

تخمین پارامترهای هندسی مهمات منفجر نشده به روش القای الکترومغناطیس با استفاده از الگوریتم ژنتیک

مجتبی بابایی^{۱*} و سید منوچهر حسینی^۲

^۱ استادیار، گروه ژئوفیزیک، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

^۲ استادیار، گروه برق، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۴، پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۱۶)

چکیده

شناسایی و آشکارسازی مهمات منفجر نشده چه در خشکی و چه در محیط دریا، به دلیل مشکلات جانی و زیست محیطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است و به دلیل وجود قطعات فراوان به جای مانده از انفجار مهمات، جداسازی این مهمات، به دلیل هزینه‌های بالای استخراج، بسیار مهم است. در این مقاله به منظور آشکارسازی مهمات منفجر نشده، پارامترهای هندسی کره‌وار شامل عمق، آزیموت و خروج از مرکز در دو حالت رسانا و نارسانا به عنوان مدلی از این مهمات، با استفاده از داده‌های القای الکترومغناطیسی، آمده است. پاسخ‌های الکترومغناطیسی در حوزه فرکانس و در محدوده القای در دو مد پاسخ جریان گردابی ناشی از تحریک جسم رسانا با یک میدان مغناطیسی و پاسخ جریان کانالی به دلیل آشفتگی ایجاد شده در میدان الکتریکی تابشی بر حسب پاسخ کره در نظر گرفته می‌شود و تابع هدف با معادلات به دست آمده تعیین می‌گردد. برای تولید داده‌ها از چرخش پیچ‌های فرستنده و گیرنده هم‌محور و همین‌طور تغییر فرکانس میدان‌های تابشی به طور همزمان استفاده شد تا در حالت دو بعدی، پارامترهای بی‌هنجاری مدفون به دست آیند. در این پژوهش برای تخمین پارامترها از روش الگوریتم ژنتیک با چرخه رولت و بر روی داده‌های القای الکترومغناطیس با نوفه ۵ درصد و بدون نوفه استفاده شده است. نتایج حاصل نشان می‌دهد که اعمال الگوریتم ژنتیک بر روی این داده‌ها، توانایی تفکیک اجسام و تخمین پارامترهای مدل را داراست. هر سه پارامتر با خطای کمتر از ۱۰ درصد به دست آمدند و پارامتر عمق نسبت به دو پارامتر دیگر با دقت بهتری به دست آمد.

کلمه‌های کلیدی: الکترومغناطیس القایی، حوزه فرکانس، مهمات منفجر نشده، الگوریتم ژنتیک، پارامترهای هندسی مدل

۱ مقدمه

آلودگی مهمات منفجر نشده (UXO) به یک مشکل جدی بشردوستانه و زیست محیطی در سراسر جهان تبدیل شده است؛ زیرا استفاده از زمین را محدود، امنیت عمومی را تهدید و باعث تلفات جدی غیرنظامیان می‌شود (بیلوخوا و همکاران، ۲۰۰۷). بنابراین پاک‌سازی مناطق آلوده با UXO یکی از موضوعات مهم و چالش برانگیز است و به دلیل وسعت زیاد (میلیون‌ها هکتار)، شرایط زمین‌شناسی متنوع مناطق آلوده و تنوع زیاد در اندازه‌ها و انواع UXO، پیچیده و پرهزینه است. (فورست و همکاران، ۲۰۱۷). در حالی که برخی از UXO های بسیار بزرگ ممکن است در عمق ۱۰ متری زیر زمین قرار داشته باشند، اما بیشتر UXO ها در عمق کمتر از یک متر از سطح خاک قرار دارند و نیاز به روش‌های بررسی کم عمق دارند. شناسایی، جداسازی و طبقه‌بندی، سه مرحله در پاکسازی UXO هستند (گرزگوو ریچ و همکاران، ۲۰۱۲). در مرحله شناسایی، زمین باید مورد بازرسی قرار گیرد تا مشخص شود که آیا هدفی مشابه UXO وجود دارد یا خیر. به عبارت دیگر ابتدا باید اطمینان حاصل شود که در نقشه‌برداری UXO سیگنال به اندازه کافی واضح از این مهمات به دست آمده است. متأسفانه، حسگرها تقریباً پاسخ‌های همه اجسام که در محیط قادر به تولید سیگنال باشند و از جمله قراضه فلزات و ترکش‌های به جا مانده را نیز ثبت می‌کنند که این امر در حفاری برای استخراج اشیاء شناسایی شده منجر به صرف هزینه‌های هنگفت می‌شود. بنابراین بی‌هنجاری‌های سیگنال دریافتی باید تحت بررسی دقیق قرار گیرند تا ماهیت شی پاسخ‌دهنده تشخیص و احتمال UXO بودن آن معلوم شود. پس دومین مساله اساسی، جداسازی مهمات از تکه فلزات و سایر اشیاء فلزی بی‌خطر بر جای مانده است. و در سومین مرحله ضروری است که نوع مهمات آشکار شده از یکدیگر تفکیک و طبقه‌بندی شوند. به این منظور لازم است وارون‌سازی داده‌های به‌دست آمده از

بی‌هنجاری‌ها انجام و پارامترهای هندسی و فیزیکی آن‌ها برآورد شود.

حسگرهای الکترومغناطیسی در حال حاضر مناسب‌ترین انتخاب برای آشکارسازی اجسام فلزی مدفون هستند. رادار نفوذ زمینی (GPR) ضمن این که در بسیاری از موارد ژئوفیزیک کاربردی مانند محیط زیست، باستان‌شناسی و بررسی‌های زیرسطحی به کار می‌رود، به طور کلی در تشخیص UXO چندان موفق نبوده است؛ زیرا در این روش، بازتاب از سطوح زمین و افت کیفیت سیگنال با عمق و همچنین به هم‌ریختگی سیگنال به دلیل قطعات فلزی و ناهمگونی‌های دی‌الکتریک بسیار زیاد است (اونیل، ۲۰۰۵؛ نانز-نیوتو و همکاران، ۲۰۱۴). یکی از رایج‌ترین روش‌های آشکارسازی اجسام آهنی، مغناطیس‌سنجی ایستا است. مغناطیس‌سنج‌ها با تشخیص اختلال ایجاد شده ناشی از اجسام فولادی در میدان مغناطیسی زمین، دست کم به عنوان آشکارسازهای فولاد نسبتاً قابل اعتماد هستند؛ اما به دلیل عملکرد فعلی و محتوای ذاتی اطلاعات در سیگنال‌ها، تصویری نسبتاً خام تولید می‌کنند و قابلیت جداسازی توسط آن کاملاً محدود است (ویگ و همکاران، ۲۰۲۰؛ السون، ۲۰۲۲). به لحاظ محدوده فرکانسی، حسگر القای الکترومغناطیسی (EMI) محاسن روش‌های مغناطیس‌سنجی و GPR را ترکیب می‌کنند. حسگرهای EMI مانند مغناطیس‌سنج تحت تاثیر ناهمگنی‌های دی‌الکتریک قرار نمی‌گیرند و در مقیاس مورد مشاهده در آشکارسازی مهمات، اساساً زمین برای آنها شفاف است. سیگنال‌های دریافتی با این روش دارای محتوای اطلاعاتی بالایی هستند و نسبت به فاصله، شکل، جهت‌گیری و جنس جسم حساس هستند. با این حساب می‌توان گفت استفاده از حسگرهای القای الکترومغناطیسی UWB (از چند ده هرتز تا ۱۰۰ کیلوهرتز) در روش القای الکترومغناطیسی (EMI) بهترین روش برای تشخیص مهمات منفجر نشده زیرسطحی است (اونیل و فرناندز، ۲۰۰۹). در حوزه الکترومغناطیس

رولت است. الگوریتم ژنتیک از نظریه تکامل داروین الهام گرفته شده‌اند (داروین، ۱۸۵۹). در این الگوریتم، نحوه تکامل ژنتیکی موجودات زنده شبیه‌سازی می‌شود. این روش با الهام از روند تکاملی طبیعت، مسائل را حل می‌کنند (هالند، ۱۹۷۵) و شامل خانواده‌ای از مدل‌های محاسباتی است که از مفهوم تکامل الهام گرفته شده‌اند. پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک، معمولاً با تولید جمعیتی از کروموزوم‌ها با عنوان جمعیت اولیه آغاز می‌شود. در الگوریتم‌های ژنتیک کروموزوم‌ها معمولاً به طور تصادفی تولید می‌شوند و مقید به حد بالا و پایین متغیرهای مسأله هستند. در مرحله بعد، ساختارهای داده‌ای تولید شده (کروموزوم‌ها) ارزیابی می‌شوند و کروموزوم‌هایی که می‌توانند به شکل بهتری جواب بهینه مسأله مورد نظر را نمایش دهند، نسبت به جواب‌های ضعیف‌تر شانس بیشتری برای تولید مثل پیدا می‌کنند. به عبارت دیگر، فرصت‌های تولید مثل بیشتری به این دسته از کروموزوم‌ها اختصاص داده می‌شود. میزان خوب بودن یک جواب، معمولاً نسبت به جمعیت جواب‌های کاندید فعلی سنجیده می‌شود. در الگوریتم ژنتیک، برای جلوگیری از به دام افتادن در کمینه‌های محلی در فضای جواب مسئله، جهش‌هایی به صورت تصادفی اعمال می‌شوند. اگر مسیر جستجوی اصلی به سمت همگرایی محلی برود، در همان زمان عملگر با جهش‌های تصادفی، به جستجوی مناطق دیگر فضای حل ادامه می‌دهد. برای اجرای الگوریتم لازم است در ابتدا با استفاده از اطلاعات اولیه، محدوده تغییرات پارامترها را برای تنظیم محدوده جستجو پیشنهاد و سپس تعداد بیت‌های تعیین‌کننده مدل را که مستقیماً با وضوح جستجوی GA مرتبط هستند، مشخص شوند. استفاده از بیت‌های بیشتر، حل‌هایی با وضوح بالاتر را به قیمت افزایش زمان محاسبات به دست می‌دهد. عملگر GA شروع به رمزگذاری «کروموزوم‌ها» که رشته‌های دوتایی از ترکیب «۰» و «۱» هستند و به طور تصادفی در امتداد عدد بیت مدل فضاها

القایی مطالعات متعددی برای آشکارسازی مهمات منفجر نشده انجام شده است.

