

تفسیر داده‌های القای الکترومغناطیسی با روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تعیین پارامترهای کره رسانا به‌عنوان مدلی از مهمات منفجر نشده

مجتبی بابایی^{۱*} و محمد احسان مسیبیان^۲

^۱ استادیار، گروه ژئوفیزیک، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران
^۲ استادیار، گروه برق، واحد تویسرکان، دانشگاه آزاد اسلامی، تویسرکان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۰۲)

چکیده

مین‌های دریایی مدفون در دریا یا خشکی تعداد زیادی از مردم را در سراسر دنیا تهدید می‌کند و افراد زیادی بر اثر برخورد با این مهمات منفجر نشده جان خود را از دست می‌دهند. لازم است این‌گونه مهمات با روش‌های غیرتخریبی شناسایی شوند. روش‌های متعددی برای شناسایی، جداسازی و آشکارسازی این‌گونه اجسام معرفی شده است. یکی از این روش‌ها در ژئوفیزیک، روش الکترومغناطیس در حوزه زمان و همچنین حوزه فرکانس است که به کمک آنها، این‌گونه بی‌هنجاری‌ها آشکارسازی و پارامترهای فیزیکی و هندسی آنها تخمین زده می‌شوند. یکی از روش‌های حوزه فرکانس، روش الکترومغناطیس القایی است. تعداد زیادی از مهمات منفجر نشده، در ساده‌ترین شکل با کره و با تقریب بهتر با کره‌وار شبیه‌سازی می‌شوند. در این مقاله، با استفاده از پاسخ‌های القای الکترومغناطیسی ناشی از جریان‌های گردابی ایجاد شده در سطح جسم کاملاً رسانا و جریان کانالی در محیط میزبان با رسانندگی ضعیف، عمق و شعاع جسم مدفون برای چهار حالت جهت‌گیری پیچ‌های گیرنده و فرستنده نسبت به یکدیگر به‌دست می‌آید. روش به‌کاررفته برای تعیین عمق و شعاع، روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات است که یک روش فراگیر بهینه‌سازی است و از آن می‌توان در حل مسائلی استفاده کرد که پاسخ آنها یک نقطه یا سطح در فضای چندبعدی است. این الگوریتم در ابتدا با مقادیر تصادفی تنظیم می‌شود و اهداف را با تکرارهای به‌روز شده جستجو می‌کند. برای برآورد شعاع و عمق مهمات منفجر نشده که به‌صورت کره شبیه‌سازی شده‌اند، این روش بهینه‌سازی نخست روی داده‌های بدون نوفه و پس از آن روی داده‌های با نوفه اجرا می‌شود سپس نتایج برای ارزیابی توانایی روش مقایسه می‌شوند. میزان خطای تخمین برای داده‌های بدون نوفه تقریباً برابر صفر است و وقتی به داده‌ها نوفه اضافه می‌شود، عمق بی‌هنجاری و شعاع با خطایی پذیرفتنی محاسبه می‌شود.

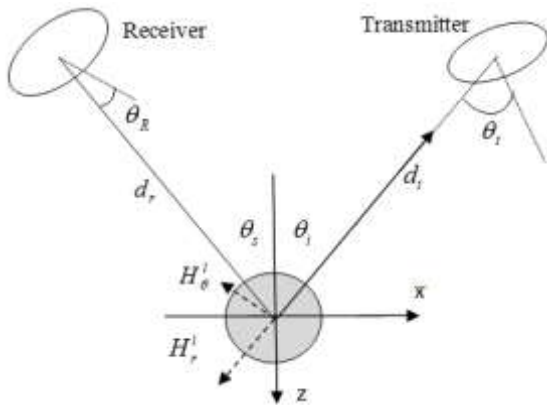
واژه‌های کلیدی: الکترومغناطیس القایی، مهمات منفجر نشده، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات، برآورد عمق و شعاع کره

۱ مقدمه

می‌کنند که گیرنده روی سطح زمین آن را اندازه‌گیری می‌کند. پس از خاموش شدن میدان اولیه، حسگرهای EM واپاشی این میدان‌های ثانویه را اندازه‌گیری می‌کنند. چگونگی واپاشی میدان‌های ثانویه، اطلاعاتی درباره رسانندگی الکتریکی (جنس) و هندسه جسم مدفون در زمین (نوع مهمات) ارائه می‌دهد. در روش القای الکترومغناطیسی (در حوزه فرکانس)، پیچیده فرستنده میدان مغناطیسی تابشی تولید می‌کند که به‌طور هماهنگ وابسته به زمان است. دستگاه GEM-5 ساخت شرکت Geophex که از دو پیچیده هم‌محور یکی به‌عنوان فرستنده و دیگری به‌عنوان گیرنده ساخته شده است، میدان با فرکانس چند هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز تولید می‌کند (محمودی و تان، ۲۰۰۹). جسم تحت میدان تابشی، در گیرنده دو مد جریان ایجاد می‌کند. مد جریان گردابی (eddy current) ناشی از جسم رسانا است که در عمق کم قرار گرفته است. میدان الکتریکی تابشی در محیط با رسانندگی ضعیف، جریانی تولید می‌کند که الگوی این جریان در برخورد با بی‌هنجاری واپاشیده می‌شود و این آشفتگی در جریان به ایجاد مد دیگری از پاسخ در پیچیده گیرنده منجر می‌شود که مد جریان کانالی (current channeling) نام دارد. این مد در اکتشاف اجسام رسانا، به‌ویژه مین‌ها در محیطی که رسانندگی دارد، نقش مهمی می‌تواند داشته باشد (نورتون و همکاران، ۲۰۰۵). می‌توان با چرخش پیچیده‌های فرستنده و گیرنده هریک از مدهای جریان گردابی یا کانالی را نسبت به دیگری تقویت یا حذف کرد. با فرض اینکه فاصله پیچیده‌ها از جسم چندین برابر ابعاد جسم است و محیط میزبان رسانندگی اندکی دارد، در محل پیچیده گیرنده، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تابشی در محدوده‌ای که جسم قرار دارد، یکنواخت در نظر گرفته می‌شوند. برای جسمی با رسانندگی زیاد، جریان‌های گردابی در سطح جسم محدود هستند و به داخل آن نفوذ نمی‌کنند (وو و همکاران، ۲۰۰۵).

