

## مدلسازی دو بعدی داده های الکترومغناطیس هوابرد به منظور اکتشاف اهداف رسانی زیر سطحی

محمد محمدزاده مقدم<sup>۱</sup>، محمدرضا سیف<sup>۲</sup>، داود رجبی<sup>۳</sup>، سعید میرزایی<sup>۴</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی شهید بهشتی

<sup>۲</sup> دانشگاه جامع امام حسین (ع)، دانشکده پدافند غیرعامل

<sup>۳</sup> پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی شهید بهشتی

<sup>۴</sup> پژوهشکده علوم پایه کاربردی، جهاد دانشگاهی شهید بهشتی

نام و نشانی ایمیل نویسنده مسئول:

محمد محمد زاده مقدم

[mmz140@yahoo.com](mailto:mmz140@yahoo.com)

### چکیده

سازه های نظامی زیر زمینی نقش اساسی در حفاظت فیزیکی از سرمایه های ملی دارند و به عنوان مهمترین گزینه های پدافندی مطرح می باشند. بررسی امکان آشکار سازی سازه های زیر زمینی همواره یکی از پیچیده ترین مسائل مورد بحث در تأمین امنیت تأسیسات مدفون بوده است. سازه ها و تأسیسات نظامی زیر زمینی به دلیل وجود مواد فلزی در ترکیب آنها و در نتیجه ایجاد تباین رسانایی الکتریکی با سنگ های اطراف، می توانند توسط سنسورهای الکترومغناطیسی شناسایی و مکان یابی شوند. در این پژوهش از داده های الکترومغناطیس هوابرد حوزه فرکانس برای حل مسئله استفاده شده است. روش الکترومغناطیسی هوابرد یکی از شاخه های مهم ژئوفیزیک اکتشافی است که در آن برداشت داده از بالای سطح زمین انجام می شود و جز قدرتمندترین و متداول ترین روش های ژئوفیزیک اکتشافی است. سرعت بالا، پوشش وسیع، امکان اجرا در مناطق صعب العبور و هزینه مناسب تر نسبت به سایر روش های ژئوفیزیک اکتشافی، از ویژگی های این نوع برداشت است. روش های الکترومغناطیسی همانند روش های الکتریکی به هدایت یا مقاومت الکتریکی، ضریب گذردهی الکتریکی و تراوایی مغناطیسی زمین مورد مطالعه وابسته می باشند. برای تحلیل همه جانبه موضوع مورد نظر، مسئله به صورت مستقیم و معکوس در نظر گرفته شده است. در مسئله مستقیم با فرض معلوم بودن ابعاد و موقعیت سازه مدفون به مدلسازی سیگنال الکترومغناطیسی پرداخته می شود و با بررسی دامنه این سیگنال و سطح دقت دستگاه امکان کشف سازه زیر زمینی مورد بحث قرار می گیرد. در مسئله معکوس، با معلوم بودن سیگنال الکترومغناطیس با استفاده از روش های وارون سازی داده های EM، موقعیت سازه مدفون برآورد می شود. در این پژوهش پس از بررسی جدیدترین و کارآمدترین کدها و نرم افزارهای مربوطه، یک کد رایانه ای تحت MATLAB معرفی شده که قادر است به انجام مدلسازی پیشرو و معکوس داده های الکترومغناطیس هوایی در حوزه فرکانس بپردازد. روش مذکور برپایه روش های معکوس سازی سیمون و نیبلت-بوستیک ارائه شده است. کارایی و سرعت محاسبه الگوریتم ارائه شده، با لحاظ نمودن مدل های مختلف زمین مورد آزمون قرار گرفت. هر دو مسئله مستقیم و معکوس با انجام شبیه سازی های متنوع مورد بررسی قرار گرفته و راهکارهای پدافندی برای کاهش احتمال کشف سازه های زیر زمینی ارائه شده است.

**کلمات کلیدی:** الکترومغناطیس، سازه های مدفون، رسانایی الکتریکی

**مقدمه**

سازه های زیرزمینی اهمیت به سزایی در مسائل مربوط به امنیت ملی دارند. بدین معنی که این امکان را فراهم می سازند تا از تجهیزات نظامی و مکان فرماندهی و کنترل نیروها و تجهیزات نظامی در برابر سلاح های دقیق و قوی جدید محافظت به عمل آید. از نقطه نظر دیگر، به دلیل ویژگی ذاتی این تأسیسات امکان شناسایی مکان آنها یک مسئله بسیار پیچیده است که برای نیروهای نظامی یکی از اساسی ترین مسائل در زمان جنگ می باشد. واضح است که به دلیل استتار این تأسیسات زیر زمینی و وجود اثرات سطحی و زمینی بسیار اندک، شناسایی آنها با استفاده از سنجنده های مرئی و حرارتی امکان پذیر نیست. از این رو شناسایی این اهداف به یکی از چالش های بزرگ و مهم سده اخیر تبدیل شده است [۲].

نگارنده در این پژوهش بدنبال این نتیجه گیری است که با توجه به چشمان تیزبین سنجنده های مختلف هوابرد بر فراز پهنه سرزمینی قلمرو کشور چگونه می توان سازه های زیرزمینی را بوژه در برابر تهدیدات غیرطبیعی و انسان ساز، ایمن ساخت و نقش رعایت اصول پدافند غیرعامل تا چه میزان می تواند باعث ناکارآمدسازی سامانه های هوایی گردد و تا چه میزان می توان از طریق روش های نو ظهور باعث کاهش آسیب پذیری و استمرار برنامه های توسعه ای در کشور گردید.