برای مدل‌سازی مهمات منفجر نشده، هم در حوزه زمان و هم در حوزه فرکانس از کره و کره‌وار به عنوان دو شکل هندسی نزدیک به این گونه بی‌هنجاری‌ها استفاده شده است (پاشن و اولدنبرگ؛ آمبروس، ۲۰۱۶). مدل‌سازی پاسخ کره‌وار در حوزه زمان، با دو دوقطبی متعامد واقع در مرکز کره‌وار انجام و با استفاده از نحوه واپاشی قدرت این دوقطبی‌ها، پارامترهای کره‌وار تعیین شد (پاشن، ۲۰۰۱). در سال ۲۰۰۵ نورتون و همکاران، برای سیستم گیرنده و فرستنده هم محور و هم مرکز، رابطه تحلیلی پاسخ القای الکترومغناطیسی کره و همچنین کره‌وار بر حسب پاسخ کره هم ارز را به دست آوردند. در حالتی که پیچ‌های فرستنده و گیرنده از هم جدا هستند، پاسخ القای الکترومغناطیس برای کره‌وار توسط محمودی و تان (۲۰۰۹) و برای کره‌وار توسط بابایی و همکاران در سال ۲۰۱۳ به دست آمد. با استفاده از داده‌های القای الکترومغناطیس، تخمین عمق کره با روش خطی‌سازی (بابایی و همکاران، ۲۰۱۴) و تخمین عمق و شعاع کره با روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات انجام شده است (بابایی و مسییان، ۱۴۰۱).

در این مقاله از مدل مصنوعی کره‌وار برای مدل‌سازی مهمات منفجر نشده استفاده شده است. در ابتدا پاسخ الکترومغناطیس القایی کره‌وار به عنوان مدلی از مهمات منفجر نشده در دو حالت کشیده و پخت ارائه می‌گردد. در گام بعد با تولید داده‌های مصنوعی با و بدون نوفه در محدوده القای الکترومغناطیس حاصل از کره‌واری که درست زیر پیچ‌های گیرنده و فرستنده قرار داشته و جهت‌گیری دلخواه دارد، تولید می‌شود. از این داده‌ها برای تخمین پارامترهای هندسی شامل نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک کره‌وار، زاویه محور بزرگ کره‌وار با سطح زمین و عمق بی‌هنجاری استفاده می‌شود. روش به کار رفته برای تخمین پارامترها، روش الگوریتم ژنتیک (GA) با چرخه

محدودیت‌های جدی در کاربرد و وضوح حاصل از مطالعات در الکترومغناطیس القایی کاربردی ایجاد می‌کند. با فرض این که فرستنده و گیرنده هم مکان باشند، در رابطه (۳)، افت سیگنال کل به دلیل هندسه ذاتی میدان‌های شبه ایستا با $1/r^6$ متناسب است (نورتون و همکاران، ۲۰۰۵). البته اثر محیط در افت سیگنال که در GPR که یک مشکل جدی است، EMI را تحت تاثیر قرار نمی‌دهد. کاربرد قانون مداری آمپر-ماکسول همراه با این واقعیت که خطوط میدان مغناطیسی مسیر بسته‌ای را تشکیل می‌دهند، منجر به معادلات (۴) از نوع هلمهولتز در حوزه زمان (TD) و در حوزه فرکانس (FD) می‌شود (اونیل و فرناندز، ۲۰۰۹):

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla^2 \mathbf{H} = \sigma \mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} + \varepsilon \mu \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} \quad (\text{TD}) \\ (i\omega\sigma\mu + \omega^2\mu\varepsilon)\mathbf{H} = -k^2\mathbf{H} \quad (\text{FD}) \end{array} \right. \quad (4)$$

که در آن k عدد موج است. بزرگی نسبی دو جمله مشتق زمانی در رابطه (۴) از نسبت جمله‌های حوزه فرکانس متناظر، یعنی $\sigma/\omega\varepsilon$ ، تعیین کننده رفتار موجی یا انتشار در هوا، زمین یا دریاست که در آن بی‌هنجاری مدفون است. در محدوده فرکانس GPR ($10^7 - 10^9$ هرتز)، میدان‌ها در هوا ($\sigma \approx 0$) رفتار موجی دارند. در زمین، ثابت دی الکتریک خاک، $\kappa = \varepsilon/\varepsilon_0$ ، از حدود ۶ برای خاک خشک تا حداکثر حدود ۳۰ برای خاک کاملاً اشباع از آب متغیر است. برای زمین، σ از حدود $10^{-3} S/m$ (به ویژه برای خاک خشک و دانه‌دار) تا حدود $1 S/m$ برای محیط‌های اشباع شده با آب دریا متغیر است. رسانندگی دریا معمولاً $4 S/m$ در نظر گرفته می‌شود (محمودی و تان، ۲۰۰۹). با این مفروضات، برای GPR تقریباً در دو انتهای بازه، یعنی کمترین رسانندگی محیط مورد مطالعه (زمین یا دریا) و بیشترین فرکانس چشمه، نسبت عامل موج به عامل پخش برابر 10^{-3} و برای بیشترین رسانندگی و کمترین بسامد این نسبت برابر 10^2 است. با این حساب در مواردی موج و در موارد دیگری پخش ممکن است غالب شوند. به عنوان نمونه در صورت نبود آب شور در خاک،

جمع‌آوری شده‌اند، می‌کند. همه کروموزوم‌ها با هم مجموعه‌ای به نام مدل «جمعیت» را می‌سازند.

۱ روابط پایه

قانون فارادی، یکی از معادلات چهارگانه ماکسول، شار مغناطیسی متغیر با زمان را به E مرتبط می‌کند (اونیل و فرناندز، ۲۰۰۹):

$$\nabla \times E = \quad (1)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{زمان حوزه} \\ \left[-\frac{\partial B}{\partial t} \right] \\ \text{حوزه فرکانس} \\ [i\omega\mu H[e^{-i\omega t}]] \end{array} \right.$$

$B(T)$ چگالی شار مغناطیسی، برابر با حاصل ضرب میدان مغناطیسی $H(A/m)$ در پذیرفتاری مغناطیسی متوسط $\mu(H/m)$ است.

انتگرال‌گیری مولفه قائم از معادله (۱) بر روی سطح S ، رابطه انتگرالی قانون فارادی را به دست می‌دهد (اونیل و فرناندز، ۲۰۰۹):

$$\oint_C E \cdot dl = -d/dt \int_S B_n dS = -d\Phi/dt \quad (2)$$

انتگرال خطی حول مرز سطح C ، برابر نیروی محرکه الکتریکی است که در صورت وجود رسانا در اطراف سطح، یک حلقه جریان الکتریکی تولید خواهد کرد. زمانی که میدان‌های مغناطیسی ارسالی با جسم فلزی برخورد می‌کنند، تغییر شار مغناطیسی یک حلقه جریان ایجاد می‌کند. میدان H تولیدی توسط دوقطبی مغناطیسی کوچک که در آن فاصله نقطه از مرکز حلقه، r ، چند برابر قطر حلقه است از رابطه زیر به دست می‌آید (اونیل و فرناندز، ۲۰۰۹):

$$\mathbf{H}(\mathbf{r}) = \mathbf{m} \cdot \frac{3\hat{\mathbf{r}}\hat{\mathbf{r}} - \mathbf{I}}{4\pi r^3} \quad (3)$$