کره ساده‌ترین شکل برای مدل‌سازی طیف وسیعی از

مهمات منفجر نشده (Unexploded Ordnance, UXO) در بسیاری از جوامعی که در مقطعی درگیر جنگ بوده‌اند، خسارت‌های جانی و مالی فراوانی به‌بار آورده است. ضروری است این اجسام مدفون با استفاده از روش‌های تخریبی یا غیرتخریبی برای خنثی‌سازی، شناسایی و آشکارسازی شوند. از روش غیرتخریبی ژئومغناطیسی برای تشخیص مواد منفجره فراوان استفاده شده است (ژانگ و همکاران، ۲۰۰۳؛ بیلینگز، ۲۰۰۴؛ بیلینگز و همکاران، ۲۰۱۰ و شابیتیز و همکاران، ۲۰۱۱). پذیرفتاری مغناطیسی برخی مواد به‌کاررفته در این اجسام زیاد است (مانند فولاد)؛ بنابراین سبب تولید بی‌هنجاری می‌شوند که با تجهیزات مغناطیسی می‌توان آن را اندازه‌گیری کرد. حسگرهای مغناطیسی که برای تشخیص UXO استفاده می‌شوند، معمولاً میدان مغناطیسی کل (اندازه‌گیری مغناطیس‌سنج) یا تفاوت بین مؤلفه‌های عمودی میدان مغناطیسی دو مغناطیس‌سنج نزدیک به هم را اندازه‌گیری می‌کنند (اندازه‌گیری گرادایومتر). روش رادار زمین نفوذی (ساتو و همکاران، ۲۰۰۴؛ مصطفی و حسین، ۲۰۰۷) و استفاده از دستگاه‌های فلزیاب (پروتی و همکاران، ۲۰۱۰) از دیگر روش‌ها برای آشکارسازی مهمات منفجر نشده است. روش‌های الکترومغناطیسی (EM) در حوزه زمان (پاشن و اولدنبرگ، ۲۰۰۱؛ پاشن، ۲۰۰۷ و استینه‌هاتز و همکاران، ۲۰۱۱) و حوزه فرکانس (بل و همکاران، ۲۰۰۱ و پاشن، ۲۰۱۱) نیز از روش‌های مرسوم برای شناسایی، جداسازی و آشکارسازی این‌گونه اجسام است. پردازش داده‌های الکترومغناطیسی پاسخ ذاتی (با اثر انگشت) یکتایی برای هر هدف ایجاد می‌کند که می‌تواند با پاسخ‌های انواع مهمات تطبیق داده شود. ابزارهای الکترومغناطیسی در حوزه زمان، به‌طور فعال یک میدان مغناطیسی اولیه متغیر در زمان (پله‌ای) را به زمین می‌تابانند (پاشن، ۲۰۰۷). میدان اولیه متغیر با زمان، نیروی محرکه القایی در زمین ایجاد می‌کند که در صورت وجود رسانندگی مناسب، سبب ایجاد جریان القایی می‌شود. این جریان‌ها میدان ثانویه‌ای تولید



شکل ۱. کره‌رسانا و هندسه پیچ‌های فرستنده و گیرنده.

به ترتیب d_r و d_t فاصله فرستنده و گیرنده از کره و θ_r و θ_t به ترتیب زاویه بین دوقطبی‌های معادل پیچ‌های فرستنده و گیرنده و خط واصل مرکز کره به مرکز این پیچ‌هاست. اگر I_R و I_T به ترتیب جریان در پیچ‌های فرستنده و گیرنده باشند و N_r و N_t ، A_r و A_t به ترتیب مساحت و تعداد دورهای پیچ‌های فرستنده و گیرنده باشند، $M_r = N_r A_r I_r$ و $M_t = N_t A_t I_t$ مغناطیسی تابشی با بسامد زاویه‌ای ω است که در سطح جسم رسانا سبب ایجاد جریان گردابی می‌شود. این جریان گردابی، میدان مغناطیسی ثانویه‌ای ایجاد می‌کند. طبق قانون القای فارادی، میدان ثانویه تولیدشده، در محل پیچ گیرنده پتانسیل الکتریکی تولید می‌کند که از رابطه زیر به‌دست می‌آید (محمودی و تان، ۲۰۰۹):

$$V_{EC}^{sph} = \frac{i\omega N_r N_t A_r A_t \mu_s a_0^3}{2\pi d_t^3 d_r^3} \times [\cos \theta_t \cos \alpha_r^s \cos \theta_r + \frac{1}{2} \sin \theta_t \cos \alpha_\theta^s \cos \theta_r + \frac{1}{2} \cos \theta_t \sin \alpha_r^s \sin \theta_r + \frac{1}{4} \sin \theta_t \sin \alpha_r^s \sin \theta_r]. \quad (1)$$

که α_r^s و α_θ^s به ترتیب زوایای بین مؤلفه‌های شعاعی و قطبی میدان مغناطیسی تابشی و خط واصل مراکز پیچ فرستنده کره هستند و $i = \sqrt{-1}$ است. اگر محیط رسانندگی ضعیفی داشته باشد، میدان الکتریکی تابشی با نفوذ در محیط، سبب ایجاد جریان رسانی می‌شود. الگوی این جریان در برخورد با سطح جسم رسانا واپاشیده می‌شود و سبب تولید پتانسیلی در محل پیچ گیرنده می‌شود که پتانسیل حاصل از جریان کانالی نامیده می‌شود و از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$V_{CC}^{sph}(r_s = d_r, \theta_r = \theta_r) =$$

اجسام از جمله مین‌ها است که تقارن محوری دارند (فرناندز و همکاران، ۲۰۰۷). نورتون و همکاران (۲۰۰۵) پاسخ الکترومغناطیسی کره را برای پیچ‌های فرستنده و گیرنده هم‌محور با پاسخ دوقطبی معادل‌سازی کردند. پاسخ القای الکترومغناطیسی کره و کره‌وار رسانا برای پیچ‌های جدا از هم برای چهار حالت جهت‌گیری پیچ‌های گیرنده و فرستنده نسبت به هم محاسبه شده است (بابایی و همکاران، ۲۰۱۳).

