

رادارهای نفوذ کننده در زمین در مقایسه با دیگر فناوری های کاوش های زیر زمینی

اشکان معصومی
دانشگاه آزاد اسلامی واحد بوشهر
Am_arshad_85@yahoo.com

حمید دهقانی
دانشگاه صنعتی مالک اشتر
hamid_deh@yahoo.com

چکیده: امروزه نیاز به اکتساب اطلاعات مربوط به اکتشاف زمین و زمین شناسی در کاربردهای مختلف گسترش یافته اند. به دنبال این نیاز تکنولوژی های مختلفی از گذشته تاکنون معرفی شده اند. در این میان رادارهای نفوذ در زمین در دهه های اخیر گسترش بسیاری یافته اند. در این مقاله به مقایسه این رادار ها با دیگر فناوری های کاوش زمین می پردازیم.

کلمات کلیدی: رادارهای نفوذ در زمین، تفکیک پذیری، ثقل سنجی، ژئومغناطیس، ژئوالکتریک

خلاصه: بمنظور کاوش های زیر زمینی برای اکتساب دیتای مورد نیاز فناوری های مختلفی معرفی شده اند. رادارهای نفوذ در زمین یکی از این فناوری هاست که در دهه های اخیر بسیار مورد توجه قرار گرفته شده است. معمولاً اشیا و مواد مختلف بر اساس مجموعه ای از پارامترها معرفی می شوند. برای مثال پارامترهایی از قبیل اندازه، شکل، رنگ، بافت، چیدمان و غیره پارامترهایی هستند که انسان از آنها برای تفکیک مواد و اشیای مختلف در محدود طول موج های مرئی استفاده می نماید. از آنجائیکه این پارامترها برای مواد زیر سطح زمین قابل اندازه گیری نیستند، باید پارامتر یا پارامترهایی برای اندازه گیری انتخاب شوند که ویژگی های زیر را داشته باشند:

- ۱- به طریقی برای مواد زیر سطح زمین از روی یا بالای سطح زمین قابل اندازه گیری باشند.
 - ۲- با استفاده از آنها تفکیک قابل قبولی بین مواد مختلف ایجاد شود.
- از این رو اساس این روش ها یک ارسال و یک دریافت می باشد. سیگنالی یا میدانی که به پارامتر خاصی از مواد حساس است تولید شده، وارد زمین شده و انعکاس یا تغییرات آن اندازه گیری می شود. خروجی فرایند اندازه گیری تحلیل و تفسیر شده و در مورد محتوای زیر سطح

زمین اظهار نظر می شود. از جمله پارامترهای قابل اندازه گیری مقاومت الکتریکی مواد است که امکان اندازه گیری آن از روی سطح زمین وجود دارد. شکل (۱) نمونه ای از این اندازه گیری ها را نشان می دهد. این نکته در مورد همه روش های آشکار سازی های زیر سطح زمین صادق است که تجربه تفسیر کننده داده های بدست آمده از روش های مختلف، نقش اصلی را در دقت و صحت اشیاء و هدف های تعیین شده دارد.

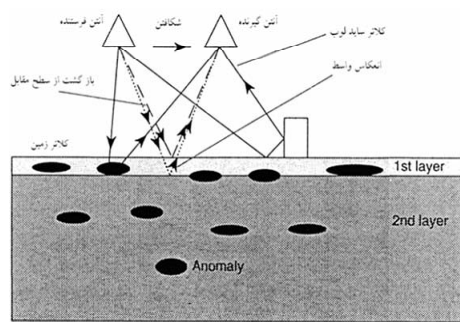
۱- رادار نفوذ کننده در زمین GPR

در روش های رادارهای نفوذ در زمین از پارامتر ثابت دی الکتریک مواد مختلف برای شناسایی آنها استفاده می شود. در این روش ها یک موج الکترومغناطیسی به زمین وارد شده و متناسب با ثابت دی الکتریک مواد زیر زمین، گیرنده در زمانهای مختلف امواجی را دریافت می کند. با کنار هم قرار دادن تمام اموج دریافتی یک تصویر خام از زیر زمین در اختیار کاربر قرار می گیرد. در مرحله بعد پردازش های زیادی روی داده های تهیه شده، انجام می گیرد. پس از این پردازش ها یک تصویر تقریباً دقیق از زیر سطح زمین در اختیار کاربر قرار داده می شود.

