

آشکارسازی و تعیین موقعیت اهداف و تأسیسات زیرزمینی بر پایه داده‌های گرادیان گرانی به روش واهم‌آمیخت اوایلر

محمد رضا سیف^۱، صفا خزائی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری ژئودزی، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران و پژوهشگر دانشگاه جامع امام حسین (ع)

۲- استادیار، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

(دریافت: ۹۳/۰۶/۰۳، پذیرش: ۹۴/۰۲/۱۴)

چکیده

بررسی امکان آشکارسازی سازه‌های زیرزمینی همواره از یکی از پیچیده‌ترین مسائل مورد بحث در تأمین امنیت تأسیسات مدفون بوده است. در این مقاله از داده‌های گرادیان جاذبی برای حل این مسئله استفاده شده است. برای تحلیل همه جانبه موضوع مورد نظر مسئله به صورت مستقیم و معکوس در نظر گرفته شده است. در مسئله مستقیم با فرض معلوم بودن ابعاد و موقعیت سازه مدفون به مدل‌سازی سیگنال گرادیان جاذبی پرداخته می‌شود و با بررسی دامنه این سیگنال و سطح نویز دستگاه گرادیان‌سنج گرانی امکان کشف سازه زیرزمینی مورد بحث قرار می‌گیرد. در مسئله معکوس، با معلوم بودن سیگنال گرادیان جاذبی با استفاده از روش واهم‌آمیخت اوایلر موقعیت سازه مدفون برآورد می‌شود. هر دو مسئله مستقیم و معکوس با انجام شبیه‌سازی‌های متنوع مورد بررسی قرار گرفته و راهکارهای پدافندی برای کاهش احتمال کشف سازه‌های زیرزمینی ارائه شده است.

کلید واژه‌ها: مشاهدات گرادیان گرانی، تعیین موقعیت سازه‌های مدفون، واهم‌آمیخت اوایلر، تأسیسات زیرزمینی.

Detection of Underground Targets Based on the Gravity Gradient Data Using the Euler Deconvolution Method

M. R. Saif*, S. Khazaei

PhD student of geodesy, Department of Surveying and Geomatics Engineering
University College of Engineering, University of Tehran, Iran.

(Received: 25/8/2014; Accepted: 04/05/2015)

Abstract

Investigating the possibility of detection of underground structures is one of the complicated problems. In this paper, making use of gravity gradient data is introduced as an efficient technique to solve this problem. In order to analyze this problem thoroughly and take into account all parts of it, both direct and inverse problems are treated in this contribution. In the direct problem, with the assumption of the known size and position of the structure, gravity gradient signal is modeled. Then, using this modeled signal and by considering the noise level of the gradiometer, some points about the detectability of the structure are discussed. In the inverse problem, position of the underground target is estimated based on the Euler deconvolution, given the gravity gradient tensor. Finally, both of the direct and inverse problems are implemented based on simulated data and some suggestions are made to decrease the probability of detectability of the underground targets.

Keywords: Gravity Gradient Data, Underground Structure Detection, Euler Deconvolution, Underground Utilities.

*Corresponding Author E-mail: m_r_saif@yahoo.com

۱. مقدمه

روش‌های زیبرزمینی اهمیت به‌سزایی در مسائل مربوط به امنیت ملی دارند. بدین معنی که این امکان را فراهم می‌سازند تا از تجهیزات نظامی و مکان فرماندهی و کنترل نیروها و تجهیزات نظامی در برابر سلاح‌های دقیق و قوی جدید محافظت به عمل آید. از نقطه نظر دیگر، به دلیل ویژگی ذاتی این تأسیسات امکان شناسایی مکان آن‌ها یک مسئله بسیار پیچیده است که برای نیروهای نظامی یکی از اساسی‌ترین مسائل در زمان جنگ می‌باشد. واضح است که به دلیل استتار این تأسیسات زیرزمینی و وجود اثرات سطحی و زمینی بسیار اندک، شناسایی آنها با استفاده از سنجنده‌های مرئی و حرارتی امکان‌پذیر نیست. از این رو شناسایی این اهداف به یکی از چالش‌های بزرگ و مهم سده اخیر تبدیل شده است [۱].

در میان روش‌هایی که برای شناسایی سازه‌های زیبرزمینی به کار می‌روند، روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری میدان ثقل زمین به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد میدان ثقل از کارایی بالایی برخوردار هستند. در کاربردهای زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی، از داده‌های ثقلی برای کشف گنبدی‌های نمکی و منابع گازی استفاده می‌شود. در این کاربردها، نقشه مربوط به میدان ثقل منطقه اندازه‌گیری می‌شود و از آنجایی که تغییرات میدان ثقل از تغییرات چگالی اجرام موجود در زیر زمین منتج می‌گردد، با آنالیز داده‌های ثقلی اندازه‌گیری شده می‌توان به اطلاعاتی در مورد نوع مواد زیبرزمینی و مکان آن‌ها دست یافت [۲].

روش بررسی شده در این تحقیق برای تشخیص اهداف زیبرزمینی، استفاده از مشاهدات گرادیان جاذبی به جای اندازه‌گیری خود میدان جاذبی می‌باشد. از نقطه نظر ریاضی، میدان جاذبی به صورت مشتق پتانسیل جاذبی و مشتق مرتبه دوم پتانسیل جاذبی (یا مشتق اول مکانی میدان جاذبی) با عنوان تنسور گرادیان جاذبی تعریف می‌شود. از آنجایی که شتاب و میدان ثقل به طور کلی قابل تفکیک از یکدیگر نیستند، تمامی وسایل متحرکی که میدان جاذبی را اندازه‌گیری می‌گیرند با مسئله پیچیده تفکیک شتاب وسیله متحرک از میدان ثقل مشاهده شده سروکار دارند. چون روش گرادیان جاذبی به شتاب وسیله متحرک حساسیت ندارد، به دلیل عدم نیاز به اندازه‌گیری شتاب خود وسیله، استفاده از این روش برای هر وسیله متحرکی ارجحیت دارد. از آنجایی که در روش گرادیان جاذبی تغییرات شتاب ثقل مشاهده می‌شود، این روش در مقابل لرزش و نیروهای جانبی وارده بر وسیله متحرک نیز مصون می‌باشد. همچنین به دلیل اندازه‌گیری تغییرات مکانی میدان جاذبی، دقت و حساسیت این روش به تغییرات چگالی به مراتب بالاتر از روش گرانی‌سنجی است. این ویژگی باعث می‌شود که در روش گرادیان جاذبی فرکانس‌های بالا بهتر قابل مشاهده و تشخیص گردند. از دیگر مزیت‌های روش گرادیان جاذبی می‌توان به انفعالی و خودگردان بودن آن اشاره کرد که نیاز به هر نوع منبع و سامانه بیرونی برای عملیاتی کردن پروژه را برطرف می‌کند [۳].

علاوه بر موارد فوق، در بخشی از تحقیقی استفاده از روش ثقل‌سنجی برای شناسایی اهداف مدفون مورد بررسی قرار گرفته است [۷]. روش کار در این پروژه بیشتر توصیفی بوده و کمتر نتایج عددی ملموس در آن به چشم می‌خورد. در تحقیق دیگری نیز روش‌های مختلف اعم از لرزه‌ای، الکترومغناطیس و گرانی‌سنجی را برای شناسایی سازه‌های زیبرزمینی به طور اجمالی و کلی معرفی شده و برای هر مورد یک شبیه‌سازی ساده انجام شده است [۸]. همچنین در پژوهش دیگری شناسایی سازه‌های مدفون با داده‌های شبیه‌سازی ثقل‌سنجی معرفی شده و با انجام شبیه‌سازی‌هایی مسئله کشف آن‌ها مورد بررسی قرار داده شده است [۹]. باید توجه شود که در تمامی تحقیقات مذکور مسئله شناسایی به صورت مسئله مستقیم بررسی شده است. به عبارت دیگر، با فرض معلوم بودن مشخصات سازه زیبرزمینی مانند اندازه و آنومالی چگالی، سیگنال جاذبی یا گرادیان جاذبی شبیه‌سازی شده است و بر اساس این سیگنال، تحلیل‌هایی در مورد کشف و شناسایی سازه مورد نظر ارائه شده است. در مقاله حاضر، آشکارسازی سازه‌های مدفون به صورت دو مسئله مستقیم و مسئله معکوس مورد بررسی قرار می‌گیرد. در مرحله اول مدل‌سازی سیگنال گرادیان جاذبی حاصل از سازه مدفون ارائه می‌شود. لازم به ذکر است که بر خلاف تحقیقات پیشین، المان‌های جرمی مختلف اعم از جرم نقطه‌ای (کره با چگالی ثابت)، منشور (سازه مکعب) و جرم لایه‌ای برای مدل‌سازی سازه مدفون به کار گرفته می‌شود. سپس در مرحله بعد برای حل مسئله معکوس، تعیین موقعیت سازه مدفون با استفاده از سیگنال گرادیان جاذبی، به روش واهم‌آمیخت اولیتر ارائه می‌شود.