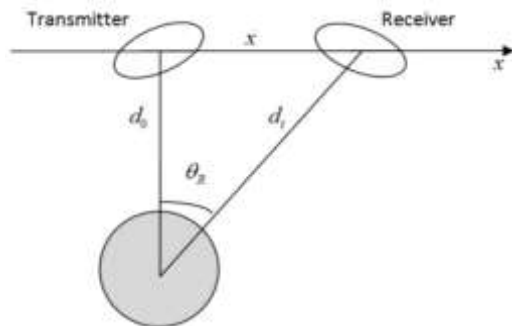
در ژئوفیزیک اکتشافی پس از محاسبه پاسخ بی‌هنجاری لازم است پارامترهای هندسی نظیر عمق و ابعاد جسم تعیین شوند. همچنین برای تعیین جنس جسم، پارامترهای فیزیکی مانند رسانندگی، ثابت دی‌الکتریک و... باید به‌دست بیایند. برای حالتی که پیچ فرستنده، افقی و موازی سطح زمین و پیچ گیرنده، عمود بر سطح زمین است، عمق کره با استفاده از روش خطی‌سازی و به کمک داده‌های القای الکترومغناطیسی تخمین زده شده است (بابایی و همکاران، ۲۰۱۴). همچنین عمق کره با روش کمینه مربعات برای حالتی که هر دو پیچ فرستنده و گیرنده، افقی و موازی سطح زمین هستند و حالتی که پیچ فرستنده، افقی و پیچ گیرنده، عمودی است نیز به‌دست آمده است (بابایی، ۱۳۹۴).

در این مقاله با استفاده از داده‌های القای الکترومغناطیسی و محاسبه تابع هدف به کمک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (Particle Swarm Optimization, PSO) عمق و شعاع کره برای هر چهار حالت جهت‌گیری پیچ‌های گیرنده و فرستنده به‌دست می‌آید. پس از آن با تولید داده‌ها با و بدون نوفه، عمق بی‌هنجاری محاسبه و روش، اعتبارسنجی می‌شود.

۲ پاسخ الکترومغناطیسی کره کاملاً رسانا در محیطی با رسانندگی محدود

در شکل ۱ کره کاملاً رسانا به شعاع a_0 ، تراوایی مغناطیسی μ_0 و قابلیت گذردهی الکتریکی ϵ_0 در محیطی با رسانندگی یکنواخت σ_0 و هندسه پیچ‌ها نشان داده شده است.

اینکه پیچه‌ها بر هم عمود یا با هم موازی باشند، چهار حالت فرض می‌شود. پتانسیل به‌دست آمده و آرایش پیچه‌ها در جدول ۱ آورده شده است (بابایی و همکاران، ۲۰۱۳).



شکل ۲. پیچه فرستنده بالای بی‌هنجاری قرار دارد و پیچه گیرنده در امتداد محور x روی سطح افقی جابه‌جا می‌شود.

در جدول ۱، $k = \frac{\omega N_T N_T A_T A_T I_T \mu_S}{2\pi}$ و $g = \frac{\sigma_0 \omega^2 N_T N_T A_T A_T I_T \mu_S^2}{2\pi}$ است. در شکل ۳ نمودار پتانسیل دریافتی روی پروفیل برداشت داده برای حالت‌های (۱) و (۲) نشان داده شده است. محور x بر پروفیل برداشت داده منطبق است و مبدأ محور درست بالای مرکز کره قرار دارد. ملاحظه می‌شود پاسخ دریافتی در مبدأ محور در حالت (۱) بیشینه و در حالت (۲) صفر است. از این

$$\frac{\omega^2 \mu_S^2 N_T A_T N_T I_T A_T \sigma_0 a_0^3}{4\pi d_t^2 d_r^2} \sin \theta_t \sin \alpha_\phi^s \sin \theta_r \quad (2)$$

که α_ϕ^s زاویه بین میدان الکتریکی تابشی و خط واصل مراکز پیچه فرستنده و کره است. در این مقاله، محیط میزبان، دریا است که رسانندگی آن $4S/m$ در نظر گرفته می‌شود (محمودی و تان، ۲۰۰۹). ولتاژ کل القایی در پیچه گیرنده برابر است با:

$$V_{tot}^{sph} = V_{EC}^{sph} + V_{CC}^{sph} \quad (3)$$

چنانچه در روابط (۱) و (۲) ملاحظه می‌شود، پتانسیل حاصل از جریان گردابی، مختلط و پتانسیل حاصل از جریان کانالی، حقیقی است. دامنه و فاز پتانسیل کل برابرند با:

$$|V_{tot}^{sph}| = \sqrt{|V_{EC}^{sph}|^2 + V_{CC}^{sph2}} \quad (4)$$

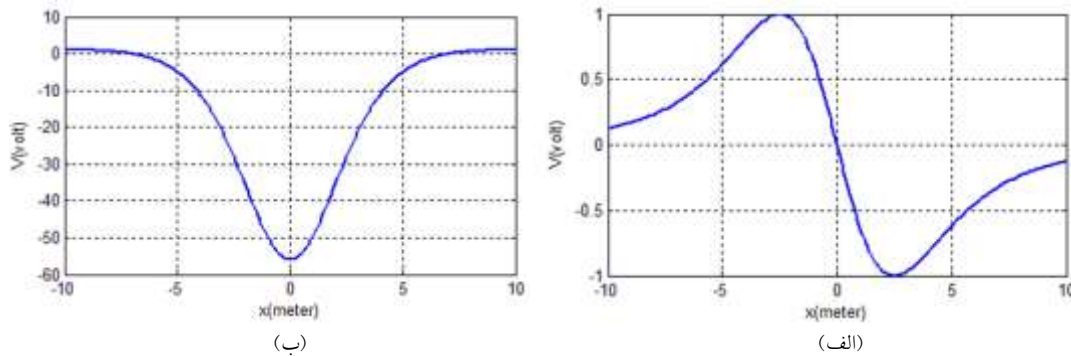
$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{|V_{EC}^{sph}|}{V_{CC}^{sph}} \right) \quad (5)$$

مطابق شکل ۲ فرض می‌شود پیچه فرستنده در مبدأ محور x ها و کره در عمق d_0 زیر آن قرار گرفته باشد و پیچه گیرنده در امتداد محور x ها جابه‌جا شود.

با استفاده از روابط (۱) و (۲) برای جهت‌گیری‌های مختلف این پیچه‌ها، می‌توان پتانسیل‌های حاصل از جریان‌های گردابی و کانالی را محاسبه کرد. بر اساس

جدول ۱. آرایش هندسی پیچه‌ها و پاسخ دریافتی در محل پیچه گیرنده.