تجارب حاصل از جنگ های گذشته مؤید این نظر است که کشور مهاجم به منظور در هم شکستن اراده ملت و توان اقتصادی، نظامی و سیاسی کشور مورد تهاجم، با اتخاذ استراتژی انهدام مراکز ثقل؛ توجه خود را صرف بمباران و انهدام مراکز حیاتی و حساس بخصوص تأسیسات نظامی می نماید. بنابراین حفاظت از زیر ساخت های حیاتی و دستاوردهای کشور که با صرف هزینه های بسیار ساخته شده اند، امری ضروری می باشد، لذا برای کاهش آسیب پذیری زیر ساخت ها و سازه های پراهمیت راهبردی و عملیاتی در برابر سلاح های دشمن، معمولاً آنها را به عمق و موقعیت زمین شناسی مناسبی منتقل می نمایند. عمق و موقعیت مناسب آن است که کشور متجاوز نتواند با استفاده از پیشرفته ترین تجهیزات ژئوفیزیک یعنی الکترومغناطیس هوابرد اقدام به شناسایی و مکان یابی این تأسیسات نظامی حساس نماید. این پژوهش، پس از شناخت پیشرفته ترین تجهیزات اکتشافی الکترومغناطیس هوابرد، به مدلسازی و مقایسه انواع مختلف مدل های مصنوعی زیرسطحی (نماینده تأسیسات نظامی زیرزمینی) می پردازد.

در میان روش هایی که برای شناسایی سازه های زیرزمینی به کار می روند، روش های مبتنی بر اندازه گیری رسانندگی الکتریکی زمین به دلیل ویژگی های منحصر به فرد میدان الکترومغناطیسی از کارایی بالایی برخوردار هستند. روش الکترومغناطیس هوابرد به دلیل دقت بالا، سرعت بالای داده برداری و ارزان بودن نسبت به سایر روش ها به یکی از پرکاربردترین روش های ژئوفیزیکی تبدیل شده است. در کاربردهای زمین شناسی و ژئوفیزیکی، از این روش برای کشف کانی زایی های فلزی و آب های زیرزمینی استفاده می شود. در این کاربردها، نقشه مربوط به رسانندگی الکتریکی منطقه اندازه گیری می شود و از آنجایی که تغییرات رسانندگی از تغییرات رسانندگی الکتریکی سنگ ها و اجرام موجود در زمین به دلیل وجود کانی های فلزی منتج می گردد، با آنالیز داده های الکترومغناطیسی اندازه گیری شده می توان به اطلاعاتی در مورد نوع مواد زیرزمینی و مکان آنها دست یافت [۳].

روش های الکترومغناطیسی از جمله روش های ژئوفیزیکی بسیار متنوع و کارا، سریع و نسبتاً کم هزینه به شمار می روند که به سرعت در حال توسعه می باشند. این روش ها در بین روش های ژئوفیزیکی (به استثنای روش مغناطیسی) بیشترین کاربرد را در اکتشاف مواد معدنی و بیشترین تنوع را در سیستم های برداشت دارند [۴].

**روش شناسی**

سیستم های نوین هلیکوپتری الکترومغناطیس حوزه بسامد دارای پیچیده های متعدد فرستنده و گیرنده با قطری نزدیک به نیم متر هستند. سیگنال فرستنده یا همان میدان مغناطیسی اولیه، در نتیجه یک شار جریان الکتریکی سینوسی در پیچ فرستنده و در بسامدهای مختلف ایجاد می شود. شرایط حاکم بر محیط تولید این میدان مانند فاصله های پیچ فرستنده و گیرنده سبب می شود شرایطی مانند یک میدان دوقطبی شکل گیرد. نوسانات میدان مغناطیسی اولیه باعث تشکیل جریان های گردابی زیرسطحی می شود. این جریان ها نیز منجر به شکل گیری یک میدان مغناطیسی ثانویه متناسب با توزیع مقاومت ویژه زمین می شوند. میدان مغناطیسی ثانویه در پیچ گیرنده ثبت می شوند و وابسته به میدان اولیه تولیدی در پیچ فرستنده است [۵].

از آنجا که در برداشت های الکترومغناطیس هوابرد فاصله جدایش فرستنده و گیرنده نسبت به ارتفاع پرواز ناچیز است؛ لذا می توان فرستنده یا گیرنده را به صورت دوقطبی مغناطیسی نوسان کننده در نظر گرفت (این فرض در ادامه باعث سهولت در حل معادلات مربوطه خواهد شد) [۶]. لذا با این فرض، مولفه های میدان حاصل به صورت یک طیف پیوسته از طول موجها قابل تعریف است. اگر میدان مغناطیسی ثانویه نرمالیزه شده در محل سیم پیچ گیرنده با  $Z$  نشان داده شود، با فرض:

$$h \geq 3.3 r$$

(۱)

که در آن  $t$ ، فاصله جدایش سیم پیچ های فرستنده و گیرنده و  $h$  ارتفاع پرنده از سطح زمین است. حال بر اساس رابطه زیر که به نام رابطه ماندیری نیز معروف است داریم [۷]:

$$Z \cong G_j \left(\frac{r}{h}\right)^3 \int_0^\infty k^2 R_1 e^{-2k} dk \quad (2)$$

در این رابطه،  $k = \lambda h$  و  $G_j$  فاکتوری است که به نحوه قرارگیری سیم پیچ های فرستنده و گیرنده بستگی دارد. این فاکتور برای سیم پیچ های هم صفحه افقی  $j = 1$ ،  $G_1 = 1$ ، برای سیم پیچ های هم صفحه عمودی  $j = 2$ ،  $G_1 = 1/2$  و برای سیم پیچ های هم محور قائم  $j = 3$ ،  $G_3 = -1/4$  است.  $R_1$  ضریب بازتاب نام دارد و پارامتری است مختلط که از دو جزء حقیقی و موهومی وابسته به پارامترهای زمین، تشکیل شده است.