در ادامه ساختار مقاله به شرح زیر است. ابتدا در بخش دوم، مسئله مستقیم، مدل‌سازی اثر جاذبی و گرادیان جاذبی حاصل از المان‌های جرمی مختلف، ارائه می‌شود. بخش سوم به تشریح روش واهم‌آمیخت

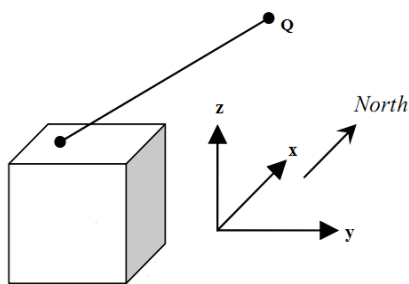
غیرقطری و دو عنصر قطری می‌شود. در ادامه روابط مؤلفه‌های بردار شتاب جاذبی و تنسور گرادیان جاذبی برای المان‌های جرمی مکعبی، جرم نقطه‌ای و جرم لایه‌ای ارائه می‌گردد.

۲-۱. سازه مکعبی (منشور)

سامانه مختصات محلی تعریف شده برای این منظور در امتداد گوشه‌های مکعب قرار دارد. محور z در جهت شعاعی و محورهای x و y در جهت شمال و شرق هستند (شکل (۱)).

پتانسیل مکعب حاصل از انتگرال نیوتون (معادله (۱)) با فرض توزیع جرم همگن برابر است با [۱۲]:

$$V(Q) = G\rho \left[-y z \log(x + \ell) - x y \log(z + \ell) - x z \log(y + \ell) + \frac{x^2}{2} \arctan \frac{y z}{x \ell} + \frac{y^2}{2} \arctan \frac{x z}{y \ell} + \frac{z^2}{2} \arctan \frac{y x}{z \ell} \right]_{x_1, y_1, z_1}^{x_2, y_2, z_2} \quad (4)$$



شکل ۱. سامانه مختصات محلی سازه مکعبی.

مؤلفه‌های بردار جاذبی و تنسور گرادیان جاذبی برای مکعب فوق در روابط زیر آمده است:

$$g_x(Q) = -G \iiint_V \left[\frac{-\rho \cdot \bar{x}}{\ell^3} \right] \cdot dx' dy' dz' = G\rho \cdot \left[\bar{y} \cdot \log(\bar{z} + \ell) + \bar{z} \cdot \log(\bar{y} + \ell) - \bar{x} \cdot \arctan \frac{\bar{y} \cdot \bar{z}}{\bar{x} \cdot \ell} \right]_{x_1, y_1, z_1}^{x_2, y_2, z_2} \quad (5)$$

$$g_y(Q) = -G \iiint_V \left[\frac{-\rho \cdot \bar{y}}{\ell^3} \right] \cdot dx' dy' dz' = G\rho \cdot \left[\bar{z} \cdot \log(\bar{x} + \ell) + \bar{x} \cdot \log(\bar{z} + \ell) - \bar{y} \cdot \arctan \frac{\bar{x} \cdot \bar{z}}{\bar{y} \cdot \ell} \right]_{x_1, y_1, z_1}^{x_2, y_2, z_2} \quad (6)$$

$$g_z(Q) = -G \iiint_V \left[\frac{-\rho \cdot \bar{z}}{\ell^3} \right] \cdot dx' dy' dz' = G\rho \cdot \left[\bar{y} \cdot \log(\bar{x} + \ell) + \bar{x} \cdot \log(\bar{y} + \ell) - \bar{z} \cdot \arctan \frac{\bar{y} \cdot \bar{x}}{\bar{z} \cdot \ell} \right]_{x_1, y_1, z_1}^{x_2, y_2, z_2} \quad (7)$$

$$\Gamma_{xx}(Q) = G \iiint_V \rho \cdot \left[-\frac{1}{\ell^3} + \frac{3\bar{x}^2}{\ell^5} \right] \cdot dx' dy' dz' = G\rho \cdot \arctan \frac{\bar{y} \cdot \bar{z}}{\bar{x} \cdot \ell} \Big|_{x_1, y_1, z_1}^{x_2, y_2, z_2} \quad (8)$$

$$\Gamma_{yy}(Q) = G \iiint_V \rho \cdot \left[\frac{3\bar{y} \cdot \bar{z}}{\ell^5} \right] \cdot dx' dy' dz' = -G\rho \cdot \log(\bar{z} + \ell) \Big|_{x_1, y_1, z_1}^{x_2, y_2, z_2} \quad (9)$$

اولر برای حل مسئله معکوس مکان‌یابی سازه‌های مدفون با استفاده از داده‌های گرادیان جاذبی می‌پردازد. در بخش ۴ نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی مسائل مستقیم و معکوس ارائه می‌شود و سپس به راه‌حل‌های پدافند غیرعامل جهت مقابله با آشکارسازی سازه‌های مدفون اشاره می‌گردد. بخش پایانی هم به نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

۲. مسئله مستقیم: مدل سازی اثر میدان جاذبی و گرادیان جاذبی المان‌های جرمی مختلف

در علم ژئودزی داده‌های جاذبی برای تعیین شکل زمین و در ژئوفیزیک از این مشاهدات برای آشکارسازی ساختار اجرام و مواد زیر زمین استفاده می‌شود. تنسور گرادیان جاذبی مشتق دوم مکانی پتانسیل جاذبه زمین است و حساسیت آن برای آشکارسازی آنومالی‌های جرمی زیر سطح زمین نسبت به داده‌های جاذبی بیشتر است. بنابراین از داده‌های گرادیان جاذبی برای شناسایی دقیق مواد زیر سطح زمین می‌توان استفاده کرد [۱۰].

مدل سازی جاذبه و گرادیان جاذبی روشی برای محاسبه این کمیت‌ها با استفاده از آنومالی جرمی معلوم بر اساس تئوری پتانسیل جاذبی نیوتون می‌باشد. برای مثال با داشتن چگالی ثابت یک لایه و معلوم بودن مرزهای آن جرم می‌توان کمیت‌های فوق را محاسبه کرد.

پتانسیل جاذبی V در نقطه $Q = (x, y, z)$ حاصل از جرم v' را می‌توان به فرم زیر نمایش داد [۱۱]:

$$V(Q) = G \iiint_{v'} \frac{\rho}{\ell} dv' \quad (1)$$

که در آن، $\ell = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$

فاصله بین نقطه محاسباتی Q و نقطه المانی جرم (x', y', z') در سامانه مختصات NEU (محورها در جهت شمال، شرق و بالا) است. ρ دانسیته، $dv' = dx' dy' dz'$ حجمی و G ثابت جاذبی نیوتون می‌باشد. رابطه بردار شتاب جاذبی و تنسور گرادیان جاذبی با پتانسیل عبارت است از:

$$g = (g_x, g_y, g_z)^T = \left(\frac{\partial V}{\partial x}, \frac{\partial V}{\partial y}, \frac{\partial V}{\partial z} \right)^T \quad (2)$$

$$\Gamma = \nabla g^T = \begin{pmatrix} \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} & \frac{\partial^2 V}{\partial xy} & \frac{\partial^2 V}{\partial xz} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial yx} & \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} & \frac{\partial^2 V}{\partial yz} \\ \frac{\partial^2 V}{\partial zx} & \frac{\partial^2 V}{\partial zy} & \frac{\partial^2 V}{\partial z^2} \end{pmatrix} \quad (3)$$

تنسور گرادیان گرانی متقارن است و مجموع عناصر قطری آن در صورت عدم وجود جرم برابر صفر است (معادله لاپلاس). بنابراین فقط ۵ مؤلفه مستقل در تنسور فوق وجود دارد که شامل سه عنصر

$$\Gamma_{xx}(Q) = -G \rho \Delta z \int_{x_1, y_1}^{x_2, y_2} \left[\frac{\bar{x} \bar{y}}{(\bar{x}^2 + \bar{z}^2) \ell} \right] \quad (23)$$

$$\Gamma_{xy}(Q) = G \rho \Delta z \int_{x_1, y_1}^{x_2, y_2} \left[\frac{\bar{x} \bar{y}}{(\bar{x}^2 + \bar{z}^2) \ell} \right] \quad (24)$$

$$\Gamma_{xz}(Q) = -G \rho \Delta z \int_{x_1, y_1}^{x_2, y_2} \left[\frac{\bar{x} \bar{z}}{(\bar{x}^2 + \bar{z}^2) \ell} \right] \quad (25)$$

$$\Gamma_{yy}(Q) = -G \rho \Delta z \int_{x_1, y_1}^{x_2, y_2} \left[\frac{\bar{x} \bar{y}}{(\bar{y}^2 + \bar{z}^2) \ell} \right] \quad (26)$$

$$\Gamma_{yz}(Q) = -G \rho \Delta z \int_{x_1, y_1}^{x_2, y_2} \left[\frac{\bar{x} \bar{z}}{(\bar{y}^2 + \bar{z}^2) \ell} \right] \quad (27)$$

$$\Gamma_{zz}(Q) = G \rho \Delta z \int_{x_1, y_1}^{x_2, y_2} \left[\frac{\bar{x} \bar{x} (\bar{x}^2 + \bar{y}^2 + 2\bar{z}^2)}{(\bar{x}^2 + \bar{z}^2)(\bar{y}^2 + \bar{z}^2) \ell} \right] \quad (28)$$

۳. مسئله معکوس: تعیین موقعیت اهداف زیرزمینی به روش

واهم آمیخت اوپلر با استفاده از داده های گرادیان جاذبی

روش واهم آمیخت اوپلر حدود نیم قرن است که در ژئوفیزیک بر روی داده های مغناطیسی و جاذبی اعمال می شود. هود [۱۳] برای اولین روش این روش را بر روی داده های مغناطیسی پیاده کرد و شاخص ساختاری^۱ را برای قطب نقطه ای و دو قطبی به دست آورد. تامسون [۱۴] این روش را بهبود داد و آن را بر روی داده های شبیه سازی شده و واقعی مغناطیسی اعمال کرد. رید [۱۵] روش را برای کاربردهای سه بعدی تعمیم داد و همچنین پیشنهاد داد که از این روش برای مشاهدات جاذبی و گرادیان جاذبی بهره برداری شود.

