



شبیه‌سازی عددی داده‌های رادار نفوذی به زمین (GPR) برای آشکارسازی مین‌های فلزی

فریدون شریفی^۱ و صفا خزایی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود
۲- استادیار، مرکز تحقیقات عمران و سازندگی، دانشگاه جامع امام حسین (ع)

دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۰۹/۱۷؛ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۰۲

* نویسنده مسئول مکاتبات: skhazai@ihu.ac.ir

چکیده

واژگان کلیدی

پاک‌سازی میادین مین و مناطق آلوده به مواد منفجره عمل‌نکرده یکی از مسائلی است که در کشورهای جنگ‌زده و از جمله کشور ما، با وجود گذشت ده‌ها سال از زمان جنگ، نیازمند توجه جدی است. روش‌های مختلف ژئوفیزیکی از جمله روش GPR نقش بسیار مهمی در آشکارسازی محل این آثار مخرب باقیمانده از جنگ دارند. روش GPR هوارد به دلیل قابلیت‌ها و برتری‌های خاصی که نسبت به روش برداشت زمینی دارد، توجه ویژه متخصصان امر را به استفاده از آن در آشکارسازی UXO معطوف داشته است. در این تحقیق به منظور امکان‌سنجی کاربرد روش GPR هوارد در آشکارسازی UXO، به شبیه‌سازی عددی و تجزیه و تحلیل سیگنال‌های برگشتی از یک مین فلزی ضد نفر مدفون در عمق ۱۰ سانتیمتری خاک با استفاده از این روش پرداخته شده است. برای این منظور دو مدل مصنوعی، شامل یک لایه هوا و یک لایه خاک، طراحی شده است که در یکی از آن‌ها مدل عاری از مین (Model A) و دیگری مدل حاوی یک مین فلزی ضد نفر مدفون در عمق ۱۰ سانتی‌متری خاک و در موقعیت $x=0.25m$ (Model B) در مرکز مدل، می‌باشند. در ادامه ردها و نگاشت‌های راداری در ارتفاع‌های پرواز (۰ تا ۱۰ متر) و در بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ مگاهرتز و منطبق با مرکز دو مدل فوق‌الذکر، در مجموع تعداد ۶۳۸ حالت مختلف، با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD) شبیه‌سازی شده‌اند. تجزیه و تحلیل داده‌ها شامل بررسی انرژی سیگنال، تبدیل موجک برای انتقال داده‌ها به حوزه فرکانس و حذف نوفه و در نهایت انتقال داده‌ها به حوزه زمان-فرکانس در محیط نرم‌افزار MATLAB انجام پذیرفته است. با توجه به نتایج هر سه روش پردازش سیگنال مورد استفاده، قابلیت آشکارسازی مین با روش GPR هوارد تا حداکثر ارتفاع پرواز ۱۰ متر و در بازه فرکانسی ۵۵۰ تا ۱۵۰۰ مگاهرتز تأیید شد.

GPR هوارد

شبیه‌سازی عددی

انرژی سیگنال

تبدیل موجک

تحلیل زمان-فرکانس

آشکارسازی UXO

۱- مقدمه

یکی از آثار سوء باقیمانده از جنگ‌ها، مناطق آلوده به مین‌ها و گلوله‌های جنگی عمل‌نکرده^۱ (UXO) می‌باشند که همواره می‌توانند به عنوان خطری جدی، امنیت جانی و اقتصادی انسان‌ها و یک منطقه را تهدید نمایند. لذا در صورت نیاز به استفاده مجدد از این مناطق برای اهداف مختلف اقتصادی و استفاده‌های عمومی، پاک‌سازی آن‌ها امری ضروری است (Daniels, 2006).

یکی از مهم‌ترین اقداماتی که برای رفع تهدید و خنثی‌سازی UXO باید صورت گیرد، شناسایی دقیق محل دفن آن‌هاست. در راستای نیل به این هدف، مدیریت زمان، هزینه و نیز تأمین امنیت مجریان و کارشناسان باید مورد توجه جدی قرار گیرد. با توجه به این معیارها و نیز ماهیت این عملیات، روش‌های ژئوفیزیکی مانند مغناطیس‌سنجی (Butler et al., 2012)، الکترومغناطیس زمین (Benedetto and Pajewski, 5015) و ... جایگاه ویژه‌ای را به خود اختصاص داده و همواره مورد توجه کارشناسان و متخصصان امر بوده است. آشکارسازی اهداف زیرسطحی با استفاده از این روش‌ها بر مبنای تباین خواص فیزیکی همچون خودپذیری مغناطیسی، ویژگی‌های الکتریکی (ثابت گذردهی الکتریکی، هدایت ویژه الکتریکی و ...) و ... استوار است؛ که به صورت زمینی، دریایی و هوابرد مورد استفاده واقع می‌شوند (Reynolds, 2011).

یکی از مشکلات استفاده از روش‌های مرسوم ژئوفیزیکی (مانند روش‌های مغناطیسی و الکترومغناطیسی) در مناطق آلوده به UXO این است که این روش‌ها غالباً جهت آشکارسازی اهداف فلزی قابلیت اجرایی دارند و در صورتی که آشکارسازی اهداف غیرفلزی (مانند مین‌های پلاستیکی و سرامیکی) مورد نظر باشد، این روش‌ها کارایی خود را از دست می‌دهند. علاوه بر این در شرایطی که نوفه‌های ناشی از زباله‌های فلزی غالب باشند، در اثر دریافت سیگنال‌های ناخواسته و کاذب، استفاده از این روش‌ها با مشکل جدی روبرو خواهد شد (Youn, 2007, Daniels, 2009, www.geophysics.mines.edu/cgem/consortia/uxo.html).

روش GPR که کارایی آن برای آشکارسازی اهداف مدفون در زیر خاک به اثبات رسیده، روشی شناخته‌شده برای آشکارسازی مین‌ها و UXO بشمار می‌آید (Gader et al., 2001; Sato et al., 2005; Daniels, 2006; Gonzalez- Huici, 2012). این روش یکی از روش‌های ژئوالکتریکی است؛ که بر مبنای اندازه‌گیری زمان بازتابش امواج الکترومغناطیس (پالس‌های رادار) از اهدافی که به وسیله تباین ثابت دی‌الکتریک از سایر عوارض فیزیکی تفکیک می‌گردند، پایه‌گذاری شده است. هر چقدر ثابت دی‌الکتریک یک محیط کمتر باشد، سرعت انتقال موج الکترومغناطیس در آن بیشتر است. از مزایای این روش، سادگی، غیرمخرب بودن، سریع و دقیق

بودن آن است (Maierhofer, 2003).

عمق کاوش روش GPR بسته به خصوصیات مواد مورد مطالعه و نیز طول موج ارسالی به داخل زمین، از کمتر از یک متر تا بیش از ۵۴۰۰ متر (روی ورقه یخچالی) متغیر است (پرنو، ۱۳۹۳). این روش قادر به آشکارسازی اهداف کم‌عمق با دقت بسیار بالا و هزینه مطلوب است. لذا با توجه به عمق کم UXO، استفاده از روش GPR نفوذی به زمین برای آشکارسازی محل دفن آن‌ها با دقت، سرعت و هزینه مطلوب، انتخاب مناسبی خواهد بود (Daniels, 2004, Daniels, 2009, Daniels, 2006).

یکی از مشکلات اصلی برداشتهای ژئوفیزیکی زمینی در مناطق آلوده، تهدید ناشی از انفجار UXO در حین عملیات شناسایی است؛ که متوجه نیروهای انسانی و تجهیزات ژئوفیزیکی است. این موضوع استفاده از تجهیزات خاص و یا انجام برداشتهای به صورت هوابرد را می‌طلبد. همچنین صرفه‌جویی در زمان و هزینه اجرای پروژه اکتشافی، قابلیت استفاده در مناطق غیر قابل دسترس و مناطق پهناور (مانند مناطق بیابانی) از مزایای روش GPR هوابرد برای اکتشاف غیرمستقیم است.

