

تصویرسازی توده‌های زیرسطحی با استفاده از روش توموگرافی احتمال داده‌های گرانی

محمد جواد دهقان و وحید ابراهیم‌زاده اردستانی*

موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، ایران

(تاریخ دریافت: ۹۲/۶/۲۶، تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۲/۲۶)

چکیده

هدف از روش توموگرافی احتمال، تصویرسازی چشمه‌های بی‌هنجاری گرانی، با استفاده از داده‌های برداشت شده روی سطحی با توپوگرافی آزاد، است. به این منظور، ابتدا معادله بی‌هنجاری بوگه را که با انتگرال نیوتون تعریف می‌شود، به شکل گسسته و به صورت مجموعی از جرم‌های شبه‌نقطه‌ای تعریف می‌کنیم. به کمک این تعریف، تابع توان وابسته به بی‌هنجاری بوگه، از همبستگی بین داده‌های بی‌هنجاری بوگه و تابع پیمایش محلی به دست می‌آید. با اعمال نابرابری شوارتز بر معادله تابع توان، تابع احتمال رخداد تباین جرم، به مثابه ابزار مفیدی در تصویرسازی چشمه ایجاد کننده اثر گرانی، حاصل می‌شود. روش توموگرافی احتمال، شامل پیمایش نیم‌فضای زیر محدوده برداشت گرانی و محاسبه تابع احتمال رخداد تباین جرم در هر یک از گره‌های یک شبکه منظم سه‌بعدی است. با رسم مقادیر به دست آمده برای این تابع، می‌توان محدوده‌ای را در زیر سطح مشخص کرد که در آن، تابع رخداد تباین جرم دارای بیشترین مقدار است. این محدوده، در حکم محتمل‌ترین مکان برای چشمه ایجاد کننده بی‌هنجاری معرفی می‌شود. مدل مصنوعی مورد استفاده در این تحقیق، دقت روش توموگرافی احتمال را در بیان موقعیت توده زیرسطحی نشان می‌دهد. در نهایت، این روش را بر داده‌های به دست آمده از عملیات پی‌جویی سنگ معدن باریت، در منطقه آباده فارس اعمال می‌کنیم.

واژه‌های کلیدی: توموگرافی احتمال، بی‌هنجاری بوگه، تابع رخداد تباین جرم، نابرابری شوارتز، مدل مصنوعی

Subsurface bodies imaging using the probability tomography method for gravity data

Mohammad Javad Dehghan and Vahid Ebrahimzadeh Ardestani*

Institute of Geophysics, University of Tehran, Iran

(Received: 17 September 2013, accepted: 17 March 2015)

Summary

The purpose of the geophysical studies is to obtain information about the shape, location and physical parameters of the subsurface bodies. To do this, we often need to solve the inverse problem. On the other hand, the solution to this problem is very complex because

*Corresponding author:

ebrahimz@ut.ac.ir

*نگارنده رابطا:

of the many solutions compatible with an acquired data set; indeed, different bodies can cause the same image on the surface.

The probability tomography approach allows the analysis of the experimental data without introducing any a priori information on the investigated structures. This method is able to give a geometrical representation of the buried sources of anomalies.

Nevertheless, the main difference between this method and the inverse problems is the absence of any response to estimate the physical parameters of the source of the anomaly. The probability tomography was originally formulated for the self-potential method, and then extended to the Electric, EM induction, Gravity and Magnetic prospecting. In Gravity formulation, it was proposed as an approach to vertically explore the subsurface in order to locate the most probable source of anomalies appearing in a field dataset collection in a given datum domain. First, the Newtonian-type integral defining the Bouguer anomaly function was solved as a sum of elementary contributions from points like mass contrast elements.

The power associated with the Bouguer effect was derived as a sum of cross correlation integrals between the Bouguer anomaly data and scanner function expressing the gravity effect from a point like mass contrast element. Using the Schwarz's inequality property, we achieved a Δ -mass occurrence probability function as a suitable tool for determination of the depth to the source of a given gravity anomaly field.

The 3D Δ -mass occurrence probability function is a normalized correlation which its positive values refer to a mass excess at point q while negative values are the results of a mass deficit at the same point with respect to the host volume.

The tomographic procedure consists of scanning the subsurface with the elementary source and calculating the occurrence probability function at the nodes of a regular grid. The complete set of grid values is used to highlight the zone of the highest probability of mass contrast concentrations. This range is defined as the most probable location for the source of the gravity anomaly.

In this study, gravity anomalies due to synthetic gravity data created for spherical models with a density contrast of $1\text{gr}/\text{cm}^3$, radius of 2m and at the depth of 10m were interpreted. To apply the procedure, the surface was divided into a regular grid with a sampling factor of 1m. The sphere was located at the center of the grid. The obtained results from applying tomography method on synthetic models implied that the method had a high resolution in determination of maximum and minimum depth of subsurface anomalies. The effect of random noise was examined on the model, by 20% random noise, and showed that the effect of noise was negligible on the procedure.

The practical application of real data was also illustrated. The survey area was close to Abadeh, a city in Fars province, in south west of Iran. The main geological units were constructed from silt stone, conglomerate and limestone. Ore bodies of Barite were mainly out-cropped in limestone unit. The gravity station grid consisted of 200 measurement points on a grid of 5m to 10m. Applying the proposed method to real data, the horizontal and vertical extension of the anomaly were detected with satisfactory results.

Keywords: Probability tomography, Bouguer anomaly, mass contrast occurrence function, Schwarz's inequality, synthetic model

۱ مقدمه

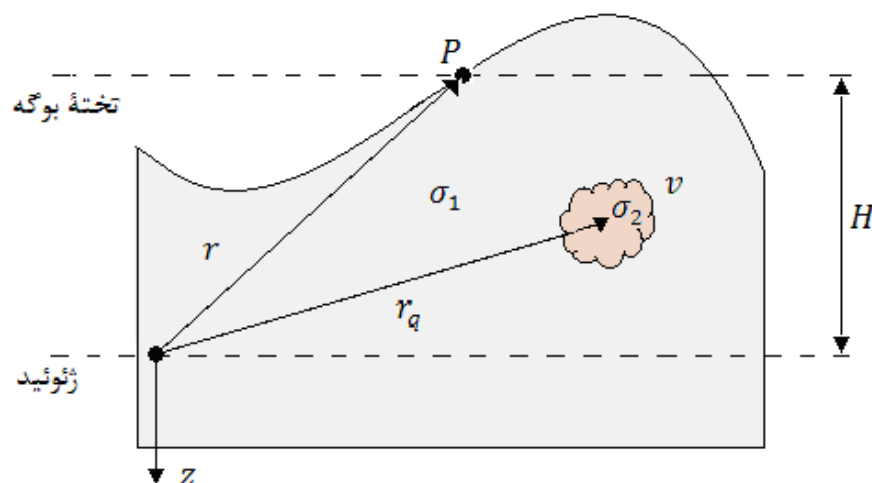
هدف از تحقیقات ژئوفیزیکی، به دست آوردن اطلاعاتی در مورد شکل، مکان و پارامترهای فیزیکی توده زیرسطحی مورد بررسی است. در گرانی‌سنجی، برای دسترسی به این اطلاعات، اغلب نیازمند حل مسائلی موسوم به مسائل وارون هستیم. به‌طور کلی در مسائل وارون، اطلاعاتی از مدل، که همان چشمه ایجاد کننده بی‌هنجاری گرانی است در اختیار نیست و هدف، تعیین این اطلاعات به کمک داده‌های گرانی مشاهده‌ای روی سطح زمین است. در واقع هدف در این مسائل، بازسازی توده‌های زیرسطحی به کمک داده‌های مشاهده‌ای است. برای حل مسائل وارون، ابتدا یک مدل اولیه بر پایه شکل کلی داده‌ها و اطلاعات زمین‌شناسی منطقه فرض می‌شود. پس از آن، اثر گرانی ناشی از مدل اولیه فرضی، محاسبه و با داده‌های مشاهده‌ای مقایسه می‌شود. به‌منظور کاهش اختلاف بین داده‌های مشاهده‌ای و اثر گرانی ناشی از مدل فرضی، پارامترهای قابل تغییر مدل اولیه، در یک فرایند تکرار دستخوش تغییرات می‌شود. این فرایند تا مرحله‌ای ادامه می‌یابد که اختلاف پاسخ مدل با داده‌های واقعی به حد قابل قبول برای مفسر، کاهش یابد.

