

تخمین عمق کره رسانای مدفون به عنوان مدلی از مهمات منفجر نشده به کمک داده‌های القای الکترومغناطیسی

مجتبی بابایی

استادیار، گروه فیزیک، واحد تویسرکان، دانشگاه آزاد اسلامی، تویسرکان، ایران

(دریافت: ۹۵/۰۱/۱۵، پذیرش: ۹۵/۰۹/۰۲)

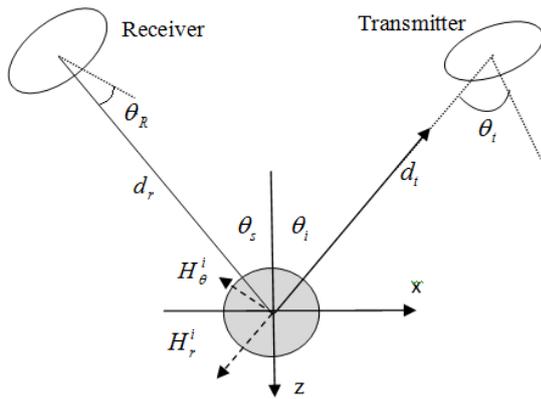
چکیده: در این مقاله عمق کره رسانای مدفون به عنوان مدلی از یک مین فلزی در یک محیط با رسانایی ضعیف، با استفاده از داده‌های القای الکترومغناطیسی محاسبه می‌شود. جسم رسانا در محیط با رسانندگی محدود به وسیله پیچیده فرستنده، تحت تابش میدان الکترومغناطیسی قرار می‌گیرد. در این حالت دو مد، یکی حاصل از جریان القایی ایجاد شده در سطح جسم (جریان گردابی) و دیگری حاصل از آشفتگی جریان شارشی در محیط رسانا در برخورد با جسم (جریان کانالی)، در محل گیرنده دریافت خواهد شد. در این مقاله برای چهار حالت جهت‌گیری هندسی پیچیده، پاسخ القای الکترومغناطیسی محاسبه و به کمک روش کمترین مربعات، عمق کره برای دو حالتی که فقط پاسخ جریان گردابی در محل پیچیده گیرنده دریافت می‌شود تعیین می‌گردد. با محاسبه بیشینه مقدار جریان گردابی، مساله تخمین عمق به مساله یافتن پاسخی برای معادله غیرخطی به شکل $f(z)=0$ تبدیل می‌شود. روش بر روی داده‌های مصنوعی، با و بدون نوفه اعمال و در دو حالت، عمق کره محاسبه گردید. در همه موارد عمق کره با خطای کمتر از ۶ درصد به دست آمد.

کلیدواژه‌ها: القای الکترومغناطیسی، جریان گردابی، مهمات منفجر نشده، تخمین عمق

۱- مقدمه

این میدان قرار داشته و با آن تحریک می‌شود. پاسخ دریافتی درگیرنده شامل دو مد است. مد جریان گردابی حاصل از جسم رسانا است که در عمق کم قرار گرفته و از این پاسخ می‌توان برای تعیین محل و عمق استفاده کرد [۶]. در محیط رسانا علاوه بر پاسخ حاصل از جریان گردابی، مد دیگری با عنوان پاسخ جریان کانالی ناشی از رسانندگی محیط نیز در محل گیرنده دریافت می‌شود. میدان الکتریکی تابشی در محیط رسانا جریانی تولید می‌کند که الگوی این جریان در برخورد با بی‌هنجاری و پاشیده شده و این آشفتگی در جریان منجر به ایجاد مد دیگری از پاسخ در پیچیده گیرنده می‌شود که مد جریان کانالی نام دارد. این مد در اکتشاف اجسام رسانا، به ویژه مین‌ها در محیط دریا که دارای رسانندگی نسبتاً خوبی است نقش مهمی می‌تواند داشته باشد [۷]. اگر محیط میزبان فاقد رسانندگی باشد پاسخ حاصل از جریان کانالی دریافت نخواهد شد. علاوه بر این در محیط دارای رسانندگی می‌توان با چرخش پیچیده‌ها هر یک از مدهای جریان گردابی و یا کانالی را نسبت به دیگری تقویت یا اساساً حذف نمود. در محاسبه پاسخ القای الکترومغناطیسی در محل پیچیده گیرنده، فرض می‌شود که میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تابشی در محدوده‌ای که جسم قرار دارد یکنواخت است. این فرض در صورتی درست است که فاصله پیچیده‌ها از جسم چندین

