

مدلسازی پیشرو و وارون سه بعدی داده های مغناطیسی به منظور اکتشاف سازه های زیرسطحی

محمد محمدزاده مقدم^۱، محمدرضا سیف^۲، سعید میرزایی^۳

^۱ پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی شهید بهشتی

^۲ دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده پدافند غیرعامل

^۳ پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی شهید بهشتی

نام و نشانی ایمیل نویسنده مسئول:

محمد محمد زاده مقدم

mmz140@yahoo.com

چکیده

بررسی امکان آشکارسازی سازه های زیرزمینی همواره یکی از پیچیده ترین مسائل مورد بحث در تأمین امنیت تأسیسات مدفون بوده است. در این مقاله از داده های مغناطیسی برای حل مسئله استفاده شده است. با استفاده از روش مغناطیس سنجی می توان در مدت کوتاهی مناطق وسیعی را تحت پوشش قرار داد و سپس با تجزیه تحلیل نقشه های مغناطیسی بدست آمده به شناسایی اهداف زیرسطحی مورد نظر پرداخت. برای تحلیل همه جانبه موضوع مورد نظر، مسئله به دو صورت پیشرو 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 می شود و با بررسی دامنه این سیگنال امکان کشف سازه زیرزمینی مورد بحث قرار می گیرد. در مسئله وارون، با معلوم بودن سیگنال میدان مغناطیسی با استفاده از وارون سازی سه بعدی توسط الگوریتم لی و اولدنبرگ، موقعیت سازه مدفون برآورد می شود. هر دو مسئله مستقیم و معکوس با انجام شبیه سازی های متنوع مورد بررسی قرار گرفته و راهکارهای پدافندی برای کاهش احتمال کشف سازه های زیرزمینی ارائه شده است.

کلمات کلیدی: مغناطیس سنجی، سازه های مدفون، مدلسازی پیشرو و وارون سه بعدی.

مقدمه

در میان روش‌هایی که برای شناسایی سازه‌های زیرزمینی به کار می‌روند، روش‌های مبتنی بر اندازه‌گیری میدان مغناطیسی زمین به دلیل ویژگی‌های منحصر به فرد میدان مغناطیسی از کارایی بالایی برخوردار هستند. روش مغناطیس‌سنجی 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 هیدروکربوری استفاده می‌شود. در این کاربردها، نقشه مربوط به میدان مغناطیسی منطقه اندازه‌گیری می‌شود و از آنجایی که تغییرات میدان مغناطیسی از تغییرات خودپذیری مغناطیسی سنگ‌ها و اجرام موجود در زمین به دلیل وجود کانی‌مگنتیت منتج می‌گردد، با آنالیز داده‌های مغناطیسی اندازه‌گیری شده می‌توان به اطلاعاتی در مورد نوع مواد زیرزمینی و مکان آنها دست یافت [۱].

در مبحث کاربرد روش‌های ژئوفیزیکی در مباحث نظامی، محققان زیادی به بررسی نحوه استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی بخصوص مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی و الکترومغناطیس به منظور اکتشاف و مکان‌یابی اهداف نظامی پرداخته‌اند [۲]، [۳]، [۴]، [۵] و [۶]. عمده این پژوهشگران به بررسی نحوه امکان شناسایی اشیاء فلزی و مهمات عمل‌نکرده نزدیک سطح زمین پرداخته‌اند. استفاده از روش‌های ژئوفیزیکی در شناسایی اشیاء فلزی نزدیک سطح زمین یا مهمات عمل‌نکرده نیازمند داده‌برداری بر روی سطح زمین و یا بسیار نزدیک به سطح زمین، صرف زمان زیاد و همچنین احتمال خطای بالا در خروجی‌های بدست آمده است. اما امروزه یکی از مسائل مهم نظامی در مبحث پدافند غیرعامل امکان شناسایی اهداف نظامی زیرزمینی زیرسطحی و عمیق مانند سیلوها، انبار مهمات، تجهیزات و موشک‌های پنهان توسط یکی از پرکاربردترین روش‌های ژئوفیزیکی یعنی روش مغناطیس‌سنجی از طرف کشور متجاوز می‌باشد. با استفاده از روش مغناطیس‌سنجی می‌توان در مدت زمان کوتاهی مناطق وسیع و صعب‌العبور را مورد پوشش قرار داد. سیف و همکاران [۶] 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 همه جانبه 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^۱ است که وسیله‌ای برای اندازه‌گیری میزان مغناطیس‌شوندگی مواد می‌باشد. 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 با $1/r^3$ که r فاصله تا هدف است.

