

بررسی پارامترهای مؤثر در ضریب گذردهی الکتریکی خاک در فرایند آشکارسازی و شناسایی اهداف مدفون

احسان شهروسوند^۱، مرتضی کازرونی^۲

۱- دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی مالک اشتر، تهران

۲- دانشیار مجتمع دانشگاهی برق و کامپیوتر دانشگاه صنعتی مالک اشتر تهران

چکیده

در این مقاله به بررسی مجموعه پارامترهای مؤثر در فرایند آشکارسازی و شناسایی اهداف مدفون پرداخته شده است. این پارامترها بر روی ضریب گذردهی الکتریکی خاک تأثیر می گذارند و به تبع آن می توانند عمق نفوذ امواج در خاک را تعیین نمایند. تخمین نوع خاک و اطلاع یافتن از ضریب گذردهی الکتریکی خاک و عمق نفوذ امواج در آن می تواند در انتخاب فرکانس مناسب، نوع آنتن، میزان توان ارسالی و در حالت کلی انتخاب بهینه پارامترهای راداری کمک شایانی به ما کند و از هدر رفت منابع و زمان جستجو تا حد قابل قبولی جلوگیری و بازدهی سامانه راداری را بالا ببرد. در این مقاله تأثیر پارامترهای فیزیکی و محیطی بر روی ۷ نمونه خاک بررسی گردیده است و میزان ضریب گذردهی الکتریکی و عمق نفوذ امواج در آن ها در نرم افزار متلب محاسبه شده است. در مرحله بعدی شبیه سازی، خاک لوم رسی شن دار به عنوان خاک مرجع قرار گرفته و تغییرات فشردگی، دمایی و رطوبتی در آن اعمال شده و متناسب با هر مرحله ضریب گذردهی الکتریکی و عمق نفوذ امواج احصا گردیده است. در مرحله نهایی شبیه سازی، فرایند آشکارسازی یک هدف مدفون فلزی با توجه به عمق قابل دسترس آشکارسازی در مراحل مختلف قبلی در نرم افزار CST شبیه سازی گردیده است. بیشترین تأثیر در ضریب گذردهی الکتریکی مربوط به تغییرات رطوبت خاک می باشد. بیشترین عمق نفوذ امواج در خاک خشک و با فرکانس ۱۰۰ مگاهرتز در حدود ۲۳ متر می باشد که با بالا رفتن درصد رطوبت خاک به ۴۰ درصد، عمق نفوذ امواج به ۱ متر کاهش می یابد.

واژه های کلیدی: آشکارسازی و شناسایی اهداف مدفون، ضریب گذردهی الکتریکی خاک،

عمق نفوذ امواج در خاک، پارامترهای فیزیکی

Investigating effective parameters in soil electrical permittivity in the process of detecting and identifying buried targets

Ehsan Shahroosvand¹, Morteza Kazerooni²

1-Phd student Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

1-prof. Faculty of Electrical & Computer Engineering, Malek Ashtar University of Technology, Tehran, Iran

Abstract

In this article, the effective parameters in detecting and identifying buried targets have been investigated. These parameters affect the electrical permittivity of the soil and can determine the penetration depth of the waves in the soil.

Knowing the type of soil and the electrical conductivity of the soil, as well as the penetration depth of electromagnetic waves in it, can help us choose the appropriate frequency, antenna type, and transmission power, and in general, optimize the radar parameters. This can prevent resource waste and reduce search time to an acceptable level, and increase the efficiency of the radar system. The effect of physical and environmental parameters on 7 soil samples has been investigated, and the electrical permittivity coefficient and the depth of wave penetration in them have been calculated. In the next stage of simulation, loamy clay & sand soil is used as a reference soil and changes in compression, temperature, and humidity are applied to it, and according to each stage, the electrical permittivity coefficient and the penetration depth of wave are calculated. In the final stage of the simulation, the detection process of a buried metal target has been simulated in CST software according to the available detection depth in the previous stages. The biggest effect on electrical permittivity is related to changes in soil moisture. The maximum penetration depth of waves in dry soil with a frequency of 100 MHz is about 23 meters, and with the increase in soil moisture, the penetration depth of waves decreases to 1 meter.

Keywords: Detecting and identifying buried targets, electrical permittivity of soil, penetration depth of waves in soil, the effect of physical

۱- مقدمه

فرماندهی استراتژیک ایالات متحده مرکز عملیات اطلاعاتی مشترک^۴ و مرکز کاربردهای فنی نیروی هوایی^۵ (AFTAC) و همچنین آژانس کاهش تهدیدات دفاعی^۶ (DTRA) و سازمان زمین شناسی ایالات متحده^۷ (USGS) انجام فعالیت می کند.

۲- آشکارسازی و شناسایی اهداف مدفون

در حال حاضر آشکارسازی و شناسایی اهداف مدفون در چهار حوزه ژئوفیزیکی، اپتیکی، راداری و انتشاری انجام می پذیرد. روش های ژئوفیزیکی با استفاده از علم زمین شناختی و مباحث فیزیکی لایه های مختلف زمین به آشکارسازی و شناسایی اهداف مدفون می پردازد که از مهم ترین این روش ها می توان به روش لرزه ای^۸، مقاومت سنجی^۹، گرانی سنجی^{۱۰}، مغناطیس سنجی^{۱۱} و رادیومتری^{۱۲} اشاره نمود [۲].

روش های اپتیکی شامل تصویربرداری معمولی و حرارتی هست که عمدتاً در فواصل زمانی مشخص از قبل احداث و بعد آن گرفته می شوند و با مقایسه آن ها می توان به وجود تونل یا مرکز زیرزمینی پی برد. کار تصویربرداری توسط ماهواره ها یا هواپیماها صورت می پذیرد.

روش های راداری یکی از پرکاربردترین روش های آشکارسازی و شناسایی اهداف مدفون می باشد که با بهره گیری از امواج الکترومغناطیسی به آشکارسازی و شناسایی این اهداف می پردازد که از مهم ترین روش های آن می توان به رادارهای زمین نفوذ^{۱۳} [۳]، رادارهای زمین نفوذ دهانه مصنوعی تصویربرداری^{۱۴} [۴] و رادارهای تداخل سنج^{۱۵} [۵] اشاره نمود.

در روش های انتشاری نیز همانند روش های راداری از امواج الکترومغناطیسی بهره می گیرند با این تفاوت که در این روش عمدتاً فرستنده های امواج به صورت ثابت و در اطراف هدف قرار می گیرند که این کار توسط دارت (پرتابه هایی که توسط هواپیما به اطراف هدف پرتاب

در حال حاضر حفاظت و حراست از اماکن و مراکز حساس و مهم بسیار حیاتی و ضروری است به نحوی که به خطراتادن آن ها می تواند صدمات جبران ناپذیری را وارد نماید. یکی از راهکارهای مناسب جهت در امان ماندن از دید راداری یا اپتیکی، استفاده از تأسیسات مدفون زیرزمینی می باشد که با توجه به رشد فناوری و بهره بردن از روش های ترکیبی در حوزه سنجش از دور، امکان آشکارسازی این اهداف نیز میسر گردیده است. در حال حاضر داشتن یک سازه مدفون امن یکی از مؤلفه های قدرت محسوب می شود.

سابقه داشتن تأسیسات زیرزمینی و چالش مکان یابی و استفاده از امکانات و تجهیزات در زیرزمین در عصر حاضر حداقل به جنگ جهانی دوم برمی گردد. در آن زمان آلمان ها تصمیم گرفتند قسمتی از کارخانه های تولید جنگ افزار و هواپیمای خود را به سایت های زیرزمینی منتقل کنند تا از حملات هوایی متفقین در امان بمانند. در طول جنگ سرد نیز دو بلوک شرق و غرب از تأسیسات و امکانات زیرزمینی به دو منظور بهره می بردند که اولین هدف آن ها استفاده از این ظرفیت ها جهت ساخت، انبار، نگهداری و هم چنین شلیک پرتابه های استراتژیک خود بود و دومین هدف آن ها ایجاد جان پناه های زیرزمینی برای حفاظت از رهبران و فرماندهان و در امان ماندن آن ها در برابر حملات دشمن بود [۱].

مهم ترین نشانه نگرانی کشورهای ابرقدرت و در رأس آن ها ایالات متحده آمریکا در مورد گسترش تأسیسات زیرزمینی کشورهای دیگر، تأسیس و تشکیل مرکز تجزیه و تحلیل تأسیسات زیرزمینی^۱ (UFAC) در سال ۱۹۹۷ بود که زیرمجموعه آژانس اطلاعات دفاعی هست و با همکاری سازمان های اطلاعاتی دیگر از جمله سازمان اطلاعات مرکزی^۲ (CIA)، آژانس امنیت ملی^۳ (NSA)،

⁹ Resistivity survey

¹⁰ Gravity gradiometry

¹¹ Magnetic Surveys

¹² Radiometric

¹³ Ground penetrating Radar (GPR)

¹⁴ Synthetic-aperture radar (GPR-SAR)

¹⁵ Interferometric synthetic-aperture radar (INSAR)

¹ Underground Facility Analysis Center

² Central Intelligence Agency

³ National Security Agency

⁴ U.S. Strategic Command Joint Intelligence Operations Center

⁵ The Air Force Technical Applications Center

⁶ Defense Threat Reduction Agency

⁷ U.S. Geological Survey

⁸ Seismic

دیامانتی و همکاران [۱۱] در پژوهش خود در سال ۲۰۱۹ به بررسی کاربرد رادار زمین نفوذ در شناسایی تونل‌ها پرداخته‌اند. در این پژوهش نویسنده ابتدا به تشریح ویژگی‌های ساختاری تونل‌ها و حفره‌های زیرسطحی که می‌تواند در فرایند آشکارسازی و شناسایی آن‌ها مؤثر باشند پرداخته است. استفاده از ساختارهای پشتیبان جهت جلوگیری از ریزش تونل، وجود سیستم ریلی جهت جابجایی بارهای سنگین، وجود کابل‌ها و خطوط انتقال جریان و همچنین خود فضای داخلی تونل که با هوا پر شده است به عنوان یک دی‌الکتریک قوی عمل می‌کند که با محیط پیرامون خود متفاوت است که از این جمله می‌باشند، اشاره نمود.

