

فصلنامه علمی-ترویجی پدافند غیرعامل

سال چهارم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۲، (پیاپی ۱۶): صص ۶۳-۷۶

مدل سازی توانمندی سنجنده‌های ژئوفیزیکی در شناسایی تأسیسات زیرزمینی و راهکارهای مقابله با آن

احمد معدنچی زارع^۱، حمید دهقانی^۲، کیومرث موسی زاده^۳، سید روح الله تقوی^۴

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۹/۰۳

تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۰/۱۶

چکیده

یکی از پایدارترین اقدامات پدافند غیرعامل در حوزه راهبردی، استفاده از سازه‌های زیرزمینی و به خصوص تونل‌ها می‌باشد. این تونل‌ها در مناطق کوهستانی با سرباره‌های زیاد طراحی و ساخته می‌شوند. در مقابل، دشمن نیز اقداماتی در جهت توسعه روش‌های شناسایی این سازه‌ها انجام می‌دهد. همچنین افزایش قابلیت ادوات و تجهیزات تهاجمی، گام بعدی دشمن می‌باشد. موضوع این تحقیق، بررسی، ارزیابی و مدل سازی میزان کارایی فناوری‌های ژئوفیزیکی در حوزه آشکارسازی تأسیسات زیرزمینی می‌باشد. روش‌های هواپایه و فضاپایه، بیشتر مورد نظر دشمن می‌باشد. احداث و استفاده از چنین فضا‌های زیرزمینی، اثرات متفاوتی را بر پارامترهای سطح و زیر سطح زمین می‌گذارند. با استفاده از مدل سازی، توان شناسایی فناوری‌های مختلف ژئوفیزیکی در آشکارسازی اشیاء، اهداف و تأسیسات زیرزمینی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در پایان، راهکارهای مقابله (استتار، اختفا و فریب) با شناسایی تأسیسات زیرزمینی توسط این فناوری‌ها ارائه شده است.

کلیدواژه‌ها: تأسیسات زیرزمینی، سنجنده‌های ژئوفیزیکی، استتار، اختفا

۱- مجتمع دانشگاهی آمایش و پدافند غیرعامل - دانشگاه صنعتی مالک اشتر ahmad.madanchi@gmail.com - نویسنده مسئول

۲- همان hamid_deh@yahoo.com

۳- همان kiomarskms@yahoo.com

۴- همان sr.taghavi@ymail.com

۱- مقدمه

یکی از اقدامات پدافند غیرعامل بعد از مستحکم‌سازی و در رأس آن ساخت تونل با کاربری‌های مختلف، کاهش توان آشکارسازی دشمن یا استتار این‌گونه اهداف می‌باشد. برای داشتن دفاع ملی، منسجم و همه‌جانبه لازم است تا همه جوانب دفاع مورد توجه کافی قرار گیرد. هم‌ارز قرارگیری دفاع غیرعامل با دفاع عامل در دکترین نظامی قوای جهانی، لزوم پرداختن بیش از پیش به این مقوله را آشکار می‌سازد. استفاده از سرباره‌های مستحکم صخره‌ای و غیرقابل نفوذ، یکی از راهبردهایی است که امروزه همراه با رشد فناوری‌های احداث این‌گونه سازه‌ها بیش از پیش در بخش دفاع مورد توجه قرار گرفته است.

از طرف دیگر، آشکار بودن یک هدف هر چند مستحکم باعث کاهش هزینه دشمن در شناسایی و سهولت اعمال تهدید مترتب بر آن خواهد شد. استراتژیست‌های آمریکایی صراحتاً خواستار جهانی هستند که آمریکا «فرمانده و رهبر» آن باشد. مطابق «چشم‌انداز مشترک ارتش آمریکا در افق ۲۰۲۰»، این استراتژی از طریق «کسب برتری همه‌جانبه» تحقق خواهد یافت. کسب برتری همه‌جانبه با استفاده از ابزارهای «برتری اطلاعاتی» در تمامی ابعاد امور دفاعی (مفاهیم، دکترین، سازمان، فناوری‌ها و ...) قابل دستیابی می‌باشند.

برای کشور آمریکا مسئله کسب برتری اطلاعاتی در قالب موضوع آگاهی فضای نبرد دنبال می‌شود. در این خصوص در سال ۲۰۰۵ سندی تحت عنوان «قابلیت‌های پایه‌ای صنعتی دفاعی؛ آگاهی فضای نبرد» منتشر شد [۹]. مطابق این سند، آگاهی از فضای نبرد، مجموعه‌ای از قابلیت‌ها است که برای فرماندهان و نیروها، امکان دیدن، درک و فهم محیط پیرامون را فراهم نموده تا در آن عمل کرده و با دشمن روبرو شوند. برای این منظور، از قابلیت‌های مراقبتی متعددی به‌منظور کسب اطلاعات استفاده می‌کنند. برای مدیریت اطلاعات از یک محیط شبکه‌ای امن و برای تحلیل، درک و پیش‌بینی از مجموعه‌ای از قابلیت‌ها استفاده می‌شود. آگاهی از فضای نبرد، دانش حیاتی مورد نیاز برای به‌کارگیری دقیق نیرو، ناکام کردن یا پیش‌دستی کردن نسبت به تلاش‌های دشمن، و پشتیبانی درست در مکان مناسب و در زمان مناسب را فراهم می‌سازد. همچنین توسعه جنگ‌افزارهای ضد اهداف مدفون، مثل تسلیحات هوشمند GBU-28 و GBU-57 که دارای قدرت نفوذ و تخریب بالا در سرباره‌های سنگی می‌باشند، مدیران و فرماندهان نظامی را بر آن می‌دارد تا حداکثر اقدامات استتاری این اهداف را به انجام برسانند. همچنین توسعه فناوری‌های سنجشی در زمینه شناسایی اهداف مدفون، یکی از تهدیدات بالقوه این امر بوده و لازم است با شناسایی این روش‌ها راهکارهای مقابله با آن استخراج گردد.

می‌توان عنوان نمود که راه‌حل تعیین‌کننده و قطعی در جهت شناسایی و رصد این‌گونه تأسیسات زیرزمینی وجود ندارد. به‌عبارت دیگر، ابزار مفید در این حوزه به‌کارگیری ترکیبی از منابع مختلف

است که از جمله می‌توان به موارد: شناسایی تصویری، نظیر تصاویر حاصل از سنجش از دور هواپایه و فضاپایه، سنجش یا شناسایی نشانه‌هایی نظیر رصد خاک‌برداری و دپوهای وسیع خاک، برداشت‌های ژئوفیزیکی، صوتی، خروج مواد شیمیایی، شناسایی سیگنال‌هایی نظیر سیگنال‌های رادیویی یا راداری و در آخر، شناسایی از طریق عوامل انسانی نظیر استفاده از جاسوس اشاره نمود. سوال مهم و اساسی در انجام این پژوهش، استخراج توانمندی و نقاط ضعف هر فناوری در شناسایی اهداف زیرزمینی می‌باشد. به‌عبارت دیگر، نقش هر فناوری در روند شناسایی اهداف زیرزمینی چیست؟ با استخراج نقاط ضعف و محدودیت‌های هر فناوری می‌توان راهکارهای مقابله با آن را طراحی نمود.

شناسایی تأسیسات زیرزمینی زمانی آسان‌تر و سریع‌تر است که موقعیت تقریبی سازه مورد نظر معلوم باشد. بدیهی است داشتن موقعیت تقریبی اهداف زیرزمینی، مستلزم برخورداری از ابزار شناسایی است که می‌تواند حوزه‌های گسترده‌ای را شامل شود تا بتواند موقعیت نسبی و در صورت امکان، ابعاد سازه مدفون را تعیین کند. به‌عبارت دیگر، این قابلیت باید از طریق استفاده از یک مجموعه فناوری محقق گردد. بدیهی است این قابلیت می‌تواند سپس به‌عنوان سرخ برای دیگر منابع اطلاعاتی و جاسوسی به‌عنوان هدف قابل رصد تلقی گردیده تا به مکان و نقطه‌ای خاص متمرکز شود و اطلاعات کامل‌تر و جزئیات بیشتر در مورد هدف مورد نظر با استفاده از ابزار متعارف شناسایی کسب گردد. برای نیل به چنین قابلیت‌هایی لازم است گستره اقدامات را از محدوده عملیات جاسوسی و شناسایی متعارف فراتر دید و به دنبال روش‌هایی بود که دانشمندان و دیگر کارشناسان برای درک و گسترش اطلاعات خویش در مورد لایه‌های زیرین و درون زمین از این روش‌ها استفاده می‌کنند [۱۰]. ژئوفیزیک‌دانان و زمین‌شناسان از سال‌ها پیش تاکنون از امکان سنجش میدان ثقل یا گرانی‌سنجی، مغناطیس‌سنجی، امواج رادار، الکترومغناطیس و... جهت تحلیل و مطالعه نهشته‌های معدنی و ساختارهای زمین‌شناسی زیر سطحی استفاده می‌کنند. به‌عبارت دیگر، فناوری‌های ژئوفیزیکی می‌توانند حداکثر اطلاعات را در مورد یک هدف مدفون استخراج کرده و آخرین مرحله شناسایی آن محسوب گردد.

مطالب ارائه‌شده در این مقاله حاصل پژوهش، مدل‌سازی و تحقیقاتی است که برای اجرای پروژه‌ای در شناسایی تونل، توسط نویسندگان این مقاله در دانشگاه صنعتی مالک اشتر به انجام رسیده است.

۲- روش‌های شناسایی اهداف مدفون

اطلاعات به‌دست آمده از روش‌های مختلف همچون سنجش از دور، جاسوسی و دیگر آگاهی‌ها راجع به یک سازه می‌تواند به برنامه‌ریزان نظامی برای مواجهه با این اهداف کمک کند. جای شگفتی نیست که

با توجه به محدودیت‌های موجود در نگارش مقاله، در اینجا از روش‌های غیر ژئوفیزیکی شناسایی تأسیسات زیرزمینی صرف نظر نموده و صرفاً به روش‌های ژئوفیزیکی می‌پردازیم. امید است در آینده پژوهش‌های انجام‌شده توسط تیم نویسندگان این مقاله، روش‌های دیگر نیز به همین ترتیب منتشر گردد. همچنین متذکر می‌گردم مدل‌سازی‌های انجام‌شده که اغلب در محیط نرم‌افزار متلب و یا نرم‌افزارهای مرتبط با فناوری خاص صورت گرفته است، در هر فناوری ژئوفیزیکی به‌طور جداگانه منتشر شده و در اینجا به بیان نتایج آنها بسنده می‌گردد.

