرانی‌سنجی

Two-dimensional inversion of gravity data by defining primary points or strikes of an underground anomaly

Behnam Mahdioghli Lahroodi and Vahid Ebrahmzadeh Ardestani*

Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 21 April 2013, accepted: 9 November 2014)

Summary

Considering the development of different methods of modeling, the geophysicists are looking for methods that firstly can model the complex geological structures and secondly they are not time consuming. In this study, we aimed to model the gravity anomalies by defining the prior information. We studied a different method for interpreting 2D gravity anomalies produced by multiple and complex gravity sources separated from each other by short distances. This is an approach combining the best features of the automatic

*Corresponding author:

ebrahimz@ut.ac.ir

* نگارنده رابط:

inversion and forward modeling. The assumed interpretation model is a grid of 2D prisms placed side by side; the density contrasts of this grid are the parameters to be determined. The interpreter designates the outlines of the gravity sources in terms of geometric elements (line segments and points) and the density contrast associated with the geometric elements defining each gravity source structure (this amounts to specifying the supposed density contrast for each source). The method then estimates the density-contrast distribution that fits the observed anomaly within the measurement errors and represents compact gravity sources closest to the specified geometric elements. The user can either accept the interpretation or adjust the gravity-source structure, changing the position of the geometric elements and/or the density contrast associated with each of the elements and begin the inversion once again. In fact, we estimate the geometrical shape of the underground anomalies. The interpreter defines some initial points and line segments with predefined density contrasts and then the modeling process estimates the final shape and density contrasts in the surrounding of the points and line segments. A computer code in MATLAB was written for these targets by the authors.

The advantage of this method was to hold the data fit by the user. This capability helps the user consider the noise existing in the data to achieve a more acceptable model. This was shown for synthetic models. Also, the method was tested on simple and complex synthetic models in two states, i.e. without noise and with random noise. Another advantage of this method was the ability of the inversion of complex geometric models and the lack of sensitivity of the method to points and line segments placed as the prior information given.

Method's practical application was shown by applying it to two sets of gravity data from different geologic settings. (1) Modeling a karstic cavity in the Havasan region in Ilam Province, Iran; (2) Modeling a Barite ore body in the Abadeh region in Fars Province, Iran. A Scintrex CG3 gravimeter with a sensitivity of 5 microGal was used for micro-gravity observations in the selected areas. Station altitudes were measured with a total station model Leica Tc 407 with an accuracy of 1-5mm in horizontal and vertical coordinates. The residual gravity grids were obtained using the Geosoft software.

For both regions, the forward modeling method was done. Then the inversion method (the method used in this study) was applied to the gravity data and compared with the forward modeling method. Indeed, this inversion method offered a better data fit and more acceptable model. When the user has information about approximate anomaly locations and density contrast, this method is one of the best choices for the 2D gravity modeling.

Keywords: 2D inversion, primary points and strikes, shape and density contrasts, gravity

۱ مقدمه

(۲۰۰۰)، اکیسی (۲۰۰۸) اشاره کرد که برتری این روش‌ها در برازش مناسب نتیجه با داده‌های گرانی است. اما از جمله ضعف‌های این روش‌ها این است که در مواردی که هندسه بی‌هنجاری پیچیده می‌شود، هندسه بی‌هنجاری را به‌دقت به‌دست نمی‌دهند و از طرفی برای وارد کردن اطلاعات اولیه همه اطلاعات زمین‌شناسی باید به شکل ریاضی در آورده و به‌طور خودکار روش تلفیق

در زمینه مدل‌سازی داده‌های گرانی روش‌های زیادی عرضه شده است که می‌توان آنها را به دو دسته خودکار و غیرخودکار (دستی) تقسیم کرد. می‌توان گفت همه وارون‌سازی‌ها از دسته خودکار هستند؛ برای مثال می‌توان به روش‌های عرضه شده گویلن و مینچتی (۱۹۸۴)، لوی (۱۹۹۴)، لی و الدنبرگ (۱۹۹۸)، سیلوا و همکاران

درواقع این روش ترکیب وارون‌سازی خودکار و مدل‌سازی دستی است.

۲ الگوریتم وارون‌سازی

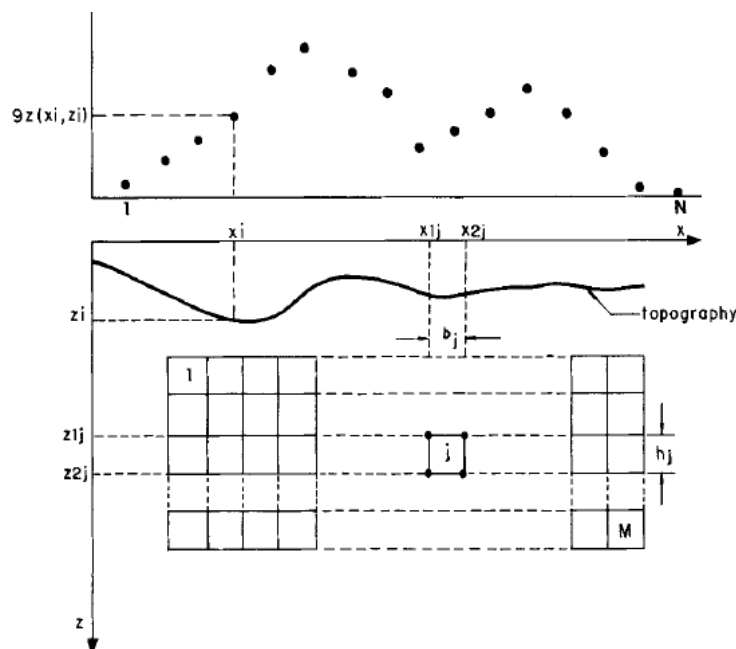
ابتدا سطح مقطع برشی منطقه موردنظر را به منشورهای مستطیلی شبکه‌بندی می‌کنیم که طول و عرض این مستطیل‌ها با توجه به فاصله برداشت‌ها و هندسه و اندازه بی‌هنجاری به شکل بهینه‌ای انتخاب می‌شود؛ به نحوی که اگر تعداد کل منشورها M تا و تعداد برداشت‌ها N تا باشد داریم:

$$g_i = \sum_{j=1}^M \rho_j a_{ij}, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (1)$$

که ρ_j تباین چگالی ژأمین منشور است و a_{ij} معادل بی‌هنجاری گرانشی حاصل از منشور j ام با تباین چگالی واحد در x_i است و می‌توان آن را طبق رابطه (۲) محاسبه کرد (باربسا و سیلوا، ۱۹۹۴):

شود، یعنی کاربر نظارت مستقیم بر روش ندارد. در مدل‌سازی‌های غیرخودکار یا دستی با تغییر دستی پارامترهای مدل سعی بر برازش اثر مدل با داده‌ها است. برای مثال می‌توان به ابوت و لویی (۲۰۰۰)، گراچ و همکاران (۲۰۰۱) اشاره کرد. در این نوع مدل‌سازی محدودیتی در پیچیدگی چشمه گرانی نداریم ولی یکی از مشکلات این روش سختی فاحش آن در به‌دست آوردن برازش معقول با مشاهدات است. اگر به برازش هم برسیم ممکن است حل با زمین‌شناسی تطابق نداشته باشد مگر اینکه قیده‌های کافی دیگری در دسترس باشد تا انتخاب‌ها را محدود کند.

لیکن در روش عرضه شده سیلوا و باربوسا (۲۰۰۶) با وارد کردن نقطه و یا پاره‌خطهایی که حدس می‌زنیم بی‌هنجاری در آن نقاط یا پاره‌خطها وجود دارد، نظارت مستقیم روی وارون‌سازی داریم و می‌توانیم بی‌هنجاری‌های با هندسه پیچیده را مدل‌سازی کنیم.