محمدرضا سیف و همکارانش [۱۲] در سال ۱۳۹۷ در پژوهشی با عنوان مدل سازی، پردازش و تفسیر داده‌های رادار نفوذی به زمین (رادار زمین نفوذ) به منظور شناسایی تونل‌های دفاعی به بررسی چگونگی آشکارسازی و شناسایی آن‌ها با استفاده از رادار زمین نفوذ پرداخته است. کامکار روحانی و همکاران [۱۳] در سال ۱۳۹۱ داده‌های رادار زمین نفوذ را به منظور شناسایی حفره‌های زیرسطحی و بررسی لایه‌بندی، دانه‌بندی و برآورد میزان رس در رسوبات زیرسطحی کم‌عمق، پردازش و تفسیر کردند.

۳- انواع محیط‌ها در مواجهه با امواج الکترومغناطیسی

در حالت کلی مواد پیرامون ما از جمله زمین دارای سه پارامتر مهم الکترومغناطیسی می‌باشد که در تعامل با امواج الکترومغناطیسی نقش اساسی ایفا می‌کنند. این پارامترها عبارت‌اند از:

- گذردهی الکتریکی
- هدایت الکتریکی
- نفوذپذیری مغناطیسی

گذردهی الکتریکی و نفوذپذیری مغناطیسی مواد معمولاً با توجه به خواص دی‌الکتریک فضای آزاد بیان می‌شوند. هدایت الکتریکی مواد تابعی از گذردهی الکتریکی می‌باشد. از اصطلاحات گذردهی الکتریکی نسبی و نفوذپذیری مغناطیسی نسبی رابطه (۱) برای بیان مشخصات الکترومغناطیسی مواد استفاده می‌شود [۱۴].

می‌شوند) صورت می‌پذیرد و سیستم گیرنده در دفعات متعدد و با سبک‌های مختلف به جمع‌آوری سیگنال‌های بازتابی می‌پردازد و بعد از جمع‌آوری به پردازش آن‌ها را انجام خواهد داد و بدین صورت وجود هدف آشکار خواهد شد [۶]. جوف نگار رادیویی^{۱۶} و پژواک‌سنجی زیرسطحی^{۱۷} دو روش عمده در این حوزه می‌باشند [۷].

بررسی مقالات و پژوهش‌های متعدد در سالیان اخیر نشان می‌دهد که آشکارسازی و شناسایی هدف مدفون با استفاده از روش‌های راداری که غالباً از نوع رادار زمین نفوذ بوده است در کانون توجهات قرار گرفته است. در حالت کلی میزان سیر و نفوذ امواج الکترومغناطیسی در محیط‌های مختلف به خواص الکترومغناطیسی آن محیط وابسته می‌باشد. یکی از راهکارهای بالا بردن امنیت در سازه‌های مدفون قرار دادن آن‌ها در اعماق زیاد می‌باشد ولی در حال حاضر پژوهش‌های متعدد نشان می‌دهد که این راهکار نیز تقریباً اثر خود را از دست داده است و می‌توان با سامانه‌های راداری متنوع و همچنین استفاده از روش‌های ترکیبی حوزه‌های انتشاری و راداری و ژئوفیزیکی به آشکارسازی و شناسایی این دسته از اهداف پرداخت [۸]. در این قسمت به بررسی و معرفی چند پژوهش صورت پذیرفته در این زمینه می‌پردازیم. راجر تیلی و همکارانش [۹] در پژوهشی که در سال ۲۰۱۹ با عنوان تصویربرداری رادار زمین نفوذ اشیای مدفون عمیق منتشر کردند عنوان می‌دارند که اشیای مدفون عمیق عبارت بسیار مهمی در فناوری دور سنجی راداری تلقی می‌گردد و آشکارسازی آن‌ها بسیار مهم و چالش‌برانگیز می‌باشد. در این مقاله اولاً از باندهای فرکانسی پایین جهت آشکارسازی و شناسایی اهداف عمیق استفاده شده است و ثانیاً با توجه به اینکه در فرکانس‌های پایین قدرت تفکیک ممکن است کاهش یابد با ترکیب جاروب فرکانسی به حد تفکیک بهتری رسیده است.

ژیانگلی چو و همکارانش [۱۰] در مقاله خود با عنوان توسعه یک سیستم جدید GPR با فرکانس پایین برای تشخیص فوق‌العاده عمیق در معدن که در سال ۲۰۱۶ منتشر شده است، به صراحت گفته است که برای رسیدن اعماق فوق عمیق یعنی ۳۰ تا ۸۰ متر و برای آشکارسازی هدف مدفون از فرکانس‌های پایین یعنی محدوده ۱۲/۵ تا ۵۰ مگاهرتز استفاده شده است.

^{۱۷} Subsurface Radar Sounding

^{۱۶} RF tomography

روی دوقطبی های الکتریکی شکل گرفته تأثیر بگذارد. تعداد گشتاورهای دوقطبی القایی در واحد حجم ماده را چگالی شار الکتریکی (D) می نامند که با ثابت گذردهی الکتریکی نسبی (ϵ_r) به میدان الکتریکی متغیر با زمان (E) مربوط می شود واحد گذردهی الکتریکی در سامانه SI بر حسب فاراد بر متر ($\frac{F}{m}$) تعریف می شود. در اکثر مواد ضریب گذردهی الکتریکی نسبی تعریف می شود که به صورت یک نسبت از گذردهی الکتریکی مواد به گذردهی الکتریکی خلأ تعریف می شود. در محیط های واقعی به علت وجود تلفات در مواد گذردهی الکتریکی به صورت یک عدد مختلط می باشد. که ϵ' قسمت حقیقی و ϵ'' قسمت موهومی گذردهی الکتریکی می باشد. روابط مربوط به گذردهی الکتریکی به صورت رابطه (۲) می باشد.

$$\begin{aligned} D &= \epsilon E \\ \epsilon &= \epsilon' - j\epsilon'' \end{aligned} \quad (2)$$

در حالت کلی ضریب گذردهی الکتریکی هر ماده به عوامل متعددی وابسته است که از آن جمله می توان به پارامترهای فیزیکی (مقدار، اجزای تشکیل دهنده و میزان فشردگی)، پارامترهای محیطی (میزان رطوبت و میزان دما) و پارامترهای تحریکی (فرکانس و شدت میدان) اشاره نمود. یکی از مهم ترین توابع جهت بیان ضریب گذردهی الکتریکی در محیط پاشنده خطی تابع سکون دبای می باشد.

۳-۱-۱- تابع سکون دبای

تابع سکون دبای در حوزه فرکانس برای موادی با مقادیر گذردهی الکتریکی مختلط بکار برده می شود. رابطه (۳) تابع سکون دبای را بیان می کند [۱۵].

$$\begin{aligned} \epsilon &= \epsilon_\infty + \chi_\omega \\ \chi_\omega &= \sum_{p=1}^p \frac{\epsilon_{s,p} - \epsilon_\infty}{1 + j\omega t_{0,p}} \end{aligned} \quad (3)$$

جایی که χ_ω به عنوان تابع پذیرش شناخته می شود که بخش پاشندگی گذردهی الکتریکی را توصیف می کند، ϵ_s و ϵ_∞ به ترتیب گذردهی الکتریکی برای فرکانس صفر و بی نهایت و t_0 زمان آرامش است [۱۶]. فرکانس آرامش (یعنی فرکانسی که قسمت موهومی و همچنین

$$\begin{aligned} \epsilon_r &= \frac{\epsilon}{\epsilon_0} \\ \mu_r &= \frac{\mu}{\mu_0} \end{aligned} \quad (1)$$

درجایی که ϵ_r و μ_r به ترتیب گذردهی و نفوذپذیری نسبی هستند، ϵ_0 و μ_0 خواص دی الکتریک فضای آزاد و ϵ و μ خواص دی الکتریک ماده هستند. خواص دی الکتریک ممکن است با توجه به فرکانس و همچنین دامنه میدان متفاوت باشد. بر این اساس، مواد را می توان به چهار نوع طبقه بندی کرد

• خطی: خواص دی الکتریک با تغییر فرکانس و دامنه میدان ورودی ثابت خواهد بود.

• پاشنده خطی: خواص دی الکتریک در با تغییر فرکانس تغییر پیدا می کند؛ ولی نسبت به دامنه میدان مستقل خواهد بود.

• غیرخطی: خواص دی الکتریک با توجه به دامنه میدان تغییر خواهد کرد؛ ولی با تغییر فرکانس ثابت خواهد بود.

• پاشنده غیرخطی: خواص دی الکتریک ماده با تغییر فرکانس و دامنه میدان تغییر پیدا می کنند.

اکثر مواد در طبیعت نظیر آب، بافت های انسانی، تمام مواد و خاک ها از دسته مواد پاشنده خطی محسوب می شوند. این مواد دارای یک رفتار پراکندگی مشخص در طیف وسیعی از فرکانس ها و یک رفتار خطی برای شدت های متفاوت میدان های تحریک هستند [۱۴].

۳-۱- گذردهی الکتریکی

در اکثر مواد دی الکتریک یا عایق بارهای الکتریکی آزاد کمی وجود دارند و اکثر بارها به صورت مقید هستند که اگر تحت تأثیر میدان الکتریکی متغیر با زمان قرار گیرند کم کم از قید پیوندهای خود خارج می شوند و طی حرکت های کوچک سعی در خنثی نمودن این میدان خارجی می گیرند که باعث افزایش الکترون های یک سمت اتم و خالی شدن سمت دیگر می شوند که اصطلاحاً دوقطبی های الکتریکی را به وجود می آورند. گذردهی الکتریکی در واقع میزان و شدت قطبیت پذیری یک ماده را بیان می کند و اعلام می دارد که میدان الکتریکی تا چه حد می تواند بر

مواردی از پاسخ پراکندگی امواج خاک‌های اشباع از آب را با پاسخ پراکندگی امواج آب در فرکانس‌های مختلف را بررسی کرد، و بعد از تطابق نتایج دریافت که وجود آب عامل اساسی پراکندگی امواج خاک‌های مرطوب است. در مطالعات بعدی دابسون و همکاران، [۱۸] فرضیه فوق را ثابت کردند و اهمیت آب را برای توصیف خواص دی‌الکتریک خاک را برجسته کردند. وجود آب در خاک مستقیماً بر روی ضریب گذردهی الکتریکی تأثیر می‌گذارد و بر روی هدایت الکتریکی خاک نیز به صورت غیرمستقیم تأثیرگذار است. ضریب گذردهی الکتریکی آب موجود در خاک تحت تأثیر عوامل مختلفی نظیر شوری، دما و نسبت آن به کل خاک تغییر پیدا می‌کند که این امر باعث تغییر ضریب گذردهی نسبی الکتریکی خاک می‌شود.