۲-۱- آشکارسازی اهداف مدفون با روش‌های ژئوفیزیکی

علم ژئوفیزیک، علم مطالعه زمین با استفاده از روش‌های فیزیکی است. این علم همان‌طور که از نامش پیداست با فیزیک زمین و جو اطراف آن سروکار دارد. به‌عبارت دیگر، موضوع ژئوفیزیک، فیزیک تمامی زمین از عمیق‌ترین بخش درونی زمین تا خارجی‌ترین بخش جو زمین را پوشش می‌دهد. بررسی مسائل بزرگ‌مقیاس درباره ساختار و رفتار دینامیکی زمین در شاخه‌ای از علم ژئوفیزیک تحت عنوان ژئوفیزیک جهانی گنجانیده می‌شود. از سوی دیگر، نیاز فزاینده بشر به آگاهی از اعماق زمین همچنین انواع فلزات و مواد معدنی و افزایش شدید مصرف مواد نفتی و گاز به ویژه در دهه‌های اخیر سبب توسعه بسیاری از روش‌های ژئوفیزیکی با دقت‌های زیاد گردیده است. به همین خاطر بکارگیری خاص روش‌های ژئوفیزیکی در اکتشاف ذخائر معدنی و نفت سبب تقسیم‌بندی این روش‌ها در شاخه‌ای از ژئوفیزیک به نام ژئوفیزیک کاربردی یا اکتشافی گردیده است. به‌طور کلی می‌توان گفت، ژئوفیزیک اکتشافی شامل اندازه‌گیری خصوصیات فیزیکی سنگ‌های زیرسطحی با استفاده از تکنیک‌ها و وسایل مخصوص، به‌منظور اکتشاف و پی‌جویی ذخایر و مواد پنهان‌شده در دل زمین و همچنین برای مقاصد مهندسی می‌باشد [۲].

همچنین آمریکا در راستای برنامه کسب برتری اطلاعاتی، فناوری‌های ژئوفیزیکی را به‌منظور استفاده در آگاهی از فضای نبرد و اهداف نظامی خود مد نظر قرار داده است. برای پشتیبانی از این قابلیت‌ها، مجموعه‌ای از فناوری‌ها معرفی شده است که تعداد زیادی از آن‌ها به بلوغ رسیده و تعدادی از آن‌ها در حال مطالعه، تحقیق و توسعه می‌باشند. در ادامه، به بررسی اجمالی فناوری‌های ژئوفیزیکی حوزه آشکارسازی تأسیسات زیرزمینی پرداخته می‌شود. این فناوری‌ها ابزارهایی هستند که برتری اطلاعاتی را در حوزه سنجش زیرسطح فراهم می‌آورند. برخی از اهدافی که با استفاده از این فناوری‌ها رصد می‌شوند، به قرار زیر می‌باشند.

- آشکارسازی و مکان‌یابی ساختارها و زیر ساخت دست ساز بشر زیر سطح زمین

پیدا کردن تأسیسات زیر زمینی کاملاً مشکل است و تجربیات و فناوری لازم برای انجام چنین کاری به‌طور کامل توسعه پیدا نکرده است. بنابراین، منابع انسانی می‌تواند به‌عنوان راه و ظرفیتی قابل توجه برای شناسایی تأسیسات زیرزمینی مورد توجه قرار گیرد. به‌طور کلی به وسیله ترکیب ابزارهای پی جویی زمین، ماهواره‌ها و گزارشات جاسوسی احتمال شناسایی مکان تأسیسات زیر زمینی وجود دارد [۱۱].

اگر بخواهیم دسته‌بندی‌ای از روش‌های شناسایی اهداف مدفون ارائه نماییم می‌توانیم آن‌ها را در چهار گروه دسته‌بندی نماییم. این چهار گروه عبارتند از: ۱- عوامل اطلاعاتی و جاسوسی، ۲- روش‌های سنجش از دور، ۳- روش‌های ژئوفیزیکی و ۴- روش‌های ترکیبی و نوین. در این مقاله روش‌های ژئوفیزیکی مد نظر بوده و فرصتی برای روش‌های دیگر نمی‌باشد. با توجه به مراحل شناسایی شامل آشکارسازی^۱، تشخیص^۲ و شناسایی کامل^۳ بهتر است در ابتدا بیان شود که فناوری‌های سنجش از دور و عوامل جاسوسی به آشکارسازی محدوده هدف پرداخته و فناوری‌های دیگر، گام‌های بعدی شناسایی را دنبال می‌کنند.

در دهه‌های اخیر، با به‌کارگیری نسل‌های پیشرفته و جدید سنجنده‌های تصویربرداری در سکوها ماهواره‌ای، امکان کسب اطلاعات ارزشمند مکانی و طیفی با دقت و قابلیت اعتمادپذیری بالا فراهم آمده است؛ از این روی، رویکرد استفاده از این محصولات در اهداف نظامی پررنگ‌تر شده است. کسب اطلاعات ارزشمند نظامی با استفاده از فناوری سنجش از دور، بر خلاف روش‌های متعارف نظامی که پیچیده، پرهزینه و اغلب خطرناک هستند، فرآیندی سریع، مطمئن و با قابلیت‌های پردازشی بالاست [۱۱].

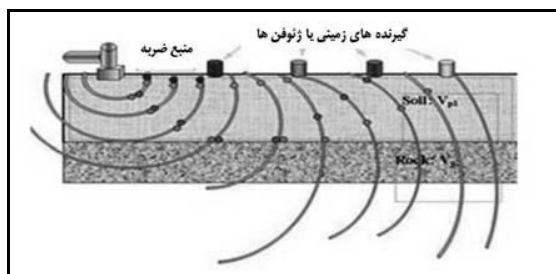
با استفاده از فناوری سنجش از دور، امکان شناسایی زیرساخت‌های نظامی و غیرنظامی (نظیر فرودگاه‌ها، بنادر، نیروگاه‌ها، مراکز فرماندهی و کنترل و...)، تعیین موقعیت اهداف جهت هدف‌گیری تسلیحات هدایت‌شونده (نظیر موشک‌های کروز)، پایش نقل و انتقال تجهیزات نظامی و ... فراهم شده است [۱]. همگام با توسعه روش‌های دستیابی اطلاعات نظامی از تصاویر ماهواره‌ای و فناوری سنجش از دور، روش‌هایی به‌منظور استتار اهداف مورد نظر (مراکز و زیرساخت‌های نظامی و غیرنظامی) از دید سنجنده‌های سنجش از دور نیز ارائه شده است [۱۲].

شناسایی برخی از اهداف عمرانی- نظامی (مانند ابنیه، سازه‌ها، تونل‌ها و زیرساخت‌های زیرزمینی) با توجه به ساختار، پیچیدگی و موقعیت مکانی آن‌ها و همچنین انجام اقدامات استتاری توسط دشمن، امری بسیار مهم و در عین حال پیچیده به‌شمار می‌رود [۱۳].

- 1- Detection
- 2- Recognition
- 3- Identification

مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اکتشافات مستقیم کانی‌ها این روش کاربرد کمی دارد زیرا جایی که فصل مشترک سنگ‌های مختلف خیلی بی‌نظم باشند، نمی‌توانند نتایج خوبی ارائه دهد [۱۴]. رفتارسنجی لرزه‌ای غیرفعال در بسیاری از آزمایشات برای شناسایی مکان زیرزمینی به‌طور موفق اجرا شده است که می‌تواند دقیق‌ترین روش حسی در حال حاضر باشد. پیمایش لرزه‌ای غیرفعال بر اساس همان اصول روش لرزه‌ای فعال است: گسترش و تکثیر موج الاستیک درون زیرلایه [۱۰].

فرق حسگر فعال با غیرفعال در این است که در حسگر فعال، فعالیت لرزه‌ای را به وسیله عملیات کندن و رفت‌وآمد تونل رفتارسنجی می‌کنند؛ اما در رفتارسنجی غیرفعال از ژئوفن^۱ (زمین آوا) استفاده می‌شود که یک سیگنال موج را انتقال می‌دهند. از این رو به‌طور موثر منبع سیگنال مکان‌یابی می‌شود [۱۰].



شکل ۱- نمای کلی فناوری لرزه‌سنجی [۱۵]

برای مدل‌سازی اهداف زیرزمینی به روش لرزه، می‌توان از نرم‌افزار GXII استفاده نمود. در مدل‌سازی‌های انجام‌شده مشخص گردید این روش می‌تواند برای شناسایی اهداف زیرزمینی نسبتاً بزرگ موثر باشد. اما با توجه به این که امکان استفاده از این فناوری فقط در سکوه‌های زمین‌پایه و آن هم با اثرات جانبی، وجود دارد، این روش کمتر مورد توجه شناسایی نظامی است.

۲-۱-۲- روش گرانی^۲

کاوش گرانی از مطالعه میدان گرانشی زمین، موضوعی است که در ۲۵۰ سال گذشته مورد توجه دانشمندان ژئودزی در تعیین شکل زمین بوده است. امروزه معلوم شده است که بزرگی گرانی در روی سطح زمین به پنج عامل بستگی دارد که عبارت‌اند از: عرض جغرافیایی، ارتفاع، توپوگرافی زمین اطراف، جزر و مد زمین و تغییرات چگالی زیر سطحی. آخرین عامل، تنها عاملی است که در کاوش گرانی دارای اهمیت بوده و اثر آن معمولاً فوق‌العاده کمتر از سایر عوامل است. برای مثال، تغییرات گرانی از استوا تا قطب حدود

- آشکارسازی و مکان‌یابی فعالیت دست‌ساز بشر زیر سطح زمین (نقب پناهگاه و فعالیت نظامی)
- آشکارسازی و مکان‌یابی انفجارهای هسته‌ای زیر سطح زمین
- توصیف انفجارها و کلاهک‌های انفجاری زیر سطح زمین
- توصیف انفجارهای هسته‌ای زیر سطح زمین

بررسی‌های ژئوفیزیکی در عمل به چهار صورت زمینی، هوایی، دریایی و درون‌چاهی اجرا می‌شوند. روش‌های ژئوفیزیکی امروزه از تنوع زیادی برخوردار شده‌اند. به طوری که امروزه یک روش یا دستگاه فقط مخصوص یک پروژه یا اکتشاف یک فلز خاص می‌باشد. وجود یک هدف زیرزمینی باعث ایجاد یک بی‌هنجاری در محیط می‌شود. هر یک از این بی‌هنجاری‌ها (چگالی، دی‌الکتریک، نفوذپذیری الکترومغناطیسی و ...) در یک فناوری قابل آشکارسازی می‌باشد. همان‌طور که گفته شد ژئوفیزیک علاوه بر کاربرد نظامی، کاربردهای دیگری نیز دارد که از آن جمله می‌توان به: اکتشافات معدنی، اکتشاف منابع نفت، اکتشاف منابع آب، بررسی وضعیت سنگ بستر و شواهد زمین‌شناسی یک منطقه، مطالعات اولیه در پروژه‌های عمرانی از قبیل: سدسازی، راه‌سازی، ساختمان‌سازی و... اشاره کرد [۲].

