

شناسایی و مکان‌یابی اهداف و تأسیسات زیرزمینی بر پایه داده‌های مغناطیس‌سنجی با استفاده از روش‌های سیگنال تحلیلی، اویلر و وارون‌سازی سه‌بعدی

محمد رضا سیف^۱، محمد محمدزاده مقدم^{۲*}، سعید میرزایی^۳

۱- پژوهشگر، دانشگاه جامع امام حسین (ع) ۲- دانشجوی دکتری، ۳- استاد، جهاد دانشگاهی شهید بهشتی

(دریافت: ۹۵/۱۱/۲۳، پذیرش: ۹۶/۰۳/۲۳)

چکیده

بررسی امکان آشکارسازی سازه‌های زیرزمینی همواره یکی از پیچیده‌ترین مسائل مورد بحث در تأمین امنیت تأسیسات مدفون بوده است. در این مقاله از داده‌های مغناطیسی برای حل مسئله استفاده شده است و 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 میدان مغناطیسی پرداخته می‌شود و با بررسی دامنه این سیگنال و سطح نوفه دستگاه مغناطیس‌سنج امکان کشف سازه زیرزمینی مورد بحث قرار می‌گیرد. در مسئله معکوس، با معلوم بودن سیگنال میدان مغناطیسی با استفاده از روش‌های سیگنال تحلیلی، اویلر و وارون‌سازی سه‌بعدی توسط الگوریتم لی و اولدنبرگ، 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. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در صورت انجام یک عملیات مغناطیس‌سنجی با فاصله خطوط برداشت کمتر از ۶۰ متر می‌توان در شرایط آرام زمین‌شناسی مانند حوضه‌های رسوبی، اهداف و سازه‌های نظامی با خودپذیری بالاتر از ۰/۰۵ در واحد SI را تا عمق ۲۰۰ متری با وضوح مناسبی شناسایی کرد. با افزایش خودپذیری مغناطیسی سازه احتمال کشف آن بالاتر می‌رود به طوری که اگر خودپذیری آن از ۰/۱ تجاوز کند احتمال کشف تا اعماق ۴۰۰ متر هم وجود خواهد داشت.

کلیدواژه‌ها: مغناطیس‌سنجی، سازه‌های مدفون، سیگنال تحلیلی، اویلر، وارون‌سازی سه‌بعدی

Detection of Underground Targets Based on the Aeromagnetic Data Using the Analytic Signal and Euler Deconvolution and 3D Inversion Methods

M. R. Saif, M. Mohammadzadeh-Moghaddam*, S. Mirzaei

Shahid Beheshti University

(Received: 11/02/2017; Accepted: 13/06/2017)

Abstract

Investigating the possibility of underground structures detection is one of the complicated problems. In this paper, magnetic data have been used and both direct and inverse problems have been considered. In direct problem, with the assumption of the known size and position of the structure, magnetic response is modeled. Then, using the modeled signals, some points about the detectability of the structures are discussed. In inverse problem, position of the underground target is estimated based on the analytic signal and Euler deconvolution methods and 3D inversion of the magnetic data. Finally, both of the direct and inverse problems are implemented based on the simulated data and some suggestions are made to decrease the probability of detectability of the underground targets. The results show a concealed military structure with a susceptibility more than 0.05 SI and the depth of less than 200 m can be detected and located in a nonmagnetic host rocks using aeromagnetic survey with a resolution more than 60 m between lines. With increasing the magnetic susceptibility of structure, the possibility of detection will be increased; so that if the susceptibility exceeds 0.01 SI, the possibility of detection will be increased to depth of 400 m.

Keywords: Aeromagnetic, Underground Structures, Analytic Signal, Euler Deconvolution, 3D Inversion

۱. مقدمه

اهداف نظامی زیرزمینی زیرسطحی و عمیق مانند سیلواها، انبار مهمات، تجهیزات و موشک‌های پنهان توسط یکی از پرکاربردترین روش‌های ژئوفیزیکی یعنی روش مغناطیس‌سنجی از طرف کشور متجاوز است. با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی هوابرد می‌توان در مدت زمان کوتاهی مناطق وسیع و صعب‌العبور را مورد پوشش قرار داد. سیف و همکاران [۷] امکان شناسایی سازه‌های مختلف توسط روش گرانی‌سنجی را بررسی کردند و نشان دادند که عواملی مانند تباین چگالی سازه با محیط و عمق آن چگونه سبب شناسایی آن می‌شود. بدیهی است که بررسی همه‌جانبه امکان شناسایی این سازه‌ها با روش‌های گرانی‌سنجی و مغناطیس‌سنجی می‌تواند بسیار سودمند باشد.

مغناطیس‌سنج‌ها ترکیبات آهن‌دار مانند فلزات آهنی و همچنین خاک و سنگ‌های حاوی آهن را شناسایی می‌کنند. سنجنده‌های مغناطیسی به خاصیت نفوذپذیری مغناطیسی مواد پاسخ می‌دهند. خاصیت فیزیکی مرتبط با نفوذپذیری، خودپذیری مغناطیسی است که وسیله‌ای برای اندازه‌گیری میزان مغناطیس‌شوندگی مواد است. پاسخ سنجنده‌های ژئوفیزیکی نسبت به یک هدف بستگی به عوامل متنوعی از جمله تباین ویژگی هدف و محیط اطراف، عمق تدفین و جهت قرارگیری و بزرگی هدف دارد. با افزایش عمق قدرت کشف اهداف کاهش می‌یابد. همچنین با کاهش اندازه و تباین با محیط اطراف قدرت شناسایی کاهش می‌یابد. برای یک هدف و محیط مشخص، با افزایش عمق ساختار مدفون توانایی شناسایی هدف مورد نظر کاهش می‌یابد. این ویژگی توسط قانون فیزیکی که در آن شدت میدان تابع فاصله از منبع است کنترل می‌شود. به عنوان مثال برای یک دوقطبی مغناطیسی، نرخ افت برابر است با $1/r^3$ که r فاصله تا هدف است.

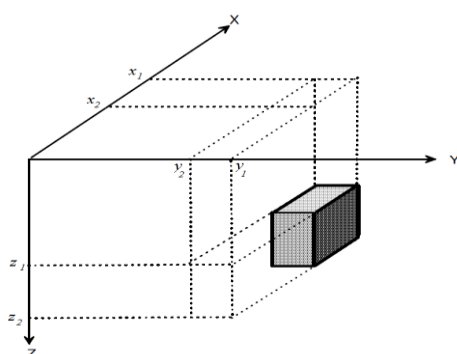
در این تحقیق مسئله امکان شناسایی سازه‌های مغناطیسی به دو صورت مستقیم و معکوس مورد بررسی قرار گرفت. در حالت مستقیم سازه‌هایی با ابعاد، عمق و خودپذیری مغناطیسی مشخص در نظر گرفته شد و سیگنال مغناطیسی آن‌ها در سطح زمین مورد بررسی قرار گرفت. سپس در حالت وارون از سیگنال مغناطیسی مرحله مستقیم استفاده شد تا با استفاده از بهترین و جدیدترین روش‌های پردازشی و تفسیری، امکان یا عدم امکان شناسایی سازه‌ها بررسی و در صورت مثبت بودن جواب به برآورد عمق و دیگر مشخصات آن‌ها پرداخته شود. در حالت وارون به منظور برآورد عمق و مشخصات اهداف بی‌هنجار مغناطیسی، داده‌های مغناطیس برداشت‌شده با استفاده از سه روش واهمامیخت اوپلر^۲، سیگنال تحلیلی^۱ و وارون‌سازی سه‌بعدی مورد پردازش و تفسیر قرار گرفته‌اند.