شکل ۱. میدان گرانش در N نقطه در بالا و نمایشی از M منشور و مختصات گوشه‌هایش در پایین (باربسا و سیلوا، ۱۹۹۴).

$$\phi(\rho) = (g - A\rho)^T (g - A\rho) + \lambda(\rho - \rho_0)^T w (\rho - \rho_0), \quad (5)$$

برای کمینه کردن رابطه (۵) از ϕ نسبت به ρ مشتق می‌گیریم و برابر صفر قرار می‌دهیم و با کمی محاسبات ماتریسی و در نظر گرفتن تکرار، به رابطه زیر می‌رسیم:

$$\Delta\rho^{(k)} = \mathbf{W}_{(k)}^{-1} \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{W}_{(k)}^{-1} \mathbf{A}^T + \lambda \mathbf{I})^{-1} (\mathbf{g} - \mathbf{A} \hat{\rho}_F^{(k)}), \quad (6)$$

در گام اول با در نظر گرفتن $\mathbf{W} = \mathbf{I}$ یک حداقل معیار استاندارد برای چگالی محاسبه می‌کنیم و داریم (سیلوا و باربسا، ۲۰۰۶):

$$\hat{\rho}^o = \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{A}^T + \lambda \mathbf{I})^{-1} \mathbf{g}, \quad (7)$$

که T عملگر ترانهاده، \mathbf{I} ماتریس یکه و λ یک اسکالر غیرمنفی است. هرچه مقادیر λ بزرگ‌تر باشد، نرم اقلیدسی $\hat{\rho}^o$ کوچک‌تر می‌شود و هرچه λ بزرگ‌تر باشد منابع گرانشی برآورد شده به المان‌های هندسی نزدیک‌تر خواهند بود. از طرف دیگر این پارامتر مسئول کنترل پایداری جواب‌ها است و هرچه λ بزرگ‌تر باشد، جواب پایداری دارد. پس مقدار بهینه این پارامتر کوچک‌ترین مقدار مثبتی است که جواب‌های پایداری هم تولید کند. ولی اگر مفسر اعتماد زیادی به شکل اجمالی فرضی خود از منابع گرانی داشته باشد، مقدار λ باید بزرگ‌ترین مقدار مثبت که هنوز برازش قابل قبول با داده‌ها دارد، باشد.

سپس با عمل تکرار برآورد را بهتر می‌کنیم:

$$\hat{\rho}^{(k+1)} = \hat{\rho}_F^{(k)} + \Delta\rho^{(k)}, \quad (8)$$

که:

$$\Delta\rho^{(k)} = \mathbf{W}_{(k)}^{-1} \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{W}_{(k)}^{-1} \mathbf{A}^T + \lambda \mathbf{I})^{-1} (\mathbf{g} - \mathbf{A} \hat{\rho}_F^{(k)}), \quad (9)$$

$$a_{ij} = G \left[A \log \frac{A^2 + D^2}{A^2 + C^2} - B \log \frac{B^2 + D^2}{B^2 + C^2} + 2D \left(\tan^{-1} \frac{A}{D} - \tan^{-1} \frac{B}{D} \right) - 2C \left(\tan^{-1} \frac{A}{C} - \tan^{-1} \frac{B}{C} \right) \right] \quad (2)$$

$i=1, 2, \dots, N, \quad j=1, 2, \dots, M,$

و

$$A = x_i - x_{1j}, B = x_i - x_{2j}, C = z_i - z_{1j}, D = z_i - z_{2j}$$

که G ثابت جهانی گرانش و $x_{1j}, x_{2j}, z_{1j}, z_{2j}$ مختصات گوشه‌های منشور λ_m است که در شکل ۱ نشان داده شده است.

حالت برداری رابطه (۱) به این شکل است:

$$\mathbf{g} = \mathbf{A} \rho, \quad (3)$$

در اینجا \mathbf{g} برداری $1 \times N$ است که N آمین عنصر آن \mathbf{g}_i ، ماتریسی $M \times N$ است با عنصرهای a_{ij} و ρ برداری $1 \times M$ با مولفه‌های ρ_j است. در مسائل وارون خطی ترکیبی با فرض موجود بودن اطلاعات اولیه روی شاخص‌های مدل، تابع هدف به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\phi(m) = e^T e + \lambda (m^{est} - \langle m \rangle)^T w_m (m^{est} - \langle m \rangle), \quad (4)$$

در اینجا شاخص‌های مدل (m) تباین چگالی است و می‌توان آن را با ρ و m^{est} را با ρ_0 نشان داد. بردار خطا (e) را هم می‌توان به شکل $\mathbf{g} - \mathbf{A} \rho$ نوشت و چون یک ماتریس وزنی داریم (ماتریس وزنی خطا نداریم) w_m را با w نشان می‌دهیم. با این اوصاف تابع هدف را به شکل‌های زیر می‌توان نوشت:

$$\phi(\rho) = \|\mathbf{g} - \mathbf{A} \rho\|_2^2 + \lambda \left\| w^{\frac{1}{2}} (\rho - \rho_0) \right\|_2^2$$

[0] بیفتد عنصر $\hat{\rho}_F^{(k)}$ با مرز نقض شده (v_j یا 0) جایگزین می شود و برای وزن متناظر w_{jj} یک مقدار به نسبت بزرگ (f) تعیین می شود تا برآورد تباین چگالی در این سلول (در مرز نقض شده) حداقل موقتاً بدون تغییر باشد و هرچه مقدار f بزرگ تر باشد به سمت حفظ برآورد تباین چگالی، بدون تغییر در طول تکرارها میل می کند و اگر برآورد $\hat{\rho}_j^{(k)}$ در داخل این مرزها قرار گرفت عنصر $\hat{\rho}_F^{(k)}$ تغییر نمی کند (یعنی مساوی با $\hat{\rho}_j^{(k)}$ است) و وزن متناظر، با همان معادله (۱۰) محاسبه می شود.

در عمل نیاز به افزایش مقدار f زمانی لازم است که منابع گرانش برآورد شده در تکرارهای پایانی تباین چگالی بیشینه را تقریباً ثابت و بزرگ تر از (از نظر اندازه) تباین چگالی هدف نمایش دهند. از طرف دیگر اگر در طول تکرار همگرایی به تباین چگالی تعیین شده به طور یکنواخت صورت گیرد، ممکن است مقادیر قابل قبول برای f با چندین مرتبه بزرگی متفاوت باشد بدون اینکه تغییرات محسوسی در نتیجه نهایی حاصل شود.