۱-۱- معرفی و مشخصات و نحوه عملکرد رادارهای نفوذ در زمین
فناوری رادارهای نفوذ در زمین یک تکنیک راداری است که برای کاوش های زیر سطح (نزدیک به سطح) زمین مورد استفاده قرار می گیرد. این فناوری در طی سه دهه اخیر مطرح و گسترش داده شده است. فناوری رادارهای نفوذ در زمین می تواند

یک تصویر سه بعدی از زیر سطح، 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 زیر سطح را تعیین نمود.

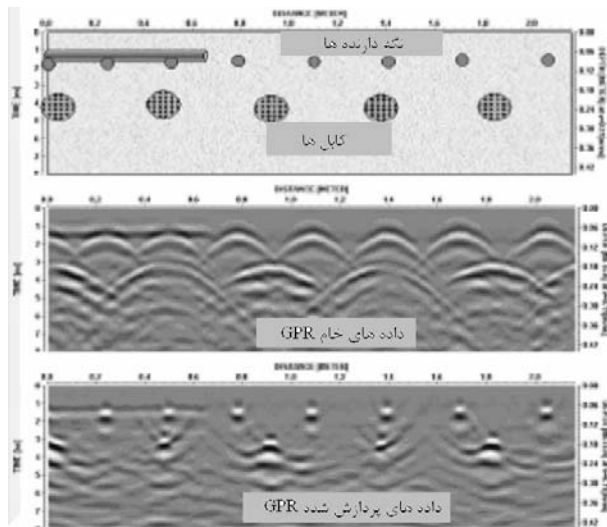
رادارهای نفوذ در زمین از خاصیت تفرق امواج الکترومغناطیسی برای مکان یابی اشیای مدفون شده استفاده می نماید. همانگونه که در شکل ۱ نشان داده شده است، پرتوی الکترومغناطیسی توسط یک آنتن فرستنده به سطح ارسال می شود. بسته به طول موج، این امواج در سطح نفوذ کرده و با سرعتی از بین مواد زیر سطح عبور می کنند. این سرعت با ضریب دی الکتریک مواد زیر سطح ارتباط دارد. این امواج در طی نفوذ در زیر سطح به مواد و اشیای برخورد نموده که خواص الکتریکی (ضریب دی الکتریک) متفاوتی با محیط اطراف خود دارند. در برخورد با این اشیاء، امواج متفرق شده و بخشی از آن توسط یک آنتن گیرنده در روی سطح زمین آشکار سازی می شود. با تحلیل این داده ها می توان در خصوص وجود، نوع و مشخصات اشیای زیر سطح اطلاعاتی را استخراج نمود.



شکل ۱: لایه فیزیکی سیستم رادار

رادارهای نفوذ در زمین در محدوده $VHF-UHF$ از طیف الکترومغناطیس فعالیت می کنند. علت انتخاب این محدوده بر این اساس است که فرکانس های پایین برای نفوذ در زیر سطح زمین بهتر جواب می دهند. از طرف دیگر هر چه فرکانس بیشتر باشد، طول موج کمتر بوده و امکان شناسایی اشیایی با اندازه کوچکتر مثل لوله و کابل، بیشتر فراهم می شود. معمولا رادارهای نفوذ در زمین در فرکانس مرکزی 150 MHz در محدوده فرکانسی 75 MHz تا 300 MHz فعالیت می کنند. با این وجود در برخی موارد مشاهده می شود که از فرکانس 500 MHz برای شناسایی های دقیق در زیرسطح و از فرکانس 20 MHz برای شناسایی حفره ها و تونل های حفر شده در عمق زیاد استفاده شده است. توان تفکیک مکانی این فناوری توسط فرکانس مورد استفاده کنترل می شود. بر اساس فرکانس استفاده شده، دقت این فناوری از چند سانتیمتر برای مطالعات کانی شناسی تا چند صد متر در مطالعات یخ های قطبی تغییر می کند. عمق نفوذ در زیر سطح زمین توسط فرکانس و خواص الکتریکی مواد کنترل می شود. عمق نفوذ معمول برای این فناوری، بیشتر از 30 متر می باشد. برای شناسایی اشیای پنهان شده عمق نفوذ این فناوری 3 تا 15 فوت و توان تفکیک آن در بهترین حالت $0/1$ فوت (چهار سانتیمتر) است.