در بیش از شصت کشور جهان تعداد زیادی مهمات منفجر نشده جان انسان‌ها را به خطر انداخته است. بنابراین لازم است از روش‌هایی برای شناسایی، آشکارسازی و جداسازی این اجسام استفاده شود [۴-۱]. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش رادار زمین نفوذی، استفاده از دستگاه‌های فلزیاب و روش القای الکترومغناطیسی اشاره کرد. روش رادار زمین نفوذی که بر اساس تباین ثابت دی الکتریک جسم و محیط میزبان و در محدوده فرکانسی ۳۰ MHz تا ۶GHz کار می‌کند، به شرط آن که محیط میزبان فاقد رطوبت باشد دارای عمق کاوش نسبتاً زیاد در حدود ۱۵ متر است [۵]. با این حال در محیط‌های مرطوب، عمق کاوش آن از چند سانتیمتر تجاوز نمی‌کند. در روش القای الکترومغناطیسی توسط پیچیده فرستنده، میدان مغناطیسی تابشی که به طور هارمونیک وابسته به زمان است تولید می‌شود. دستگاه GEM-5 ساخت شرکت Geophex که از دو پیچیده هم محور یکی به عنوان فرستنده و دیگری به عنوان گیرنده ساخته شده، میدانی با فرکانس چند هرتز تا ۲۰ کیلوهرتز تولید می‌کند [۶]. جسم در



شکل (۱): هندسه گیرنده و فرستنده

θ_r و θ_t به ترتیب زاویه بین دوقطبی‌های معادل پیچ‌های فرستنده و گیرنده با خط واصل مرکز کره به مرکز این پیچ‌هاست. θ_s نیز به ترتیب زاویه خط قائم با خطوط واصل مرکز پیچ‌های فرستنده و گیرنده با مرکز کره است. گشتاورهای دوقطبی فرستنده و گیرنده به ترتیب $M_T = N_T A_T I_T$ و $M_R = N_R A_R I_R$ می‌باشند. که در آن I_T و I_R به ترتیب جریان در پیچ‌های فرستنده و گیرنده و N_T, A_T, N_R و A_R به ترتیب مساحت و تعداد دورهای پیچ‌های فرستنده و گیرنده می‌باشند. میدان مغناطیسی تابشی توسط فرستنده، نسبت به زمان متغیر بوده و با تابع $H^i = H_0^i \exp(-i\omega t)$ تعریف می‌شود. این میدان مغناطیسی تابشی متغیر نسبت به زمان در سطح جسم رسانا جریانهای گردابی را به وجود می‌آورد. جریان‌های گردابی خود میدان مغناطیسی ثانویه‌ای ایجاد می‌کنند و این میدان ثانویه طبق قانون القای فارادی، در محل پیچ‌گیرنده پتانسیل الکتریکی تولید می‌کند که از رابطه زیر به دست می‌آید [۶]:

$$V_{EC}^{sph} = \frac{i\omega N_R N_T A_T A_R I_T \mu_s a_0^3}{2\pi d_t^3 d_r^3} \times \left[\cos\theta_T \cos\alpha_r^s \cos\theta_R + \frac{1}{2} \sin\theta_T \cos\alpha_\phi^s \cos\theta_R + \frac{1}{2} \cos\theta_T \sin\alpha_r^s \sin\theta_R + \frac{1}{4} \sin\theta_T \sin\alpha_\phi^s \sin\theta_R \right] \quad (1)$$

میدان الکتریکی تابشی توسط پیچ‌های فرستنده با نفوذ در داخل محیط با رسانندگی ضعیف، جریانی رسانشی را ایجاد می‌کند. الگوی این جریان در برخورد با سطح جسم رسانا واپاشیده شده و این امر باعث تولید پتانسیلی در محل پیچ‌گیرنده می‌شود که پتانسیل حاصل از جریان کانالی نامیده شده و از رابطه زیر به دست می‌آید [۶]:

$$V_{CC}^{sph} (r_s = d_r, \theta_r = \theta_R) = \frac{\omega^2 \mu_s^2 N_T A_T N_R I_T A_R \sigma_s a_0^3}{4\pi d_t^2 d_r^2} \sin\theta_T \sin\alpha_\phi^s \sin\theta_R \quad (2)$$