مسائل وارون در گرانی‌سنجی، اغلب جزء مسائل وارون نایکتا محسوب می‌شوند، چرا که در این کاوش‌ها، عموماً توزیع‌های غیر یکنواخت جرمی، منشأ میدان بی‌هنجار گرانی است. بنابراین در این‌گونه مسائل، ممکن است تعداد زیادی حل معادله به دست آید. برای نمونه، همه اجسام کروی هم‌مرکز و دارای جرم یکسان (با شعاع متفاوت)، بی‌هنجاری‌های گرانی یکسانی را در خارج از خود ایجاد می‌کنند (اردستانی، ۱۳۸۹). مسئله دیگر در نظریه وارون، قضیه ناپایداری جواب‌های عرضه شده است. پایداری در یک مسئله وارون، به حرکت هموار و بدون مشکل همه پارامترهای مدل، به سمت پاسخ واقعی مسئله، تلقی می‌شود (پارکر، ۱۹۷۷). ممکن است یک

مسئله وارون در حرکت از نقطه انتخاب اولیه در فضای هیلبرت، دچار واگرایی شود. به این معنا که، اختلاف بین داده‌های صحرائی و پیش‌بینی شده، و نیز فاصله بین مقادیر مدل و پاسخ واقعی افزایش یابد. انتخاب نامناسب مدل اولیه، یکی از عوامل مؤثر در نایکتایی و ناپایداری پاسخ به دست آمده برای مسائل وارون است. از این رو، انتخاب آگاهانه یک مدل اولیه مناسب بر پایه اطلاعات زمین‌شناسی موجود منطقه، ضروری به نظر می‌رسد.

مائوریلو و پاتلا (۲۰۰۱) روشی را تحت عنوان توموگرافی احتمال داده‌های گرانی، به‌منظور تصویرسازی چشمه‌های بی‌هنجاری گرانی معرفی کردند. پس از آن، آلیا و همکارانش (آلیا و همکاران، ۲۰۰۸، ۲۰۰۹) با استفاده از این روش به تعیین مرکز، گوشه‌ها و مرز بی‌هنجاری‌های گرانی پرداختند. روش توموگرافی احتمال، همچنین برای تحلیل داده‌های مربوط به پتانسیل خودزا (پاتلا، ۱۹۹۷)، مقاومت ویژه الکتریکی (مائوریلو و همکاران، ۱۹۹۸؛ مائوریلو و پاتلا، ۱۹۹۹)، چشمه‌های الکترومغناطیسی (مائوریلو و پاتلا، ۱۹۹۹) و بی‌هنجاری‌های مغناطیسی (چینی‌ز و لپانا، ۲۰۰۷؛ مائوریلو و پاتلا، ۲۰۰۸) مورد استفاده قرار گرفته است. روش توموگرافی احتمال این اجازه را می‌دهد که بدون نیاز به در نظر گرفتن یک مدل اولیه، به تحقیق و بررسی ساختارهای هدف پردازیم. در این روش، می‌توان به کمک داده‌های مربوط به بی‌هنجاری بوگه، تقریب مناسبی از شکل و گستره عمقی توزیع جرم ایجاد کننده بی‌هنجاری گرانی به دست آورد. اختلاف اساسی روش توموگرافی احتمال با مسائل وارون، فقدان هرگونه پاسخی به‌منظور برآورد پارامترهای فیزیکی ذاتی چشمه بی‌هنجاری است.

این محدودیت روش توموگرافی احتمال، در بسیاری از کاربردها و اکتشافات نزدیک سطح، قابل اغماض است و



شکل ۱. تصویر طرحوار از موقعیت نقطه برداشت گرانی نسبت به توده زیرسطحی.

که Γ فاصله نقطه برداشت گرانی روی سطح زمین از مبدأ است. Γ_q ، فاصله مرکز توده زیرسطحی از مبدأ و k_z بردار واحد در جهت Z محور مختصات است. این معادله را می‌توان به صورت زیر به یک معادله گسسته تبدیل کرد (مائوریلو و پاتلا، ۲۰۰۱):

(۲)

$$B_a(x, y, z) =$$

$$\sum_{q=1}^Q \Gamma_q \frac{z_q - z}{[(x - x_q)^2 + (y - y_q)^2 + (z_q - z)^2]^{3/2}}$$

که حجم V به Q قسمت تقسیم و به هر قسمت یک جرم شبه‌نقطه‌ای در مرکز آن، معادل با جرم کل آن قسمت، نسبت داده شده است. که در آن، (x_q, y_q, z_q) مختصات نقطه q و Γ_q متناسب با جرم آن نقطه است.

۳ تابع احتمال رخداد تباین جرم

همان‌گونه که در قسمت قبل شرح داده شد، بی‌هنجاری بوگه روی یک سطح غیرهموار، از معادله (۱) به دست می‌آید. می‌توان تابع توان کل Λ ، متناسب با بی‌هنجاری بوگه را به صورت زیر تعریف کرد (مائوریلو و پاتلا، ۲۰۰۱):

نارسایی چشمگیری ایجاد نمی‌کند (مائوریلو و پاتلا، ۲۰۰۱). با وجود این، در مواردی که آگاهی از پارامترهای فیزیکی توده هدف اهمیت زیادی داشته باشد، نتایج حاصل از روش توموگرافی را می‌توان در حکم پارامترهای اولیه قابل‌اعتمادی برای حل مسائل وارون، مورد استفاده قرار داد.

۲ بی‌هنجاری بوگه

محدوده‌ای از سطح زمین با توپوگرافی غیر هم‌سطح را در نظر می‌گیریم. دستگاه مختصاتی با صفحه $X-Y$ موازی با زمینوار (ژئوئید) و جهت مثبت محور Z به سمت پایین انتخاب می‌کنیم. شکل ۱ تصویری از موقعیت توده زیرسطحی را نشان می‌دهد.

