

## تحلیل پاسخ القای الکترومغناطیس کره‌وار به عنوان مدلی از مهمات منفجر نشده

مجتبی بابایی<sup>۱\*</sup>

<sup>۱</sup> استادیار، گروه ژئوفیزیک، واحد همدان، دانشگاه آزاد اسلامی، همدان، ایران

(دریافت: ۱۴۰۲/۰۵/۰۲، پذیرش: ۱۴۰۲/۰۹/۰۷)

### چکیده

شناسایی، آشکارسازی، طبقه‌بندی و جداسازی مهمات منفجر نشده یکی از نیازهای ضروری کشورها و جوامعی است که درگیر جنگ بوده‌اند. روش‌های غیرتخریبی اکتشاف این‌گونه مواد که بیشتر مبتنی بر روش‌های ژئوفیزیکی است، به لحاظ اقتصادی و ایمنی از اهمیت خاصی برخوردارند. روش القای الکترومغناطیسی روش ژئوفیزیکی کارآمدی است که در شناسایی مین‌های زمینی و دریایی کاربرد دارد. به‌طور کلی در فرایند پردازش داده‌های حاصل از برداشت‌های ژئوفیزیکی و به‌ویژه در روش القای الکترومغناطیسی، این بی‌هنجاری‌ها با اجسام ساده هندسی نظیر کره یا کره‌وار مدل‌سازی می‌شوند. در گام اول تفسیر داده‌ها و برای تعیین ابعاد مدل که نشان‌دهنده نوع مین یا بمب است و همچنین برای تعیین محل آن، لازم است مفسر دید روشنی از نحوه وابستگی پاسخ القای الکترومغناطیسی به پارامترهای هندسی و فیزیکی این‌گونه مواد داشته باشد. برای این منظور، در این مقاله چگونگی تغییرات و رفتار پاسخ القای الکترومغناطیسی دریافتی در پیچه گیرنده برحسب عمق، ابعاد و جهت‌گیری بی‌هنجاری بررسی می‌شود و نمودارهای به‌دست‌آمده برحسب متغیرهای مذکور تحلیل می‌شوند. نتایج این تحلیل‌ها ضمن اینکه خود تا حدود زیادی وضعیت و موقعیت بی‌هنجاری را به‌صورت کیفی معلوم می‌کند، می‌تواند در روش‌های عددی محاسبه کمیت‌های هندسی و فیزیکی بی‌هنجاری نیز مفید واقع شود.

**کلمه‌های کلیدی:** روش القای الکترومغناطیسی، مهمات منفجر نشده، کره‌وار، تحلیل پاسخ‌ها

## ۱ مقدمه

مهمات منفجر نشده (Unexploded Ordnance, UXO) بیشتر به بمب‌ها و مین‌های به‌جامانده از میدان مین اشاره دارد. بر اساس گزارش پویش بین‌المللی برای ممنوعیت مین‌های زمینی (ICBL)، بیش از ۸۰ کشور و منطقه در جهان تحت تأثیر مین‌های زمینی قرار گرفته‌اند. این موضوع که یک نگرانی جهانی است، سلامت انسان‌ها را تهدید می‌کند و مانع ساخت‌وساز اقتصادی و استفاده مجدد از زمین‌هایی می‌شود که زمانی درگیر جنگ بوده‌اند (فروست و همکاران، ۲۰۱۷). ترکش‌ها و زباله‌های فلزی معمولاً در اطراف مهمات منفجر نشده پراکنده می‌شوند و تشخیص و شناسایی مهمات را دشوار و پرهزینه می‌کنند (بران و همکاران، ۲۰۱۳)؛ بنابراین شناسایی و جداسازی سریع و دقیق این مهمات با روش‌های غیرتخریبی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

در دهه‌های اخیر، انواع روش‌های آشکارسازی و شناسایی مانند روش مغناطیسی (باتلر، ۲۰۰۱؛ بیلینگز و همکاران، ۲۰۱۰؛ شاییتیز و همکاران، ۲۰۱۱ و نانز-نیوتو، ۲۰۱۴)، رادار نفوذی زمین (GPR) (هینزل و همکاران، ۲۰۱۹ و نانز-نیوتو، ۲۰۱۴) و القای الکترومغناطیسی (EMI) (چن و همکاران، ۲۰۲۰ و بیلینگز و همکاران، ۲۰۱۷) توسعه یافته‌اند. آشکارسازی مغناطیسی روش تشخیص غیرفعال مبتنی بر تشخیص غیرعادی اهداف در میدان ژئومغناطیسی است که روشی سریع، راحت و کارآمد است. برای تشخیص هدف در روش رادار نفوذی، امواج الکترومغناطیسی با بسامد زیاد ارسال و تصویربرداری از هدف انجام می‌شود. روش EMI شامل حوزه بسامد (هوانگ و وون، ۲۰۰۳؛ محمودی و تان، ۲۰۰۹ و بابایی و همکاران، ۲۰۱۳، ۲۰۱۴) و حوزه زمان (پاشن و اولدنبرگ؛ پاشن، ۲۰۰۷، ۲۰۱۱ و آمبروس و همکاران، ۲۰۱۶) است که یک روش تشخیص فعال است و بسامد به‌کاررفته در این روش از ده‌ها هرتز تا چند ده کیلوهرتز متغیر است. از

روش EMI حوزه زمان یا روش الکترومغناطیسی گذرا (TEM) به‌طور مؤثری برای تشخیص هدف زیرزمینی استفاده شده است.

القای الکترومغناطیسی در حوزه بسامد به‌طور معمول روشی غیرمخرب برای آشکارسازی و تعیین ویژگی‌های فیزیکی و هندسی اجسام است (گاریسیا-مارتین و همکاران، ۲۰۱۱ و چن و همکاران، ۲۰۲۰). در این روش اسکنی از جسم بدون تماس و آسیب رساندن به نمونه آزمایش‌شونده تهیه می‌شود. در روش القای الکترومغناطیسی حوزه بسامد، پیچه فرستنده میدان مغناطیسی تابشی‌ای را تولید می‌کند که به‌طور هماهنگ وابسته به زمان است و جسم در اثر این 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. از این مد برای آشکارسازی بی‌هنگاری‌ها در عمق کم و همچنین تشخیص ترک در لوله‌ها استفاده شده است (عبدالله و همکاران، ۲۰۱۹). میدان الکتریکی تابشی در محیط رسانا جریانی تولید می‌کند که الگوی این جریان در برخورد با بی‌هنگاری واپاشیده می‌شود. این آشفتگی سبب ایجاد مد دیگری از پاسخ در پیچه می‌شود که مد جریان کانالی (current channeling) نام دارد. این مد نقش مهمی در اکتشاف مین‌ها در محیط دریا دارد (نورتون و همکاران، ۲۰۰۵). در محل پیچه گیرنده، میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی تابشی در محدوده‌ای که جسم قرار دارد یکنواخت فرض می‌شوند. جریان‌های گردابی در سطح جسمی با رسانندگی زیاد محدود هستند و به داخل آن نفوذ نمی‌کنند (وو و همکاران، ۲۰۰۵).

کره‌وار شکل هندسی مناسبی برای مدل‌سازی طیف وسیعی از اجسامی است که تقارن محوری دارند (مانند مین‌ها). نورتون و همکاران (۲۰۰۵) با استفاده از پیچه‌های فرستنده و گیرنده هم‌محور و داده‌های القای الکترومغناطیسی، پاسخ جریان‌های گردابی و کانالی را برای

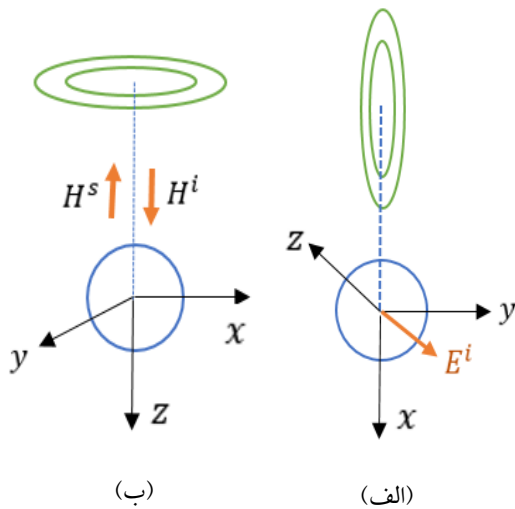
گام اول در همه روش‌های وارون‌سازی جهت تعیین پارامترهای مجهول هندسی و فیزیکی بی‌هنجاری مدفون، داشتن اطلاعات اولیه کافی و بینش مناسب درباره رفتار پاسخ‌های دریافتی است. بررسی این رفتارها و نحوه تغییرات آنها نسبت به متغیرهای وابسته، به کاربر در تحلیل داده‌های اندازه‌گیری‌شده و اجرای موفق‌تر روش وارون‌سازی برای تعیین شکل و عمق کره‌وار کمک می‌کند. تعیین عددی این پارامترها موضوع تحقیق دیگری است. در این مقاله، نمودار پاسخ القای الکترومغناطیسی کره‌وار در دو حالت کاملاً رسانا و نارسانا برحسب نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک کره‌وار که نشان‌دهنده شکل کره‌وار است و همچنین برحسب جهت‌گیری کره‌وار نسبت به پیچه‌ها برای عمق‌های مختلف کره‌وار رسم می‌شود و نتایج بررسی و تحلیل می‌شوند.