سازه‌های زیرزمینی 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 است. 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 زیرزمینی به‌کار می‌روند، روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری میدان مغناطیسی زمین به دلیل ویژگی‌های منحصربه‌فرد میدان مغناطیسی از کارایی بالایی برخوردار هستند. روش مغناطیس‌سنجی هوابرد به دلیل دقت بالا، سرعت بالای داده‌برداری و ارزان بودن نسبت به سایر روش‌ها به یکی از پرکاربردترین روش‌های ژئوفیزیکی تبدیل شده است. در کاربردهای زمین‌شناسی و ژئوفیزیکی، از روش مغناطیسی برای کشف کانی‌زایی‌های آهن و منابع هیدروکربنی استفاده می‌شود. در این کاربردها، نقشه مربوط به میدان مغناطیسی منطقه اندازه‌گیری می‌شود و از آنجایی که تغییرات میدان مغناطیسی از تغییرات خودپذیری مغناطیسی^۱ سنگ‌ها و اجرام موجود در زمین به دلیل وجود کانی مگنتیت منتج می‌گردد، با آنالیز داده‌های مغناطیسی اندازه‌گیری شده می‌توان به اطلاعاتی در مورد نوع مواد زیرزمینی و مکان آن‌ها دست یافت [۲].

در مبحث کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی در مباحث نظامی، محققان زیادی به بررسی نحوه استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی به ویژه مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی و الکترومغناطیس به منظور اکتشاف و مکان‌یابی اهداف نظامی پرداخته‌اند [۷-۳]. عمده این پژوهشگران به بررسی نحوه امکان شناسایی اشیای فلزی و مهمات عمل نکرده نزدیک سطح زمین پرداخته‌اند. استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی در شناسایی اشیاء فلزی نزدیک سطح زمین یا مهمات عمل نکرده نیازمند داده‌برداری بر روی سطح زمین و یا بسیار نزدیک به سطح زمین، صرف زمان زیاد و همچنین احتمال خطای بالا در خروجی‌های به دست آمده است. اما امروزه یکی از مسائل مهم نظامی در مبحث پدافند غیرعامل امکان شناسایی

^۲ Euler Deconvolution^۱ Magnetic Susceptibility



شکل ۱. مدل منشور مستطیلی

پتانسیل مغناطیسی (U) ناشی از یک منشور محدود در مختصات $x_1 < x < x_2$ ، $y_1 < y < y_2$ و $z_1 < z < z_2$ در فاصله R برابر است با:

$$U = \iiint_V \frac{\vec{R} \cdot \vec{M}}{R^3} dv = - \iiint_V (\vec{M} \cdot \text{grad}_K \frac{1}{R}) dv \quad (1)$$

که در این رابطه، M شدت مغناطیس شدگی است. مؤلفه‌های میدان مغناطیسی عبارت‌اند از:

$$\Delta X = -\frac{\partial U}{\partial x}, \quad \Delta Y = -\frac{\partial U}{\partial y}, \quad \Delta Z = -\frac{\partial U}{\partial z} \quad (2)$$

این روابط به صورت زیر قابل بازنویسی است [۱۹]:

$$\Delta X = \{-M_x \arctan \frac{(y-y_k)(z-z_k)}{(x-x_k)R} + M_y \ln[R + (z-z_k)] + M_z \ln[R + (y-y_k)]\} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$$\Delta Y = \{M_x \ln[R + (z-z_k)] - M_y \arctan \frac{(x-x_k)(z-z_k)}{(y-y_k)R} + M_z \ln[R + (x-x_k)]\} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix} \quad (4)$$

$$\Delta Z = \{M_x \ln[R + (y-y_k)] - M_y \ln[R + (x-x_k)] - M_z \arctan \frac{(x-x_k)(y-y_k)}{(z-z_k)R}\} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

بنابراین میدان افقی مغناطیسی به صورت زیر قابل محاسبه است:

$$H_{xy} = \Delta X \sin D + \Delta Y \cos I \quad (6)$$

که در این رابطه، I زاویه میل^۲ و D زاویه انحراف میدان مغناطیسی^۳ است. در نهایت میدان مغناطیسی کل (ΔT) برابر است با:

$$\Delta T = \Delta X \cos I \cos D + \Delta Y \cos I \sin D + \Delta Z \sin I \quad (7)$$

روابط فوق اغلب به عنوان معادلات پایه برای محاسبه آنومالی‌های مغناطیسی ناشی از توده‌های زیرسطحی با اشکال هندسی مختلف به کار می‌رود.

در این مدل‌سازی از اشکال هندسی منظم شامل کره، مکعب و مکعب مستطیل به عنوان سازه‌های زیرزمینی مورد نظر استفاده شده است (شکل ۲). در این مدل‌سازی از اجسام توپر برای استفاده شده است و در واقع فرض شده است که این سازه‌ها

روش واهمامیخت اولر به مثابه فنی برای تعیین عمق، موقعیت و شکل منبع‌های مغناطیسی دوبعدی و سه‌بعدی، از چند دهه پیش کاربرد وسیعی یافته است [۸-۱۱]. روش سیگنال تحلیلی نیز در حکم روشی پر اهمیت در تفسیر داده‌های مغناطیسی مورد توجه بوده است. نیقیان [۱۴-۱۲] از سیگنال تحلیلی برای برآورد عمق اجسام مغناطیسی صفحه‌ای استفاده کرد. هسیو و همکاران [۱۵] از سیگنال تحلیلی ارتقاء یافته برای تعیین عمق ساختارهای مغناطیسی دایکی شکل و گسل استفاده کردند. بر همین اساس باستانی و پدرسن [۱۶] با استفاده از سیگنال تحلیلی روشی را برای محاسبه پارامترهای سازه‌های دایکی شکل عرضه کردند. سالم و همکاران [۱۷] از تابع سیگنال تحلیلی در روش اولر استفاده کردند و عمق و مکان منبع را برای حالت خاصی که شاخص ساختاری معلوم باشد به دست آوردند. زمانی که با استفاده از روش‌های اولر و سیگنال تحلیلی موقعیت حدودی هدف برآورد شد می‌توان از این اطلاعات در مدل‌سازی سه‌بعدی استفاده نمود. در این بررسی از برنامه رایانه‌ای UBC Mag3D استفاده شد [۱۸]. این برنامه بر اساس الگوریتم غیرخطی لی-اولدنبرگ عمل می‌کند به طوری که بهترین جواب ممکن برای اهداف مغناطیسی، با روش تکرار حاصل می‌شود.