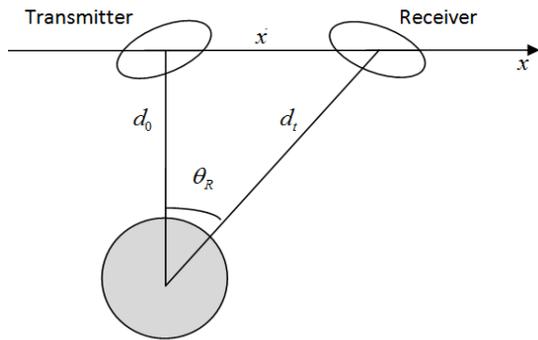
برابر ابعاد جسم بوده و محیط میزبان رسانندگی پایینی داشته باشد. علاوه بر این برای جسم رسانندگی بالایی در نظر گرفته می‌شود به همین دلیل جریانهای گردابی در سطح جسم محدود بوده و به داخل آن نفوذ نمی‌کنند [۳].

کره اغلب به عنوان یک مدل قابل قبول در مطالعات القای الکترومغناطیسی مورد توجه بوده است. با این مدل می‌توان طیف وسیعی از اجسام از جمله مین‌ها که دارای تقارن محوری هستند را مدل سازی نمود [۴]. پاسخ الکترومغناطیسی کره هم در حوزه زمان و هم در حوزه فرکانس با روش‌های متعددی به دست آمده است [۸-۱۵]. در سال ۲۰۰۵ پاسخ الکترومغناطیسی کره برای پیچ‌های فرستنده و گیرنده هم محور به صورت معادل سازی شده با پاسخ دوقطبی به دست آمد [۷]. محاسبات مربوط به پاسخ القای الکترومغناطیسی کره و کره‌وار رسانا برای پیچ‌های جدا از هم توسط بابایی و همکاران [۱۶] به دست آمد

در ژئوفیزیک اکتشافی پس از محاسبه پاسخ بی‌هنجاری لازم است تا پارامترهای هندسی نظیر عمق و ابعاد جسم و همچنین برای تعیین جنس جسم، پارامترهای فیزیکی مانند رسانندگی، ثابت دی‌الکتریک و ... به دست آیند. چنان که در بخش بعدی نشان خواهیم داد، پاسخ القای الکترومغناطیسی بی‌هنجاری به نحوه جهت‌گیری پیچ‌های فرستنده و گیرنده نسبت به یکدیگر بستگی دارد. در سال ۲۰۱۴، عمق کره با استفاده از تکنیک خطی سازی و به کمک داده‌های القای الکترومغناطیسی برای تنها یک حالت جهت‌گیری پیچ‌ها که در آن پیچ‌های فرستنده افقی و موازی سطح زمین و پیچ‌های گیرنده عمود بر سطح زمین است به دست آمد [۱۷]. در این مقاله با استفاده از داده‌های القای الکترومغناطیسی و محاسبه تابع هدف برای کره و به روش کمترین مربعات، برای دو حالت جهت‌گیری پیچ‌ها، عمق این بی‌هنجاری به دست می‌آید. به این منظور در ابتدا برای چهار حالت جهت‌گیری پیچ‌های گیرنده و فرستنده، پاسخ الکترومغناطیسی کره در دو مد گردابی و کانالی محاسبه می‌شود. سپس تابع هدف برای تعیین عمق بی‌هنجاری در دو حالت که در هر دو پیچ‌های فرستنده به موازات سطح زمین و در حالت اول پیچ‌های گیرنده نیز موازی و در حالت دوم عمود بر سطح زمین است به دست می‌آید. پس از آن با تولید داده‌های با و بدون نوفه، عمق بی‌هنجاری محاسبه و روش اعتبار سنجی می‌شود.