اگر توده‌ای با حجم V و اختلاف چگالی $\Delta\sigma$ نسبت به زمینه در زیر سطح زمین در نظر بگیریم، بی‌هنجاری بوگه در هر نقطه P روی سطح، از معادله زیر به دست می‌آید (مائوریلو و پاتلا، ۲۰۰۱):

$$B_a(r) = G \int \Delta\sigma(\mathbf{r}_q) \frac{(\mathbf{r}_q - \mathbf{r}) \cdot \mathbf{k}_z}{|\mathbf{r}_q - \mathbf{r}|^3} dV, \quad (1)$$

$$C = \left[\int_{S_{x,y}} B_a^2(x_q, y_q, z_q) ds \right]^{(-1/2)} \quad (8)$$

تابع سه‌بُعدی $\eta(x_q, y_q, z_q)$ در معادله (۷)، یک تابع بهنجار شده است که در شرط زیر صدق می‌کند:

$$-1 \leq \eta(x_q, y_q, z_q) \leq +1. \quad (9)$$

مقدار مثبت این تابع ناشی از جرم اضافی و مقدار منفی آن ناشی از کمبود جرم در نقطه q ، نسبت به زمینه است.

روش توموگرافی احتمال، شامل پیمایش نیم‌فضای زیر محدوده برداشت گرانی و محاسبه تابع احتمال رخداد تباین جرم در هریک از گره‌های یک شبکه منظم سه‌بُعدی است. با ترسیم تابع η محاسبه شده در صفحات موازی با صفحه $X-Y$ و به‌ازای عمق‌های متفاوت، محدوده‌ای که دارای بیشترین مقدار η است، درحکم محتمل‌ترین محدوده برای توزیع جرم هدف زیرسطحی معرفی می‌شود. بنابراین، به کمک این روش می‌توان به برآورد مناسبی از موقعیت توده زیرسطحی دست یافت.

۴ مدل‌سازی مصنوعی

در بررسی‌های گرانی‌سنجی، به‌منظور بررسی روش‌های مورد استفاده در پردازش و تفسیر داده‌های به‌دست آمده از عملیات صحرائی و سنجش دقت و قابلیت عملی این روش‌ها، آنها را بر داده‌های مصنوعی حاصل از شکل‌های هندسی ساده اعمال می‌کنند. برای بیان بی‌هنجاری‌های گرانی حاصل از شکل‌های هندسی ساده، از روابط تحلیلی استفاده می‌شود. این فرمول‌های ریاضی تابع‌هایی از عمق، عامل شکل، ضریب دامنه و تباین چگالی ساختار مدفون هستند. بنابراین، می‌توان نتایج به‌دست آمده را با مقادیر اولیه پارامترهای هدف مقایسه کرد و برآورد مناسبی از میزان دقت روش مورد استفاده به‌دست آورد.

$$\Lambda = \int_s B_a^2(x, y, z) dS. \quad (3)$$

حال اگر رابطه بی‌هنجاری بوگه را از معادله (۲)، در معادله مربوط به تابع قرار دهیم، این تابع به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$\Lambda = \sum_{q=1}^Q \Gamma_q. \quad (4)$$

که Γ_q به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Gamma_q = \frac{\int_s B_a(x, y, z) \mathfrak{I}(x - x_q, y - y_q, z_q - z) ds}{[(x - x_q)^2 + (y - y_q)^2 + (z_q - z)^2]^{(3/2)}} \quad (5)$$

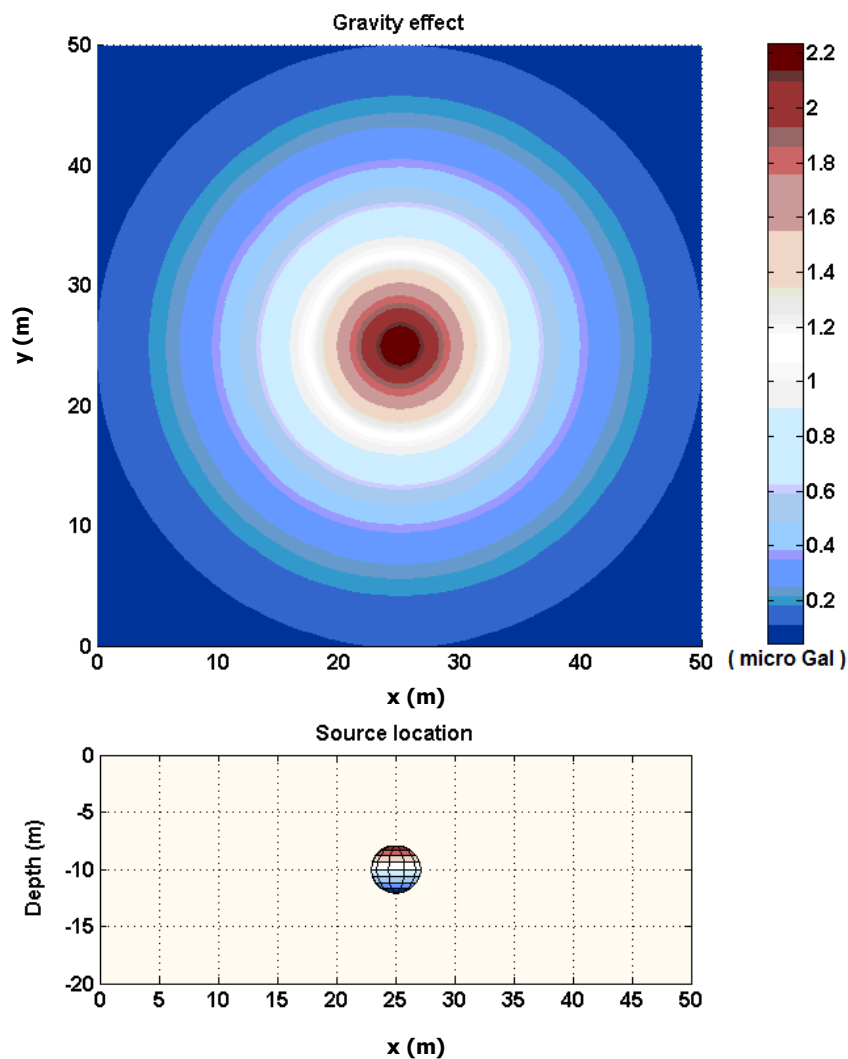
معادله (۵) را تابع پیمایش فضایی می‌نامند، که نقش مهمی در توموگرافی احتمال داده‌های گرانی و تعیین موقعیت توده‌های زیرسطحی ایفا می‌کند. با اعمال رابطه نابرابری شوارتز بر معادله (۴) خواهیم داشت:

$$\left[\int_s B_a(x, y, z) \cdot \mathfrak{I}(x - x_q, y - y_q, z_q - z) ds \right]^2 \leq \int_s B_a^2(x, y, z) dS \cdot \int_s \mathfrak{I}^2(x - x_q, y - y_q, z_q - z) ds. \quad (6)$$

اگر طرف چپ معادله فوق را بر طرف راست آن تقسیم و ریشه عبارت به‌دست آمده محاسبه شود، تابع رخداد تباین جرم، به‌منظور تحلیل سه‌بُعدی داده‌های گرانی، به‌صورت زیر، حاصل می‌شود:

$$\eta(x_q, y_q, z_q) = C \cdot \int_s B_a(x, y, z) \mathfrak{I}(x - x_q, y - y_q, z_q - z) ds, \quad (7)$$