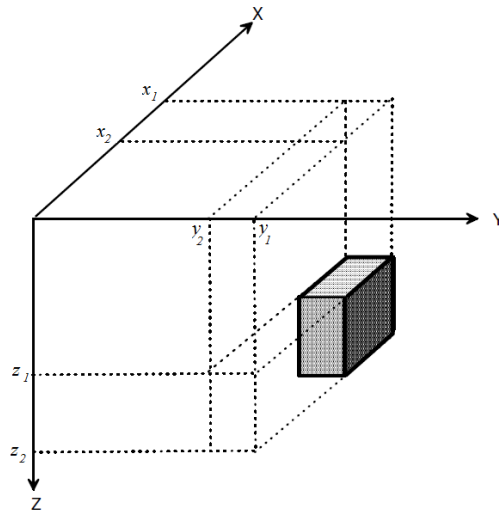
در این تحقیق مسئله امکان شناسایی سازه‌های مغناطیسی به دو صورت مستقیم و معکوس مورد بررسی قرار گرفت. در حالت مستقیم سازه‌هایی با ابعاد، عمق و خودپذیری مغناطیسی مشخص در نظر گرفته شد و سیگنال مغناطیسی آن‌ها در سطح زمین مورد بررسی قرار گرفت. سپس در حالت وارون از سیگنال مغناطیسی مرحله مستقیم استفاده شد تا 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 برداشت شده با استفاده از وارون‌سازی سه‌بعدی مورد تعبیر و تفسیر قرار گرفته‌اند. زمانی که با استفاده از روش‌های کیفی موقعیت حدودی هدف برآورد شد می‌توان از این اطلاعات در مدل‌سازی سه‌بعدی استفاده نمود. در این بررسی از برنامه رایانه‌ای UBC Mag3D استفاده شد [۷]. این برنامه بر اساس الگوریتم غیر خطی لی-اولدنبرگ عمل می‌کند به طوری که بهترین جواب ممکن برای اهداف مغناطیسی، با روش تکرار حاصل می‌شود.

مدلسازی مستقیم

در ژئوفیزیک کاربردی از داده‌های مغناطیسی برای آشکارسازی ساختار توده‌ها و مواد زیر زمین استفاده می‌شود. مدل‌سازی مغناطیسی روشی برای محاسبه این کمیت‌ها با استفاده از آنومالی‌های مغناطیسی معلوم بر اساس تئوری پتانسیل است. برای مثال با داشتن خودپذیری یک توده و معلوم بودن مرزهای آن می‌توان کمیت‌های فوق را محاسبه کرد.

¹ Susceptibility

هر توده مغناطیسی می تواند 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 مدل سازی برای محاسبه اثر میدان مغناطیسی آن در سطح دقیق تر خواهد بود، اما در این صورت تعداد مجهولات بیشتر و در نتیجه زمان انجام مدلسازی افزایش خواهد یافت.



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 مغناطیدگی است. مولفه های میدان مغناطیسی عبارتند 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 [۸]:

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

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

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

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:

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

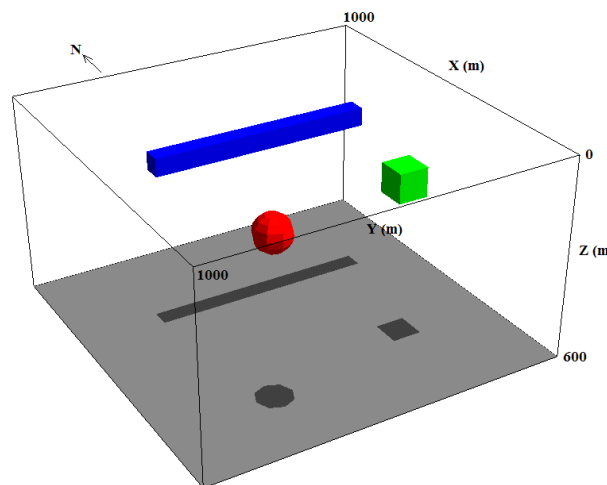
روابط فوق اغلب به عنوان معادلات پایه برای محاسبه آنومالی های مغناطیسی ناشی از توده های زیرسطحی با اشکال هندسی مختلف

بکار می رود.