لین و ساکستون [۱۹] یک بخش رسانایی را به مدل استاندارد دبای اضافه کردند تا رسانایی یونی حاصل از شوری آب را در برگیرد. رابطه (۵) مدل اصلاح‌شده دبای با در نظر گرفتن رسانایی یونی حاصل از شوری آب را نشان می‌دهد.

$$\epsilon_{\omega} = \epsilon_{\omega, \infty} + \frac{\epsilon_{\omega, s} - \epsilon_{\omega, \infty}}{1 + j \omega \tau_{\omega, 0}} + \frac{\sigma_{\omega}}{j \omega \epsilon_0} \quad (5)$$

که در آن عبارت σ_{ω} رسانای ناشی از الکترولیت‌ها است. کلاین و سویت [۲۰] دریافتند که گذردهی الکتریکی برای فرکانس صفر ($\epsilon_{\omega, s}$) با دما مرتبط است، آن‌ها خاک‌های مختلف با درصدهای شوری متفاوت و در دماهای متفاوت را مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که اثر غالب شوری بر پارامتر هدایت الکتریکی خاک می‌باشد. هدایت الکتریکی ناشی از آب موجود در خاک می‌باشد که تأثیرگذار بر قسمت موهومی ضریب گذردهی الکتریکی است. شکل تغییرات قسمت موهومی ضریب گذردهی الکتریکی آب در دمای ثابت و با میزان شوری‌های مختلف را نشان می‌دهد.

۳-۱-۲-۲-۲-۲-۲ دمای آب

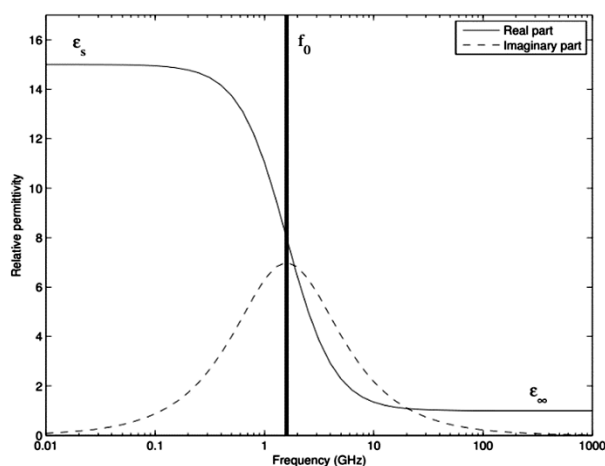
کلاین و سویت [۲۰] در پژوهش‌های خود دریافتند که $\epsilon_{\omega, s}$ با دما مرتبط است و آن‌ها به یک فرمول تجربی (رابطه (۶)) رسیدند که گذردهی ساکن آب وابسته به دما را توصیف می‌کند.

در رابطه (۶) مقدار دما برحسب (C) است. شکل (۳)

اولین مشتق $\frac{\partial \text{Re}\{\epsilon\}}{\partial \omega}$ از قسمت واقعی به حداکثر مقدار خود می‌رسند) مستقیماً با زمان آرامش از طریق $f_0 = \frac{1}{2\pi t_0}$ مرتبط است.

شکل) نمودار ضریب گذردهی نسبی یک ماده با فرضیات مشخص را نشان می‌دهد. تابع سکون در حوزه زمان با رابطه (۴) بیان می‌شود.

$$\chi(t) = \sum_{p=1}^p \frac{\epsilon_{s,p} - \epsilon_{\infty}}{t_{0,p}} e^{-\frac{t}{t_{0,p}}} \quad (4)$$



شکل ۱- نمودار تابع سکون دبای در حالتی که $\epsilon_s = \epsilon_0$ و

$$[14] \quad t_0 = 0.1 \text{ ns} \quad \epsilon_{\infty} = 15 \epsilon_0$$

۳-۱-۲-۱-۳ عوامل مؤثر بر ضریب گذردهی الکتریکی نسبی خاک

۳-۱-۲-۱-۳-۱-۳-۱-۳ رطوبت خاک

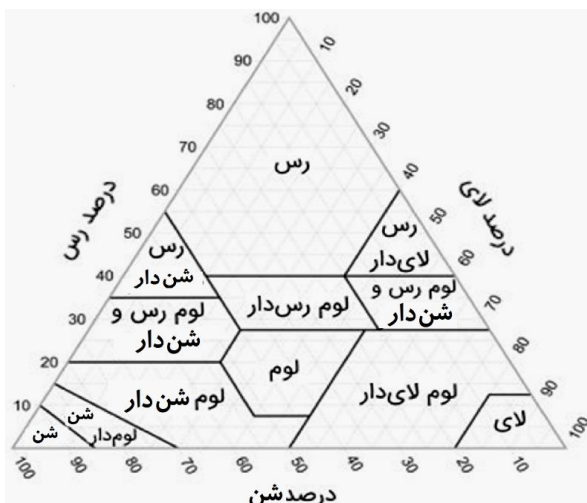
محققان در تحقیقات اولیه که انجام دادند به این نتیجه

$$\epsilon_{\omega, s} = \epsilon_0 (88.045 - 0.4147T + 6.295 \times 10^{-4} T^2 + 1.075 \times 10^{-5} T^3) \quad (6)$$

رسیدند که خاک خشک دارای پاسخ پراکندگی ضعیفی در مواجهه با امواج الکترومغناطیسی می‌باشد. فون هیپل [۱۷]

بزرگترین ذرات خاک هستند که دارای قطری بین ۰/۵ میلی متر تا ۲ میلی متر می باشند. ذرات بزرگتر از ۲ میلی متر سنگریزه ها می باشند و تا زمانی که از ۱۵ درصد حجم خاک تجاوز نکنند، از آن ها چشم پوشی می شود. همان طور که در شکل نشان داده شده است، از ترکیب درصدهای مختلف ذرات رس، لای و شن انواع مدل های موجود خاک در طبیعت به وجود می آیند.

پپلینسکی و همکارانش [۲۱] دریافته اند که محیط های رسی (به دلیل تخلخل زیاد خاک رس) دارای محتوای آب بیشتری هستند که منجر به کاهش سرعت امواج می شود. خاک رس خشک در مقایسه با شن خشک دارای گذردهی برابر یا کمتر است، هم چنین به دلیل تخلخل زیاد رس ها، خاک رس خشک باعث ایجاد کسر زیادی از هوا می شود که به افزایش کلی سرعت می افزاید [۲۲].

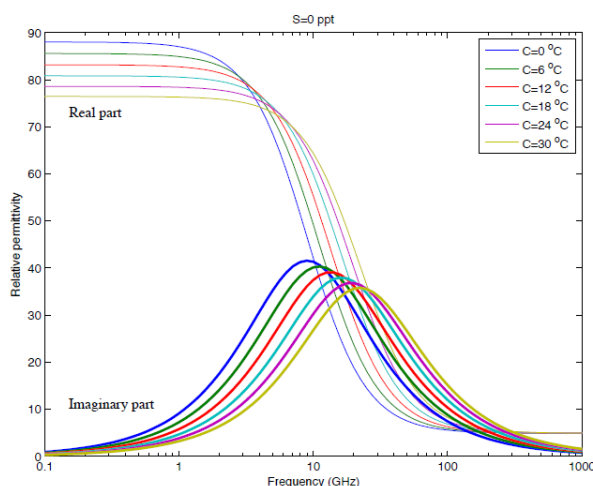


شکل ۴- مثلث طبقه بندی نوع خاک

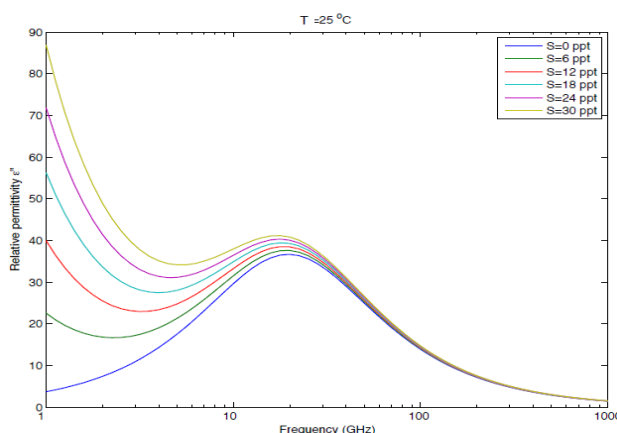
کسر خاک رس عمدتاً بر بخش موهومی گذردهی الکتریکی تأثیر می گذارد. قسمت موهومی گذردهی الکتریکی از دو قسمت تشکیل شده است که یکی مربوط به اصطلاح رسانا و دیگری مربوط به آرامش دبای به دلیل شل شدن دوقطبی آب است. افزایش کسر حجمی آب منجر به افزایش بخش موهومی (تضعیف) می شود و سهم آرامش دبای را افزایش می دهد. افزایش کسر رس باعث می شود که تلفات در درجه اول، مربوط به قسمت رسانا باشد و اثرات آرامش دبای را کاهش یابد که این اثرات نتیجه ناتوانی خاک رس در نگهداری آب است.

پپلینسکی و همکارانش [۲۱] مدل نیمه تجربی را جهت محاسبه ضریب گذردهی نسبی خاک ارائه نمودند. در این مدل تأثیر پارامترهای مهمی نظیر کسر حجمی آب، چگالی

تغییرات قسمت های حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی آب را در بازه دمایی ۰ تا ۳۰ درجه سانتی گراد درحالی که شوری آب صفر است را نشان می دهد.