در دهه‌های اخیر استفاده از روش GPR هوابرد برای اهداف بشردوستانه مورد توجه محققان قرار گرفته است (Arcone and Delaney, 2000; Liu and Feng, 2011; Crocco and Ferrara, 2014). آشکارسازی محل دفن قربانیان ریزش بهمین (Machguth et al., 2006; Heilig et al., 2008; Fruehauf et al., 2009) یکی از این کاربردهاست؛ که در این موارد، داده‌های GPR حداقل از سه لایه هوا، برف و لایه زیرین آن دریافت می‌شود. هنگامی که دستگاه اندازه‌گیری در یک جهت و با سرعت ثابت حرکت کند، مرز لایه‌ها به‌صورت خطوط پیوسته در رادارگرام به نمایش درمی‌آید و اهداف با ابعاد محدود مدفون در زیر برف که دارای تباین گذردهی الکتریکی یا رسانندگی الکتریکی باشند، به شکل هایپربولیک در رادارگرام ظاهر می‌شوند (Daniels, 2004; Olhoft and Modroo, 2006; Fruehauf et al., 2009).

تاکنون تلاش‌های متعددی در رابطه با استفاده از روش GPR هوابرد برای آشکارسازی UXO صورت گرفته است. روش GPR هوابرد برای اولین بار در اواخر دهه ۱۹۶۰ برای پروفیل‌زنی لایه‌های یخی در اعماق چند هزار فوتی، مورد توجه قرار گرفت.

دو مؤسسه DERA^۲ و TLG^۳ در سال ۲۰۰۰ آزمایشی را با هدف آشکارسازی مناطق آلوده به مین با استفاده از یک سفینه هوایی A60+ و با بهره‌گیری از سیستم راداری پهنای باند وسیع دهانه ترکیبی (UWB SAR) اجرا نمودند. در این مطالعه پس از

2- Defense Evaluation and research Agency
3- The Lightship Group

1- Unexploded Ordnance (UXO)

مشکل‌تر است و نیازمند فرکانس‌های بالاتر است؛ بنابراین در این تحقیق آشکارسازی مین ضدنفر با استفاده از روش GPR هوابرد مورد توجه قرار گرفته است. برای این منظور نتایج برداشت روش GPR هوابرد، بر روی دو مدل مصنوعی مورد بررسی قرار گرفته است. مدل اول یک مدل دو لایه‌ای هوا- خاک عاری از UXO (Model A) و مدل دوم یک مدل دو لایه‌ای هوا- خاک حاوی مین ضد نفر فلزی (Model B) است؛ که در ارتفاع‌های پرواز مختلف (۰ تا ۱۰ متر) و در بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ مگاهرتز با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان و در محیط نرم‌افزارهای Reflexw و MATLAB شبیه‌سازی شده‌اند.

با توجه به این‌که روش GPR هوابرد روش نوینی است و در رابطه با بحث پردازش سیگنال کارهای بسیار محدودی بر روی داده‌های آن انجام شده است، به منظور تجزیه و تحلیل سیگنال در این تحقیق، در مرحله اول اختلاف انرژی سیگنال‌های متناظر در دو مدل فوق‌الذکر با تکیه بر تبدیل هیلبرت (Proakis and Manolakis, 1988)، به عنوان وجه تمایز دو مدل در نظر گرفته شده و این اختلاف انرژی به حضور جسم مدفون (مین) در مدل نسبت داده شده است. از آنجا که سیگنال‌های GPR یک بعدی در حوزه زمان هستند و زمان‌های رسیدن امواج برگشتی به گیرنده از عوارض، بسیار نزدیک به هم می‌باشند؛ برای مشاهده تغییرات فرکانسی و همچنین حذف نوفه از داده‌ها، از تبدیل موجک^۴ (Weeks, 2007)، استفاده شده، که در بسیاری از موارد مؤلفه‌های فرکانسی مربوط به منعکس‌کننده‌ها (سطح زمین و هدف مدفون) در اثر گسسته‌سازی سیگنال با این روش قابل مشاهده است. هرچند با توجه به این‌که سیگنال‌های مورد بررسی غیر ایستا هستند و در پاره‌ای از موارد، تفکیک مؤلفه‌های فرکانسی از یکدیگر میسر نشده است، سیگنال‌های زمان- رسید به حوزه زمان- فرکانس (Boashash, 2015) منتقل شدند؛ که در این روش با توجه به امکان مشاهده تغییرات فرکانس در طول زمان، تفکیک منعکس‌کننده‌ها با سهولت بیشتری میسر گردید.

۲- نسل‌های مختلف GPR هوابرد

۲-۱- نسل اول

این سیستم توسط آزمایشگاه مهندسی و تحقیق ارتش آمریکا (CRREL) با نصب آنتن‌های مورد استفاده در برداشت‌های زمینی بر روی هلیکوپتر، توسعه داده شده است. برداشت داده‌ها با این سیستم برای اولین بار بر روی ورقه یخی از ارتفاع ۲ تا ۷ متری و با سرعت حدود ۵ متر بر ثانیه با موفقیت انجام پذیرفت (Liu and Feng, 2011).

تعیین ارتفاع و سرعت بهینه سفینه، اهداف فلزی و پلاستیکی شبه‌مین مدفون، با موفقیت آشکارسازی گردیدند (Christoforato, 2000).

ویکرز (Vickers, 2002) استفاده از فرکانس بین ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ مگاهرتز برای آشکارسازی انواع مین‌های ضد تانک^۱ و ضد نفر^۲ توسط روش GPR هوابرد را پیشنهاد نمود و به بررسی امکان آشکارسازی مین‌های ضد تانک سطحی و مدفون با استفاده از داده‌های پلاریزاسیون افقی در ارتفاع ۱۵۰۰ فوتی در صحرای یوما^۳ پرداخت.

موسلی و همکاران (Moussally et al., 2004) به منظور استفاده از روش GPR هوابرد برای شناسایی میدان مین، دستگاه GPR دهانه ترکیبی (GPSAR) را بر روی یک سکوی پرواز روتورکرافت CAMCOPTER مجهز به چندین دستگاه GPS نصب نمودند؛ که در این سیستم دستگاه‌های GPS امکان تعیین موقعیت و جهت دقیق سنسور را فراهم می‌نمایند. با توجه به نتایج آزمایش‌های انجام‌شده بر روی چند میدان مین به وسیله این سیستم، امکان شناسایی انواع مین‌های ضد تانک سطحی و مدفون در شرایط مختلف آزمایش و در محیط‌های ماسه‌ای خشک و خاک لومی با رطوبت متوسط وجود دارد.

از آنجا که در روش GPR هوابرد، آنتن‌ها از یک سکوی هوابرد آویزان و به وسیله هواپیمای پرسرعت حمل می‌شوند؛ مکانیسم آن از روش‌های مرسوم GPR زمینی پیچیده‌تر است. در این روش امواج الکترومغناطیس تولید شده، در هوا پخش و منتشر شده و به سطح زمین خواهند رسید؛ که بخش اعظم انرژی در هوا پراکنده شده و بقیه آن با زمین جفت می‌گردد. امواج بازتابش شده از لایه‌های زمین، برای رسیدن به گیرنده نصب‌شده بر روی هواپیما، از مرز زمین- هوا عبور خواهند کرد. در این حالت بزرگ بودن ضریب بازتاب در مرز هوا- زمین فرآیند آشکارسازی را پیچیده‌تر می‌کند.

با استناد به «تفاهم‌نامه همکاری مشترک مین‌زدایی بشردوستانه ایران - عراق» در سال ۱۳۸۴، بیش از ۲۰ میلیون مین از انواع مختلف در خاک کشور ایران در میادین مینی با مساحتی حدود چهار میلیون و دویست هزار هکتار کار گذاشته شده و نیز علاوه بر مین، بیش از ده‌ها میلیون مواد منفجره و بمب‌های خوشه‌ای نیز پس از جنگ در کشورمان به جا مانده است (www.defapress.ir)؛ بنابراین با توجه به برتری‌های روش GPR هوابرد نسبت به روش زمینی (سرعت عملیات و ایمنی بالا) استفاده از آن یک نیاز جدی بوده و گریز ناپذیر است.