از بین فناوری‌های مختلف ژئوفیزیک، فقط سه روش قابلیت برداشت هوایی را دارند. این روش‌ها عبارت‌اند از: روش گرانی، روش مغناطیسی و روش الکترومغناطیس. یکی از روش‌های ارزیابی توانمندی یک فناوری، شبیه‌سازی و سنجش با مدل‌های ساخته‌شده در محیط نرم‌افزار می‌باشد. با شبیه‌سازی مدل‌های مختلف اهداف مدفون در این فناوری‌ها می‌توان قابلیت آن‌ها در شناسایی اهداف مدفون را با توجه به دقت دستگاهی موجود ارزیابی نمود.

۲-۱-۱- روش لرزه‌ای^۱

در این روش، امواج لرزه درون زمین گسترش می‌یابند. این امواج لرزه‌ای پس از برخورد به لایه‌های مختلف زمین و اشیاء موجود در آن‌ها بازتاب و به سطح زمین می‌رسند. بازتابش امواج توسط ابزارهای حساس به نوسان ثبت می‌شوند. این امواج در سطح زمین توسط آرایه‌ای از لرزه‌سنج‌ها ثبت و در آخر، تحلیل و تفسیر می‌شود شکل (۱). روش لرزه‌ای به دو صورت فعال و غیر فعال انجام می‌گیرد. این روش از نظر میزان هزینه و مطالعات انجام‌شده، مهم‌ترین و پرهزینه‌ترین فناوری ژئوفیزیکی است. برتری این روش به روش‌های دیگر از چند جهت است که مهم‌ترین آن‌ها دقت زیاد، توان تفکیک بالا و عمق نفوذ زیادی است که این روش دارد. بیشترین استفاده از روش‌های لرزه‌ای در اکتشافات نفت است و چاه‌های اکتشافی به ندرت بدون اطلاعات لرزه‌ای تعیین محل می‌شوند. همچنین این روش برای جستجوی آب‌های زیرزمینی و در کارهای مهندسی، در پی ساختمان‌های بزرگ، سدها، بزرگراه‌ها و بندرگاه‌های پر اهمیت

2- Geophone
3- Gravity

1- Seismic

این اطلاعات راجع به گسترش و ضخامت مواد مغناطیسی هستند. نقشه‌های مزبور در علوم هوانوردی و دریانوردی نیز از کاربرد ویژه‌ای برخوردار هستند.

تمام توانایی‌های فوق برای روش مغناطیس‌سنجی، مرهون این حقیقت است که معمولاً سنگ‌های رسوبی اثرات مغناطیسی بسیار جزئی دارند؛ از این رو تغییرات شدت میدان مغناطیسی در سطح زمین را می‌توان مربوط به تغییرات لیتولوژی و عمق پی سنگ منطقه و یا وجود توده‌های آذرین که شدت مغناطیسی بالاتری را دارا می‌باشند، دانست [۱۵].

متخصصان علوم زمین، با مطالعه دیرینه مغناطیسی زمین توانسته‌اند وجود حرکت در صفحات لیتوسفر زمین را (که در فرضیه "تکتونیک" صفحه‌ای بیان شده بود)، ثابت نمایند و جهت حرکت و سرعت حرکت آن‌ها را تعیین نمایند.

امروزه انجام مغناطیس‌سنجی و نیز روش‌های جدید سنجش از راه دور مغناطیس‌سنجی، ما را به بررسی مناطق وسیع با صرف هزینه اندک قادر ساخته است [۱۵].

۲-۱-۴- روش الکترومغناطیسی^۳

اساس روش الکترومغناطیسی این است که امواج الکترومغناطیس در رساناها، جریان‌هایی القاء می‌کنند. جریان‌های ایجادشده، خود منشأ امواج الکترومغناطیسی جدیدی می‌شوند که می‌توان آنها را با تجهیزات مناسب آشکارسازی کرد (شکل ۲). هم‌خانواده روش EM، ابزارهای فلز یابی است که در حد وسیعی در بازرسی‌ها و در کشف مین‌های جنگی به کار می‌روند. روش EM معمولاً با دو سیم‌پیچ به نام سیم‌پیچ فرستنده و سیم‌پیچ گیرنده انجام می‌شود. یکی از مزایای عمده روش EM بر سایر روش‌های الکتریکی که نیاز به الکتروود دارند، سریع‌تر بودن عملیات برداشت است و دیگر آنکه می‌توان برای برداشت هوابرد، یک سیستم را بر روی هواپیما یا بالگرد نصب و از آن استفاده کرد. روش EM هوابرد و روش مغناطیس‌سنج هوابرد ابزارهایی اساسی برای اکتشاف شناسایی کانی‌های فلزی هستند.

محدودیت عمده روش EM عمق نفوذ کم جریان القاء شونده است، که این عمق بیشتر از چند صد متر نیست. به علت محدودیت عمق نفوذ، روش EM در اکتشاف نفت به کار نمی‌رود. ضمناً چون روش EM به ساختارهای مقاوم و غیر رسانا حساس نیست به ندرت در بررسی‌های مهندسی به کار می‌رود.

۲-۱-۴-۱- روش VLF^۴

منبع به‌کاربرده در روش VLF امواج الکترومغناطیسی با فرکانس پایین در باند ۲۵ - ۱۵ کیلو هرتز است که توسط فرستنده‌های رادیویی قوی ایجاد می‌شوند.

۵ میلی‌گال یا ۰/۵ درصد مقدار متوسط g (۹۸۰ گال) است، در حالی که اثر ارتفاع در بعضی حالت‌ها ممکن است به ۰/۱ گال و یا ۰/۰۱ درصد g بالغ شود. از طرف دیگر یک بی‌هنجاری گرانی بزرگ در اکتشاف نفت ممکن است حدود ۱۰ میلی‌گال (۰/۰۱ درصد g) باشد، در حالی که در مناطق معدنی مقدار آن شاید به یک دهم این مقدار بالغ شود [۲].

بنابراین واضح است که تغییرات g که در امر کاوش بسیار حائز اهمیت است نه تنها در مقایسه با خود مقدار گرانی g، بلکه در مقایسه با اثرهای تغییرات زیاد در عرض جغرافیایی و ارتفاع نیز بسیار کوچک است. خوشبختانه عملاً حذف این تغییرات بزرگ با دقت کافی امکان‌پذیر است [۲].

یکی از قابلیت‌های این روش، امکان برداشت هوایی است که باعث توجه نظامیان به آن شده است. برداشت هوایی در روش گرانی با چند تکنیک گرانی، گرادیان گرانی افقی و قائم امکان‌پذیر می‌باشد. روش گرانی‌سنجی هواپایه، شناسایی و بررسی منطقه مورد نظر را در زمان کوتاهی امکان‌پذیر می‌سازد. این روش نسبت به روش‌های سنجش از دور (ماهواره‌ای)، از دقت لازم جهت تعیین مکان سازه‌های زیرزمینی مدفون شامل سازه‌های نوع سطحی^۱ و نوع حفاری‌شده^۲ برخوردار است. از طرفی دیگر پیشرفت‌های سریعی که ناشی از اختصاص بودجه‌های هنگفت توسط وزارت دفاع امریکا و روسیه در ۱۰ سال گذشته در دستگاه‌های گرانی‌سنجی و گرادیان‌سنجی گرانی به‌وجود آمده، خود گویای اهمیت این روش و کاربردهای فراوان آن می‌باشد [۳].

۲-۱-۳- روش مغناطیس‌سنجی

در این روش، اندازه‌گیری تغییرات میدان مغناطیسی زمین انجام می‌شود. چرا که برخی از مواد مانند مگنتیت در میدان مغناطیسی زمین، آنومالی‌های بالای مغناطیسی نشان می‌دهند. کانسارهای آهن، مس‌های اسکارن، نیکل و آزنیت به دلیل همراهی با کانه‌های مغناطیسی، با برداشت‌های مغناطیس‌سنجی به راحتی قابل اکتشاف‌اند.

اساس روش مغناطیس‌سنجی بر اندازه‌گیری مؤلفه‌های میدان مغناطیسی زمین توسط دستگاه‌های مختلف مگنتومتر مبتنی است. در این روش مواردی چون: «شدت کل میدان مغناطیسی»، «مؤلفه‌های قائم و افقی میدان مغناطیسی»، و «زوایای میل و انحراف میدان مغناطیسی زمین» ثبت می‌شود و پس از آن، تصمیمات متعددی از جمله حذف آثار تغییرات روزانه و سالیانه میدان مغناطیسی زمین، نقشه‌های منحنی‌های هم‌شدت، هم‌انحراف و هم‌میل تهیه می‌شود که اطلاعات مفیدی در اختیار قرار می‌دهند.

3- Electromagnetic
4- Very Low Frequency

1- Cut-and-Cover
2- Tunneling

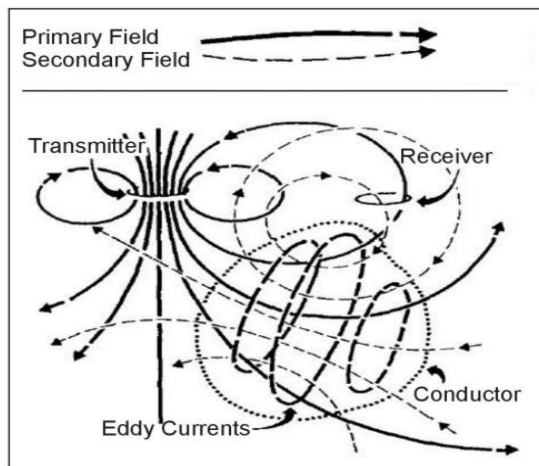
گیرنده VLF یک دستگاه دستی کوچک حاوی دو آنتن هوایی عمود بر هم است که می‌تواند با فرکانس‌های معین فرستنده تنظیم شود. جهت فرستنده را می‌توان با چرخاندن آنتن افقی حول محور قائم (تا رسیدن به حالت صفر) پیدا کرد. سپس خطوط برداشت در ناحیه تحت مطالعه عمود بر امتداد (انتشار امواج) طرح‌ریزی می‌شود. آنتن عمودی دستگاه، حول یک محور افقی عمود بر خط برداشت چرخانده می‌شود و زاویه تیلت در حالت صفر خوانده می‌شود. پروفیل‌های زاویه تیلت به دست آمده از این روش مشابه شکل (۳) می‌باشند و محل توده رسانای زیرسطحی جایی خواهد بود که مقدار زاویه تیلت صفر شود.