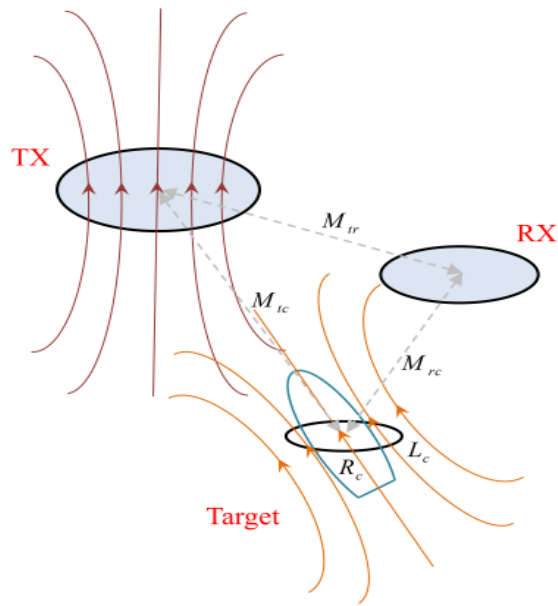
که در آن m گشتاور دوقطبی حلقه جریان است. معمولاً فرستنده‌های EMI و اجسام مورد اکتشاف دوقطبی‌های کوچکی را تشکیل می‌دهند و بنابراین رابطه (۳) با تقریب خوبی قابلیت کاربرد دارد. وابستگی $1/r^3$ سیگنال‌ها

حالتی که جسم مدفون نارساناست، در روش الکترومغناطیس القایی تنها راه شناسایی دریافت و تحلیل همین مد پاسخ است. خاک دارای تراوایی مغناطیسی هنوز هم می تواند یک پاسخ نیم فضای قابل توجه، از جمله اثر سطح ناهموار (که ما در واقع در کار میدانی می بینیم) ایجاد کند. تراوایی نسبی μ_r در فضای آزاد برابر یک است. برای خاک μ_r معمولاً بر حسب پذیرفتاری مغناطیسی (حجمی) و به صورت $(1 + \chi)$ بیان می شود. هر چند بزرگی χ به طور کلی در مرتبه 10^{-3} یا کمتر است (باتلر، ۲۰۰۳)، ولی می تواند برای ایجاد یک پاسخ نیم فضا که نسبت به اهداف فلزی مدفون قابل توجه است، کافی باشد. این امر در برخی در شناسایی UXO در مناطقی مانند زمین های آتشفشانی مشکل ساز هستند. اگر فلز به لحاظ مغناطیسی نفوذ پذیر باشد ($\mu > \mu_0$)، به دلیل ساختارهای دوقطبی مغناطیسی میکروسکوپی درون ماده یک مغناطیدگی ظاهر می شود. شکل (۱) هندسه جسم مدفون در زمین و میدان های تابشی توسط پیچه، میدان پاسخ دریافتی در پیچه گیرنده و بی هنجاری مدفون را نشان می دهد.

۲ پاسخ القای الکترومغناطیس کره و کره وار

پاسخ القای الکترومغناطیس یک کره فلزی تحت تاثیر میدان تابشی یکنواخت H شامل یک بخش حقیقی و یک بخش موهومی است. در محدوده حد فرکانس بالا، نفوذ میدان اولیه در کره به قدری ناچیز است که اساساً فقط جریان های سطحی گردابی وجود دارد و مطابق با قانون لنز، این جریان های سطحی به گونه ای گردش می کنند که با میدان اولیه مخالفت می کنند و در این حالت با پاسخ حقیقی منفی مواجه هستیم. رسانندگی محیط هم سبب ایجاد جریان می شود که برخورد خطوط جریان با جسم مدفون سبب اختلال در الگوی جریان شده و مد دیگری از پاسخ با نام

بیشینه مقدار نسبت از مرتبه واحد است. بنابراین پدیده های موجی معمولاً برجسته یا دست کم بسیار قابل توجه هستند. در مغناطیس شبه ایستا، یا الکترومغناطیس القایی عملاً جریان جابجایی $\partial \mathbf{D} / \partial t$ ناچیز است و در سراسر باند EMI در هوا و خاک پدیده پخش غالب بوده و رفتار موجی اساساً قابل چشم پوشی است و با میدان H غیر چرخشی مواجه هستیم که برای پتانسیل وابسته به آن معادله لاپلاس حاکم است. طول موج از چند کیلومتر در بالای باند تا شاید $10,000$ کیلومتر نزدیک به پایین باند متغیر است و در نتیجه در مقیاس مشاهده ما تغییر فاز قابل تشخیصی بین یک نقطه و نقطه دیگر وجود ندارد. همچنین در محدوده EMI پدیده هایی نظیر بازتاب، پراش، تشدید و غیره از نوع مورد انتظار موج روی نمی دهد. سیگنال ها پس از انتشار در هوا و زمین، به اهداف فلزی می رسند و در بیشتر باند EMI در فلز نفوذ می کنند که این امر در جداسازی اهداف ناشناخته، حائز اهمیت است. σ محیط انتشار کوچک است و عمق پوسته بسیار بیشتر از مقیاس مشاهده است. از این نظر، خاک نسبت به سیگنال های باند EMI شفاف است. بنابراین به طور کلی، در مورد EMI، برای تمام اهداف مورد نظر، میدان ارسالی به یک جسم مدفون فلزی می رسد و اساساً تحت تاثیر زمین قرار نمی گیرد. با توجه به پیوستگی مولفه مماسی میدان E بین خاک و اجسام فلزی مدفون، نسبت بزرگی جریان القایی در هر یک تقریباً برابر نسبت رسانایی آنها خواهد بود که از مرتبه 10^9 است. جریان القایی ناشی از میدان الکتریکی، در خاک سیگنال پاسخ قابل توجهی ایجاد نمی کند. البته در مورد محیط دریا جریان الکتریکی حاصل از میدان الکتریکی قابل ملاحظه است و اختلال ایجاد شده در این الگوی جریان به سبب برخورد با جسم رسانا، سبب ایجاد یک مد پتانسیلی در پیچه گیرنده می شود که پتانسیل حاصل از جریان کانالی (V_{cc}) نام دارد و در



شکل ۱. هندسه پیچ‌ها، میدان‌ها و بی‌هنجاری مدفون.

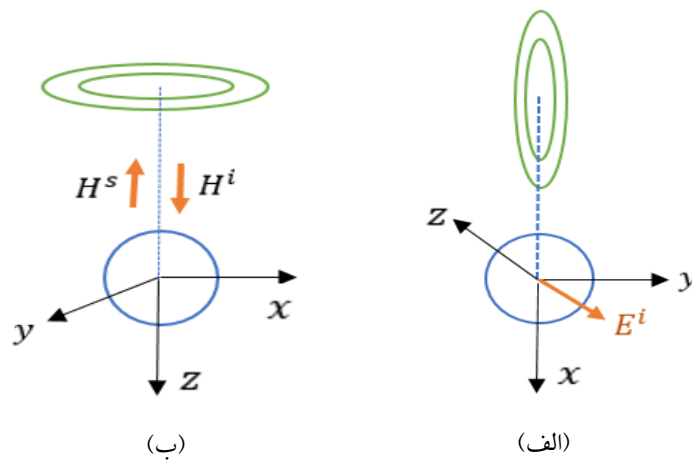
$$V_{ec}^{(sph)} = \frac{i\omega\mu_0 a^3}{2\pi I z^6} M_T M_R \quad (5)$$

در شکل (۲-الف) تنها پاسخ جریان گردابی دریافت می‌شود و پاسخ مد دیگر برابر صفر است و در شکل (۲-ب) فقط پاسخ جریان کانالی در پیچ‌ها گیرنده حس می‌شود و پاسخ جریان گردابی صفر است. کره کاملاً نارسای مدفون در محیط یکنواخت و با رسانایی ضعیف σ تنها پاسخ جریان کانالی دارد که برابر است با:

$$V_{cc}^{(void)} = -\frac{1}{2} V_{cc}^{(sph)} \quad (6)$$

جریان کانالی را در پیچ‌ها گیرنده تولید می‌کند. پاسخ‌های جریان‌های گردابی (V_{ec}) و کانالی (V_{cc}) دریافتی در پیچ‌ها گیرنده ناشی از کره کاملاً رسانا با شعاع a واقع در عمق z از سطح زمین و محل گیرنده (شکل ۱) با رابطه (۵) داده می‌شوند (نورتون و همکاران، ۲۰۰۵). M_R و M_T به ترتیب گشتاورهای دوقطبی پیچ‌های فرستنده و گیرنده، I جریان در پیچ‌ها فرستنده، σ رسانندگی محیط میزبان و ω بسامد زاویه‌ای میدان تابشی هستند:

$$V_{cc}^{(sph)} = -\frac{\sigma\omega^2\mu_s^2 a^3}{4\pi I z^4} M_T M_R \quad (5)$$



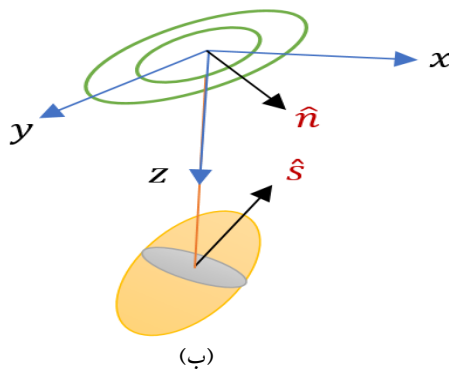
شکل ۲. هندسه پیچ‌ها و کره. در حالت (الف) تنها پاسخ جریان گردابی و در حالت (ب) تنها پاسخ جریان کانالی دریافت می‌شود.