² - Inclination

³ - Declination

در این مدل سازی از اشکال هندسی منظم شامل کره، مکعب مربع و مکعب مستطیل به عنوان سازه های زیرزمینی مورد نظر استفاده شده است (شکل ۲). ابعاد اجسام مذکور در جدول ۱ آورده شده است. همانطور که مشاهده می شود ابعاد در نظر گرفته شده به ابعاد سازه های واقعی زیرسطحی نزدیک است. به منظور تولید این مدل های سه بعدی، از نرم افزار ModelVision استفاده شد. این نرم افزار قادر است بر اساس الگوریتم مدل سازی مذکور پاسخ میدان مغناطیسی ناشی از شکل های هندسی مختلف با کمیت های دلخواه را با دقت بالایی تولید کند. یکی از کمیت های مهم جهت انجام مدل سازی پیشرو، برآورد صحیح خودپذیری مغناطیسی توده مولد آنومالی است. برای این منظور از جدول خودپذیری سنگ ها و کانی های ارائه شده توسط تلفورد و همکاران [۱] و همچنین بررسی نتایج مدل استفاده شد. در این مدل سازی از یک بازه خودپذیری مغناطیسی نسبتاً وسیع استفاده شد تا بتواند انواع سازه ها از نظر محتویات و خصوصیات مغناطیسی آن ها را در برگیرد. در این مدل سازی سه خودپذیری مغناطیسی، ۰/۰۵، ۰/۱ و ۰/۲ در واحد SI در نظر گرفته شد. یکی دیگر از کمیت های مهم در انجام مدل سازی پیشرو عمق سازه (فاصله جسم تا نقطه مشاهده ای) است. همانطور که در رابطه (۱) ذکر شد شدت میدان مغناطیسی با مجذور سوم فاصله رابطه عکس دارد. بنابراین فاصله بین جسم تا نقطه مشاهده ای تاثیر زیادی در امکان یا عدم امکان شناسایی آن دارد. بر این اساس در این مقاله نحوه تاثیر تغییر فاصله بین مغناطیس سنج تا سازه بررسی می شود. این فاصله می تواند شامل هر دو کمیت ارتفاع پرواز و عمق سازه و یا صرفاً یکی از آن ها باشد. از آنجایی که معمولاً کمیت عمق سازه از ارتفاع پرواز بیشتر است، بنابراین در اینجا برای سهولت بحث بجای ذکر فاصله بین سنجنده و سازه از عمق سازه استفاده خواهد شد. عمق های مختلف سازه در این مدل سازی عبارتند از ۵۰، ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰ و ۵۰۰ متر. یکی دیگر از مسائل مهمی که در مدل سازی مغناطیسی سازه های نظامی باید به آن توجه شود، وضوح داده برداری است. این مسئله به طور مستقیم در امکان یا عدم امکان شناسایی هدف مورد مطالعه موثر است. وضوح داده برداری به طور عمده توسط ارتفاع پرواز و فاصله بین خطوط برداشت کنترل می شود. همانطور که ذکر گردید در این مقاله ارتفاع پرواز، متغیر در نظر گرفته شده و انواع حالت های آن مورد بررسی قرار می گیرد، اما فاصله خطوط پرواز ثابت فرض شده است؛ به طوری که هیچ گونه سیگنال مغناطیسی از سازه ها از دست نرفته و پدیده الیاسینگ^۴ رخ نمی دهد. در این مقاله با توجه به ابعاد سازه های 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 می رود.



شکل ۲- سازه های زیرزمینی مختلف.

جدول ۱- مشخصات سازه های زیرزمینی مورد نظر.