حالات	آرایش پیچه‌ها	پاسخ جریان گردابی (ECR)	پاسخ جریان کانالی (CCR)
حالت (۱)		$V_{EC}^{(1)} = \frac{ik}{2} \left(\frac{a_0}{d_0} \right)^3 \left(\frac{x^2 - 2d_0^2}{(x^2 + d_0^2)^{5/2}} \right)$	$V_{CC}^{(1)} = 0$
حالت (۲)		$V_{EC}^{(2)} = -\frac{1}{2} ik \left(\frac{a_0}{d_0} \right)^3 \left(\frac{x d_0}{(x^2 + d_0^2)^{5/2}} \right)$	$V_{CC}^{(2)} = 0$
حالت (۳)		$V_{EC}^{(3)} = \frac{3}{4} ik \left(\frac{a_0}{d_0} \right)^3 \left(\frac{x d_0}{(x^2 + d_0^2)^{5/2}} \right)$	$V_{CC}^{(3)} = \frac{1}{2} g \left(\frac{a_0}{d_0} \right)^3 \left(\frac{x d_0}{(x^2 + d_0^2)^{3/2}} \right)$
حالت (۴)		$V_{EC}^{(4)} = \frac{1}{4} ik \left(\frac{a_0}{d_0} \right)^3 \left(\frac{2x^2 + d_0^2}{(x^2 + z^2)^{5/2}} \right)$	$V_{CC}^{(4)} = \frac{1}{2} g \left(\frac{a_0}{d_0} \right)^3 \left(\frac{x d_0}{(x^2 + d_0^2)^{3/2}} \right)$



شکل ۳. نمودار پتانسیل دریافتی روی محور x ها که درست از بالای بی‌هنجاری می‌گذرد. (الف) حالت (۱) (ب) حالت (۲).

آنها و تغییر شکل بهینه دسته استفاده شد. در این الگوریتم، ذرات در فضای جستجو جاری می‌شوند. تغییر مکان ذرات در فضای جستجو تحت تأثیر تجربه و دانش خودشان و همسایگانشان است. نتیجه مدل‌سازی این رفتار اجتماعی فرایند جستجویی است که طی آن ذرات به سوی نواحی موفق میل می‌کنند. در واقع الگوریتم PSO از تعداد مشخصی از ذرات تشکیل شده است که به صورت تصادفی مقدار اولیه می‌گیرند. برای هر ذره دو مقدار وضعیت و سرعت تعریف می‌شود که به ترتیب با یک بردار مکان و یک بردار سرعت مدل می‌شود. این ذرات به صورت تکرار شونده‌ای در فضای n بعدی مسئله حرکت می‌کنند تا با محاسبه مقدار بهینگی به عنوان یک ملاک سنجش، گزینه‌های ممکن جدید را جستجو کنند. بعد فضای مسئله، برابر تعداد پارامترهای موجود در تابع مورد نظر برای بهینه‌سازی است. یک حافظه به ذخیره بهترین موقعیت هر ذره در گذشته و یک حافظه به ذخیره بهترین موقعیت به دست آمده در میان همه ذرات اختصاص می‌یابد. با تجربه حاصل از این حافظه‌ها، ذرات تصمیم می‌گیرند که در تکرار بعدی چگونه حرکت کنند. در هر بار تکرار، همه ذرات در فضای n بعدی مسئله حرکت می‌کنند تا بالاخره نقطه بهینه عام پیدا شود. ذرات سرعت و موقعیت خود را با استفاده از روابط زیر به روز می‌کنند:

$$v_i^{t+1} = \omega v_i^t + c_1 r_1 (x_{best_i}^t - x_i^t) + c_2 r_2 (g_{best_i}^t - x_i^t) \quad (6)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (7)$$

نکات می‌توان برای تعیین محل بی‌هنجاری بهره برد. در حالت دوم نیز، بیشینه و کمینه پاسخ دریافتی در نقاط $x = \pm d_0/2$ قرار دارد. به عبارت دیگر، فاصله بین این دو نقطه برابر با عمق بی‌هنجاری است. به این ترتیب به صورت سرانگشتی و با استفاده از نمودارها می‌توان محل و عمق بی‌هنجاری را برآورد کرد.

ثابت k به عوامل کنترل‌شدنی نظیر مشخصات هندسی پیچ‌ها و بسامد میدان تابشی بستگی دارد، ولی g علاوه بر این عوامل، به رسانندگی محیط نیز وابسته است. برای ساده‌تر شدن محاسبات، پتانسیل‌ها در هر چهار حالت به k به‌هنجار می‌شود. به کمک روابط (۲) و (۴)، دامنه $A(x_i, d_0, a_0, \sigma_0)$ و فاز $\varphi(x_i, d_0, a_0, \sigma_0)$ پتانسیل کل دریافتی برای هریک از چهار حالت موجود در جدول ۱ محاسبه می‌شود. به جز حالات (۱) و (۲) که فاز ثابت و برابر ۹۰ درجه است، دامنه و فاز شامل سه پارامتر عمق، شعاع کره و رسانندگی محیط است. در بخش بعدی این مقاله، عمق و شعاع با روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات به دست خواهد آمد.

۳ الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات

الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات یا الگوریتم پرندگان (PSO) یک الگوریتم جستجوی اجتماعی است که با توجه به رفتار اجتماعی دسته‌های پرندگان مدل شده است. این روش را اولین بار کندی و ابره‌ارت (۱۹۹۵) مطرح کردند. در ابتدا این الگوریتم برای کشف الگوهای حاکم بر پرواز هم‌زمان پرندگان و تغییر مسیر ناگهانی

عمق و شعاع مجهول کره را می‌توان با کمینه‌سازی معادله زیر، که به آن تابع هدف نیز می‌گویند، به‌دست‌آورد:

$$\psi(z) = \text{Min} \left(\sum_i^N [L(x_i) - V_{EC}^{(1)}]^2 \right) \quad (9)$$

که $L(x_i)$ پاسخ نسبی دریافتی در نقطه x_i است. در این بخش با اجرای الگوریتم PSO برای تابع فوق، توانایی روش در پیدا کردن مکان تمامی جایگاه‌ها و رسیدن به جواب بهینه سنجیده می‌شود. برای این منظور تعداد جمعیت ذرات، ضرایب ω ، C_1 و C_2 به ترتیب معادل ۳۰، ۰/۱، ۲ و ۲ فرض و الگوریتم ۱۵۰ بار اجرا می‌شود ($T=150$). شکل ۴ موقعیت (عمق و شعاع) هریک از ذرات را در تکرار ۱، ۷۵ و ۱۵۰ نشان می‌دهد. چنانکه مشاهده می‌شود، بیشتر ذرات به یک موقعیت مشخص همگرا شده‌اند و تعداد ذرات همگرا شده با افزایش تعداد تکرارها افزایش می‌یابد.