آشکارسازی اهداف بزرگ و سطحی مانند مین‌های ضد تانک در بازه فرکانس ۲۰۰ مگاهرتز تا ۱ گیگاهرتز قابل انجام است. هرچند آشکارسازی مین‌های ضد نفر با سطح مقطع کوچک و محتوای فلزی،

- 1- Antitank (A-T)
- 2- Anti- Personal (A-P)
- 3- Yuma

4- Wavelet Transform

۲-۲- نسل دوم

دانیلز (Daniels, 2006) استفاده شده است؛ که در آن یک مین ضد نفر متشکل از دو قسمت اصلی محفظه هوادار (رنگ آبی) و بدنه حاوی مواد منفجره (رنگ قرمز) در عمق ۱۰ سانتیمتری در زیر خاک دفن شده است. موقعیت خطوط برداشت مختلف از سطح زمین تا ارتفاع ۱۰ متری با رنگ قرمز بر روی این مدل نشان داده شده است (شکل ۱). ویژگی‌های الکترومغناطیسی هر سه ماده هوا، خاک و مین که در مدل‌سازی مورد استفاده قرار گرفته؛ در جدول ۱ و ویژگی‌ها و ابعاد هندسی مدل در جدول ۲ درج شده است. تولید نگاشت راداری با بهره‌گیری از نرم‌افزار MATLAB و Reflexw و با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان انجام شده است.

در ادامه ردهای رادار مربوطه (A-Scan) در مرکز مدل ($x=0.25$) در Model A و در محل متناظر با آن و منطبق با مرکز دفن مین در Model B نیز استخراج گردید. در شکل ۲ نگاشت‌های راداری و ردهای مربوطه در مرکز آن در سطح زمین (شکل‌های ۲ الف و ج) و ارتفاع ۱۰ متری (شکل‌های ۲ ب و د) در فرکانس ۵۵۰ MHz به ترتیب برای دو مدل مفهومی مورد نظر در این تحقیق (Model A و Model B) به نمایش درآمده است. شکل‌های ۲-الف و ۲-ب مربوط به Model A می‌باشند؛ که سیگنال برگشتی به گیرنده را در کمترین و بیشترین ارتفاع مورد مطالعه در مرکز این مدل نشان می‌دهند. با توجه به این‌که در کمترین ارتفاع مربوط به این مدل فیزیکی، هیچ منعکس‌کننده‌ای وجود ندارد؛ دامنه سیگنال برگشتی صفر بوده و هیچ تغییری را نشان نمی‌دهد. در شکل ۲-ب نیز دامنه سیگنال برگشتی در اثر برخورد با مرز هوا-زمین دچار تغییر قابل توجه شده است. همچنین مرز مذکور به صورت پیوسته در نگاشت راداری مربوطه به تصویر درآمده است. در شکل‌های ۲-ج و ۲-د دامنه سیگنال‌های برگشتی به گیرنده در سطح زمین و ارتفاع ۱۰ متری از سطح زمین مربوط به Model B نشان داده شده‌اند. در شکل ۲-ج اثر حضور مین در نگاشت راداری به صورت هایپربولیک ظاهر شده است. در شکل ۲-د به دلیل ارتفاع نسبتاً زیاد پرواز و عمق دفن کم مربوط به مین (۱۰ cm) تشخیص اثر مین به صورت چشمی دشوار است. هر چند که از مقایسه سیگنال‌های نشان داده شده در شکل‌های ۲-ب و ۲-د به تفاوت بین آن دو که مربوط به اثر مین مدفون است، می‌توان پی برد. پدیده دیگری که در شکل‌های ۲-ب و ۲-د قابل مشاهده است، نوار رنگی ممتد در سراسر طول نگاشت است؛ که در اثر قطبیت موجک بازتاب یافته به وجود آمده است.

شکل‌های ۳ و ۴ ردهای راداری ثبت‌شده به وسیله گیرنده رادار در فرکانس ۵۵۰ MHz در تمام ارتفاع‌های مورد بررسی را نشان می‌دهند. بدیهی است که با توجه به این شکل‌ها، دامنه سیگنال دریافتی توسط گیرنده رادار برای هر دو مدل مفهومی مورد بررسی در این تحقیق، با افزایش ارتفاع خط برداشت، کاهش یافته است.

این سیستم سخت‌افزاری قابل حمل با هلیکوپتر، توسط موسسه BGR طراحی شده و به یک هلیکوپتر AS350 مجهز گردیده است. فرکانس عملیاتی در این سیستم ۱۵۰ مگاهرتز است. پهنای پالس دارای گزینه‌های ۱۲، ۶۰ و ۶۰۰ نانو ثانیه است. قدرت پیک ۶/۱ کیلو وات و کمترین زمان نمونه‌برداری ۱ نانو ثانیه است. قدرت تفکیک قائم ۱ متر، ۵ متر و ۵۰ متر است. همچنین موسسه UTIG سیستم GPR هواپیمای بال ثابت (fixed-wing) را توسعه داد؛ که شامل ارتفاع‌سنج، آنتن GPS، رادار، دستگاه گرانی‌سنج و مگنتومتر است (Liu and Feng, 2011).

۲-۳- نسل سوم

نسل سوم سیستم رادار دهانه ترکیبی (SAR) هواپرد دارای قابلیت GPR است؛ که سرعت بالا، فرکانس بالا و عمق نفوذ پایین از ویژگی‌های این سیستم است (Liu and Feng, 2011). اخیراً یک شرکت هلندی تولیدکننده تجهیزات تصویربرداری، در حال طراحی یک سیستم GPR هواپرد با عنوان Mine Kafon Drone است؛ که گفته می‌شود ۲۰ برابر سریع‌تر از روش‌های متداول عمل می‌کند. این سیستم قابلیت انجام نقشه‌برداری، آشکار سازی و منفجر کردن UXO را در سه مرحله مجزا و به طور متوالی دارد (<http://www.skylinephotography.co.uk>).

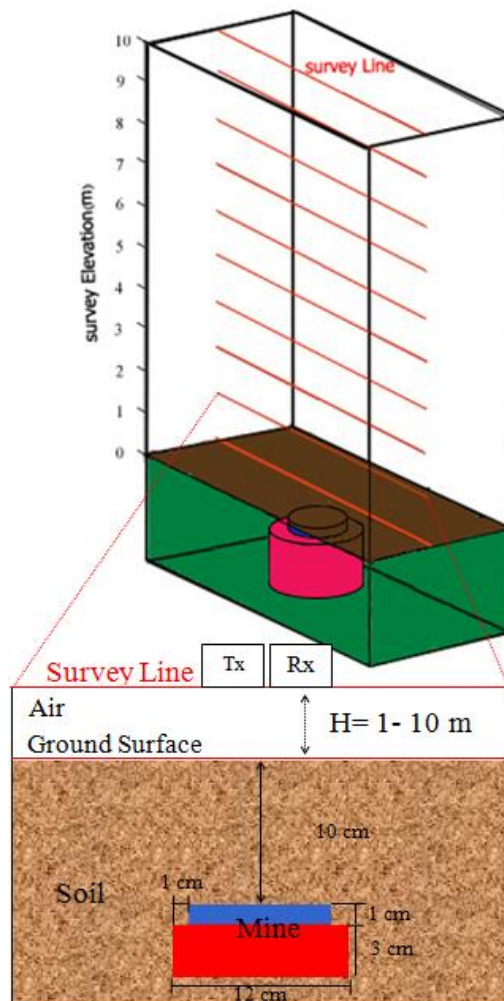
۳- شبیه‌سازی

در این تحقیق، انجام شبیه‌سازی داده‌های GPR هواپرد بدین ترتیب بوده است که نخست دامنه سیگنال‌های برگشتی به گیرنده در ارتفاع‌های مختلف (از صفر تا ۱۰ متر با طول گام ۱ متر) و در فرکانس‌های مختلف (از ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ مگاهرتز و با طول گام ۵۰ مگاهرتز) برای هر خط برداشت بر روی مدل‌های مفهومی، با استفاده از نرم‌افزارهای Reflexw و MATLAB با تکیه بر روش تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD)، به صورت نگاشت‌های راداری تهیه شده است. در مرحله بعد، در مرکز مدل ($x=0.25$) و در بازه زمانی ۰ تا ۱۰۰ ns ردهای زمان-رسید مربوط به تمام مدل‌ها (در هر دو حالت وجود مین و عدم وجود مین) در تمام خطوط برداشت (از ارتفاع صفر تا ۱۰ متر) و در بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ مگاهرتز برای هر خط برداشت استخراج گردید؛ که در مجموع تعداد ۶۳۸ سیگنال برگشتی مختلف، منطبق با مرکز مدل فیزیکی ایجاد شد. در ادامه انرژی سیگنال مربوط به هر یک از ردهای استخراج شده با بهره‌گیری از تبدیل هیلبرت محاسبه شد (Proakis and Manolakis, 1988) و اختلاف انرژی سیگنال‌های مرتبط با هر دو مدل مفهومی (شکل ۱) به عنوان یک شاهد اولیه از حضور مین در زیر سطح زمین به دست آمده و ترسیم شده است. برای طراحی مدل مفهومی (شکل ۱) از مدل مورد استفاده

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۳، شماره ۱، ۱۳۹۶.