مزایای روش VLF عبارت‌اند از اینکه دستگاه صحرائی آن کوچک و سبک است، به راحتی توسط یک نفر قابل اجرا است و به نصب فرستنده در محل نیاز ندارد. روش‌های ابداعی می‌توانند با شبکه‌ای از این گونه گیرنده‌ها و سیستم‌های ارسال کننده سیگنال، روش موثری برای شناسایی فعالیت‌های زیر زمینی ایجاد کنند. این روش معایبی نیز دارد که به عنوان نمونه، برای یک بررسی خاص، ممکن است فرستنده مناسبی که بردار مغناطیسی تولید کند و امتداد زمین‌شناسی را نیز قطع کند وجود نداشته باشد. عمق نفوذ این روش نسبت به روش زاویه تیلت با فرستنده محلی کمتر است. روش VLF را می‌توان در برداشت‌های هوایی نیز به کار برد.

۲-۱-۵- روش مقاومت ویژه (ژئوالکتریک)

در این روش، یک ولتاژ الکتریکی در یک نقطه از زمین اعمال شده و در نقاط دیگر، ولتاژ دریافتی اندازه‌گیری می‌شود. در روش‌های الکتریکی از برخی خواص الکتریکی مواد، مانند پتانسیل‌های الکتریکی طبیعی، رسانایی الکتریکی و ثابت دی الکتریک استفاده می‌شود. با استفاده از ولتاژ دریافتی، اندازه کمیت‌های الکتریکی در نقاط مختلف محاسبه شده و پس از انجام تصحیح نقشه‌های مربوط به خواص الکتریکی زمین به دست می‌آید. با بررسی این نقشه و مدل‌های مرجعی که وجود دارد، می‌توان جنس مواد مختلف و عمق تقریبی آن‌ها را تخمین زد (شکل ۴). روش مقاومت ویژه الکتریکی که روش الکتریکی گالوانیکی نیز نامیده می‌شود، بعضی مواقع در محل‌های مخزن زیرزمینی برای تعیین شرایط زمین‌شناختی و هیدروژئولوژیکی کم‌عمق و تعیین محل زبانه‌های آلوده باقیمانده و شناور مفید می‌باشد. با اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی به طریق جریان مستقیم در سطح زمین، این روش ژئوفیزیکی می‌تواند در موارد زیر سودمند باشد [۴]:

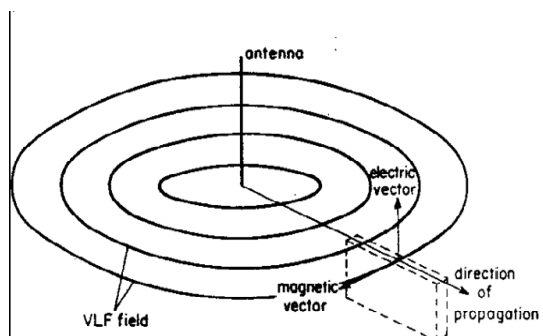
- تعیین محل مناطق شکسته، گسل‌ها، کارست و دیگر مسیرهای حرکت آب‌های زیرزمینی یا آلاینده‌ها
- تعیین محل عدسی‌های رسی و کانال‌های ماسه
- تعیین محل مناطق آب معلق و عمق آب زیرزمینی



شکل ۲- نمای کلی روش الکترومغناطیس و نحوه انتشار و دریافت موج [۱۸]

این فرستنده‌های رادیویی در سیستم‌های مخابراتی و ناوبری کاربرد دارند. چندین ایستگاه در سراسر دنیا وجود دارد که چنین فرکانس‌هایی دارند و به‌طور دائم امواجی را ارسال می‌کنند. از چنین علائمی می‌توان برای اکتشاف در فواصل هزاران کیلومتر از فرستنده استفاده کرد.

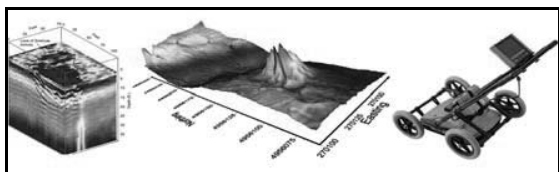
در فواصل دور از منبع، میدان الکترومغناطیسی اساساً صفحه‌ای و افقی است (شکل ۳). مؤلفه الکتریکی (E) در صفحه قائم و مؤلفه مغناطیسی عمود بر امتداد انتشار موج در صفحه افقی قرار می‌گیرد. توده رسانایی که در جهت فرستنده امتداد دارد توسط بردار مغناطیسی قطع می‌شود و جریان‌های الکتریکی پیچکی، یک میدان الکترومغناطیسی ثانویه ایجاد می‌کنند. توده‌هایی که امتدادشان عمود بر امتداد انتشار امواج است به‌طور موثر توسط بردار مغناطیسی قطع نمی‌شوند.



شکل ۳- اصول روش VLF. خطوط منقطع یک جسم رسانای تخت را نشان می‌دهد که در جهت انتشار امواج امتداد دارد و مؤلفه مغناطیسی میدان به‌طور موثر این توده را قطع می‌نماید [۱۸]

می کند و به وسیله اندازه گیری تفاوت در زمان بازتاب از یک نقطه به نقطه دیگر، عکس هایی با شفافیت بالا از زیرلایه تولید می نماید. به دلیل اینکه نفوذپذیری هوا به شکل قابل ملاحظه ای از خاک پیرامون متفاوت است؛ روش GPR برای کشف حفره های هوا بسیار موثر خواهد بود [۱۷].

وقتی که یک پالس رادار ساطع شده از آنتن فرستنده به یک ناپیوستگی الکتریکی برخورد می کند، بخشی از آن از فصل مشترک عبور کرده و بخشی بازتاب می گردد. این امر ناشی از تغییر امپدانس امواج الکترومغناطیس در فصل مشترک دو محیط می باشد. اگر زمانی را که پالس به منعکس کننده در زمین می رسد و به آنتن گیرنده باز می گردد اندازه گیری کنیم، با معلوم بودن سرعت پالس می توان موقعیت منعکس کننده را مشخص نمود. از این لحاظ و در بعضی موارد دیگر مانند نمونه برداری، پردازش و نمایش داده ها، رادار نفوذی به زمین، مشابه روش لرزه ای می باشد. رادار نفوذی به زمین روشی غیر مهلک و مخرب است، در نتیجه می توان در محیط های حساس از آن استفاده نمود. (نمایش یک سنجنده GPR را در شکل (۵) ببینید).

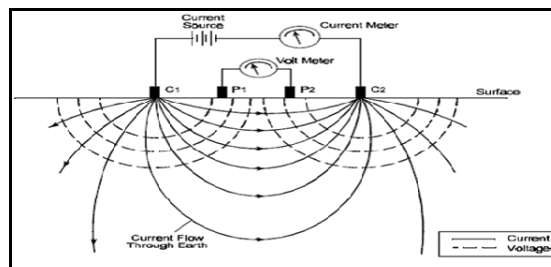


شکل ۵- یک سنجنده GPR کششی به همراه مدل برداشت سه بعدی [۸]

۲-۱-۶-۱- کاربرد های روش GPR

- تعیین ضخامت افق های خاک و عمق سطح ایستایی
- آشکارسازی حفرات پر شده از هوا، کانال ها و تونل های مدفون
- به نقشه در آوردن مناطق آلوده
- بررسی شرایط ساخت سازه های عظیم مانند سد و پل
- آشکارسازی اشیاء مدفون در بررسی های باستان شناسی
- تعیین ضخامت یخ
- بررسی شرایط لایه های آسفالت در جاده ها
- علی رغم قابلیت های بالای این روش، به علت عمق نفوذ محدود آن، GPR در بررسی های نزدیک سطح (عموماً کمتر از ۵۰ متر) استفاده می شود [۱۷].

در فناوری GPR از پارامتر ثابت دی الکتریک مواد مختلف برای شناسایی آن ها استفاده می شود. فناوری GPR می تواند یک تصویر سه بعدی از زیرسطح، در اختیار کاربر قرار دهد. با استفاده از داده های اخذ شده توسط این فناوری می توان با دقت زیادی عمق اشیای طبیعی و دست ساز بشر زیرسطح را تعیین نمود. در این



شکل ۴- نمای کلی فناوری سنجش الکتریکی [۱۸]

- بعضی مواقع تعیین محل مقادیر وسیعی از زباله های آلوده باقیمانده و شناور

انواع آرایش الکترونی (به طور مثال ونر، شلومبرژه، دو قطبی - دو قطبی) می تواند بسته به نوع کاربرد و قدرت تفکیک آن ها مفید باشد. نوع جریان الکتریکی از یک جهت الکتروود وارد زمین می شود. جهت الکتروود دیگر، میزان ولتاژ را اندازه گیری می کند. الکتروودها با فاصله بیشتر، برای بررسی عمیق تر به کار می روند. از آنجا که مواد گوناگون زیر سطحی مقاومت ویژه متفاوت دارند، اندازه گیری های سطحی در تعیین تغییرات قائم و جانبی مواد زیرین می تواند مفید باشد. شکل (۴) نمودار شماتیک مقاومت ویژه الکتریکی مورد استفاده در آرایه ونر را نشان می دهد. به طور کلی روش های الکتریکی سطحی، کمتر در میدان های نفتی به کار می روند، زیرا بیشتر این متدها برای اکتشاف در اعماق کم مفید هستند و معمولاً نمی توانند اطلاعات مفیدی از اعماق بیشتر از ۵۰۰ متر (بهترین شرایط ۳۰۰ متر) را فراهم نمایند [۱۶].