### مدلسازی پیشرو و معکوس

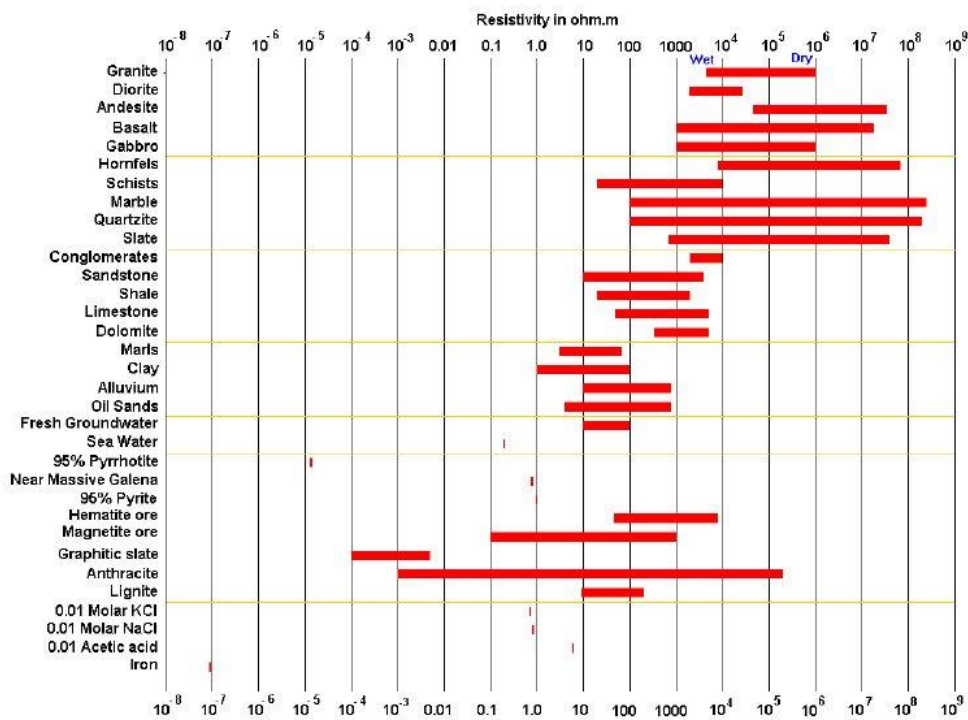
در این تحقیق مسئله امکان شناسایی اهداف زیرسطحی مختلف به دو صورت مستقیم و معکوس مورد بررسی قرار گرفت. در حالت مستقیم سازه هایی با ابعاد، عمق و رسانایی الکتریکی مشخص در نظر گرفته شد و سیگنال الکترومغناطیسی آن ها در سطح پرواز سنجنده مورد بررسی قرار گرفت. سپس در حالت وارون از سیگنال مغناطیسی مرحله مستقیم استفاده شد تا با استفاده از روش وارون سازی ارائه شده در این پژوهش، امکان یا عدم امکان شناسایی سازه ها بررسی و در صورت مثبت بودن جواب به برآورد عمق و دیگر مشخصات آن ها پرداخته شود.

یکی از مهمترین مشخصات مختلف سازه که امکان شناسایی آن را به شدت تحت تاثیر قرار می دهد، مقاومت ویژه الکتریکی سازه و اختلاف آن با سنگ های درونگیر است. جدول (۱) مقاومت ویژه الکتریکی سنگ ها و کانی های مهم زمین شناسی را ارائه می دهد. همانطور که مشاهده می شود مقاومت ویژه الکتریکی سنگ ها طیف وسیعی را شامل می شود. عواملی از جمله رطوبت، درز و شکاف، درجه حرارت، فشار و ماهیت کانی ها و مواد درون یک سنگ در میزان مقاومت ویژه آن تاثیر دارد. به عنوان مثال ماسه سنگ ها طیف مقاومت ویژه گسترده ای از حدود ۱۰۰ تا بیش از ۱۰۰۰ اهم متر را در برمی گیرد. هر چه میزان درز و شکاف های آبدار درون یک سنگ بیشتر باشد مقاومت الکتریکی آن کمتر خواهد بود. عمده سنگ های تشکیل دهنده پوسته زمین و بخصوص چند صدمتر بالایی سطح زمین عمدتاً سنگ های رسوبی، آذرین و دگرگونی شامل سنگ آهک، ماسه سنگ گرانیت و آندزیت و شیت ها است. در کمربندهای کوهزایی ایران مانند رشته کوه های زاگرس و البرز عمده واحدها متشکل از سنگ آهک، ماسه سنگ و شیل است. در زون دگرگونی سنندج- سیرجان که نوار بزرگ و وسیعی از شمال غرب تا جنوب ایران به موازات زاگرس کشیده شده است، عمده سنگ های آن از نوع شیت ها هستند. در بخش های شرقی ایران نیز واحدهای آهکی و ماسه سنگی و همچنین واحدهای آذرین متعددی به چشم می خورد.