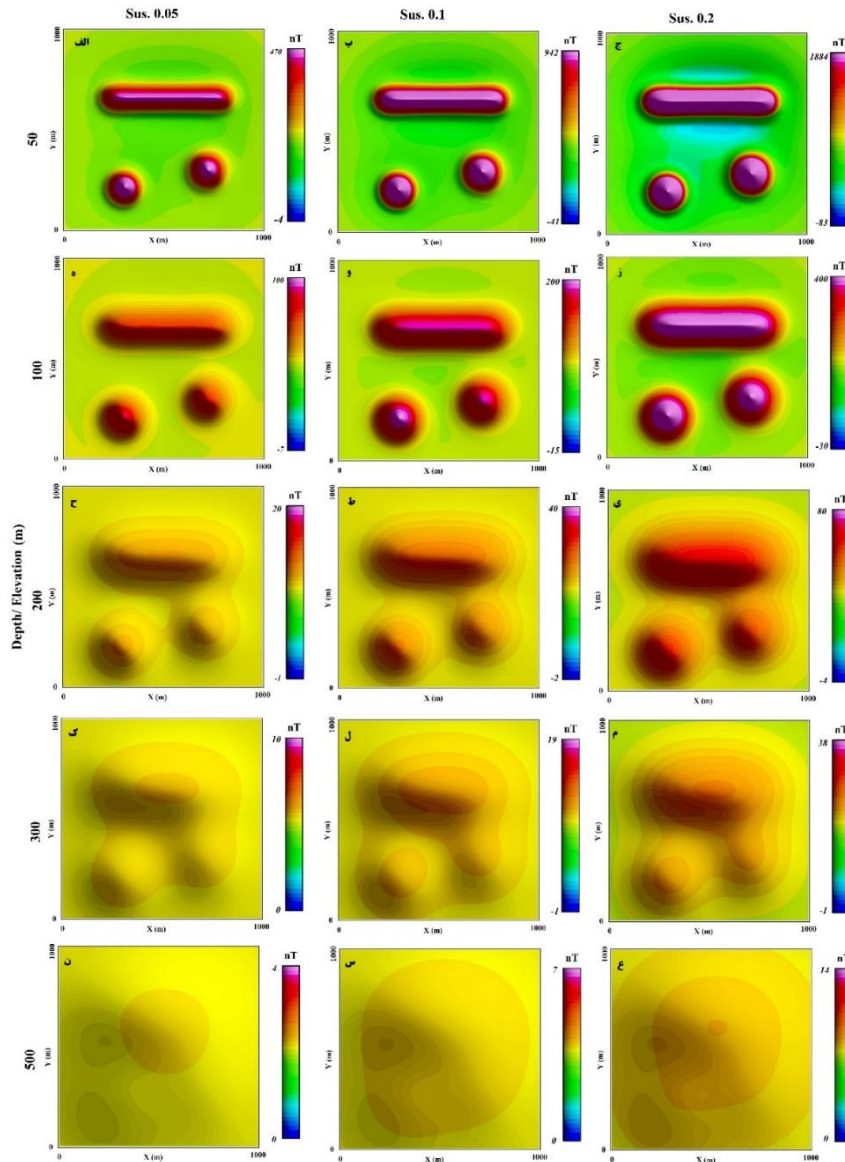
ابعاد (متر)	شکل سازه
۵۰*۵۰*۶۰۰	مکعب مستطیل
۸۰*۸۰*۸۰	مکعب مربع
۵۰ (شعاع)	کره

مدل سازی پیشرو با هدف بررسی پاسخ میدان مغناطیسی سازه های مختلف مطابق جدول ۱ و با در نظر گرفتن خودپذیری ها و اعماق متفاوت، محاسبه شد. شکل (۳- الف تا ع) نتایج این مدل سازی را در حالت های مختلف نشان می دهد. همان گونه که در این شکل مشاهده می شود، در هر ستون خودپذیری مغناطیسی ثابت و در هر ردیف عمق سازه یکسان است. لازم به ذکر است که موقعیت افقی و ابعاد سازه ها در کلیه این شکل ها ثابت در نظر گرفته شده است. با توجه به این شکل ها می توان به صورت همه جانبه تاثیر تغییرات خودپذیری مغناطیسی و عمق سازه در نحوه شناسایی آن ها 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 نانوتسلا (شکل ۳- الف)، در خودپذیری ۰/۱ در حدود ۹۸۳ نانوتسلا (شکل ۳- ب) و در خودپذیری ۰/۲ حدود ۱۹۶۷ نانوتسلا (شکل ۳- ج) است. در جدول ۲ بیشینه تباین مغناطیسی ایجاد شده برحسب نانوتسلا با تغییر عمق و خودپذیری مغناطیسی سازه مربوط به شکل ۳، ارائه گردیده است.