در کره‌های رسانا و نارسانا، بررسی پیچه‌های فرستنده و گیرنده هم‌محور با فرض یکنواخت بودن میدان‌های تابشی در محدوده مکانی بی‌هنجاری انجام شده است. نورتون و همکاران (۲۰۰۵) پاسخ کره‌وار را برحسب پاسخ کره به‌دست‌آورده‌اند؛ بنابراین در ابتدا، پاسخ القای الکترومغناطیسی کره مرور می‌شود و پس از آن پاسخ کره‌وار از حاصل ضرب ضریب قطبش و پاسخ کره به‌دست‌می‌آید.

در شکل ۱ کره کاملاً رسانا با تراوایی مغناطیسی  $\mu_0$  و قابلیت‌گذردهی الکتریکی  $\epsilon_0$  در محیطی با رسانندگی یکنواخت  $\sigma_s$  در نظر گرفته شده است (شکل ۱). ویژگی‌های مغناطیس شبه‌ایستا یا الکترومغناطیس القایی عبارت‌اند از: جریان جابه‌جایی  $d\mathbf{D}/dt$  ناچیز است؛ در سراسر باند EMI در هوا و خاک پدیده پخش غالب است؛ از رفتار موجی می‌توان چشم‌پوشی کرد؛ با میدان H غیر چرخشی مواجه هستیم که بر پتانسیل وابسته به آن معادله لاپلاس حاکم است؛ طول موج از چند کیلومتر در بالای باند تا شاید ده‌هزار کیلومتر نزدیک به پایین باند متغیر است

کره‌وار رسانا و نارسانای مدفون در محیطی با رسانندگی محدود به‌دست‌آوردند. محمودی و تان (۲۰۰۹) این پاسخ‌ها را برای کره رسانای مدفون در محیطی با رسانندگی محدود با استفاده از پیچه‌های جدا از هم و برای کره‌وار رسانا با استفاده از پیچه‌های هم‌محور با جهت‌گیری دلخواه محاسبه کردند. بابایی و همکاران (۲۰۱۱) پاسخ القای الکترومغناطیسی کره‌وار را برای حالت جدا از هم بودن پیچه‌های فرستنده و گیرنده به‌دست‌آوردند. پاسخ القای الکترومغناطیسی حاصل از بی‌هنجاری در محل‌گیرنده به پارامترهای هندسی، عمق، جهت‌گیری پیچه‌ها نسبت به بی‌هنجاری و جنس محیط میزبان بستگی دارد و پارامترهای مذکور را با استفاده از این پاسخ‌ها می‌توان به‌دست‌آورد. در مطالعه بابایی و همکاران (۲۰۱۴) برای تخمین عمق کره رسانا در حالتی که پیچه فرستنده افقی و موازی سطح زمین و پیچه گیرنده عمود بر سطح زمین است، از روش خطی‌سازی استفاده شده است. بابایی (۱۳۹۴) با روش کمینه مربعات برای دو وضعیت قرارگیری پیچه‌ها که در حالت اول، پیچه‌های فرستنده و گیرنده افقی و موازی سطح زمین و در حالت دوم، پیچه فرستنده افقی و موازی سطح زمین و پیچه گیرنده عمود بر سطح زمین است، عمق کره را به دست آورد. بابایی و مسیبیان (۱۴۰۱) از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات جهت تخمین عمق و شعاع کره برای چهار حالت جهت‌گیری پیچه‌های فرستنده و گیرنده استفاده کردند. در این چهار حالت، پیچه‌ها هر دو موازی سطح زمین یا هر دو عمود بر سطح زمین بودند یا یکی موازی سطح زمین و دیگری عمود بر سطح زمین بود. برای درک نحوه تغییرات پاسخ القای الکترومغناطیسی کره‌وار، لازم است رفتار این پاسخ برحسب پارامترهای هندسی (نسبت قطر کوچک به قطر بزرگ کره‌وار) و همچنین زاویه بین راستای نیم‌خط عمود بر سطوح پیچه‌ها و محور کره‌وار بررسی و تحلیل شود.

محیط، جسم کاملاً عایق فرض می‌شود و ولتاژ القا شده در محل گیرنده ناشی از آشفتگی جریان موجود در محیط رسانا در برخورد با جسم است. چنان که در شکل‌های ۱-الف و ۱-ب نشان داده شده است، در حالت اول صفحه پیچه‌ها موازی و در حالت دوم عمود بر سطح افقی است. پاسخ‌های القای الکترومغناطیسی به ترتیب زیر به دست می‌آیند.



شکل ۱. هندسه پیچه‌ها. در حالت (الف) تنها پاسخ جریان گردابی و در حالت (ب) تنها پاسخ جریان کانالی دریافت می‌شود.

چگالی جریان در فرستنده (J)، میدان‌های الکتریکی E و مغناطیسی H را تولید می‌کند. پاسخ جریان گردابی (شکل ۱-الف) و پاسخ جریان کانالی (شکل ۱-ب) دریافتی در پیچه گیرنده ناشی از کره کاملاً رسانا با شعاع  $a_0$  واقع در فاصله  $d_0$  از گیرنده به ترتیب با روابط (۱) و (۲) داده می‌شود (نورتون و همکاران، ۲۰۰۵):

$$V_{cc}^{(sph)} = -\frac{\sigma_s \omega^2 \mu_0^2 a_0^3}{4\pi I d_0^4} M_T M_R \quad (1)$$

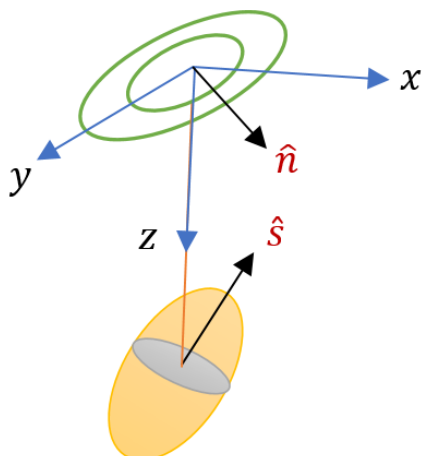
$$V_{ec}^{(sph)} = \frac{i\omega \mu_0 a_0^3}{2\pi I d_0^6} M_T M_R$$

و در نتیجه، در مقیاس مشاهده ما تغییر فاز مشخصی بین یک نقطه و نقطه دیگر وجود ندارد؛ در محدوده EMI پدیده‌هایی نظیر بازتاب، پراش، تشدید و غیره از نوع مورد انتظار موج روی نمی‌دهد؛ سیگنال‌ها پس از انتشار در هوا و زمین، به اهداف فلزی می‌رسند و در بیشتر باندهای EMI در فلز نفوذ می‌کنند که این موضوع در جداسازی اهداف ناشناخته، حائز اهمیت است؛  $\sigma$  محیط انتشار کوچک است و عمق پوسته بسیار بیشتر از مقیاس مشاهده است پس خاک نسبت به سیگنال‌های باندهای EMI شفاف است. به‌طور کلی در EMI برای تمام اهداف مورد نظر، میدان ارسالی به جسم مدفون فلزی می‌رسد و تحت تأثیر زمین قرار نمی‌گیرد. با ناچیز بودن جریان‌های القایی خاک و جریان‌های جابه‌جایی که به مراتب کوچک‌تر هم هستند، میدان H غیر چرخشی است و معادله پتانسیل لاپلاس نرده‌ای حاکم است.