به طور کلی به منظور انجام یک مدلسازی نزدیک به واقعیت زمین شناسی بهتر است طیف وسیعی از مقاومت ویژه الکتریکی که همه نوع تشکیلات را شامل می شود انتخاب شده و مدنظر قرار گیرد. بر همین اساس در این بخش به منظور انجام مدلسازی مستقیم، مقاومت ویژه ای که برای سنگ های میزبان سازه های نظامی زیرزمینی در نظر گرفته شده از ۲۰۰ تا ۱۰۰۰ اهم متر است که طیف وسیع و گسترده ای از مقاومت ویژه تشکیلات زمین شناسی ایران را در بر می گیرد. با توجه به جدول (۱)، این طیف مقاومت ویژه الکتریکی می تواند رنج مناسبی برای تشکیلات زمین شناسی مذکور باشد.

مقاومت ویژه الکتریکی سازه ها و محتویات سازه از دیگر عوامل مهم در ایجاد تباین مقاومت ویژه الکتریکی است که امکان شناسایی در روش معکوس سازی داده های الکترومغناطیسی را تحت تاثیر قرار می دهد. جدول (۲) مقاومت ویژه الکتریکی برخی فلزات مهم که می تواند در ساخت یک سازه نظامی و همچنین مهمات و اجسام بکار رفته در آن بکار رود، ارائه می دهد. همانطور که در این جدول مشاهده می شود همه این نوع مواد (آلومینیوم، مس و کربن) از نوع مواد هادی الکتریکی هستند و بنابراین مقاومت ویژه الکتریکی آن ها در مقدار بسیار پایینی است. اما توجه به این مطلب که مواد بکار رفته در سازه ها و در مهمات و اجسام درون یک سازه نیز شامل کلسیت، مگنتیت و بسیاری از کانی های جدول (۱) می شود، ضروری است. به عبارتی دیگر مواد بکار رفته در سازه ها و اهداف درون سازه از یک ترکیب هادی خاص نیست و مواد مختلفی در آن بکار رفته است. ترکیبات و مواد بکار رفته از در یک سازه و همچنین مهمات و اجسام فلزی درون یک سازه متنوع و به عواملی مختلفی بستگی دارد، اما به منظور انجام مدلسازی مستقیم این اهداف نیاز به دانستن مقاومت ویژه این اهداف است که در این پژوهش با توجه به مطالب مذکور مقاومت ویژه الکتریکی در نظر گرفته برای آن ها در رنج ۵ تا ۲۰ اهم متر است.

جدول ۱- مقاومت ویژه الکتریکی سنگ ها و کانی های مهم.



جدول ۲- مقاومت ویژه الکتریکی برخی فلزات مهم بکار رفته در سازه های نظامی و محتویات آن.

Conductors	
Aluminum	$2.73 \times 10^{-8}$
Carbon (amorphous)	$3.5 \times 10^{-5}$
Copper	$1.72 \times 10^{-8}$
Gold	$2.27 \times 10^{-8}$
Nichrome	$1.12 \times 10^{-6}$
Silver	$1.63 \times 10^{-8}$
Tungsten	$5.44 \times 10^{-8}$

در ژئوفیزیک کاربردی از داده های الکترومغناطیسی برای آشکارسازی ساختار توده ها و مواد زیر زمین استفاده می شود. مدل سازی الکترومغناطیسی روشی برای محاسبه این کمیت ها با استفاده از آنومالی های الکتریکی معلوم بر اساس تئوری ماکسول است. برای مثال با داشتن مقاومت ویژه الکتریکی یک توده و معلوم بودن مرزهای آن می توان کمیت های فوق را محاسبه کرد.

به منظور انجام مدلسازی پیشرو از سازه های هندسی منظم شامل استوانه افقی و مکعب مستطیل و... با ابعاد مشخص به عنوان سازه های زیرزمینی مورد نظر می توان استفاده کرد. از آنجایی که شکل کلی سازه در نحوه شناسایی آن با روش الکترومغناطیس هواپرد نقش زیادی ندارد بنابراین در این پژوهش از یک سازه استوانه ای شکل افقی به منظور انجام مدلسازی ها استفاده شده است و با تغییر پارامترهای مختلف شامل عمق و تباین رسانندگی الکتریکی نحوه شناسایی و مکان یابی این سازه مصنوعی به طور مفصل بررسی شده است. ابعاد، عمق و دیگر مشخصات این سازه ها در جدول (۳) آورده شده است. در این جدول حالت های مختلف سازه های زیرسطحی به منظور انجام مدلسازی داده های الکترومغناطیس هوایی ارائه شده است. همانطور که مشاهده می شود ابعاد در نظر گرفته شده به ابعاد سازه های واقعی زیرسطحی نزدیک است. همانطور که در این جدول مشاهده می شود، سعی شده است که حتی امکان تمام بازه های عمقی و رسانایی الکتریکی محتمل در یک سازه نظامی زیرزمینی مورد توجه قرار گیرد.

جدول ۳- حالت های مختلف سازه های زیرسطحی به منظور انجام مدل سازی داده های الکترومغناطیس هوابرد.