واهم آمیخت اوپلر روشی است که برای مکان یابی منبع تولید کننده آنومالی جاذبی یا مغناطیسی به کار گرفته می شود. فرض واهم آمیخت اوپلر این است که چنین آنومالی های از منابع ساده بسیاری تولید می شوند. فرم عمومی معادله اوپلر عبارت است از:

$$r \cdot \nabla f = -n f \quad (29)$$

هر تابع f را که در معادله اوپلر صدق کند، تابعی همگن از درجه n می نامند. درجه n معیاری از نرخ تغییرات با زیاد شدن فاصله نقطه مشاهداتی از منبع می باشد. به همین دلیل آن را شاخص ساختاری می گویند. در جدول (۱) شاخص ساختاری چند منبع برای میدان گرادیان جاذبی ذکر شده است [۱۶].

نمایشی دیگر از معادله اوپلر که درک راحت تری از مسئله به دست می دهد به شکل زیر است:

$$(x - x_0) \frac{\partial f}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial f}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial f}{\partial z} = -n f$$

که در آن، (x_0, y_0, z_0) موقعیت منبع و (x, y, z) موقعیت

$$\Gamma_{xz}(Q) = G \iiint_V \rho \left[\frac{3\bar{x} \cdot \bar{z}}{\ell^5} \right] dx' dy' dz' = -G \rho \cdot \log(\bar{y} + \ell) \Big|_{x_1, y_1, z_1}^{x_2, y_2, z_2} \quad (10)$$

$$\Gamma_{yy}(Q) = G \iiint_V \rho \left[-\frac{1}{\ell^3} + \frac{3\bar{y}^2}{\ell^5} \right] dx' dy' dz' = G \rho \cdot \arctan \frac{\bar{x} \cdot \bar{z}}{\bar{y} \cdot \ell} \Big|_{x_1, y_1, z_1}^{x_2, y_2, z_2} \quad (11)$$

$$\Gamma_{yz}(Q) = G \iiint_V \rho \left[\frac{3\bar{y} \cdot \bar{z}}{\ell^5} \right] dx' dy' dz' = -G \rho \cdot \log(\bar{x} + \ell) \Big|_{x_1, y_1, z_1}^{x_2, y_2, z_2} \quad (12)$$

$$\Gamma_{zz}(Q) = G \iiint_V \rho \left[-\frac{1}{\ell^3} + \frac{3\bar{z}^2}{\ell^5} \right] dx' dy' dz' = G \rho \cdot \arctan \frac{\bar{y} \cdot \bar{x}}{\bar{z} \cdot \ell} \Big|_{x_1, y_1, z_1}^{x_2, y_2, z_2} \quad (13)$$

۲-۲. جرم نقطه ای

اثر جاذبی اجرام دور دست را می توان با جرم نقطه ای تقریب زد. مکان جرم نقطه ای در مرکز ثقل جرم مورد نظر و جرم آن برابر با آن است. پتانسیل جرم نقطه ای برابر است با [۸]:

$$V(Q) = \frac{GM}{\ell} \quad (14)$$

بردار جاذبی از رابطه زیر:

$$\begin{pmatrix} g_x \\ g_y \\ g_z \end{pmatrix} = \frac{GM}{\ell^3} \begin{pmatrix} -x \\ -y \\ -z \end{pmatrix} \quad (15)$$

و مؤلفه های تنسور از معادلات زیر محاسبه می شوند.

$$\Gamma_{xx}(Q) = GM \times \left[-\frac{1}{\ell^3} + \frac{3\bar{x}^2}{\ell^5} \right] \quad (16)$$

$$\Gamma_{xy}(Q) = GM \cdot \left[\frac{3\bar{x} \bar{y}}{\ell^5} \right] \quad (17)$$

$$\Gamma_{xz}(Q) = GM \cdot \left[\frac{3\bar{x} \bar{z}}{\ell^5} \right] \quad (18)$$

$$\Gamma_{yy}(Q) = GM \cdot \left[-\frac{1}{\ell^3} + \frac{3\bar{y}^2}{\ell^5} \right] \quad (19)$$

$$\Gamma_{yz}(Q) = GM \cdot \left[\frac{3\bar{y} \bar{z}}{\ell^5} \right] \quad (20)$$

$$\Gamma_{zz}(Q) = GM \cdot \left[-\frac{1}{\ell^3} + \frac{3\bar{z}^2}{\ell^5} \right] \quad (21)$$

در حالی که هدف از محاسبه معادلات فوق، کره همگن با شعاع R و چگالی ρ باشد، جرم از رابطه $M = \frac{4}{3} \pi \rho R^3$ محاسبه می شود.

۳-۲. جرم لایه ای

با فرض قابل اغماض بودن ارتفاع لایه Δz نسبت به طول و عرض آن، اثر مربوط به جرم لایه ای را می توان از معادلات مربوط به مکعب استخراج کرد [۱۲]. پتانسیل این المان برابر است با:

$$V(Q) = G \rho \Delta z \left[\bar{x} \log(\bar{y} + \ell) + \bar{y} \log(\bar{x} + \ell) - \bar{z} \arctan \frac{\bar{x} \bar{y}}{\bar{z} \ell} \right] \Big|_{x_1, y_1, z_1}^{x_2, y_2, z_2} \quad (22)$$

تنسور گرادیان جاذبی مربوطه در معادلات زیر آمده است:

¹ Structural Index

کمترین مربعات آن از معادله (۳۲) برآورد می‌شود.

$$X = (A^T A)^{-1} A^T Y \quad (33)$$

روش واهم‌آمیخت اوپلر پنجره‌ای با طول مشخص از داده‌ها در نظر گرفته و دستگاه معادلات (۳۲) را برای آن حل کرده و موقعیت منبع را برآورد می‌کند. سپس پنجره مورد نظر را به سمت جلو حرکت داده و جواب جدیدی با استفاده از داده‌های قرار گرفته در پنجره جدید به دست می‌آورد. بنابراین ما یک بردار از جواب‌ها برای موقعیت منبع در اختیار داریم که باید با استفاده از یک روش مناسب مکان منبع‌های احتمالی را تعیین کنیم. لازم به ذکر است که اگر منبع موجود باشد جواب‌های مسئله مورد نظر به سمت یک نقطه خاص همگرا می‌شود. در این مقاله از دو روش ساده برای تعیین موقعیت منبع احتمالی از بین تمامی جواب‌ها استفاده شده است.

روش اول رستر نام دارد. در این روش تمامی جواب‌هایی که در یک سلول رستری قرار می‌گیرند شمرده می‌شوند و هر سلول به نسبت تعداد جواب موجود در آن رنگ خاصی می‌پذیرد. واضح است که سلول با تعداد جواب بیشتر منبع احتمالی می‌باشد.

روش دوم مجموع معکوس فاصله‌ها نام دارد. در این روش مجموع معکوس فاصله تمامی جواب‌ها از جواب i به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$d_i = \sum_{j=1}^M \frac{1}{\sqrt{(r_i - r_j)}} \quad (34)$$

که در آن، r بردار جواب مورد نظر و M تعداد کل جواب‌ها می‌باشد. مجموع تمام d_j ها بردار d را می‌سازد. رابطه (۳۳) برای نقطه‌ای که در مجاورت نقاط دیگر قرار دارد مقدار بیشتری دارد و برای نقاط ایزوله مقدار دارای کمتری می‌باشد. برای یافتن منبع احتمالی تمام جواب‌هایی که d_i آنها از میانه بردار d کمتر باشد، از مسئله حذف می‌شوند. در اکثر موارد بیشتر نقاط شرط فوق را دارا نبوده و در نتیجه به عنوان منبع احتمالی در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین نقاط زیادی به عنوان جواب احتمالی باقی مانده که با هم هم‌پوشانی دارند.

۴. نتایج عددی

در این بخش نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده برای بررسی و تحلیل مسئله آشکارسازی سازه‌های مدفون ارائه می‌شود. ابتدا با استفاده از مسئله مستقیم و سپس به وسیله مسئله معکوس به تحلیل این موضوع پرداخته می‌شود.