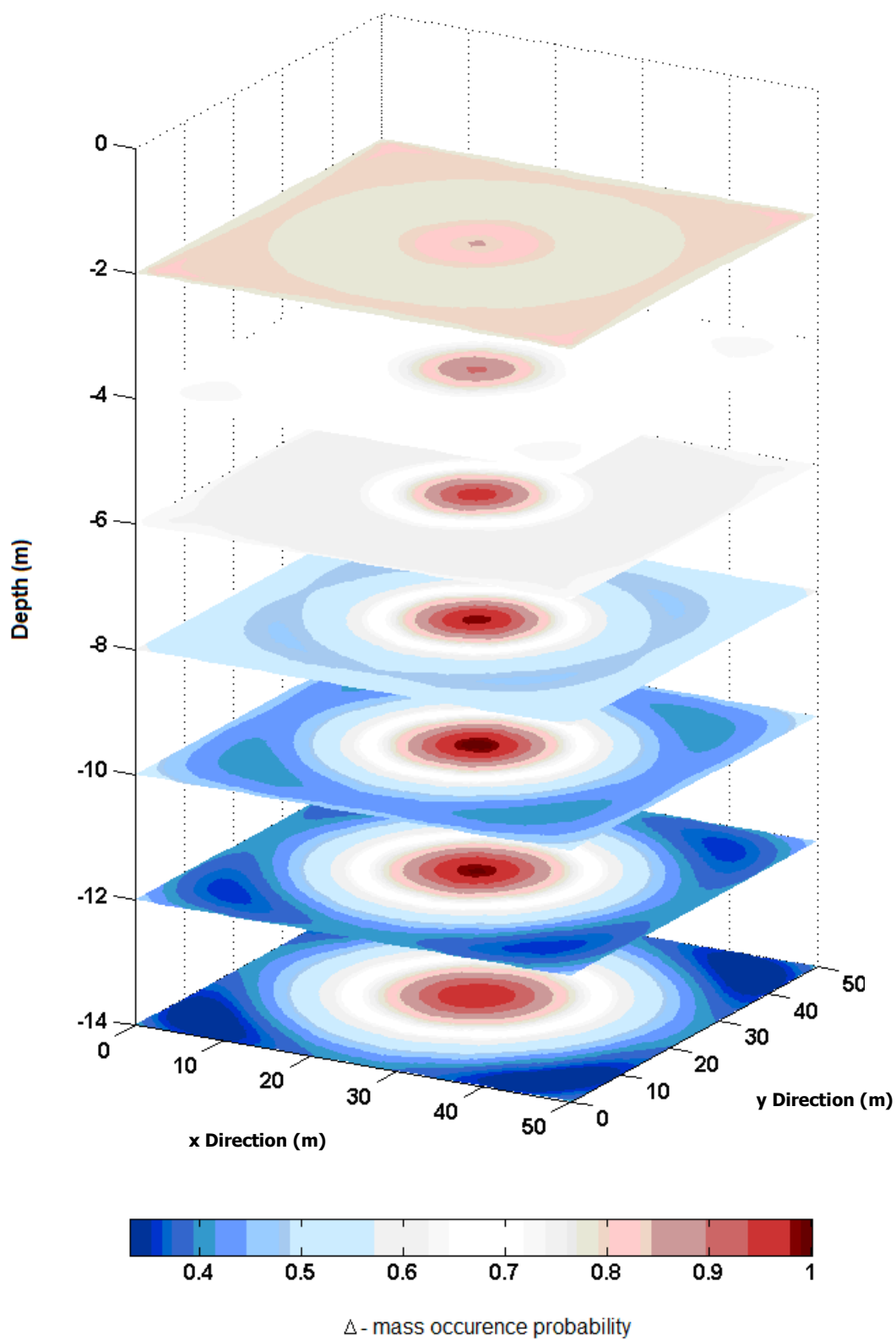
که پارامتر C به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:



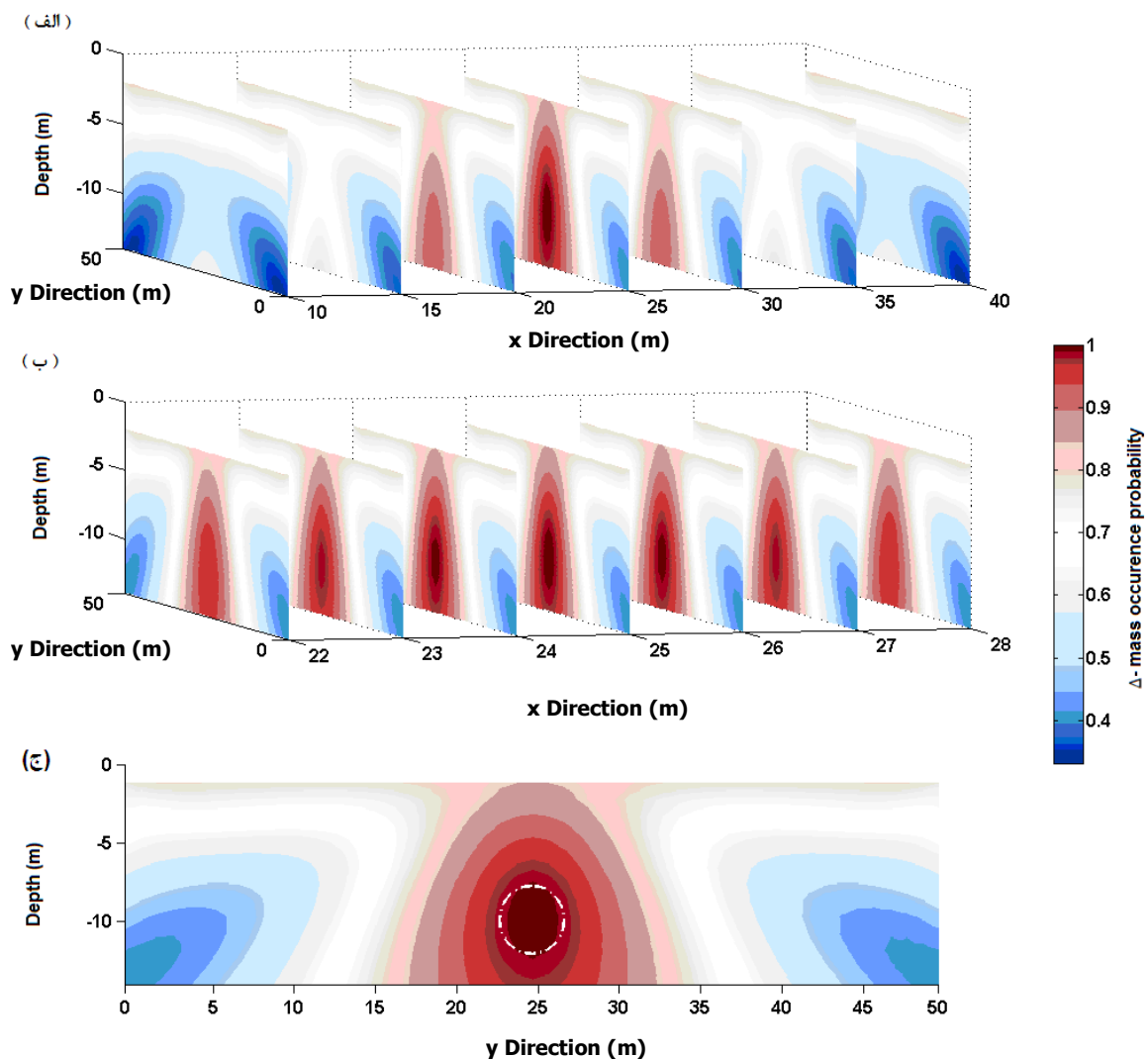
شکل ۲. بی‌هنجاری بوگه به‌دست آمده از مدل کروی به شعاع دو متر که مرکز آن در عمق ۱۰ متری قرار دارد.