تبدیل موجک و نمایش در حوزه زمان- فرکانس) در بخش ۳، به بررسی این موضوع پرداخته شده است.

همچنین تفاوت قابل ملاحظه‌ای بین سیگنال‌های متناظر مربوط به مدل‌های مفهومی A و B وجود دارد؛ که با انجام پردازش و تحلیل رفتار سیگنال با استفاده از روش‌های مختلف (تحلیل انرژی سیگنال،



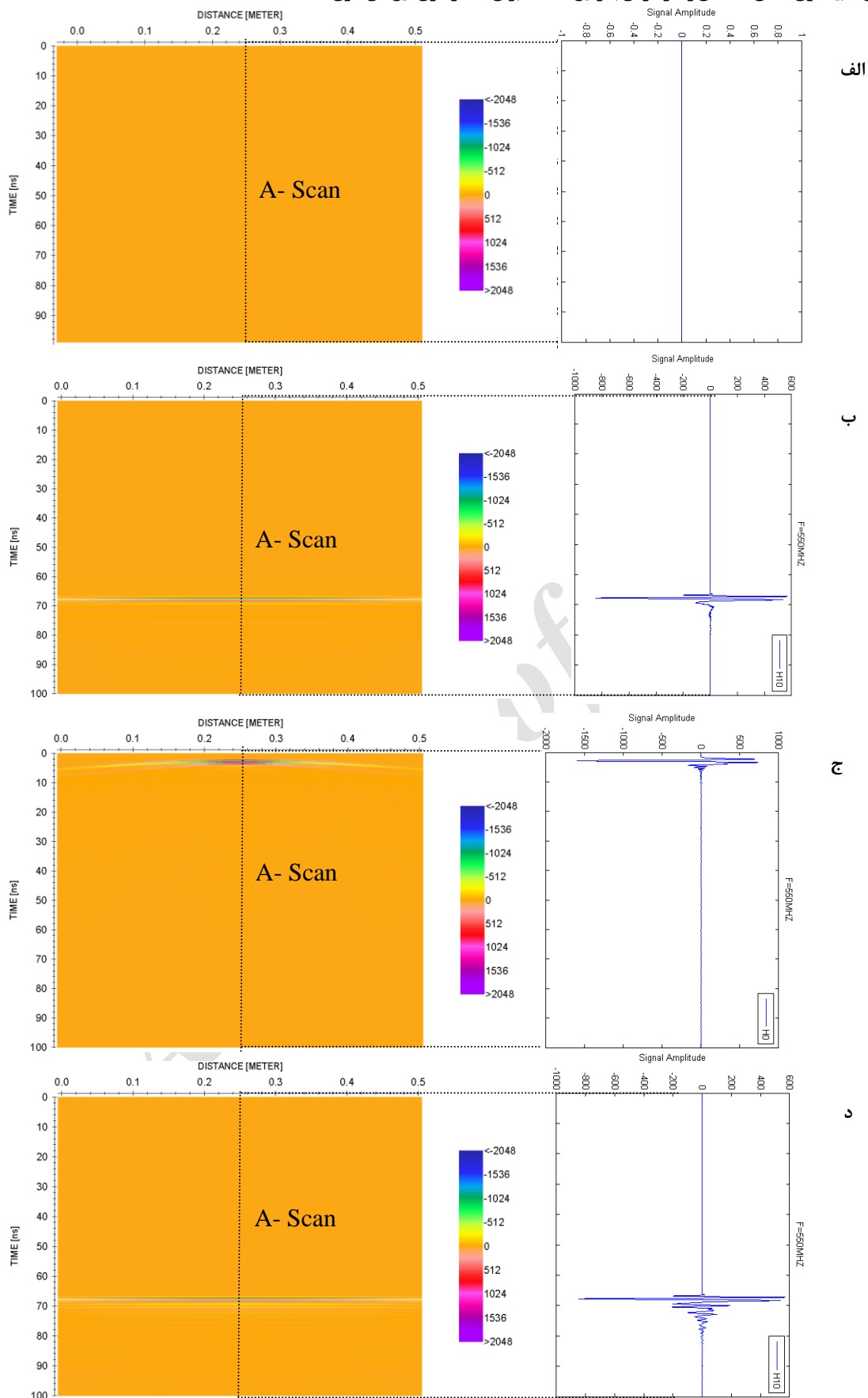
شکل ۱: موقعیت مین مدفون در داخل خاک و خطوط برداشت با استفاده از GPR هوابرد.

جدول ۱: ویژگی‌های الکترومغناطیسی مواد مورد استفاده در مدل‌سازی (Daniels, 2006).

جسم/ ماده	گذردهی نسبی الکتریکی	تراوایی نسبی مغناطیسی	رسانندگی الکتریکی (S/m)
هوا	۱	۱	۰
خاک	۹	۱	۰/۰۰۱
مین	۲/۳	۱	۰/۰۰۲۳

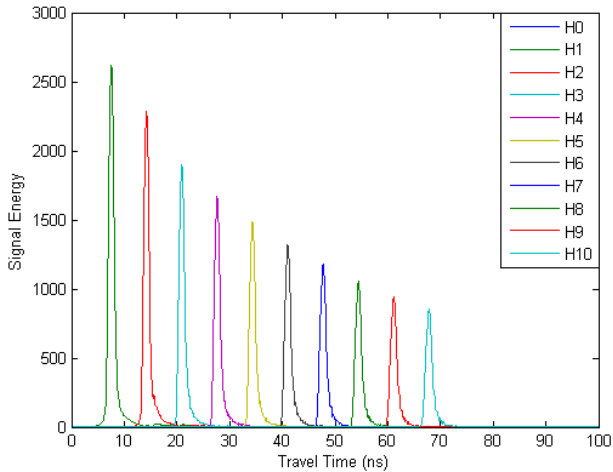
جدول ۲: ویژگی‌ها و ابعاد هندسی مواد مورد استفاده در مدل‌سازی.

جسم/ ماده	ضخامت/ ارتفاع (متر)	طول
هوا	۱-۱۰	۰/۵
لایه خاک	۰/۲	۰/۵
محفظه هودار مین	۰/۰۱	۰/۱
ماده منفجره مین	۰/۰۳	۰/۱۲

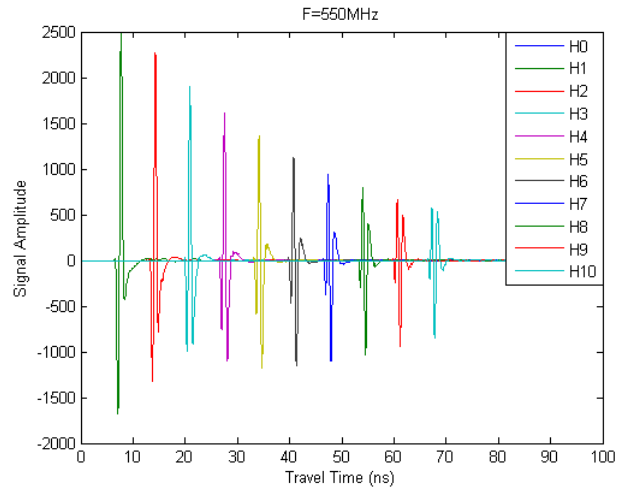


شکل ۲: نگاهش‌های راداری و ردهای مربوطه در مرکز آن‌ها. الف و ب) Model A ج و د) Model B در سطح زمین (شکل‌های الف و ج) و ارتفاع ۱۰