۴-۱. نتایج مسئله مستقیم

در این قسمت مدل‌سازی اثر جاذبی و گرادیان جاذبی حاصل از المان‌های جرمی سازه مکعبی و سازه کروی (متناظر با جرم نقطه‌ای متمرکز در مرکز کره با جرمی برابر با آن) با در نظر گرفتن متغیرهای مختلف مسئله اعم از عمق و اندازه سازه و ارتفاع پرواز شبیه‌سازی می‌شود.

نقطه مشاهداتی است [۱۷]. برای محاسبه واهم‌آمیخت اوپلر یک نکته ظریف باید رعایت شود. میدان f را باید به صورت مجموع یک میدان پایه ثابت و یک میدان باقی‌مانده متغیر نوشت. بنابراین داریم:

$$(x - x_0) \frac{\partial \Delta f}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial \Delta f}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial \Delta f}{\partial z} = -n(\Delta f + B) \quad (30)$$

که در آن، B همان میدان پایه ثابت می‌باشد.

برای بهره‌برداری از این روش برای مشاهدات گرادیان جاذبی، از آنجایی که مشتق مکانی هر تابع همگن خود تابعی همگن است، به سادگی با استفاده از $\Delta f = T_z$ داریم:

$$(x - x_0) T_{xz} + (y - y_0) T_{yz} + (z - z_0) T_{zz} = -n(T_z + B_z) \quad (31)$$

به صورت مشابه می‌توان روابط زیر را به دست آورد:

$$(x - x_0) T_{xy} + (y - y_0) T_{yy} + (z - z_0) T_{zy} = -n(T_y + B_y)$$

$$(x - x_0) T_{xx} + (y - y_0) T_{yx} + (z - z_0) T_{zx} = -n(T_x + B_x)$$

جدول ۱. شاخص ساختاری چند منبع مختلف برای گرادیان جاذبی

n	نوع منبع
۰/۵	روبان، نوار
۱	جرم خطی
۲	جرم نقطه‌ای

بنابراین از تمامی مؤلفه‌های تنسور گرادیان جاذبی می‌توان بهره برد. در این مقاله از معادله (۳۱) برای مکان‌یابی منبع استفاده شده است. لازم به ذکر است که T در روابط فوق همان آنومالی پتانسیل می‌باشد.

از آنجایی که چهار مجهول در معادله اوپلر وجود دارد مسئله مورد نظر بیشتر از تعداد مجهولات مشاهده داراست. به همین دلیل دستگاه معادلات مربوطه به روش کمترین مربعات حل می‌شود. با فرض موجود بودن N نقطه مشاهداتی معادله (۳۱) به شکل دستگاه معادلات زیر بازنویسی می‌شود:

$$\begin{pmatrix} T_{xz,1} & T_{yz,1} & T_{zz,1} & -n \\ & \dots & & \\ T_{xz,N} & T_{yz,N} & T_{zz,N} & -n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \\ B_z \end{pmatrix} \quad (32)$$

$$= \begin{pmatrix} xT_{xz,1} + yT_{yz,1} + zT_{zz,1} + nT_{z,1} \\ \dots \\ xT_{xz,N} + yT_{yz,N} + zT_{zz,N} + nT_{z,N} \end{pmatrix}$$

فرم ماتریسی معادله (۳۱) به صورت $Y = AX$ است که جواب

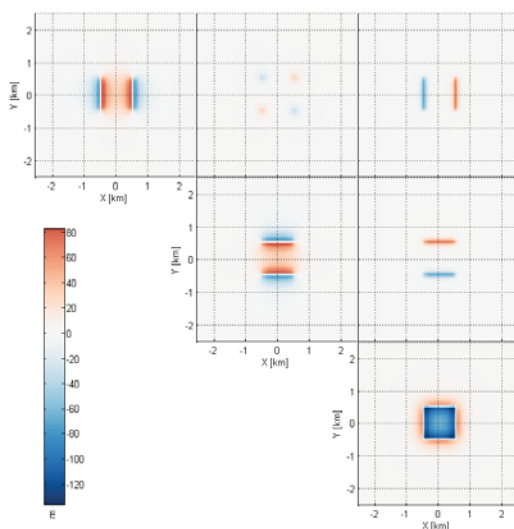
نتایج عددی مربوط به آنالیز حساسیت فوق در جدول (۲) آمده است. در این جدول بیشترین دامنه سیگنال ارتفاعی تنسور در هر یک از نه مورد فوق ذکر شده است. به عنوان مثال از توجه به این جدول می‌توان به این نتیجه رسید که اگر سازه مورد نظر ما در عمق ۱۰۰ متری ساخته شود و هواپیما در ارتفاع ۱۰۰۰ متری بر فراز منطقه پرواز کند، با فرض سطح نویز حدود ۲ تا ۳ اتووش، سازه مورد نظر قابل کشف نخواهد بود. ولی اگر ارتفاع پرواز حدود ۵۰۰ متر باشد به احتمال زیاد سازه مورد نظر امکان آشکارسازی را خواهد داشت.

بنابراین با در نظر گرفتن اختلاف چگالی سازه مورد نظر با محیط اطراف، ابعاد سازه و عمق آن می‌توان به شبیه‌سازی داده‌های گرادیان جاذبی با سطح نویزهای مختلف در ارتفاع‌های متفاوت پرداخت و احتمال کشف آن‌ها را مورد بررسی قرار داد، تا بتوان راهکار پدافندی مناسبی را برای کاهش احتمال کشف این سازه‌های مدفون توسط دشمن ارائه داد. بدین منظور در ادامه روش‌هایی برای کاهش احتمال کشف این سازه‌ها ارائه می‌شود.

جدول ۲. بیشترین دامنه سیگنال گرادیان جاذبی ارتفاعی (T_{zz}) با واحد اتووش با تغییر عمق سازه و ارتفاع پرواز

ارتفاع پرواز (متر)			عمق سازه (متر)
۱۰۰۰	۵۰۰	۱۰۰	
۴/۲	۱۴/۵	۴۴/۶	۵۰
۳/۸	۱۲/۷	۳۶/۰	۱۰۰
۳/۴	۱۱/۱	۳۰/۹	۱۵۰

یکی از مناسب‌ترین راهکارهای پدافند غیرعامل در برابر کشف سازه‌های زیرزمینی به وسیله گرادیان سنج گرانی افزایش عمق سازه مورد نظر است. واضح است که با افزایش عمق سازه امکان کشف آن کاهش می‌یابد.

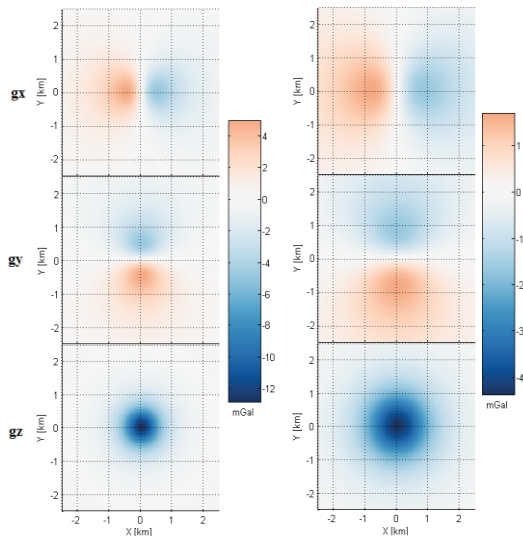


شکل ۲. تنسور گرادیان جاذبی حاصل از سازه مکعبی در سطح زمین

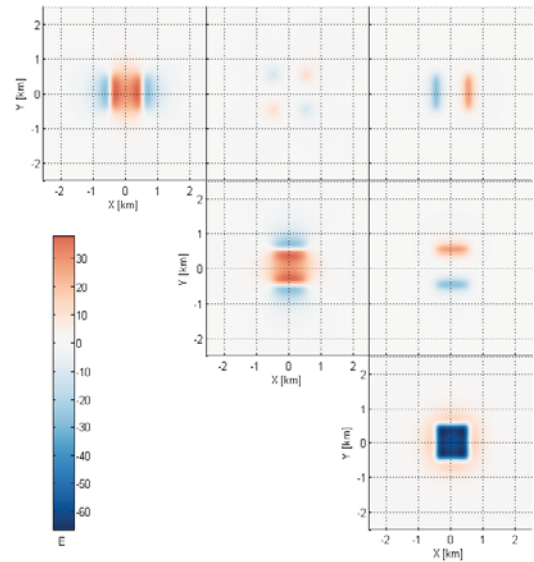
به همین منظور ابتدا سازه‌ای مکعبی با طول و عرض یک کیلومتر و ارتفاع ۵۰ متر که مرکز ثقل آن در عمق ۷۵ متری قرار دارد، شبیه‌سازی شده است. اختلاف چگالی بین سازه مورد نظر و محیط اطراف 1800 kg/m^3 در نظر گرفته شده است. تنسور گرادیان جاذبی (شامل سه مؤلفه قطری و سه مؤلفه غیرقطری) حاصل از جرم فوق در ارتفاع‌های مختلف از سطح زمین (ارتفاع صفر) تا ارتفاع ۱۰۰۰ متری محاسبه شده با استفاده از معادلات (۱۳-۸) در شکل‌های (۵-۲) نشان داده شده است. همان‌گونه که در این شکل‌ها مشخص است دامنه سیگنال مؤلفه شعاعی تنسور (T_{zz}) بیشتر از سایر مؤلفه‌ها است. همچنین معلوم می‌شود که تنها مؤلفه شعاعی تنسور دارای توزیعی همگن در همه جهت‌ها می‌باشد. تغییرات دامنه سیگنال گرادیان جاذبی با افزایش ارتفاع با ضریب r^{-3} کاهش می‌یابد. به عنوان مثال حداکثر دامنه سیگنال مربوط به مؤلفه ارتفاعی تنسور (T_{zz}) با افزایش ارتفاع وسیله مشاهده کننده (مانند هواپیما یا پهباد) از سطح زمین به ارتفاع ۱۰۰۰ متری از ۱۳۰ اتووش به ۶ اتووش کاهش می‌یابد (هر اتووش E معادل 10^9 S^{-2} می‌باشد). بنابراین اگر سطح نویز گرادیان سنج گرانی مورد استفاده برای اندازه‌گیری گرادیان‌های جاذبی حدود ۵ اتووش و ارتفاع پرواز از ۱۰۰۰ متر بیشتر باشد، امکان آشکارسازی سازه مورد نظر وجود نخواهد داشت.