اِعمال روش توموگرافی احتمال بر داده‌های به‌دست آمده از مدل کروی، اندازه η در هر یک از گره‌های شبکه، با فواصل یک متر در جهت محور Z و تا عمق ۱۴ متر، محاسبه شده است. شکل ۳ نتیجه حاصل از ترسیم تابع احتمال رخداد تباین جرم در صفحات موازی با صفحه X-Y، به‌ازای عمق‌های متفاوت است. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، بیشینه مقدار به‌دست آمده برای η در مختصات مربوط به مرکز کره قرار می‌گیرد و اندازه آن با دور شدن از مرکز، کاهش می‌یابد.

به‌منظور بررسی دقت روش توموگرافی احتمال، این روش را، بر داده‌های به‌دست آمده از مدل ساده کروی اعمال می‌کنیم و نتایج را مورد بحث و بررسی قرار می‌دهیم. یک مدل کروی با تباین چگالی یک گرم بر سانتی‌متر مکعب، نسبت به زمینه، در نظر می‌گیریم. شعاع کره برابر دو متر و مرکز آن در عمق ۱۰ متری قرار دارد. برای تولید مدل مصنوعی از یک شبکه مربعی به طول ۵۰ متر و فاصله نمونه‌برداری یک متر استفاده شده است. مدل کروی در مرکز شبکه فرض می‌شود. شکل ۲ بی‌هنجاری بوگه ناشی از مدل فوق را نشان می‌دهد. با



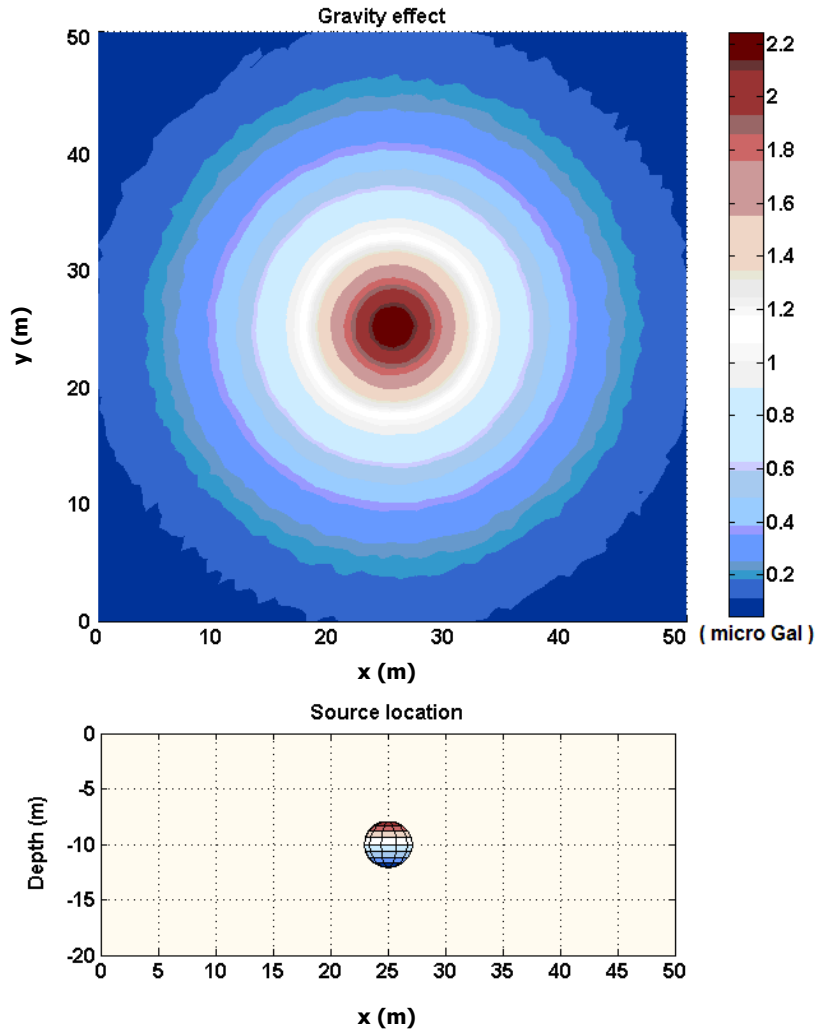
شکل ۳. نمایش تابع احتمال رخداد تباین جرم، حاصل از مدل کروی.



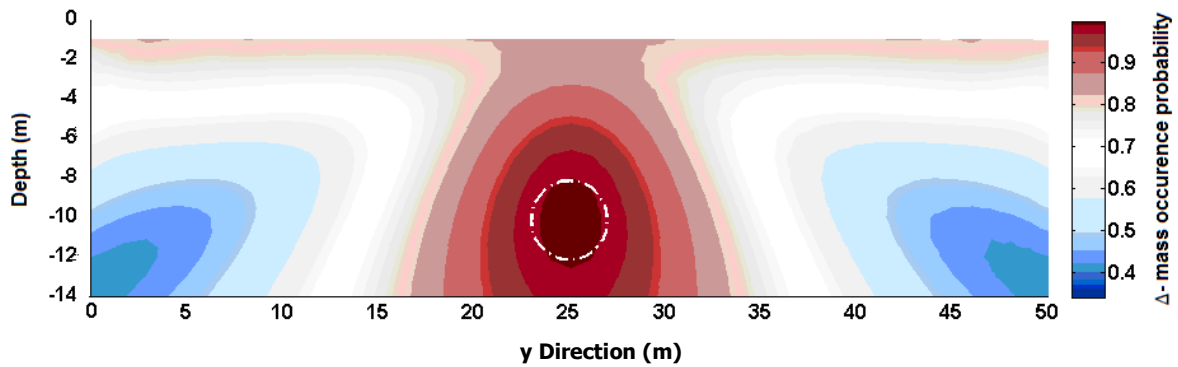
شکل ۴. مقاطع قائم تابع احتمال رخداد تباین جرم، حاصل از مدل کره، در امتداد محور X و موازی با محور Y (الف) از $X = 10$ تا $X = 40$ و با فواصل ۵ متر (ب) از $X = 22$ تا $X = 28$ و با فواصل یک متر (ج) در صفحه گذراندن از مرکز کره ($X = 25$).

مصنوعی تولید شده، نوفه اضافه شود. از این رو، به منظور بررسی دقیق‌تر روش توموگرافی احتمال، ۲۰ درصد نوفه تصادفی به داده‌های مصنوعی اضافه و نتایج را مجدداً بررسی می‌کنیم. شکل ۵ بی‌هنجاری بوگه حاصل از مدل کروی همراه با ۲۰ درصد نوفه تصادفی را نشان می‌دهد. نتیجه حاصل از اعمال روش توموگرافی بر داده‌های آلوده به نوفه، در شکل‌های ۶ و ۷ به تصویر کشیده شده است. مشاهدات نشان می‌دهد که افزایش نوفه، تأثیر بسزایی در کاهش دقت روش توموگرافی احتمال ندارد.