نوع و نمونه ای از خروجی، از آنجایی که اساس این فناوری رادار است، خروجی یک سیستم رادارهای نفوذ در زمین سیگنال بوده که با استفاده از تکنیک های پردازش سیگنال به تصویر تبدیل می شود. این تصویر، تفسیر شده و با استفاده از تکنیک های پردازش تصویر به اطلاعات تبدیل می شود. نمونه ای از این اطلاعات در شکل نشان داده شده است. در شکل (2) نمونه داده اخذ شده توسط سیستم های رادارهای نفوذ در زمین و اطلاعات تولید شده نشان داده شده است.



شکل (2): نمونه ای از داده و اطلاعات تولید شده توسط رادارهای نفوذ در زمین

۲-۱- شرایط و محدودیت ها

۱-۲-۱- عوامل موثر بر سیستم

زمین از چند لایه تشکیل شده که میزان هدایت هر یک متفاوت است، از این رو موجب محدودیت در عمق نفوذ سیگنال می شود. از طرفی جنس خاک، نرمی و زبری، و میزان رطوبت آن بر میزان نفوذ و انتشار امواج برگشتی و همچنین تضعیف سیگنال موثر می باشد. از طرف دیگر، با توجه به گسترده بودن رنج سیستم رادارهای نفوذ در زمین سیگنال، انتخاب رنج عملکردهای فرکانسی، یک طرح مدولاسیون خاص، و نوع آنتن و پلاریزاسیون آن بستگی به فاکتورهایی چون اندازه و شکل هدف، خواص انتقال از واسط، و احتیاجات عملی تعریف شده از لحاظ اقتصادی دارد. مشخصه یک نوع خاص از سیستم می تواند توسط آزمون فاکتورهای مختلفی که بر دقت و آشکارسازی اثر می گذارند بدست می آید. برای اجرای موفقیت آمیز، رادار نفوذ کننده در زمین بایستی موارد روبرو را محاسبه کرد: (۱) نرخ سیگنال به کلاتر (۲) نرخ سیگنال به نویز مناسب (۳) دقت مکانی مناسب از هدف (۴) دقت عمق مناسب از هدف. اکثر سیستم های رادارهای نفوذ در زمین سیگنال برگشتی پراکنده شده را از هدف آشکار می کنند. تخمین مناسبی از عملکرد رادار را می توان با ملاحظه فاکتورهای روبرو بدست آورد: تلفات مسیر، قابلیت بازتاب هدف، رنج دینامیکی سیستم و کلاتر. همچنین می توان دقت مکانی رادار را با ملاحظه جداگانه دقت عمق و سطح بررسی کرد. شکل ۱ لایه فیزیکی سیستم رادار را نشان می دهد [4].

تلفات ماده، تلفات جداسازی و بازتاب هدف یا تلفات پراکندگی عوامل موثر بر رنج رادارهای نفوذ در زمین هستند. البته انواع دیگری از تلفات وجود دارند مانند: تلفات آنتن، تلفات عدم تطابق فرستنده و آنتن که در حدود $-1db$ است، تلفات کوپلینگ ارسال و ارسال مجدد، تلفات تضعیف آنتن. در حالت کلی کلاتر در رنج زمانی کوتاه اهمیت زیادی دارد و برعکس در زمان های بزرگ از اهمیت آن کاسته می شود.

۱-۲-۲- تفکیک پذیری در عمق و سطح

در دقت عمق، گونه ای از کاربردهای رادار زیر سطح، مانند ارزیابی ضخامت لایه جاده وجود دارند که به یک سیگنال واسط متمایل اند. پس می توان عمق را با اندازه گیری اختلاف زمانی بین لبه هدایت موجک گیرنده و یک موج زمانی بدست آورد. در این مورد پهنای پالس سیگنال گیرنده بسیار مهم تر است تا موجک فرستنده.