شکل ۲- قسمت های حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی آب در بازه دمایی ۰ تا ۳۰ درجه سانتی گراد [۱۴]



شکل ۳- تغییرات قسمت موهومی ضریب گذردهی الکتریکی آب در دمای ثابت و با میزان شوری های مختلف [۱۴]

۳-۱-۲-۳- نوع بافت و ساختار خاک منطقه

به طور کلی خاک موجود در طبیعت از اجزای متنوعی شامل رس، لای، شن، سنگ و... تشکیل شده است که میزان تراکم و دانه بندی های آن ها در مناطق مختلف گوناگون می باشد. بافت خاک یک پارامتر ژئوفیزیکی است که به مقدار نسبی شن، لای و رس در نمونه خاک منطقه مورد نظر اشاره دارد. به ذرات معدنی با قطر کوچکتر از ۰/۰۰۲ میلی متر رس می گویند. قطر ذرات لای بین ۰/۰۰۲ میلی متر تا ۰/۰۵ میلی متر متغیر است و ذرات شن

پی خواهد داشت یعنی اگر در یک منطقه میزان رسانایی خاک آن بالا باشد امواج الکترومغناطیسی کمتر در آن نفوذ خواهند کرد. در زمین هایی که حاوی رس مرطوب ولای مرطوب باشند عموماً رسانایی و هدایت الکتریکی بالایی دارند. همچنین محیط هایی که اشباع از رس و آب زیرزمینی حاوی نمک می باشند دارای هدایت الکتریکی بالا و عمق نفوذ امواج در آن ها کم می باشد. یکی دیگر از عوامل مهم در افزایش هدایت الکتریکی محیط افزایش دما می باشد چون با افزایش دما فعالیت یون های حل شده در خاک افزایش پیدا می کنند [۲۴]. هدایت الکتریکی متناسب با تغییرات ضریب گذردهی الکتریکی تغییر پیدا می کند.

با در نظر گرفتن مقادیر گذردهی الکتریکی و هدایت الکتریکی برای یک ماده می توانیم مفهوم تانژانت تلفات را با رابطه (۹) تعریف کنیم. با استفاده از مفهوم تانژانت تلفات می توانیم به زاویه تلفاتی (رابطه (۹)) دست پیدا کنیم.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon'}{\epsilon''} = \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \quad (9)$$

$$\delta = \tan^{-1} \frac{\epsilon'}{\epsilon''} = \tan^{-1} \frac{\sigma}{\omega \epsilon} \quad (10)$$

۳-۳- نفوذپذیری مغناطیسی

نفوذپذیری مغناطیسی (μ) پارامتری می باشد که رفتار گشتاور مغناطیسی ذاتی مولکول و اتم ها را در مواجهه با میدان مغناطیسی خارجی توصیف می کند. این پارامتر هم مانند گذردهی الکتریکی به صورت نسبی (μ_r) بیان می گردد که به صورت نسبت نفوذپذیری مغناطیسی مواد به نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد تعریف می شود. به بیان دیگر نفوذپذیری مغناطیسی یکی از ویژگی های محیط می باشد که رابطه بین چگالی شار مغناطیسی و شدت میدان مغناطیسی را بیان می کند و واحد آن هانری بر متر است. باید به این نکته اشاره نمود در طبیعت اکثر مواد به جز فریت ها و مواد مغناطیسی دارای نفوذپذیری مغناطیسی ۱ می باشند.

۴- تعیین عمق نفوذ امواج با توجه به مشخصات محیط

یکی دیگر از پارامترهای مهم در بررسی مواجهه امواج الکترومغناطیسی از یک محیط به محیط دیگر عمق نفوذ امواج الکترومغناطیسی (P_d) می باشد. عمق نفوذ امواج

ذرات شن، چگالی انباشت خاک لحاظ گردیده است. ضریب گذردهی نسبی خاک در این مدل در دو بازه فرکانسی بالا و پایین مورد محاسبه قرار می گیرد. روابط (۷) معادلات حاکم در این مدل می باشند.

$$\epsilon'_{(high_frequency)} = (1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\epsilon_s^a - 1) + f_{\omega}^{\beta'} \epsilon_{\omega}^a - f_{\omega})^{\frac{1}{a}}$$

$$\epsilon'_{(low_frequency)} = 1.15 \epsilon'_{(high_frequency)} - 0.68$$

$$\epsilon'' = f_{\omega}^{\beta''} (\epsilon_{\omega}'' + \frac{\sigma_f (\rho_s - \rho_b)}{\omega \epsilon_0 \rho_s f_{\omega}})$$

$$\epsilon_s = (1.01 + 0.44 \rho_s)^2 - 0.062$$

$$\beta' = 1.2748 - 0.519 \times S - 0.152 \times C$$

$$\beta'' = 1.33797 - 0.603 \times S - 0.166 \times C$$

$$\epsilon_{\omega} = \epsilon_{\omega, \infty} + \frac{\epsilon_{\omega, s} - \epsilon_{\omega, \infty}}{1 + j\omega t_{0, \omega}}$$

$$\sigma_f (high_frequency) = -1.645 + 1.939 \rho_b - 2.25622 \times S + 1.594 \times C$$

$$\sigma_f (low_frequency) = 0.0467 + 0.2204 \rho_b - 0.411 \times S + 0.6614 \times C$$

در روابط این مدل، f_{ω} کسر حجمی آب، ρ_s چگالی ذرات شن بر حسب (g/cm^3)، ρ_b چگالی انباشت خاک (g/cm^3)، ϵ_s گذردهی نسبی ذرات شن، $a=0/65$ یک ثابت مشتق شده تجربی و S و C به ترتیب کسرهای جرمی شن و خاک رس هستند ($0 \leq S, C \leq 1, S + C = 1$).

۳-۲- هدایت الکتریکی

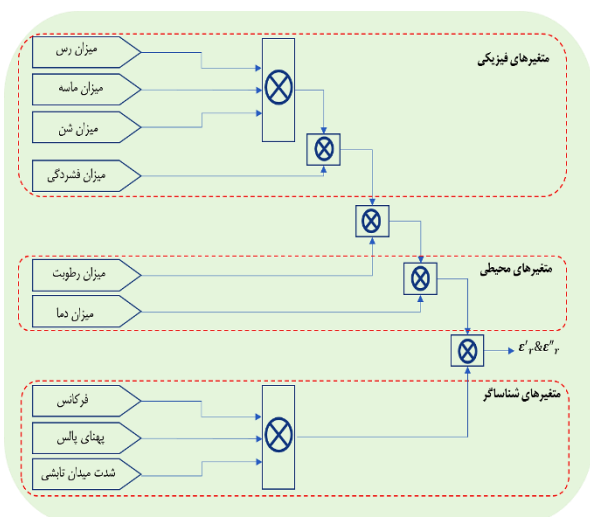
یکی دیگر از پارامترهای مهم مواد در برابر میدان های الکتریکی هدایت الکتریکی (σ) می باشد. هدایت الکتریکی بیانگر تعداد الکترون های آزاد و شدت پیوند بارهای مقید در برابر میدان الکتریکی می باشد که هرچه پیوند بارهای مقید کمتر باشد هدایت الکتریکی در آن ماده بیشتر می باشد. طبق رابطه (۸) هدایت الکتریکی نیز مانند گذردهی الکتریکی در مواد واقعی که دارای تلف می باشند به صورت یک عدد مختلط بیان می شود که قسمت حقیقی هدایت اهمی و قسمت موهومی آن پخش فارادیک را شامل می شود [۲۳].

$$\sigma = \sigma' - j\sigma'' \quad (8)$$

هدایت الکتریکی در یک ماده سبب تلف شدن میدان الکتریکی می شود که این اتلاف کم شدن عمق نفوذ را در

مجموع این پارامترها بر روی ضریب گذردهی الکتریکی تأثیر می گذارند. پارامترهای فیزیکی شامل میزان و مقدار اجزای تشکیل دهنده، مقدار فشردگی، اندازه و ابعاد می شود. پارامترهای فیزیکی به صورت مستقیم در قسمت حقیقی گذردهی الکتریکی نسبی و به صورت غیرمستقیم بر هدایت الکتریکی محیط قرارگیری هدف تأثیر می گذارد. پارامترهای محیطی نیز شامل میزان رطوبت و دما می باشد که به طور مستقیم بر قسمت موهومی گذردهی الکتریکی نسبی محیط و به صورت غیرمستقیم بر هدایت الکتریکی محیط تأثیر خواهد گذاشت. پارامترهای شناساگر شامل فرکانس و پهنای پالس و شدت میدان تابشی و... می باشد. مجموع پارامترهای شناساگر، عوامل فیزیکی و محیطی می توانند عمق نفوذ امواج در یک محیط را تعیین نمایند. شکل (۵) شمای کلی پارامترهای مؤثر در ضریب گذردهی الکتریکی را نشان می دهد. برای نشان دادن میزان تأثیر پارامترهای فیزیکی، محیطی و شناساگر بر ضریب گذردهی الکتریکی خاک و به طبع آن حداکثر عمق نفوذ امواج از ۷ نمونه خاک استفاده شده است.

درصدهای مختلف مواد تشکیل دهنده خاک با توجه به



شکل ۵- شمای کلی پارامترهای مؤثر در ضریب گذردهی

محیط قابلیت رسوخ موج در آن محیط هست و به عوامل متعددی بستگی دارد. از مهم ترین پارامترهایی که در میزان عمق نفوذ تأثیر دارند می توان به ثابت گذردهی الکتریکی (ϵ)، هدایت الکتریکی (σ)، رطوبت خاک، زاویه تلفاتی (δ) (رابطه (۹)) و فرکانس اشاره نمود.

میزان عمق نفوذ امواج با فرکانس رابطه معکوس دارد؛ یعنی هرچه فرکانس بالاتر می رود عمق نفوذ امواج کاهش می یابد پس برای شناسایی اهداف با عمق بالا باید از فرکانس های پایین و برای شناسایی اهداف با عمق کم از فرکانس های بالا استفاده کنیم.