جدول ۲- بیشینه تباین مغناطیسی ایجاد شده برحسب نانوتسلا با تغییر خودپذیری مغناطیسی و عمق سازه.

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

یکی از مناسب ترین راهکارهای پدافند غیرعامل در برابر کشف سازه های زیرزمینی به وسیله مغناطی سنجی افزایش عمق و کاهش خودپذیری مغناطیسی مواد و محتویات سازه مورد نظر است. واضح است که با افزایش عمق و کاهش خودپذیری سازه امکان کشف آن کاهش می یابد. به منظور بررسی دقیق تر موضوع و نحوه آشکارسازی اهداف مورد نظر با جدیدترین و کارآمدترین روش های پردازشی و تفسیری موجود، داده های تولید شده در این مرحله به عنوان ورودی در حالت مسئله وارون استفاده می شود. لازم به ذکر است که قبل از ورود داده ها به مرحله بعد، ۵ درصد نوفه به روش گاوسی به داده ها افزوده شد تا به واقعیت نزدیک تر شود.



شکل ۳- پاسخ میدان مغناطیسی حاصل از سازه های زیرزمینی شکل ۲ با تغییر عمق و خودپذیری مغناطیسی.

مدلسازی معکوس

یکی از بهترین روش های تحلیل نتایج از حاصل مدلسازی مستقیم، حل این مسائل به صورت وارون است. در این مقاله از داده های میدان مغناطیسی ناشی از اشکال هندسی منظم (در بخش ۲) به منظور مدل سازی وارون آن ها استفاده شد. وارون سازی سه بعدی داده های مغناطیسی توسط الگوریتم لی و اولدنبرگ [۷] یکی از بهترین روش های حل مسائل وارون در سال های اخیر است.

به منظور بررسی سه بعدی سازه های مورد نظر، برگردان سه بعدی داده ها توسط الگوریتم مذکور در قالب نرم افزار UBC Mag3D انجام شد. استفاده از این الگوریتم جهت انجام وارون سازی داده های مغناطیسی در مناطق مختلف دنیا نتایج بسیار سودمندی را ارائه داده است (به عنوان نمونه: [۹]، [۱۰]، [۱۱] و [۱]). در رویکرد برگردان عرضه شده از سوی لی و اولدنبرگ [۷] ابتدا در مورد متغیری که تفسیر براساس آن صورت خواهد گرفت، تصمیم گیری می شود که تابعی از خودپذیری مغناطیسی مورد جستجو می باشد. سپس یک تابع هدف چند مؤلفه ای که دارای انعطاف پذیری کافی برای تولید انواع مدل باشد، ساخته می شود. این تابع هدف، ناهمواری ها را در سه جهت فضایی جبران می کند و یک وزن دهی سه بعدی براساس توزیع خودپذیری مغناطیسی با عمق دارد. تابع های کمکی وزن دهی سه بعدی در تابع هدف را می توان در ترکیب کردن اطلاعات بیشتر درباره مدل به کار برد. چنین اطلاعاتی ممکن است از کاوش های دیگر ژئوفیزیکی، داده های زمین شناسی و یا درک کمی و کیفی مفسر از ساختار زمین شناسی و ارتباط آن با خودپذیری مغناطیسی سنگ ها باشد. راه حل عددی برای برگردان، از راه تقسیم زمین به تعداد زیادی سلول، تحقق یافته است؛ تا اجسام زمین شناسی پیچیده به طور نسبی ساخته شوند. حدس های اولیه در