شماره	نوع سازه	ابعاد سازه (متر)	عمق سقف سازه (متر)	تباين رسانايي الكتريكي سازه با سنگ های درونگیر (اهم. متر)	
۱	استوانه افقی	قطر: ۱۰ طول: ۱۵۰	۲۰	۱۹۵	
۲				۴۹۰	
۳				۹۸۰	
۴			۴۰	۱۰۰	۱۹۵
۵					۴۹۰
۶					۹۸۰
۷			۱۰۰	۱۰۰	۱۹۵
۸					۴۹۰
۹					۹۸۰

همانطور که می دانیم شدت پاسخ میدان مغناطیسی ثانویه با مجذور سوم فاصله رابطه عکس دارد. بنابراین فاصله بین جسم تا نقطه مشاهده ای تاثیر زیادی در امکان یا عدم امکان شناسایی آن دارد. بر این اساس نحوه تاثیر تغییر فاصله بین سنجنده الکترومغناطیسی تا سازه بررسی می شود. این فاصله می تواند شامل هر دو کمیت ارتفاع پرواز و عمق سازه و یا صرفاً یکی از آن ها باشد. از آنجایی که معمولاً کمیت ارتفاع پرواز نسبت به عمق سازه بدلیل مقاومت الکتریکی بسیار بالای هوا، تاثیر زیادی در شناسایی اهداف مورد نظر ندارد، بنابراین در اینجا ارتفاع پرواز یا ارتفاع سنسور الکترومغناطیسی پرنده از سطح زمین ثابت و معادل ۴۰ متر در نظر گرفته می شود؛ و بنابراین صرفاً عمق سازه از سطح زمین مورد توجه قرار می گیرد. عمق های بررسی شده در این مدل سازی عبارتند از ۲۰، ۴۰ و ۱۰۰ متر. در این پژوهش به منظور انجام مدل سازی مستقیم از کد رایانه ای معرفی شده استفاده شد. نتایج این بخش شامل فایل اکسل شامل ستون های فرکانسی و پاسخ مدل (مولفه های حقیقی و موهومی) است. این داده ها به عنوان ورودی در مرحله وارون سازی داده ها استفاده می شود.

به منظور تولید پاسخ های الکترومغناطیسی ناشی از این مدل های دو بعدی مذکور (جدول ۳)، از کد رایانه ای معرفی شده در این پژوهش استفاده شد. در این مقاله از کد رایانه ای ارائه شده توسط عرب امیری [۱]. که شامل دو بخش مدل سازی مستقیم و مدل سازی وارون داده های الکترومغناطیس هوایی است، استفاده شد. همانطور که ذکر گردید در ابتدا با توجه به حالت های مختلف جدول (۳)، مشخصات سازه شامل عمق و رسانایی الکتریکی توسط کاربر به نرم افزار ارائه می گردد و این کد رایانه ای قادر است در مرحله اول داده های الکترومغناطیسی ناشی از این مدل را تولید و در مرحله دوم از این داده ها به عنوان داده های ورودی برای انجام مدل سازی وارون استفاده نماید. خروجی نهایی به صورت فایل اکسلی است که شامل پنج ستون زیر است:

ستون اول: فرکانس های سنجنده الکترومغناطیسی (۱۸ فرکانس از ۱۰۰ تا ۵۰۰۰۰۰ هرتز)

ستون دوم: قسمت حقیقی پاسخ الکترومغناطیسی مدل

ستون سوم: قسمت موهومی پاسخ الکترومغناطیسی مدل

ستون چهارم: عمق محاسبه شده متناظر با فرکانس های ستون اول

ستون پنجم: مقاومت ویژه الکتریکی محاسبه شده متناظر با فرکانس های ستون اول

پس از محاسبه ستون های چهارم و پنجم که شامل عمق و مقاومت الکتریکی سازه های و زمین است، می توان شبه مقطع مقاومت ویژه پاسخ الکترومغناطیسی آن را ترسیم کرد. برای این کار می توان گرید مقطع مورد نظر را به روش *minimum curvature* در نرم افزار Surfer شبکه بندی نمود. این مقطع که در واقع به طور مستقیم از کد رایانه ای ارائه شده در این پژوهش بدست می آید، اصطلاحاً به عنوان شبه مقطع مقاومت الکتریکی زمین زیرسطحی نام برده می شود. به منظور رسیدن به مدل واقعی از زیرسطح زمین لازم است، این داده ها بطور دستی و بر اساس تفسیر مفسر در یک نرم افزار مناسب به مدل های لایه بندی واقعی زمین تبدیل شوند. به این کار اصطلاحاً مدل سازی یک

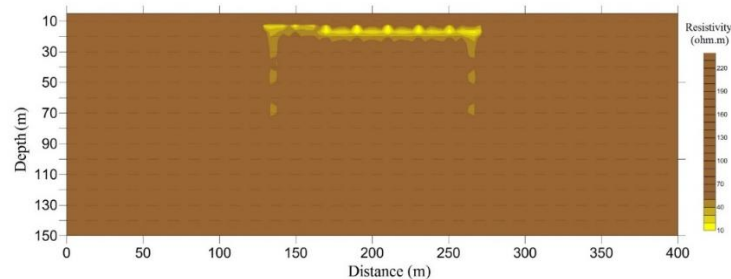
بعدی سونداژ مقاومت الکتریکی نام دارد. در این پژوهش برای انجام این کار از نرم افزار IX1D استفاده شده است. مدل نهایی خروجی در این مرحله به عنوان مقطع مقاومت ویژه الکتریکی زمین نامبرده می شود. این مقطع اطلاعات مفیدی از مقاومت ویژه الکتریکی ساختارها زیرسطحی ارائه می دهد.

شکل های (۱) تا (۹) شبه مقاطع مقاومت ویژه الکتریکی سازه های ذکر شده در جدول ۵-۳ (حالت های ۱ تا ۹) را نشان می دهند. همانطور که در این شکل ها مشاهده می شود مدلسازی تا عمق ۱۵۰ متری از سطح زمین انجام شده است. این شکل های به وضوح قدرت روش الکترومغناطیسی در شناسایی سازه های زیرسطحی را نشان می دهد.