در ادامه، برای ساده‌سازی، پیچه‌های گیرنده و فرستنده به صورت دوقطبی‌هایی به ترتیب با گشتاور دوقطبی  $M_R$  و  $M_T$  در نظر گرفته شده‌اند. گشتاورهای دوقطبی فرستنده و گیرنده به ترتیب  $M_R = N_R A_R I_R$  و  $M_T = N_T A_T I_T$  هستند که در آن  $I_R$  و  $I_T$  به ترتیب جریان در پیچه‌های فرستنده و گیرنده و  $N_R$  و  $N_T$  به ترتیب مساحت و تعداد دور پیچه‌های فرستنده و گیرنده است. پاسخ‌های القای الکترومغناطیسی مربوط به جریان‌های گردابی و کانالی ناشی از کره کاملاً رسانای مدفون در محیطی با رسانندگی محدود به ترتیب با  $V_{ec}^{(sph)}$  و  $V_{cc}^{(sph)}$  پاسخ حاصل از جریان کانالی جسم کره‌ای رسانا با  $V_{cc}^{(void)}$  نشان داده شده است.

هنگام محاسبه پاسخ جریان گردابی فرض می‌شود جسم کاملاً رساناست و از جریان‌های موجود در محیط صرف نظر می‌شود. با فرض رسانندگی زیاد جسم، در عمق پوسته برای جسم بسیار ناچیز است و جریان القایی تنها در سطح جسم وجود دارد و به درون بی‌هنجاری نفوذ نمی‌کند. همچنین در محاسبه پاسخ حاصل از رسانندگی

بی‌نهایت از توابع لژاندر و توابع موج کره‌وار خواهد بود. در تقریب اول، با یک دوقطبی که شدت و جهت آن متناسب با پارامترهای کره‌وار (نظیر حجم، شکل و جهت‌گیری) است، می‌توان پاسخ القای الکترومغناطیس را برای کره‌وار جایگزین کرد.



شکل ۲. جهت‌گیری عمومی پیچ‌های هم‌مرکز نسبت به کره‌وار.

حل پاسخ کره‌وار برحسب پاسخ کره‌ای با شعاع  $a$  ارائه می‌شود. این کره مرجع در شکل ۳ با خط‌چین نشان داده شده است. پاسخ کره‌وار می‌تواند از حاصل ضرب ضریب قطبش‌پذیری مغناطیسی ( $\alpha$ ) و پاسخ کره به‌دست آید. این ضریب به ویژگی‌های کره‌وار وابسته است. کره‌وار در دو وضعیت کشیده (prolate spheroid) (شکل ۳-الف) و پخت (oblate spheroid) (شکل ۳-ب) در نظر گرفته می‌شود. برای کره‌وار کاملاً رسانی در محیطی با رسانندگی ضعیف، در حالتی که پیچ‌ها موازی سطح زمین هستند و محور بزرگ کره‌وار عمود بر سطح زمین است (کره‌وار کشیده)، پاسخ‌های جریان گردابی و کانالی محوری به‌ترتیب  $V_{ec}^{(A)}$  و  $V_{cc}^{(A)}$  و در حالتی که محور بزرگ کره‌وار افقی است، پاسخ‌های جریان گردابی و کانالی عرضی  $V_{ec}^{(T)}$  و  $V_{cc}^{(T)}$  هستند. از کره‌وار نارسانا تنها پاسخ جریان کانالی دریافت می‌شود. پاسخ محوری و عرضی جریان کانالی کره‌وار کشیده نارسانا به‌ترتیب  $V_{cc}^{(A, void)}$

در هریک از این حالت‌ها پاسخ دریافت‌شده بیشینه است و مقدار پاسخ مد دیگر برابر صفر است. پاسخ جریان کانالی کره کاملاً نارسانا در یک محیط یکنواخت با رسانایی ضعیف  $\sigma_s$  برابر است با:

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

در این حالت پاسخ جریان گردابی صفر است. در محیطی مانند دریا که رسانندگی محدود است، این مد در آشکارسازی مین‌های نارسانا اهمیت دارد.

در کره‌وار رسانی با توجه به جهت‌گیری پیچ‌ها و کره‌وار می‌توان پاسخ جریان گردابی، پاسخ جریان کانالی یا هر دو پاسخ را دریافت کرد. در حالت کلی مطابق شکل ۲، در وضعیت جهت‌گیری دلخواه پیچ‌ها و کره‌وار، پاسخ دریافتی برابر خواهد بود با (نورتون و همکاران، ۲۰۰۵):

$$V = V^{(A)}(\hat{n} \cdot \hat{s})^2 + V^{(T)}[1 - (\hat{n} \cdot \hat{s})^2] \quad (3)$$

که جهت میدان تابشی با بردار یکه  $\hat{n}$  و جهت محور کره‌وار با  $\hat{s}$  تعریف می‌شود. این رابطه هم برای پاسخ جریان گردابی و هم برای پاسخ جریان کانالی برقرار است. پاسخ‌های محوری  $V_{ec}^{(A)}$  و عرضی  $V_{ec}^{(T)}$  مربوط به جریان گردابی، پاسخ‌های محوری  $V_{cc}^{(A)}$  و عرضی  $V_{cc}^{(T)}$  مربوط به جریان کانالی برای کره‌وار کاملاً رسانی و همچنین پاسخ‌های محوری  $V_{cc}^{(A, void)}$  و عرضی  $V_{cc}^{(T, void)}$  مربوط به جریان کانالی برای کره‌وار نارسانا را می‌توان محاسبه کرد. در حالتی که میدان‌های تابشی در راستای محور بزرگ کره‌وار باشند، پاسخ محوری  $V^{(A)}$  و در حالتی که میدان‌ها در راستای عمود بر این محور جهت‌گیری کرده باشند، پاسخ عرضی  $V^{(T)}$  در پیچ‌گیرنده دریافت می‌شود.

تجزیه و تحلیل مسئله کره‌وار برای یک جسم با رسانندگی دلخواه پیچیده است و حل آن شامل مجموع

$$\alpha_{ec}^{(A)} = \frac{2}{3} \left[ \frac{e^3}{\frac{e}{1-e^2} - \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+e}{1-e} \right)} \right]$$

$$\alpha_{cc}^{(T)} = \frac{2}{3} \left[ \frac{e^3}{\frac{e}{1-e^2} - \frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+e}{1-e} \right)} \right]$$

$$\alpha_{cc}^{(A)} = \frac{1}{3} \left[ \frac{e^3}{\frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+e}{1-e} \right) - e} \right]$$

$$\alpha_{cc}^{(T\_void)} = -\frac{1}{2} \alpha_{ec}^{(T)}$$

$$\alpha_{cc}^{(A\_void)} = -\frac{1}{2} \alpha_{ec}^{(A)}$$

برای کره‌وار رسانا با محور موازی سطح زمین (کره‌وار پخت) و کره‌وار نارسانا با محور قائم بر سطح زمین قطبش پذیری برابر است با:

$$\alpha_{ec}^{(T)} = \frac{4}{3} \left[ \frac{e^3}{e + \frac{e^3}{1+e^2} - \tan^{-1} e} \right]$$

$$\alpha_{ec}^{(A)} = \frac{2}{3} \left[ \frac{e^3}{\tan^{-1} e - \frac{e}{1+e^2}} \right]$$

$$\alpha_{cc}^{(T)} = \frac{2}{3} \left[ \frac{e^3}{\tan^{-1} e - \frac{e}{1+e^2}} \right]$$

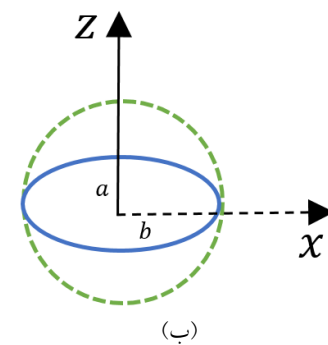
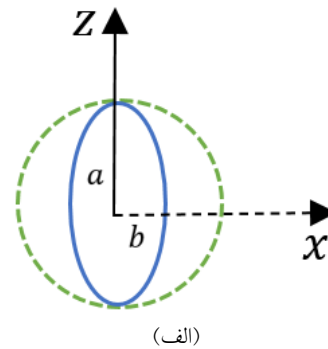
$$\alpha_{cc}^{(A)} = \frac{1}{3} \left[ \frac{e^3}{e - \tan^{-1} e} \right]$$

قطبش‌پذیری محوری و عرضی جریان کانالی برای یک کره‌وار کشیده قائم نارسانا عبارت است از:

$$\alpha_{cc}^{(A\_void)} = -\frac{1}{2} \alpha_{ec}^{(A)}$$

$$\alpha_{cc}^{(T\_void)} = -\frac{1}{2} \alpha_{ec}^{(T)}$$

است. مطابق شکل ۳، طول نیم‌قطر بزرگ و نیم‌قطر کوچک کره‌وار کشیده به ترتیب با  $a$  و  $b$  (با فرض  $a \geq b$ ) و خروج از مرکز آن با  $e = \sqrt{a^2 - b^2}/a$  (با فرض  $0 \leq e < 1$ ) تعریف می‌شود. 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  $e = \sqrt{b^2 - a^2}/b$  (با فرض  $0 \leq e < \infty$ ) تعریف می‌شود.