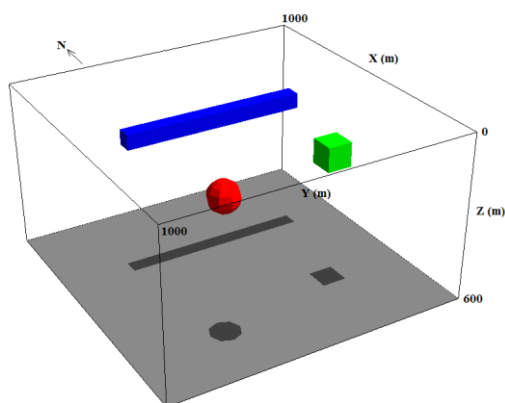
۲. مسئله مستقیم: مدل‌سازی اثر میدان مغناطیسی اشکال هندسی مختلف

در این بخش نتایج عددی حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده برای بررسی و تحلیل مسئله آشکارسازی سازه‌های مدفون ارائه می‌شود. در ژئوفیزیک کاربردی از داده‌های مغناطیسی برای آشکارسازی ساختار توده‌ها و مواد زیرزمین استفاده می‌شود. مدل‌سازی مغناطیسی روشی برای محاسبه این کمیت‌ها با استفاده از آنومالی‌های مغناطیسی معلوم بر اساس نظریه پتانسیل است. برای مثال با داشتن خودپذیری یک توده و معلوم بودن مرزهای آن می‌توان کمیت‌های فوق را محاسبه کرد.

هر توده مغناطیسی می‌تواند به تعدادی منشور قائم تقسیم شود به طوری که هر منشور دارای خودپذیری مغناطیسی ثابتی است (شکل ۱). آنومالی مغناطیسی این توده در هر نقطه تقریباً با حاصل جمع اثر همه منشورها برابر است. هر چه قدر توده مورد نظر به منشورهای کوچک‌تر تقسیم شود دقت مدل‌سازی برای محاسبه اثر میدان مغناطیسی آن در سطح دقیق‌تر خواهد بود، اما در این صورت تعداد مجهولات بیشتر و در نتیجه زمان انجام مدل‌سازی افزایش خواهد یافت.

^۲ Inclination
^۳ Declination

^۱ Analytic Signal



شکل ۲. سازه‌های زیرزمینی مختلف

جدول ۱. مشخصات سازه‌های زیرزمینی مورد نظر

ابعاد (متر)	شکل سازه
۵۰×۵۰×۶۰۰	مکعب مستطیل
۸۰×۸۰×۸۰	مکعب مربع
R=۵۰	کره

مدل‌سازی پیشرو با هدف بررسی پاسخ میدان مغناطیسی سازه‌های مختلف مطابق جدول (۱) و با در نظر گرفتن خودپذیری‌ها و اعماق متفاوت، محاسبه شد. شکل (۳ الف تا ع)) نتایج این مدل‌سازی را در حالت‌های مختلف نشان می‌دهد. همان‌گونه که در این شکل مشاهده می‌شود، در هر ستون خودپذیری مغناطیسی ثابت و در هر ردیف عمق سازه یکسان است. لازم به ذکر است که موقعیت افقی و ابعاد سازه‌ها در کلیه این شکل‌ها ثابت در نظر گرفته شده است. با توجه به این شکل‌ها می‌توان به صورت همه‌جانبه تأثیر تغییرات خودپذیری مغناطیسی و عمق سازه در نحوه شناسایی آن‌ها را بررسی نمود. به عنوان مثال تباین مغناطیسی ایجاد شده در عمق ۵۰ متر بسیار بالا و قابل ملاحظه است؛ به طوری که با توجه به ستون رنگی راهنمای هر نقشه، بیشینه تباین مغناطیسی ایجاد شده در خودپذیری ۰/۰۵ در حدود ۴۷۴ نانو تسلا (شکل ۳- الف)، در خودپذیری ۰/۱ در حدود ۹۸۳ نانو تسلا (شکل ۳- ب) و در خودپذیری ۰/۲ در حدود ۱۹۶۷ نانو تسلا (شکل ۳- ج) است. در جدول (۲) بیشینه تباین مغناطیسی ایجاد شده بر حسب نانو تسلا با تغییر عمق و خودپذیری مغناطیسی سازه مربوط به شکل (۳)، ارائه شده است. یکی از مناسب‌ترین راهکارهای پدافند غیرعامل در برابر کشف سازه‌های زیرزمینی به وسیله مغناطیس‌سنجی افزایش عمق و کاهش خودپذیری مغناطیسی کلی سازه مورد نظر است. در صورت استفاده کمتر از مواد مغناطیسی (آهن و فولاد) در ترکیب سازه‌ها و محتویات داخل آن می‌توان خودپذیری کلی سازه را کاهش داد.

توسط تجهیزات نظامی و یا مهمات مغناطیسی پر شده است. ابعاد اجسام مذکور در جدول (۱) آورده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود ابعاد در نظر گرفته شده به ابعاد سازه‌های واقعی زیرسطحی نزدیک است. به منظور تولید این مدل‌های سه‌بعدی، از نرم‌افزار ModelVision استفاده شد. این نرم‌افزار قادر است بر اساس الگوریتم مدل‌سازی مذکور پاسخ میدان مغناطیسی ناشی از شکل‌های هندسی مختلف با کمیت‌های دلخواه را با دقت بالایی تولید کند. یکی از کمیت‌های مهم جهت انجام مدل‌سازی پیشرو، برآورد صحیح خودپذیری مغناطیسی توده مولد آنومالی است. برای این منظور از جدول خودپذیری سنگ‌ها و کانی‌های ارائه شده توسط تلفورد و همکاران و همچنین بررسی نتایج مدل استفاده شد [۲]. در این مدل‌سازی از یک بازه خودپذیری مغناطیسی به نسبت وسیع استفاده شد تا بتواند انواع سازه‌ها از نظر محتویات و خصوصیات مغناطیسی آن‌ها را دربر گیرد. در این مدل‌سازی سه خودپذیری مغناطیسی، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ در واحد SI در نظر گرفته شد. یکی دیگر از کمیت‌های مهم در انجام مدل‌سازی پیشرو عمق سازه (فاصله جسم تا نقطه مشاهده‌ای) است. همان طور که در رابطه (۱) ذکر شد شدت میدان مغناطیسی با مجذور سوم فاصله رابطه عکس دارد. بنابراین فاصله بین جسم تا نقطه مشاهده‌ای تأثیر زیادی در امکان یا عدم امکان شناسایی آن دارد. بر این اساس در این مقاله نحوه تأثیر تغییر فاصله بین مغناطیس‌سنج تا سازه بررسی می‌شود. این فاصله می‌تواند شامل هر دو کمیت ارتفاع پرواز و عمق سازه و یا صرفاً یکی از آن‌ها باشد. از آنجایی که معمولاً کمیت عمق سازه از ارتفاع پرواز بیشتر است، بنابراین در اینجا برای سهولت بحث به جای ذکر فاصله بین سنجنده و سازه از عمق سازه استفاده خواهد شد. در این مدل‌سازی عبارت‌اند از: ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ متر.

یکی دیگر از مسائل مهمی که در مدل‌سازی مغناطیسی سازه‌های نظامی باید به آن توجه شود، وضوح داده‌برداری است. این مسئله به طور مستقیم در امکان یا عدم امکان شناسایی هدف مورد مطالعه مؤثر است. وضوح داده‌برداری به طور عمده توسط ارتفاع پرواز و فاصله بین خطوط برداشت کنترل می‌شود. همان طور که ذکر شد در این مقاله ارتفاع پرواز متغیر در نظر گرفته شده و انواع حالت‌های آن مورد بررسی قرار می‌گیرد، اما فاصله خطوط پرواز ثابت در نظر گرفته شده است؛ به طوری که هیچ‌گونه سیگنال مغناطیسی از سازه‌ها از دست نرفته و پدیده الیاسینگ^۱ رخ نمی‌دهد. در این مقاله با توجه به ابعاد سازه‌های مورد مطالعه، فاصله بین خطوط برداشت ۶۰ متر در نظر گرفته شده است. در صورت افزایش این فاصله امکان شناسایی اهداف مورد مطالعه به تدریج از بین می‌رود.