۲- پاسخ ناشی از جریان‌های گردابی و کانالی برای کره کاملاً رسانا در محیط با رسانندگی محدود

مطابق شکل (۱) کره کاملاً رسانا به شعاع a ، در محیطی با تراوایی مغناطیسی μ_s ، قابلیت گذردن الکتریکی ϵ_s و رسانندگی σ_s در نظر گرفته می‌شود. فاصله فرستنده و گیرنده از کره به ترتیب d_t و d_r فرض می‌شود.



شکل (۲): پیچه‌ها در امتداد محور x بر روی سطح افقی جابجا می‌شوند

۳- وارون‌سازی برای تعیین عمق بی‌هنجاری

برای حالت اول

دیدیم که در حالتی که پیچه‌های گیرنده و فرستنده موازی سطح زمین می‌باشند فقط پتانسیل حاصل از جریان گردابی در محل پیچه گیرنده دریافت شده و پتانسیل مربوط به جریان کانالی صفر است. بنابراین پتانسیل کل دریافتی از رابطه (۴) به دست می‌آید. در این قسمت به محاسبه عمق کره رسانا می‌پردازیم.

پتانسیل حاصل از جریان گردابی در حالتی که گیرنده در مبداء محور x قرار دارد از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$V_{EC}^{(1)} \Big|_{x=0} = -\frac{k}{z^6} \quad (10)$$

بنابراین می‌توان نوشت:

$$F(x_i, z) = \frac{V_{EC}^{(1)}(x)}{V_{EC}^{(1)}(0)} = -\frac{1}{2} \frac{x^2 z^3 - 2z^5}{(x^2 + z^2)^{5/2}} \quad (11)$$

عمق مجهول کره را می‌توان با کمینه‌سازی معادله زیر، که به آن تابع هدف نیز می‌گوییم، به دست آورد:

$$\psi(z) = \sum_i^N [L(x_i) - F(x_i, z)]^2 \quad (12)$$

که در آن، $L(x_i)$ پاسخ نسبی دریافتی در نقطه x_i می‌باشد. کمینه‌سازی $\psi(z)$ با روش کمترین مربعات به این معنی است که باید داشته باشیم:

$$f(z) = (d/dz)\psi(z) = \sum_i^N [L(x_i) - F(x_i, z)] F^*(x_i, z) = 0 \quad (13)$$

که در آن، $F^*(x_i, z) = \frac{dF(x_i, z)}{dz}$ بنابراین خواهیم داشت:

ولتاژ کل القا شده در پیچه گیرنده برابر مجموع ولتاژهای حاصل از جریان‌های گردابی و کانالی خواهد بود [۷]:

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

حال مطابق شکل (۲) فرض می‌شود که پیچه فرستنده در مبداء محور x و کره در عمق d_0 زیر آن قرار گرفته دارد و پیچه گیرنده در امتداد محور x جابه‌جا شود. با استفاده از روابط (۱) و (۲) برای جهت‌گیری‌های مختلف این پیچه‌ها، می‌توان پتانسیل‌های حاصل از جریان‌های گردابی و کانالی را محاسبه نمود.

حالت اول: هر دو پیچه به موازات سطح افق قرار دارند:

$$V_{EC}^{(1)} = \frac{ik}{2} \left(\frac{a_0}{d_0} \right)^3 \left(\frac{x^2 - 2d_0^2}{(x^2 + d_0^2)^{5/2}} \right) \quad (4)$$

حالت دوم: پیچه فرستنده موازی با و پیچه گیرنده عمود بر سطح زمین قرار دارند [۱۶]:

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

حالت سوم: پیچه فرستنده به طور عمود بر و پیچه گیرنده به موازات سطح زمین قرار دارند.

$$V_{EC}^{(3)} = \frac{3}{4} ik \left(\frac{a_0}{d_0} \right)^3 \left(\frac{xd_0}{(x^2 + d_0^2)^{5/2}} \right) \quad (6)$$

حالت چهارم: هر دو پیچه فرستنده و گیرنده به طور عمود سطح زمین قرار دارند:

$$V_{EC}^{(4)} = \frac{1}{4} ik \left(\frac{a_0}{d_0} \right)^3 \left(\frac{2x^2 + d_0^2}{(x^2 + z^2)^{5/2}} \right) \quad (7)$$