شکل ۳. کره‌وار محاط در کره‌ای که شعاع آن با قطر بزرگ کره‌وار برابر است. (الف) کره‌وار کشیده (ب) کره‌وار پخت.

پاسخ کره‌وار برابر حاصل ضرب ضریب قطبش‌پذیری مغناطیسی ( $\alpha$ ) و پاسخ کره متناظر است. این ضرایب با روابط (۴) تا (۱۰) تعریف می‌شوند (نورتون و همکاران، ۲۰۰۵):

$$\alpha_{ec}^{(T)} = \frac{4}{3} \left[ \frac{e^3}{\frac{1}{2} \ln \left( \frac{1+e}{1-e} \right) + \frac{e^3}{1-e^2} - e} \right]$$

Geophex که میدان‌ها را در محدوده چند هرتز تا چند ده کیلوهرتز تولید می‌کند، از بسامد ۲۰ کیلوهرتز (محمودی و تان، ۲۰۰۹) استفاده شده است. چون روش القای الکترومغناطیس یکی از روش‌های مؤثر در آشکارسازی مین‌های دریایی است، رسانندگی محیط برابر رسانندگی دریا و برابر  $f_s/m$  و مساحت پیچه‌ها و جریان در پیچه فرستنده برابر واحد فرض شده است.

## ۲-۱-۱ چگونگی تغییرات پاسخ‌های جریان‌های

### گردابی، کانالی و کل کره‌وار کشیده رسانا با $\theta$

در شکل ۴ نمودار پاسخ جریان‌های گردابی، کانالی و کل برای کره‌وار کشیده رسانا در محیط میزبان با رسانندگی ضعیف برحسب  $\theta$  رسم شده است. در هر چهار نمودار برای نسبت‌های متفاوت  $r = a/b$ ، پاسخ‌های بهنجار شده جریان کانالی و کل بیشترین مقدار خود را در  $\theta = 0^\circ$  دارند. با افزایش  $\theta$  از صفر تا  $90^\circ$  درجه، این دو پاسخ کاهش می‌یابند و به ازای  $\theta = 90^\circ$  به کمترین مقدار خود می‌رسند. پاسخ جریان گردابی برای  $r$  های رسم شده در حالتی که پیچه‌ها و محور بزرگ کره‌وار هم‌راستا هستند، برعکس دو پاسخ دیگر کمترین مقدار خود را دارد. با افزایش زاویه بین این دو محور، مقدار پاسخ افزایش می‌یابد و در حالت قائم بودن دو محور به بیشینه مقدار خود می‌رسد. این روند تغییرات برای همه مقادیر  $r$  یکسان است. مطابق شکل (۴-الف) برای  $r \approx 1$  که جسم به شکل کره است، پاسخ‌های دریافتی به  $\theta$  وابسته نیستند و دامنه تغییرات هر سه پاسخ ناچیز و مقدار آنها برای هر سه پاسخ بسیار نزدیک به بیشینه مقدار خود است. برای  $r$  های بزرگ (شکل‌های ۴-ج و ۴-د) که کره‌وار به شکل میله قائم نزدیک می‌شود، سهم جریان گردابی در پاسخ کل کاهش می‌یابد و پاسخ‌های جریان‌های کل و کانالی به هم نزدیک و سرانجام بر هم منطبق می‌شوند.

پتانسیل کل  $V_t$  در پیچه گیرنده با رابطه زیر نشان داده می‌شود:

$$V_t = i|V_{ec}| + V_{cc} \quad (11)$$

و دامنه آن برابر است با:

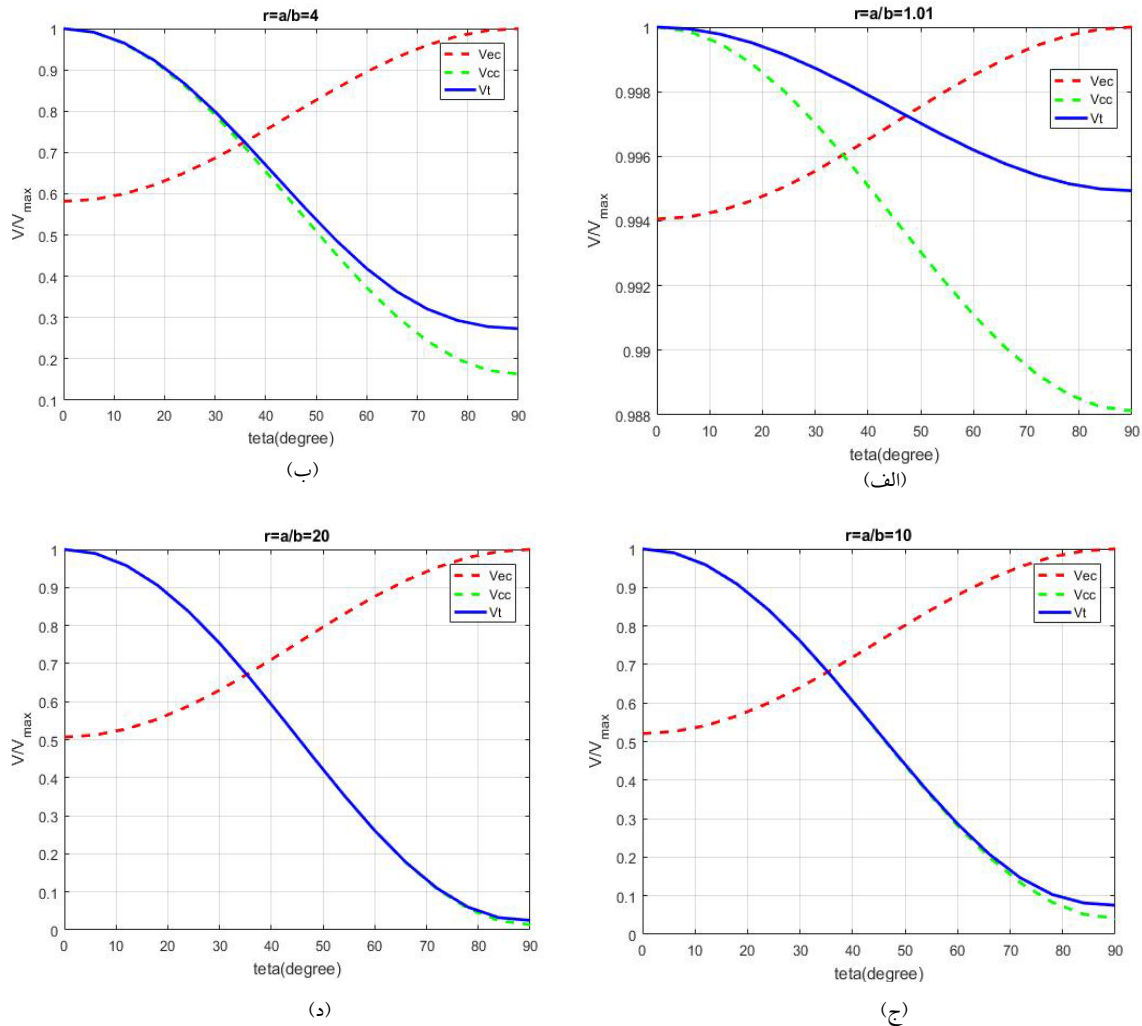
$$V_t = \sqrt{|V_{ec}|^2 + V_{cc}^2} \quad (12)$$

## ۲ تجزیه و تحلیل پاسخ القای الکترومغناطیسی کره‌وار

پاسخ القای الکترومغناطیسی ناشی از جریان القایی، جریان گردابی و همچنین پاسخ کل دریافتی در پیچه گیرنده به زاویه بین محور پیچه‌ها و محور کره‌وار ( $\theta$ )، نسبت طول نیم‌قطر بزرگ به طول نیم‌قطر کوچک کره‌وار ( $r$ )، عمق کره‌وار ( $d_0$ )، رسانندگی محیط میزبان ( $\sigma_0$ ) و ویژگی‌های فیزیکی و هندسی پیچه‌ها نظیر جریان‌ها و مساحت پیچه‌ها بستگی دارد. در آشکارسازی و شناسایی کره‌وار مدفون به‌عنوان مدلی از مهمات منفجر نشده، لازم است کاربر درباره چگونگی وابستگی پاسخ القای الکترومغناطیسی این‌گونه اجسام به پارامترهای فیزیکی و هندسی کره‌وار آگاهی کیفی داشته باشد. در این مقاله برای ایجاد چنین بینشی، پاسخ‌ها برحسب برخی از این پارامترها برای کره‌وار رسانا و نارسنای کشیده و پخت بررسی می‌شوند.