در این رابطه متغیرهای x_{best} و g_{best} به ترتیب نشان‌دهنده بهترین موقعیت ذره و بهترین موقعیت گروه هستند. سایر متغیرها در زیر توضیح داده شده‌اند:

ω : اینرسی وزن؛

C_1 و C_2 : دو مقدار ثابت با علامت مثبت؛

r_1 و r_2 : دو پارامتر تصادفی مثبت با مقدار بین صفر تا یک.

شبه‌کد رایانه‌ای برای الگوریتم PSO به صورت زیر است:

۴ نتایج شبیه‌سازی

در حالتی که پیچه‌های گیرنده و فرستنده موازی سطح زمین هستند، فقط پتانسیل حاصل از جریان گردابی در محل پیچه گیرنده دریافت می‌شود و پتانسیل مربوط به جریان کانالی صفر است؛ بنابراین پتانسیل کل دریافتی از رابطه زیر به‌دست می‌آید (بابایی و همکاران، ۲۰۱۴):

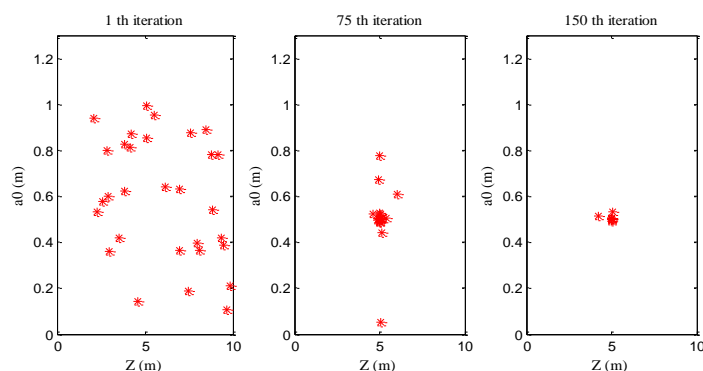
$$V_{EC}^{(1)} = \frac{ik}{2} \left(\frac{a_0}{d_0} \right)^3 \left(\frac{x^2 - 2d_0^2}{(x^2 + d_0^2)^{5/2}} \right) \quad (8)$$

```

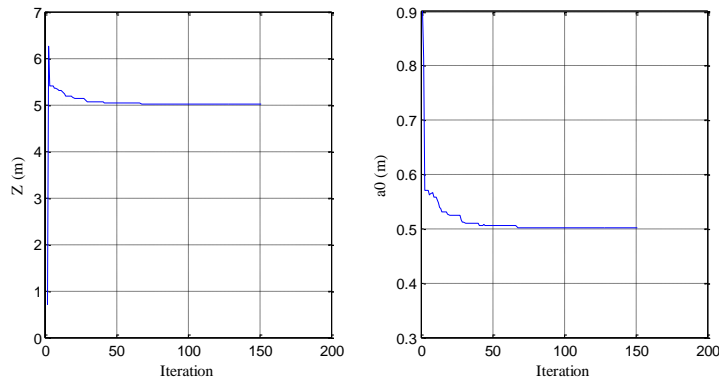
For each particle
  Initialize particle
END
Do
  For each particle
    Calculate fitness value
    If the fitness value is better than its personal best
      set current value as the new pbest
    End
  Choose the particle with the best fitness value of all as gbest
  For each particle
    Calculate particle velocity according to equation (a)
    Update particle position according to equation (b)
  End

```

While maximum iterations or minimum error criteria is not attained



شکل ۴. موقعیت ذرات در تکرارهای مختلف الگوریتم PSO



شکل ۵. روند همگرایی برای تخمین متغیرهای عمق و شعاع.

تخمین عمق محاسبه شده است.

مقادیر به دست آمده برای عمق و شعاع کره نشان می‌دهد این الگوریتم می‌تواند روشی مؤثر برای تخمین این پارامترها باشد. درصد خطا در تعیین عمق و شعاع کره در همه موارد کمتر از ۱/۲ درصد است. البته برای مقادیر بدون نوفه، میزان خطا تقریباً صفر است و وقتی به داده‌ها نوفه اضافه می‌شود، عمق بی‌هنجاری و شعاع با خطای کاملاً پذیرفتنی محاسبه می‌شود؛ با این حال پاسخ به دست آمده به نوفه حساس است و در صورت اجرای مکرر برنامه، مقادیر متفاوتی برای آن به دست می‌آید. البته محدوده تغییرات ناچیز است و می‌توان گفت پایداری حل مسئله پذیرفتنی است.

شکل ۵ نیز روند همگرایی برای دو متغیر عمق و شعاع کره را در تکرارهای مختلف به صورت مجزا نشان می‌دهد. بر اساس این محاسبات، عمق جسم مدفون معادل ۵ متر و شعاع آن نیز تقریباً ۰/۵ متر تخمین زده می‌شود.

در ادامه و برای بررسی حالات مختلف، در ابتدا پروفیلی در نظر گرفته می‌شود که درست از بالای کره می‌گذرد تا داده‌های مصنوعی مربوط به کره در عمق و شعاع معین تولید شود. سپس در دو مرحله، نخست با داده‌های بدون نوفه و در مرحله بعد با استفاده از داده‌هایی که به آنها نوفه اضافه شده است، این متغیرها محاسبه می‌شوند. برای کره عمق‌های ۲، ۵ و ۱۰ متر در شعاع‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ فرض و در هر مورد خطای

جدول ۲. نتایج تخمین عمق (Z) و شعاع کره (a0) برای حالت (۱) در طول پروفیلی که درست از بالای کره می‌گذرد. فاصله نقاط برداشت ۱ واحد انتخاب شده است.