در مرحله بعد سازه‌ای کروی با شعاع ۵۰۰ متر در عمق ۷۰۰ متری با اختلاف چگالی معادل مکعب شبیه‌سازی پیشین در نظر گرفته شده است. ابتدا بردار جاذبی حاصل از این سازه در سطح زمین و در ارتفاع ۵۰۰ متری مدل‌سازی شده و در شکل ۶ نمایش داده شده است. سپس تنسور گرادیان جاذبی در ارتفاع‌های ۱۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری تعیین و در شکل‌های (۱۰-۷) ترسیم شده است. از مقایسه بردار جاذبی و تنسور گرادیان جاذبی حساسیت بالاتر و قدرت آشکارسازی بیشتر مشاهدات گرادیان جاذبی مشخص می‌شود. همچنین همانند سازه مکعبی، کاهش دامنه سیگنال و میرایی آن با افزایش ارتفاع آشکار است.

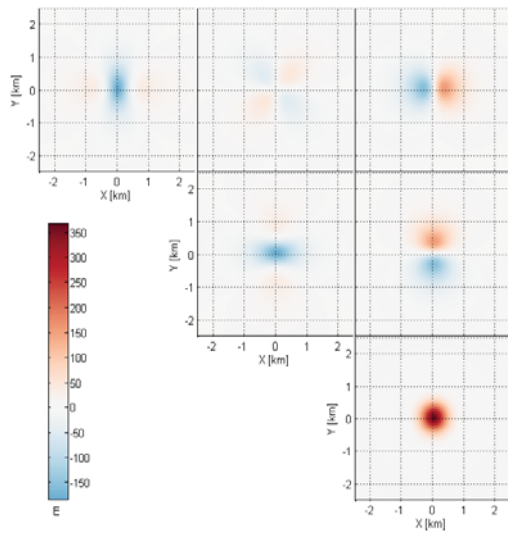
برای بررسی دقیق‌تر مسئله آشکارسازی سازه‌های مدفون و اثر پارامترهای مختلف بر روی آن از آنالیز حساسیت استفاده شده است. با استفاده از این آنالیز، اثر تغییر پارامترهای عمق سازه و ارتفاع پرواز مورد بررسی قرار می‌گیرد تا مشخص شود که سازه مورد نظر ما باید در چه عمقی ساخته شود تا قابلیت آشکارسازی از ارتفاعی معلوم را نداشته باشد. برای این منظور سازه‌ای مکعبی با طول و عرض یک کیلومتری و ارتفاع ۳۰ متری شبیه‌سازی شده است. با تغییر عمق سازه از ۵۰ به ۱۰۰ و ۱۵۰ متر و تغییر ارتفاع پرواز از ۱۰۰ به ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متری، تغییرات سیگنال مؤلفه ارتفاعی تنسور گرادیان جاذبی (که مؤلفه با بیشترین دامنه می‌باشد) در شکل (۱۱) رسم شده است. این شکل چگونگی میرایی سیگنال با افزایش عمق سازه و افزایش ارتفاع پرواز را نمایش می‌دهد و ایده مناسبی برای بررسی مسئله آشکارسازی سازه‌های مدفون به دست می‌دهد.



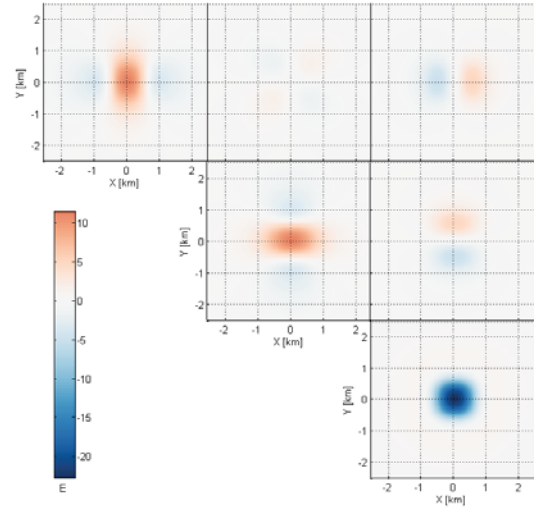
شکل ۶. بردار شتاب جاذبی حاصل از جرم کروی در سطح زمین (شکل راست) و ارتفاع ۵۰۰ متری (شکل چپ)



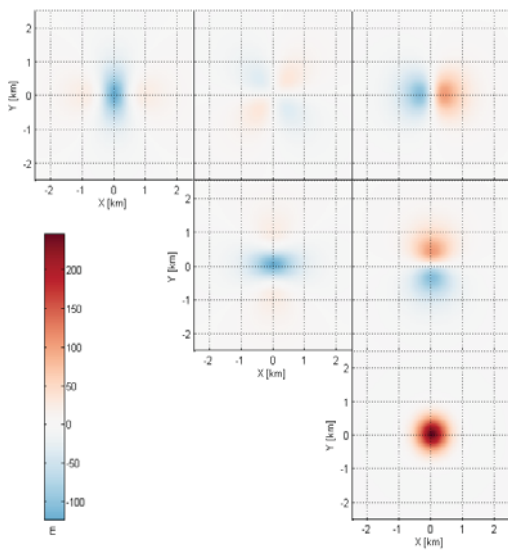
شکل ۳. تانسور گرادیان جاذبی حاصل از سازه مکعبی در ارتفاع ۱۰۰ متری



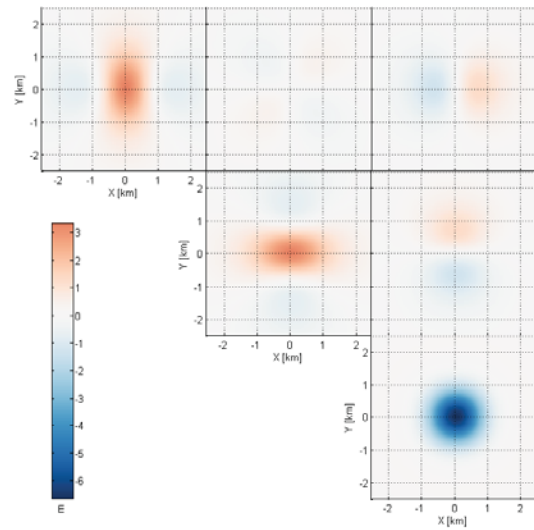
شکل ۷. تانسور گرادیان جاذبی حاصل از سازه کروی در سطح زمین



شکل ۴. تانسور گرادیان جاذبی حاصل از سازه مکعبی در ارتفاع ۵۰۰ متری



شکل ۸. تانسور گرادیان جاذبی حاصل از سازه کروی در ارتفاع ۱۰۰ متری



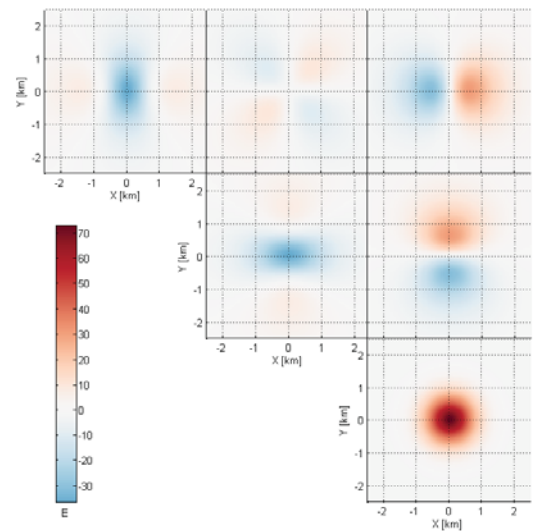
شکل ۵. تانسور گرادیان جاذبی حاصل از سازه مکعبی در ارتفاع ۱۰۰۰ متری

از آنجایی که سیگنال جذبی تولید شده از سازه مدفون به اختلاف چگالی آن با محیط اطراف ارتباط مستقیم دارد، می‌توان راهکارهایی نیز در این زمینه ارائه داد [۹]. به عنوان مثال می‌توان سازه‌هایی با اختلاف چگالی مثبت بالا نسبت به محیط در اطراف سازه مورد نظر ساخت تا با تغییر چگالی محیط امکان آشکارسازی دشوارتر شود. همچنین می‌توان سازه مورد نظر را به چند قسمت کوچک‌تر تقسیم کرد و از دیواره‌های بتونی با چگالی بالا در اطراف آنها استفاده کرد تا شناسایی آنها به راحتی صورت نگیرد. علاوه بر موارد فوق، از آنجایی که در بعضی مکان‌ها که زمین از جرمی با چگالی خاصی تشکیل شده است می‌توان سازه‌ای را در عمق مشخص ساخت که به دلیل خنثی شدن اختلاف چگالی سازه مورد نظر با محیط اطراف امکان کشف آن مشکل‌تر باشد. در تمامی موارد فوق باید پیش از ساخت سازه، با استفاده از روش ارائه شده در این مقاله، مسئله مورد نظر شبیه‌سازی شود و احتمال کشف سازه با تغییر تمامی پارامترها مورد بررسی قرار گیرد.