یکی دیگر از محدودیت های استفاده از فرکانس های پایین با وجود داشتن عمق نفوذ بالا قدرت تفکیک با رزولوشن پایین می باشد که در شناسایی اهداف کنار هم ما را با مشکل روبرو خواهد کرد. پس برای داشتن قدرت تفکیک مناسب و همچنین عمق نفوذ مطلوب انتخاب فرکانس کاری مناسب بسیار اهمیت دارد. عمق نفوذ امواج الکترومغناطیسی در محیط با توجه به طول موج و زاویه تضعیف (δ) از رابطه (۱۱) به دست می آید [۲۵].

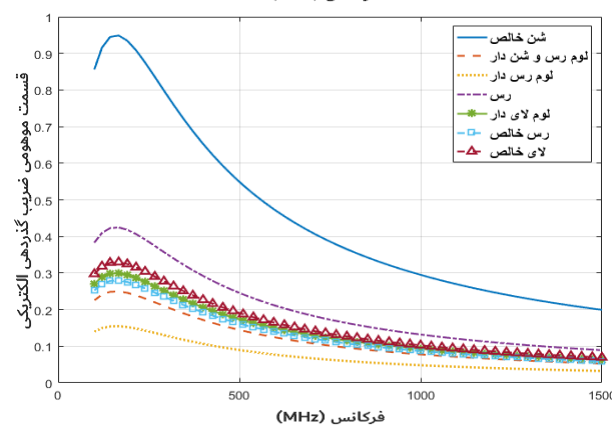
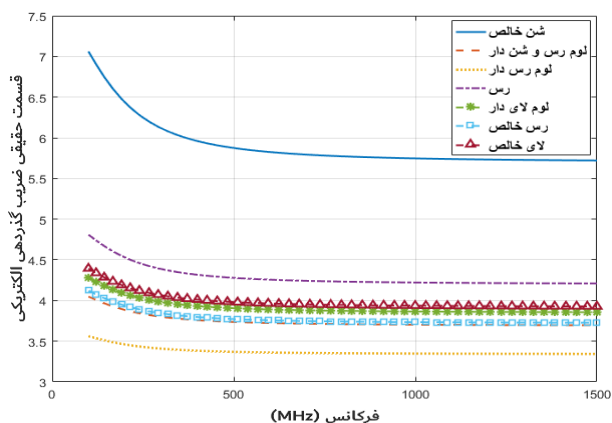
$$P_d = \frac{\lambda}{4\pi\sqrt{\epsilon_r} \sin(\delta/2)} \quad (11)$$

مهم ترین پارامتری که در میزان عمق نفوذ امواج داخل محیط دخالت دارد میزان ضریب گذردهی الکتریکی می باشد؛ چراکه بقیه عوامل مانند هدایت الکتریکی وابسته به این پارامتر می باشد. همچنین سایر تغییرات محیطی نظیر رطوبت و دما و تغییرات فیزیکی شامل دانه بندی و ترکیب مواد مستقیماً روی ضریب گذردهی الکتریکی تأثیر می گذارند. در این قسمت به میزان تأثیرگذاری هر یک از عوامل (محیطی و فیزیکی) بر روی ضریب گذردهی الکتریکی محیط (خاک) پرداخته می شود.

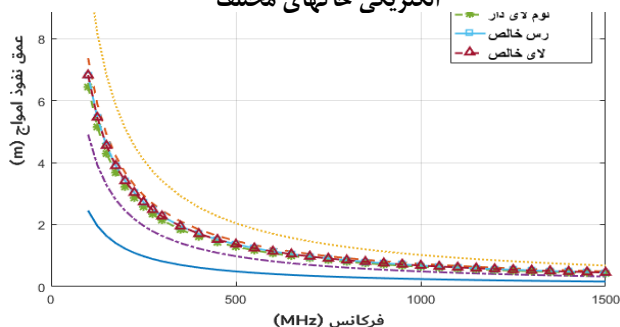
۵- بدست آوردن ضریب گذردهی الکتریکی نسبی و محیطی در نرم افزار متلب

در حالت کلی می توان مجموعه پارامترهای مؤثر در فرایند آشکارسازی و شناسایی اهداف مدفون را به پارامترهای فیزیکی، محیطی و شناساگر دسته بندی نمود.

انتخاب کنیم. خاک انتخابی از نوع لوم رسی شن دار می باشد که از عمده شن و نسبت برابر رس و لای تشکیل شده



شکل ۶- قسمت های حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی خاکهای مختلف



شکل ۷- عمق نفوذ امواج در خاکهای مختلف

است. در مرحله اول رطوبت و دما را ثابت فرض کرده و به تغییرات فشردگی می پردازیم. فشردگی خاک در چهار حالت ۱/۵، ۲، ۲٫۵ و ۳ گرم بر سانتی مترمکعب مورد بررسی قرار می گیرد.

شکل (۸) نمودارهای مربوط به قسمت حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی این حالت در بازه فرکانسی ۱۰۰ مگاهرتز تا ۱/۵ گیگاهرتز را نشان می دهد.

دیگرام شکل نوع خاک را مشخص می کند. در فاز اول شبیه سازی، ۷ نمونه خاک مطابق با جدول (۱) با درصدی متفاوتی از رس، شن و لای در حالت نرمال (رطوبت ۵٪، فشردگی ۱/۵ و دما ۲۰ درجه سانتی گراد) و در زمان آرامش ۱ نانوثانیه در نرم افزار متلب کدنویسی و مورد بررسی قرار گرفته شده است.

جدول ۱- مشخصات نمونه خاک های مورد بررسی

پارامترهای محیطی		پارامترهای فیزیکی			پارامترها	نوع خاک
رطوبت (%)	دما (C)	فشردگی (g/cm³)	درصد اجزا			
			س	ر	ل	
۵	۲۵	۱/۵	۰	۰	۱۰۰	شن خالص
۵	۲۵	۱/۵	۱۰۰	۰	۰	رس خالص
۵	۲۵	۱/۵	۰	۱۰۰	۰	لای خالص
۵	۲۵	۱/۵	۲۵	۲۵	۵۰	لوم رس و شن دار
۵	۲۵	۱/۵	۵۰	۲۵	۲۵	رس
۵	۲۵	۱/۵	۲۵	۵۰	۲۵	لوم لای دار
۵	۲۵	۱/۵	۳۳/۳	۳۳/۳	۳۳/۳	لوم رس دار

شکل (۶) نمودارهای مربوط به قسمت حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی هر خاک در بازه فرکانسی ۱۰۰ مگاهرتز تا ۱/۵ گیگاهرتز را نشان می دهد.

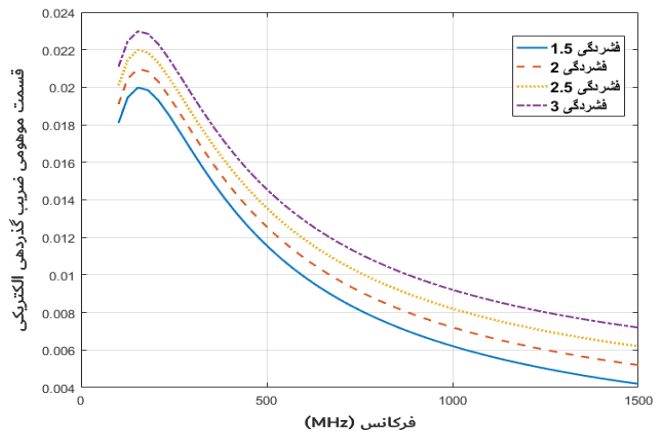
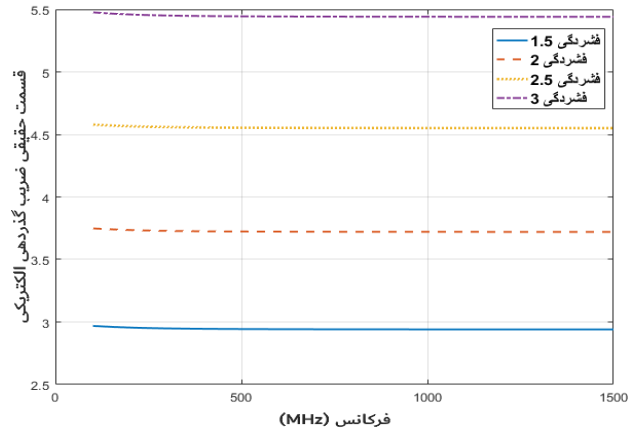
با توجه به مقادیر به دست آمده ضریب گذردهی الکتریکی در انواع خاک های جدول می توان عمق نفوذ امواج را در این خاک ها با توجه به رابطه محاسبه نمود. نمودار شکل (۷) عمق نفوذ امواج در خاک های مورد نظر را در بازه فرکانسی ۱۰۰ مگاهرتز تا ۱/۵ گیگاهرتز را نشان می دهد. همان گونه که قبلاً ذکر گردید و در شکل (۷) نیز قابل مشاهده است، عمق نفوذ امواج با میزان فرکانس رابطه عکس دارد یعنی برای داشتن حداکثر عمق نفوذ امواج باید از فرکانس های باندهای پایین استفاده کنیم.

به منظور بررسی میزان تأثیر تغییرات پارامترهای فیزیکی و محیطی بر میزان ضریب گذردهی خاک و به طبع آن حداکثر عمق نفوذ امواج می بایست یک نمونه خاک را

رسی شن‌دار را در بازه فرکانسی ۱۰۰ مگاهرتز تا ۱/۵ گیگاهرتز را نشان می‌دهد.