همچنین پاسخ جریان کانالی در دو جهت‌گیری افقی فرستنده برابر صفر، و برای دو حالتی که فرستنده به طور قائم قرار گرفته است با هم برابرند.

$$V_{CC}^{(1)} = V_{CC}^{(2)} = 0 \quad (8)$$

$$V_{CC}^{(3)} = V_{CC}^{(4)} = \frac{1}{2} g \left(\frac{a_0}{d_0} \right)^3 \left(\frac{xd_0}{(x^2 + d_0^2)^{3/2}} \right) \quad (9)$$

که در روابط اخیر، $k = \frac{\omega N_R N_T A_T A_R I_T \mu_s}{2\pi}$ و $g = \frac{\sigma_0 \omega^2 N_R N_T A_T A_R I_T \mu_s^2}{2\pi}$ فرض می‌شوند.

جدول (۱): نتایج حاصل از تخمین عمق کره در طول پروفیلی که درست از بالای کره می‌گذرد. فاصله نقاط برداشت ۱ واحد انتخاب شده است. (حالت (۱))

عمق کره (m)	عمق محاسبه شده (m)				
	بدون نوفه	با نوفه ۲٪	درصد خطا در تخمین عمق	با نوفه ۵٪	درصد خطا در تخمین عمق
۲	۲	۲,۰۲	۱	۲,۰۶	۳
۳	۳	۳,۰۸	۲,۶	۳,۱۴	۴,۷
۵	۵	۴,۸۶	-۲,۸	۵,۲۶	۵,۲
۱۰	۱۰	۱۰,۴	۴	۱۰,۶۱	۶,۱

جدول (۲): نتایج حاصل از تخمین عمق کره در طول پروفیلی که درست از بالای کره می‌گذرد. فاصله نقاط برداشت ۱ واحد انتخاب شده است. (حالت (۲))

عمق کره (m)	عمق محاسبه شده (m)				
	بدون نوفه	با نوفه ۲٪	درصد خطا	با نوفه ۵٪	درصد خطا
۲	۲	۲,۰۱	۰,۵	۲,۰۶	۳
۳	۳	۳,۰۸	۲,۶۷	۳,۱۲	۴
۵	۵	۵,۲۳	۴,۶	۵,۲۴	۴,۸
۱۰	۱۰	۱۰,۳۸	۳,۸	۱۰,۵۲	۵,۲

مقادیر به‌دست‌آمده برای عمق کره نشان می‌دهد که این روش می‌تواند روشی موثر برای تخمین عمق باشد. درصد خطا در تعیین عمق در همه موارد کمتر از ۶ درصد است. البته برای مقادیر بدون نوفه، عمق به سرعت و با دقت به‌دست می‌آید و وقتی به داده‌ها نوفه اضافه می‌شود عمق بی‌هنجاری با خطای قابل قبولی محاسبه می‌شود؛ با این حال نتیجه به‌دست‌آمده به نوفه حساس بوده و در صورت اجرای مکرر برنامه مقادیر متفاوتی برای آن به‌دست می‌آید که دارای محدوده تغییرات ناچیز بوده و می‌توان گفت حل مساله از پایداری قابل قبولی برخوردار است.

۴- نتیجه‌گیری

در محاسبه عمق یک کره رسانای واقع در یک عمق معین در محیط میزبان نارسانا، از داده‌های حاصل از القای الکترومغناطیسی استفاده شده است. مساله تعیین عمق این بی‌هنجاری بر اساس تکنیک کمترین مربعات، منجر به یک معادله غیرخطی شده که در این مقاله از روش نیوتن برای حل آن استفاده شده است. با این روش درحالی که داده‌ها فاقد نوفه می‌باشند عمق بی‌هنجاری

$$f(z) = \sum_i^N \left\{ \left[L(x_i) - \frac{2z^5 - x^2 z^3}{2(x^2 + z^2)^{5/2}} \right] \times \left[\frac{12x^2 z^4 - 3x^4 z^2}{2(x^2 + z^2)^{7/2}} \right] \right\} = 0 \quad (14)$$