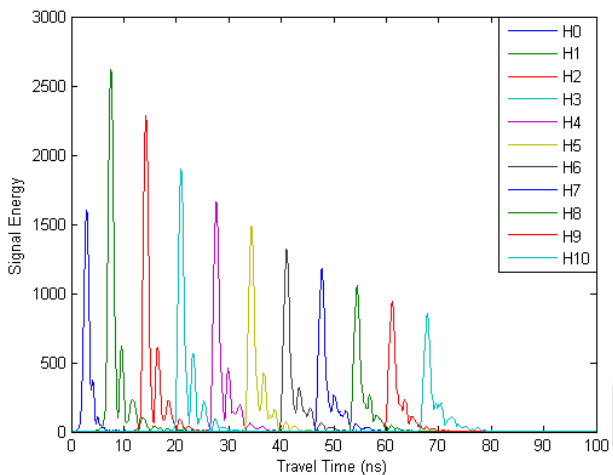
متری از سطح زمین (شکل‌های ب و د) در فرکانس ۵۵۰ MHz.



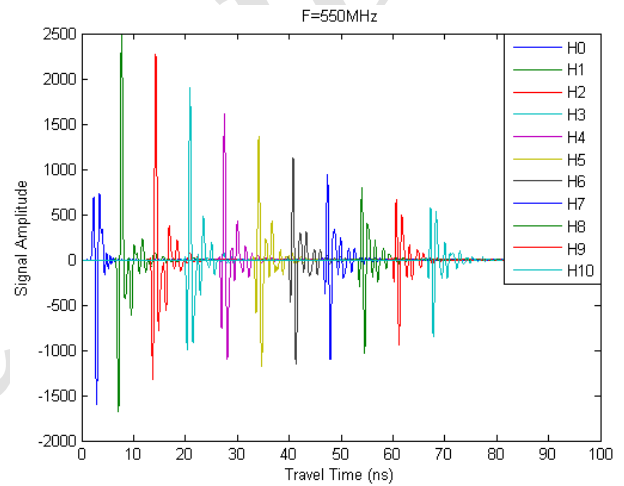
شکل ۵: طیف انرژی ردهای رادار مرتبط با Model A در فرکانس ۵۵۰ MHz برای ارتفاع‌های ۰ تا ۱۰ متر.



شکل ۳: ردهای رادار مرتبط با Model A در فرکانس ۵۵۰ MHz.



شکل ۶: طیف انرژی ردهای رادار مرتبط با Model B در فرکانس ۵۵۰ MHz برای ارتفاع‌های ۰ تا ۱۰ متر.



شکل ۴: ردهای رادار مرتبط با Model B در فرکانس ۵۵۰ MHz.

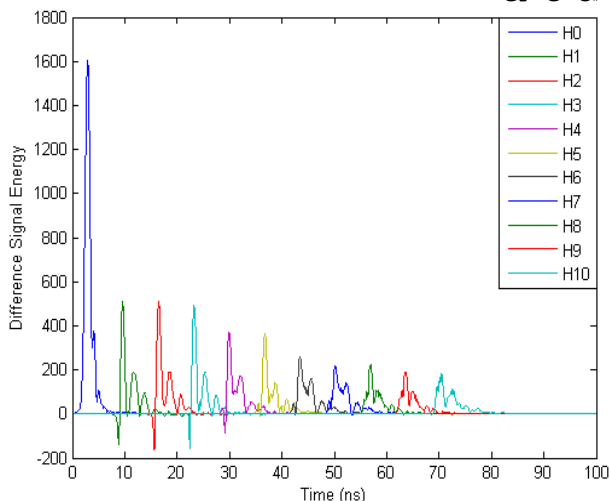
۴- تجزیه و تحلیل

۴-۱- بررسی انرژی سیگنال

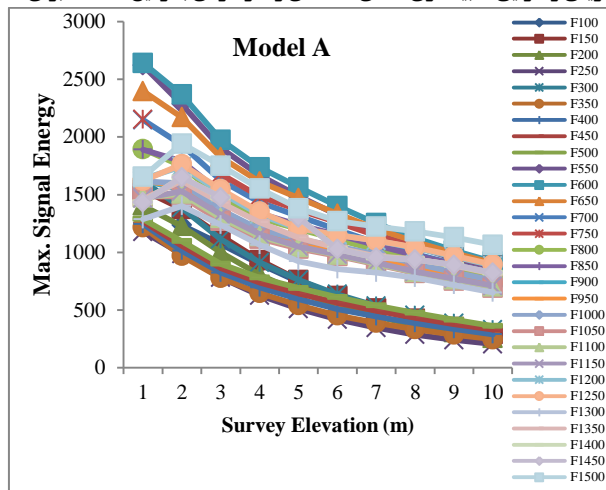
بیشینه مقدار انرژی سیگنال برای تمام ردهای تولید شده در بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ مگاهرتز در مقابل تغییر ارتفاع برداشت، به ترتیب برای دو حالت بدون مین و با حضور مین، مطابق آنچه که در شکل‌های ۷ و ۸ نمایش داده شده، به دست آمده است. با توجه به این شکل‌ها در هر دو حالت (Model A و Model B) با افزایش ارتفاع، بیشینه انرژی سیگنال دریافتی و در نتیجه احتمال اکتشاف کاهش پیدا کرده است؛ اما مقدار آن در بیشترین ارتفاع برداشت (ارتفاع ۱۰ متر) نیز قابل توجه است.

در مرحله بعد، طیف انرژی مرتبط با اثر مین مدفون، از اختلاف انرژی بین دو مدل مورد بررسی که در شکل‌های ۵ و ۶ نشان داده شده‌اند، به صورت آنچه که در شکل ۹ نشان داده شده، به دست آمده است.

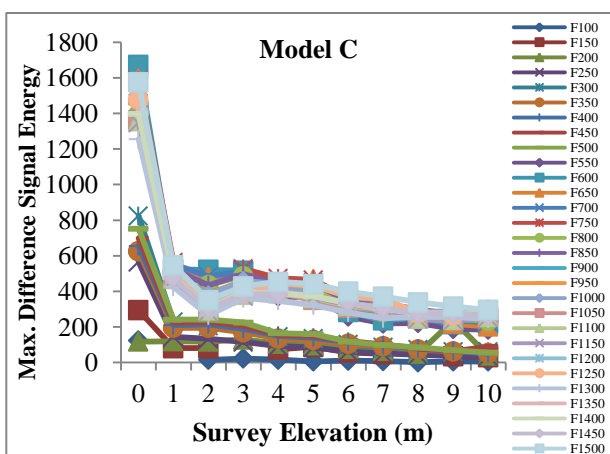
به منظور بررسی احتمال کشف مین مدفون و مقایسه با حالت بدون حضور مین در ارتفاع‌های مختلف برداشت، طیف انرژی ردهای راداری مربوط به ارتفاع‌های ۰ تا ۱۰ متر در بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ مگاهرتز برای دو حالت مورد بررسی (Model A و Model B)، با اعمال تبدیل هیلبرت و تعیین مقدار مطلق آن، به دست آمده است (شکل‌های ۵ و ۶). همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش ارتفاع، انرژی سیگنال در هر دو حالت کاهش پیدا کرده است. هر چند در بیشترین ارتفاع مورد بررسی (ارتفاع ۱۰ متری) نیز میزان انرژی سیگنال دریافتی قابل توجه است.