در مرحله بعد رطوبت و فشردگی را ثابت فرض کرده و به تغییرات دمایی می‌پردازیم. دمای خاک در چهار حالت ۲۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سانتی‌گراد مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۱۰) نمودارهای مربوط به قسمت حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی این حالت در بازه فرکانسی ۱۰۰ مگاهرتز تا ۱/۵ گیگاهرتز را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در نمودارهای شکل (۱۰) دیده می‌شود میزان تغییرات دمایی در قسمت حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی تأثیر کمی دارد. البته باید به این نکته توجه داشت که تغییرات دمایی در خاک‌های مرطوب تأثیرگذاری بیشتری

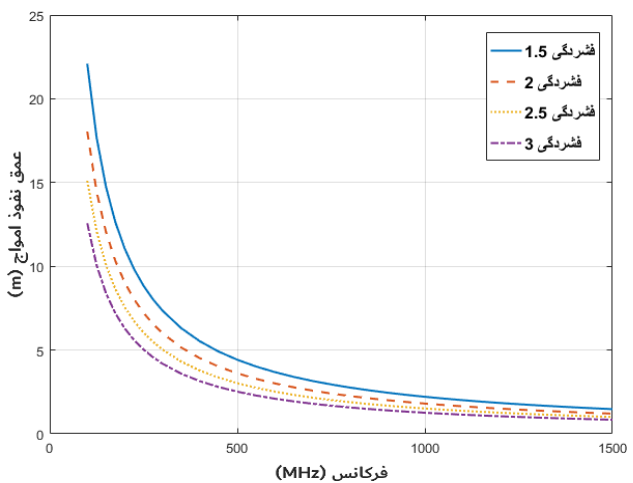
همان‌گونه که در نمودارها نیز قابل مشاهده است بیشترین تأثیر میزان تغییرات فشردگی در قسمت حقیقی ضریب



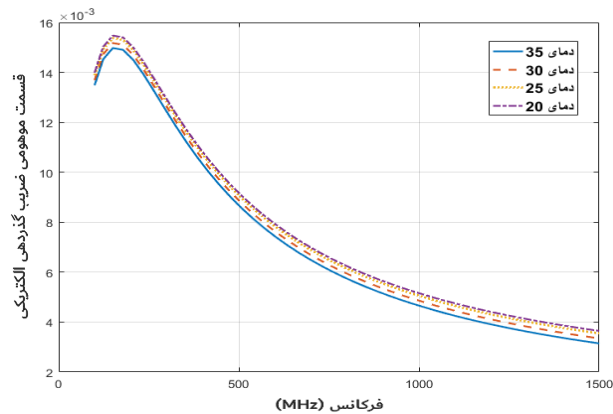
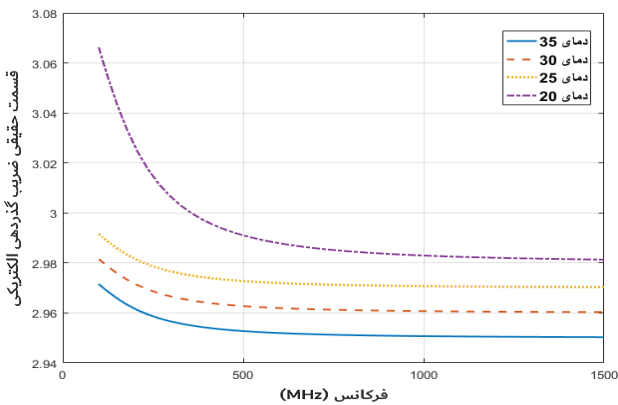
شکل ۸- قسمت‌های حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی با فشردگی های مختلف

گذردهی الکتریکی می‌باشد.

شکل (۹) نمودارهای عمق نفوذ امواج در خاک لوم



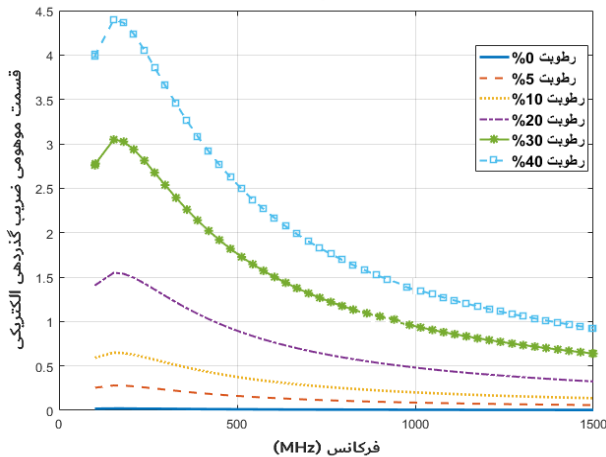
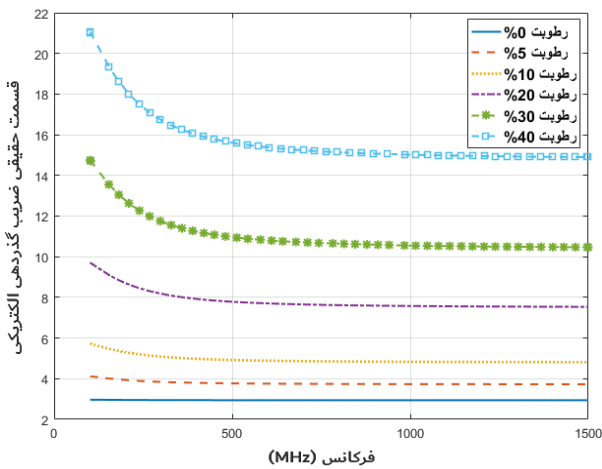
شکل ۹- عمق نفوذ امواج در خاک لوم رس و شن‌دار با فشردگی های مختلف



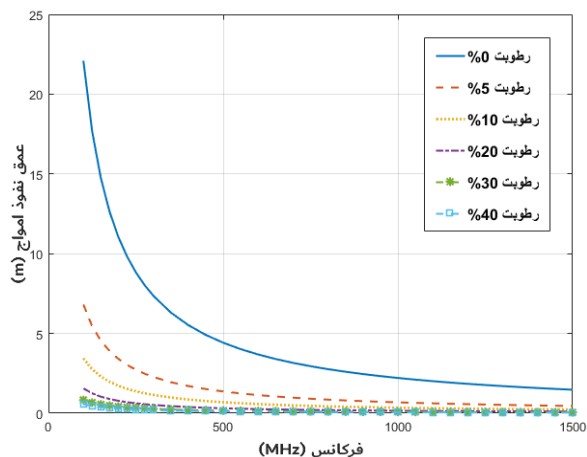
شکل ۱۰- قسمت‌های حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی با میزان دماهای مختلف

دارد.

می‌کنیم. در این شبیه‌سازی از قسمت سیگنال زمانی راداری این



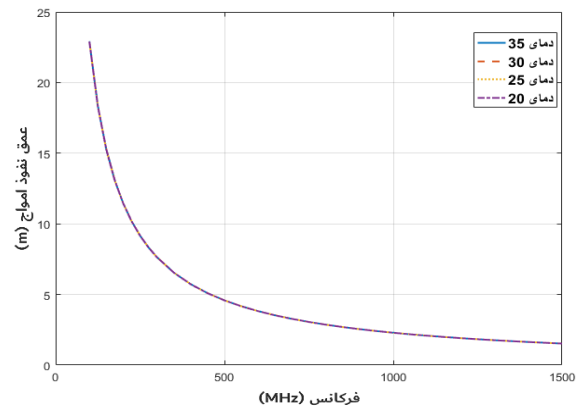
شکل ۱۲- قسمت‌های حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی با میزان رطوبت‌های مختلف



شکل ۱۳- عمق نفوذ امواج در خاک لوم رس و شن دار با میزان رطوبت‌های مختلف

نرم‌افزار استفاده شده است. در این شبیه‌سازی از پورت انتشاری با

شکل (۱۱) نمودارهای عمق نفوذ امواج در خاک لوم رسی شن‌دار در بازه فرکانسی ۱۰۰ مگاهرتز تا ۱/۵ گیگاهرتز را در حالتی که دما متغیر است، نشان می‌دهد. با توجه به تغییرات اندک ضریب گذردهی الکتریکی تغییرات عمق نفوذ امواج نیز اندک خواهد بود.



شکل ۱۴- عمق نفوذ امواج در خاک لوم رس و شن‌دار با

در مرحله بعد میزان فشردگی و دما را ثابت فرض کرده و به تغییرات میزان رطوبت می‌پردازیم. میزان رطوبت خاک در شش حالت ۰، ۵، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ درصد مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۱۲) نمودارهای مربوط به قسمت حقیقی و موهومی ضریب گذردهی الکتریکی این حالت در بازه فرکانسی ۱۰۰ مگاهرتز تا ۱/۵ گیگاهرتز را نشان می‌دهد. همان‌گونه که انتظار داشتیم بیشترین تأثیرگذاری بر ضریب گذردهی الکتریکی مربوط به میزان رطوبت می‌باشد. با تغییر درصد رطوبت خاک قسمت‌های حقیقی و موهومی ضرایب گذردهی الکتریکی به شدت تغییر می‌کنند.

شکل (۱۳) عمق نفوذ امواج در خاک لوم رسی شن‌دار در بازه فرکانسی ۱۰۰ مگاهرتز تا ۱/۵ گیگاهرتز را در حالتی که رطوبت خاک متغیر است، نشان می‌دهد. با توجه به تغییرات زیاد ضریب گذردهی الکتریکی تغییرات عمق نفوذ امواج نیز زیاد خواهد بود.

۶- شبیه‌سازی آشکارسازی هدف مدفون فلزی در نرم‌افزار CST

در این سناریو یک صفحه تخت رسانای بزرگ را به‌عنوان هدف در عمق‌های مختلف خاک قرار داده و میزان سیگنال انعکاسی دریافتی که نشانگر آشکارسازی هدف می‌باشد را اندازه‌گیری

نحوی در عمق مناسب قرار می گیرد که در سیگنال خروجی پاسخ مناسبی را دریافت کنیم سپس میزان تأخیر زمانی بین پاسخها را اندازه گیری و در جدول مربوطه ثبت می کنیم. در مرحله بعدی به منظور بررسی میزان تأثیر تغییرات پارامترهای فیزیکی و محیطی بر میزان ضریب گذردهی و عمق نفوذ امواج، جعبه خاک را از خاک لوم رسی روشن دار پر کرده و تأثیر تغییرات فشردگی، دمایی و رطوبت را اندازه گیری و در جدولهای جداگانه ثبت می کنیم. شکل ۱۴ شمای کلی این شبیه سازی را نشان می دهد.