مورد هدف مورد بررسی از جمله خودپذیری مغناطیسی، موقعیت و شکل آن جهت انجام این وارون سازی، ما را در رسیدن به یک مدل واقعی تر هدایت می کنند. بنابراین به منظور وارون سازی دقیق داده ها از نتایج به دست آمده از روش های قبل (سیگنال تحلیلی و اوپلر) استفاده شد. الگوریتم عرضه شده از سوی لی- اولدنبرگ از رابطه (۸) آغاز می شود:

$$d = Gk \quad (8)$$

که d مربوط به داده های واقعی، G ماتریس حساسیت و k خودپذیری مغناطیسی سنگ ها در یک بلوک متعامد و شبکه بندی شده به منظور انجام وارون سازی است. مسئله برگردان به منزله یک مسئله بهینه سازی، فرمول بندی می شود؛ که یک تابع هدف از مدل، با توجه به محدودیت های معادله کمینه می شود؛ تا داده ها، با یک خطای قابل قبول باز تولید شود. فرض کنید تابع هدف به صورت زیر باشد:

$$\begin{aligned} \Phi_m(m) = & \alpha_s \int_v w_s \{w(r)(m(r) - m_0)\}^2 dv \\ & + \alpha_x \int_v w_x \{[\partial w(r)/\partial x][(m(r) - m_0)]\}^2 dv \\ & + \alpha_y \int_v w_y \{[\partial w(r)/\partial y][(m(r) - m_0)]\}^2 dv \\ & + \alpha_z \int_v w_z \{[\partial w(r)/\partial z][(m(r) - m_0)]\}^2 dv, \end{aligned} \quad (9)$$

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 $\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z$ و α_s بر درجه اهمیت نسبی متفاوت مولفه 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 (۱۰) به دست می آید:

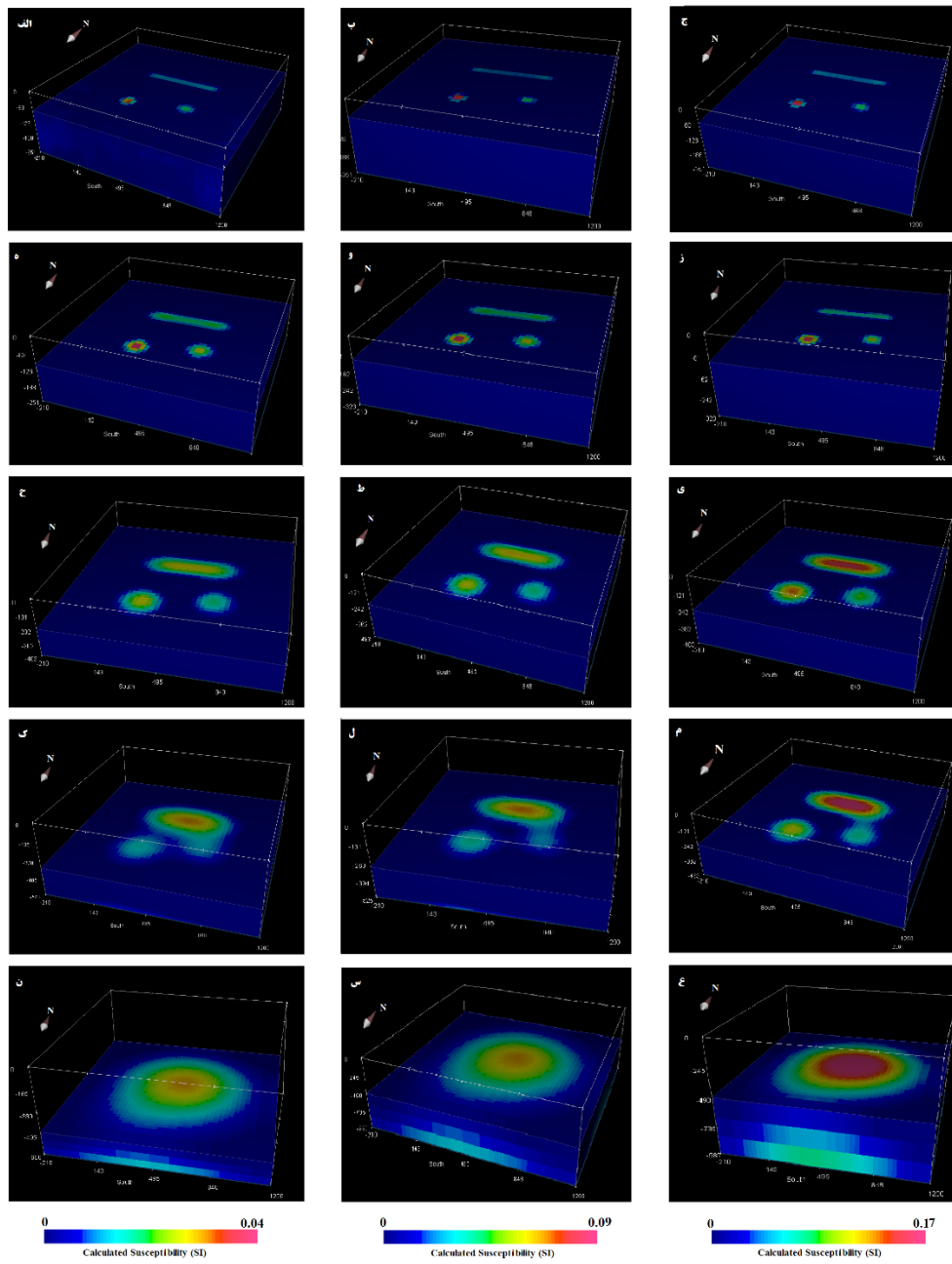
$$\Phi_d = \|w_d(Gk - d_{obs})\|^2 \quad (10)$$