## ۲-۱ تحلیل پاسخ القای الکترومغناطیسی کره‌وار کشیده رسانا

در این بخش پاسخ حاصل از جریان گردابی و کانالی و پاسخ کل دریافتی در پیچه گیرنده برحسب زاویه بین محور پیچه‌ها و محور کره‌وار ( $\theta$ ) و همچنین برحسب نسبت طول نیم‌قطر بزرگ به نیم‌قطر کوچک کره‌وار کشیده بررسی می‌شود. برای به‌دست‌آوردن نمودارها، بر اساس بسامد مورد استفاده در دستگاه GEM-5 ساخت شرکت



شکل ۴. نمودار پاسخ جریان‌های گردابی، کانالی و کل بهنجار شده به مقدار بیشینه برای کره‌وار کشیده (الف)  $a = 2b$  (ب)  $a = b$  (ج)  $a = 10b$  (د)  $a = 20b$  نسبت به زاویه بین راستای قطر بزرگ کره‌وار با محور پیچه‌ها ( $\theta$ ).

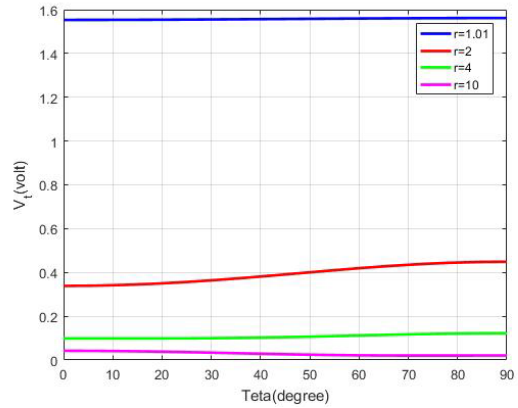
پاسخ کره‌وار است و با افزایش  $r$  بزرگی این پاسخ کاهش می‌یابد؛ برای نمونه وقتی مقدار عددی نسبت قطر بزرگ کره‌وار به قطر کوچک آن از حدود ۱ به ۲ افزایش می‌یابد، متوسط پاسخ دریافتی ۷۵ درصد افت می‌کند. برای مقادیر بزرگ‌تر  $r$  این افت مقدار وجود دارد ولی نه به شدت قبل. وقتی کره‌وار به میله قائم نزدیک می‌شود، مقدار پاسخ به صفر میل می‌کند.

## ۲-۱-۲ تحلیل رفتار پاسخ کل با تغییر زاویه بین

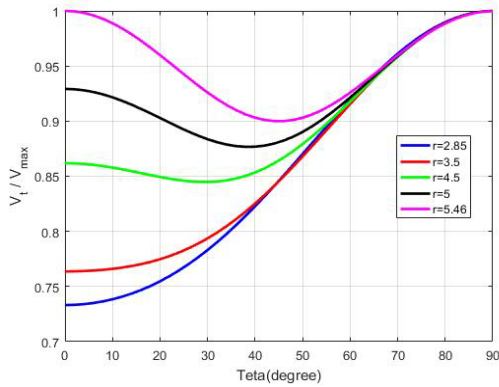
### محور پیچه‌ها و محور کره‌وار کشیده

برای تحلیل واضح‌تر رفتار پاسخ کل دریافتی در پیچه گیرنده، در شکل ۵ نمودار این پاسخ بر حسب  $\theta$  برای مقادیر مختلف  $r$  رسم شده است. برای رسم این نمودار، مقدار جریان در پیچه فرستنده و مساحت پیچه‌ها برابر واحد و بسامد چشمه ۲۰ کیلوهرتز در نظر گرفته شده است. ملاحظه می‌شود که پاسخ کره متناظر ( $r \approx 1$ ) به مراتب بزرگ‌تر از

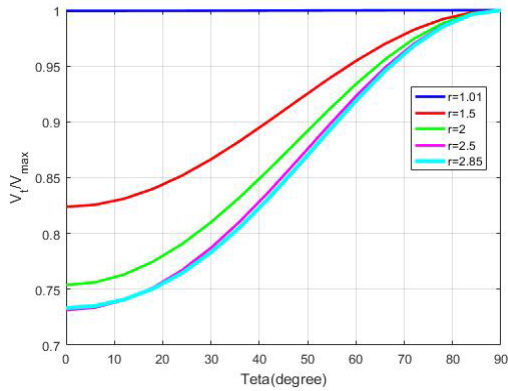
برای نمایش بهتر نحوه تغییر پاسخ کل با زاویه  $\theta$ ، در شکل ۶ پاسخ کل بهنجار شده با مقدار بیشینه خود رسم شده است. بررسی و پیگیری رد نمودارها نشان می‌دهد مطابق شکل ۶-الف برای مقادیر  $r \leq 85/2$  با افزایش  $\theta$  مقدار پاسخ کل افزایش می‌یابد و در حالتی که محورهای پیچ و کره‌وار بر هم عمود هستند ( $\theta = 90^\circ$ )، پاسخ کل دریافتی بیشینه است. به ازای همه مقادیر  $85/2 \leq r \leq 48/5$  پاسخ کل دریافتی همچنان برای  $\theta = 90^\circ$  بیشینه است، ولی چنانکه در شکل ۶-ب دیده می‌شود، منحنی‌ها تغییر رفتار می‌دهند و مقدار آنها دیگر به ازای  $\theta = 0^\circ$  کمینه نیست و با افزایش مقدار  $r$  رو به افزایش می‌گذارد.



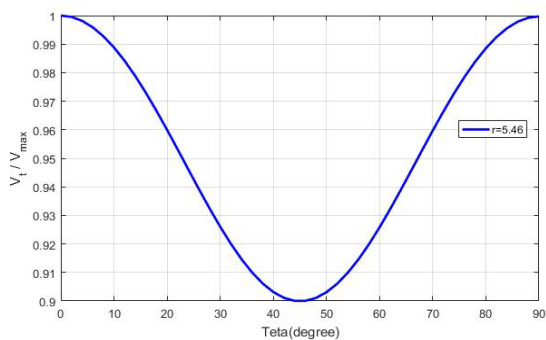
شکل ۵. نمودار پاسخ کل بر حسب  $\theta$  برای کره‌وار کشیده رسانا با  $r$  های مختلف.



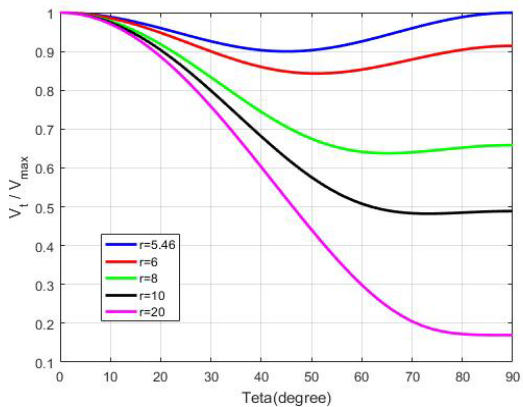
(ب)



(الف)



(د)



(ج)

شکل ۶. نمودار پاسخ کل بهنجار شده به مقدار بیشینه بر حسب  $\theta$  برای کره‌وار کشیده رسانا با  $r$  های مختلف.