¹ Aliasing

است: روش‌های سیگنال تحلیلی، واهم‌آمیخت اولر و وارون‌سازی سه‌بعدی با استفاده از الگوریتم لی و اولدنبرگ [۱۸].

روش سیگنال تحلیلی قادر است لبه بی‌هنجاری‌های مغناطیسی را با دقت بسیار بالایی شناسایی کند. روش واهم‌آمیخت اولر نیز با استفاده از مشتقات میدان مغناطیسی، عمق و موقعیت افقی بی‌هنجاری را با دقت بسیار بالاتری نسبت به سایر روش‌های مشابه (مانند Werner و SPI) برآورد می‌کند. پس از برآورد اولیه موقعیت و عمق بی‌هنجاری مورد نظر می‌توان از آن‌ها به عنوان اطلاعات اولیه در وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌ها استفاده کرد. در ادامه در مورد هر کدام از روش‌ها بحث و نتایج آن ارائه شده است.

۳-۱. روش سیگنال تحلیلی

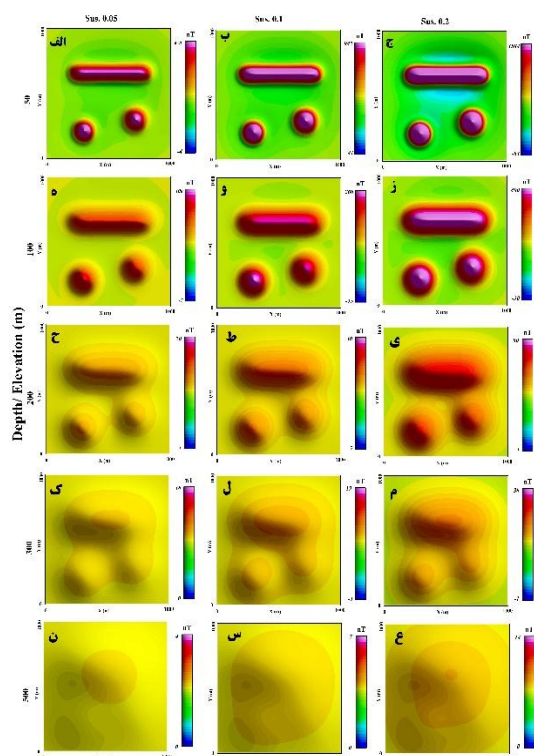
روش سیگنال تحلیلی برای تفسیر داده‌های مغناطیس و گرانی به کار می‌رود. تابع سیگنال تحلیلی به تابعی گفته می‌شود که قسمت موهومی آن تبدیل هیلبرت قسمت حقیقی آن است. تابع سیگنال تحلیلی در ابتدا برای بی‌هنجاری‌های مغناطیسی دوبعدی به صورت مشتق میدان مغناطیسی مختلط که این میدان خود حاصل مشتق پتانسیل مغناطیسی است تعریف شد [۱۲]. دامنه سیگنال تحلیلی برابر است با جذر مجموع مربعات مشتق‌های افقی و قائم. دامنه سیگنال تحلیلی یک تابع متقارن و زنگوله‌ای شکل است که مقدار بیشینه آن بالای لبه بی‌هنجاری قرار می‌گیرد و پهنای منحنی دامنه با عمق رویه بی‌هنجاری نسبت مستقیم دارد [۲۰]. از این ویژگی سیگنال تحلیلی برای برآورد پارامترهای منشأ مغناطیسی مانند عمق، مکان و ضخامت استفاده می‌شود [۲۱]. دامنه سیگنال تحلیلی میدان، برای حالت سه‌بعدی با روابط زیر تعریف می‌شود:

$$AAS(x, y) = \frac{\partial T}{\partial x} \hat{i} + \frac{\partial T}{\partial y} \hat{j} + \frac{\partial T}{\partial z} \hat{k} \quad (8)$$

$$|AAS(x, y)| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)^2} \quad (9)$$

که در آن، $\frac{\partial T}{\partial y}$ مشتق افقی میدان در جهت y و i, j, k بردارهای یکه در جهت محورهای مختصات است. در نواحی که گرادیان مغناطیسی بیشتر است، مقدار مشتقات سیگنال تحلیلی به بیشینه یا کمینه خود می‌رسد؛ بنابراین ناپیوستگی‌های موجود، بارزتر شده و لبه ساختارها آشکارتر می‌شود.

شکل منحنی دامنه سیگنال تحلیلی کاملاً مستقل از کمیت‌های جهتی مانند مغناطیس‌شوندگی، زاویه میل^۱ و زاویه انحراف^۲ میدان بوده و همواره یک تابع زوج و متقارن است. این



شکل ۳. پاسخ میدان مغناطیسی حاصل از سازه‌های زیرزمینی معرفی شده در شکل (۲)

جدول ۲. بیشینه تباین مغناطیسی ایجاد شده بر حسب نانو تسلا با تغییر خودپذیری مغناطیسی و عمق سازه

		خودپذیری مغناطیسی (SI)		
		۰/۰۵	۰/۱	۰/۲
عمق سازه (متر)	۵۰	۴۷۴	۹۸۳	۱۹۶۷
	۱۰۰	۱۰۷	۲۱۵	۴۳۰
	۲۰۰	۲۱	۴۲	۸۴
	۳۰۰	۱۰	۲۰	۳۹
	۵۰۰	۴	۷	۱۴

به منظور بررسی دقیق‌تر موضوع و نحوه آشکارسازی اهداف مورد نظر با جدیدترین و کارآمدترین روش‌های پردازشی و تفسیری موجود، داده‌های تولیدشده در این مرحله به عنوان ورودی در حالت مسئله وارون استفاده می‌شود. لازم به ذکر است که قبل از ورود داده‌ها به مرحله بعد، ۵ درصد نوفه به روش گاوسی به داده‌ها افزوده شد تا به واقعیت نزدیک‌تر شود.

۳. مسئله وارون: شناسایی و مکان‌یابی اهداف زیرزمینی با استفاده از داده‌های مغناطیسی

به منظور شناسایی و مکان‌یابی منشأ بی‌هنجاری‌های مغناطیسی (اهداف زیرزمینی) از سه روش جدید و پرکاربرد استفاده شده

^۱ Inclination

^۲ Declination

است. در عمق‌های بالاتر روش سیگنال تحلیلی قادر به ارزیابی مناسبی از سازه‌های مدفون نیست. نکته قابل توجه دیگری که با توجه به نقشه‌های شکل (۴) قابل ذکر است این است که سازه‌های کروی به دلیل تغییرات گرادیانی بیشتر، آنومالی‌های بارزتری ایجاد می‌کنند و بنابراین راحت‌تر آشکار می‌شوند.