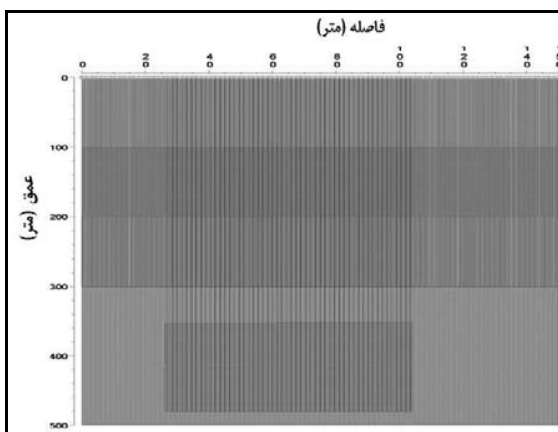
به دلیل نیاز به اتصال الکتروودها به زمین، استفاده از این فناوری فقط در سکوهای زمین پایه ممکن است. از جمله کاربردهای این روش می توان به مکان یابی بخش های ترک خورده و معیوب، آشکارسازی آب های زیرزمینی و نشر آلودگی های شناور اشاره نمود. این فناوری به علت وابستگی به سطح زمین، قابلیت برداشت هوایی نداشته و در بررسی های نظامی و یا به عبارت دیگر، در شناسایی تأسیسات زیرزمینی کمتر مورد استفاده قرار می گیرد.

۲-۱-۶-۲- رادار نفوذی زمین GPR^۱

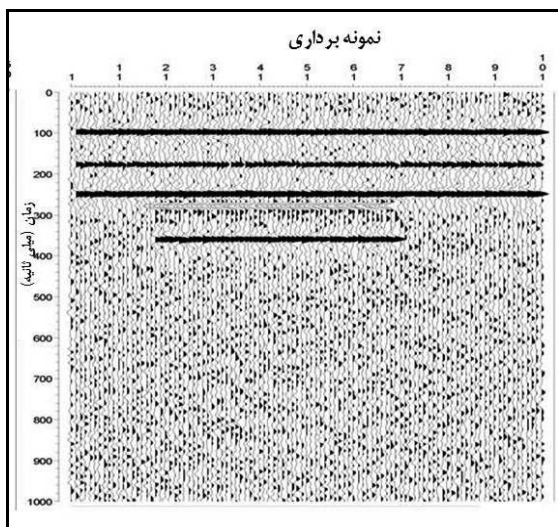
در رادار نفوذکننده در زمین (GPR) اصول بازتاب موج، مشابه آنچه در روش لرزه ای گفته شد، می باشد. با این وجود به جای بازتاب موج های الاستیک روی تغییرات چگالی، روش GPR بر روی بازتاب موج های الکترومغناطیس در مرزهای مواد با ثابت دی الکتریک متفاوت و یا نفوذپذیری نسبی مغناطیس مواد، متکی است. دستگاه GPR پالس های امواج الکترومغناطیسی با فرکانس بالا را از طریق یک آنتن به داخل زمین انتقال می دهد و بازتاب این امواج را دریافت

1- Ground Penetration Radar

سطر قابل محاسبه است) تکرار گردد. شکل (۶) الف: از بالا به پایین لایه‌های شیل، سنگ آهک، دولومیت و آنهیدرایت را نشان می‌دهد. مدل‌سازی در محیط متلب و نرم‌افزار GXII با در نظر گرفتن فاکتور ضریب فشردگی‌های مختلف و پاسخ ضربه هر لایه صورت گرفته است. سرعت حرکت موج بر اساس فشردگی تغییر نموده و بر اساس آن می‌توان مرزهای لایه‌ها را تفکیک نمود. در این مدل‌سازی مسیر حرکت رفت و برگشتی موج به صورت خطوط عمودی نشان داده شده‌اند [۵].



(الف)



(ب)

شکل ۶- الف) نمای مدل‌سازی یک سازه مکعب در عمق ۳۵۰ متری،
ب) پاسخ خروجی مدل در محیط متلب و نشان دادن فضای حفره
در لایه چهارم [۵]

بهینه‌ترین و ایده‌آل‌ترین حالت، ایجاد الگویی است که بتوانیم با قرار دادن چشمه و گیرنده بر روی هم، موج عبوری را به صورت رفت و

روش‌ها یک موج الکترومغناطیسی به زمین وارد شده و متناسب با ثابت دی‌الکتریک مواد زیر زمین، گیرنده در زمان‌های مختلف امواجی را دریافت می‌کند. با کنار هم قرار دادن تمام امواج دریافتی، یک تصویر خام از زیر زمین در اختیار کاربر قرار می‌گیرد.

GPR ها در محدوده VHF-UHF از طیف الکترومغناطیس فعالیت می‌کنند. فرکانس‌های پایین برای نفوذ در زیرسطح زمین بهتر جواب می‌دهند. از طرف دیگر هر چه فرکانس بیشتر باشد، امکان شناسایی اشیایی با اندازه کوچک‌تر، بیشتر فراهم می‌شود. معمولاً GPR ها در فرکانس مرکزی ۱۵۰ MHz تا ۷۵ تا ۳۰۰ MHz فعالیت می‌کنند [۱۷]. با این وجود در برخی موارد مشاهده می‌شود که از فرکانس ۵۰۰ MHz برای شناسایی‌های دقیق در زیرسطح و از فرکانس ۲۰ MHz برای شناسایی حفره‌ها و تونل‌های حفر شده در عمق زیاد استفاده شده است. توان تفکیک مکانی این فناوری توسط فرکانس مورد استفاده کنترل می‌شود [۱۷].

دقت این فناوری از چند سانتیمتر تا چند صد متر می‌تواند تغییر کند. عمق نفوذ در زیر سطح زمین توسط فرکانس و خواص الکتریکی مواد کنترل می‌شود. عمق نفوذ معمول برای این فناوری، کمتر از ۵۰ متر می‌باشد [۱۷].

بر اساس مدل‌سازی‌های انجام شده در محیط نرم‌افزار GPRMOD به روش FDTD^۱، می‌توان تخمینی از میزان شناسایی اهداف زیرزمینی توسط این روش را استخراج نمود.

همچنین بر اساس مدل‌سازی‌های صورت‌پذیرفته در اجرای پروژه تحقیقاتی یادشده، به دلیل وابستگی به سطح در این فناوری، قابلیت برداشت هواپرد وجود نداشته و به همین دلیل GPR قابلیت نصب روی UAV توسط دشمن را ندارد. اما در برخی موارد از برداشت‌های الکترومغناطیس هواپرد به اشتباه GPR هواپرد نام برده می‌شود.

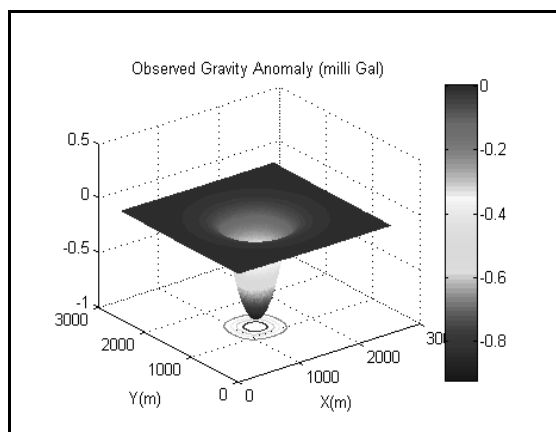
۳- بررسی و ارائه نتایج تجربی

در مطالعات انجام‌پذیرفته توسط تیم نویسندگان این مقاله سعی شده است مدل‌های مختلف، مدل‌سازی شده و در هر فناوری مورد ارزیابی قرار گیرند. در اینجا با توجه به محدودیت‌های نگارش مقاله، مدل مکعب و کره ارائه می‌گردد. بیشتر مدل‌سازی‌ها در محیط نرم‌افزار متلب و بعضاً در نرم‌افزارهای موجود برای فناوری خاص صورت پذیرفته است.

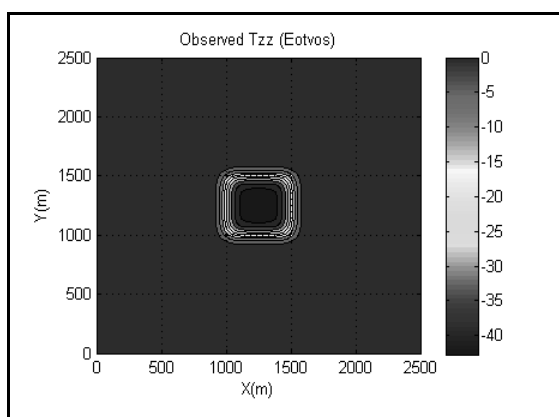
۳-۱- مکعب در عمق زیاد در روش لرزه:

مدل‌سازی لرزه به صورت دو بعدی و فضای زیرزمینی، در زیر چندین لایه در نظر گرفته شده است. برای داشتن یک مدل کامل سه‌بعدی لازم است تا روبش در جهت عمق تصویر به تعداد کافی (فواصل هر

1- Finite-Difference Time-Domain (تفاضل محدود حوزه زمان)



شکل ۷- مدل‌سازی سه‌بعدی سازه زیرزمینی در روش گرانی و گرادیان گرانی قائم [۳]



شکل ۸- مدل‌سازی دوبعدی سازه زیرزمینی در روش گرانی و گرادیان گرانی قائم [۳]

$$U(p) = \gamma \int_R \frac{\rho}{r} dv \quad (1)$$

چگالی، فاصله و المان حجم مورد نظر می‌باشد. میدان گرانی به‌صورت گرادیان پتانسیل به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$$g(p) = \nabla U = -\gamma \int_R \frac{\hat{r}}{r^2} \rho dv$$

با توجه به اینکه انواع گرانی‌سنج‌ها مؤلفه قائم میدان گرانی را اندازه‌گیری می‌کنند می‌توان نوشت:

$$g(x, y, z) = \frac{\partial U}{\partial z} = -\gamma \iiint_{x', y', z'} \rho(x', y', z') \frac{(z - z')}{r^3} dx' dy' dz' \quad (2)$$

$$r = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2} \quad \text{که در آن:}$$

برگشت و به‌طور عمودی دریافت داریم که این امر، مستلزم در نظر گرفتن الگوی انحراف صفر^۱ می‌باشد. در این الگو، فاصله‌ی هر گیرنده از هم را ۱٫۵ متر در نظر گرفته‌ایم که با توجه به برداشت ۱۵۰ متری، تعداد چشمه و گیرنده ۱۰۰ عدد می‌شود. انتخاب این فاصله بین چشمه‌ها براساس آزمون و خطا بوده است. با انتخاب این الگو و سپس تولید موج توسط چشمه‌ها و در پی آن دریافت موج برگشتی و محاسبه زمان رفت و برگشت موج توسط گیرنده‌ها، اقدام به پردازش و تفسیر مقطع مصنوعی دریافت شده توسط نرم‌افزار GXII می‌کنیم [۵].

همان‌طور که در شکل فوق مشاهده می‌کنیم، مقطع لرزه‌ای توانسته سه لایه و یک فضای خالی را به خوبی استخراج نماید. مهم‌ترین کاربرد این روش، شناسایی لایه‌های مواد هیدروکربونی در اعماق زیاد می‌باشد.