مرکز کره یا کره‌وار به مرکز پیچه‌ها زاویه دلخواه θ می‌سازد، هر یک از پاسخ‌های جریان گردابی و کانالی دریافتی با داشتن پاسخ محوری (V^A) و پاسخ عرضی (V^T) برای هر یک از مدها، برابر است با (نورتون و همکاران، ۲۰۰۵):

$$V = V^{(A)}(\hat{n}, \hat{s}) + V^{(T)}[1 - (\hat{n}, \hat{s})^2] \quad (۷)$$

که در این رابطه مطابق شکل (۳-ب) جهت میدان تابشی با بردار یکه \hat{n} و جهت بردار از مرکز پیچه‌ها به مرکز جسم را با \hat{s} تعریف می‌کنیم. شکل (۳-الف) نمونه‌ای از یک مهمات منفجر نشده واقعی را نشان می‌دهد. رابطه (۷) هم برای پاسخ جریان گردابی و هم برای پاسخ جریان کانالی برقرار است.

پاسخ القای الکترومغناطیسی حاصل از یک کره‌وار مدفون در محیط میزبان با رسانندگی σ را می‌توان بر حسب پاسخ‌های کره‌متناظر که شعاع آن برابر قطر بزرگ و محیط بر کره‌وار است، نوشت. این پاسخ‌ها از حاصل ضرب روابط مربوط به کره در فاکتوری به نام ضریب قطبش، α ، به دست می‌آیند. میدان‌های تابشی الکتریکی و مغناطیسی را می‌توان در دو راستای عمود بر هم، یکی در راستای محور کره‌وار و دیگری در راستای محور عرضی تجزیه نمود. در حالتی که میدان تابشی در راستای محور بزرگ کره‌وار و در وضعیتی که در راستای محور عرضی کره‌وار است، پاسخ دریافتی به ترتیب، محوری (V^A) و عرضی (V^T) به دست می‌آید. در حالت کلی که محور پیچه‌ها با خط واصل



(ب)



(الف)

شکل ۳. الف- نمونه‌ای از مهمات منفجر نشده، ب) جهت‌گیری عمومی پیچه‌های هم‌مرکز نسبت به کره‌وار.

با a و b (با فرض $a \geq b$) و خروج از مرکز آن با $e = \sqrt{a^2 - b^2}/a$, ($0 \leq e < 1$) و برای کره‌وار پخت، طول نیم‌قطر بزرگ و نیم‌قطر کوچک به ترتیب با a و b (با فرض $b \geq a$) و خروج از مرکز آن با $e = \sqrt{b^2 - a^2}/b$, ($0 \leq e < \infty$) تعریف می‌شود.

پتانسیل کل، V_t در پیچه گیرنده برابر است با:

$$V_t = i|V_{ec}| + V_{cc} \quad (۸)$$

که در آن $i = \sqrt{-1}$ و دامنه پاسخ کل برابر است با:

$$V_t = \sqrt{|V_{ec}|^2 + V_{cc}^2} \quad (۹)$$

پاسخ‌های محوری $V_{ec}^{(A)}$ (شکل ۴-الف) و عرضی (شکل ۴-ب) مربوط به جریان گردابی، پاسخ‌های محوری $V_{cc}^{(A)}$ (شکل ۴-پ) و عرضی $V_{cc}^{(T)}$ (شکل ۴-ت) مربوط به جریان کانالی برای جسم کاملاً رسانا و همچنین پاسخ‌های محوری $V_{cc}^{(Avoid)}$ و عرضی $V_{cc}^{(Tvoid)}$ مربوط به جریان کانالی برای کره‌وار نارسانا را می‌توان بر حسب پاسخ کره و ضریب قطبش محاسبه نمود. ضرایب قطبش برای کره‌وار رسانا و نارسانا در دو وضعیت کشیده و پخت در جدول‌های (۱) تا (۳) آورده شده‌اند (نورتون و همکاران، ۲۰۰۵). طول نیم‌قطر بزرگ و نیم‌قطر کوچک کره‌وار کشیده به ترتیب

جدول ۱. ضرایب قطبش‌پذیری برای کره‌وار رسانای کشیده (حالت ۱).

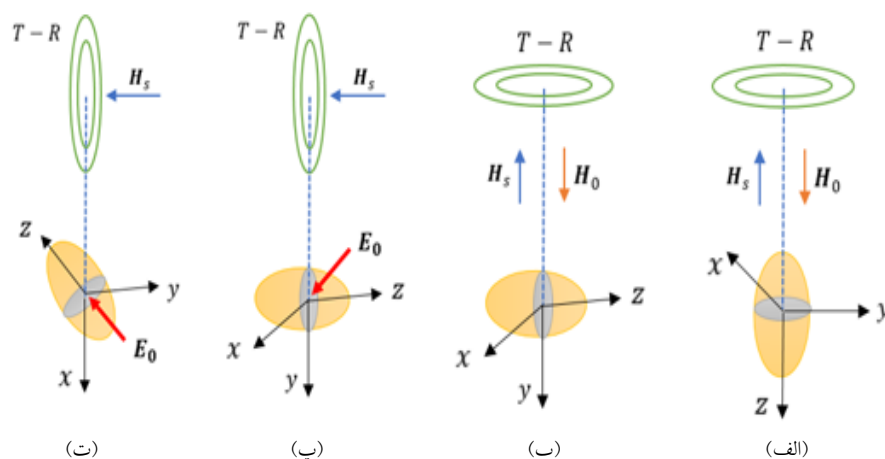
کره‌وار رسانای کشیده			
پاسخ جریان کانالی		پاسخ جریان گردابی	
عرضی $(\alpha_{cc}^{(T)})$	محوری $(\alpha_{cc}^{(A)})$	عرضی $(\alpha_{ec}^{(T)})$	محوری $(\alpha_{ec}^{(A)})$
$\frac{2}{3} \left[\frac{e^3}{1-e^2} - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+e}{1-e} \right) \right]$	$\frac{1}{3} \left[\frac{e^3}{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+e}{1-e} \right)} - e \right]$	$\frac{4}{3} \left[\frac{e^3}{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+e}{1-e} \right) + \frac{e^3}{1-e^2} - e} \right]$	$\frac{2}{3} \left[\frac{e^3}{1-e^2} - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+e}{1-e} \right) \right]$

جدول ۲. ضرایب قطبش‌پذیری برای کره‌وار رسانای پخت (حالت ۲).

کره‌وار رسانای پخت			
پاسخ جریان کانالی		پاسخ جریان گردابی	
عرضی $(\alpha_{cc}^{(T)})$	محوری $(\alpha_{cc}^{(A)})$	عرضی $(\alpha_{ec}^{(T)})$	محوری $(\alpha_{ec}^{(A)})$
$\frac{2}{3} \left[\frac{e^3}{\tan^{-1} e - \frac{e}{1+e^2}} \right]$	$\frac{1}{3} \left[\frac{e^3}{e - \tan^{-1} e} \right]$	$\frac{4}{3} \left[\frac{e^3}{e + \frac{e^3}{1+e^2} - \tan^{-1} e} \right]$	$\frac{2}{3} \left[\frac{e^3}{\tan^{-1} e - \frac{e}{1+e^2}} \right]$

جدول ۳. ضرایب قطبش‌پذیری برای کره‌وار نارسانای کشیده (حالت ۳) و پخت (حالت ۴).

کره‌وار نارسانا (پاسخ جریان کانالی)			
پخت		کشیده	
عرضی $(\alpha_{cc}^{(T, void)})$	محوری $(\alpha_{cc}^{(A, void)})$	عرضی $(\alpha_{cc}^{(T, void)})$	محوری $(\alpha_{cc}^{(A, void)})$
$-\frac{2}{3} \left[\frac{e^3}{e + \frac{e^3}{1+e^2} - \tan^{-1} e} \right]$	$-\frac{1}{3} \left[\frac{e^3}{\tan^{-1} e - \frac{e}{1+e^2}} \right]$	$-\frac{2}{3} \left[\frac{e^3}{\frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+e}{1-e} \right) + \frac{e^3}{1-e^2} - e} \right]$	$-\frac{1}{3} \left[\frac{e^3}{\frac{e}{1-e^2} - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{1+e}{1-e} \right)} \right]$



شکل ۴. جهت‌گیری مختلف کره‌وار نسبت به پیچ‌های فرستنده و گیرنده: الف- میدان مغناطیسی تابشی محوری است و پاسخ جریان گردابی محوری V_{ec}^A دریافت می‌شود. ب- میدان مغناطیسی تابشی عرضی است و پاسخ جریان گردابی عرضی V_{ec}^T دریافت می‌شود. پ- میدان الکتریکی تابشی محوری است و پاسخ جریان کانالی محوری V_{cc}^A دریافت می‌شود. ت- میدان الکتریکی تابشی عرضی است و پاسخ جریان کانالی عرضی V_{cc}^T دریافت می‌شود.