۳-۲. روش واهم‌آمیخت اوپلر

روش واهم‌آمیخت اوپلر حدود نیم‌قرن است که در ژئوفیزیک بر روی داده‌های مغناطیسی و گرانی اعمال می‌شود. این روش از گرادیان‌های قائم میدان مغناطیسی به منظور برآورد مکان افقی و عمق منشأهای مغناطیسی استفاده می‌کند. معادله اوپلر در حالت سه‌بعدی به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود [۱۲]:

$$(x - x_0) \frac{\partial T}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial T}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial T}{\partial z} = N(B - T) \quad (10)$$

که در آن، (x_0, y_0, z_0) مختصات منشأ مغناطیسی، $\frac{\partial T}{\partial x}$ ، $\frac{\partial T}{\partial y}$ و $\frac{\partial T}{\partial z}$ مشتقات میدان مغناطیسی در سه جهت (x, y, z) ، N شاخص ساختاری و مربوط می‌شود به نرخ تغییرات میدان با فاصله از منشأ و B میدان مغناطیسی منطقه‌ای درون پنجره اوپلر است. معادله اوپلر با استفاده از یک روش خطی کمترین مربعات قابل حل است [۸]. مقدار شاخص ساختاری به هندسه و شکل منشأ بی‌هنجاری مغناطیسی وابسته است و مقدار آن از ۰ تا ۳ (در مغناطیس) است. تامسون [۲۲] مقادیر شاخص ساختاری مربوط به اجسام مختلف زمین‌شناسی را ارائه کرده است (جدول ۳).

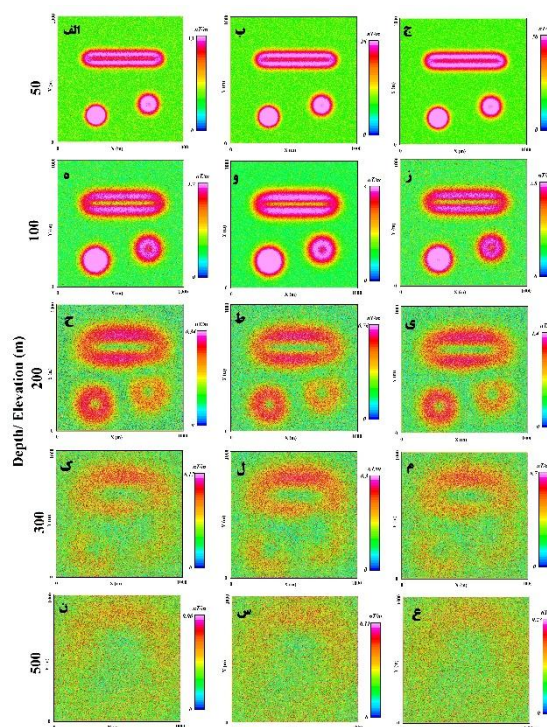
جدول ۳. مقادیر شاخص ساختاری (بدون واحد) برای شکل‌های مختلف مغناطیسی [۲۲]

شکل ساختار	اندیس ساختاری
همبری افقی با گستردگی بی‌نهایت	۰
همبری قائم	۰-۰/۵
پله (فروافتادگی) ضخیم	۰/۵
دایک یا سیل نامنظم	۱
استوانه قائم	۲-۲/۱
استوانه با امتداد نامشخص	۲/۲
استوانه افقی	۲-۲/۳
کره	۳

در این مقاله به منظور اعمال روش اوپلر بر روی داده‌ها از نرم‌افزار Geosoft Oasis Montaj 6.4.2 استفاده شد. پس از آماده‌سازی داده‌ها، نقشه‌های مشتقات میدان کل در سه جهت x ، y و z که تهیه آن لازمه اجرای فرایند واهم‌آمیخت اوپلر است، تهیه شدند؛ همچنین برای اعمال فرایند اوپلر نیاز به شاخص ساختاری و اندازه پنجره است. برای دستیابی به پاسخ‌های مناسب، شاخص‌های ساختاری به صورت پیش‌فرض به مسئله داده می‌شود و شاخص ساختاری صحیح‌تر شاخصی در نظر گرفته

کمیت‌ها فقط روی اندازه دامنه سیگنال تحلیلی تأثیر دارند. تأثیر نداشتن کمیت‌های جهتی بر شکل منحنی دامنه، یک ویژگی مهم سیگنال تحلیلی است [۱۲ و ۲۰].

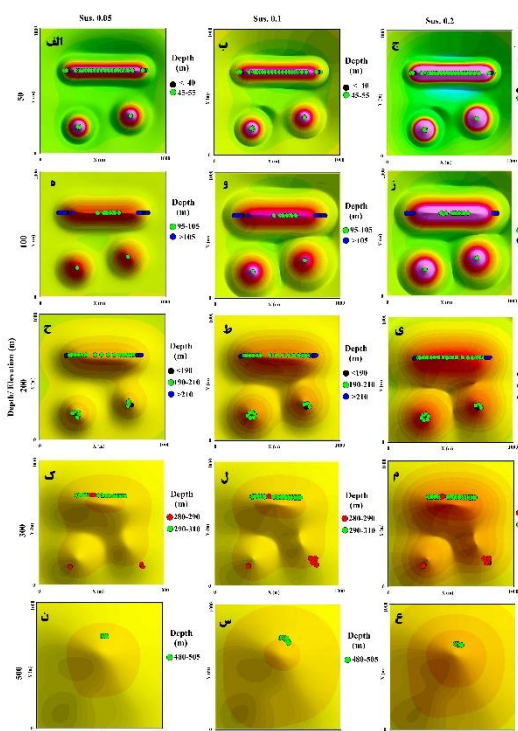
شکل (۴- الف تا ع) نتایج حاصل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی بر روی داده‌های مغناطیسی تولیدشده در حالت مسئله مستقیم را نشان می‌دهد (شکل ۳). قبل از اعمال این فیلتر، چهار درصد نوفه گاوسی به داده‌ها افزوده شد تا داده‌ها به واقعیت نزدیک‌تر باشند.



شکل ۴. نتایج اعمال روش سیگنال تحلیلی بر روی داده‌های مغناطیسی ارائه‌شده در شکل (۳). قبل از اعمال فیلتر سیگنال تحلیلی پنج درصد نوفه گاوسی بر روی داده‌ها اعمال شد.

همان‌طور که در شکل (۴) مشاهده می‌شود در عمق ۵۰ متری، فیلتر سیگنال تحلیلی با دقت بالایی قادر است مرز هر سه نوع سازه را آشکارتر نماید. دامنه سیگنال تحلیلی نیز در هر سه حالت خودپذیری، بالا است. در عمق ۱۰۰ متری نیز مرز ساختارها باز هم با دقت نسبتاً بالایی شناسایی شده است. اما به نظر می‌رسد لبه‌های سازه مکعب مستطیل شکل کمی بازتر شده و از دقت کمتری برخوردار است. در این عمق نیز دامنه سیگنال تحلیلی در هر سه حالت خودپذیری، نسبتاً بالا و قابل ملاحظه است. در عمق ۲۰۰ متری نیز لبه‌های ساختارها به ویژه سازه مکعب مستطیلی با دقت پایین‌تری شناسایی شده است. همچنین دامنه سیگنال تحلیلی در هر سه حالت مقدار کمی دارد؛ به ویژه در خودپذیری‌های ۰/۵ و ۰/۱ که این مقدار به کمتر از یک می‌رسد و بنابراین به نظر می‌رسد در حالت واقعی به سختی قابل‌شناسایی