۳-۲- مدل‌سازی مکعب در روش گرانی

در مطالعات انجام‌شده که به‌منظور امکان‌سنجی استخراج اهداف مدفون با روش گرانی انجام شده نتایج زیر به دست آمده است. در این تحقیق دقت دستگاهی تجهیزاتی گرانی‌سنجی موجود غیر نظامی در حد یک میلی‌گال و گرادیان گرانی در حد یک اتووش^۲ در نظر گرفته شده است. با توجه به متوسط چگالی سنگ‌های پوسته زمین که در حدود ۲۶۷۰ کیلوگرم بر مترمکعب می‌باشد می‌توان یک سازه مکعبی شکل را که شامل ادواتی با چگالی تقریبی معلومی است، مدل کرد. (شکل‌های ۷ و ۸). در این قسمت تبیینی در حدود ۲۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب برای سازه زیرزمینی نسبت به محیط اطراف در نظر گرفته شده است. در شبیه‌سازی‌های انجام‌شده سازه‌ای با ابعاد ۵۰۰ متر × ۵۰۰ متر و ارتفاع ۲۰ متر که در عمق بین ۳۰ تا ۵۰ متر در زیر زمین قرار دارد، در نظر گرفته شده است. جهت نزدیکی داده‌های شبیه‌سازی‌شده به واقعیت ۵٪ نویز اتفاقی به داده‌ها اضافه شده است. جهت تعیین احتمال کشف این سازه، بی‌هنجاری حاصل از این سازه بر روی سطح زمین و ارتفاع‌های مشخصی شبیه‌سازی شده است. ارتفاع‌های مورد نظر شامل ۱۰۰، ۲۰۰، ۳۰۰، ۵۰۰، ۷۰۰ و ۱۰۰۰ متر بالای سطح زمین می‌باشد. در جداول (۱) و (۲) به‌ترتیب بیشینه دامنه بی‌هنجاری گرانی مشاهده شده و بیشینه دامنه گرادیان قائم گرانی مشاهده شده برای ارتفاع‌های مختلف نشان داده شده است. با مقایسه بزرگی بی‌هنجاری به‌دست آمده و دقت دستگاه‌های گرانی‌سنجی معرفی‌شده، احتمال کشف سازه زیرزمینی قابل بررسی خواهد بود [۳].

پتانسیل گرانی را می‌توان به‌صورت رابطه (۱) بیان کرد:

1- Zero-Offset
2- Eotvos (1E=10⁻⁶mgal/cm)

مورد نظر که دستگاه‌های مختلف گرانی‌سنجی قادر به شناسایی آن می‌باشند، در حدود ۳۰۰ متر برآورد کرد. همچنین با توجه به دقت دستگاه‌های گرادیان‌سنجی گرانی و مقایسه آن‌ها با دامنه بی‌هنجاری‌های شبیه‌سازی شده در ارتفاعات مختلف می‌توان مشاهده کرد که روش گرادیان‌گرانی قادر است سازه مورد نظر را با ارتفاع پروازی بیشتر از ۱۰۰۰ متر شناسایی کند.

جدول ۱- بیشینه دامنه بی‌هنجاری گرانی مشاهده شده برای ارتفاع‌های مختلف [۳]

ارتفاع پرواز (متر)	بیشینه دامنه بی‌هنجاری گرانی مشاهده شده (میلی‌گال)
سطح زمین	۱/۴۳۷
۱۰۰	۰/۹۲۳
۲۰۰	۰/۵۸۴
۳۰۰	۰/۳۸۳
۵۰۰	۰/۱۸۹
۷۰۰	۰/۱۱۰
۱۰۰۰	۰/۰۵۸

جدول ۲- بیشینه دامنه گرادیان قائم گرانی مشاهده شده برای ارتفاع‌های مختلف [۳]

ارتفاع پرواز (متر)	بیشینه دامنه گرادیان قائم گرانی مشاهده شده (اتووش)
سطح زمین	۱۱۵/۱۶۶
۱۰۰	۴۲/۷۳۰
۲۰۰	۲۶/۰۰۴
۳۰۰	۱۵/۲۷۷
۵۰۰	۵/۸۳۹
۷۰۰	۲/۶۶۷
۱۰۰۰	۱/۰۶۱

۳-۳- مدل‌سازی مکعب در روش مغناطیس‌سنجی:

در این تحقیق فرض بر این می‌باشد که محل مورد نظر برای مدل‌سازی در شهر تهران واقع می‌باشد (مشخصات مغناطیسی منطقه تهران). همچنین مکعبی با ابعاد $20 \times 50 \times 50$ m (ارتفاع ۲۰ متر) که مرکز آن در وسط یک پروفیل ۱۰۰۰ متری می‌باشد، در عمق ۵۰ متری در نظر گرفته شده و بی‌هنجاری مغناطیسی حاصل از آن مدل‌سازی و پیش‌بینی شده است. (شکل‌های (۱۰) و (۱۱) را ببینید) می‌توان یک جسم سه بعدی را با اجتماع تعدادی منشور مستطیلی شکل مدل‌سازی کرد. میدان مغناطیسی یک منشور مستطیلی به وسیله بهاتاچاریا^۱ محاسبه شد.

$$\mathbf{M} = M (\hat{i}\hat{M}_x + \hat{j}\hat{M}_y + \hat{k}\hat{M}_z) \quad (۸)$$

مکعبی را با ابعادی به صورت $x_1 \leq x \leq x_2$ ، $y_1 \leq y \leq y_2$ و $z_1 \leq z \leq z_2$ در نظر می‌گیریم. در این صورت مؤلفه قائم گرانی از رابطه (۳) به دست خواهد آمد:

$$g = \gamma\rho \int_{z_1}^{z_2} \int_{y_1}^{y_2} \int_{x_1}^{x_2} \frac{z'}{[x'^2 + y'^2 + z'^2]^{3/2}} dx' dy' dz' \quad (۳)$$

که جهت سادگی، نقطه اندازه‌گیری بر مبدأ قرار داده شده است. حاصل انتگرال بالا را می‌توان به صورت رابطه (۴) نشان داد:

$$g = \gamma\rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mu_{ijk} \left[z_k \arctan \frac{x_i y_j}{z_k R_{ijk}} - x_i \log(R_{ijk} + y_j) - y_j \log(R_{ijk} + x_i) \right] \quad (۴)$$

که در آن:

$$r = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + (z-z')^2}$$

$$\mu_{ijk} = (-1)^i (-1)^j (-1)^k$$

با مشتق‌گیری از رابطه (۵) می‌توان روابط مربوط به و را محاسبه و نهایتاً رابطه را به دست آورد.

$$T_{xx} = \gamma\rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mu_{ijk} \left[\arctan \left(\frac{(y-y_j)(z-z_k)}{(x-x_i)R_{ijk}} \right) \right] \quad (۵)$$

$$T_{yy} = \gamma\rho \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^2 \sum_{k=1}^2 \mu_{ijk} \left[\arctan \left(\frac{(x-x_i)(z-z_k)}{(y-y_j)R_{ijk}} \right) \right] \quad (۶)$$

$$T_{zz} = -(T_{xx} + T_{yy}) \quad (۷)$$

از شبیه‌سازی ارائه شده، مقدار بی‌هنجاری ایجاد شده از هدف زیرزمینی در ارتفاع‌های مختلف به دست می‌آید. در ادامه با مقایسه دقت تجهیزات موجود می‌توان قابلیت آنها را در شناسایی این هدف زیرزمینی ارزیابی نمود. با استفاده از شبیه‌سازی انجام شده در محیط متلب برای سازه مورد نظر و مقایسه نتایج به دست آمده با دقت دستگاه‌های-AIRGrav, TAGS AirIII, Lacoste & Lomberg Air- II و GT-1A می‌توان بیشترین ارتفاع پرواز را برای مدل سازه

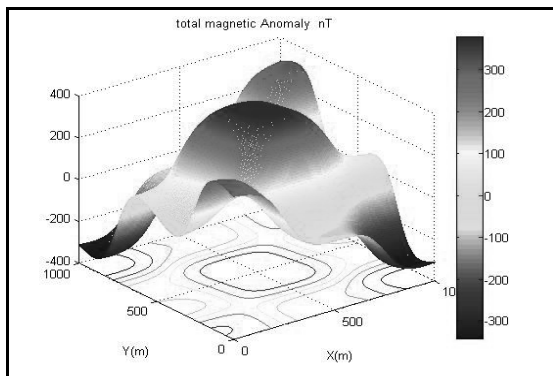
اجسام بزرگ استفاده کرد. تعریف گشتاور مغناطیسی که میدان مغناطیسی محدود و مغناطیس پذیری مشخصی را استفاده می کند:

$$\begin{aligned}
 M &= \kappa H \\
 B &= \mu H \\
 B &= \mu_0(1 + \kappa)H \\
 H &= \frac{1}{\mu_0(1 + \kappa)} B \\
 M &= \frac{\kappa}{\mu_0(1 + \kappa)} B
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

که در آن: M گشتاور مغناطیسی، B القای مغناطیسی، K مغناطیس پذیری و μ نفوذپذیری

IGRF (magnetic field intensity): ۴۷۰۰۰

لازم به ذکر می باشد که در مدل سازی مذکور، تمامی تصحیح های لازم اعم از تصحیح روزانه و سالیانه و همچنین تصحیح تغییرات مکانی و تصحیح تغییرات میدان مغناطیسی اصلی زمین انجام شده و بی هنجاری مربوط به زمینه نیز انجام شده است [۶]. با توجه به شکل های (۱۰ و ۱۱) مشاهده می شود که بیشینه بی هنجاری تولیدی در مرکز مکعب بوده و مقدار تقریبی آن از ۳۸۰ نانوتسلا تا ۱۰۰ نانوتسلا در ارتفاع های مختلف تغییر می نماید. تا حدود ۱۵۰ نانوتسلا توسط تمامی دستگاه های مغناطیس سنج (مگنتومترهای فلاکس گیت، پروتون، بخار سزیم، پیچشی، SQUID و پیچ های) قابل شناسایی است. اما مقادیر کمتر از آن دیگر قابل شناسایی نخواهد بود. این مدل سازی با توجه به جدول (۳)، نشان می دهد یک UAV دشمن با رسیدن به ارتفاع پروازی حدود ۲۵۰ متر و تکرار برداشتها قادر خواهد بود تا سازه زیرزمینی به ابعاد بزرگ را شناسایی نماید.