		مقادیر تخمین زده شده											
		بدون نوفه				نوفه ۵ درصد				نوفه ۱۰ درصد			
		Z	Err (%)	a0	Err (%)	Z	Err (%)	a0	Err (%)	Z	Err (%)	a0	Err (%)
Z=۲	a0=۰/۱	۲/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰	۲/۰۰۲۶	۰/۱	۰/۱۹۹۴	۰/۲	۰/۱۰۰۲	۰/۷	۰/۰۹۸۹	۱/۱
	a0=۰/۲	۲/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۲۰۰۰	۰/۰	۱/۹۹۹۴	۰/۰	۰/۴۹۸۳	۰/۱	۰/۱۹۹۸	۰/۳	۰/۱۹۸۵	۰/۷
	a0=۰/۵	۲/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۵۰۰۰	۰/۰	۲/۰۰۷۵	۰/۴	۰/۶۹۳۹	۰/۷	۰/۵۰۳۴	۰/۵	۰/۴۹۶۰	۰/۸
Z=۵	a0=۰/۱	۵/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰	۴/۹۹۱۴	۰/۲	۰/۲۰۰۱	۰/۲	۰/۰۹۹۸	۰/۱	۰/۰۹۹۸	۰/۲
	a0=۰/۲	۵/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۲۰۰۰	۰/۰	۵/۰۱۴۶	۰/۳	۰/۵۰۲۴	۰/۴	۰/۲۰۰۹	۰/۳	۰/۱۹۹۲	۰/۴
	a0=۰/۵	۵/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۵۰۰۰	۰/۰	۴/۹۹۴۲	۰/۱	۰/۶۹۹۲	۰/۲	۰/۴۹۸۸	۰/۳	۰/۴۹۶۹	۰/۶
Z=۱۰	a0=۰/۱	۱۰/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰	۹/۹۷۹۵	۰/۲	۰/۲۰۰۱	۰/۴	۰/۰۹۹۶	۰/۷	۰/۰۹۸۸	۱/۲
	a0=۰/۲	۱۰/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۲۰۰۰	۰/۰	۹/۹۷۰۲	۰/۳	۰/۵۰۳۴	۰/۵	۰/۱۹۹۰	۰/۰	۰/۱۹۹۹	۰/۰
	a0=۰/۵	۱۰/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۵۰۰۰	۰/۰	۹/۹۹۷۶	۰/۰	۰/۶۹۹۶	۰/۱	۰/۴۹۹۷	۰/۲	۰/۴۹۷۸	۰/۴

جدول ۳. نتایج تخمین عمق (Z) و شعاع کره (a0) برای حالت (۲) در طول پروفیلی که درست از بالای کره می‌گذرد. فاصله نقاط برداشت ۱ واحد انتخاب شده است.

		مقادیر تخمین زده شده											
		بدون نوفه				نوفه ۵ درصد				نوفه ۱۰ درصد			
		Z	Err (%)	a0	Err (%)	Z	Err (%)	a0	Err (%)	Z	Err (%)	a0	Err (%)
Z=۲	a0=۰/۱	۲/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰	۱/۹۹۹۵	۰/۰	۰/۹۹۹۰	۰/۱	۱/۹۹۷۵	۰/۱	۰/۰۹۹۷	۰/۳
	a0=۰/۲	۲/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۲۰۰۰	۰/۰	۱/۹۹۸۷	۰/۱	۰/۱۹۹۷	۰/۲	۲/۰۱۶۱	۰/۸	۰/۲۰۲۷	۱/۴
	a0=۰/۵	۲/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۵۰۰۰	۰/۰	۲/۰۰۱۱	۰/۱	۰/۴۹۹۹	۰/۰	۲/۰۰۲۱	۰/۱	۰/۵۰۰۲	۰/۰
Z=۵	a0=۰/۱	۵/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰	۴/۹۹۸۰	۰/۰	۰/۹۹۹۰	۰/۱	۵/۰۰۹۱	۰/۲	۰/۱۰۰۲	۰/۲
	a0=۰/۲	۵/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۲۰۰۰	۰/۰	۴/۹۹۶۳	۰/۱	۰/۱۹۹۶	۰/۲	۴/۹۹۹۰	۰/۰	۰/۲۰۰۱	۰/۱
	a0=۰/۵	۵/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۵۰۰۰	۰/۰	۴/۹۹۵۱	۰/۱	۰/۴۹۹۱	۰/۲	۵/۰۱۶۰	۰/۳	۰/۵۰۳۱	۰/۶
Z=۱۰	a0=۰/۱	۱۰/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰	۱۰/۰۱۲۶	۰/۱	۰/۱۰۰۲	۰/۲	۱۰/۰۲۴۴	۰/۲	۰/۱۰۰۴	۰/۴
	a0=۰/۲	۱۰/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۲۰۰۰	۰/۰	۹/۹۸۸۱	۰/۱	۰/۱۹۹۵	۰/۲	۱۰/۰۳۳	۰/۳	۰/۲۰۱۳	۰/۶
	a0=۰/۵	۱۰/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۵۰۰۰	۰/۰	۹/۹۹۴۸	۰/۱	۰/۴۹۹۴	۰/۱	۱۰/۰۱۳۲	۰/۱	۰/۵۰۱۴	۰/۳

عمق و شعاع کره استفاده کرد. نتایج این بررسی در جداول ۴ و ۵ جمع‌آوری شده است. مشابه حالت قبل، دقت تخمین پارامترهای عمق و شعاع کره، تأییدی بر توانمندی الگوریتم در تخمین پارامترهاست.

۵ نتیجه‌گیری

در این تحقیق با استفاده از داده‌های القای الکترومغناطیسی، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای تخمین عمق و شعاع کره کاملاً رسانای مدفون در محیطی با رسانندگی ضعیف اجرا شد. برای جهت‌گیری پیچ‌های فرستنده و گیرنده نسبت به هم، چهار حالت هندسی در نظر گرفته شد و در هر حالت، پس از تولید داده‌های مصنوعی بدون و با نوفه و با استفاده از روش الگوریتم بهینه‌سازی ذرات، عمق و شعاع کره به‌دست آمد. در روش یادشده، عمق و شعاع کره، ذرات فرض شدند. با اجرای الگوریتم و پس از ۷۵ تکرار، همگرایی به‌دست آمد و سرعت همگرایی زیاد این روش معلوم شد. برای ترکیب مختلفی از مقادیر عمق و شعاع کره و با نوفه ۰، ۵ و ۱۰ درصد، در همه حالات، خطای تخمین پارامترها کمتر از ۲ درصد بود که نشان می‌دهد این روش دقتی پذیرفتنی دارد.