با عمق دارد. تابع‌های کمکی وزن دهی سه‌بعدی در تابع هدف را می‌توان در ترکیب کردن اطلاعات بیشتر درباره مدل به‌کار برد. چنین اطلاعاتی ممکن است از کاوش‌های دیگر ژئوفیزیکی، داده‌های زمین‌شناسی و یا درک کمی و کیفی مفسر از ساختار زمین‌شناسی و ارتباط آن با خودپذیری مغناطیسی سنگ‌ها باشد. راه‌حل عددی برای برگردان، از راه تقسیم زمین به تعداد زیادی سلول، تحقق یافته است؛ تا اجسام زمین‌شناسی پیچیده به طور نسبی ساخته شوند. حدس‌های اولیه در مورد هدف مورد بررسی از جمله خودپذیری مغناطیسی، موقعیت و شکل آن جهت انجام این وارون‌سازی، ما را در رسیدن به یک مدل واقعی‌تر هدایت می‌کنند. بنابراین به منظور وارون‌سازی دقیق داده‌ها از نتایج به دست آمده از روش‌های قبل (سیگنال تحلیلی و اوپلر) استفاده شد.



شکل ۵. نتایج حاصل از اعمال روش واهم‌آمیخت اوپلر بر روی داده‌های مغناطیسی. نقاط رنگی توپر، عمق بی‌هنجاری در آن نقطه را نشان می‌دهند.

الگوریتم عرضه‌شده از سوی لی- اولدنبرگ از رابطه (۱۱) آغاز می‌شود:

$$d = Gk \quad (11)$$

که در آن، d مربوط به داده‌های واقعی، G ماتریس حساسیت و k خودپذیری مغناطیسی سنگ‌ها در یک بلوک متعامد و شبکه‌بندی شده به منظور انجام وارون‌سازی است. مسئله برگردان به منزله یک مسئله بهینه‌سازی، فرمول‌بندی می‌شود که یک تابع هدف از

می‌شود که اولاً بیش‌ترین خوشه‌بندی^۱ را در پاسخ‌ها داشته باشد، یعنی پاسخ‌های با عمق یکسان مجاور هم باشند و دومان مناطقی که بی‌هنجاری وجود ندارد از لحاظ آماری، تعداد نقاط حل اوپلر کمینه باشد [۲۳].

از آنجایی که مفسر دید مناسبی از اعماق زمین ندارد برای رسیدن به این شاخص ساختاری مناسب، باید اعداد مختلف شاخص ساختاری، مورد آزمایش قرار گیرد. با توجه به مطالب مذکور بهترین شاخص ساختاری که برای بی‌هنجاری‌های موجود در این مطالعه برآورد شد، عدد ۲/۲ بود. با توجه به جدول (۱)، این شاخص ساختاری تقریباً مربوط به توده‌های مغناطیسی با شکل استوانه افقی تا کره است. شکل (۵ الف تا ع) نتایج حاصل از اعمال این روش بر روی داده‌های مغناطیسی تولیدشده در حالت مسئله مستقیم (شکل ۳) را نشان می‌دهد.

لازم به ذکر است که قبل از اعمال این فیلتر، چهار درصد نوفه گاوسی به داده‌ها افزوده شد. نتایج این تخمین عمق در نقاط مختلف نقشه با دواپر رنگی توپر مشخص شده‌اند. همان‌طور که مشاهده می‌شود روش اوپلر بر روی بی‌هنجاری‌های مورد نظر، اعماق متفاوتی را نشان می‌دهد؛ اما به طور کلی عمق برآورد شده تا حد زیادی به عمق واقعی اجسام مغناطیسی نزدیک است.

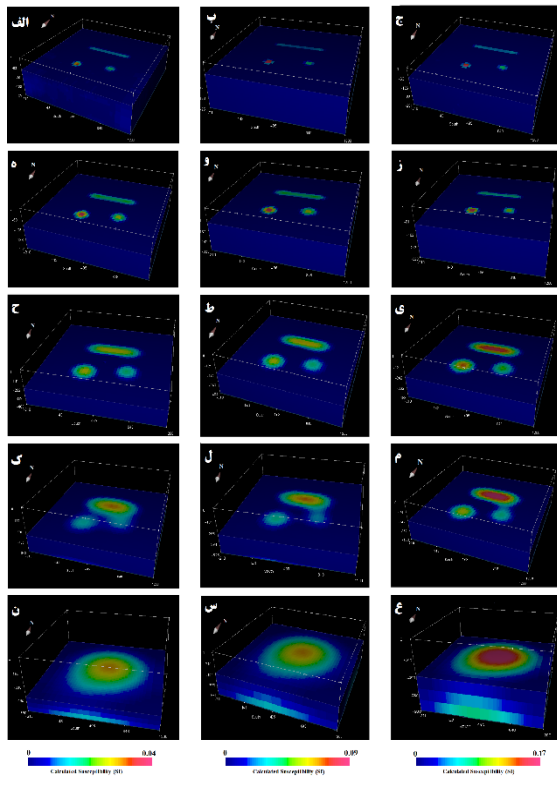
۳-۳. وارون‌سازی سه‌بعدی

یکی از بهترین روش‌های تحلیل نتایج از حاصل مدل‌سازی مستقیم، حل این مسائل به صورت وارون است. در این مقاله از داده‌های میدان مغناطیسی ناشی از شکل‌های هندسی منظم (در بخش ۲) به منظور مدل‌سازی وارون آن‌ها استفاده شد. وارون‌سازی سه‌بعدی داده‌های مغناطیسی توسط الگوریتم لی و اولدنبرگ یکی از بهترین روش‌های حل مسائل وارون در سال‌های اخیر است [۱۸]. به منظور بررسی سه‌بعدی سازه‌های مورد نظر، برگردان سه‌بعدی داده‌ها توسط الگوریتم مذکور در قالب نرم‌افزار UBC Mag3D انجام شد. استفاده از این الگوریتم جهت انجام وارون‌سازی داده‌های مغناطیسی در مناطق مختلف دنیا نتایج بسیار سودمندی را ارائه داده است [۲۴-۲۷].

در رویکرد برگردان عرضه‌شده از سوی لی و اولدنبرگ ابتدا در مورد متغیری که تفسیر بر اساس آن صورت خواهد گرفت، تصمیم‌گیری می‌شود که تابعی از خودپذیری مغناطیسی مورد جستجو است. سپس یک تابع هدف چند مؤلفه‌ای که دارای انعطاف‌پذیری کافی برای تولید انواع مدل باشد، ساخته می‌شود. این تابع هدف، ناهمواری‌ها را در سه جهت فضایی جبران می‌کند و یک وزن دهی سه‌بعدی بر اساس توزیع خودپذیری مغناطیسی

¹ Clustering

حداکثر مقدار خودپذیری بازسازی شده در حدود ۰/۰۴ است. در ستون دوم و سوم نیز این مقدار به ترتیب با اختلاف خودپذیری ۰/۰۱ و ۰/۰۳ محاسبه و بازسازی شده است. با مقایسه نتایج این وارون سازی با نتایج مدل های واقعی، به نظر می رسد الگوریتم وارون سازی مذکور، روش بسیار مناسبی برای بازسازی شکل، موقعیت و خودپذیری سازه ها و اهداف مغناطیسی پنهان است.