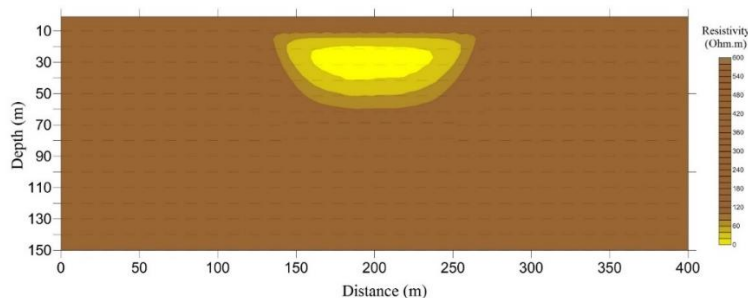
شکل (۱) مقطع وارون سازی شده ناشی از یک سازه استوانه ای شکل افقی با قطر ۱۰ و طول ۱۰۰ متر را نشان می دهد که با تباین مقاومت ویژه الکتریکی ۱۹۵ اهم متر در بازه عمقی ۲۰ تا ۳۰ متری از سطح زمین واقع شده است. همانطور که در این شکل مشاهده می شود نوار زرد رنگ نماینده جسم رسانا (سازه) در عمق حدود ۱۵ تا ۲۵ را نشان می دهد. بنابراین عمق سازه با حدود ۵ متر خطا به نحو مطلوبی مدلسازی و آشکار شده است. شکل های (۲) و (۳) نیز نتایج وارون سازی سازه مذکور با تباین مقاومت الکتریکی ۴۹۰ و ۹۸۰ اهم متر را نشان می دهند. همانطور که در این شکل ها نیز مشاهده می شود سازه مذکور به نحو مطلوبی اما با خطای عمقی ۵ تا ۱۰ متر مدلسازی و آشکار شده است.

شکل های (۴) تا (۶) مقطع وارون سازی شده ناشی از یک سازه استوانه ای شکل افقی با قطر ۱۰ و طول ۱۰۰ متر را نشان می دهد که به ترتیب با تباین مقاومت ویژه الکتریکی ۱۹۵، ۴۹۰ و ۹۸۰ اهم متر در بازه عمقی ۴۰ تا ۵۰ متری از سطح زمین واقع شده است. همانطور که مشاهده می شود در این شکل ها نیز سازه مورد نظر با وضوح مناسبی بازسازی شده است اما به نظر می رسد عمق برآورد شده در این وارون سازی حداقل دارای ۱۰ متر خطا است زیرا عمق سقف سازه را در ۵۰ متری برآورد کرده است.

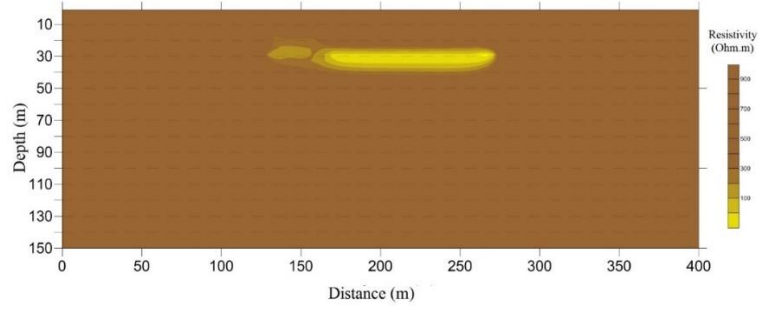
شکل های (۷) تا (۹) مقطع وارون سازی شده ناشی از یک سازه استوانه ای شکل افقی با قطر ۱۰ و طول ۱۰۰ متر را نشان می دهد که به ترتیب با تباین مقاومت ویژه الکتریکی ۱۹۵، ۴۹۰ و ۹۸۰ اهم متر در بازه عمقی ۱۰۰ تا ۱۱۰ متری از سطح زمین واقع شده است. همانطور که مشاهده می شود در این شکل ها نیز سازه مورد نظر با وضوح مناسبی بازسازی نشده است و موقعیت سازه عمدتاً بصورت یک توده و یا یک سازه کروی برآورد شده است علاوه بر این مشکل، عمق برآورد شده با خطای زیادی در حدود ۳۰ تا ۵۰ متر برآورد شده است. خطای دیگری که در این شکل ها مشاهده می شود تولید یک رسانای کم عمق کاذب نزدیک به سطح است. بنابراین می توان به این نتیجه رسید که در عمق های بالاتر از ۷۰ یا ۸۰ متر از سطح زمین علی رغم تباین رسانندگی بالا بین سازه و محیط اطراف، روش الکترومغناطیس هوایرد قادر به شناسایی هدف مورد نظر نیست.



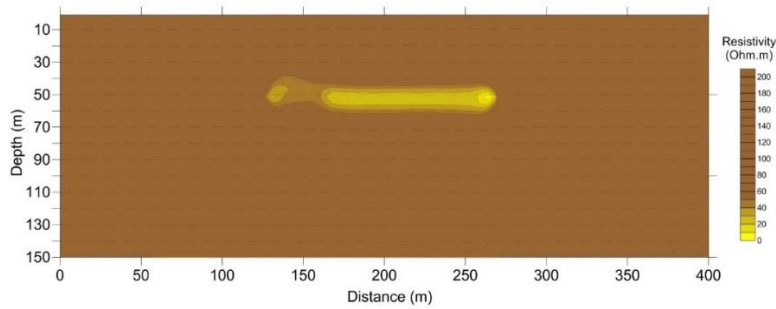
شکل ۱- نتایج وارون سازی داده های حاصل از سازه استوانه ای شکل افقی با قطر ۱۰ متر، مدفون در عمق ۲۰ متر و تباین رسانایی ۱۹۵ اهم متر.