در حالت دوم نیز با توجه به اینکه پیچ فرستنده موازی با سطح زمین و پیچ گیرنده عمود بر سطح زمین است، فقط پتانسیل حاصل از جریان گردابی در محل پیچ گیرنده دریافت شده و پتانسیل مربوط به جریان کانالی صفر است؛ بنابراین پتانسیل کل دریافتی برابر است با:

$$V_{EC}^{(2)} = -\frac{1}{2} ik \left(\frac{a_0}{d_0}\right)^3 \left(\frac{xd_0}{(x^2+d_0^2)^{5/2}}\right) \quad (10)$$

مشابه حالت قبل با جایگزینی رابطه (۱۰) در رابطه (۹) و به جای پتانسیل کل دریافتی حالت اول می‌توان عمق و شعاع مجهول کره را با کمینه‌سازی به‌دست آورد. در این راستا پارامترهای الگوریتم بهینه ذرات مشابه حالت قبل تنظیم شده‌اند و نتایج در جدول ۳ گردآوری شده است. چنانکه مشاهده می‌شود، عملکرد الگوریتم در تخمین پارامترهای عمق و شعاع کره دقت مناسبی دارد. در حالات سوم و چهارم پتانسیل کل دریافتی حاصل از جریان گردابی و جریان کانالی در محل پیچ گیرنده است و از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$V_C^{3,4} = \sqrt{(V_{EC}^{(3,4)})^2 + (V_{CC}^{(3,4)})^2} \quad (11)$$

بنابراین با جایگزینی رابطه فوق در رابطه (۹) می‌توان مشابه قبل، از الگوریتم ازدحام ذرات در تخمین مقادیر

جدول ۴. نتایج تخمین عمق (Z) و شعاع کره (a0) برای حالت (۳) در طول پروفیلی که درست از بالای کره می‌گذرد. فاصله نقاط برداشت ۱ واحد انتخاب شده است.

		مقادیر تخمین زده شده											
		بدون نوفه				نوفه ۵ درصد				نوفه ۱۰ درصد			
		Z	Err (%)	a0	Err (%)	Z	Err (%)	a0	Err (%)	Z	Err (%)	a0	Err (%)
Z=۲	a0=۱	۲/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰	۱/۹۹۷۰	۰/۲	۰/۰۹۹۸	۰/۲	۲/۰۰۲۹	۰/۱	۰/۱۰۰۲	۰/۲
	a0=۰/۲	۲/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۲۰۰۰	۰/۰	۲/۰۰۰۳	۰/۰	۰/۲۰۰۱	۰/۰	۲/۰۰۹۸	۰/۵	۰/۲۰۱۰	۰/۵
	a0=۰/۵	۲/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۵۰۰۰	۰/۰	۱/۹۹۷۰	۰/۱	۰/۴۹۹۴	۰/۱	۲/۰۰۰۶	۰/۰	۰/۵۰۰۴	۰/۱
Z=۵	a0=۱	۵/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰	۴/۹۹۹۳	۰/۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰	۵/۰۰۶۲	۰/۱	۰/۱۰۰۱	۰/۱
	a0=۰/۲	۵/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۲۰۰۰	۰/۰	۵/۰۰۳۸	۰/۱	۰/۲۰۰۳	۰/۱	۵/۰۰۰۱	۰/۰	۰/۲۰۰۱	۰/۱
	a0=۰/۵	۵/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۵۰۰۰	۰/۰	۵/۰۱۲۰	۰/۲	۰/۵۰۱۵	۰/۳	۵/۰۲۴۷	۰/۵	۰/۵۰۲۷	۰/۵
Z=۱۰	a0=۱	۱۰/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰	۱۰/۰۱۵۶	۰/۲	۰/۱۰۰۱	۰/۱	۹/۹۹۶۴	۰/۰	۰/۰۹۹۹	۰/۱
	a0=۰/۲	۱۰/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۲۰۰۰	۰/۰	۱۰/۰۰۲۱	۰/۰	۰/۲۰۰۰	۰/۰	۱۰/۰۲۸۰	۰/۳	۰/۲۰۰۸	۰/۴
	a0=۰/۵	۱۰/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۵۰۰۰	۰/۰	۱۰/۰۲۸۸	۰/۳	۰/۵۰۲۰	۰/۴	۱۰/۰۴۰۴	۰/۴	۰/۵۰۲۴	۰/۵

جدول ۵. نتایج تخمین عمق (Z) و شعاع کره (a0) برای حالت (۴) در طول پروفیلی که درست از بالای کره می‌گذرد. فاصله نقاط برداشت ۱ واحد انتخاب شده است.

		مقادیر تخمین زده شده											
		بدون نوفه				نوفه ۵ درصد				نوفه ۱۰ درصد			
		Z	Err (%)	a0	Err (%)	Z	Err (%)	a0	Err (%)	Z	Err (%)	a0	Err (%)
Z=۲	a0=۱	۲/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰	۲/۰۰۱۹	۰/۱	۰/۱۰۰۱	۰/۱	۲/۰۱۴۸	۰/۷	۰/۱۰۰۷	۰/۷
	a0=۰/۲	۲/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۲۰۰۰	۰/۰	۱/۹۹۷۰	۰/۲	۰/۱۹۹۸	۰/۱	۱/۹۹۳۶	۰/۳	۰/۱۹۹۹	۰/۴
	a0=۰/۵	۲/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۵۰۰۰	۰/۰	۲/۰۰۴۴	۰/۲	۰/۵۰۱۷	۰/۳	۲/۰۱۲۵	۰/۶	۰/۵۰۳۱	۰/۶
Z=۵	a0=۱	۵/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰	۵/۰۰۱۷	۰/۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰	۴/۹۷۰۲	۰/۶	۰/۰۹۹۳	۰/۷
	a0=۰/۲	۵/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۲۰۰۰	۰/۰	۴/۹۸۰۷	۰/۴	۰/۱۹۹۲	۰/۴	۵/۰۰۷۷	۰/۲	۰/۲۰۰۳	۰/۱
	a0=۰/۵	۵/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۵۰۰۰	۰/۰	۴/۹۹۹۴	۰/۰	۰/۴۹۹۷	۰/۱	۴/۹۹۷۸	۰/۰	۰/۴۹۹۸	۰/۰
Z=۱۰	a0=۱	۹/۹۹۹۹	۰/۰	۰/۱۰۰۰	۰/۰	۹/۹۵۳۸	۰/۵	۰/۰۹۹۳	۰/۷	۹/۹۷۲۵	۰/۳	۰/۰۹۹۷	۰/۳
	a0=۰/۲	۱۰/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۲۰۰۰	۰/۰	۱۰/۰۲۲۵	۰/۲	۰/۲۰۰۶	۰/۳	۹/۹۹۰۸	۰/۱	۰/۱۹۹۸	۰/۱
	a0=۰/۵	۱۰/۰۰۰۰	۰/۰	۰/۵۰۰۰	۰/۰	۱۰/۰۳۷۶	۰/۴	۰/۵۰۲۶	۰/۵	۹/۹۸۵۸	۰/۱	۰/۴۹۸۷	۰/۳

response of the spheroidal conductor for the separated receiver and transmitter systems: Arabian Journal of Geosciences, 6(6), 1913-1934.