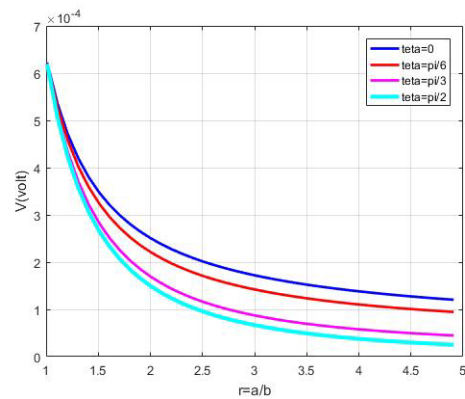
با افزایش مقدار  $r$  کره‌وار کشیده‌تری خواهیم داشت. چنانکه در شکل ۷ ملاحظه می‌شود، روند کلی تغییرات نشان می‌دهد برای زوایای انتخابی  $\theta$  با افزایش  $r$  و کشیده‌تر شدن کره‌وار، پاسخ کل کاهش می‌یابد. همان‌طور که انتظار می‌رود برای  $r = 1$  پاسخ دریافتی به زاویه بین محور پیچ‌ها و محور کره وابسته نیست و با خروج از کره و تبدیل جسم به کره‌وار کشیده‌تر، مقدار پاسخ‌ها برای همه زوایا کاهش می‌یابد و برای  $r$  های بزرگ که کره‌وار به شکل میله نازک قائم درمی‌آید، کمترین مقدار خود را خواهد داشت.

## ۲-۲ تحلیل پاسخ القای الکترومغناطیسی کره‌وار پخت رسانا

در این بخش رفتار هریک از پاسخ‌های دریافتی در پیچ‌گیرنده با همان مقادیر بسامد و رسانندگی که در بخش قبل اشاره شد، بحث و بررسی می‌شود.

### ۱-۲-۲ چگونگی تغییرات پاسخ‌ها با زاویه بین محور پیچ‌ها و محور کره‌وار پخت رسانا

در شکل ۸ نمودار پاسخ جریان‌های گردابی و کانالی و پاسخ کل برای کره‌وار پخت رسانا در محیط میزبان با رسانندگی ضعیف برحسب  $\theta$  برای چند  $r$  رسم شده است. برای  $r = b/a \approx 1$  که کره‌وار به کره بسیار نزدیک است (شکل ۸-الف)، پاسخ‌های جریان گردابی و کانالی به مقدار خیلی کمی وابستگی به  $\theta$  را به‌نمایش می‌گذارند و می‌توان گفت پاسخ کل به  $\theta$  وابسته نیست و هر قدر مقدار  $r$  نزدیک‌تر به یک باشد، این موضوع واضح‌تر دیده می‌شود. با افزایش مقادیر  $r$  و  $\theta$  پاسخ‌های جریان گردابی و کانالی در جهت عکس تغییر می‌کنند.

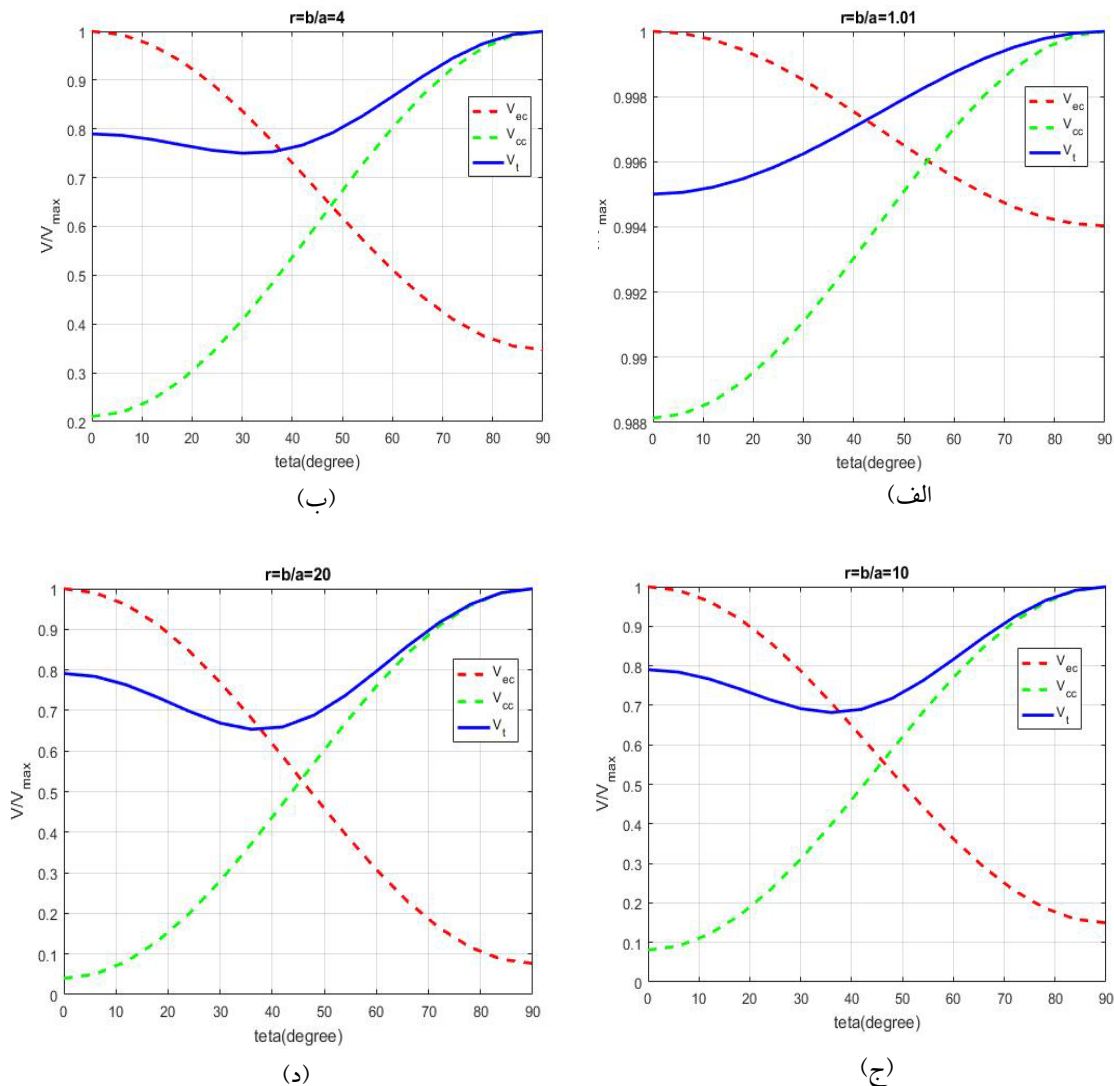


شکل ۷. نمودار پاسخ کل برحسب  $r$  برای کره‌وار کشیده رسانا برای چند جهت‌گیری متفاوت پیچ‌ها و کره‌وار.

به ازای  $r = 48/5$  نمودار پاسخ کل کاملاً متقارن است و برای  $\theta = 0^\circ$  و  $\theta = 90^\circ$  بیشینه و برای  $\theta = 45^\circ$  کمینه مقدار خود را دارد (شکل ۶-ج). با توجه به شکل ۶-د، برای مقادیر  $r \leq 48/5$  در حالتی که محور پیچ‌ها و کره‌وار هم‌راستا هستند ( $\theta = 0^\circ$ )، پاسخ کل دریافتی بیشینه است. برای مقادیر خیلی بزرگ  $r$  که کره‌وار در عمل به میله قائم نزدیک می‌شود، نمودار پاسخ کل به ازای  $\theta = 90^\circ$  به صفر متمایل می‌شود. این نمودارها برای مقادیر متفاوت کمیت‌های هندسی و فیزیکی چشمه‌ها بررسی شد و ملاحظه شد که رفتار آنها به این مقادیر بستگی ندارد.