غیرخطی بودن ماتریس $\mathbf{W}^{(k)}$ نشان می دهد که مسئله برگردان گرانی، غیرخطی است و باید به روش تکرار حل شود. برای شروع تقریبی نه چندان دقیق برای ρ لازم است. به همین منظور با قرار دادن $w_{jj}=1$ برای تکرار در معادله (۹) مقداردهی اولیه صورت می گیرد، اما پاسخ نهایی به این تقریب حساس نیست و هر مقداردهی اولیه ای برای w_{jj} به طور نظری امکان پذیر است. در عمل اگر مقادیر تعیین شده برای اندیس های مختلف w_{jj} با چندین مرتبه بزرگی متفاوت باشند ممکن است یک سری مسائل عددی رخ دهد. تکرار وقتی متوقف می شود که (سیلوا و باربسا، ۲۰۰۶):

$$\hat{\rho}_j^{(k)} \leq (1 + \tau) v_j, \quad j=1, 2, \dots, M \quad (12)$$

$\mathbf{W}^{(k)}$ یک ماتریس قطری است که ضریب تصحیح $\Delta \rho^{(k)}$ را در هر تکرار کنترل می کند. سلول های نزدیک به المان های هندسی و دارای تباین چگالی بزرگ، چون در تکرارهای قبل، وزن کوچکی دارند تصحیحات متناظرشان بزرگ خواهد بود و سلول های دور از همه المان های هندسی و دارای تباین چگالی کوچک چون در تکرارهای قبل وزن بزرگی داشته اند بنابراین تصحیحات متناظرشان کوچک خواهد بود. به این ترتیب جواب ها به شکل توده ای در نزدیکی المان های هندسی خواهند بود و عنصرهای غیر صفر $\mathbf{W}^{(k)}$ به شکل زیر تعریف می شوند (سیلوا و باربسا، ۲۰۰۶):

$$w_{jj} = \frac{d_j^2}{|\hat{\rho}_j^{(k)}| + \varepsilon}, \quad (10)$$

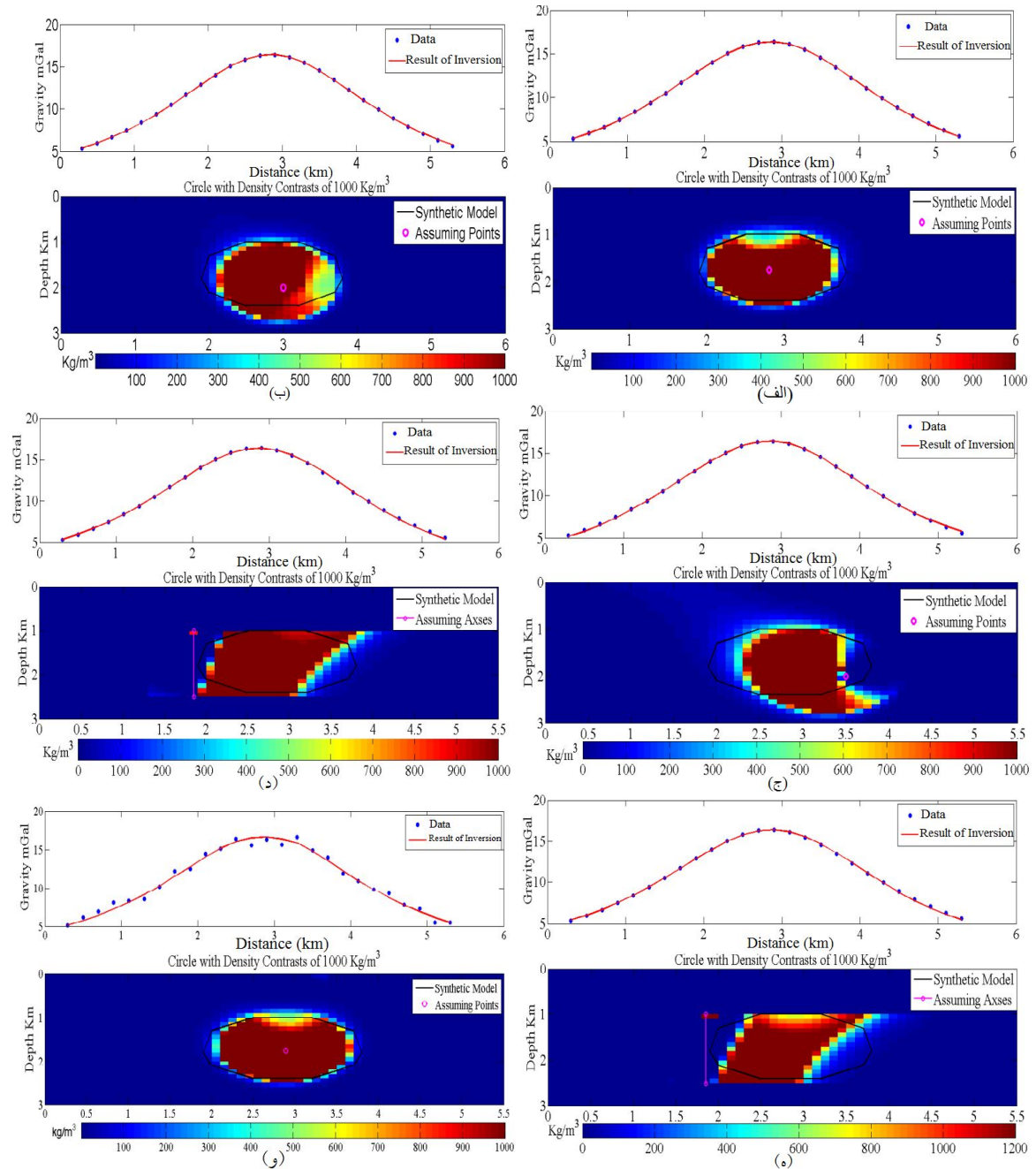
و

$$d_j = \min_{1 < i < L} d_{ij}, \quad (11)$$

که ε یک عدد کوچک مثبت از مرتبه 10^{-7} است و d_{ij} فاصله از مرکز منشور ابتدایی $\hat{\rho}_F^{(k)}$ تا المان هندسی $\hat{\rho}_F^{(k)}$ است. عنصرهای بردار $\hat{\rho}_F^{(k)}$ ، یا عنصرهای بردار $\hat{\rho}^{(k)}$ است و یا پارامترهای بدون تغییر هستند. برای تعیین عنصرهای $\hat{\rho}_F^{(k)}$ و برای اینکه جواب هایی که به دست می آوریم از نظر زمین شناسی معنادار باشد و همه چگالی روی نقاط و پاره خط های فرضی نیفتد، بردار M بُعدی v را تعریف می کنیم که عنصر v_j آن تباین چگالی هدف است که اگر تصویر سلول $\hat{\rho}_F^{(k)}$ روی امتداد پاره خط فرضی خارج از پاره خط مربوطه بیفتد به جای v_j صفر می نشیند؛ در غیر این صورت مقدار آن، مقدار تباین چگالی نسبت داده شده به نزدیک ترین المان هندسی خواهد بود. اگر در تکرار k ام برآورد $\hat{\rho}_j^{(k)}$ برای تباین چگالی مثبت بیرون بازه $[0, v_j]$ و یا برای تباین چگالی منفی بیرون بازه $[v_j,$

بزرگ‌تر باشد، همگنی بیشتر است و مقدار معمول برای این پارامتر مطابق با یک منبع با واریانس تباین چگالی

و τ یک کمیت زنده‌ای مثبت است که درجه همگنی را برای منابع گرانی برآورد شده کنترل می‌کند. هرچه τ