سرعت موج الکترومغناطیسی در هر محیطهای غیر مغناطیسی متناسب با ثابت گذردهی الکتریکی نسبی (ϵ_r) آن محیط تغییر پیدا می کند. سرعت موج الکترومغناطیسی (v) در یک محیط از رابطه ۱۲ به دست می آید [۲۶].

$$(12) \quad v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}} \left(\frac{m/s}{\sqrt{\epsilon_r}} \right) = \frac{0.3}{\sqrt{\epsilon_r}} \left(\frac{m/ns}{\sqrt{\epsilon_r}} \right)$$

در رابطه فوق C سرعت نور در فضای آزاد می باشد. عمق نفوذ امواج سامانه های راداری زمین نفوذ (D) با دانستن سرعت موج در محیط مورد نظر و محاسبه زمان رفت و برگشت موج Δt امکان پذیر بوده و از رابطه ۱۳ به دست می آید [۲۷].

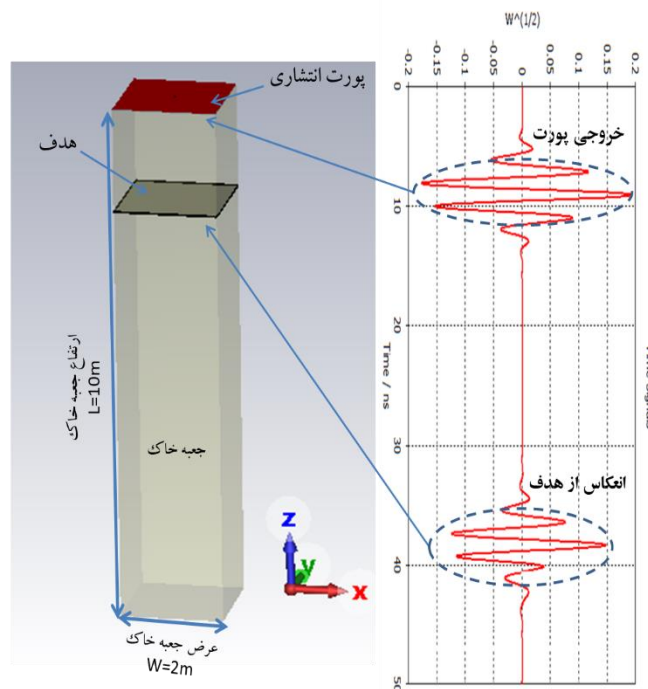
$$D_{(m)} = \frac{1}{2} v \Delta t \quad (13)$$

طبق رابطه ۱۳ برای به دست آوردن فواصل قرارگیری هر یک از عناصر کافی است، میزان تأخیر سیگنال برگشتی (Δt) از آن عنصر را در نصف سرعت موج در آن محیط ضرب کنیم.

۶-۱- شبیه سازی آشکارسازی هدف مدفون فلزی در خاکهای مختلف

در این مرحله از شبیه سازی ماده تشکیل دهنده جعبه خاک را با مشخصات الکترومغناطیسی متناظر با ۷ نمونه خاک قید شده در جدول ۱ در نوبت های مختلف جایگزین می کنیم. عمق قرارگیری هدف را با توجه به پالسهای دریافتی در هر خاک را به گونه ای انتخاب می کنیم که بیشترین عمق جهت آشکارسازی باشد. نتایج این مرحله از شبیه سازی در جدول ۲ قرار داده شده است. همانگونه که انتظار میرفت نتایج شبیه سازی تا حد قابل قبولی در حدود کمتر از ۲ درصد با هم اختلاف دارند.

ابعاد متناظر با سطح جعبه خاک استفاده شده است و فرض گردیده این سطح با سطح مقطع روشن شده توسط آنتن در ناحیه میدان دور برابر است. این ابعاد پورت انتشاری به ما این امکان را می دهد تا با ارسال اولین سیگنال راداری هدف کاملاً تحریک شده و پاسخ مناسبی به سمت گیرنده ارسال نماید. فرض بعدی در این شبیه سازی عدم پاسخ پراکندگی از سطح جعبه خاک به علت چسباندن پورت انتشاری به سطح جعبه خاک است. نمودارهای سیگنال دریافتی مورد انتظار ما شامل دو پاسخ می باشد که پاسخ اول ناشی از خروجی پورت انتشاری و پاسخ بعدی در سیگنال دریافتی، ناشی از انعکاس هدف می باشد که میزان عمق قرارگیری هدف را با در نظر گرفتن مقدار تأخیر زمانی و لحاظ نمودن زمان سیر دوطرفه و سرعت موج در محیط (با توجه به میزان ضریب گذردهی الکتریکی) تعیین می کند. فرکانس مرکزی مورد استفاده در این شبیه سازی ۵۰۰ مگاهرتز می باشد و پهنای باند فرکانسی نیز ۴۰۰ مگاهرتز است. محیطی که هدف در آن قرار دارد یک مکعب مستطیل به ابعاد ۲*۲*۱۰ متر (جعبه خاک) می باشد که جنس آن متناسب با هر گام شبیه سازی تغییر پیدا می کند. هدف شامل یک صفحه تخت رسانای کامل به ابعاد ۲*۲ متر و ضخامت آن ۵ سانتی متر می باشد. این شبیه سازی نیز همانند شبیه سازی بدست آوردن ضریب گذردهی الکتریکی نسبی و هدایت الکتریکی با توجه به پارامترهای فیزیکی



شکل ۱۴- شمای کلی شبیه سازی آشکارسازی هدف مدفون فلزی در نرم افزار CST

و محیطی در نرم افزار متلب در ۲ مرحله انجام می پذیرد. در مرحله اول ۷ نمونه خاک به ترتیب در جعبه خاک قرار گرفته و هدف به

دمایی خاک بر روی آشکارسازی هدف مدفون فلزی پرداخته شده است و نتایج حاصل از این شبیه سازی در جدول ۴ آمده است. اثر تغییرات دمایی خاک بر روی ضریب گذردهی الکتریکی و عمق نفوذ بسیار ناچیز بوده به نحوی که نتایج در هر ۴ حالت دمایی (۰، ۲۵، ۳۰ و ۳۵ درجه سانتی گراد تقریباً یکسان می باشد. همانطور که انتظار داشتیم در این گام نیز اختلاف بین نتایج شبیه سازی با محاسبات در نرم افزار متلب نزدیک به هم می باشد.

جدول ۴- نتایج شبیه سازی تأثیر میزان دمای خاک لوم- رسی و شن دار در آشکارسازی هدف مدفون فلزی

نتایج	شبهه سازی با CST			نرم افزار متلب	
	عمق آشکارسازی هدف (mm)	تأخیر زمانی بین پاسخ ها (ns)	ضریب گذردهی الکتریکی	عمق نفوذ امواج (m)	ضریب گذردهی الکتریکی
شن خالص	۰/۴۸	۸/۲	۶/۰۵	۰/۵	۵/۸۹
رس خالص	۱/۴۶	۱۹	۳/۸۱	۱/۴۹	۳/۷۴
لای خالص	۱/۲۵	۱۶/۸	۴/۰۵	۱/۲۰	۳/۹۷
لوم رس و شن دار	۱/۷۵	۲۳	۳/۸۹	۱/۶۸	۳/۷۲
رس	۱/۱۰	۱۵/۵	۴/۴۵	۱/۰۲	۴/۴۱
لوم لای دار	۱/۲۸	۱۷	۳/۹۶	۱/۲۵	۳/۹۱
لوم رس دار	۲/۰۹	۲۶	۳/۴۷	۲	۳/۴۳

در سومین گام از این مرحله شبیه سازی به تأثیر میزان تغییرات رطوبت خاک بر روی آشکارسازی هدف مدفون فلزی پرداخته شده است و نتایج حاصل از این شبیه سازی در جدول ۵ آمده است. همانطور که انتظار داشتیم در این گام نیز اختلاف بین نتایج شبیه سازی با محاسبات در نرم افزار متلب نزدیک به هم می باشد.

جدول ۵- نتایج شبیه سازی تأثیر میزان رطوبت خاک لوم- رسی و شن دار در آشکارسازی هدف مدفون فلزی

نتایج	شبهه سازی با CST			نرم افزار متلب	
	عمق آشکارسازی هدف (mm)	تأخیر زمانی بین پاسخ ها (ns)	ضریب گذردهی الکتریکی	عمق نفوذ امواج (m)	ضریب گذردهی الکتریکی
رطوبت ۰	۴/۴۸	۵۱/۷	۲/۹۹	۴/۴۱	۲/۹۴
رطوبت ۵	۱/۷۵	۲۳	۳/۸۹	۱/۶۸	۳/۷۲
رطوبت ۱۰	۰/۷۴	۱۱	۴/۹۸	۰/۷۰	۴/۹۲
رطوبت ۲۰	۰/۳۷	۷	۷/۸۹	۰/۳۵	۷/۸۲
رطوبت ۳۰	۰/۱۹	۴/۳	۱۱/۰۵	۰/۲	۱۱
رطوبت ۴۰	*	۴/۱	۱۵/۸۶	۰/۱۵	۱۵/۸

*در این فرکانس عمق قرارگیری هدف قابل آشکارسازی نمی باشد.

جدول ۲- نتایج شبیه سازی آشکارسازی هدف مدفون فلزی در خاکهای مختلف

نتایج	شبهه سازی با CST			نرم افزار متلب	
	عمق آشکارسازی هدف (mm)	تأخیر زمانی بین پاسخ ها (ns)	ضریب گذردهی الکتریکی	عمق نفوذ امواج (m)	ضریب گذردهی الکتریکی
شن خالص	۰/۴۸	۸/۲	۶/۰۵	۰/۵	۵/۸۹
رس خالص	۱/۴۶	۱۹	۳/۸۱	۱/۴۹	۳/۷۴
لای خالص	۱/۲۵	۱۶/۸	۴/۰۵	۱/۲۰	۳/۹۷
لوم رس و شن دار	۱/۷۵	۲۳	۳/۸۹	۱/۶۸	۳/۷۲
رس	۱/۱۰	۱۵/۵	۴/۴۵	۱/۰۲	۴/۴۱
لوم لای دار	۱/۲۸	۱۷	۳/۹۶	۱/۲۵	۳/۹۱
لوم رس دار	۲/۰۹	۲۶	۳/۴۷	۲	۳/۴۳

جدول ۶-۲- شبیه سازی آشکارسازی هدف مدفون فلزی

در خاک لوم رسی و شن دار با تغییرات

پارامترهای محیطی و فیزیکی

در این مرحله از شبیه سازی خاک لوم رسی و شن دار را به عنوان ماده جعبه خاک قرار می دهیم. در اولین گام تغییرات فیزیکی شامل تغییرات فشردگی را همانگونه که بیشتر در نرم افزار متلب بررسی شده است را شبیه سازی نموده و نتایج آن در جدول ۳ ارائه شده است. میزان اختلاف نتایج در این گام کمتر از ۲ درصد است.