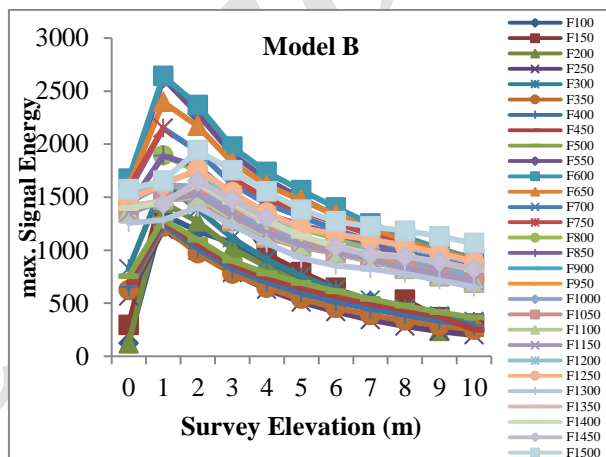
شکل ۹: اختلاف طیف انرژی بین مدل‌های Model A و Model B در فرکانس ۵۵۰ MHz برای ارتفاع‌های ۰ تا ۱۰ متر.



شکل ۷: نمودار بیشینه انرژی ردهای راداری مرتبط با Model A در بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ MHz در مقابل تغییر ارتفاع برداشت.



شکل ۱۰: اختلاف بیشینه انرژی بین مدل‌های Model A و Model B در بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ MHz در مقابل تغییر ارتفاع برداشت.



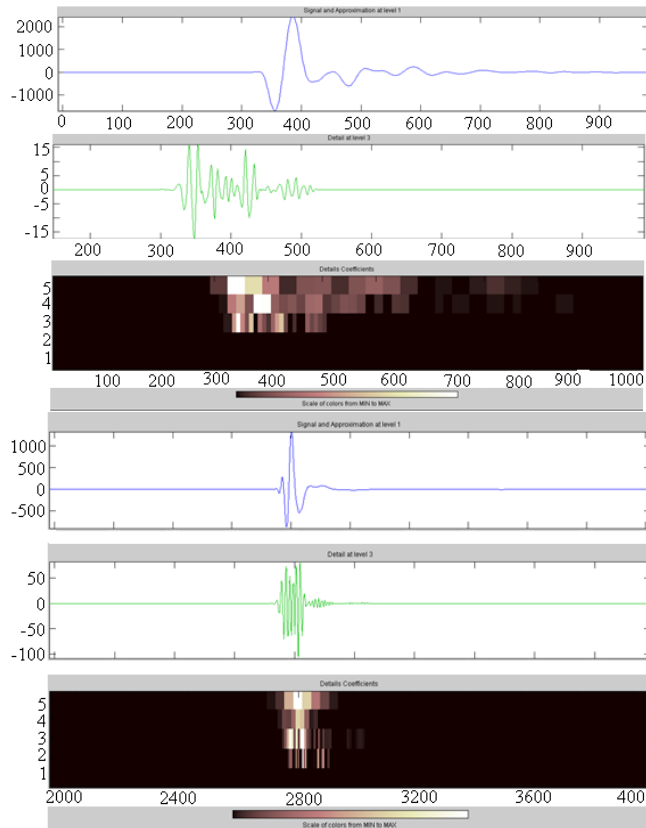
شکل ۸: نمودار بیشینه انرژی ردهای راداری مرتبط با Model B در بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ MHz در مقابل تغییر ارتفاع برداشت.

۴-۲- تبدیل موجک

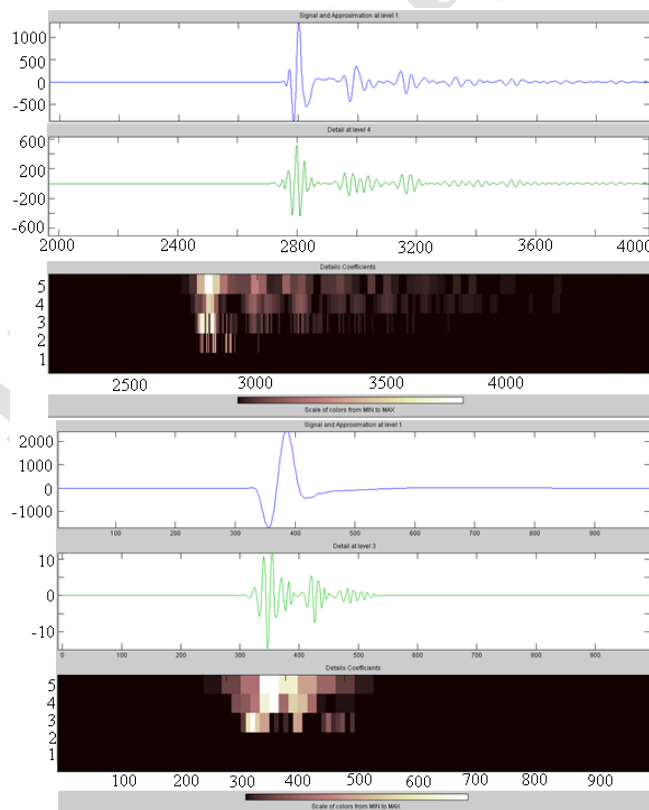
از آنجا که سیگنال‌های زمان-سیر GPR در حوزه زمان هستند و زمان‌های رسیدن امواج برگشتی از عوارض مورد توجه در این مطالعه به گیرنده، بسیار نزدیک به هم است؛ برای مشاهده تغییرات، با استفاده از تبدیل چند رزولوشنی موجک و با استفاده از موجک مادر db6 سیگنال‌ها به حوزه فرکانس منتقل شده و ضمن حذف نوفه از داده‌ها، با بهره‌گیری از این تبدیل، مؤلفه‌های فرکانسی مربوط به ردهای راداری که هر کدام مربوط به یک سطح/جسم منعکس‌کننده می‌باشند؛ استخراج شده است (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). در شکل ۱۱ مؤلفه‌های approximate و detail در سطح ۳ (d3) در ارتفاع ۱ و ۵ متری برای فرکانس‌های ۵۵۰ و ۱۵۰۰ مگاهرتز بر روی Model A نشان داده شده؛ که اثرات مربوط به انعکاس از مرز هوا-زمین در مؤلفه approximate به خوبی آشکار شده است. در شکل ۱۲ نیز اثر مربوط به مرز لایه در مؤلفه approximate و اثر مین در مؤلفه detail نمایان شده است.

همچنین اختلاف بین دو شکل ۷ و ۸ که بیشینه انرژی سیگنال دریافتی مرتبط با مین مدفون توسط گیرنده رادار را نشان می‌دهد، در شکل ۱۰ به تصویر درآمده است. با توجه به شکل ۱۰ با افزایش ارتفاع برداشت از ۰ تا ۱۰ متر در بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ MHz، میزان اختلاف انرژی دریافتی بین دو مدل مفهومی، قابل توجه است. آنچه که در شکل ۱۰ قابل توجه است، این است که میزان اختلاف انرژی مربوط به فرکانس‌های کمتر از ۵۰۰ مگاهرتز نسبت به فرکانس‌های بالاتر از آن به شکل معناداری پایین است و این می‌تواند به این دلیل باشد؛ که در فرکانس‌های پایین به دلیل بزرگ بودن نسبتی طول موج، احتمال آشکارسازی مین ضدنفر با اندازه کوچک، خیلی ضعیف است؛ اما در فرکانس‌های بالاتر با توجه به بالا بودن میزان اختلاف سطح انرژی، احتمال آشکارسازی آن بالاتر خواهد بود. برای بررسی بیشتر این موضوع تبدیل موجک و تبدیل زمان-فرکانس نیز بر روی داده‌ها اعمال گردیده است که نتایج آن در ادامه مورد بررسی قرار می‌گیرد.

نشریه پژوهش‌های ژئوفیزیک کاربردی، دوره ۳، شماره ۱، ۱۳۹۶.



شکل ۱۱: تبدیل موجک سیگنال زمان - سیر Model A در ارتفاع ۱ و ۵ متری و در فرکانس ۵۵۰ و ۱۵۰۰ مگاهرتز به ترتیب از بالا به پایین.