Babaei, M., Meshinchi-Asl, M., and 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.

Bell, T., Barrow, B., Miller, J., and Keiswetter, D., 2001, Time and frequency domain

منابع

بابایی، م.، ۱۳۹۴، تخمین عمق کره رسانای مدفون

به عنوان مدلی از مهمات منفجر نشده به کمک

داده‌های القای الکترومغناطیسی: مجله الکترومغناطیسی

کاربردی، ۲، ۱-۶.

Babaei, M., Meshinchi-Asl, M., and Zomorrodian, H., 2013, Computing eddy-current response and current channeling

- Sato, M., Hamada, Y., Feng, X., Kong, F., Zeng, Z., and Fang, G., 2004, GPR using an array antenna for landmine detection: Near Surface Geophysics, **2**(1), 7-13.
- Shubitidze, F., Barrowes, B., Shamatava, I., Fernandez, J. P., and O'Neill, K., 2011, The Ortho-Normalized Volume Magnetic Source Technique Applied to Live-Site UXO data, Inversion and Classification Studies: SEG Technical Program Expanded Abstracts, **30**, 3766-3770.
- Steinhurst, D. A., Harbaugh, G. R., Kingdon, J. B., Furuya, T., Keiswetter, D. A., and George, D. C., 2011, EMI Array for Cued UXO Discrimination: ESTCP Project MM-0601, Technical Report, ESTCP.
- Wu, R., Liu, J., Li, T., Gao, Q., Li, H., and Zhang, B., 2005, Progress in the research of ground bounce removal for landmine detection with ground penetrating radar: PIERS Online, **1**(3), 336-340.
- Zhang, Y., Collins, L. M., Yu, H., Baum, C. E., and Carin, L., 2003, Sensing of unexploded ordnance with magnetometer and induction data: Theory and Signal Processing: IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing **41**, 1005-1015.
- electromagnetic induction signatures of unexploded ordnance: Subsurface Sensing Technologies and Applications, **2**, 153-175.
- Billings, S. D., 2004, Discrimination and classification of buried unexploded ordnance using magnetometry: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **42**, 1241-1251.
- Billings, S. D., Pasion, L. R., Beran, L., et al., 2010, Unexploded ordnance discrimination using magnetic and electromagnetic sensors: Case study from a former military site: Geophysics, **75**, B103-B114.
- Fernandez, J.P., Sun K., Barrowes, B., O'Neill, K., Shamatava, I., Shubitidze, F., Pauksen (2007) Inferring the location of buried UXO using a support vector machine Proc.SPIE 6553.
- Kennedy, J., and Eberhart, R., 1995, Particle swarm optimization: Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, **IV**, 1942-1948.
- Mahmoodi, M., and Tan, S. Y., 2009, Depth detection of conducting of marine mines via eddy-current and current -channeling response: Progress in Electromagnetic Research, **90**, 287-307.
- Moustafa, K., and Hussein, K. F. A., 2007, Performance evaluation of separated aperture sensor GPR system for land mine detection: Progress in Electromagnetics Research, PIER **72**, 21-37.
- Norton, S. J., SanFilipo, W. A., and Won, I. J., 2005, Eddy-current and current-channeling response to spheroidal anomalies: IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, **43**, 2200-2209.
- Pasion, L. R., 2011, Feature Extraction and Classification of Magnetic and EMI Data: ESTCP Project MR- 201004, Technical Report, Camp Beale, CA.
- Pasion, L. R., and Oldenburg, D. W., 2001, A discrimination algorithm for UXO using time domain electromagnetic induction: Journal of Environmental and Engineering Geophysics, **6**, 91-102.
- Pasion, L. R., 2007, Inversion of Time-Domain Electromagnetic Data for the Detection of Unexploded Ordnance: Ph.D. thesis, University of British Columbia.
- Prouty, M., George, D. C., and Snyder, D. D., 2010, Metal Mapper: A Multi Sensor TEM System for UXO Detection and Classification: ESTCP Project MR-200603, Technical Report, ESTCP.

Interpretation of electromagnetic induction data using particle swarm optimization method to determine the parameters of conductive sphere as a model of unexploded ordnance

Mojtaba Babaei ^{1*} and Mohammad Ehsan Mosayebian ²

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

² Assistant Professor, Department of Electrical Engineering, Tuyserkan Branch, Islamic Azad University, Tuyserkan, Iran

(Received: 11 February 2022, Accepted: 22 April 2022)

Summary

Landmines buried in the sea or land threaten a large number of people around the world, and many people die as a result of these unexploded ordnance. Such ammunition needs to be identified by non-destructive methods. Numerous methods have been used to identify, discriminate and detect them. One of these methods in geophysics is electromagnetism in the time and also frequency domain, by which such anomalies are detected and their physical and geometric parameters are estimated. The electromagnetic induction method (EMI) is one of the frequency domain methods used for this purpose. This technique takes into account Eddy-Current Response (ECR) induced on the conducting marine mines as well as Current-Channeling Response (CCR) associated with the perturbation of currents induced in the conductive marine environment. Sea water is a good conducting medium in low-frequency range. Thus, displacement current can be neglected. The effect of noise due to the background medium can also be neglected. The sphere has often been used as a tractable model of a conducting anomaly in studying the response of electromagnetic induction (EMI) system. A large amount of unexploded ordnance is simulated in the simplest form with a sphere and a spheroid (for more accurate approximation).

In this study, using the electromagnetic induction responses which are caused by eddy currents generated on the surface of the object and also the channel current in the host environment, the depth and radius of the buried object are obtained for four different modes of receiver and transmitter coil orientation. The transmitting and receiving coils can be approximated as magnetic dipoles. The incident fields emanating from the transmitting coil are uniform over the extent of the object. The object is considered as a perfect conductor compared to the host environment. To determine the depth and radius, the particle swarm optimization (PSO) algorithm is proposed. This technique is a global optimization method that can be used to solve problems whose answer is a point or surface in a multidimensional space. PSO is adjusted with random particles (models) and searches for targets by updating generations. The algorithm is implemented on the noise-free and noisy data respectively to evaluate the algorithm performance. The simulation results indicate that this method can be an effective way to estimate the depth and radius of the sphere. For noise-free data, the error is almost zero, and when noise is added to detect them, the depth of the anomaly and the radius are calculated with a perfectly acceptable error.

Keywords: electromagnetic induction, unexploded ordnance, particle swarm optimization algorithm, depth and radius estimation of sphere

*Corresponding author:

m_babaei@iauh.ac.ir