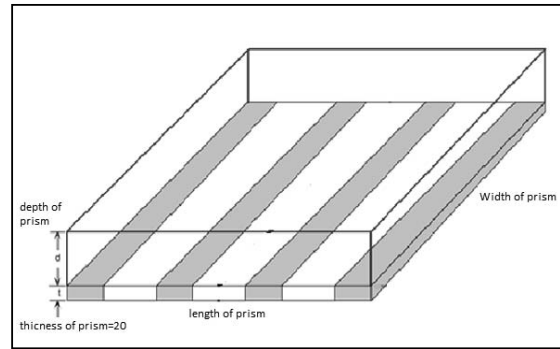


شکل ۱۰- مدل سازی سه بعدی سازه زیرزمینی در روش مغناطیس سنجی (محیط نرم افزار متلب) [۶]

هر منشور به صورت موازی با محورهای x,y,z قرار گرفته و دارای گشتاور مغناطیسی M می باشد. ابعاد منشور بدین صورت می باشد:

$$z_1 \leq z \leq z_2, y_1 \leq y \leq y_2, x_1 \leq x \leq x_2$$

$$x_1 \leq x \leq x_2, y_1 \leq y \leq y_2, z_1 \leq z \leq \infty \tag{9}$$



شکل ۹- مکعب با ابعاد ۲۰×۵۰۰×۵۰۰ متر در عمق d از سطح زمین [۶]

اگر آنومالی حاصل از منشور در یک منطقه موازی بردار $\vec{F} = (\vec{F}_x, \vec{F}_y, \vec{F}_z)$ باشد، آنومالی میدان کلی که در منطقه مشاهده می شود برابر است با:

$$\begin{aligned}
 \Delta T &= C_m M \left[\frac{\alpha_{23}}{2} \log \frac{r-x'}{r+x'} + \frac{\alpha_{13}}{2} \log \frac{r-y'}{r+y'} - \alpha_{12} \log(r+z_1) \right. \\
 &- \widehat{M}_x \widehat{F}_x \arctan \left(\frac{x'y'}{x'^2 + rz_1 + z_1^2} \right) - \widehat{M}_y \widehat{F}_y \arctan \left(\frac{x'y'}{r^2 + rz_1 + x'^2} \right) \\
 &\left. - \widehat{M}_z \widehat{F}_z \arctan \left(\frac{x'y'}{rz_1} \right) \right] \Bigg|_{x'=x_1}^{x'=x_2} \Bigg|_{y'=y_1}^{y'=y_2}
 \end{aligned}
 \tag{10}$$

$$\begin{aligned}
 \alpha_{12} &= \widehat{M}_x \widehat{F}_y + \widehat{M}_y \widehat{F}_x, \\
 \alpha_{13} &= \widehat{M}_x \widehat{F}_z + \widehat{M}_z \widehat{F}_x, \\
 \alpha_{23} &= \widehat{M}_y \widehat{F}_z + \widehat{M}_z \widehat{F}_y, \\
 r^2 &= x'^2 + y'^2 + z'^2
 \end{aligned}
 \tag{11}$$

معادله (۱۰) آنومالی میدان کلی یک منشور را که سر آن در ۱z و ته آن در بی نهایت است محاسبه می کند. اگر این معادله دو بار محاسبه شود به طوری که یک بار برای $M=M_0$ و $z=zt$ و بار دیگر برای $M=-M_0$ و $z=zb$ ، با توجه به اصل انطباق جمع این دو محاسبه، میدان مغناطیسی منشور با گشتاور مغناطیسی M_0 و ابتدا در zt و انتها در zb به دست می آید.

با تقسیم بندی جسم به تعدادی از منشورهای مستطیلی، معادله (۱۰) را می توان برای هر کدام از این منشورها و بنابراین برای مدل سازی

۳-۴- مدل سازی مکعب در روش مقاومت ویژه

مدل ارائه شده یک بلوک فرضی را با عرض ۵۰۰ و ارتفاع ۲۰ متر در عمق ۱۰۰ متری در شکل (۱۲-الف) با مقاومت ویژه ۱۰۰۰۰۰ اهم (مقاومت ویژه فضای خالی) در نظر گرفته که در بستری (سخت) با مقاومت ویژه ۳۰۰۰۰ اهم واقع شده است. این بلوک می تواند یک منشور یا مکعب مستطیل باشد. این مدل زمین شناسی می تواند یک هدف زیرزمینی باشد که در نرم افزار Res2Dmod اجرا شده است [۷]. با توجه به مدل مصنوعی ارائه شده، با استفاده از نرم افزار Res2Dinv مدل سازی معکوس انجام و شبه مقطع زمین شناسی و مدل سازی معکوس در عمق ۱۰۰ متری در شکل (۱۲-ب) ارائه شد. با توجه به شبه مقطع، نتایج زیر را می توان با استفاده از مدل سازی به دست آورد:

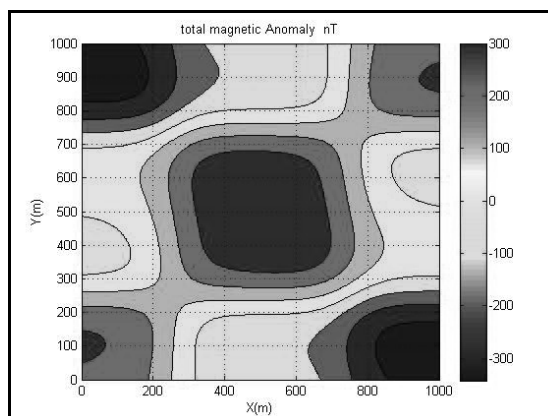
۱- محدوده قرارگیری بلوک از نظر کیفی به درستی مشخص شده است.

۲- شکل شبه مقطع مستطیلی به حالت کشیده تر تبدیل شده است.

۳- عرض بلوک به درستی مشخص شده است.

۳-۵- مدل سازی کره در روش GPR

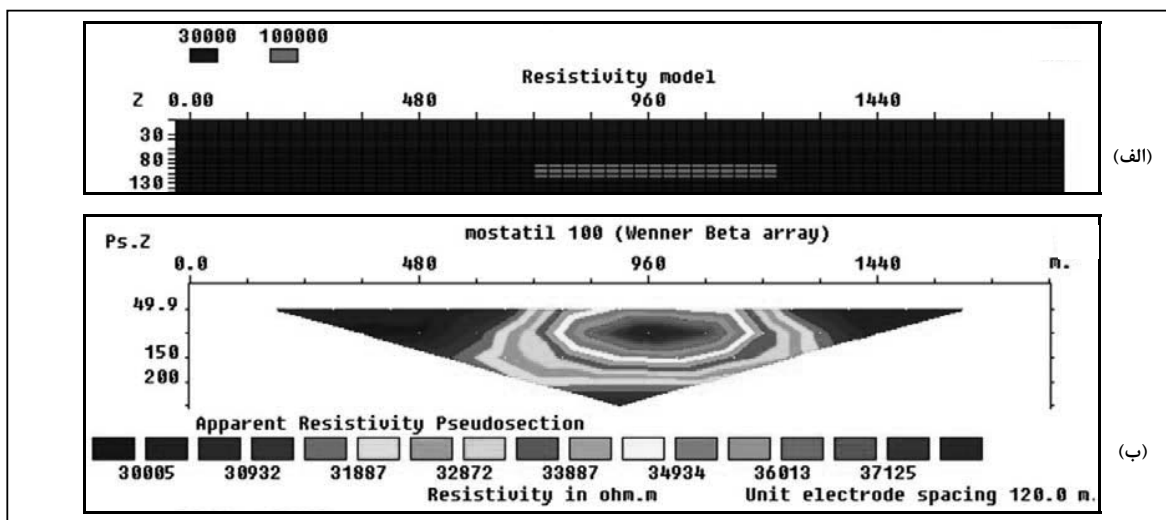
در این روش، شبیه سازی با استفاده از نرم افزاری تحت عنوان GPRMOD انجام شده است. در این نرم افزار همان طور که در شکل (۱۳) نشان داده شده است ابتدا بایستی هندسه مدل به همراه مشخصات الکترومغناطیسی (ثابت دی الکتریک، مقاومت الکتریکی، نفوذپذیری مغناطیسی) هر مدل طراحی شود. در این شکل یک لایه با ضخامت ۰/۵ متر در عمق ۰/۵ متری و یک کره با قطر ۱ متر در عمق ۸ متری ترسیم شده است که مشخصات هر منطقه از مدل نیز اعمال گردیده است [۸].



شکل ۱۱- مدل سازی دوبعدی سازه زیرزمینی در روش مغناطیس سنجی (محیط نرم افزار متلب) [۶]

جدول ۳- بی هنجاری مربوط به مکعب با ابعاد ۲۰×۵۰۰×۵۰۰ متر در عمق ۵۰ متر برای ارتفاع های مختلف پرواز روی سطح زمین. [۶]

ارتفاع پرواز (متر)	بیشینه دامنه بی هنجاری مغناطیسی مشاهده شده (nT)
سطح زمین	۳۸۰
۱۰۰	۳۰۰
۱۴۰	۲۸۰
۱۸۰	۲۳۰
۲۲۰	۱۸۰
۲۶۰	۱۵۰
۲۸۰	۱۰۰



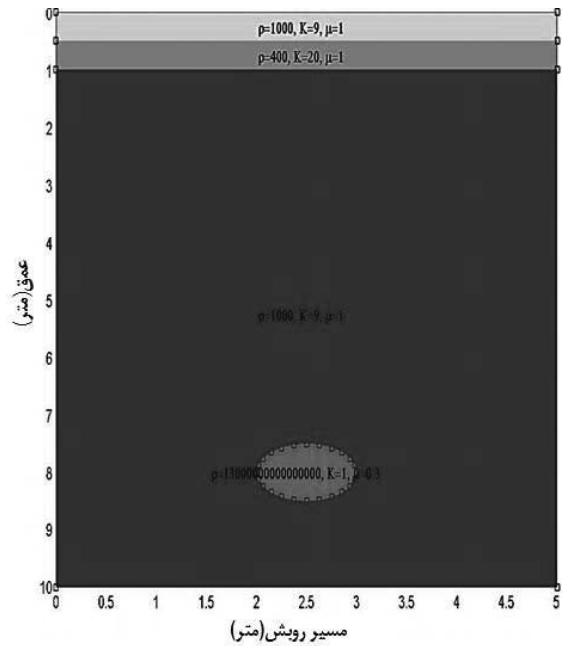
شکل ۱۲- الف) مدل سازی معکوس بلوک ۵۰۰ در ۲۰ متر در عمق ۱۰۰ متری با استفاده از نرم افزار Res2Dmod (ب) پاسخ مدل مصنوعی ایجاد شده بلوک ۵۰۰ در ۲۰ متر در عمق ۱۰۰ متری از سطح زمین با استفاده از نرم افزار Res2Dinv [۷]

در عمق صفر قرار دارد) منتشر می شود، پرداخت. بازتاب موج و همچنین شکل و میزان موج بازتاب شده بستگی به عواملی مانند، فرکانس موج اولیه، مشخصات الکترومغناطیسی ساختار زمین شناسی و توده ها، عمق، شکل و ابعاد عوارض زیرسطحی دارد که به منظور بررسی میزان و چگونگی تأثیر هر یک از عوامل فوق، این عوامل به صورت مجزا در قالب یک مدل شبیه سازی شده اند [۸].