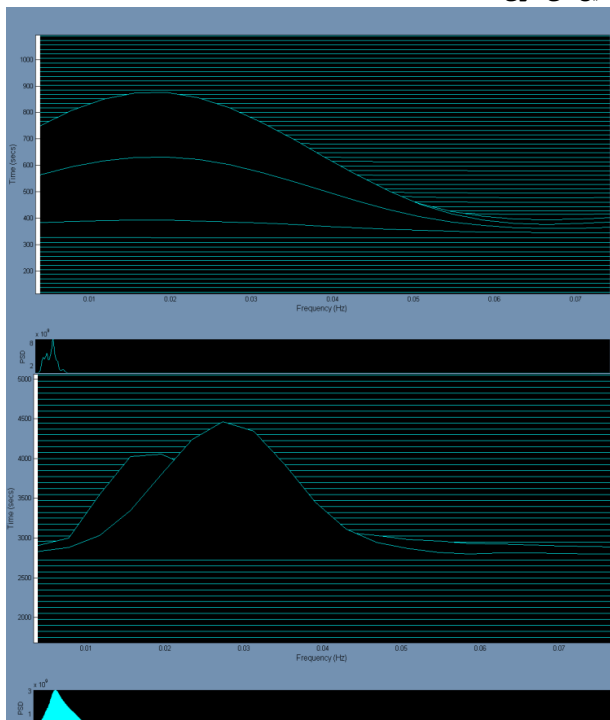


شکل ۱۲: تبدیل موجک سیگنال زمان - سیر Model B در ارتفاع ۱ و ۵ متری و در فرکانس ۵۵۰ و ۱۵۰۰ مگاهرتز به ترتیب از بالا به پایین.

۳-۴- بررسی سیگنال در حوزه زمان-فرکانس

با تبدیل موجک، با توجه به شکل‌های ۱۱ و ۱۲، در تعدادی از سیگنال‌ها، ردهای مربوط به موج مستقیم، انعکاس از فصل مشترک هوا-زمین و انعکاس از مین مدفون در زیر سطح زمین آشکار شده است. در تعدادی از سیگنال‌ها با وجود تبدیل موجک، اثر منعکس‌کننده‌های موج رادار به‌خوبی از هم تفکیک نشده است. برای رفع این مشکل سیگنال‌های مربوطه به حوزه زمان-فرکانس منتقل شده است (شکل‌های ۱۳ و ۱۴). با توجه به نتایج اعمال این تبدیل بر روی سیگنال‌ها، همان‌گونه که در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ مشهود است، پیک فرکانس مرتبط به ردهای راداری منعکس‌شده از مرز خاک/مین موجود در دو مدل A و B به‌وضوح خود را نشان داده است.

با توجه به اسپکتروگرام مربوط به مدل B در ارتفاع یک متری و فرکانس ۵۵۰ مگاهرتز، سه پیک فرکانسی ایجاد شده؛ که یکی مربوط به موج مستقیم، یکی مربوط به انعکاس از مرز زمین-هوا و دیگری مربوط به اثر مین است. البته در ارتفاع پرواز ۵ متری و فرکانس موج ارسالی ۱۵۰۰ مگاهرتز، فقط دو پیک فرکانسی ظاهر شده است و این می‌تواند به این دلیل باشد که در ارتفاع مذکور انرژی موج با توجه به بالا بودن فرکانس به شدت میرا شده و مانع آشکارسازی اثر مین شده است (شکل ۱۴)؛ بنابراین در ارتفاع‌های بیشتر نمی‌توان از فرکانس‌های بالا استفاده نمود.

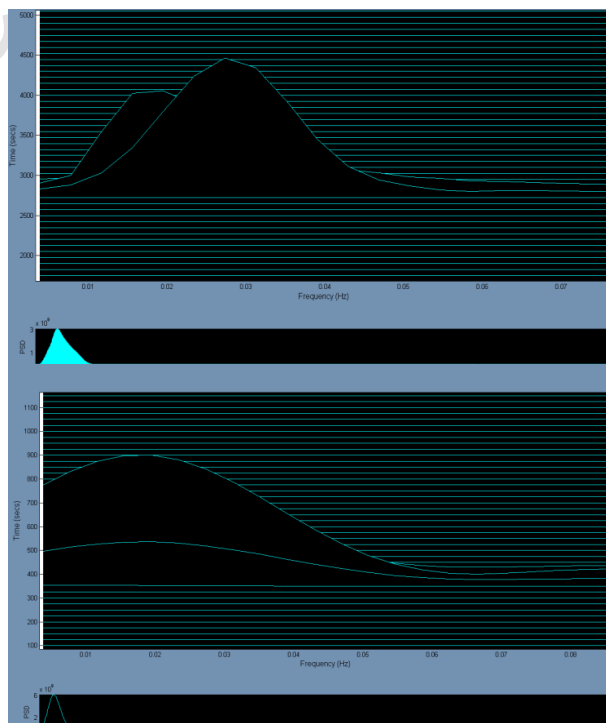


شکل ۱۴: نمایش اسپکتروگرام Model B در ارتفاع ۱ و ۵ متری و در فرکانس ۵۵۰ و ۱۵۰۰ مگاهرتز به ترتیب از بالا به پایین.

۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق به‌منظور امکان‌سنجی کاربرد روش GPR هوابرد در آشکارسازی محل مین فلزی ضد نفر، به شبیه‌سازی پاسخ یک مین مدفون در عمق ۱۰ سانتیمتری خاک با استفاده از روش GPR هوابرد پرداخته شده است. برای این منظور یک مدل مفهومی طراحی شده و ردها و نگاشت‌های راداری در ارتفاع‌های مختلف پرواز (۰ تا ۱۰ متر) و در بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ مگاهرتز در مرکز مدل و منطبق با مرکز مین مدفون، با استفاده از روش تفاضل محدود در حوزه زمان (FDTD) شبیه‌سازی گردید (Model B). همچنین این شبیه‌سازی برای مدل مفهومی عاری از مین (Model A) انجام شده است. در ادامه برای بررسی احتمال کشف توسط این روش، انرژی سیگنال دریافتی توسط گیرنده در دو حالت مذکور مورد بررسی قرار گرفته و اختلاف انرژی بین این دو حالت (Model C) به پاسخ دریافتی از مین مدفون نسبت داده شده است.

با افزایش ارتفاع پرواز از ۰ تا ۱۰ متر در بازه فرکانسی ۱۰۰ تا ۱۵۰۰ مگاهرتز، میزان اختلاف انرژی دریافتی توسط گیرنده رادار قابل توجه است. هرچند با توجه به تبدیل موجک و تبدیل زمان-فرکانس در فرکانس‌های نزدیک ۵۵۰ مگاهرتز تا ارتفاع ۱۰ متری نیز اثر مین قابل آشکارسازی است و در فرکانس‌های بالاتر فقط در ارتفاع‌های پایین اثر مین دیده می‌شود. با افزایش ارتفاع با توجه به بالا بودن میرایی انرژی موج ارسالی، احتمال آشکارسازی اهداف کوچک مانند مین ضد نفر، بسیار ضعیف می‌شود.



شکل ۱۳: نمایش اسپکتروگرام Model A در ارتفاع ۱ و ۵ متری و در فرکانس ۵۵۰ و ۱۵۰۰ مگاهرتز به ترتیب از بالا به پایین.

Daniels, D.J., 2006, A review of GPR for landmine detection, *Sensing and Imaging: An international journal*, 7 (3), 90-123.

Daniels, D.J., 2009, Ground penetrating radar for buried landmine and IED detection. In *Unexploded Ordnance Detection and Mitigation*, Springer Netherlands, pp. 89-111.

Davis, K., Li, Y. and Nabighian, M., 2010, Automatic detection of UXO magnetic anomalies using extended Euler deconvolution, *Geophysics*, 75 (3), G13-G20.

Davis, K., Li, Y. and Nabighian, M.N., 2011, Effects of low-pass filtering on the calculated structure index from magnetic data, *Geophysics*, 76, L23-L28.

Fruehauf, F., Heilig, A., Schneebeli, M., Fellin, W. and Scherzer, O., 2009, Experiments and algorithms to detect snow avalanche victims using airborne ground-penetrating radar, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 47 (7), 2240-2251.

Gader, P.D., Mystkowski, M. and Zhao, Y., 2001, Landmine detection with ground penetrating radar using hidden Markov models, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39 (6), 1231-1244.

Gonzalez-Huici, M., 2012, A strategy for landmine detection and recognition using simulated GPR responses, In *Ground Penetrating Radar (GPR)*, 14th International Conference on IEEE, pp. 871-876.