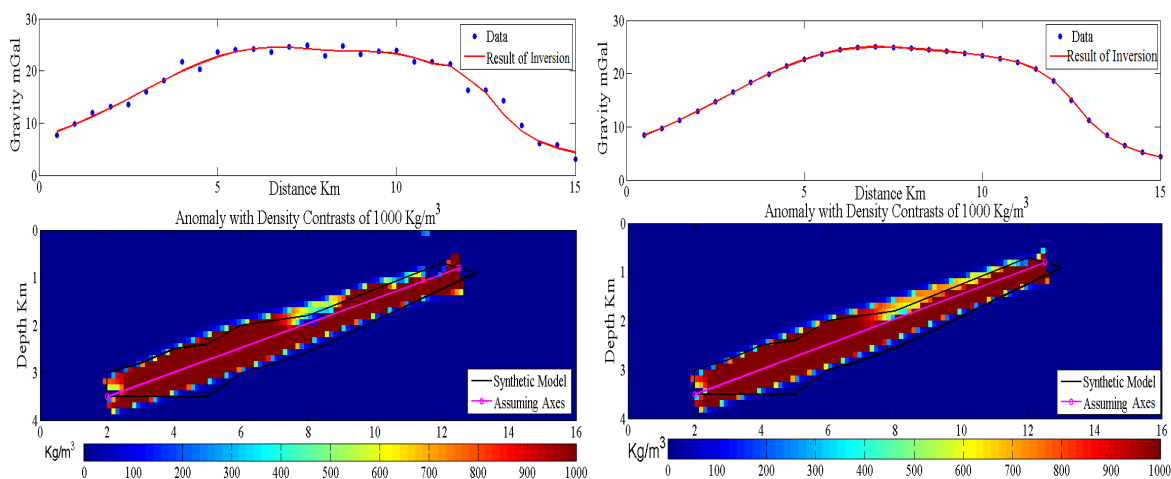
شکل ۲. برازش داده با نتیجه وارون‌سازی در بالای هر شکل، مدل (محیط مدل با خطوط مشکی)، نقاط و پاره‌خط‌های فرضی درحکم اطلاعات اولیه (دایره و پاره‌خط‌های بنفش‌رنگ) و نتیجه وارون‌سازی برای تباین چگالی در پایین هر شکل نشان داده شده است که اطلاعات اولیه در (الف) نقطه‌ای در مرکز مدل، (ب) نقطه‌ای به فاصله ۲۰۰ متر در جهت نیم‌رخ و ۲۵۰ متر در جهت عمق از مرکز مدل، (ج) نقطه‌ای به فاصله ۷۰۰ متر در جهت نیم‌رخ و ۲۵۰ متر در جهت عمق از مرکز مدل، (د) پاره‌خطی به فاصله یک کیلومتر از مرکز مدل و خارج از مدل و نسبت دادن چگالی $1/2 \text{ g/cm}^3$ (یعنی ۲۰ درصد خطا در برآورد چگالی)، و (و) نتیجه وارون‌سازی با اعمال ۸ درصد نوفه به داده را نشان می‌دهد.

وارون‌سازی یک مدل ۱۰ ضلعی با چگالی 1000 kg/m^3 داریم که با دادن اطلاعات اولیه متفاوت، حساسیت روش به انتخاب مکان نقاط و پاره‌خط‌های فرضی و چگالی نسبت داده شده به آنها را مورد بررسی قرار می‌دهیم. در همه موارد شکل ۲، $\lambda = 0.1$ ، $f = 50000$ و $\tau = 0.1$ انتخاب می‌شود و در همه موارد ریشه میانگین مربعات (RMS) تفاضل داده‌های حاصل از مدل و داده‌های حاصل از وارون‌سازی از مرتبه 10^{-2} mGal یا کمتر است. همان‌طور که در شکل ۲-ه می‌بینیم با اینکه پاره‌خط

کمتر یا مساوی با ۰.۱٪ تباین چگالی هدف، ۰/۰۱ است. معیار توقف تنها مبتنی بر تباین چگالی برآورد شده است. ارزش بالقوه روش در عرضه نتایجی پایدار و معنادار از نظر زمین‌شناسی است که سعی می‌کنیم آن را روی داده‌های مصنوعی یا واقعی نشان دهیم.

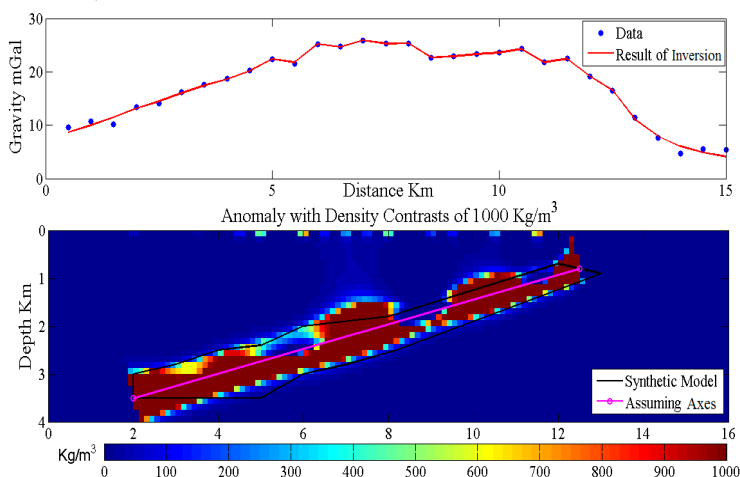
۳ مدل‌های مصنوعی

ابتدا به بررسی مدلی ساده برای نشان دادن حساسیت روش به اطلاعات اولیه می‌پردازیم. در شکل ۲ نتیجه



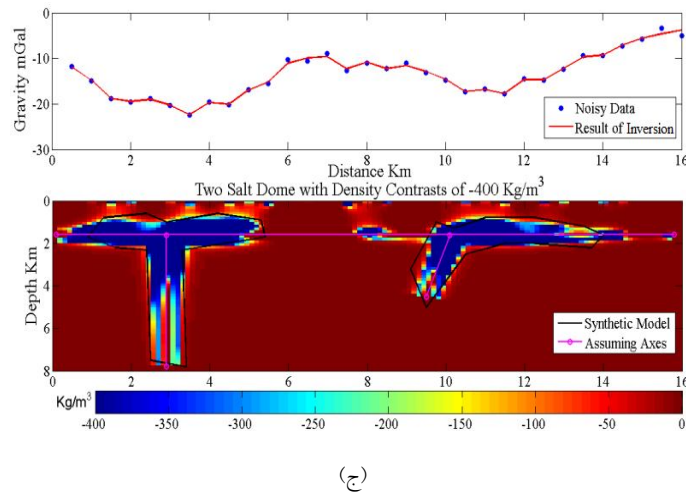
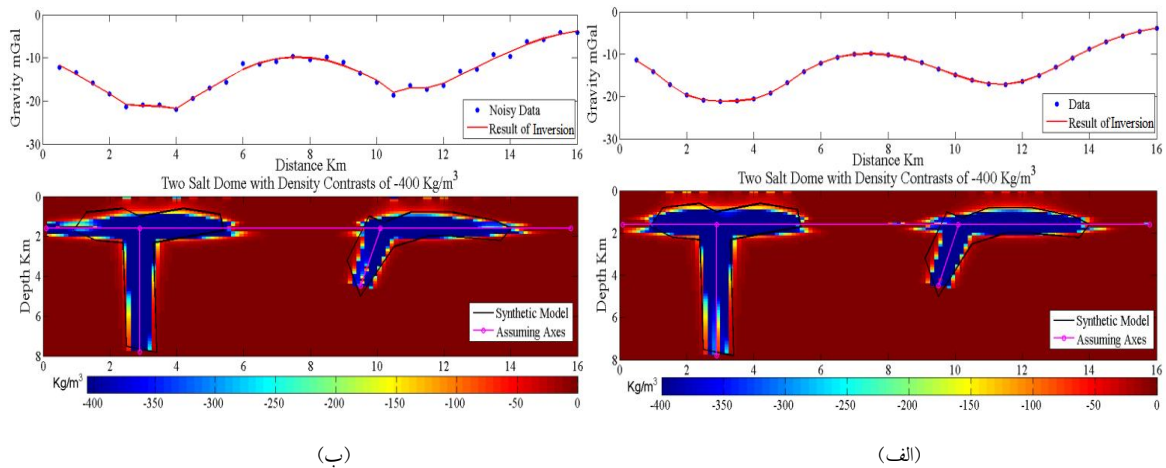
(ب)

(الف)



(ج)

شکل ۳. بی‌هنجاری با تباین چگالی 1 g/cm^3 در (الف) داده بدون نوفه و $\lambda = 0.2$ ، (ب) RMS بی‌هنجاری برای $\lambda = 0.2$ برابر 0.2 mGal و (ج) برای $\lambda = 0.07$ برابر 0.1 mGal است.