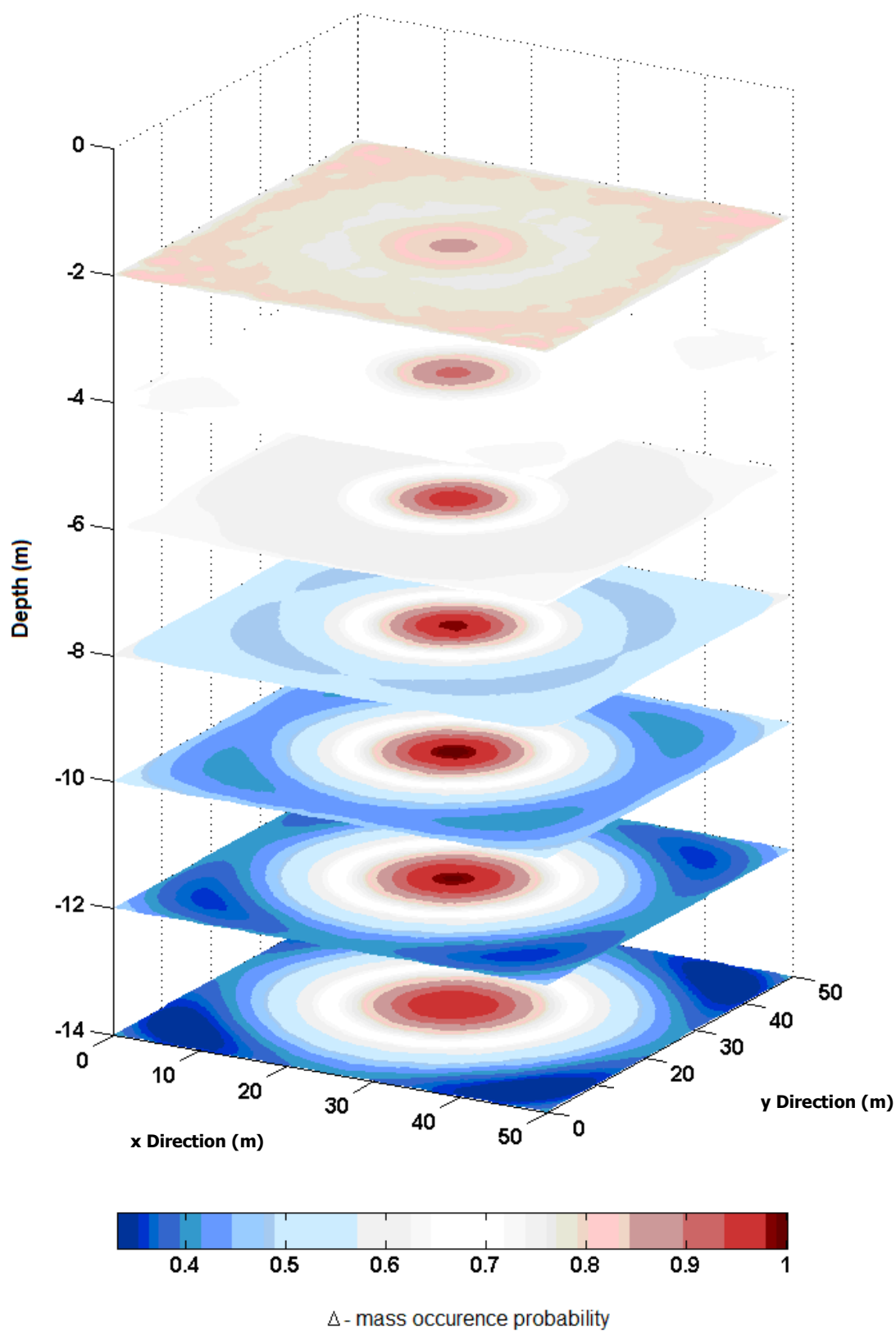
با توجه به شکل ۳، می‌توان گسترده‌گی عمقی توده هدف را در بازه ۸ تا ۱۲ متر برآورد کرد. این نتیجه، هم‌خوانی قابل‌قبولی با پارامترهای مدل مصنوعی دارد. با این حال، برای بررسی دقیق‌تر و همچنین تعیین گسترده‌گی افقی هدف زیرسطحی، مقاطع قائم مربوط به تابع توموگرافی احتمال، در شکل ۴ نشان داده شده است. از آنجاکه داده‌های واقعی اندازه‌گیری شده همواره با نوفه همراه‌اند، به منظور بررسی دقیق‌تر روش توموگرافی در شرایطی مشابه با شرایط واقعی، بایستی به داده‌های



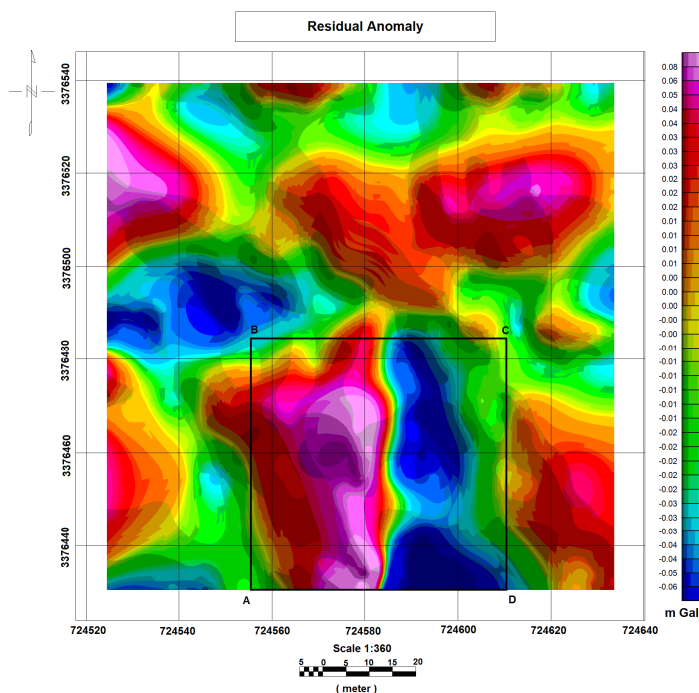
شکل ۵. بی‌هنجاری بوگه به‌دست آمده از مدل کروی به همراه ۲۰٪ نوفه تصادفی.



شکل ۶. مقطع قائم تابع احتمال رخداد تباین جرم، حاصل از مدل کروی همراه با ۲۰٪ نوفه تصادفی، در صفحه گذراندۀ از مرکز کره و موازی محور y ($x = 25$).



شکل ۷. تابع احتمال رخداد تباین جرم، حاصل از مدل کروی همراه با ۲۰٪ نوفه تصادفی، به ازای عمق‌های متفاوت.



شکل ۸. نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده گرانی.

نقطه برداشت و فواصل ایستگاهی ۵ تا ۱۰ متر صورت گرفته است. شکل ۸ نقشه بی‌هنجاری باقی‌مانده گرانی، مربوط به سایت موردنظر را نشان می‌دهد. بخشی از نقشه، به منظور پردازش به روش توموگرافی احتمال، با پنجره ABCD مشخص شده است. این محدوده، شامل یک بی‌هنجاری به شکل استوانه افقی با تباین چگالی مثبت، در بخش جنوبی نقشه است. داده‌برداری در محدوده پنجره، به کمک روش‌های برازش داده در شبکه‌ای مربعی با طول ۵۵ متر و فواصل نمونه‌برداری یک متر صورت گرفته است.