### ۳-۱-۲ چگونگی تغییرات پاسخ‌ها با تغییر ابعاد هندسی کره‌وار رسانای کشیده برای جهت‌گیری‌های خاص کره‌وار و پیچ‌ها

در این قسمت نمودار تغییرات پاسخ کل برحسب  $r$  رسم و بررسی می‌شود. دامنه تغییرات این کمیت، برابر یا بیشتر از یک است. به ازای  $r = 1$  کره‌وار به کره تبدیل می‌شود و



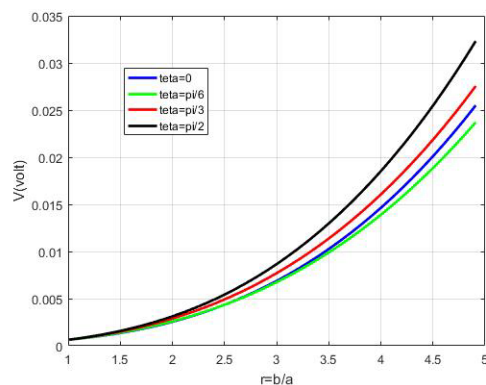
شکل ۸. نمودار پاسخ جریان‌های گردابی، کانالی و کل بهنجار شده به مقدار بیشینه برای کره‌وار پخت (الف)  $b \approx a$  (ب)  $b="4" a$  (ج)  $b="10" a$  (د)  $b="20" a$  نسبت به زاویه بین راستای قطر بزرگ کره‌وار با محور پیچ‌ها ( $\theta$ )

### ۲-۲-۲ تحلیل رفتار پاسخ کل با تغییر زاویه بین محور پیچ‌ها و محور کره‌وار پخت رسانا

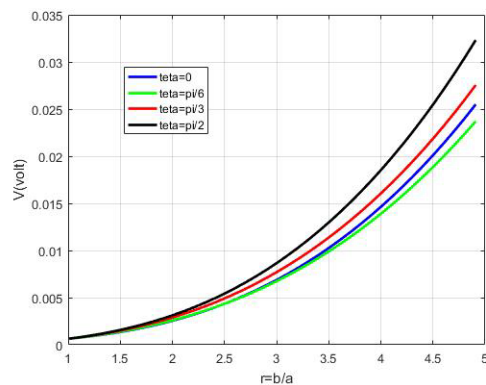
برای تحلیل پاسخ کل کره‌وار پخت، مانند حالت کره‌وار کشیده، مساحت پیچ‌ها و جریان در پیچ‌ها فرستنده را برابر واحد و بسامد چشمه ۲۰ کیلوهرتز فرض می‌شود. در شکل ۹ پاسخ کل برحسب زاویه  $\theta$  برای چند مقدار  $r$  رسم شده است. ملاحظه می‌شود برای  $r \approx 1$  که قطرهای کوچک و بزرگ با هم برابرند و کره‌وار به کره

نزدیک است، پاسخ دریافتی بیشترین مقدار را دارد. با افزایش  $r$  مقدار پاسخ دریافتی در پیچ‌ها گیرنده افت می‌کند و برای مقادیر بزرگ  $r$  که کره‌وار به شکل میله نزدیک می‌شود، پاسخ دریافتی بسیار کوچک است. مقایسه نمودارهای شکل‌های ۵ و ۹ نشان می‌دهد در شرایط یکسان عمق بی‌هنجاری و ویژگی‌های چشمه، پاسخ دریافتی از کره‌وار کشیده بزرگ‌تر از کره‌وار پخت است.

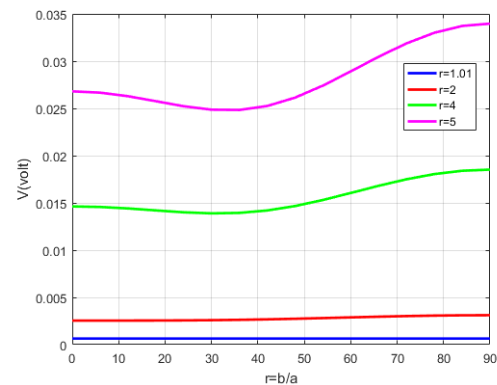
روند کلی تغییرات نشان می‌دهد برای زوایای انتخابی  $\theta$ ، با افزایش  $r$  و کشیده‌تر شدن کره‌وار، پاسخ کل افزایش می‌یابد. در اینجا نیز مانند کره‌وار کشیده، برای  $r = 1$  پاسخ کل به زاویه بین محور پیچه‌ها و محور کره وابسته نیست و با خروج از کره و تبدیل شکل به کره‌وار کشیده‌تر، مقدار پاسخ‌ها برای همه زوایا افزایش می‌یابد. برای  $r$  های به نسبت بزرگ که کره‌وار به شکل میله نازک افقی درمی‌آید، بیشترین پاسخ دریافت می‌شود. مقایسه شکل‌های ۷ و ۱۱ نشان می‌دهد روند تغییرات پاسخ کل نسبت به  $r$  برای کره‌وار کشیده، عکس کره‌وار پخت است. با توجه به اینکه نمودارها در شکل‌های ۷ و ۱۱ با شرایط یکسان برای پیچه فرستنده و عمق کره‌وار رسم شده‌اند، مقایسه دو نمودار نشان می‌دهد مقدار پاسخ‌های دریافتی از کره‌وار پخت بزرگ‌تر از کره‌وار کشیده است.



شکل ۹. نمودار پاسخ کل برحسب  $r$  برای کره‌وار پخت رسانا با  $\theta$  های مختلف



شکل ۱۰. نمودار پاسخ کل برحسب  $e$  برای کره‌وار پخت رسانا.



شکل ۱۱. نمودار پاسخ کل برحسب  $\theta$  برای کره‌وار پخت رسانا با  $r$  های مختلف

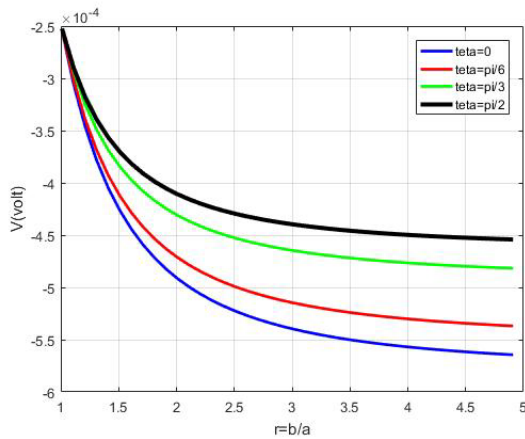
### ۳-۲-۲ بررسی چگونگی تغییرات پاسخ‌ها با تغییر ابعاد هندسی کره‌وار رسانای پخت

برای همه  $r$  ها که در شکل ۸ آورده شده‌اند و برای دیگر مقادیر  $r$  آزموده شده، به ازای  $\theta = 0^\circ$  پاسخ جریان گردابی بیشینه و پاسخ جریان کانالی کمینه است و برای  $\theta = 90^\circ$  پاسخ کل بیشینه مقدار خود را دارد. با افزایش  $r$  و افزایش مقدار  $\theta$  از صفر تا  $90^\circ$  درجه، پاسخ جریان‌های گردابی کاهش و پاسخ جریان کانالی افزایش می‌یابد. پاسخ کل به ازای زوایای کمتر از  $90^\circ$  درجه رفتاری متغیر دارد که برای بررسی بیشتر این پاسخ، نمودار آن برحسب  $r = b/a$  برای چند زاویه رسم شده است (شکل ۱۰).

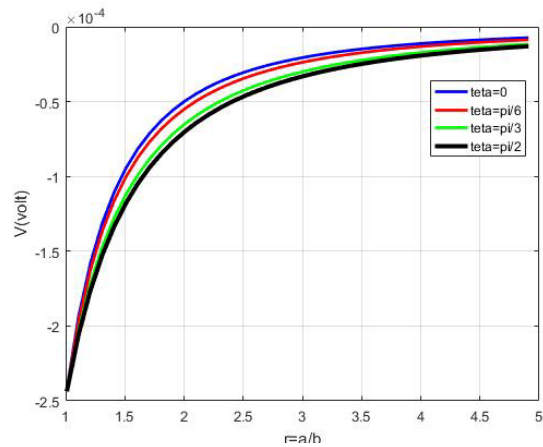
چنانکه در شکل ۱۰ دیده می‌شود، در حالت  $\theta = 0^\circ$  که محور پیچه‌ها و محور بزرگ کره‌وار هم‌راستا هستند، برعکس کره‌وار کشیده، پاسخ کره‌وار پخت با افزایش مقدار  $e$  افزایش می‌یابد و برای  $e \approx 1$  برای همه مقادیر  $\theta$  پاسخ کل بیشینه است. در حالتی که  $e$  خیلی کوچک است یا به عبارت دیگر، کره‌وار به شکل میله نازک افقی نزدیک می‌شود، برای همه زوایای انتخابی، پاسخ کل بهنجار شده کمترین مقدار خود را دارد.