شکل ۴. دو گنبد نمکی در کنار هم با تباین چگالی g/cm^3 -0.4 که در (الف) داده بدون نوفه، $\lambda = 0.2$ و $RMS = 0.07$ mGal، (ب) داده آغشته به ۷ درصد نوفه، $\lambda = 0.2$ و $RMS = 0.3$ mGal و (ج) داده آغشته به ۷ درصد نوفه، $\lambda = 0.1$ و $RMS = 0.1$ mGal است.

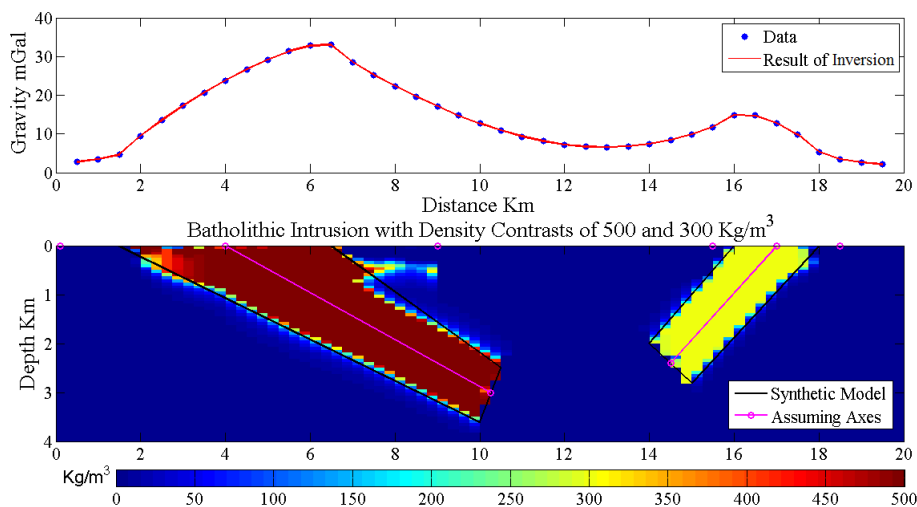
داده با λ های متفاوت برای داده‌ای با ۷ درصد نوفه را بررسی کنیم. در هر سه شکل ۳، ۴ و ۶ در وارون‌سازی همان‌طور که در شکل‌های ۳ و ۴ می‌بینید برازش داده برای λ کوچک‌تر بهتر است ولی نتیجه وارون‌سازی در برآورد هندسه بی‌هنجاری برای λ بزرگ‌تر، بهتر است. پس در این روش در مواقعی که به اطلاعات اولیه اعتماد داریم باید به دنبال بزرگ‌ترین λ که هنوز برازش مناسبی با داده‌ها ایجاد می‌کند، باشیم.

فرضی یک کیلومتر از مرکز مدل فاصله دارد و خارج از مدل است و ۲۰ درصد خطا در چگالی برآورد شده وجود دارد، این روش نتیجه قابل قبولی به دست داده است. برای اثبات کارایی روش در بی‌هنجاری‌های با هندسه پیچیده از مدل‌هایی با هندسه پیچیده استفاده می‌کنیم؛ برای مثال می‌توان به شکل‌های ۳ و ۴ اشاره کرد که در این موارد با انتخاب λ های متفاوت می‌خواهیم تأثیر انتخاب λ در RMS تفاضل داده‌های حاصل از مدل و داده‌های حاصل از وارون‌سازی و نحوه برازش این دو

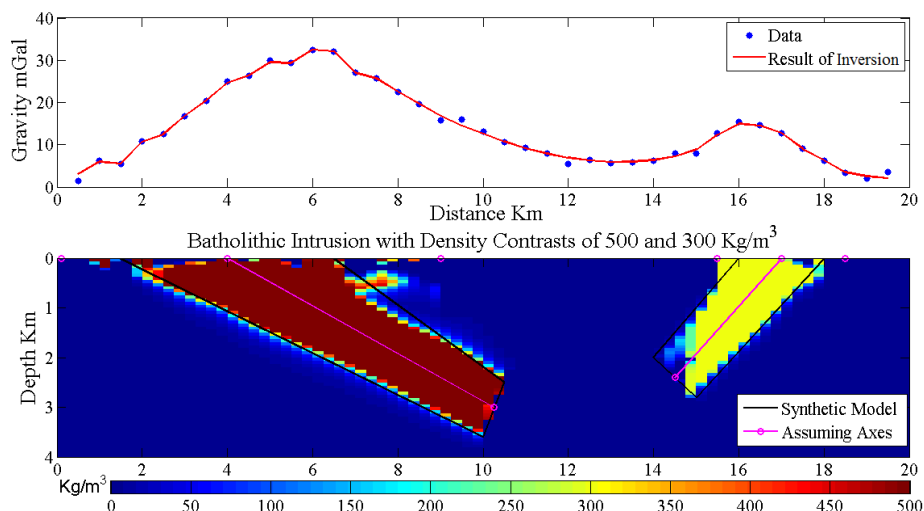
۴ داده‌های واقعی

در این بخش از دو مجموعه داده تصحیح‌یافته گرانی استفاده شده است. برداشت داده‌ها را بخش گرانی‌سنجی موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران به انجام رسانده است. در ابتدا از داده واقعی استفاده شده است که مربوط به بررسی‌های میکروگرانی‌سنجی برای احداث سد مخزنی

حال به بررسی چند بی‌هنجاری با تباین چگالی متفاوت در کنار هم می‌پردازیم. همان‌طور که در شکل ۵ نتیجه وارون‌سازی برای دو دایک با تباین چگالی متفاوت را می‌بینید. این روش برای چند بی‌هنجاری در کنار هم نیز نتایج مناسبی به دست می‌دهد.



(الف)



(ب)

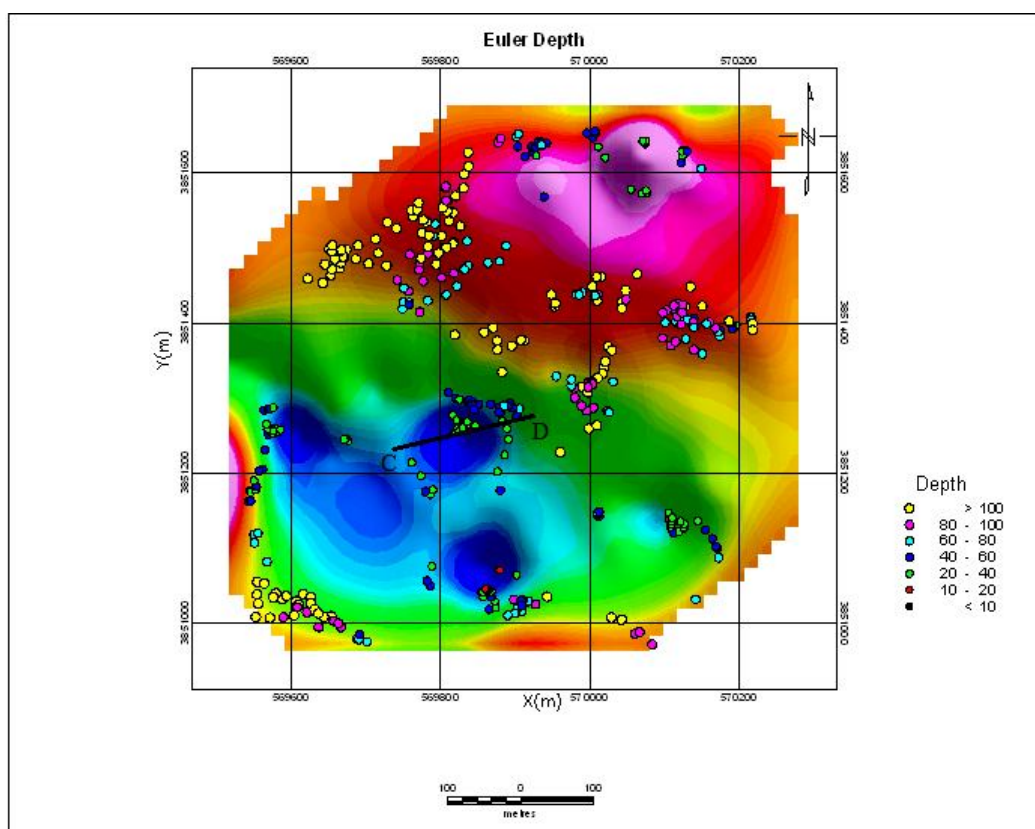
شکل ۵. دو دایک با تباین چگالی 0.3 g/cm^3 و 0.5 g/cm^3 و با در نظر گرفتن $\lambda = 0.1$ که در (الف) داده بدون نوفه و $\text{RMS} = 0.016 \text{ mGal}$ و در (ب) داده آغشته به ۷ درصد نوفه و $\text{RMS} = 0.2 \text{ mGal}$ است.