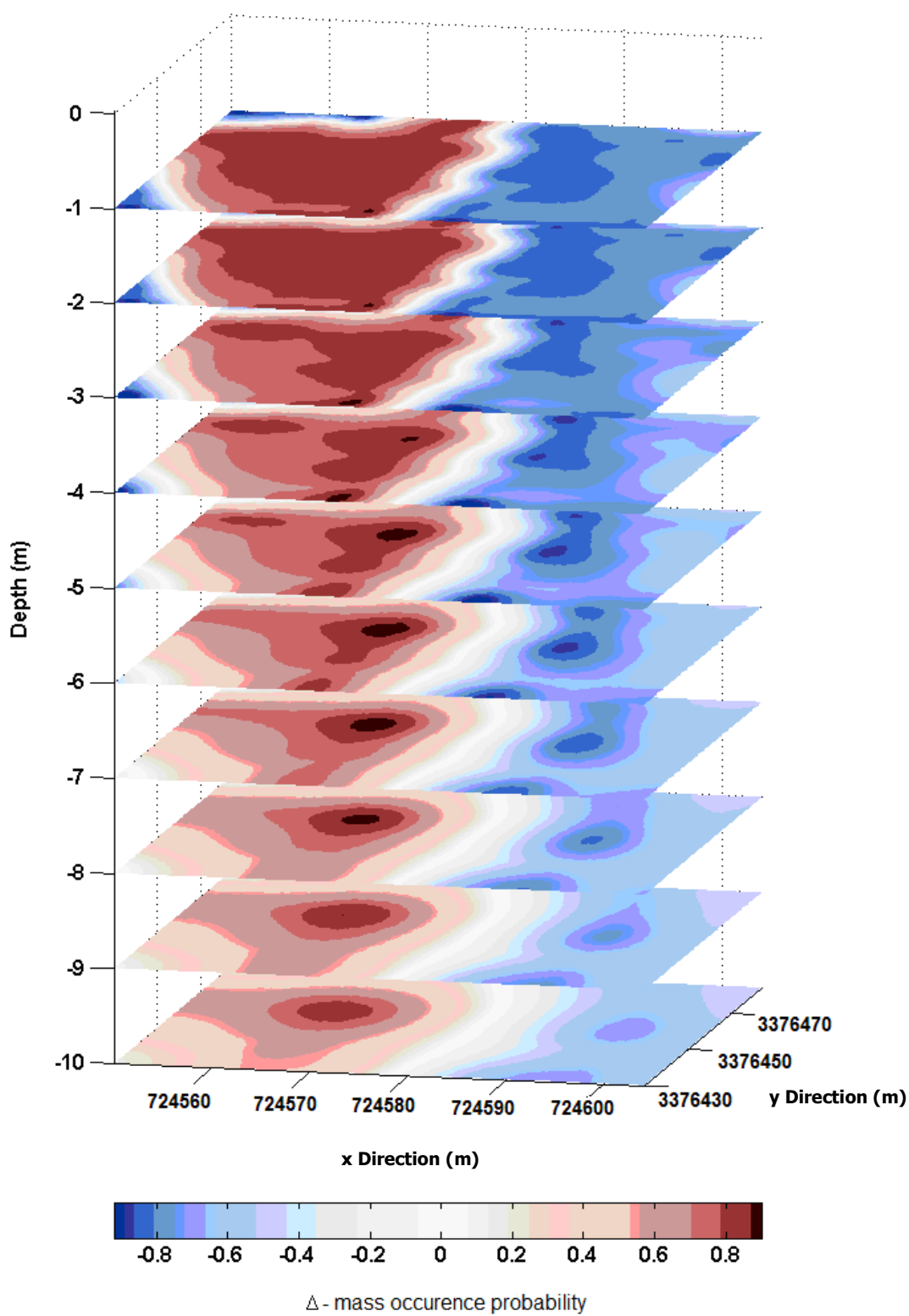
نتایج حاصل از اعمال روش توموگرافی احتمال بر داده‌های واقعی، در شکل ۹ نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، عمق توده در بازه ۴ تا ۹ متر زیر سطح زمین برآورد می‌شود. به‌منظور بررسی دقیق‌تر، مقاطع قائم گذرنده از محل بی‌هنجاری در جهت محور x، در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ نشان داده شده است.

۵ داده‌های واقعی

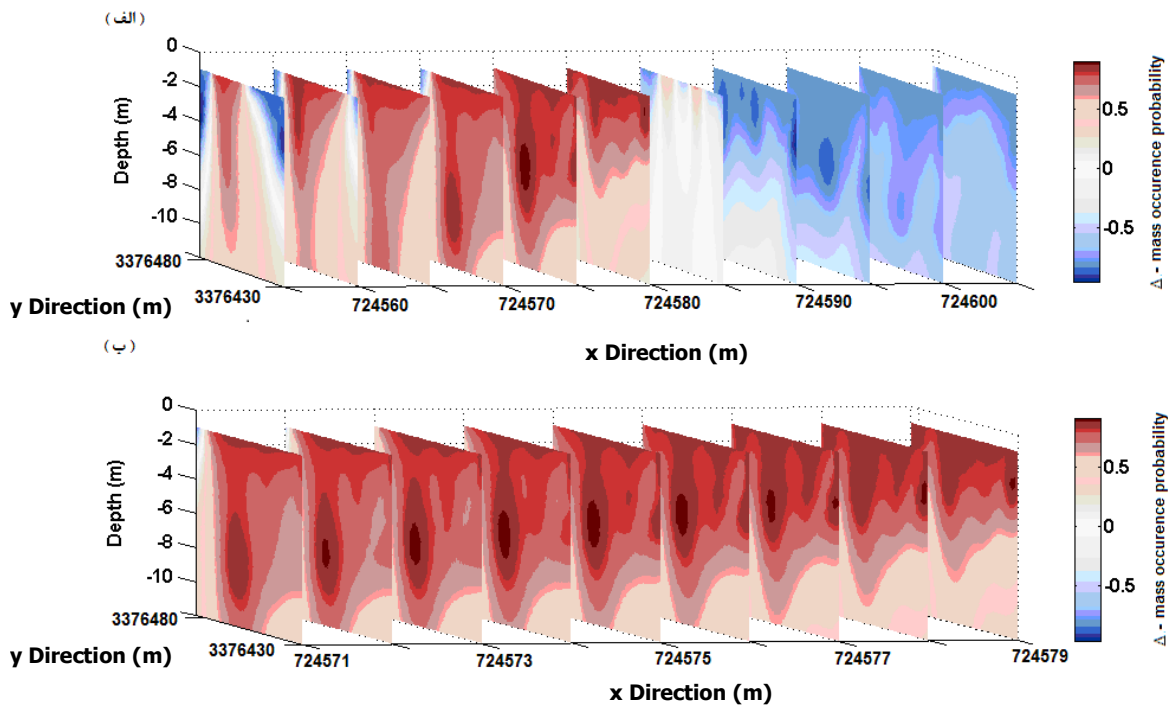
داده‌های مورد استفاده در این بخش، مربوط به عملیات اکتشاف سنگ معدن باریت در منطقه آباد، واقع در استان فارس است. نقطه مبنای محدوده مورد بررسی در دستگاه مختصات UTM با $x = 724695/7$ و $y = 3376527/3$ مشخص می‌شود.