برای حالت دوم نیز ولتاژ کل، $V_i^{(2)}(x_i, z)$ ، در نقاط $x = \pm z / 2$ بیشینه می‌شود مقدار این ماکزیمم برابر است با:

$$V_i^{(2)} \Big|_{\max} = -\frac{1}{2} ika_0^3 \left(\frac{0.2862}{z^6} \right) \quad (15)$$

با استفاده از معادله (۲)، معادله (۱) را می‌توان به شکل به‌هنجار شده زیر نوشت:

$$F(x_i, z) = \frac{V_{ec}^{(2)}(x_i, z)}{V_{ec}^{(2)}(\max)} = 3.4939 \frac{xz^4}{(x^2 + z^2)^{5/2}} \quad (16)$$

حال با اعمال مشابه معادله (۱۵) با روش کمترین مربعات، می‌توان عمق بی‌هنجاری را از حل معادله زیر به‌دست آورد:

$$f(z) = \sum_i^N \left\{ \left[L(x_i) - 3.4939 \frac{xz^4}{(x^2 + z^2)^{5/2}} \right] \times \left[3.4939 \frac{4x^3 z^3 - xz^5}{(x^2 + z^2)^{7/2}} \right] \right\} = 0 \quad (17)$$

حال می‌توان معادلات (۱۴) و (۱۷) را به منظور یافتن z با روش‌های استاندارد برای حل معادلات غیرخطی نظیر روش نیوتن، تندترین شیب نزولی، روش تکراری ساده و روش تکراری مولر حل نمود. در اینجا با استفاده از روش نیوتن معادلات حل شده‌اند و نتایج در جداول (۱) و (۲) آورده شده‌اند. در ابتدا یک پروفیل که درست از بالای کره می‌گذرد در نظر گرفته می‌شود. برای کره عمق‌های ۲، ۳، ۵ و ۱۰ متر در نظر گرفته شد و داده‌های مصنوعی مربوط به کره واقع در عمق معین تولید گردید. سپس در دو مرحله، ابتدا با داده‌های فاقد نوفه و در مرحله بعد با استفاده از داده‌هایی که به آنها نوفه اضافه شده عمق کره محاسبه و در هر مورد خطای تخمین عمق محاسبه شد. در حالتی که داده‌ها فاقد نوفه هستند، چنان که در ستون دوم جداول (۱) و (۲) نشان داده شده، برای همه عمق‌های در نظر گرفته شده، عمق کره بدون خطا به‌دست می‌آید. با اضافه کردن ۲ و ۵ درصد نوفه به داده‌ها، عمق کره با خطای قابل قبولی به‌دست می‌آید. ملاحظه می‌شود با افزایش عمق بی‌هنجاری، میزان خطا در تخمین عمق نیز زیاد می‌شود که این امر به دلیل کاهش نسبت سیگنال (پاسخ کره) به نوفه است.

- [7] S. J. Norton, W. A. SanFilipo, and I. J. Won, "Eddy- current and current-channeling response to spheroidal anomalies," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* vol. 43, pp. 2200-2209, 2005.
- [8] J. R. Wait, "A conducting sphere in a time-varying magnetic field," *Geophysics*, vol. 16, pp. 666-672, 1952.
- [9] J. R. Wait, "A conducting permeable sphere in the presence of a coil carrying an oscillating current," *Can. J. Phys.*, vol. 31, pp. 670-678, 1953.
- [10] J. R. Wait and K. P. Spies, "Quasi-static transient response of a conducting permeable sphere," *Geophysics*, vol. 34, pp. 789-792, 1969.
- [11] M. N. Nabighian, "Electromagnetic Methods in Applied Geophysics," Tulsa, OK: Soc. Explor. Geophys., 1987, vol. 1, 1963.
- [12] D. Yogadhis, E. M. John, and H. C. Robert, "Time Domain Response of a Sphere in the Field of a Coil," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 22, pp. 360-367, 1984.
- [13] M. N. Nabighian, "Electromagnetic Methods in Applied Geophysics," Tulsa, OK: Soc. Explor. Geophys., vol. 1, 1987.
- [14] J. T. Weaver, "Mathematical Methods for Geo-electromagnetic Induction," John Wiley and Sons, Inc, 1994.
- [15] L. R. Pasion, "Detecting Unexploded Ordnance with time domain electromagnetic induction," Master thesis, University of British Colombia, 1999.
- [16] M. Babaei, M. Meshinch-Asl, and H. Zomorrodian, "Computing Eddy-Current Response and Current Channeling Response of the Spheroidal Conductor for the Separated Receiver and Transmitter Systems," *Arab J. Geosci.*, vol. 6, no. 6, pp. 1913-1934, 2013.
- [17] M. Babaei, M. Meshinch-Asl, and H. Zomorrodian, "Estimation of depth of buried conductive sphere from electromagnetic induction anomaly data using linearization process," *Arab J. Geosci.*, vol. 7, pp. 2363-2366, 2014.