خاکستری و آهک بلورین مقاوم نازک تا ضخیم لایه تشکیل شده که سازند تله‌زنگ در وسط هوازده است. در شکل ۶ نقشه بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده جایگاه هواسان را داریم که عمق‌های اوپلر هم روی آن نشان داده شده است. با استفاده از روش مدل‌سازی پیشرو (روش عرضه شده گدی (۱۹۸۰)) در محل نیم‌رخ CD مقطعی دو بُعدی برای حفزه کارستی که در زمینه‌ای آهکی به‌وجود آمده است، تهیه شد. در شکل ۷-الف نتیجه مدل‌سازی پیشرو دیده می‌شود.

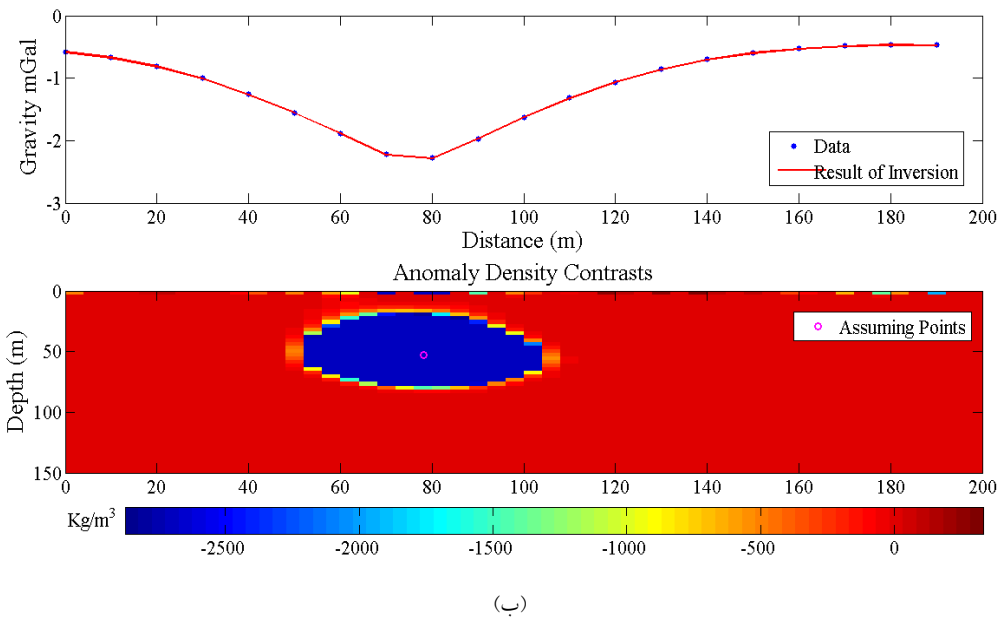
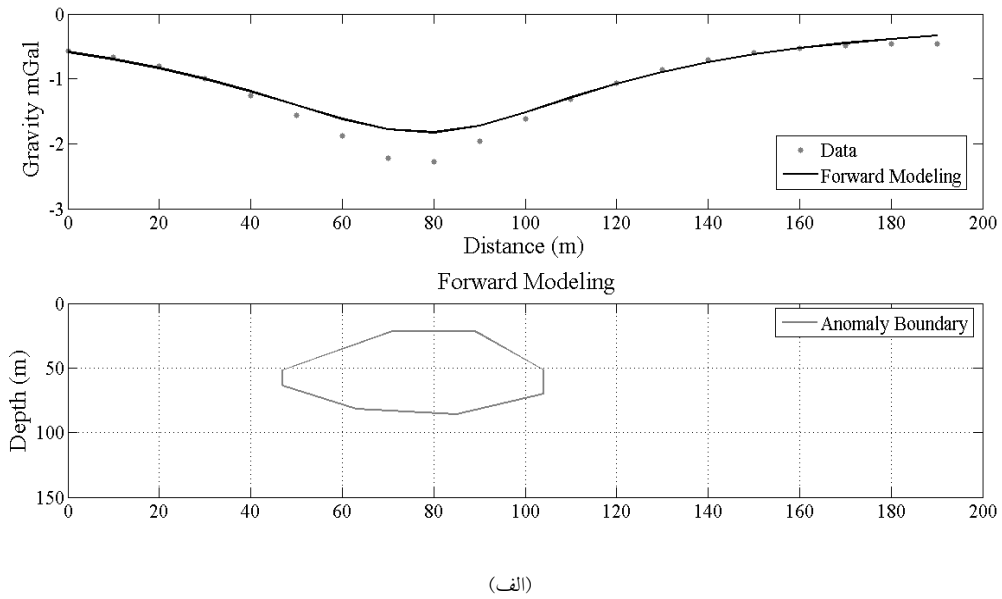
بعد از مدل‌سازی پیشرو به سراغ وارون‌سازی داده‌ها می‌رویم تا مدل‌سازی را بهبود دهیم و نتیجه را به داده‌ها نزدیک‌تر کنیم. نتیجه وارون‌سازی را در شکل ۷-ب مشاهده می‌کنیم. از آنجاکه زمینه در این قسمت آهک و

هواسان (محور قدیم) در استان ایلام در نزدیکی شهر سر پل ذهاب به مختصات نقطه شروع ۳۴/۷۹۹ درجه شمالی و ۴۵/۷۶۲ درجه شرقی به‌منظور اکتشاف مناطق کارستی است. نیم‌رخ انتخابی ما برای وارون‌سازی نیم‌رخ CD در شکل ۶ است که بی‌هنجاری اصلی را دربر دارد.

از لحاظ وضعیت زمین‌شناسی سایت موردنظر جزء رشته‌کوه‌های زاگرس است و عمده تشکیلات زمین‌شناسی مربوط به رسوبات دوران دوم است که از پایین به بالا شامل تشکیلات امیران-تله‌زنگ-آسماری و در رو نهشته‌های دوران چهارم است. تشکیلات امیران به رنگ خاکستری متمایل به سبز شامل تناوبی از مارن‌ماسه‌سنگ و سیلت‌استون ضعیف تا مقاوم است. سازندهای تله‌زنگ و آسماری از آهک‌های کرم تا



شکل ۶. نقشه بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده همراه با جواب‌های اوپلر جایگاه هواسان (ترسیم در محیط نرم‌افزار Geosoft).