شکل ۶. نتایج وارون سازی سه بعدی داده های مغناطیسی تولید شده در مرحله مسئله مستقیم. در هر شکل (الف تا ه)، برش عمقی در بهترین عمق بازسازی منشأ آنومالی، ایجاد شده است. قبل از اعمال وارون سازی پنج درصد نوفه گاوسی بر روی داده ها اعمال شد.

با بررسی کلیه مدل های بازسازی شده در شکل (۶) می توان این مطلب را عنوان نمود که برای سازه ها و اهداف مغناطیسی مدفون تا اعماق ۲۰۰ متری که دارای خودپذیری مغناطیسی بالاتر از ۰/۰۵ هستند، روش مغناطیس سنجی ابزار مناسبی برای شناسایی و مکان یابی آنها خواهد بود؛ اما در عمق بالاتر یعنی ۳۰۰ متر، این مسئله برای سازه های با خودپذیری بالاتر از ۰/۱ صادق است. زیرا همان طور که در شکل های (۶ ل) و (۶ م) مشاهده می شود نتایج وارون سازی، شکل و موقعیت سازه ها را با تفکیک مناسبی بازسازی نموده اند اما در شکل (۶ ک) تصویر مناسبی از سازه ها را ارائه نمی دهند. همچنین با توجه به نتایج وارون سازی به نظر می رسد که در عمق های بالاتر از ۴۰۰ متر، بازسازی مناسبی از سازه ها توسط روش مغناطیس سنجی امکان پذیر نیست (شکل های ۶-ن، س و ع).

مدل، با توجه به محدودیت های معادله کمینه می شود تا داده ها، با یک خطای قابل قبول بازتولید شود. فرض کنید تابع هدف به صورت زیر باشد:

$$\begin{aligned} \Phi_m(m) = & \alpha_s \int_v w_s \{w(r)(m(r) - m_0)\}^2 dv \\ & + \alpha_x \int_v w_x \{[\partial w(r)/\partial x][(m(r) - m_0)]\}^2 dv \\ & + \alpha_y \int_v w_y \{[\partial w(r)/\partial y][(m(r) - m_0)]\}^2 dv \quad (12) \\ & + \alpha_z \int_v w_z \{[\partial w(r)/\partial z][(m(r) - m_0)]\}^2 dv \end{aligned}$$

که در آن، $m(r)$ مربوط به داده های واقعی و m_0 مربوط داده های مدل هستند. همچنین توابع w_x ، w_y ، w_z و w_s مستقل های فضایی هستند در حالی که ضرایب α_x ، α_y ، α_z و α_s بر درجه اهمیت نسبی متفاوت مؤلفه ها در تابع هدف تأثیر می گذارند. در این فرمول تابع $w(r)$ یک تابع تعمیم یافته وزن دهی عمقی است. هدف این تابع خنثی کردن میرایی هندسی خودپذیری مغناطیسی با فاصله از یک مکان مشاهده است؛ به طوری که این خودپذیری مغناطیسی به دست آمده در نزدیکی ایستگاه های اندازه گیری متمرکز نشود. مقدار عدم برازش بین داده های مشاهده شده و داده های محاسبه شده با استفاده از رابطه (۴) به دست می آید:

$$\Phi_d = \|w_d(Gk - d_{obs})\|^2 \quad (13)$$

که در آن، w_d به عنوان یک ماتریس قطری است که عنصر λ_m آن، انحراف استاندارد λ_{min} داده، d_{mod} چگالی محاسبه شده و d_{obs} چگالی برداشت شده است. هدف از این معادله وارون (رابطه (۱۳))، کمینه کردن اختلاف بین تابع هدف و خطای برازش داده ها است:

$$\Phi = \Phi_d + \mu \Phi_m \quad (14)$$

که در آن، μ پارامتر تنظیم کننده است. جزئیات و توصیف های بیشتر در مقاله لی و اولدنبرگ موجود است [۱۸]. شکل (۶ الف تا ع) نتایج وارون سازی داده ها با استفاده از این الگوریتم را تا عمق حداکثر ۹۸۰ متری از سطح زمین نشان می دهد. لازم به ذکر است که قبل از انجام وارون سازی ۵ درصد نوفه گاوسی بر روی داده ها اعمال شد. نتایج به دست آمده در شکل (۶) بر حسب خودپذیری مغناطیسی است. به طوری که بلوک زیرسطحی مورد نظر به تعداد زیادی سلول با ابعاد مساوی تقسیم که پس از انجام مراحل وارون سازی به هر سلول یک خودپذیری مغناطیسی اختصاص نسبت داده شده است. همان طور که در شکل (۶) در پایین هر ستون مشاهده می شود خودپذیری بازسازی شده با درصد خطای قابل قبولی محاسبه شده است. به عنوان مثال در ستون اول از سمت چپ که خودپذیری واقعی سازه ها ۰/۰۵ بوده،

۴. نتیجه‌گیری

مواد فرومنیزین در آن‌ها دارای خودپذیری مغناطیسی بالایی هستند، عامل مزاحمی برای شناسایی اهداف مورد نظر می‌باشند. کمربند آتش‌فشانی ارومیه- دختر که با پهنای حدود ۳۰ تا ۵۰ و طول بیش از ۱۵۰۰ کیلومتر به موازات رشته کوه‌های زاگرس مناطقی زیادی از ایران را پوشش می‌دهد، به دلیل خاصیت مغناطیسی بالا می‌تواند مکان مناسبی برای ساخت این سازه‌ها باشد. مکان‌های دیگری نیز در ایران وجود دارد که به دلیل خاصیت بالای مغناطیسی، این وضعیت را دارد. برای شناسایی این مناطق می‌توان از داده‌های مغناطیس سراسری در ایران استفاده نمود. محاسبه خودپذیری سازه و محتویات آن بر اساس ترکیبات آن و انجام مدل‌سازی پیشرو و معکوس بر اساس الگوریتم ارائه‌شده در این پژوهش، و سپس بهره‌گیری از نتایج به دست آمده قبل از ساخت هر گونه سازه نظامی مهم‌ترین راهکار پدافندی برای محفوظ ماندن از دید سنجنده‌های مغناطیسی است.

۵. مراجع‌ها

- Sepp, E. M. "Deeply Buried Facilities: Implications for Military Operations"; Occasional Paper No. 14, Center for Strategy and Technology, Air War College, 2000.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sherrif, R. E. "Applied Geophysics"; Cambridge University Press, 1990.
- Butler, D. K. "Assessment of Microgravity for UXO Detection and Discrimination"; U.S. Army Engineer Research and Development Center, 2000, 1-37.
- Butler, D. K. "Potential Fields Methods for Location of Unexploded Ordnance"; The Leading Edge. 2001, 20, 890 - 895.
- Billings, S. D.; Youmans, C. "Experiences with Unexploded Ordnance Discrimination Using Magnetometry at a Live-Site in Montana"; J. Appl. Geophysics 2007, 61, 194-205.
- Davis, K.; Li, Y.; Nabighian, M. "Automatic Detection of UXO Magnetic Anomalies Using Extended Euler Deconvolution"; J. Geophysics 2010, 75, 13-20.
- Saif, M. R.; Khazaei, S. "Detection of Underground Targets Based on the Gravity Gradient Data Using the Euler Deconvolution Method"; Adv. Defence Sci. & Technol. 2015, 1, 33-43 (in Persian).
- Reid, A. B.; Allsop, J. M.; Granser, H.; Millet, A. J.; Somerton, I. W. "Magnetic Interpretation in Three Dimensions Using Euler Deconvolution"; J. Geophysics 1990, 55, 80-91.
- Ravat, D. "Analysis of the Euler Method and its Applicability in Environmental Magnetic Investigations"; J. Environ. Eng. Geophysics 1996, 1, 229-238.
- Hsu, S. K. "Imaging Magnetic Sources Using Euler Equation"; J. Geophysical Prospecting 2002, 50, 15-25.
- Cooper, G. R. "Euler Deconvolution with Improved Accuracy and Multiple Different Structural Index"; J. China Univ. of Geosciences 2008, 19, 72-76.
- Nabighian, M. N. "The Analytic Signal of Two-Dimensional Magnetic Bodies with Polygonal Cross-Section: Its Properties