در ادامه، نمودار تغییرات پاسخ کل کره‌وار پخت برحسب  $r$  برای چند جهت‌گیری کره‌وار و پیچه‌ها رسم و نتایج بررسی می‌شود. چنانکه در شکل ۱۱ ملاحظه می‌شود،

جهت‌گیری‌ها یکسان و افزایشی است. با افزایش  $\theta$  از صفر تا  $90^\circ$  درجه، مقدار پاسخ برای همه  $r$  ها اندکی کاهش می‌یابد. چنانکه در شکل ۱۲-ب دیده می‌شود، برخلاف کره‌وار کشیده، پاسخ کره‌وار پخت با افزایش  $r$  کاهش می‌یابد و بیشینه پاسخ به ازای  $r \approx 1$  روی می‌دهد. در حالت کره‌وار پخت برعکس حالت کره‌وار کشیده، به ازای  $r \approx 1$  و برای همه زوایا بزرگی پاسخ دریافتی یکسان است و بیشینه مقدار خود را دارد. گفتنی است با افزایش  $r$  و همچنین کاهش زاویه بین محورهای کره‌وار و پیچ‌ها، بزرگی پاسخ کاهش می‌یابد.



(ب)



(الف)

شکل ۱۲. نمودار پاسخ جریان کانالی کره‌وار (الف) کشیده (ب) پخت نارسانا برحسب  $r$  برای چند جهت‌گیری کره‌وار و پیچ‌ها.

خود را دارند. با افزایش  $\theta$  از صفر تا  $90^\circ$  درجه، این دو پاسخ کاهش می‌یابند و به ازای  $\theta = 90^\circ$  به کمترین مقدار خود می‌رسند. همچنین پاسخ جریان گردابی در حالتی که پیچ‌ها و محور بزرگ کره‌وار هم‌راستا هستند، کمترین مقدار خود را دارد و با افزایش زاویه بین این دو محور، مقدار پاسخ افزایش می‌یابد. هنگامی که دو محور، پاسخ به بیشینه مقدار خود می‌رسد. برای  $r \approx 1$  که جسم به شکل کره است، پاسخ‌های دریافتی به  $\theta$  وابسته نیست، دامنه تغییرات هر سه پاسخ ناچیز است و مقدار آنها برای هر سه پاسخ بسیار به

## ۲-۳ پاسخ القای الکترومغناطیسی کره‌وار کشیده و پخت نارسانا

کره‌وار نارسانا در هر دو حالت کشیده و پخت، تنها پاسخ جریان کانالی دارد. در شکل ۱۲-الف نمودار تغییرات پاسخ کره‌وار کشیده برحسب تغییرات  $r$  برای چند جهت‌گیری پیچ و جسم رسم شده است. برای  $r$  با مقدار نزدیک به یک، پاسخ جریان کانالی کره‌وار نارسانا کشیده کمترین مقدار خود را دارد و با افزایش  $r$ ، مقدار پاسخ افزایش می‌یابد. روند افزایش پاسخ این نوع کره‌وار برای چند جهت‌گیری منتخب (شکل ۱۲-الف) و سایر

## ۳ نتیجه‌گیری

در این مقاله، نمودار پاسخ القای الکترومغناطیسی حاصل از جریان‌های گردابی و کانالی و همچنین پاسخ کل کره‌وار در دو حالت کاملاً رسانا و نارسانا برحسب نسبت قطر بزرگ به قطر کوچک کره‌وار و همچنین برحسب جهت‌گیری کره‌وار نسبت به پیچ‌ها در عمق‌های مختلف برای پیچ‌های فرستنده و گیرنده هم‌محور رسم و بررسی شد. در حالت کره‌وار کشیده رسانا با نسبت‌های متفاوت  $r = a/b$ ، برای  $\theta = 0^\circ$  پاسخ‌های بهنجار شده جریان کانالی و کل بیشترین مقدار



- ransactions on Instrumentation and Measurement, **65**, 795–807.
- Babaei, M., Meshinch-Asl, M., and 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**(6), 1913–1934.
- Babaei, M., Meshinch-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.
- Beran, L., Zelt, B., and Billings, S., 2013, Detecting and classifying UXO: *The Journal of ERW Mine Action*: **17**, 57–63.
- Billings, S. D., and Beran, L., 2017, Optimizing electromagnetic sensors for unexploded ordnance detection: *Geophysics*, **82**, EN25–EN31.
- 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.
- Butler, D. K., 2001, Potential fields methods for location of unexploded ordnance: *The Leading Edge*, **20**, 890–895.
- Chen, S., Zhang, S., Zhu, J., and Luan, X., 2020, Accurate measurement of characteristic response for unexploded ordnance with transient electromagnetic system: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, **69**, 1728–1736.
- Frost, A., Boyle, P., Autier, P., King, C., Zwijnenburg, W., Hewitson, D., and Sullivan, R., 2017, The effect of explosive remnants of war on global public health: A systematic mixed-studies review using narrative synthesis: *Lancet Public Health*, **2**, 286–296.
- García-Martín, J.; Gómez-Gil, J., and Vázquez-Sánchez, S. E., 2011, Non-destructive techniques based on eddy current testing: *Sensors*, **11**, 2525–2565.
- Heinzel, A., Scharfel, M., Burr, R., Bähneemann, R., Schreiber, E., Peichl, M., and Waldschmidt, C. A., 2019, Comparison of ground-based and airborne SAR systems for the detection of landmines, UXO, and IEDs: *Proceedings of the Radar Sensor Technology, XXIII*, Baltimore, MA, USA, 15–17.
- Huang, H., and Won, I. J., 2003, Characterization of UXO-like targets using broadband electromagnetic induction sensors: *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, **41**, 652–663.
- 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.
- Norton, S. J., SanFilipo, W. A., and Won, I. J., 2005, Eddy-current and current-channeling response to spheroidal anomalies: *IEEE Transactions on Geoscience Remote Sensing*, **43**, 2200–2209.
- Núñez-Nieto, X., Solla, M., Gómez-Pérez, P., and Lorenzo, H., 2014, GPR signal characterization for automated landmine and UXO detection based on machine learning techniques: *Remote Sensing*: **6**, 9729–9748.
- 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.
- Pasion, L. R., 2011, Feature extraction and classification of magnetic and EMI data: ESTCP Project MR-201004, Technical Report, Camp Beale, CA.
- 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.
- 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), 336–34

## Analysis of spheroidal electromagnetic induction response as a model of unexploded ordnance

Mojtaba Babaei<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup> Assistant Professor, Department of Geophysics, Hamedan Branch, Islamic Azad University, Hamedan, Iran

(Received: 24 July 2023, Accepted: 28 November 2023)

### Summary

Identifying, detecting, classifying and separating unexploded ordnance (UXO) is one of the essential needs of countries and societies that have been involved in war. Marine mines submerged in seawater or buried in land are a common danger in many areas of the world. The majority of mines are composed of metal and explosive materials. There are many non-destructive schemes for detecting the location, orientation and depth of a metallic mine (modeled as a perfectly conducting sphere and spheroid). These methods of exploration of such materials, which are mainly based on geophysical methods, have a special importance and capability in terms of economy and safety. A major challenge of detecting a metallic object is to discriminate the object, such as an unexploded ordnance, from the noisy environment. It takes time and resources to identify the object, especially due to false signals from other metal objects and cultural features such as metal buildings, pipelines, and oil well casings. By measuring the secondary response of an electrically conductive object placed in a low frequency primary magnetic field, distinct spectral characteristics such as electrical conductivity, magnetic permeability, object geometry, and size can be obtained. Being one of the frequency domain methods, the Electromagnetic Induction method (EMI) is an efficient geophysical method that is used to identify land mines and sea mines. 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. In the processing of the data obtained from geophysical surveys, especially in the EMI, such anomalies are modeled with simple geometric objects such as spheres or spheroids. In the first step of data interpretation and to determine the dimensions of the model that indicates the type of mine or bomb and also to determine its location, it is necessary for the interpreter to have a clear view of how the electromagnetic induction response depends on the geometrical and physical parameters of such materials. For this purpose, in this article, the changes and behavior of the received electromagnetic induction response in the receiver coil are investigated according to the depth, dimension and orientation of the abnormality. The graphs obtained are examined and analyzed using the mentioned variables. While qualitatively determining the state of abnormality to a large extent, the obtained results can be useful in numerical methods of calculation of geometrical and physical quantities of anomalies.

**Keywords:** Electromagnetic induction method, unexploded ordnance, spheroid, analysis of responses