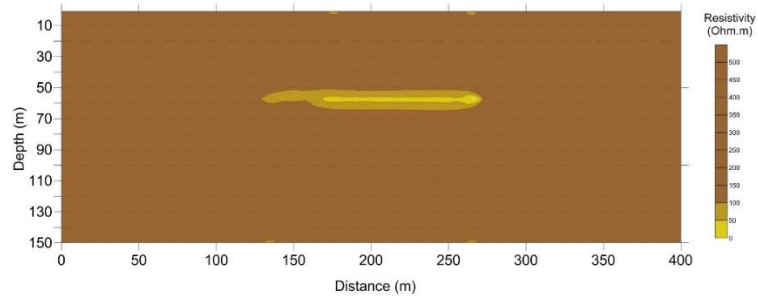
شکل ۲- نتایج وارون سازی داده های حاصل از سازه استوانه ای شکل افقی با قطر ۱۰ متر، مدفون در عمق ۲۰ متر و تباین رسانایی ۴۹۰ اهم متر.



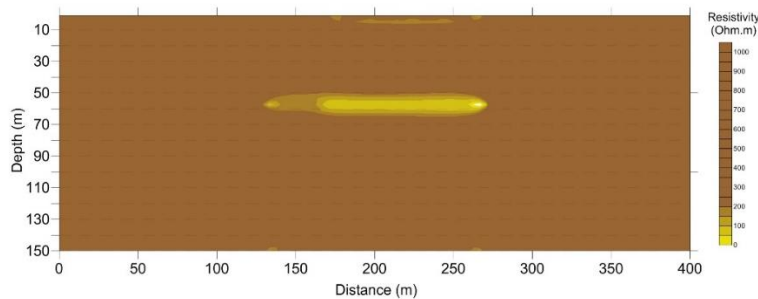
شکل ۳- نتایج وارون سازی داده های حاصل از سازه استوانه ای افقی با قطر ۱۰ متر، مدفون در عمق ۲۰ متر و تباین رسانایی ۹۸۰ اهم متر.



شکل ۴- نتایج وارون سازی داده های حاصل از سازه استوانه ای افقی با قطر ۱۰ متر، مدفون در عمق ۴۰ متر و تباین رسانایی ۱۹۵ اهم متر.

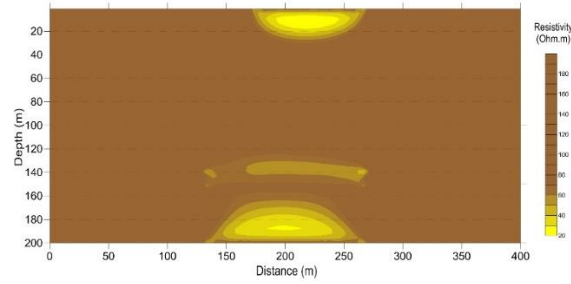


شکل ۵- نتایج وارون سازی داده های حاصل از سازه استوانه ای افقی با قطر ۱۰ متر، مدفون در عمق ۴۰ متر و تباین رسانایی ۴۹۰ اهم متر.

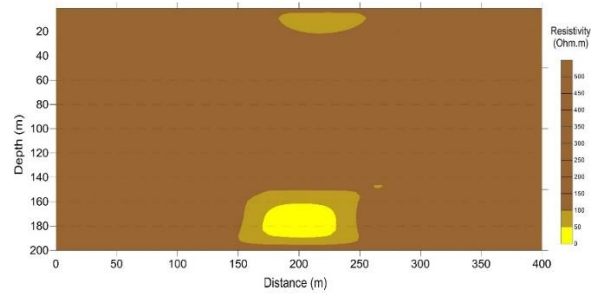


شکل ۶- نتایج وارون سازی داده های حاصل از سازه استوانه ای افقی با قطر ۱۰ متر، مدفون در عمق ۴۰ متر و تباین رسانایی ۹۸۰ اهم متر.

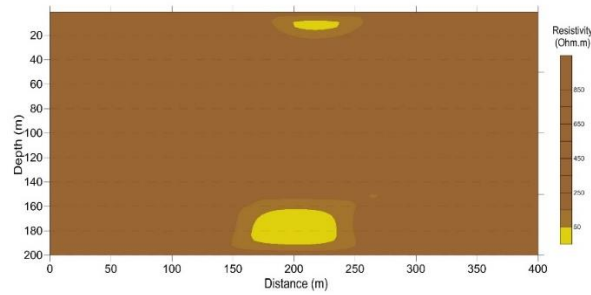




شکل ۷- نتایج وارون سازی داده های حاصل از سازه استوانه ای افقی با قطر ۱۰ متر، مدفون در عمق ۱۰۰ متر و تباین رسانایی ۱۹۵ اهم متر.



شکل ۸- نتایج وارون سازی داده های حاصل از سازه استوانه ای افقی با قطر ۱۰ متر، مدفون در عمق ۱۰۰ متر و تباین رسانایی ۴۹۰ اهم متر.



شکل ۹- نتایج وارون سازی داده های حاصل از سازه استوانه ای افقی با قطر ۱۰ متر، مدفون در عمق ۱۰۰ متر و تباین رسانایی ۹۸۰ اهم متر.