شکل ۷. (الف). برازش داده‌های منطقه هواسان با نتیجه مدل‌سازی پیش‌رو در بالای شکل، مدل داده شده برای حفره کارستی در پایین شکل نشان داده شده، (ب) برازش داده‌های منطقه هواسان با نتیجه وارون‌سازی در بالای شکل، نتیجه وارون‌سازی برای تباین چگالی در پایین شکل نشان داده شده که یک نقطه درحکم اطلاعات اولیه در نظر گرفته شده در این وارون‌سازی $\lambda = 0/1$ ، $f = 5000$ و $\tau = 0/01$ و $RMS = 0/0084$ mGal است.

اولیه، یک نقطه را که به آن تباین چگالی 2700 kg/m^3 نسبت داده شده، در نظر می‌گیریم. نتیجه وارون‌سازی،

چگالی آهک 2700 kg/m^3 است، می‌توان تباین چگالی حفره را 2700 kg/m^3 در نظر گرفت. برای اطلاعات

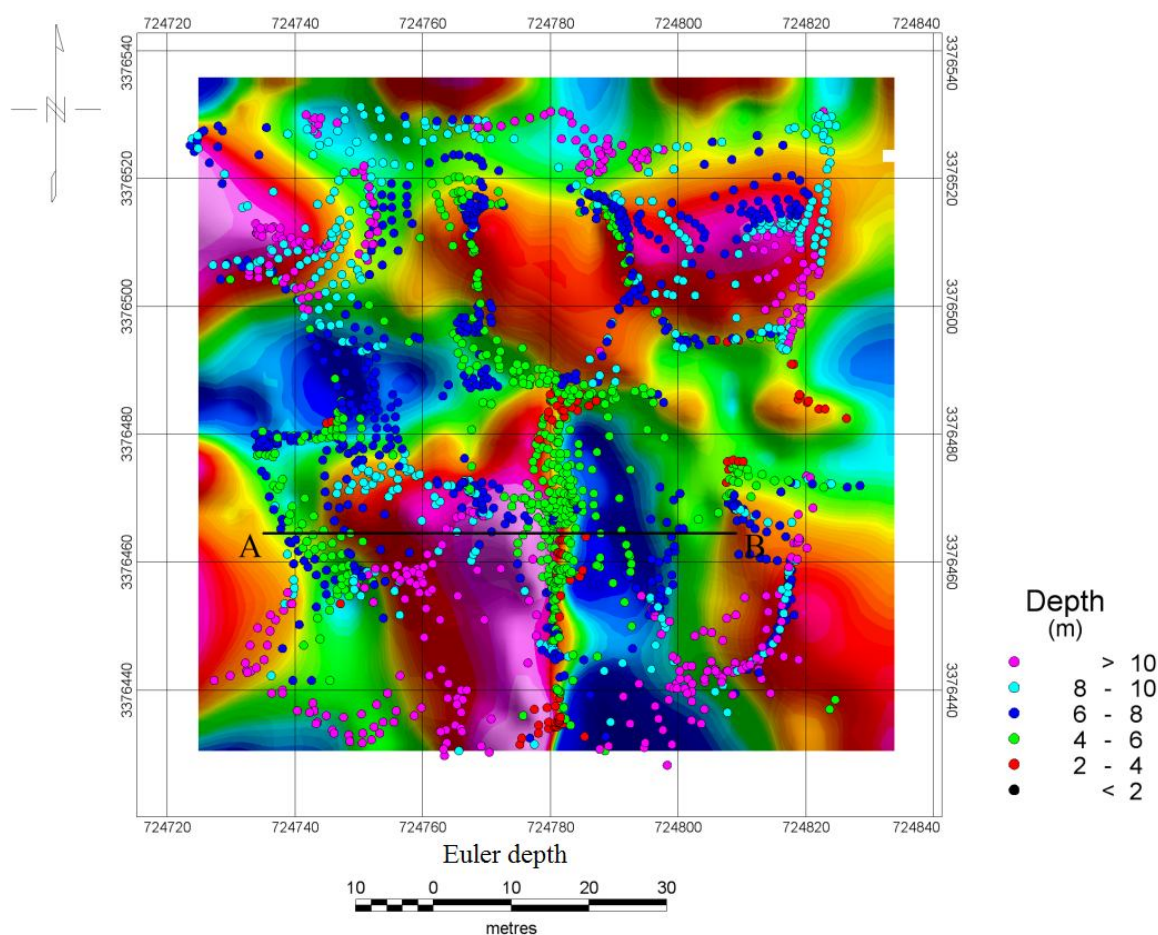
با جنس سیلت استون، ماسه سنگ، کنگلومرا و سنگ‌های آذرین مربوط به دوران ژوراسیک است که با یک رورانگی در کنار تشکیلات سنگ آهکی کرتاسه قرار گرفته است و بیرون زدگی‌های کانسار باریت عمدتاً در سنگ آهک بلورین مربوط به دوران سوم دیده شده که با یک رورانگی در کنار واحدهای با سن ژوراسیک قرار گرفته است.

نقشه بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده در شکل ۸ دیده می‌شود که عمق‌های اوپلر روی آن نشان داده شده است. روش را برای نیم‌رخ AB که روی شکل دیده می‌شود و بی‌هنجاری اصلی را در بر دارد، اعمال می‌کنیم.

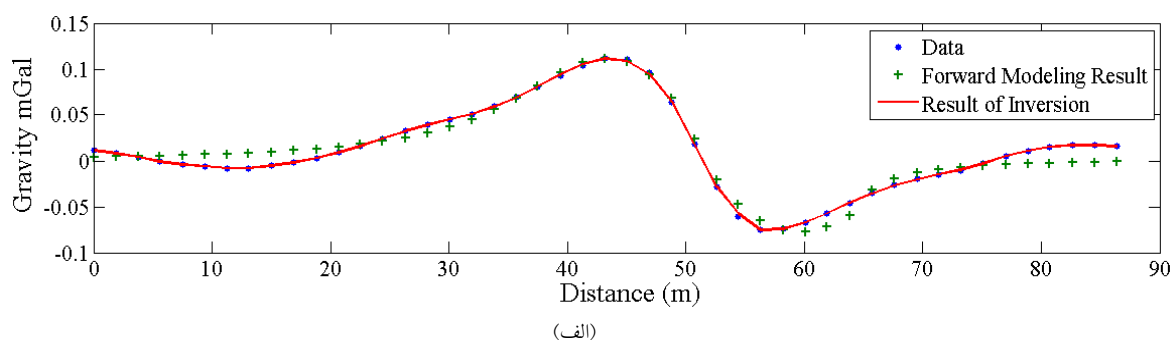
مقطع نشان داده شده در شکل ۷-ب است. همان‌طور که مشاهده می‌شود نتیجه وارون‌سازی، برازش بهتری با داده‌ها دارد.

داده بعدی که برای بررسی این روش انتخاب شده مربوط به عملیات گرانی سنجی در منطقه آباده واقع در استان فارس به مختصات نقطه مبنا ۷۲۴۶۹۲/۷۵۸ متر و ۳۳۷۶۵۲۷/۸۶۸ متر (سامانه تصویر UTM) به‌منظور اکتشاف سنگ معدن باریت است.