۳ وارون سازی و تخمین پارامترها

روش‌های وارون‌سازی به دنبال راه‌حل‌های تحلیلی با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی با رویکردهای خطی‌سازی یا روش‌های تکراری برای یافتن پارامترهای مدل هستند. تکنیک‌های خطی‌سازی تا حد زیادی به درستی تخمین اولیه پارامترهای مدل بستگی دارد. در رویکردهای غیرخطی، تکنیک‌های بهینه‌سازی محلی (شیب‌ترین نزول، گرادیان مزدوج، و غیره) به دلیل فرمول‌بندی ریاضی غیرخطی که دارند مناسب نیستند و در برخی موارد در جستجوی حل ممکن است به دام کمینه‌های محلی بیفتند. این مشکل ممکن است در وارون‌سازی داده‌های لرزه‌ای چندان مهم نباشد، ولی در مسائل وارون در حوزه روش‌های پتانسیلی چالش مهمی است و انتخاب مناسب مدل شروع به منظور حصول نتایج رضایت بخش ضروری است. همچنین با توجه به ابهام ذاتی در وارون‌سازی داده‌های پتانسیلی، روش‌های محلی همیشه مناسب‌ترین نیستند و لازم است قیدهای خاصی اعمال شوند. تکنیک‌های بهینه‌سازی جهانی با استفاده از روش‌های جستجوی (تصادفی یا سیستماتیک) در فضای مدل، جایگزین‌های خوبی برای روش‌های جستجوی محلی هستند. بهینه‌سازی سراسری هوشمند مبتنی بر ازدحام ذرات، یادگیری ماشین و الگوریتم‌های ژنتیک، در حل مسائل وارون غیرخطی در چندین حوزه ژئوفیزیک به کار رفته است (برای و لینک، ۲۰۱۴؛ دا کنسیسانو و سمپایو، ۲۰۱۹؛ ایانی و همکاران، ۲۰۲۰؛ کین و همکاران، ۲۰۲۰؛ بابایی و مسیبیان، ۱۴۰۱؛ اکوک و همکاران، ۲۰۲۳؛ لوتو و همکاران، ۲۰۲۳؛ لوی و همکاران، ۲۰۲۳). در این پژوهش از الگوریتم ژنتیک با در نظر گرفتن چرخ رولت برای تخمین پارامترهای کره‌وار به عنوان مدلی از مهمات منفجر نشده استفاده می‌شود.

۴ روش اجرا

هر پاسخ که به صورت تصادفی در الگوریتم ژنتیک تولید می‌شود یک کروموزوم نام دارد و مجموعه‌ای از کروموزوم‌ها، جمعیت نامیده می‌شود. کروموزوم‌ها از ژن‌ها تشکیل شده‌اند و مقادیر آن‌ها اعداد دودویی است. نحوه نمایش کروموزوم‌ها و مقادیر ژن‌ها یکی از اساسی‌ترین قسمت‌های حل یک مسئله با استفاده از الگوریتم ژنتیک است و بخش مهم دیگر در این الگوریتم، تعریف تابع برازش است. ارزش هر کروموزوم توسط تابعی به نام برازش اندازه‌گیری می‌شود. در واقع تابع برازش میزان مناسب بودن حل برای مساله مورد نظر را اندازه‌گیری می‌کند. در این پژوهش ولتاژ القا شده با جاروب همزمان فرانکس (بین ۱۸ تا ۲۰ کیلوهرتز با ۲۱ نمونه) و زاویه پیچ‌ها با سطح افق (بین ۰ تا π در ۶۱ نمونه) به دست آمده است و یک پاسخ ولتاژ ۱۲۸۱ نقطه‌ای (۶۱×۲۱) تولید شد. در الگوریتم اجرا شده، ولتاژ القا شده مربوط به هر پاسخ (کروموزوم) با ولتاژهای به دست آمده ناشی از پاسخ واقعی مقایسه و با محاسبه معکوس میانگین مربع خطا، تابع برازش تعریف می‌شود. کروموزومی دارای پاسخ مناسب‌تری است که میانگین مربع خطای کمتر یا معکوس میانگین مربع خطای بیشتری داشته باشد. با این فرآیند نیمی از کروموزوم‌ها انتخاب شده و در نسل بعد مورد بهره برداری قرار می‌گیرند. در نسل بعد کروموزوم‌های انتخاب شده با فرآیندی با عنوان فرآیند هم‌گذری با یکدیگر ترکیب و کروموزوم‌های جدیدی که فرزند نامیده می‌شود تولید می‌شوند. ترکیب ژن این کروموزوم‌های جدید، ترکیبی از ژن‌های والدین آن‌هاست. در یک نسل تعدادی از کروموزوم‌ها نیز در ژن‌های خود دچار جهش می‌شوند که در این تحقیق، هر کروموزوم تا ۳ جهش را به طور تصادفی در ژن‌های خود خواهد داشت. کروموزومی که در جمعیت برای نسل بعدی حفظ و نگهداری می‌شود به وسیله قانون تکامل داروین انتخاب می‌شود. کروموزومی که مقدار برازش بالاتری دارد از احتمال بالاتری برای انتخاب دوباره در نسل بعدی

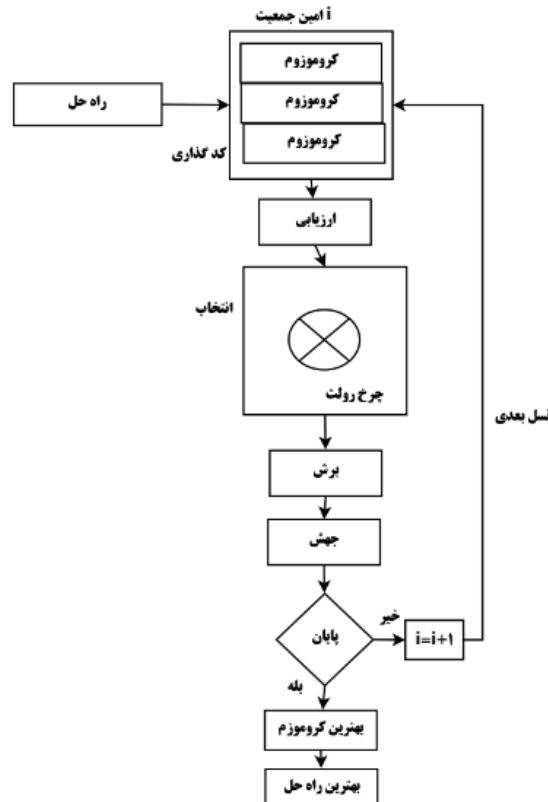
احتمال کمتر است. شیوه پیاده‌سازی چرخ رولت به این صورت است که در چرخه الگوریتم ژنتیک در گام دوم همه کروموزوم‌ها ارزیابی می‌شوند و طبق این ارزیابی می‌دانیم هر کروموزوم بر اساس تابع برازش چه ارزشی را به دست آورده است. با استفاده از این مقادیر، احتمال انتخاب شدن هر کروموزوم مشخص می‌شود. احتمال p_i برای کروموزوم i ام از حاصل تقسیم برازش آن کروموزوم، f_i ، بر مجموع برازش همه کروموزوم‌ها به دست می‌آید.

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^n f_i} \quad (10)$$

هر قدر عدد به دست آمده بزرگتر باشد، احتمال انتخاب آن کروموزوم بیشتر بوده و به عبارت دیگر شانس بیشتری برای تولید نسل بعدی خواهد داشت.

برخوردار است. بعد از چندین نسل، مقدار کروموزوم به یک مقدار خاص که بهترین راه‌حل برای مساله است همگرا می‌شود. الگوریتم در شکل (۵) ارائه شده است.

چرخ رولت یکی از محبوب‌ترین و پرکاربردترین مکانیزم‌های انتخاب است. این روش با نام انتخاب بر اساس میزان مناسب بودن تابع برازش کروموزوم نیز نامیده می‌شود. چنان که در شکل (۵) مشخص است، در گام دوم الگوریتم، هر کروموزوم با استفاده از تابع برازش ارزیابی می‌شود. در مکانیزم چرخ رولت هر یک از کروموزوم‌ها بسته به میزان مناسب بودن (بر اساس تابع برازش) احتمال انتخاب شدن را دارا هستند. به عبارت دیگر هر قدر یک کروموزوم بهتر باشد (بrazش بیشتری ایجاد کند) احتمال انتخاب شدن آن برای تولید نسل بعدی بیشتر و برعکس، هر چه کروموزوم برازش ضعیف‌تری ایجاد کند، این



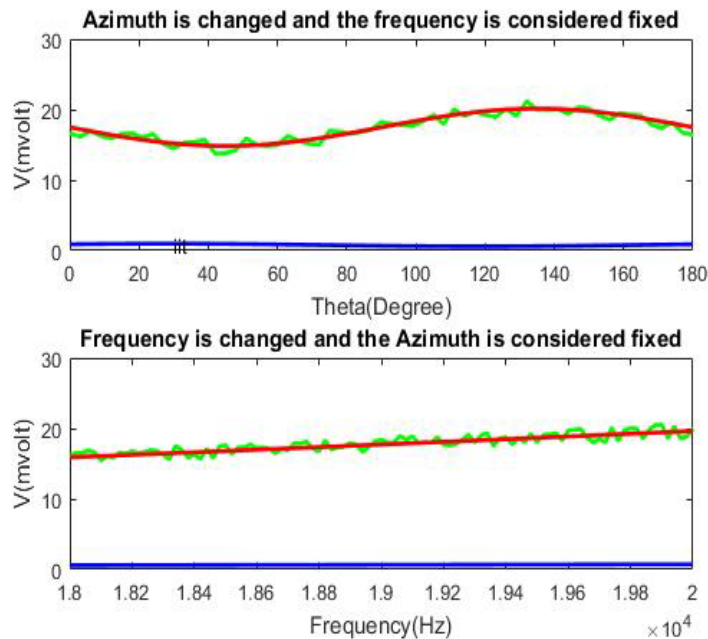
شکل ۵. الگوریتم چرخ رولت.