در مورد دقت سطح، زمانیکه مکان یابی هدف مورد نظر است و هنگامیکه نیاز به تشخیص بین بیش از یک هدف در عمق یکسان مد نظر است، این دقت از سیستم رادار زیر سطح اهمیت می یابد. دقت سطح توسط مشخصات آنتن و پردازش سیگنال بکارگرفته شده مشخص می شود. در حالت کلی برای یافتن یک دقت سطح قابل قبول به آنتن با بهره بالا احتیاج داریم. پس آنتن با سطح مقطع موثر در پایین ترین فرکانس ارسالی ضروری است [5]. از طرفی مشکلات مربوط به فرکانس

های پایین را نیز خواهیم داشت. از طرفی برای داشتن ابعاد آنتن کوچک و بهره بالا به استفاده از فرکانس حامل بالاتری نیاز داریم که ممکن است به درون ماده در عمق موثر نفوذ نکند. هنگام انتخاب تجهیزات برای یک کاربرد خاص مقایسه بین دقت سطح و اندازه آنتن، اسکوپ برای پردازش سیگنال، و قابلیت برای نفوذ مواد مورد نیاز است. دقت سطح با افزایش تضعیف بهبود می یابد. اکثر سیستم های رادارهای نفوذ در زمین از آنتن های فرستنده و گیرنده مجزا استفاده می کنند که یک مد دوحالتی را می دهد، که برای مد های بازبینی زمین شناسی بیشتر صادق است و بکار می رود.

۱-۳-۳- فرایند اکتساب داده و پردازش آن

پس از بیان ملاحظات و محدودیت های سیستم، اکنون این سوال مطرح می شود که سیستم چطور سیگنال ارسالی را به خروجی های بفرم تصاویر چند بعدی یا مشخصه نمودارهای آماری تبدیل می کند. برای این منظور بتفضیل به بررسی فرایندی می پردازیم که در آن سیستم ابتدا با ارسال سیگنال به محیط عمل و دریافت سیگنال بازگشتی از آن (بخش راداری) بعد از آن سیگنال دریافتی وارد پردازشگر شده، عملیات های مدولاسیون و کانولوشن و غیره بر روی آن انجام شده، و تکنیک های پردازش تصویر برای داشتن تصویر مطلوب، که بیانگر ویژگی های خواسته شده است، اعمال می شود.

۱-۳-۳-۱- تکنیک های مدولاسیون و پردازش سیگنال

رایجترین طرح سیستم مورد استفاده رادار ضربه است، و در اصل از لحاظ اقتصادی تنها سیستم های راداری قابل دسترس، استفاده از پالس کوتاه یا ضربه است که عموماً در طبقه بندی مدولاسیون دامنه قرار می گیرد [6]. تکنیک مدولاسیون بسیار رایج دیگر مدولاسیون فرکانسی است که توسط پالس ترکیبی صورت می گیرد و بدنبال آن تکنیک های مدولاسیون نويز و کدگذاری شده استفاده می شود.

در سیستم رادار نفوذ کننده در زمین یک سیگنال باند پهن از میان زمین فرستاده و سیگنال پراکنده شده برگشتی ضعیفی را از هدف یا اهداف آشکار می کند، که برای مثال می تواند مین باشد. قابلیت سیستم اندازه گیری برای آشکار سازی دو هدف به نوع شکل موج و فرآیند آشکار سازی گیرنده بستگی دارد. سطوح مربوطه از دو سیگنال دریافتی تضعیف افت رسانه بخوبی به سطح مقطع های اهداف بستگی دارد [7]. سطح سیگنال بازگشتی از هدف کوچکتر ممکن است بسیار کمتر از هدف بزرگتر باشد. از طرفی قابلیت سیستم اندازه گیری برای رفع بازگشت ها از دو هدف به نرخ سیگنال به نویز مناسب بستگی دارد.