## نتیجه گیری

با توجه به هدف اصلی این پژوهش، نحوه امکان شناسایی سازه های زیرزمینی، به بررسی این موضوع پرداخته شد. برای بررسی همه جانبه نحوه استفاده از این مشاهدات برای کشف سازه های زیرزمینی، مسئله مورد نظر از دو جنبه مستقیم و معکوس مورد آنالیز قرار گرفت. در مسئله مستقیم موقعیت و ابعاد سازه مورد نظر معلوم در نظر گرفته شد و سیگنال الکترومغناطیسی آن محاسبه گردید. سپس با آنالیز سیگنال مدل سازی شده می توان به احتمال کشف سازه پرداخت. در مسئله معکوس با معلوم بودن سیگنال الکترومغناطیسی، با استفاده از روش معکوس سازی معرفی شده در این پژوهش، با شبیه سازی های متعدد نشان داده شد که روش مورد نظر از کارایی بالایی برخوردار بوده و می تواند یک الگوریتم مطمئن در زمینه تعیین مکان سازه های مدفون مورد استفاده قرار گیرد. نتایج این پژوهش نشان می دهد که سازه های نظامی به دلیل ماهیت مواد بکار رفته در آن ها و ایجاد یک تباین رسانندگی نسبت به سنگ های درونگیر می تواند توسط روش الکترومغناطیس هوابرد مورد شناسایی و مکان یابی قرار گیرد. مدلسازی های انجام شده در عمق های ۲۰ تا ۱۰۰ متر نشان داد که سازه هایی که عمق سقف آن ها حدوداً بیشتر از ۶۰ تا ۸۰ متر از سطح زمین باشند، علاوه بر تباین رسانندگی بارز نسبت به اطراف نمی توانند بطور مطلوبی توسط سنجنده های الکترومغناطیسی هوابرد شناسایی شوند. نکته قابل توجه دیگری که در این مدل ها قابل مشاهده است، اهمیت کمتر رسانندگی سازه نسبت به عمق در امکان شناسایی آن است. به عبارتی دیگر در روش الکترومغناطیس هوابرد، عمق سازه نسبت به رسانندگی الکتریکی آن تاثیر بیشتری در امکان شناسایی آن دارد. به عنوان مثال سازه ای که در عمق بالاتری ساخته شود (بیش از ۷۰ یا ۸۰ متر از سطح زمین) حتی اگر مواد بکار رفته در آن تباین رسانندگی بسیار بالایی با سنگ های اطراف داشته باشند باز هم توسط روش الکترومغناطیس هوابرد قابل شناسایی نخواهد بود.

همچنین راهکارهایی در زمینه پدافند غیرعامل برای کاهش احتمال کشف سازه های زیرزمینی ارائه می شود. یکی از این راهکارها در این زمینه علاوه بر افزایش عمق سازه، شناخت زمین شناسی منطقه ای است که قرار است سازه در آن محیط تاسیس شود. نتایج این پژوهش نشان می دهد در مناطق خاص زمین شناسی مانند حوضه های رسوبی با پاسخ الکترومغناطیسی آرام (رسانندگی آرام)، اهداف زیرزمینی با تباین رسانندگی بالاتر از ۲۰۰ اهم متر با وضوح مناسبی قابل شناسایی و مکان یابی هستند. با افزایش رسانایی الکتریکی سازه که در اثر افزایش استفاده از ترکیبات فلزی (بخصوص آهن) در آن ها رخ می دهد احتمال کشف آنها بالاتر می رود به طوری که اگر رسانندگی الکتریکی آنها از ۵۰۰ اهم متر تجاوز کند احتمال کشف آن ها تا اعماق ۷۰ متر هم وجود دارد. بنابراین بر اساس مطالب مذکور، یکی دیگر از راهکارهای موثر در زمینه کاهش احتمال کشف سازه های زیرزمینی، ساخت آن ها در مناطقی است که از لحاظ زمین شناسی دارای تغییرات رسانندگی الکتریکی طبیعی بالایی هستند. مکان هایی که در آن ها از لیتولوژی های مختلف رسوبی و آذرین تشکیل شده است، مانند کمر بند آتشفشانی ارومیه- دختر که با پهنای حدود ۳۰ تا ۵۰ و طول بیش از ۱۵۰۰ کیلومتر به موازات رشته کوه های زاگرس مناطقی زیادی از ایران را پوشش می دهد، به دلیل چین خوردگی و نفوذ توده های آذرین و در نتیجه افزایش پیچیدگی زمین شناسی، می تواند مکان مناسبی برای ساخت این سازه های باشد. مکان های دیگری نیز در ایران وجود دارد که به دلیل فعالیت های تکتونیکی بالا، این وضعیت را دارد. برای شناسایی این مناطق می توان از مراجع زمین شناسی ایران استفاده نمود.

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

## منابع و مراجع

- [۱] عرب امیری، ع، ارائه روشی بهبود یافته جهت مدل سازی معکوس داده های الکترومغناطیس هلیکوپتری حوزه فرکانس، رساله دکتری، دانشگاه شاهرود، ۱۳۸۸.
- [2] Sepp, E. M. "Deeply Buried Facilities: Implications for Military Operations"; Occasional Paper No. 14, Center for Strategy and Technology, Air War College, 2000.
- [3] Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sherrif, R. E. "Applied Geophysics"; Cambridge University Press, 1990.
- [4] Reynolds, J.M., 1997. "An Introduction to Applied and Environmental Geophysics". John Wiley and sons, 796.
- [5] Sengpiel, K.P., and Siemon, B., 2000. "Advanced inversion methods for airborne electromagnetic exploration", *Geophysics*, 65, 1983-1992.
- [6] Fraser, D.C., 1972. "A new multicoil aerial electromagnetic prospecting system", *Geophysics*, 37, 518-537.
- [7] Mundry, E., 1984. "On the interpretation of airborne electromagnetic data for the two-layer case", *Geophysical Prospecting*, 32, 336-346.