زاویه به دست می‌آید. شرط توقف تکرار در برنامه، به صورت زیر تعریف شد:

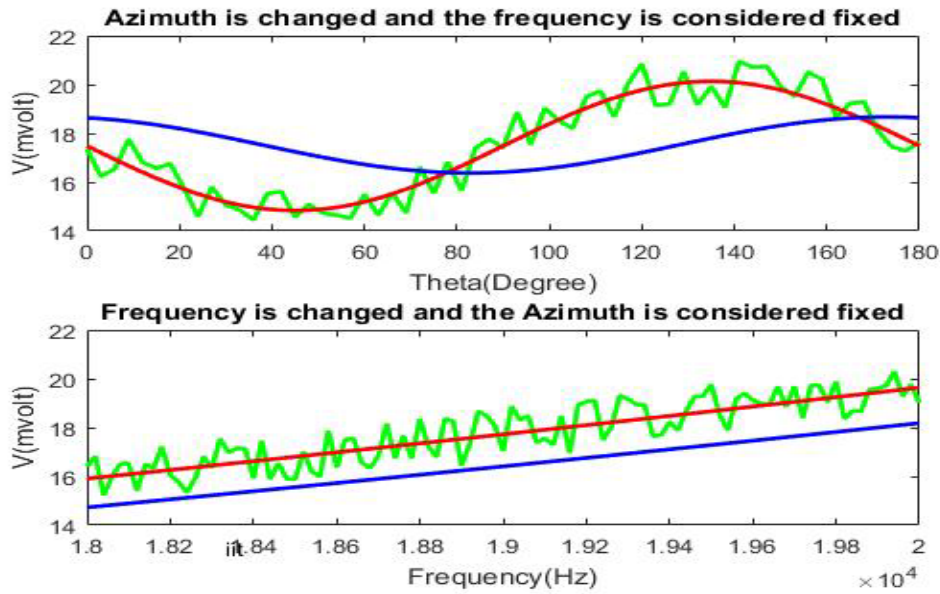
$$\varepsilon = 1/n \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{V_{tot_noisy} - V_{tot}}{V_{tot}} \right)^2} < 2 \times 10^{-2} \quad (11)$$

که در این رابطه، ε حد همگرایی الگوریتم با بهینه برازش تعیین شده و V_{tot} و V_{tot_noisy} به ترتیب ولتاژ حاصل از پارامترهای مفروض و ولتاژ به دست آمده از الگوریتم n تعداد داده‌هاست. به منظور نمایش نحوه همگرایی، در شکل‌های (۶) تا (۸) پاسخ‌های مربوط به کره‌وار رسانای کشیده، نمودار پاسخ‌ها با داده‌های بدون نوفه (نمودار قرمز)، با نوفه (نمودار سبز) و نمودار تخمینی حاصل از اجرای برنامه (آبی) را در تکرار به ترتیب (۱)، (۸) و (۴۰) آورده شده‌اند. در نمودار بالایی بسامد فرستنده ثابت فرض شده و زاویه بین پیچه‌ها با زمین تغییر می‌کند. در نمودار پایینی، برای یک جهت‌گیری معین پیچه‌ها بسامد میدان تابشی توسط پیچه فرستنده تغییر داده شده است. ملاحظه می‌شود که در تکرار چهارم (شکل ۸)، برازش به خوبی صورت گرفته است.

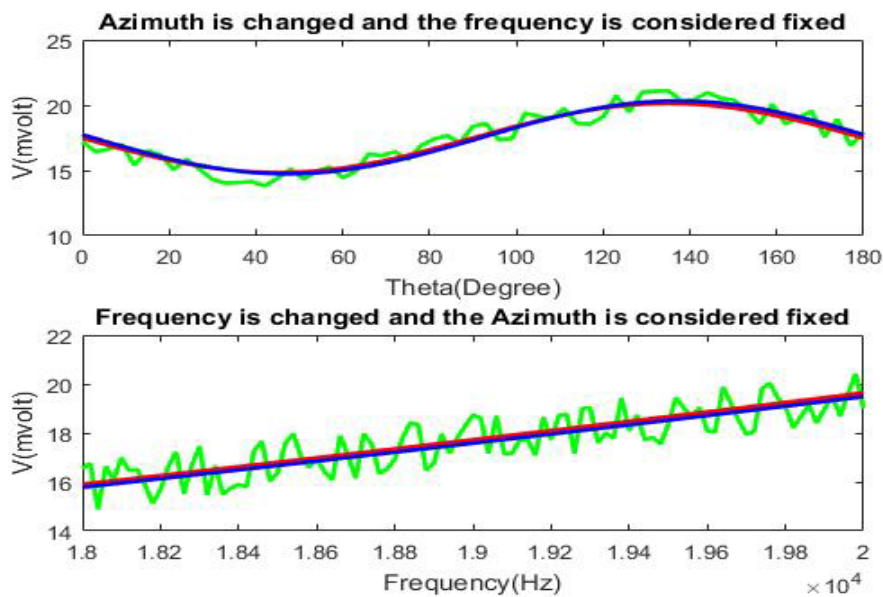
برای اجرای الگوریتم و فرایند بهینه‌سازی، هر یک از سه پارامتر عمق (d_0)، خروج از مرکز (e) و زاویه محور کره‌وار با سطح افق (θ) با ۱۶ بیت نمایش داده شد که مجموع بیت‌های این سه پارامتر یک کروموزوم ۴۸ بیتی را می‌سازد. در ابتدا یک جمعیت تصادفی با تعداد ۴۰۰۰ کروموزوم در نظر گرفته شد. انتخاب این تعداد کروموزوم با اجرای مکرر الگوریتم و بررسی میزان خطای داده‌ها انجام شد. در نظر گرفتن جمعیت با تعداد بیشتر، تغییر معناداری در کاهش خطا نداشته و از سوی دیگر سبب افزایش زمان اجرای برنامه می‌شود. پس از انتخاب جمعیت، تابع برازش از معکوس اختلاف بین ولتاژ محاسبه شده با پارامترهای حاصل از الگوریتم و ولتاژ محاسبه شده توسط پارامترهای اولیه انتخابی محاسبه و سپس به کمک این تابع، ۲۰۰۰ عضو از این جمعیت انتخاب و با آن نسل بعدی جمعیت ایجاد گردید. برای جلوگیری از همگرایی در کمینه‌های محلی تابع، ۳ جهش تصادفی در فرزندان ایجاد شد. این فرآیند تا کمینه شدن مقدار خطای تابع برازش تکرار می‌شود و در نتیجه پارامترهای کره‌وار شامل عمق، خروج از مرکز و



شکل ۶. نحوه همگرایی پاسخ‌ها با داده‌های بدون نوفه (نمودار قرمز)، با نوفه (نمودار سبز) و نمودار تخمینی حاصل از اجرای برنامه (آبی) در تکرار (۱).



شکل ۷. نحوه همگرایی پاسخها با داده‌های بدون نوفه (نمودار قرمز)، با نوفه (نمودار سبز) و نمودار تخمینی حاصل از اجرای برنامه (آبی) در تکرار ۸.



شکل ۸. نحوه همگرایی پاسخها با داده‌های بدون نوفه (نمودار قرمز)، با نوفه (نمودار سبز) و نمودار تخمینی حاصل از اجرای برنامه (آبی) در تکرار ۴۰.

در جدول‌های مذکور برای عمق و خروج از بیضی به صورت درصد خطای نسبی مربوط به پارامترهای مفروض و پارامترهای حاصل از الگوریتم و خطای آزیموت به صورت نسبت اختلاف مقادیر واقعی (مفروض) و به دست آمده در ۱۸۰ درجه محاسبه شده است.

الگوریتم برای چهار حالت کره‌وار رسانای کشیده، کره‌وار رسانای پخت، کره‌وار نارسانای کشیده و کره‌وار نارسانای پخت با داده‌های بدون نوفه و با نوفه ۵ درصد برای ۵ عمق متفاوت اجرا و نتایج در جدول‌های (۴) تا (۱۱) آورده شده است. لازم به ذکر است که خطای گزارش شده

جدول ۴. نتایج مدل‌سازی و تخمین پارامترهای کره‌وار رسانای کشیده با داده‌های بدون نوفه.