در این تحقیق آشکارسازی سازه‌های زیرزمینی با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی مورد بررسی قرار گرفت. با پیشرفت فناوری در ساخت مغناطیس‌سنج‌ها ایده استفاده از آن‌ها به عنوان یک دستگاه مناسب برای آشکارسازی سازه‌های زیرزمینی مطرح شد. با بهبود نرخ نمونه‌برداری و کاهش سطح خطا و افزایش حساسیت مغناطیس‌سنج‌ها، می‌توان با نصب این دستگاه بر روی هواپیما، با استفاده از آنالیز مشاهدات آن به کشف اختلاف خودپذیری مغناطیسی موجود در زیرزمین و در نتیجه سازه‌های مدفون پرداخت. برای بررسی همه‌جانبه 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 میدان مغناطیسی آن مدل‌سازی گردید. سپس با آنالیز سیگنال مدل‌سازی شده می‌توان به احتمال کشف سازه پرداخت. در مسئله معکوس با معلوم بودن سیگنال مغناطیسی، روش‌های سیگنال‌تحلیلی، واهم‌آمیخت اولیو و وارون‌سازی سه‌بعدی ارائه گردید و با شبیه‌سازی‌های متعدد نشان داده شد که روش مورد نظر از کارایی بالایی برخوردار بوده و می‌تواند یک الگوریتم مطمئن در زمینه تعیین مکان سازه‌های مدفون مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که در صورت انجام یک عملیات مغناطیس‌سنجی با وضوح مناسب (فاصله خطوط برداشت کمتر از ۶۰ متر) می‌توان در شرایط خاص زمین‌شناسی، اهداف و سازه‌های نظامی با خودپذیری بالاتر از ۰/۰۵ در واحد SI را شناسایی کرد. همچنین راهکارهایی در زمینه پدافند غیرعامل برای کاهش احتمال کشف سازه‌های زیرزمینی ارائه شد. یکی از این راهکارها در این زمینه افزایش عمق سازه است. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد در مناطق خاص زمین‌شناسی مانند حوضه‌های رسوبی با پاسخ مغناطیسی آرام، اهداف زیرزمینی با تباین خودپذیری مغناطیسی بالاتر از ۰/۰۵ در واحد SI، تا عمق ۲۰۰ متری با وضوح مناسبی با روش مغناطیس‌سنجی قابل‌شناسایی هستند. با افزایش خودپذیری مغناطیسی سازه که در اثر افزایش استفاده از مواد مغناطیسی (آهن و فولاد) در ترکیب آن‌ها رخ می‌دهد احتمال کشف آن‌ها بالاتر می‌رود به طوری که اگر خودپذیری آن‌ها از ۰/۱ تجاوز کند احتمال کشف آن‌ها تا اعماق ۴۰۰ متر هم وجود دارد. یکی دیگر از راهکارهای مؤثر در زمینه کاهش احتمال کشف سازه‌های زیرزمینی، ساخت آن‌ها در مناطقی است که از لحاظ زمین‌شناسی دارای تغییرات مغناطیسی طبیعی بالایی هستند. از آنجایی که بسیاری از سنگ‌های آذرین از جمله گابرو، بازالت و آندزیت به دلیل حضور

- [20] Roest, W. R.; Verhoef, J.; Pilkington, M. "Magnetic Interpretation Using 3-D Analytic Signal"; *J. Geophysics* 1992, 57, 116-125.
- [21] Salem, A.; Ravat, D. "An analytic Signal and Euler Method for Automatic Interpretation of Data"; *J. Geophysics* 2003, 68, 1952-1961.
- [22] Thompson, D. T. "EULDPH: a New Technique for Making Computer-Assisted Depth Estimates from Magnetic Data"; *J. Geophysics* 1982, 47, 31-37.
- [23] Beiki, M. "Analytic Signals of Gravity Gradient Tensor and Their Application to Estimate Source Location"; *J. Geophysics* 2010, 75, 159-174.
- [24] Oldenburg, D. W.; Pratt, D. A. "Geophysical Inversion for Mineral Exploration - A Decade of Progress in Theory and Practice"; *Conf. Mineral Exploration 2007*, 61-95.
- [25] Louro, V. H.; Mantovani, M. S. "3D Inversion and Modeling of Magnetic and Gravimetric Data Characterizing the Geophysical Anomaly Source in Pratinha I in the Southeast of Brazil"; *J. Applied Geophysics* 2012, 80, 110-120.
- [26] Riberio, V. B.; Louro, V. H.; Montovani, M. S. "3D Inversion of Magnetic Data of Grouped Anomalies Study Applied to São José Intrusions in Mato Grosso, Brazil"; *J. Applied Geophysics* 2013, 93, 67-76.
- [27] Kalateh A. N.; Kahoo, A. R. "Estimation of 3D Density Distribution of Chromite Deposits Using Gravity Data"; *J. Mining and Environment* 2013, 4, 97-104.
- and Use for Automated Anomaly Interpretation"; *J. Geophysics* 1972, 37, 507-517.
- [13] Nabighian, M. N., "Additional Comments on the Analytic Signal of Two Dimensional Magnetic Bodies with Polygonal Cross-Section"; *J. Geophysics* 1974, 39, 85-92.
- [14] Nabighian, M. N. "Toward a Three Dimensional Automatic Interpretation of Potential-Field Data via Generalized Hilbert Transforms: Fundamental Relations"; *J. Geophysics* 1984, 49, 780-786.
- [15] Hsu, S. K.; Sibuet, J. C.; Shyu, C. T. "High-resolution Detection of Geologic Boundaries from Potential Anomalies: An Enhanced Analytic Signal Technique"; *J. Geophysics* 1996, 61, 373-386.
- [16] Bastani, M.; Pedersen, L. B. "Automatic Interpretation of Magnetic Dike Parameters Using the Analytical Signal Technique"; *J. Geophysics* 2001, 66, 551-561.
- [17] Salem, A.; Ravat, D.; Gamey, T. J.; Ushijima, K. "Analytic Signal Approach and its Applicability in Environmental Magnetic Investigations"; *J. Appl. Geophysics* 2002, 49, 231-244.
- [18] Li, Y.; Oldenburg, D. W. "3-D Inversion of Magnetic Data"; *J. Geophysics* 1996, 61, 394-408.
- [19] Zhang, S. Y.; Pan, Y. L. "The Principle of Applied Geophysics"; China University of Geosciences Press 2000, 1-212.