جدول ۳- نتایج شبیه سازی تأثیر میزان فشردگی خاک لوم- رسی و شن دار در آشکارسازی هدف مدفون فلزی

نتایج	شبهه سازی با CST			نرم افزار متلب	
	عمق آشکارسازی هدف (mm)	تأخیر زمانی بین پاسخ ها (ns)	ضریب گذردهی الکتریکی	عمق نفوذ امواج (m)	ضریب گذردهی الکتریکی
فشردگی ۱/۵	۴/۴۸	۵۱/۷	۲/۹۹	۴/۴۱	۲/۹۴
فشردگی ۲	۳/۶۹	۴۷/۸	۳/۷۷	۳/۶۱	۳/۷۲
فشردگی ۲/۵	۳/۰۸	۴۶	۵	۳/۰۲	۴/۵۵
فشردگی ۳	۲/۵۶	۴۰	۵/۴۹	۲/۵۱	۵/۴۴

۷- نتیجه گیری

نتیجه این مقاله جهت استفاده در طراحی رادارهای زمین نفوذ بسیار مفید می باشد و با استفاده از نتایج آن از قابلیت پیش بینی پارامترهای تأثیرگذار در فرآیند آشکارسازی اهداف مدفون بهره برد. تخمین نوع خاک و اطلاع یافتن از ضریب گذردهی الکتریکی خاک و عمق نفوذ امواج در آن می تواند در انتخاب فرکانس مناسب، نوع آنتن، میزان توان ارسالی و در حالت کلی انتخاب بهینه پارامترهای راداری کمک شایانی به ما کند و از هدر رفت منابع و زمان جستجو تا حد قابل قبولی جلوگیری و بازدهی سامانه راداری را بالا ببرد. در این مقاله به بررسی مجموعه پارامترهای مؤثر در فرآیند آشکارسازی و شناسایی اهداف مدفون پرداخته شده است. مجموع این پارامترها بر روی ضریب گذردهی الکتریکی تأثیر می گذارند. پارامترهای فیزیکی شامل میزان و مقدار اجزای تشکیل دهنده، مقدار فشردگی، اندازه و ابعاد می شود. پارامترهای فیزیکی به صورت مستقیم در قسمت حقیقی گذردهی الکتریکی نسبی و به صورت غیرمستقیم بر هدایت الکتریکی محیط قرارگیری هدف تأثیر می گذارد. پارامترهای محیطی نیز شامل میزان رطوبت و دما می باشد که به طور مستقیم بر قسمت موهومی گذردهی الکتریکی نسبی محیط و به صورت غیرمستقیم بر هدایت الکتریکی محیط تأثیر خواهد گذاشت. پارامترهای شناساگر شامل فرکانس و پهنای پالس و شدت میدان تابشی و... می باشد. مجموع پارامترهای شناساگر، عوامل فیزیکی و محیطی می توانند عمق نفوذ امواج در یک محیط را تعیین نمایند. بیشترین تأثیر در ضریب گذردهی الکتریکی مربوط به تغییرات رطوبت خاک می باشد. مهم ترین پارامتری که در میزان عمق نفوذ امواج داخل محیط دخالت دارد میزان ضریب گذردهی الکتریکی می باشد؛ چراکه بقیه عوامل مانند هدایت الکتریکی وابسته به این پارامتر می باشد. همچنین سایر تغییرات محیطی نظیر رطوبت و دما و تغییرات فیزیکی شامل دانه بندی و ترکیب مواد مستقیماً روی ضریب گذردهی الکتریکی تأثیر می گذارند.

۸- مراجع

- [5]. B. xu, L. Li, Z. Zhu, Y. Shi, and Feng, "SAR Interferometric Baseline Refinement Based on Flat-Earth Phase Without a Ground Control Point," *Remote Sens (Basel)*, Vol. 12, p. 233, Jan. 2020.
- [6]. A. K. Maini, "Military Radars", *Handbook of Defence Electronics and Optronics*. 203–294, 10-Apr-2018.
- [7]. I. CatapaNo et al., *Airborne GPR surveys via tomographic imaging: An analysis of the reconstruction capabilities*. 2012.
- [8]. F. López-Rodríguez, V. M. Velasco-Herrera, R. Álvarez-Béjar, S. Gómez-Chávez, and J. Gazzola, "Analysis of ground penetrating radar data from the tunnel beneath the Temple of the Feathered Serpent in Teotihuacan, Mexico, using new multi-cross algorithms," *Advances in Space Research*, Vol. 58, No. 10, pp. 2164–2179, 2016.
- [9]. R. Tilley, H. R. Sadjadpour, and F. Dowla, "GPR imaging for deeply buried objects: A comparative study based on compositing of scanning frequencies and a chirp excitation function," *Geosciences (Basel)*, Vol. 9, No. 3, p. 132, 2019.
- [10]. L. S. Hao, X. L. Xu, S. P. Peng, and Y. Feng, "Development and application of a Novel combined low-frequency antenna for ultra-deep advanced detection in mine," in *2016 16th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*, IEEE, pp. 1–4, 2016.
- [11]. D. Nectaria, J. D. Redman, C. M. Hogan, and A. Peter Annan, "Air-launched GPR depth of investigation," *Society of Exploration Geophysicists*, pp. 228–231, 2020.
- [۱۲]. م. سیف، ا. خاکی و ص. خزایی، مدل سازی، پردازش و تفسیر داده های رادار نفوذی به زمین (GPR) به منظور شناسایی تونل های دفاعی به همراه یک مطالعه موردی، فصلنامه پدافند غیرعامل ۹-۱ ۴۷-۵۶، ۱۳۹۶.
- [۱۳]. ا. احمدپور، ا. کامکار روحانی، ا. پیروز و س. پرنو، مدل سازی داده های GPR با استفاده از روش FDTD و تفسیر نتایج در یک مطالعه موردی، سومین کنفرانس ملی و اولین کنفرانس بین المللی پژوهش های کاربردی در مهندسی برق، مکانیک و میکاترونیک، تهران، ۱۳۹۴.
- [14]. I. Giannakis, "Realistic numerical modelling of Ground Penetrating Radar for landmine detection," 2016.
- [15]. C. Warren, "Numerical modelling of high-frequency ground-penetrating radar antennas," 2009.
- [16]. C. A. Balanis, *Advanced Engineering Electromagnetics*, 2nd Edition. Wiley, 2012.
- [17]. A. R. Von Hippel and A. S. Labounsky, *Dielectric Materials and Applications*. in Artech House microwave library. Artech House, 1995.
- [18]. P. Hoekstra and A. Delaney, "Dielectric properties of soils at UHF and microwave frequencies," *Journal of Geophysical Research (1896-1977)*, Vol. 79, No. 11, pp. 1699–1708, Apr. 1974.
- [19]. J. A. Lane, J. A. Saxton, and E. C. Bullard, "Dielectric dispersion in pure polar liquids at very high radio-frequencies I. Measurements on water, methyl and ethyl alcohols," *Proc R Soc Lond A Math Phys Sci*, Vol. 213, No. 1114, pp. 400–408, Jan. 1997
- [20]. L. Klein and C. T. Swift, "An improved model for the dielectric constant of sea water at microwave
- [1]. E. Sepp, "Deeply Buried Facilities: Implications for Military Operations," p. 49, May 2000.
- [2]. W. R. Scott, T. Counts, G. D. Larson, A. Gurbuz, and J. H. McClellan, *Combined Ground Penetrating Radar and Seismic System for Detecting Tunnels*. 2006.
- [3]. D. Edemsky, A. Popov, I. Prokopovich, and V. Garbatsevich, "Airborne Ground Penetrating Radar, Field Test," *Remote Sens (Basel)*, Vol. 13, No. 4, 2021.
- [4]. R. Kedzierawski, J.-M. Le Caillec, and W. Czarnecki, "Simulation of subsurface imaging for remote sensing and buried object detection from airborne platforms," *Eur J Remote Sens*, Vol. 52, pp. 583–598, Dec. 2019.

- frequencies," IEEE Journal of Oceanic Engineering, Vol. 2, pp. 104–111, 1977.
- [21]. Peplinski, N. R., Ulaby, F. T. and M. Dobson, "Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3 GHz range," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Volume 33, number 3, pp. 803-807, 1995.
- [22]. Daniels, "Ground penetrating radar," IEE, 2nd edition, The University of Michigan, 2004.
- [23]. M. A. Gonzalez Huici, "Accurate ground penetrating radar numerical modeling for automatic detection and recognition of antipersonnel landmines". Universitäts-und Landesbibliothek Bonn, 2013.
- [24]. J. A. Richards, Remote Sensing with Imaging Radar. Springer Berlin Heidelberg, 2009.
- [25]. M. T. Hallikainen and F. T. Ulaby, "Microwave Dielectric Behavior of Wet Soil-Part 1 : Empirical Models and Experimental Observations1", pp. 25–34, 1985.
- [26]. H. Wang, S. Ouyang, Q. Liu, K. Liao, and L. Zhou, "Deep-Learning-Based Method for Estimating Permittivity of Ground-Penetrating Radar Targets," Remote Sensing, vol. 14, no. 17, p. 4293, Aug. 2022.
- [27]. M. M. Alves *et al.*, "A novel iterative method to estimate the soil complex permittivity from measurement and simulation modeling," 2021 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), San Diego, CA, USA, pp. 76-79, 2021.