بدون خطا به دست آمد. با اضافه کردن نوفه تا حدود ۲ و ۵ درصد، عمق کره با دقت قابل قبولی محاسبه شده و مقدار خطا در همه موارد کمتر از ۶ درصد است. با اضافه کردن نوفه بیشتر به داده‌ها و افزایش عمق بی‌هنجاری، دقت در تخمین عمق کره کاهش می‌یابد ولی از منظر برداشت‌های صحرایی ژئوفیزیکی خطا در محدوده قابل قبولی قرار دارد.

۵- مراجع

- [1] Y. Das, J. E. McFee, J. Toews, and G. C. Stuart, "Analysis of an electromagnetic induction detector for real-time location of buried objects," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 28, no. 3, pp. 278-288, May 1990.
- [2] I. J. Won, S. Norton, B. SanFilipo, and F. Funak, "Active broadband electromagnetic detection and classification of buried naval mines," *MTS/IEEE Oceans'02*, vol. 2, pp. 966-973, Oct. 2002.
- [3] R. Wu, J. Liu, T. Li, Q. Gao, H. Li, and B. Zhang, "Progress in the research of ground bounce removal for landmine detection with ground penetrating radar," *PIERS Online*, vol. 1, no. 3, pp. 336-340, 2005.
- [4] J. P. Fernandez, K. Sun, B. Barrowes, K. O'Neill, Shamatava I., F. Shubitidze, and K. Pauksen, "Inferring the location of buried UXO using a support vector machine," *Proc. SPIE*. 6553, 2007.
- [5] M. Sato, Y. Hamada, X. Feng, F. Kong, Z. Zeng, and G. Fang, "GPR using an array antenna for landmine detection," *Near Surface Geophysics*, pp. 3-9, 2004.
- [6] M. Mahmoodi and S. Y. Tan, "Depth detection of conducting of marine mines via eddy-current and current -channeling response" *Progress In Electromagnetic Research*, vol. 90, pp. 287-307, 2009.

Depth Estimation of a Buried Conductive Sphere as a Model of Unexploded Ordnance Using Electromagnetic Induction Data

M. Babaei*

Department of Physics, Tuyserkhan Branch, Islamic Azad University, Tuyserkhan, Iran

(Received: 03/04/2016, Accepted: 22/11/2016)

Abstract

In this paper, a novel scheme for depth estimation of a buried conductive sphere as a metallic mine using electromagnetic induction (EMI) data is presented. In electromagnetic induction method, the transmitter coil produces the incident magnetic and electric fields that obey the Maxwell's equations. In the receiver coil, the received response is created in two modes. Eddy-current mode (V_{ec}) is derived from the perfect conductor placed in the shallow depth and another mode called current-channeling response (V_{cc}) which depends on the conductivity of the medium. As expected, these responses differ depending on the direction of the incident field related to the receiver coil's axis. There is a case that the transmitter coil's axis is parallel to the ground surface and only the eddy current response is measured in the receiver coil. By defining the maximum value of V_{ec} , the problem with depth determination transformed into the problem with finding a solution for a nonlinear equation of the form $f(z)=0$. The method is applied to synthetic data with and without random errors. In all of the cases examined, the maximum error in depth is less than 6%.

Keywords: Electromagnetic Induction, Eddy Current, Unexploded Ordnance, Depth Estimation

* Corresponding author E-mail: m_babaei@iauh.ac.ir