عمق (متر)			خروج از بیضی			آزیموت (درجه)		
واقعی	محاسبه شده	خطا (%)	واقعی	محاسبه شده	خطا (%)	واقعی	محاسبه شده	خطا (%)
0.060	0.061	1.667	0.836	0.812	2.882	45.000	47.591	1.439
0.200	0.216	8.000	0.961	0.938	2.405	30.000	31.030	0.572
0.500	0.545	9.000	0.980	0.961	1.899	90.000	92.089	1.161
1.000	1.013	1.300	0.986	0.984	0.162	60.000	50.591	5.227
10.000	9.947	0.530	0.983	0.983	0.020	0.000	0.110	0.061

جدول ۵. نتایج مدل‌سازی و تخمین پارامترهای کره وار رسانای کشیده با داده‌های با نوفه ۵ درصد.

عمق (متر)			خروج از بیضی			آزیموت (درجه)		
واقعی	محاسبه شده	خطا	واقعی	محاسبه شده	خطا	واقعی	محاسبه شده	خطا
0.060	0.061	2.167	0.836	0.807	3.504	45.000	48.222	1.790
0.200	0.216	8.050	0.961	0.938	2.394	30.000	30.112	0.062
0.500	0.561	12.200	0.980	0.958	2.205	90.000	99.129	5.072
1.000	0.959	4.100	0.986	0.990	0.365	60.000	58.317	0.935
10.000	9.922	0.780	0.983	0.983	0.000	60.000	63.090	1.717

جدول ۶. نتایج مدل‌سازی و تخمین پارامترهای کره‌وار رسانای پخت با داده‌های بدون نوفه.

عمق (متر)			خروج از بیضی			آزیموت (درجه)		
واقعی	محاسبه شده	خطا (%)	واقعی	محاسبه شده	خطا (%)	واقعی	محاسبه شده	خطا (%)
0.060	0.061	2.000	0.821	0.803	2.181	45.000	44.835	0.092
0.200	0.207	3.600	0.943	0.934	0.944	0.000	0.181	0.101
0.500	0.485	2.980	0.964	0.969	0.456	90.000	90.696	0.387
1.000	1.006	0.640	0.978	0.978	0.051	30.000	32.010	1.117
10.000	9.530	4.700	0.968	0.985	1.798	60.000	59.016	0.546

جدول ۷. نتایج مدل‌سازی و تخمین پارامترهای کره وار رسانای پخت با داده‌های با نوفه ۵ درصد.

عمق (متر)			خروج از بیضی			آزیموت (درجه)		
واقعی	محاسبه شده	خطا (%)	واقعی	محاسبه شده	خطا (%)	واقعی	محاسبه شده	خطا (%)
0.060	0.060	0.667	0.821	0.827	0.731	45.000	48.001	1.667
0.200	0.199	0.500	0.943	0.944	0.148	0.000	0.019	0.011
0.500	0.544	8.740	0.964	0.950	1.514	90.000	85.722	2.377
1.000	0.944	5.600	0.978	0.983	0.450	30.000	31.020	0.567
10.000	9.253	7.469	0.968	0.977	0.930	60.000	61.440	0.800

جدول ۸. نتایج مدل‌سازی و تخمین پارامترهای کره‌وار نارسانای کشیده با داده‌های بدون نوفه.

عمق (متر)			خروج از مرکز			آزیموت (درجه)		
واقعی	محاسبه شده	خطا (%)	واقعی	محاسبه شده	خطا (%)	واقعی	محاسبه شده	خطا (%)
0.060	0.060	0.167	1.525	1.519	0.361	45.000	46.720	0.956
0.200	0.200	0.150	3.458	3.448	0.295	0.000	1.007	0.559
0.500	0.496	0.780	4.870	4.775	1.957	90.000	87.090	1.617
1.000	0.972	2.810	5.893	5.500	6.674	30.000	32.001	1.112
10.000	10.060	0.600	5.167	5.239	1.395	60.000	56.090	2.172

جدول ۹. نتایج مدل‌سازی و تخمین پارامترهای کره‌وار نارسانای کشیده با داده‌های با نوفه ۵ درصد.

عمق (متر)			خروج از مرکز			آزیموت (درجه)		
واقعی	محاسبه شده	خطا (%)	واقعی	محاسبه شده	خطا (%)	واقعی	محاسبه شده	خطا (%)
0.060	0.060	0.167	1.525	1.524	0.066	45.000	42.0700	1.628
0.200	0.202	0.850	3.458	3.550	2.643	0.000	2.0100	1.117
0.500	0.506	1.220	4.870	5.000	2.663	90.000	86.0600	2.189
1.000	1.013	1.310	5.893	6.059	2.819	30.000	36.1000	3.389
10.000	10.619	6.189	5.167	5.474	5.941	60.000	50.7204	5.155

جدول ۱۰. نتایج مدل‌سازی و تخمین پارامترهای کره‌وار نارسانای پخت با داده‌های بدون نوفه.

عمق (متر)			خروج از مرکز			آزیموت (درجه)		
واقعی	محاسبه شده	خطا (%)	واقعی	محاسبه شده	خطا (%)	واقعی	محاسبه شده	خطا (%)
0.060	0.061	1.000	1.525	1.560	2.321	45.000	44.222	0.432
0.200	0.193	3.400	3.458	3.250	6.026	0.000	-0.010	0.006
0.500	0.508	1.580	4.870	5.001	2.700	90.000	89.957	0.024
1.000	0.957	4.300	5.893	5.495	6.752	30.000	37.340	4.078
10.000	10.102	1.019	5.167	5.254	1.670	60.000	59.532	0.260

جدول ۱۱. نتایج مدل‌سازی و تخمین پارامترهای کره‌وار نارسانای پخت با داده‌های با نوفه ۵ درصد.

عمق (متر)			خروج از مرکز			آزیموت (درجه)		
واقعی	محاسبه شده	خطا (%)	واقعی	محاسبه شده	خطا (%)	واقعی	محاسبه شده	خطا (%)
0.060	0.058	2.833	1.525	1.420	6.873	45.000	47.580	1.433
0.200	0.203	1.250	3.458	3.527	1.972	0.000	2.089	1.161
0.500	0.507	1.480	4.870	4.974	2.140	90.000	92.003	1.113
1.000	1.020	1.990	5.893	6.062	2.871	30.000	39.090	5.050
10.000	10.178	1.781	5.167	5.304	2.640	60.000	60.013	0.007

در تخمین عمق برای کره‌وار کشیده برابر ۱۲ درصد و کمترین خطا در مورد کره‌وار نارسانای پخت برابر ۲

با مقایسه اعداد به دست آمده در جدول‌های ۴ تا ۱۱ ملاحظه می‌شود که با داده‌های با نوفه ۵ درصد، بیشینه خطا

تخمین پارامتر عمق به ترتیب برای کره‌وار کشیده رسانا بیشتر و برای کره‌وار پخت رسانا کمتر است. خروج از مرکز کره‌وار که نشان‌دهنده شکل مهمات است، برای کره‌وار رسانا نسبت به حالت رسانا با خطای بیشتری به دست آمد. تخمین زاویه جهت‌گیری کره‌وار نسبت به سطح افق (آزیموت)، برای کره‌وار رسانای پخت با دقت بیشتری نسبت به سایر حالات تعیین گردید. از مقایسه هر سه پارامتر به دست آمده برای حالات مختلف کره‌وار، ملاحظه می‌شود که تخمین عمق نسبت به دو پارامتر دیگر با خطای بیشتر و البته در محدوده قابل قبولی به دست آمده است.

منابع

- Ambruš, D., Vasić, D., & Bilas, V., 2016, Robust estimation of metal target shape using time-domain electromagnetic induction data. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **65**, 795-807.
- Ayani, M., MacGregor, L., & Mallick, S., 2020, Inversion of marine controlled source electromagnetic data using a parallel non-dominated sorting genetic algorithm. *Geophysical Journal International*, **220**, 1066-1077.
- Babaei, M., Meshinchi-Asl, M., & Zomorrodian, H., 2013, Computing eddy-current response and current-channeling response of the spheroidal conductor for the separated receiver and transmitter systems. *Arabian Journal of Geosciences*, **6**, 1913-1924.
- Babaei, M., Meshinchi-Asl, M., & Zomorrodian, H., 2014, Estimation of depth of buried conductive sphere from electromagnetic induction anomaly data using linearization process. *Arabian Journal of Geosciences*, **7**, 2363-2366.
- Babaei, M., & Mosayebian, M. E., 2022, Interpretation of electromagnetic induction data using particle swarm optimization method to determine the parameters of conductive sphere as a model of unexploded ordnance. *Iranian Journal of Geophysics*, **16**, 231-240.
- Bilukha, O. O., Brennan, M., & Anderson, M., 2007, Injuries and Deaths From Landmines and Unexploded Ordnance in Afghanistan, 2002-2006. *JAMA*, **298**(5), 516-518.
- Bray, M. P., & Link, C. A., 2014, Learning machine identification of ferromagnetic UXO

درصد است. لذا نسبت به سه حالت دیگر در نظر گرفته شده برای کره‌وار، عمق کره‌وار پخت رسانا با دقت بیشتری به دست آمده است. بیشینه خطا در تخمین پارامتر خروج از مرکز (e) برای کره‌وار پخت رسانا برابر ۶/۹ درصد و برای کره‌وار پخت رسانا برابر ۱/۵ درصد است و بنابراین این کمیت برای کره‌وار رسانای پخت با دقت بیشتری به دست آمده است. در تشخیص آزیموت، الگوریتم برای کره‌وار کشیده رسانا با داده‌های نوفه‌ای ۵/۱ درصد خطا داشته است و متناظرا این خطا برای کره‌وار رسانای پخت ۲/۴ است و در نتیجه از بین چهار حالت مورد بحث برای کره‌وار، آزیموت برای کره‌وار پخت با دقت بیشتری به دست آمده است. از مقایسه هر سه پارامتر به دست آمده برای حالات مختلف کره‌وار، ملاحظه می‌شود که خطای تخمین عمق نسبت به دو پارامتر دیگر بیشتر و البته در محدوده قابل قبولی به دست آمده است.