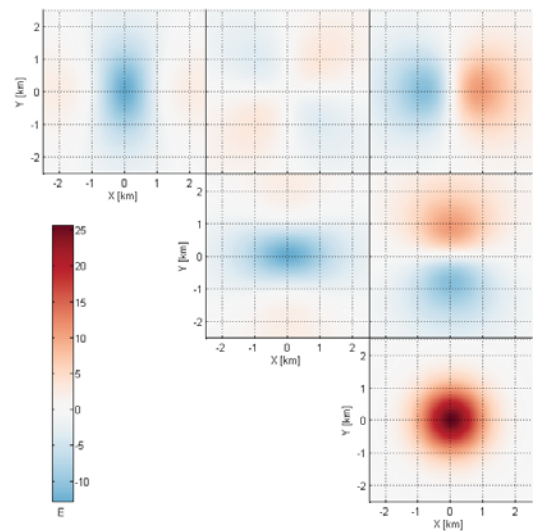
۴-۲. نتایج مسئله معکوس

در بخش ۴-۱ ابعاد و موقعیت سازه زیرزمینی معلوم در نظر گرفته شد و سیگنال گرادیان جذبی حاصل از آن مدل‌سازی گردید. در این بخش مسئله به صورت معکوس در نظر گرفته می‌شود. بدین معنی که با معلوم بودن سیگنال گرادیان جذبی، به تعیین موقعیت سازه مدفون با استفاده از حل دستگاه معادلات (۳۱) پرداخته می‌شود. لازم به ذکر است که مسئله تعیین موقعیت سازه در این بخش به صورت دو بعدی (در صفحه XZ) حل شده است. سازه مورد نظر در این بخش به صورت کره‌ای با شعاع ۱۵۰ متر در عمق ۲۰۰ متری و با اختلاف چگالی kg/m^3 ۱۸۰۰- نسبت به محیط اطراف شبیه‌سازی شده است. لازم به ذکر است که سیگنال گرادیان جذبی حاصل از این سازه تقریباً معادل سیگنال تولید شده از سازه‌ای مکعبی با طول و عرض یک کیلومتر و ارتفاع ۳۰ متر در عمق ۵۰ متری می‌باشد. تمامی مشاهدات تولید شده در ارتفاع ۱۰۰ متری از سطح زمین در محدوده‌ای به مساحت چهار در چهار کیلومتر شبیه‌سازی شده است.

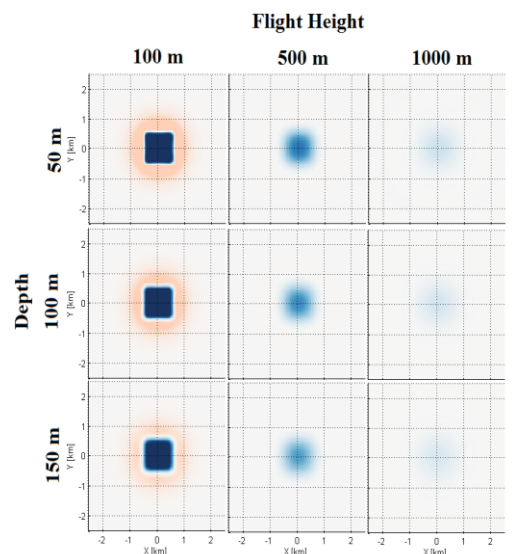
تمامی نتایج ارائه شده در این بخش به صورت یک شکل که شامل پنج قسمت است، ارائه می‌شود. در قسمت اول از بالا سیگنال T_z با رنگ آبی و طول پنجره در نظر گرفته شده برای حل مسئله و به دست آوردن موقعیت منبع با رنگ قرمز نشان داده شده است. قسمت دوم از بالا سیگنال T_{xz} با رنگ سیاه و T_{zz} با رنگ قرمز را نشان می‌دهد. در قسمت سوم از بالا (قسمت میانی هر شکل) سازه کروی و تمامی جواب‌های به دست آمده حاصل از حل معادلات واهم‌آمیخت اوپلر برای مشاهدات قرار گرفته در هر پنجره را نمایش می‌دهد (به دلیل یکسان نبودن مقیاس دو محور، کره به صورت بیضی نمایش داده شده است). در قسمت‌های چهارم و پنجم به ترتیب نتایج حاصل از الگوریتم‌های رستر و فاصله معکوس برای یافتن موقعیت نهایی سازه آمده است.



شکل ۹. تانسور گرادیان جذبی حاصل از سازه کروی در ارتفاع ۵۰۰ متری



شکل ۱۰. تانسور گرادیان جذبی حاصل از سازه کروی در ارتفاع ۱۰۰۰ متری

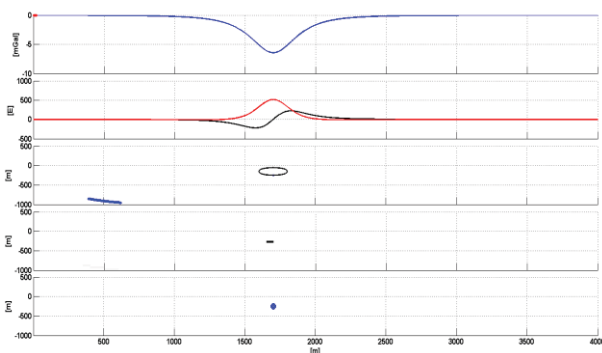


شکل ۱۱. آنالیز حساسیت مسئله آشکارسازی سازه مدفون مکعبی در عمق و ارتفاع پرواز مختلف

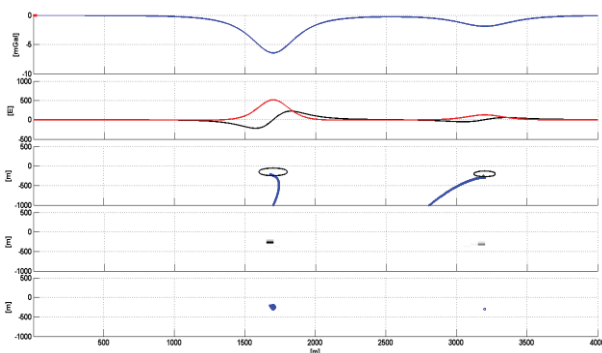
محاسبات مربوط به تعیین موقعیت منبع با استفاده از مشاهدات گرادیان جاذبی به روش واهم‌آمیخت اویلر طول پنجره یکی از پارامترهای مهم در مسئله می‌باشد که باید با در نظر گرفتن اندازه سیگنال و دامنه نویز مشاهدات به روش آزمون و خطا مشخص شود.

در این مرحله شبیه‌سازی‌های فوق را به چند منبع با اندازه مختلف و در عمق‌های متفاوت تعمیم می‌دهیم. بدین منظور چهار منبع که به ترتیب با افزایش عمق اندازه آنها هم بزرگ‌تر می‌شود، در نظر گرفته و نویز ۱۰٪ به سیگنال مربوطه اضافه می‌کنیم. نتایج حاصله با طول پنجره ۹۴۱ در شکل (۱۹) آمده است. این شکل نشان می‌دهد که موقعیت منبع اول و دوم (از سمت چپ) نسبت به دو منبع دیگر بهتر تعیین شده است. همچنین برای منبع دوم (از سمت چپ) دقت جواب روش فاصله معکوس از روش رستر بیشتر است. در شبیه‌سازی بعد، دو منبع سوم و چهارم در مجاورت یکدیگر قرار می‌گیرند (شکل (۲۰)) تا نشان داده شود که به دلیل طول پنجره بالا (۹۴۱) امکان تفکیک دو منبع از یکدیگر وجود ندارد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در انتخاب پارامتر طول پنجره، علاوه بر دامنه سیگنال و نویز باید فاصله احتمالی منابع زیرزمینی از همدیگر را هم مد نظر قرار داد.

در انتها در یک شبیه‌سازی با استفاده از دو منبع اثر افزایش سطح نویز مشاهدات مورد بررسی قرار می‌گیرد. با افزایش سطح نویز از ۱۰٪ به ۲۰٪ و ۳۰٪، مشاهده می‌شود (شکل (۲۲-۲۰)) که اولاً از دقت موقعیت برآورد شده کاسته شده و ثانیاً تعداد جواب‌های اشتباه به دست آمده افزایش می‌یابد.