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

$$\Phi = \Phi_d + \mu \Phi_m, \quad (11)$$

که در آن μ پارامتر تنظیم کننده است. جزئیات و توصیف های بیشتر در مقاله لی و اولدنبرگ [۷] موجود است. شکل (۴- 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. نتایج بدست آمده در شکل (۴) برحسب خودپذیری مغناطیسی است. بطوری 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 داده شده است. همانطور که در شکل (۴) در پایین هر ستون مشاهده می شود خودپذیری بازسازی شده با درصد خطای قابل قبولی محاسبه شده است. به عنوان مثال در ستون اول که خودپذیری واقعی سازه ها ۰/۰۵ بوده، 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.

با بررسی کلیه مدل های بازسازی شده در شکل ۴ 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 آن ها خواهد بود؛ اما در عمق بالاتر یعنی ۳۰۰ متر، این مسئله برای سازه های با خودپذیری بالاتر از ۰/۱ صادق است. زیرا همانطور که در شکل (۴- ل و م) مشاهده می شود نتایج وارون سازی، شکل و موقعیت سازه ها را با تفکیک مناسبی بازسازی نموده اند اما در شکل (۴- 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 ۴- ن، س و ع).



شکل ۴- نتایج وارون سازی سه بعدی داده های مغناطیسی تولید شده در مرحله مسئله مستقیم. در هر تصویر (الف تا ع)، برش عمقی در بهترین عمق بازسازی منشاء آنومالی، ایجاد شده است. قبل از اعمال وارون سازی پنج درصد نوفه گاوسی بر روی داده ها اعمال شد.

نتیجه گیری

با توجه به ابعاد هدف مورد مطالعه و انجام عملیات داده برداری مغناطیسی با وضوح مناسب می توان به شناسایی و مکان یابی آن ها پرداخت. نتایج این پژوهش نشان می دهد به منظور شناسایی سازه هایی در حد ابعاد جدول ۱، داده برداری مغناطیسی با فاصله خطوط ۶۰ متر نیاز است.

برای بررسی همه جانبه استفاده از این مشاهدات برای کشف سازه های 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 مدل سازی گردید. سپس با آنالیز سیگنال مدل سازی شده می توان به احتمال کشف سازه پرداخت. در مسئله معکوس با معلوم بودن سیگنال مغناطیسی وارون سازی سه بعدی ارائه گردید و با شبیه سازی های متعدد نشان داده شد که روش مورد نظر از کارایی بالایی برخوردار بوده و می تواند یک الگوریتم مطمئن در زمینه تعیین مکان سازه های مدفون مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این پژوهش نشان می دهد که در صورت انجام یک عملیات مغناطیس سنجی با وضوح مناسب (فاصله خطوط برداشت کمتر از ۶۰ متر) می توان در شرایط خاص زمین شناسی، اهداف و سازه های نظامی با خود پذیری بالاتر از ۰/۰۵ در واحد SI را شناسایی کرد.