Heilig, A., Schneebeli, M. and Fellin, W., 2008, Feasibility study of a system for airborne detection of avalanche victims with ground penetrating radar and a possible automatic location algorithm, *Cold Regions Science and Technology*, 51 (2), 178-190.

Jin, T. and Zhou, Z., 2010, Ultrawideband synthetic aperture radar unexploded ordnance detection, *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 46 (3), 1201-1213.

Li, Y., Devriese, S.G.R., Krahenbuhl, R. and Davis, K., 2013, Enhancement of magnetic data by stable downward continuation for UXO application, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, 51, 3605-3614.

Liu, S. and Feng, Y., 2011, Airborne GPR: Advances and numerical simulation, In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, pp. 3397-3400.

Machguth, H., Eisen, O., Paul, F. and Hoelzle, M., 2006, Strong spatial variability of snow accumulation observed with helicopter-borne GPR on two adjacent Alpine glaciers, *Geophysical Research Letters*, 33 (13).

Maierhofer, C., 2003, Nondestructive evaluation of concrete infrastructure with ground penetrating

۶- سپاس‌گزاری

نگارندگان بر خود لازم می‌دانند که از دکتر ابوالقاسم کامکار روحانی عضو هیئت علمی دانشگاه صنعتی شاهرود به خاطر مشاوره علمی و فراهم نمودن امکان دسترسی به منابع علمی و نرم‌افزارهای مورد نیاز، مهندس مختار محمدی و مهندس محمد مهدی علیان‌نژادی دانشجویان دکتری مهندسی برق و پردازش تصویر دانشگاه صنعتی شاهرود و مهندس سعید پرونو دانشجوی دکتری ژئوفیزیک دانشگاه تهران به خاطر راهنمایی‌های با ارزش ایشان تشکر و قدردانی نمایند.

۷- منابع

پرونو، س.، ۱۳۹۳، پردازش، مدل‌سازی و تفسیر داده‌های GPR به منظور تعیین عمق، ضخامت و محدوده جانبی یخچال‌ها در منطقه علم‌کوه مازندران، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه صنعتی شاهرود.

Arcone, S.A. and Delaney, A.J., 2000, GPR images of hidden crevasses in Antarctica, In *8th International Conference on Ground Penetrating Radar*, International Society for Optics and Photonics, pp. 760-765.

Benedetto, A. and Pajewski, L., 2015, Civil engineering applications of ground penetrating radar, *Springer Transactions in Civil and Environmental Engineering*.

Boashash, B., 2015, Time-frequency signal analysis and processing: a comprehensive reference, Academic Press.

Butler, D.K., Simms, J.E., Furey, J.S. and Bennett, H.H., 2012, Review of magnetic modeling for UXO and applications to small items and close distances, *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 17 (2), 53-73.

Chen, C.C., Higgins, M.B., O'Neill, K. and Detsch, R., 2001, Ultrawide-bandwidth fully-polarimetric ground penetrating radar classification of subsurface unexploded ordnance, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39 (6), 1221-1230.

Christoforato, S., 2000, The feasibility of operating an Ultra Wideband Synthetic Aperture Radar (UWB SAR) from an airship for the detection of mined areas in a humanitarian role, 3rd International Airship Convention Friedrichshafen, Germany.

Crocco, L. and Ferrara, V., 2014, A review on ground penetrating radar technology for the detection of buried or trapped victims. In *Collaboration Technologies and Systems (CTS)*, International Conference on IEEE, pp. 535-540.

Daniels, D.J., 2004, *Ground penetrating radar*, Vol. 1.

- GPR MD sensor system (ALIS), In Defense and Security, International Society for Optics and Photonics, pp. 1000-1007.
- Vickers, R.S., 2002, Design and applications of airborne radars in the VHF/UHF band, IEEE aerospace and electronic systems magazine, 17 (6), 26-29.
- Weeks, M., 2007, Digital Signal Processing Using MATLAB and wavelets, sl: David F.
www.defapress.ir
www.geophysics.mines.edu/cgem/consortia/uxo.html
www.skylinephotography.co.uk
- Youn, H.S., 2007, Development of unexploded ordnances (UXO) detection and classification system using ultra wide bandwidth fully polarimetric ground penetrating radar (GPR), Doctoral dissertation, The Ohio State University.
- radar, Journal of Materials in Civil Engineering, 15 (3), 287-297.
- Moussally, G., Breiter, K. and Rolig, J., 2004, Wide-area landmine survey and detection system. In Ground Penetrating Radar, Proceedings of the Tenth International Conference on IEEE, pp. 693-696.
- Olhoeft, G.R. and Modroo, J.J., 2006, Locating and identifying avalanche victims with GPR, The Leading Edge, 25 (3), 306-308.
- Proakis, J.G. and Manolakis, D.G., 1988, Introduction to digital signal processing, Prentice Hall Professional Technical Reference.
- Reynolds, J.M., 2011, An introduction to applied and environmental geophysics, John Wiley and Sons.
- Sato, M., Fujiwara, J., Feng, X., Zhou, Z.S. and Kobayashi, T., 2005, Development of a hand-held



Numerical simulation of airborne GPR data for detection of metallic landmines

Fereydoun Sharifi¹ and Safa Khazaei^{2*}

1- Ph.D. Candidate, School of Mining, Petroleum and Geophysics, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

2- Assistant Professor, Research Center of Civil and Construction, University of Imam Hossein, Tehran, Iran

Received: 7 December 2016; Accepted: 22 April 2017

Corresponding author: skhazai@ihu.ac.ir

Keywords

Airborne GPR
Numerical Simulation
Signal Energy
Wavelet Transform
Time-Frequency Analysis
Unexploded Ordnance (UXO)
Detection

Extended Abstract

Summary

Cleaning of contaminated lands containing unexploded ordnance (UXO) and mine fields demands special consideration in the war-torn countries. Some geophysical methods have been used for detecting these destructive remnants of war. Nowadays, airborne GPR has been considered as a fast and effective tool for UXO detection. In this study, the feasibility of airborne GPR for detection of anti-personal metallic landmines has been investigated by numerical simulation of back scattered GPR waves from two artificial physical models A and B. Model A is a column of a two-layer model comprising of a layer of soil under a

layer of air. In model B, an anti-personal metallic landmine has been buried in the center of model A at a depth of 10 cm beneath the soil. By using the numerical finite-difference time-domain (FDTD) method, the radargram and central traces of back scattered GPR waves from both physical models A and B have been simulated in various altitudes (0-10 meters) and operating frequencies of the transmitted GPR wave (100-1500 MHz). To do this, MATLAB and REFLEXW software packages have been employed. Moreover, several signal processing techniques including signal energy analysis, multi resolution wavelet transform, and time-frequency analysis have been performed instead of using the noise removal and trace extraction, which are related to the target. As a result, detection of intended mine becomes possible by applying airborne GPR up to altitude of 10 m and using operation frequency of transmitted GPR wave of 550 MHz to over 1000 MHz.

Introduction

Landmines are a humanitarian challenge because they indiscriminately kill and maim people and they remain active for decades. As a result, most of the victims of mines are innocent men, women and children. Hence, cleaning of contaminated lands containing UXO and mine fields requires special consideration in the war-torn countries. In situations of dealing with dangerous landmine targets and a wide-area coverage requirement, tactical forces are highly desirable. This requirement could be attained by applying airborne GPR method. Therefore, in this study, the feasibility of detection anti-personal metallic landmines using airborne GPR method has been considered. For this purpose, the backscattered GPR waves from two artificial models have been simulated by applying numerical FDTD method in various altitudes and operational frequencies.

Methodology and Approaches

In this study, the ability of airborne GPR data simulation for detecting anti-personal metallic landmines has been evaluated by applying numerical FDTD method using MATLAB and REFLEXW software packages. Then, travel time signals have been analyzed using signal energy analysis, wavelet transform, and time-frequency analysis techniques.

Results and Conclusions

Based on the numerical simulation and signal processing conducted in this study, the results show that detection of the landmine target under test is possible up to the altitude of 10 m using the operation frequency of 550 MHz to over 1000MHz. Furthermore, the results show that the detection of the target using airborne GPR operation in high frequencies of the transmitted GPR wave and in low altitudes is feasible.