۵ نتیجه‌گیری

در این مقاله به منظور تخمین پارامترهای هندسی مهمات منفجر نشده با استفاده از داده‌های القای الکترومغناطیسی، چهار مدل مصنوعی کره‌وار رسانا و رسانا در دو حالت کشیده و پخت، مورد بررسی و مطالعه قرار گرفت. برای تخمین پارامترهای هندسی از روش الگوریتم ژنتیک با چرخه رولت استفاده شد. برای تولید داده‌های القای الکترومغناطیسی بدون نوفه از تغییر زاویه پیچ‌های گیرنده و فرستنده هم مرکز و هم صفحه و هم چنین تغییر فرکانس میدان تابشی استفاده گردید. سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک و اعمال آن روی داده‌های تولیدی القای الکترومغناطیسی بدون نوفه و سپس با نوفه ۵ درصد پارامترهای مدل به دست آمدند. نتایج حاصل نشان می‌دهد که به طور کلی خطا در تخمین پارامترها برای هر چهار حالت به جز یک مورد (کره‌وار رسانای کشیده)، کمتر از ۱۰ درصد است. نسبت به سایر حالت‌ها بیشینه خطا در

- Geoscience and Remote Sensing, **43**, 2200-2209.
- Núñez-Nieto, X., Solla, M., Gómez-Pérez, P., & Lorenzo, H., 2014, GPR signal characterization for automated landmine and UXO detection based on machine learning techniques. Remote Sensing, **6**, 9729-9748.
- O'Neill, K., & Fernández, J. P., 2009, Electromagnetic methods for UXO discrimination. Paper presented at the Unexploded Ordnance Detection and Mitigation.
- O'Neill, K., 2005, Ultra-wideband, fully polarimetric ground penetrating radar for UXO discrimination. ESTCP Final Technical Report, Project, 199902.
- Pasion, L. R., 2007, Inversion of time domain electromagnetic data for the detection of unexploded ordnance.
- Pasion, L. R., & Oldenburg, D. W., 2001, A discrimination algorithm for UXO using time domain electromagnetics. Journal of Environmental & Engineering Geophysics, **6**, 91-102.
- Qin, T., Zhao, Y., Hu, S., An, C., Bi, W., Ge, S., . . . Bohlen, T., 2020, An interactive integrated interpretation of GPR and Rayleigh wave data based on the genetic algorithm. Surveys in Geophysics, **41**, 549-574.
- Wigh, M. D., Hansen, T. M., & Døssing, A., 2020, Inference of unexploded ordnance (UXO) by probabilistic inversion of magnetic data. Geophysical Journal International, **220**, 37-58.
- O'Neill, K., & Fernández, J. P. (2009). *Electromagnetic methods for UXO discrimination*. Paper presented at the Unexploded ordnance detection and mitigation.
- using magnetometry. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, **8**, 835-844.
- Butler, D. K., 2003, Implications of magnetic backgrounds for unexploded ordnance detection. Journal of Applied Geophysics, **54**, 111-125.
- da Conceição Batista, J., & Sampaio, E. E. S., 2019, Magnetotelluric inversion of one-and two-dimensional synthetic data based on hybrid genetic algorithms. Acta Geophysica, **67**, 1365-1377.
- Darwin, C., 1859, On the origins of species by means of natural selection. London: Murray, 247, 1859.
- Ekwo, S. E., Eldosouky, A. M., Essa, K. S., George, A. M., Abdelrahman, K., Fnais, M. S., . . . Akpan, A. E., 2023, Particle Swarm Optimization (PSO) of High-Quality Magnetic Data of the Obudu Basement Complex, Nigeria. Minerals, **13**(9), 1209.
- Elson, L., Meraki, A., Rushton, L. M., Pyragius, T., & Jensen, K., 2022, Detection and characterisation of conductive objects using electromagnetic induction and a fluxgate magnetometer. Sensors, **22**, 5934.
- Frost, A., Boyle, P., Autier, P., King, C., Zwijnenburg, W., Hewitson, D., & Sullivan, R., 2017, The effect of explosive remnants of war on global public health: a systematic mixed-studies review using narrative synthesis. The Lancet Public Health, **2**, 286-296.
- Grzegorzczak, T. M., Fernández, J. P., Shubitidze, F., O'Neill, K., & Barrowes, B. E. (2012). Subsurface electromagnetic induction imaging for unexploded ordnance detection. Journal of Applied Geophysics, **79**, 38-45.
- Holland, J., 1975, Adaptation in Natural and Artificial Systems. Systems. In: University of Michigan Press, Ann Harbor.
- Luo, W., Ge, J., Liu, H., Wu, S., Wang, H., Yuan, Z., . . . Fukushima, E. F., 2023, A fast tracking method for magnetic abnormalities using distributed Overhauser magnetometer system based on genetic algorithm. Review of Scientific Instruments, **94**(6).
- Mahmoudi, M., & Tan, S. Y., 2009, Depth detection of conducting marine mines via eddy-current and current-channeling response. Progress In Electromagnetics Research, **90**, 287-307.
- Norton, S. J., SanFilipo, W. A., & Won, I., 2005, Eddy-current and current-channeling response to spheroidal anomalies. IEEE Transactions on

Estimation of geometric parameters of unexploded ordnance by electromagnetic induction method using genetic algorithm

Mojtaba Babaei ^{1*} and Seyed Manouchehr Hosseini Pilangorgi ²

¹ Assistant Professor, Department of Geophysics, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

² Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Boali-Sina University, Hamadan, Iran

(Received: 24 January 2024, Accepted: 05 June 2024)

Summary

Identification and detection of unexploded ordnance is of particular importance due to life and environmental problems, and due to the presence of many fragments left from the explosion of ordnance, their separation is very important. In this article, in order to separate the unexploded ordnance, spherical geometrical parameters are obtained in two conductive and non-conductive states by using electromagnetic induction data. Electromagnetic responses in the frequency domain and in the induction range, in two modes: the eddy current response caused by the stimulation of the conductive body by the magnetic field and the channel current response due to the disturbance created in the radiating electric field in terms of the sphere response, considering a quantity called the coefficient Polarization is considered and the objective function is determined with the obtained equations. To generate the data, the rotation of the coaxial transmitter and receiver coils, as well as the frequency change of the radiation fields, were used simultaneously to obtain the buried anomaly parameters. In this research, genetic algorithm method with Roulette cycle was used to estimate the parameters. In the genetic algorithm, each randomly generated response is called a chromosome, and a set of chromosomes is called a population. Chromosomes are composed of genes and their values are binary numbers. The value of each chromosome is measured by a function called fit, which measures the usefulness and appropriateness of the solution for the given problem. In this work, the induced voltage was obtained by simultaneously sweeping the frequency (between 18 and 20 kHz with 21 samples) and the angle of the turns with the horizon (between 0 and π in 61 samples) and a real response of 1281 points. In the genetic algorithm, the voltages induced in each response (chromosome) are compared with the voltages obtained in the actual response and the fitting function is defined by calculating the inverse of the mean square error. Chromosome has a better response that has a smaller mean squared error (the inverse of a larger mean squared error). With this process, half of the chromosomes are selected and used in the next generation. In the next generation, the selected chromosomes are combined with each other and produce new chromosomes called children. In one generation, a number of chromosomes undergo mutations in their genes, in which each chromosome has up to 3 It will have random mutations in its genes. The chromosome that is maintained in the population for the next generation is selected by Darwin's law of evolution. A chromosome with a higher fitness value has a higher probability of being selected again in the next generation. After several generations, the chromosome value converges to a specific value that is the best solution for the problem. To validate the method, electromagnetic induction data with 5% noise was used. The obtained results show that the used method has an acceptable ability to estimate the parameters.

Keywords: Electromagnetic induction, frequency domain, unexploded ordnance, genetic algorithm, model geometric parameters

*Corresponding author:

m_babaei@iauh.ac.ir