در این قسمت پس از فراخوانی مدل توسط نرم افزار و اعمال فرکانس مورد نظر و همچنین سایر پارامترهای مورد نیاز شبیه سازی، انتشار امواج درون مدل به عنوان خروجی ارائه می شود. همان طور که در شکل (۱۴) نشان داده شده است با افزایش عمق به ۱۵ متر مقدار نویز محیط از سیگنال بازگشتی بیشتر بوده و عملاً هدف قابل شناسایی نخواهد بود.

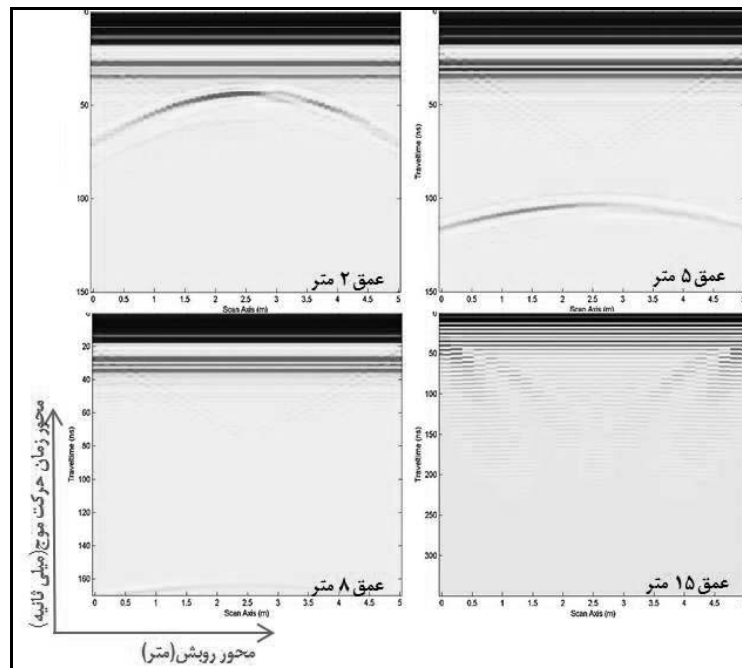
۴- جمع بندی

از مدل سازی ها و نتایج به دست آمده از آن می توان نتیجه گیری نمود که در این فناوری ها، هر چه هدف بزرگتر و نزدیکتر به سطح باشد شناسایی آن راحت تر و سریع تر می باشد. ویژگی های بسترهای مختلف زیرزمین مثل رطوبت، شوری، چگالی، مقاومت الکتریکی، و مغناطیس پذیری لایه های زمین در بسیاری از فناوری ها اثرگذار می باشد.



شکل ۱۳- مدل ساختار زیرزمینی ساخته شده توسط GPRMOD [۸]

پس از طراحی مدل، با استفاده از روش FDTD که امکان استفاده آن در نرم افزار GPRMOD وجود دارد، می توان به شبیه سازی چگونگی توزیع امواج الکترومغناطیسی درون مدل که توسط دستگاه GPR (که



شکل ۱۴- شبیه سازی انتشار امواج GPR درون مدل ساخته شده توسط GPRMOD [۸]

اشتر، مجتمع دانشگاهی آمایش و پدافند غیر عامل، تهران، (۱۳۹۱).

۷. خرمی، حمید؛ معدنچی زارع، احمد؛ بررسی روش الکتریکی مقاومت ویژه در پیدا کردن حفره‌های زیر سطحی؛ پروژه همکار تحقیقاتی بنیاد نخبگان نیروهای مسلح، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی آمایش و پدافند غیر عامل، تهران، (۱۳۹۱).

۸. رضوی، حمید؛ معدنچی زارع، احمد؛ بررسی توانمندی‌های GPR (رادارهای زمین نفوذی) در شناسایی تونل‌ها و اهداف مدفون؛ پروژه همکار تحقیقاتی بنیاد نخبگان نیروهای مسلح، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی آمایش و پدافند غیر عامل، تهران، (۱۳۹۲).

9. Office of the deputy undersecretary of defense (industrial policy) Defense Industrial Base Capabilities Study: Battle space Awareness, (2004).
10. Lance, A, Birrell, M, Borowski, K, Korth, S, Obermeyer, N, Tesla, E; "Technologies for the Detection and Monitoring of Clandestine Underground Tunnels", (2008).
11. Sepp; "Deeply Buried Facilities Implication for Military Operations, Center for Strategy and Technology", Air war college, (2000).
12. Tankus, A, Yeshurun, Y; "Convexity-Based Visual Camouflage Breaking", pp 208-237, (2001).
13. Kuloglu, M, Chen, C; "Ground Penetrating Radar for Tunnel Detection", pp 4314-4317, (2010).
14. Robert, E, Sheriff, L. P; "Exploration Seismology", Cambridge, (1995).
15. Monte L. [et.al]; "Radio Frequency Tomography for Tunnel Detection", IEEE Trans. GEO. Remote Sensing, vol. 48, 1128-1138, (2010).
16. Loke, M. H, Tutorial; "2-D and 3-D electrical imaging surveys", (2004).
17. Neal, A; "ground-penetrating radar and its use in sedimentology: principle, problem and progress", Earth-science Reviews, 66,261-330, (2003).
18. Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990, Applied Geophysics, second edition, Cambridge University

بنابراین، این فناوری‌ها می‌توانند با دسترسی (زمینی و در برخی روش‌ها، هوایی با سقف پرواز پایین) به محل تقریبی هدف زیرزمینی (آشکارسازی شده)، مشخصات هدف را با دقت نسبتاً مناسبی استخراج نمایند. با مدل‌سازی اثر لایه‌های مختلف زمین با جنس و خواص متفاوت و همچنین در نظر گرفتن محدودیت‌ها و نقاط ضعف هر فناوری، می‌توان راهکارهای مهندسی و قابل استفاده برای ایجاد استتار مناسب این گونه اهداف در برابر سنجنده‌های ژئوفیزیکی را طراحی نمود. توجه کافی مسئولان و فرماندهان در زمینه راهکارهای مقابله (که در ادامه بیان می‌شود) به این فناوری‌ها برای اجتناب از شناسایی تأسیسات و فعالیت‌های زیرزمینی کشور می‌تواند مفید واقع گردد.

همان‌گونه که بیان شد بلوغ فناوری‌های آشکارسازی تأسیسات زیرزمینی و استفاده از آن‌ها برای یک طرف جنگ، شرایط را برای طرف مقابل آن بسیار سخت می‌کند. وجود چنین فناوری‌هایی برای یک نیرو، نه تنها در میدان‌های عملیاتی بر عملکرد آن بلکه در زمان صلح حتی بر موضع‌گیری‌های اقتصادی و سیاسی آن نیز اثرگذار می‌باشد.

مراجع

۱. معدنچی زارع، احمد؛ دهقانی، حمید؛ بررسی و تحلیل اثر رنگ و سایه در طول موج‌های مرئی و ارائه راهکار مقابله با آن؛ پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته پدافند غیرعامل، گرایش آفا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی آمایش و پدافند غیر عامل، (۱۳۸۸).
۲. تلفورد، دبلیو. ام؛ ژئوفیزیک کاربردی؛ مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران؛ جلد اول، (۱۳۸۷).
۳. رشوند، مجتبی؛ سهامی، حبیب؛ تعیین مکان سازه‌های زیرزمینی با استفاده از شبیه‌سازی داده‌های ثقل سنجی؛ پروژه همکار تحقیقاتی بنیاد نخبگان نیروهای مسلح، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی آمایش و پدافند غیر عامل، تهران، (۱۳۹۰).
۴. حاجب‌حسینی، حسن؛ زمردیان، حسین؛ ژئوفیزیک کاربردی؛ مؤسسه انتشارات دانشگاه تهران؛ جلد ۲، (۱۳۷۵).
۵. طهماسبی، شهاب؛ معدنچی زارع، احمد؛ شناسایی اهداف زیرزمینی با استفاده از روش‌های لرزه‌ای؛ پروژه همکار تحقیقاتی بنیاد نخبگان نیروهای مسلح، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، مجتمع دانشگاهی آمایش و پدافند غیر عامل، تهران، (۱۳۹۲).
۶. شادی‌نقده، هادی؛ معدنچی زارع، احمد؛ استفاده از روش مغناطیسی برای شناسایی فضاها امن زیرزمینی؛ پروژه همکار تحقیقاتی بنیاد نخبگان نیروهای مسلح، دانشگاه صنعتی مالک

Modeling of Geophysical Sensors to Detect Underground Facilities and Presenting Countermeasure Approaches

A. Madanchi Zare¹

H. Dehghani²

K. Mousa Zadeh³

S. R. Taghavi⁴

Abstract

One of the most sustainable measures of passive defense in the strategic domains is to employ buried structures, in particular, tunnels. These tunnels are designed and built in mountain regions with high burms. On the other side, the adversary can take countermeasures to develop their detection methods of these structures. Also increasing the capabilities of their offensive instruments and equipments is their next step.

The subject of this study is to investigate, evaluate and model the effectiveness of geophysical detection technologies of buried facilities. Airborne and space based methods are mostly attractive by the adversary.

Construction and using these underground spaces, apply different effects on parameters of surface/subsurface of the earth. Using modeling, the Identification capabilities of different geophysical technologies in detecting objects, targets and underground facilities are assessed. In conclusion, the countermeasure methods (Camouflage, Concealment and Deception), have been presented using detection of underground facilities via these technologies.

Key Words: *Underground Facilities, Geophysics Sensors, Camouflage, Concealment*

1- Spatial Planning and Passive Defense University Complex, Malek Ashtar University (ahmad.madanchi@gmail.com) - Writer in Charge

2- Ibid (hamid_deh@yahoo.com)

3- Ibid (kiomarskms@yahoo.com)

4- Ibid (sr.taghavi@ymail.com)