شکل ۱۲. شبیه‌سازی با تک منبع



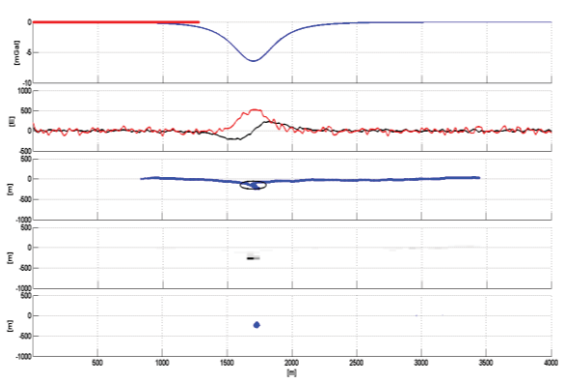
شکل ۱۳. شبیه‌سازی با دو منبع

اولین شبیه‌سازی برای تست صحت روش واهم‌آمیخت اویلر برای تعیین موقعیت منبع در نظر گرفته شده است. بدین منظور منبعی در موقعیت مکانی طول ۱۷۰۰ متری و در عمق ۱۵۰ متری شبیه‌سازی شده است. نتایج حاصل از اعمال روش واهم‌آمیخت اویلر بر روی داده‌های شبیه‌سازی شده حاصل از این منبع با طول پنجره ۲۱ در شکل (۱۲) نشان داده شده است. واضح است که الگوریتم مورد نظر موقعیت سازه را در هر دو روش رستر و فاصله معکوس با دقت تعیین کرده است. این شبیه‌سازی صحت روش مورد استفاده را نشان می‌دهد.

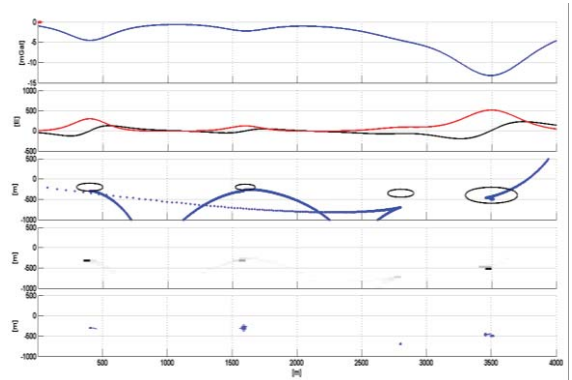
حال کارایی این روش را برای مسئله‌ای با چند منبع ارزیابی می‌کنیم. ابتدا دو منبع در عمق ۱۵۰ و ۲۰۰ متری و به ترتیب با شعاع ۲۰۰ و ۱۵۰ متری در نظر می‌گیریم. نتیجه حاصله در شکل (۱۳) آمده است. در مرحله بعد برای پیچیده کردن مسئله، چهار منبع با ابعاد مختلف در عمق‌های متفاوت از ۱۵۰ تا ۴۰۰ متری شبیه‌سازی می‌شود. موقعیت برآورد شده منبع‌ها در شکل (۱۴) نشان داده شده است. همان‌گونه که مشخص است دقت جواب‌های حاصل از دو روش رستر و فاصله معکوس تقریباً با هم برابر است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که روش واهم‌آمیخت اویلر برای مسئله یا چند منبع هم کارایی بالایی دارد و امکان تعیین موقعیت سازه‌های زیر زمینی را فراهم می‌سازد.

برای بررسی اثر اختلاف چگالی منبع، در شکل (۱۵) مسئله‌ای طراحی شده است که در آن منبع سوم از سمت چپ دارای چگالی 1500 kg/m^3 می‌باشد. نتایج حاصله نشان می‌دهد که کارایی و دقت روش در این مورد هم قابل قبول است. گرچه در این مورد بعضی جواب‌های نادرست هم از روش معکوس فاصله حاصل شده است، ولی در کل موقعیت منبع با دقتی مناسب برآورد شده است.

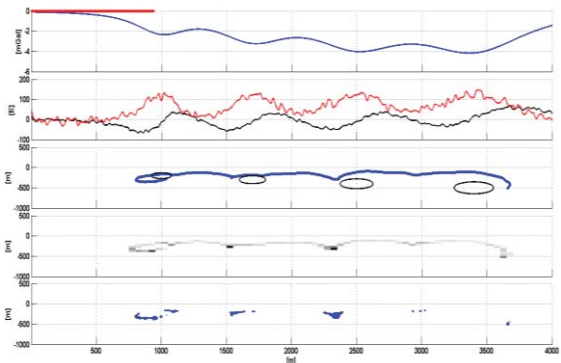
در تمامی شبیه‌سازی‌های فوق مشاهدات بدون وجود نویز شبیه‌سازی شده‌اند و طول پنجره ۲۱ است. حال برای بررسی اثر طول پنجره بر روی داده‌های نویزی چند شبیه‌سازی انجام می‌شود. برای این منظور گرادیان‌های جاذبی حاصل از سازه شبیه‌سازی اول (شکل (۱۲)) به نویزی که دامنه آن ۱۰٪ دامنه سیگنال است آغشته می‌شوند. سپس جواب مسئله با طول پنجره‌های مختلف، از ۲۱ به بالا، برآورد می‌شود. نتایج نشان می‌دهد که تا طول پنجره ۳۲۱ جواب حاصله دارای دقت و صحت کافی نمی‌باشد (به همین دلیل این نتایج در این مقاله نمایش داده نشده‌اند). نتایج برای پنجره با طول ۳۲۱ در شکل (۱۶) نشان داده شده است. همان‌گونه که از این شکل مشخص است موقعیت تقریبی منبع برآورد شده است ولی در ابتدا و انتهای بازه مشاهداتی جواب‌های اشتباه زیادی به دست آمده‌اند که ممکن است باعث تصمیم‌گیری اشتباه شوند. برای بررسی بیشتر اثر طول پنجره بر روی مسئله کشف سازه مدفون، طول پنجره را به ۶۴۱ و ۱۲۸۱ افزایش می‌دهیم. نتایج مربوط به این دو طول پنجره به ترتیب در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) آمده است. همان‌گونه که از توجه به این شکل‌ها مشخص می‌شود، با افزایش طول پنجره از تعداد جواب‌های اشتباه کاسته می‌شود، به گونه‌ای که برای طول پنجره ۱۲۸۱ تقریباً هیچ جواب اشتباهی برآورد نشده است. بنابراین در



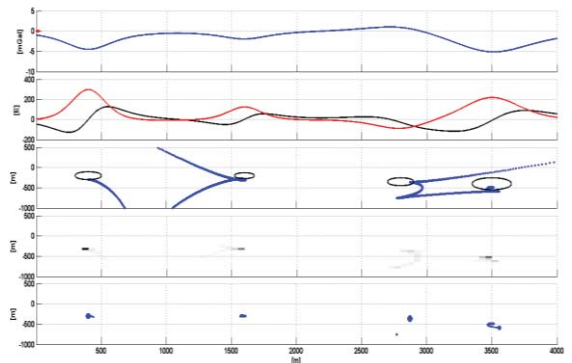
شکل ۱۸. شبیه‌سازی با داده نویزی طول پنجره ۱۲۸۱



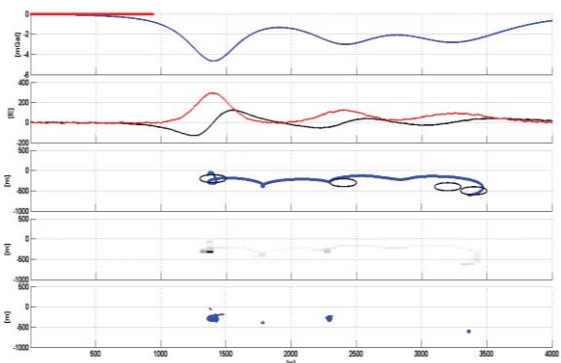
شکل ۱۴. شبیه‌سازی با چهار منبع



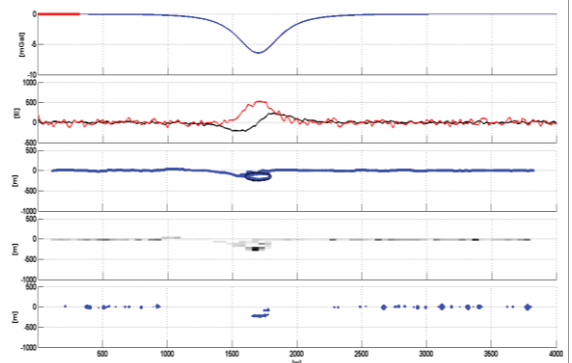
شکل ۱۹. شبیه‌سازی با داده نویزی و چهار منبع. طول پنجره ۹۴۱



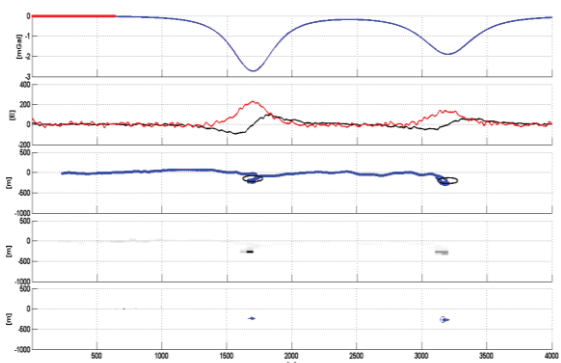
شکل ۱۵. شبیه‌سازی با چهار منبع. منبع سوم از چپ با چگالی مثبت