اغلب سنگ‌های منطقه، از جنس سنگ آهک هستند. قدیمی‌ترین واحد تشکیلات این منطقه با جنس سیلت استون، ماسه‌سنگ، کنگلومرا و سنگ‌های آذرین، مربوط به دوران ژوراسیک است که با یک رورانگی، در کنار تشکیلات سنگ آهک کرتاسه قرار گرفته است. بیرون‌زدگی‌های کانسار باریت عمدتاً در سنگ آهک بلورین، مربوط به دوران سوم، دیده شده است.

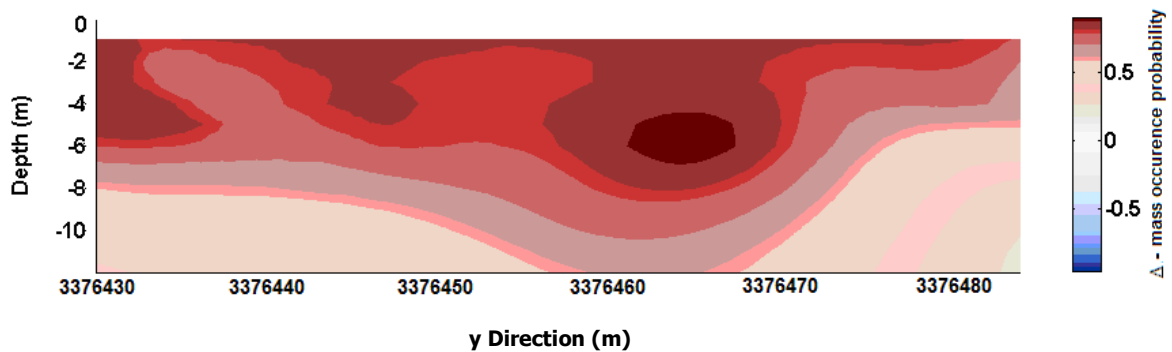
در بررسی‌های گرانی‌سنجی منطقه موردنظر، از دستگاه گرانی‌سنج سینترکس، مدل CG3، با دقت ۱۰ میکروگال استفاده شده است. برداشت داده، در شبکه‌ای شامل ۲۰۰



شکل ۹. تابع احتمال رخداد تباین جرم، حاصل از داده‌های واقعی، به ازای عمق‌های متفاوت.



شکل ۱۱. مقاطع قائم تابع احتمال رخداد تباین جرم، حاصل از مدل واقعی، در امتداد محور X دستگاه مختصات UTM و موازی با محور Y (الف) از $x = 724555$ تا $x = 724605$ و با فواصل ۵ متر (ب) از $x = 724571$ تا $x = 724579$ و با فواصل یک متر.



شکل ۱۲. مقطع قائم تابع احتمال رخداد تباین جرم به دست آمده از مدل واقعی، صفحه گذرانده از مرکز توده زیرسطحی با مختصات $x = 724575$ و موازی محور Y.

۶ نتیجه‌گیری

سطح به دست آورد که در آن، تابع رخداد تباین جرم، دارای بیشترین مقدار خود باشد. این محدوده، به منزله محتمل‌ترین مکان برای چشمه ایجاد کننده بی‌هنجاری معرفی می‌شود.

نتایج به دست آمده از اعمال روش توموگرافی بر مدل مصنوعی بیانگر این موضوع است که این روش در تعیین

روش توموگرافی احتمال شامل پیمایش نیم‌فضای زیر محدوده برداشت گرانی و محاسبه تابع احتمال رخداد تباین جرم در هریک از گره‌های یک شبکه منظم سه‌بعدی است. به کمک ترسیم مقادیر به دست آمده برای تابع رخداد تباین جرم، می‌توان محدوده‌ای را در زیر

- probability tomography: *J. Geophys. Eng.*, **5**, 359-70.
- Alaia, R., Patella, D., and Mauriello, P., 2009, Imaging multipolar gravity anomaly sources by 3D probability tomography: *J. Geophys. Eng.*, **6**, 298-310.
- Chianese, D., and Lapenna, V., 2007, Magnetic Probability Tomography for environmental purposes: Test measurements and field applications: *J. Geophys. Eng.*, **4**, 63-74
- Mauriello, P., and Patella, D., 1999a, Resistivity anomaly imaging by probability tomography: *Geophysical Prospecting*, **47**, 411-429.
- Mauriello, P., and Patella, D., 1999b, Principles of probability tomography for natural-source electromagnetic induction fields: *Geophysics*, **64**, 1403-1417.
- Mauriello, P., and Patella, D., 2001a, Gravity probability tomography: A new tool for buried mass distribution imaging: *Geophysical Prospecting*, **49** 1-12.
- Mauriello, P., and Patella, D., 2001b, Localization of maximum-depth gravity anomaly by a distribution of equivalent point mass: *Geophysics*, **66** 1431-1437.
- Mauriello, P., and Patella, D., 2008a, Localization of magnetic sources underground by a probability tomography approach: *Prog. Electromagn. Res.*, **M 3**, 27-56.
- Parker, R. L., 1977, Understanding inverse theory: *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, **5**, 35-64.
- Patella, D., 1997a, Introduction to ground surface self-potential tomography: *Geophysical Prospecting*, **45**, 653-681.
- Patella, D., 1997b, Self-potential global tomography including topography effects: *Geophysical Prospecting*, **45**, 843-863.
- عمق بیشینه و کمینه توده‌های نزدیک به سطح دقت زیادی دارد، حال آنکه تعیین گستردگی افقی توده‌های زیرسطحی به کمک این روش با خطای بیشتری همراه است.
- روش توموگرافی احتمال، وابستگی اندک به نوفه افزوده شده به داده‌های به‌دست آمده از مدل مصنوعی را نشان می‌دهد و حتی با سطح نوفه زیاد نیز دقت قابل قبولی دارد. بنابراین، می‌تواند روش مناسبی برای تحلیل داده‌هایی که نسبت سیگنال به نوفه کمی دارند، به‌شمار آید.
- با وجود دقت قابل قبول روش توموگرافی در تعیین پارامترهای هندسی توده هدف، این روش قادر به تعیین پارامترهای فیزیکی ذاتی چشمه تولیدکننده بی‌هنجاری نیست. از این‌رو، در مواردی که تعیین پارامترهای فیزیکی چشمه، درجه اهمیت زیادی داشته باشد، می‌توان از این روش به‌منظور تعیین پارامترهای اولیه قابل اعتماد برای حل مسائل وارون استفاده کرد.
- تشکر و قدردانی**
- بدین‌وسیله از موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران، به‌سبب فراهم آوردن بستری مناسب برای پیشرفت سطح علمی دانشجویان، قدردانی به عمل می‌آید. همچنین از جناب آقای مهندس سلیمی، کارشناس محترم بخش گرانی‌سنجی موسسه ژئوفیزیک، به‌خاطر زحمات ایشان در امر برداشت داده‌های موردنیاز و خانم زهرا باقری به دلیل همکاری ایشان در زمینه تدوین مقاله تشکر می‌شود.
- منابع**
- ابراهیم‌زاده اردستانی، و.، ۱۳۸۹، گرانی‌سنجی اکتشافی: انتشارات دانشگاه تهران.
- Alaia, R., Patella, D., and Mauriello, P., 2008, Imaging quadrupolar geophysical anomaly sources by 3D