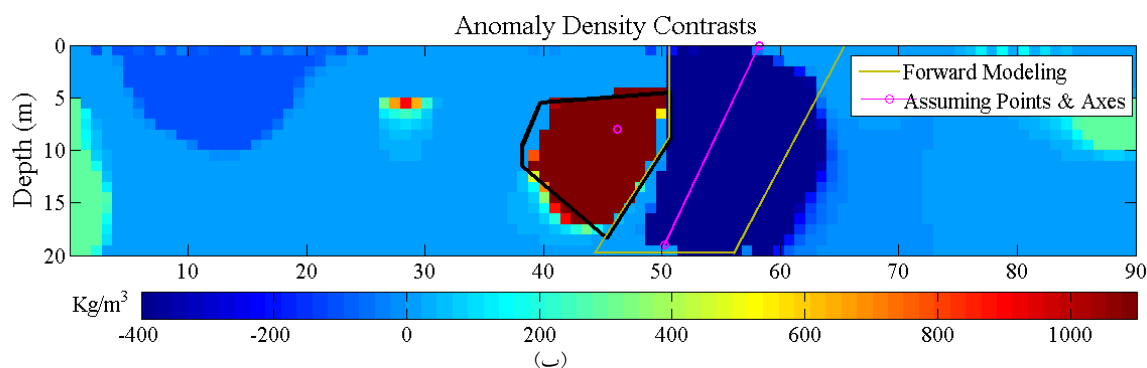
از لحاظ وضعیت زمین‌شناسی عمده تشکیلات زمین‌شناسی موجود در ناحیه، رسوبات دوران دوم (ژوراسیک و کرتاسه) است. قدیمی‌ترین واحد تشکیلات



شکل ۸ نقشه بی‌هنجاری‌های باقی‌مانده همراه با جواب‌های اوپلر جایگاه آباده (رسم در محیط نرم‌افزار Geosoft).



(الف)



(ب)

شکل ۹. (الف). برازش داده با نتیجه مدل‌سازی پیشرو و وارون‌سازی (ب) مدل عرضه شده از روش پیشرو (مرز بی‌هنجاری از این روش با خطوط نشان داده شده است) و نتیجه وارون‌سازی برای تباین چگالی نشان داده شده که نقطه و پاره‌خط فرضی درحکم اطلاعات اولیه (دایره و خط بنفش‌رنگ) و تباین چگالی نشان داده شده به رنگ سرخ نشان‌دهنده وجود سنگ باریت و تباین چگالی نشان داده شده به رنگ آبی نشان‌دهنده زون خرد شده است. در وارون‌سازی $\lambda = 0.08$, $f = 3000$ و $\tau = 0.1$ در نظر گرفته شده و $RMS = 0.011$ mGal است.

۵ نتیجه‌گیری

روش بیان شده روشی متفاوت در برآورد موقعیت و هندسه دو بُعدی منابع گرانشی روی صفحه X-Z است. این نگرش با نگرش مدل‌سازی غیرخودکار (دستی) معمول فرق می‌کند. چون در اینجا داده‌های پیش‌بینی شده به‌طور خودکار با داده‌های مشاهده‌ای برازش می‌یابند و فقط مستلزم تفسیری شامل عنصرهای هندسی ساده چون نقاط و پاره‌خط‌هایی از بی‌هنجاری به نمایندگی هندسه بی‌هنجاری، هستند. این امر مفسر را از یک آزمون و خطای خسته‌کننده که مستلزم تعداد زیادی آزمون هندسی برای به‌دست آوردن برازشی قابل‌قبول است، بی‌نیاز می‌کند.

نتیجه وارون‌سازی به همراه مدل‌سازی پیشرو در شکل ۹ مشاهده می‌شود. برای اطلاعات اولیه نقطه‌ای را در عمق ۸ متر و به فاصله ۴۶ متر از ابتدای نیم‌رخ با نسبت دادن تباین چگالی 1100 kg/m^3 و برای بی‌هنجاری منفی پاره‌خطی مطابق شکل ۹-ب با نسبت دادن تباین چگالی 400 kg/m^3 در نظر گرفتیم. منشأ بی‌هنجاری منفی گسلی است که باعث ایجاد زون خرد شده‌ای در شرق توده سنگ معدنی باریت شده است و در حقیقت سنگ معدنی باریت در این گسل نفوذ کرده است. برازش هر دو روش پیشرو و وارون با داده‌ها در شکل ۹-الف نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود در برگردان داده برازش مناسب‌تری حاصل شده است.

منابع

- Abbott, R. E., and Louie, J. N., 2000, Depth to bedrock using gravimetry in the Reno and Carson City, Nevada, area basins: *Geophysics*, **65**, 340–350.
- Barbosa, V. C. F., and Silva, J. B. C., 1994, Generalized compact gravity inversion: *Geophysics*, **59**, 57–68.
- Cady, J. W., 1980, Calculation of gravity and magnetic anomalies of finite-length right polygonal prisms: *Geophysics*, **45**, 1507–1512.
- Grauch, V. J. S., Hudson, M. R., and Minor, S. A., 2001, Aeromagnetic expression of faults that offset basin fill, Albuquerque basin, New Mexico: *Geophysics*, **66**, 707–720.
- Guillen, A., and Menichetti, V., 1984, Gravity and magnetic inversion with minimization of a specific functional: *Geophysics*, **49**, 1354–1360.
- Lewi, E., Gupta, P. K. and Khattri, K. N., 1994, 2-D inversion of 3-D gravity anomalies: *Proceedings of the national Academy of Science, India*, **64**(4A), 513–527.
- Li, Y., and Oldenburg, D. W., 1998, 3-D inversion of gravity data: *Geophysics*, **63**, 109–119.
- Silva, J. B. C., and Barbosa, V. C. F., 2006, Interactive gravity inversion: *Geophysics*, **71**, J1–J9.
- Silva, J. B. C., Medeiros, W. E., and Barbosa, V. C. F., 2000, Gravity inversion using convexity constraints: *Geophysics*, **65**, 102–112.
- Yunus L. Ekinici, 2008, 2D focusing inversion of gravity data with the use of parameter variation as a stopping criterion: *Journal of the Balkan Geophysical Society*, **11**(1), 1–9.
- نتایج به کارگیری روش روی داده‌های مصنوعی و واقعی نشان‌دهنده کاربرد مفید روش در برآورد توزیع چگالی از روی داده‌های گرانشی حاصل از بی‌هنجاری‌های چگالی با هندسه‌های پیچیده است.
- این تحقیق را می‌توان شروعی برای گسترش این نوع وارون‌سازی تلقی کرد و برای تفسیر یک وضعیت زمین‌شناسی خیلی پیچیده (برای مثال محیط‌های رسوبی با چندین گسل خوردگی به همراه لایه‌های چین‌خورده و ساختارهای نفوذی) باید به‌نحوی روش را بهبود داد.
- همچنین این روش را می‌توان برای مدل‌های سه‌بعدی و همچنین برای بی‌هنجاری‌های مغناطیسی تعمیم داد.
- از آنجاکه این روش به کاربر اجازه مداخله مستقیم در اعمال مکان و تباین چگالی بی‌هنجاری را می‌دهد، در مواقعی که کاربر اطلاعاتی از مکان و تباین چگالی تقریبی بی‌هنجاری دارد، یکی از بهترین گزینه‌ها برای مدل‌سازی دو‌بعدی داده‌های گرانی محسوب می‌شود.
- بی‌هنجاری موردنظر در مقطع دو‌بعدی حاصل از وارون‌سازی نشان داده شده در شکل ۷-ب با توجه به نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده (شکل ۶) شبیه به بیضی‌گون است و در مقطع مربوط به نیم‌رخ CD از عمق ۲۰ متر تا عمق ۷۷ متر گسترش یافته و قطر افقی آن ۵۲ متر است.
- بی‌هنجاری موردنظر در مقطع دو‌بعدی حاصل از وارون‌سازی نشان داده شده در شکل ۹ با توجه به نقشه بی‌هنجاری بوگه (شکل ۸) شبیه به استوانه‌ای افقی است که در مقطع AB از عمق ۵ متر شروع می‌شود و تا عمق ۱۶ متر گسترش می‌یابد. پهنای افقی بی‌هنجاری ۱۰ متر و تباین چگالی آن نسبت به زمینه 1100 kg/m^3 است. نتایج حفاری شروع ماده معدنی از عمق ۵ متر را تأیید می‌کند.