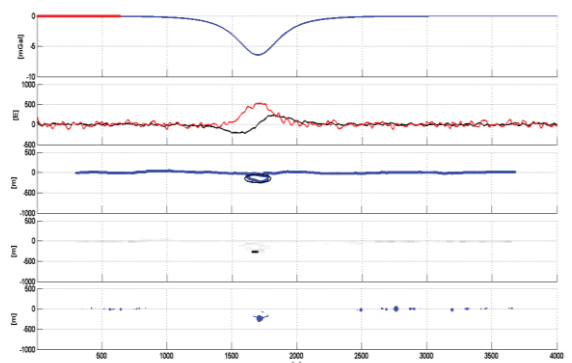
شکل ۲۰. شبیه‌سازی با داده نویزی و دو منبع نزدیک به هم طول پنجره ۹۴۱



شکل ۱۶. شبیه‌سازی با داده نویزی. طول پنجره ۳۲۱



شکل ۲۱. شبیه‌سازی با داده نویزی ۱۰٪. طول پنجره ۶۴۱

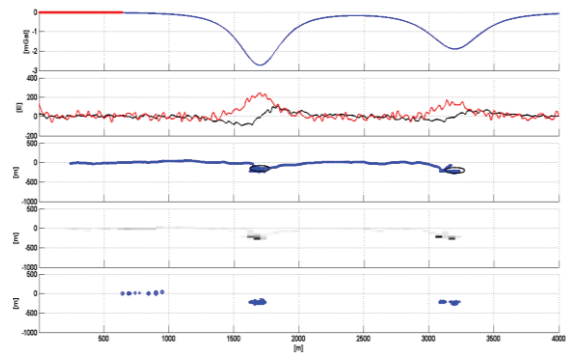


شکل ۱۷. شبیه‌سازی با داده نویزی. طول پنجره ۶۴۱

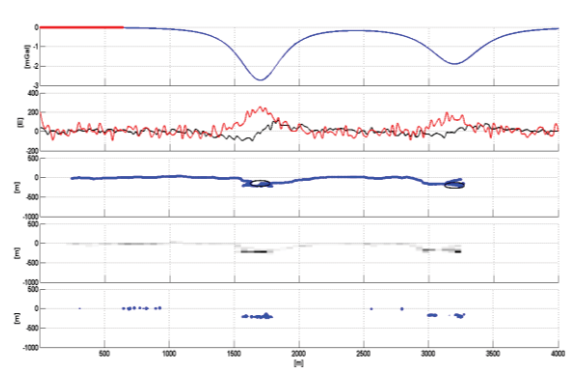
کشف سازه‌های زیرزمینی ارائه شد. یکی از بهترین راهکارها در این زمینه می‌تواند افزایش عمق سازه است. همچنین به دلیل رابطه مستقیم سیگنال جاذبی با اختلاف چگالی سازه مدفون با محیط اطراف، می‌توان سازه‌هایی با اختلاف چگالی بالا در مجاورت سازه مورد نظر ساخت تا اختلاف چگالی به نوعی خنثی و در نتیجه امکان آشکارسازی دشوارتر شود. در پایان می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از مشاهدات گرادیان جاذبی و روش واهم‌آمیخت اوپلر وسیله‌ای فراهم می‌آورد که با استفاده از آن می‌توان تأسیسات زیرزمینی را به گونه‌ای ساخت که احتمال کشف آن‌ها حداقل باشد.

۶. منابع

- [1] Sepp, E. M. "Deeply Buried Facilities: Implications for Military Operations"; Occasional Paper No. 14, Center for Strategy and Technology, Air War College, 2000.
- [2] Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sherrif, R. E. "Applied Geophysics"; Cambridge University Press, 1990.
- [3] Edwards, A. J.; Maki, J. T.; Peterson, D. G. "Gravity Gradiometry as a Tool for Underground Facility Detection. An Overview of the DOE Underground Facilities Program"; J. Environ. Eng. Geophy. 1997, 2, 139-143.
- [4] Tedla, G. E.; Meijde, M. D.; Nyblade, A. A.; Meer, F. D. "A Crustal Thickness Map of Africa Derived From a Global Gravity Field Model Using Euler Deconvolution"; Geophy. J. Int. 2011, 187, 1-9.
- [5] Mikhailov, V.; Pajot, G.; Diament, M.; Price, A. "Tensor Deconvolution: A Method to Locate Equivalent Sources from Full Tensor Gravity Data"; Geophysics 2007, 72, 161-169.
- [6] Mikhailov, V.; Pajot, G.; Diament, M.; Price, A. "Automatic Detection of UXO Magnetic Anomalies Using Extended Euler Deconvolution"; Geophysics 2010, 75, 13-20.
- [7] Abedini, A. "Detection of Underground Targets"; Tech. Rep., Malek Ashtar University, 2012 (In Persian).
- [8] Madanchi Zare, A.; Dehghani, H.; Mousa Zade, K.; Taghavi, S. "Modelling the Ability of Geophysics Sensors for Underground Utility Detection and Some Solutions to Disable Them"; Passive Defence Journal, 2013, 16, 63-76 (In Persian).
- [9] Sahami, H.; Radan, M. Y.; Majidi, D. "Detecting Buried Underground Structures Using Simulation of Gravity Data"; Passive Defence Science and Technology 2012, 1, 81-94 (In Persian).
- [10] Hammond, S.; Murphy, C. "Air-FTG™: Bell Geospace's Airborne Gravity Gradiometer, a Description and Case Study"; ASEG Preview 2003, 105, 24-26.
- [11] Hofmann-Wellenhof, B.; Moritz, H. "Physical Geodesy"; Springer, 2005.
- [12] Wild-Pfeiffer, F. "A Comparison of Different Mass Elements for Use in Gravity Gradiometry"; J. Geod. 2008, 82, 637-653.
- [13] Hood, P. "Gradient Measurements in Aeromagnetic Surveying"; Geophysics 1965, 30, 891-902.
- [14] Thompson, D. T. "EULDPH: A New Technique for Making Computer-Assisted Depth Estimates from Magnetic Data"; Geophysics 1982, 47, 31-37.
- [15] Reid, A. B. "Euler Deconvolution: Past, Present and Future. A Review"; Abstract Society of Exploration Geophysicists, 1995.
- [16] Blakely, R. J. "Potential Theory in Gravity and Magnetic Applications"; Cambridge University Press, 1996.
- [17] Zhang, C.; Mushayandebvu, M. F.; Reid, A. B.; Fairhead, J. D.; Odegard, E. "Euler Deconvolution of Gravity Tensor Gradient Data"; Geophysics 2000, 65, 512-520.



شکل ۲۲. شبیه‌سازی با داده نویزی ۲۰٪. طول پنجره ۶۴۱



شکل ۲۳. شبیه‌سازی با داده نویزی ۳۰٪. طول پنجره ۶۴۱

۵. نتیجه‌گیری

در این تحقیق آشکارسازی سازه‌های زیرزمینی با استفاده از مشاهدات گرادیان جاذبی مورد بررسی قرار گرفت. با پیشرفت تکنولوژی در ساخت شتاب‌سنج‌ها و گرادیان‌سنج‌گرانی‌ها (دستگاه اندازه‌گیری گرادیان جاذبی) ایده استفاده از گرادیان‌سنج‌گرانی به عنوان یک دستگاه مناسب برای آشکارسازی سازه‌های زیرزمینی مطرح شد. با بهبود نرخ نمونه برداری و کاهش سطح خطا و افزایش حساسیت گرادیان‌سنج‌گرانی‌ها، می‌توان با نصب این دستگاه بر روی هواپیما، با استفاده از آنالیز مشاهدات آن به کشف اختلاف چگالی موجود در زیرزمین و در نتیجه سازه‌های مدفون پرداخت.

برای بررسی همه جانبه استفاده از این مشاهدات برای کشف سازه‌های زیرزمینی، مسئله مورد نظر از دو جنبه مستقیم و معکوس مورد آنالیز قرار گرفت. در مسئله مستقیم موقعیت و ابعاد سازه مورد نظر معلوم در نظر گرفته شد و سیگنال گرادیان جاذبی مدل‌سازی گردید. سپس با آنالیز سیگنال مدل‌سازی شده و در نظر گرفتن سطح نویز دستگاه گرادیان‌سنج‌گرانی می‌توان به احتمال کشف سازه پرداخت. در مسئله معکوس با معلوم بودن سیگنال روش واهم‌آمیخت اوپلر برای تعیین موقعیت سازه مدفون ارائه گردید و با شبیه‌سازی‌های متعدد نشان داده شد که روش مورد نظر از کارایی بالایی برخوردار بوده و می‌تواند به عنوان یک الگوریتم مطمئن در زمینه تعیین مکان سازه‌های مدفون مورد استفاده قرار گیرد.

همچنین راهکارهایی در زمینه پدافند غیرعامل برای کاهش احتمال