همچنین راهکارهایی در زمینه پدافند غیرعامل برای کاهش احتمال کشف سازه های زیرزمینی ارائه شد. یکی از این راهکارها در این زمینه افزایش عمق سازه است. همچنین نتایج این پژوهش نشان می دهد در مناطق خاص زمین شناسی مانند حوضه های رسوبی با پاسخ مغناطیسی آرام، اهداف زیرزمینی با تباین خود پذیری مغناطیسی بالاتر از ۰/۰۵ در واحد SI، تا عمق ۲۰۰ متری با وضوح مناسبی با روش مغناطیس سنجی قابل شناسایی هستند. با افزایش خود پذیری مغناطیسی سازه که در اثر افزایش استفاده از ترکیبات مگنتیتی در آن ها رخ می دهد احتمال کشف آنها بالاتر می رود به طوری که اگر خود پذیری آنها از ۰/۱ تجاوز کند احتمال کشف آنها تا اعماق ۴۰۰ متر هم وجود دارد.

یکی دیگر از راهکارهای موثر در زمینه کاهش احتمال کشف سازه های زیرزمینی، ساخت آن ها در مناطقی است که از لحاظ زمین شناسی دارای تغییرات مغناطیسی طبیعی بالایی هستند. از آنجایی که بسیاری از سنگ های آذرین از جمله گابرو، بازالت و آندزیت به دلیل حضور مواد فرومنیزین در آن ها دارای خود پذیری مغناطیسی بالایی هستند، عامل مزاحمی برای شناسایی اهداف مورد نظر می باشند. کمر بند آتشفشانی ارومیه- دختر که با پهنای حدود ۳۰ تا ۵۰ و طول بیش از ۱۵۰۰ کیلومتر به موازات رشته کوه های زاگرس مناطقی زیادی از ایران را پوشش می دهد، به دلیل ماهیت مغناطیسی بالا، می توانند مکان مناسبی برای ساخت این سازه های باشد. مکان های دیگری نیز در ایران وجود دارد که به دلیل خاصیت بالای مغناطیسی، این وضعیت را دارد. برای شناسایی این مناطق می توان از داده های مغناطیس سراسری در ایران استفاده نمود.

محاسبه خود پذیری سازه و محتویات آن بر اساس ترکیبات آن قبل ساخت هر گونه سازه زیرزمینی و انجام مدل سازی پیشرو و معکوس بر اساس الگوریتم ارائه شده در این پژوهش، مهمترین راهکار پدافندی برای محفوظ ماندن از دید سنجنده های مغناطیسی است.

منابع و مراجع

- [1] Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sherrif, R. E. "Applied Geophysics"; Cambridge University Press, 1990.
- [2] Butler, D.K. "Assessment of Microgravity for UXO Detection and Discrimination"; U.S. Army Engineer Research and Development Center. 2000, 1-37.
- [3] Butler, D.K. "Potential fields methods for location of unexploded ordnance"; The Leading Edge. 2001, 20, 890 - 895.
- [4] Billings, S.D.; Youmans, C. "Experiences with unexploded ordnance discrimination using magnetometry at a live-site in Montana"; J. Applied Geophysics. 2007, 61, 194-205.
- [5] Davis, K.; Li, Y.; Nabighian, M. "Automatic detection of UXO magnetic anomalies using extended Euler deconvolution"; Geophysics. 2010, 75, 13-20.
- [6] Saif, M.R.; Khazaei, S. "Detection of Underground Targets Based on the Gravity Gradient Data Using the Euler Deconvolution Method"; J. Advanced Defense Sciences. 2015, 1, 33-43.
- [7] Li, Y.; Oldenburg, D.W. "3-D inversion of magnetic data"; J. Geophysics. 1996, 61, 394-408.
- [8] Zhang, S.Y.; Pan, Y.L. "The principle of applied geophysics"; China University of Geosciences Press: China. 2000, 1-212.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.