پردازش سیگنال اساساً وسیله ای برای کاهش کلاتر می باشند. نرخ سیگنال به نویز رادار کلیدی برای آشکار سازی هدف است. بیشتر نویز سیستم در سیستم های رادار نفوذ کننده در زمین توسط میانگین گیری قابل برطرف کردن هستند. هدف کلی پردازش سیگنال در رادار نفوذ در سطح نمایش تصویری است که بتواند توسط اپراتور یا شبکه هوشمند، برای طبقه بندی کردن هدف بازگشتی با در نظر گرفتن مولد آزمون یا الگوی معلوم تکرار شونده، قابل استفاده باشد. رهیافت معمول که کاهش بار کاری روی اپراتور را تحقیق می کند، همبستگی تصویر با یک الگوی معلوم و راه اندازی یک ضریب همبستگی فضایی است. اکثر داده رادار نفوذ کننده در زمین در فرم های اسکن A ، B و C پردازش و نشان داده می شوند. فرآیند بکار رفته برای هر فرمت داده میتواند به دسته های زیر طبقه بندی شود:

۱) پردازش اسکن A

۲) پردازش اسکن بفرم B . توجه کنید که اهداف میتواند قابل تغییر در نظر گرفته شوند، درحالیکه ممکن است پردازش های یکسان برای نمودارهای $y-z$ یا $x-y$ یا $x-z$ سودمند شود.

۳) پردازش اسکن C . توجه کنید که داده های سه بعدی فضایی می تواند برای محدود کردن نمایش های تصاویر سه بعدی استفاده شوند.

برخلاف سیستم های راداری مرسوم که بطور معمول هدف می تواند در مقایسه با کلاتر در حال حرکت تنظیم شود، در اینجا هدف و کلاتر ثابت اند و این آنتن رادار است که با در نظر گرفتن محیط جابجا می شود. دستیابی به رزولوشن مکانی مناسب به اندازه شی بستگی دارد، و برای نمونه یک طول مناسب برای اسکن A ، 512 بایت، و برای B ممکن است به 512 Mbyte ذخیره داده نیاز داشته باشد. در اسکن بفرم B تعدادی رهیافت قابل فرض برای پردازش سیگنال وجود دارند. معمولاً داده ها

پس از اسکن بهینه بفرم A تحت فشار نیستند چونکه پاسخ آنتن مکانی با پاسخ فضایی هدف کانوال می شود. فرآیند اسکن برای نمونه شامل: (۱) برداشتن افسست صفر (۲) کاهش نویز (۳) کاهش کلاتر (۴) بهره متغیر زمان (۵) فیلترینگ فرکانسی (۶) بهینه سازی موجک یا تکنیک های همگن کانولوشن (۷) رزولوشن هدف (۸) روش های آنالیز طیفی، می باشد [6].

اگرچه اسکن C الزاما یک نمودار (x, y) در مقدار ثابت z یا رنجی از مقادیر z است، لیکن ممکن است پردازش تشریح شده در بخش های قبلی قابل استفاده است. اما اهمیت تمرکز روی داده، اگر چه ترکیبات های نادرست در عمق های زیر هدف ظاهر می شود، اطمینان یافتن از رنج نمونه برداری مناسب می باشد.

۱-۳-۲- پردازش تصویر رادار نفوذ کننده در زمین

روش های کلی پردازش تصویر انتشار یافته اند. معمولا یک فیلتر ماسک دوبعدی، که ضرایبش به آن تصویر هدف تنظیم شده با داده کانوال شدند. یک مجموعه داده سه بعدی برای پردازش زیر دنباله و تصاویر دو بعدی در هر نمودار متعامد تولید شده ثبت شده اند. تکنیک های پردازش تصویر شامل عملیات فیلترینگ که به اجرای سریع الگوریتم های کانولوشن دو بعدی است، نیاز دارد. می توان تکنیک ها را به ۴ دسته تقسیم کرد: پایین گذر، بالاگذر، لبه یاب و الگوی تطبیق دهنده. تمامی این ۴ نوع معمولا توسط کانوال کردن دادهی ورودی با یک آرایه دو بعدی از ضرایب فیلتر که هسته نامیده می شوند، رایجترین کانولوشن هسته ها 3×3 و 5×5 است، اجرا می شوند. هر نوع یک تابع متفاوتی در فرآیند ترمیم- بهبود انجام می دهند و می توان بطور همزمان از چندین نوع برای بهبود قابلیت نمایش تصویر بهره برد [5].

۱-۳-۳- کاربردها و محدودیت های فناوری رادارهای نفوذ در زمین

از جمله کاربردهای این فناوری می توان به موارد زیر اشاره نمود: