

# سنجش از دور اهداف زیر سطحی با استفاده از سامانه‌های پر قدرت گرم کننده‌ی الکترومغناطیسی یونسفری (هارپ)

محمد مردانی شهر بابک<sup>۱</sup>

تاریخ دریافت مقاله: ۹۵/۰۷/۰۹

تاریخ پذیرش مقاله: ۹۵/۱۱/۰۶

\*\*\*\*\*

## چکیده

برای پنهان‌سازی سازه‌ها و تأسیسات زیرسطحی، شناخت عملکرد و توان فناوری‌های سنجش از دور نوین و پیشرفته از ضروریات اساسی است. یکی از این فناوری‌ها در سامانه‌های پر قدرت گرم کننده‌ی الکترومغناطیسی یونسفری بکار گرفته شده است که از امواج الکترومغناطیسی پر قدرت در محدوده فرکانسی ۳ تا ۱۰ مگاهرتز استفاده می‌کند. هارپ با ساطع کردن این امواج به منطقه‌ای از یونسفر موجب گرم شدن آن منطقه شده و این گرمایش منجر به گسیل امواجی با محدوده فرکانس خیلی پائین VLF و ELF می‌شود. هدف اصلی این تحقیق تحلیل و شناخت قابلیت سنجش از دور سامانه‌های پر قدرت گرم کننده‌ی الکترومغناطیسی یونسفری (هارپ)، در شناسایی اهداف زیرسطحی می‌باشد. در این پژوهش با بهره‌گیری از روش ترکیبی تجزیه و تحلیل داده‌های چندگانه بر مبنای توصیف و تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده از منابع علمی و تئوریک، گزارشات رسمی و معتبر، بررسی نتایج آزمایشات تجربی انجام گرفته در جهان و ایران و در نهایت اخذ نظر خبرگان و صاحب نظران جامعه آماری تحقیق به روش میدانی، به سؤال اصلی تحقیق پاسخ داده شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که سامانه‌های پر قدرت گرم کننده‌ی الکترومغناطیسی یونسفری، قابلیت سنجش از دور و امکان شناسایی اهداف زیرسطحی را دارند. بر این اساس، این سامانه‌ها تهدیدی جدی برای شناسایی اهداف زیر سطحی محسوب می‌شوند؛ و لذا در ادامه تحقیق، راهکارهای دفاع غیرعامل در برابر این تهدید نیز ارائه گردیده است.

واژه‌های کلیدی: امواج الکترومغناطیسی پر قدرت، هارپ، سنجش از دور، اهداف زیرسطحی، یونسفر.

\*\*\*\*\*

## ۱- مقدمه

هارپ در ایجاد تغییرات آب و هوایی پرداخته است. اما در حوزه آشکارسازی اهداف زیرسطحی هیچ تحقیق منتشر شده‌ی علمی تاکنون مشاهده نشده است. لذا شناخت و تحلیل توانایی و قابلیت شناسایی و سنجش از دور اهداف زیر سطحی سامانه‌های پر قدرت گرم کننده‌ی الکترومغناطیسی یونسفری (هارپ) هدف اصلی تحقیق حاضر می‌باشد.

## ۲- نوع و روش پژوهش

نوع تحقیق به دلیل مورد استفاده قرارگرفتن در حوزه‌های سنجش از دور و پدافند غیر عامل کشور از نوع کاربردی بوده و روش تحقیق توصیفی-تحلیلی و موردی زمینه‌ای است. مدل تحلیلی تحقیق در نگاره ۱ ارائه شده است.



### نگاره ۱: مدل مفهومی پژوهش

#### ۲-۱- روش جمع آوری داده‌ها

در این تحقیق اطلاعات مورد نیاز از طریق جستجوی منابع اینترنتی، اسناد و مدارک معتبر علمی، کتب و نشریات داخلی و خارجی، پایان‌نامه‌ها و پژوهش‌های انجام گرفته در راستای موضوع و همچنین اخذ نظر خبرگان و صاحب نظران این حوزه از طریق انجام مصاحبه و بهره‌گیری از روش علمی دلفی به صورت میدانی، گردآوری شده است.

اهداف زیر سطحی به پدیده‌هایی اطلاق می‌گردد که به دلایل مختلف در زیر سطوح طبیعی زمین احداث می‌شوند. این اهداف شامل سازه‌هایی از قبیل تأسیسات زیرزمینی مانند تأسیسات هسته‌ای، تونل‌ها، سنگرها و مراکز تجمع، زاغه‌های مهمات، خطوط انتقال نفت و گاز، کانال‌های انتقال برق، کانال‌های مخابراتی، و... می‌باشند. سنجش از دور، آشکارسازی و شناسایی اهداف زیرسطحی، از دیدگاه پدافند غیرعامل موضوعی بسیار حیاتی محسوب می‌گردد؛ چرا که این اهداف نقش بسیار مهمی در امنیت ملی کشورها بر عهده دارند.

یکی از تهدیدات ناشناخته مطرح شده در خصوص سنجش از دور و شناسایی اهداف زیرسطحی، سامانه پر قدرت گرم کننده‌ی الکترومغناطیسی یونسفری (هارپ) است که در طی یک دهه اخیر در برخی رسانه‌ها از قبیل سایت‌های اینترنتی و کانال‌های تلویزیونی (آمریکا) به شدت به آن پرداخته شده است. از این رو این تحقیق به دنبال پاسخ به این سوال اساسی است که آیا سامانه‌های پر قدرت گرم کننده‌ی الکترومغناطیسی یونسفری (هارپ)، قابلیت سنجش از دور و امکان شناسایی اهداف زیرسطحی را دارند؟

در صورت صحت قابلیت سنجش از دور و توان شناسایی اهداف زیرسطحی توسط هارپ، می‌توان به این نتیجه رسید که این سامانه یک تهدید بسیار جدی برای شناسایی اهداف مهم زیرسطحی کشور محسوب می‌گردد و اقدامات پدافند غیرعامل را با چالشی جدی مواجه می‌سازد. بنابراین انجام برنامه‌ریزی‌های راهبردی، عملیاتی و تاکتیکی جهت مقابله با این تهدید جدی، ضروری است. اما در صورت عدم صحت این قابلیت، رفع ابهامات و تشویش اذهان فرماندهان و مسئولین کشور به ویژه در حوزه پدافند غیرعامل کشور را فراهم می‌سازد.

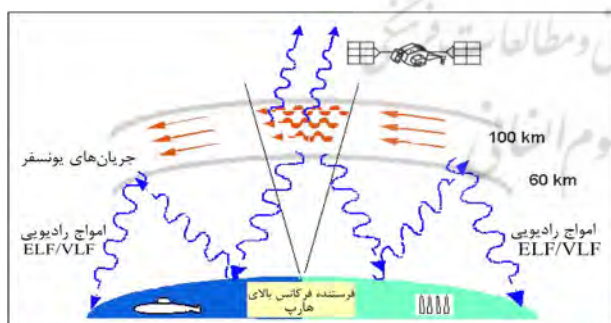
تنها تحقیق منتشر شده در کشور که توسط مردانی شهر بابک و رضوی نژاد (مردانی و همکاران، ۱۳۹۰) به صورت یک کتاب دو جلدی منتشر شده است به موضوع بررسی قابلیت

نگاره ۲: منطقه سامانه هارپ در  
 آلاسکا (راست) و آنتن‌های مخبراتی  
 تولیدکننده امواج HF (چپ)



امواج با فرکانس بالا (HF)<sup>۳</sup> را با طول موج‌هایی از ۱۰ تا ۱۰۰ متر ساطع کنند استفاده شده است (Rozell, 2015:43). این سیستم در حال حاضر از یک مجموعه ۱۸۰ آنتن دوقطبی بر روی برج‌های آلومینیومی با ارتفاع حدود ۲۳ متر قرار دارد که در زمین پهناوری به مساحت ۲۳ هزار مترمربع در ایالت آلاسکا در آمریکا نصب شده است (نگاره ۲).

امواج برگشتی از منطقه گرم شده یونسفری در سامانه هارپ در محدوده و VLF<sup>۴</sup> و ELF<sup>۵</sup> می‌باشند. نگاره ۳، طرح کلی از انجام پروژه هارپ را نشان می‌دهد و همانطور که مشخص است، امواج فرکانس بالای هارپ به یونسفر ساطع شده و امواج ELF و VLF تولید می‌شوند (مردانی و رضوی نژاد، ۱۳۹۰).



نگاره ۳: شمای کلی از پروژه هارپ و روند ایجاد امواج  
 الکترومغناطیسی ELF و VLF (Papadopoulos, 2005).

برای تولید امواج ELF و VLF در یونسفر به یک شارش

## ۲-۲- جامعه آماری تحقیق

جامعه آماری این تحقیق، صاحب نظران، خبرگان و پژوهشگران دانشگاهی و مراکز تحقیقاتی در حوزه‌های سنجش از دور، سامانه‌های گرم کننده یونسفری، یونسفر و رادارهای پر قدرت در کشور می‌باشند. جامعه نمونه آماری این پژوهش با استفاده از روش خبرگی از بین جامعه آماری تحقیق، تعداد ۳۲ نفر به صورت هدفمند تعیین گردیدند.

## ۳- مبانی نظری و تئوری‌های پژوهش

### ۳-۱- سامانه هارپ

در اوایل دهه‌ی ۱۹۹۰ به دلیل محدودیت اصلی مربوط به پوشش محلی در خصوص رادارهای نفوذ کننده زمینی (GPR)<sup>۱</sup> و روش‌های مگنتوتلوریک، شناسایی زیرزمینی اهداف در مقیاس جهانی توسط هارپ مورد توجه وزارت دفاع آمریکا قرار گرفت. هارپ در واقع یک پروژه‌ی پژوهشی با نام «برنامه پژوهشی یونسفر فعال با فرکانس بالا» است؛ که به اختصار HAARP<sup>۲</sup> نامیده می‌شود.

این پروژه در سال ۱۹۹۳ با هدف بررسی و پژوهش درباره لایه یونسفر با استفاده از امواج رادیویی با همکاری مشترک بین نیروهای هوایی و دریایی آمریکا شروع شد و در سال ۲۰۰۷ تکمیل و عملیاتی گردید. هارپ در واقع یک گرم کننده یونسفری مشابه سامانه SURA روسیه، HIPAS کانادا و سامانه IESCAT اتحادیه اروپا است. در سامانه هارپ برای انتشار امواج رادیویی مؤثر آنتن‌هایی که بتوانند

3- High Frequency

4- Very Low Frequency

5- Extremely Low Frequency

1- Ground Penetrating RADAR

2-High Frequency Active Aurora Research Program

ابزار مورد استفاده برای اندازه‌گیری مغناطیسی کویل‌های مغناطیسی می‌باشد که در سه جهت محورهای مختصات قرار گرفته است و میدان‌های مغناطیسی را ضبط می‌کند (Nabighian, et.al, 1991). با توجه به مشاهدات انجام شده، جدول (۱) دامنه حداکثر و متوسط فرکانس‌های ELF رسیده به زمین را نشان می‌دهد.

جدول ۱: دامنه حداکثر و متوسط فرکانس‌های ELF رسیده به

زمین (Paul, et.al, 2003)

دامنه متوسط (PT)	حداکثر دامنه (PT)	فرکانس (کیلوهرتز)
۱/۹	۲/۷	۱۰
۱/۴	۶	۱
۰/۶	۵	۰/۱

### ۳-۲- ژئوفیزیک الکترومغناطیسی

روش‌های مختلف ژئوفیزیکی وجود دارد که روش مگنتوتلوریک به دلیل استفاده از امواج الکترومغناطیس و میرایی کم این امواج در هوا و همچنین به دلیل نیازمند نبودن به حضور فیزیکی حائز اهمیت بوده و در حوزه‌های سنجش زیر سطحی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش پارامترهای رسانایی الکتریکی از قبیل مقدار و عمق رسانایی ماده مورد نظر (ساختارهای زیر سطحی) و همچنین میزان نفوذ مایعات در منافذ و حضور آلاینده‌های شیمیایی و حضور مایعات خلاف قاعده رسانایی منطقه را به وضوح در زیر سطح مشخص می‌کند. حتی زمانی که این روش نتواند به طور مستقیم سیال یا ماده مورد نظر را تشخیص دهد، می‌تواند به طور غیر مستقیم پارامترهای ساختاری و خواص خاک منطقه را ارائه دهد (McCoy, 2016:96).

چندین روش اصلی اندازه‌گیری‌های الکترومغناطیسی شامل MT، AMT، CSAMT و VLF است که مقاومت ویژه زمین را نسبت به عمق با اندازه‌گیری مؤلفه‌های E و B میدان الکترومغناطیسی، در رنج وسیعی از فرکانس‌ها، فراهم می‌نمایند.

جریان الکترونی در لایه پایینی یونسفر (که همانند یک پلاسما رفتار می‌کند) در ارتفاع ۷۰ تا ۱۰۰ کیلومتری سطح زمین نیاز است که تحت عنوان الکتروجت شناخته می‌شود و سه نوع می‌باشد، که عبارتند از: الکتروجت استوایی، الکتروجت استرالیایی و الکتروجت قطبی یا شفقی. همچنین به یک گرم کننده یونسفر در زیر جریان الکتروجت نیازمند است که همان هارپ می‌باشد. لازم به ذکر است که الکتروجت‌ها در ابتدا توسط بادهای خورشیدی ایجاد می‌شوند (مردانی و رضوی نژاد، ۱۳۹۰). پس می‌توان گفت که امواج الکترومغناطیسی ELF و VLF با ساطع کردن امواج هارپ، ناحیه D یونسفر (بخشی از جو زمین بین ۵۰ تا ۹۰ کیلومتر) را تحت تأثیر قرار می‌دهند و در نتیجه حرارت الکترونی باعث ایجاد جریان الکتروجت شفقی قطبی می‌شود. امواج ایجاد شده هم در زمین و هم در مگنتوسفر ساطع می‌شوند (Papadopoulos, 2005). علاوه بر مطالعات زمینی می‌توان با استفاده از این امواج مگنتوسفر را نیز مورد مطالعه قرار داد.

هارپ دارای فرستنده رادیویی با قدرت توان بالای ارسال سیگنال رادیویی است که با ایجاد حرارت اندکی در رنج فرکانسی ۳ تا ۱۰ مگاهرتز حجم خوبی از یونسفر را تحت تأثیر قرار می‌دهد (Moore, et.al, 2007). تعدیل گرمایش در یونسفر در ارتفاع بالا باعث تشکیل جریان‌هایی همانند الکتروجت‌های قطبی و جریان‌های دینامو می‌شود (مردانی و رضوی نژاد، ۱۳۹۰). این موضوع از سال ۱۹۷۰ وسیله‌ای برای تولید امواج الکترومغناطیسی در باند فرکانسی بسیار پایین (۳-۳۰۰۰ هرتز) مورد استفاده قرار گرفته است (Platino, et.al, 2004).

هارپ دارای دو گیرنده برای پایش امواج ELF و VLF یونسفری حاصل از عملکرد خود می‌باشد. یکی از این دو گیرنده در ۱۰ کیلومتری شمال مقر اصلی هارپ (آلاسکا) و در گاکانا<sup>۱</sup> واقع است. گیرنده دیگر نیز در پوکرفلات<sup>۲</sup> واقع در ۳۵۰ کیلومتری هارپ واقع می‌باشد. این گیرنده‌ها در محدوده ۳ هرتز تا ۱۲ کیلوهرتز، مؤلفه‌های افقی و متعامد میدان مغناطیسی را اندازه‌گیری می‌کنند (Paul, et.al, 2003).

1- Gakona

2- Poker Flat

تعیین این شاخص، پتانسیل بالایی را در شناسایی انواع مواد فراهم می‌نماید.

AMT<sup>۵</sup>: این روش مشابه روش MT است با این تفاوت که بر پایه اندازه‌گیری فرکانس‌های بالاتر و مطالعات اکتشافی در عمق‌های کمتر استوار است. در این شیوه معمولاً از فرکانس‌های بین ۱۰۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز استفاده می‌شود (Zonge, et.al, 1991).

CSAMT<sup>۶</sup>: از نقطه ضعف‌های عمده دو روش قبل طبیعت آشفته امواج در فرکانس‌های بالا و ضعیف بودن امواج چشمه در فرکانس‌های محدوده ۱ هرتز و ۲ کیلو هرتز می‌باشد. لذا برای حل این مشکل از روش CSAMT استفاده می‌شود. این روش که از سال ۱۹۹۲ مطرح شده، مشابه روش AMT است با این تفاوت که در این روش از یک چشمه مصنوعی استفاده می‌شود که در نقطه‌ای دور از محل برداشت جهت تولید امواج در گستره فرکانس شنوایی (صوتی) استفاده می‌شود. بدین صورت که یک آنتن دوقطبی متصل به زمین که فاصله بین موقعیت‌های ارسال و دریافت (زوج الکترودها) چندین کیلومتر است، استفاده می‌شود. فرکانس‌های اندازه‌گیری شده در این شیوه بین ۱۰۰ هرتز تا ۱۰ کیلوهرتز می‌باشد و معمولاً در کاربردهای اکتشافی در دریاچه‌ها و سواحل دریاها که عمق آب کم است انجام می‌شود. این روش به دلیل استفاده از منبع مصنوعی ارسال سیگنال قابل کنترل و تنظیم بوده و لذا اندازه‌گیری‌های آن نسبت به سایر روش‌ها دقیق‌تر می‌باشد. بر طبق گزارشات حداکثر عمق اکتشافی در این شیوه ۳ کیلومتر می‌باشد. نگاره ۴ عمق اکتشافی مؤثر را برای روش CSAMT که تابعی از فرکانس و مقاومت ویژه زمین است نشان می‌دهد، همانطور که در نگاره مشخص است با افزایش فرکانس (کاهش پریود) با توجه به مقاومت زمین منطقه از عمق قابل شناسایی کاسته می‌شود (Zonge, et.al, 1991). پس می‌توان گفت که فرکانس با عمق نفوذ رابطه عکس دارد.

MT<sup>۱</sup>: در این شیوه میدان مغناطیسی و الکتریکی طبیعی زمین در رنج وسیعی از فرکانس‌ها، از ۰/۰۰۱ هرتز تا ۱۰۰ هرتز، اندازه‌گیری می‌شود. این روش توسط تیخونوف<sup>۲</sup> (Tikhonov, 1950) و فرانس کانیار<sup>۳</sup> (Cagniard, 1953) مطرح گردیده و روس‌ها و فرانسوی‌ها توسعه دهندگان آن محسوب می‌شوند. از مهمترین مزیت‌های این روش، توانایی اکتشاف آن از عمق‌های بسیار کم تا عمق‌های بسیار زیاد، بدون استفاده از چشمه‌های مصنوعی می‌باشد و همچنین این روش هیچ گونه آثار زیست محیطی در بر ندارد. ارسال امواج مغناطیسی به درون زمین و ایجاد تغییر در میدان الکترومغناطیسی (EM)، جریان‌های الکتریکی را در لایه‌های مختلف زمین القا می‌کند. این جریان‌های زیرسطحی میدان‌های ثانویه‌ای تولید می‌کنند و توسط گیرنده در سطح زمین قابل دریافت می‌باشند. میدان‌های EM شامل اطلاعات مفیدی درباره خواص الکتریکی لایه‌های زیرسطحی می‌باشند. بوسیله اندازه‌گیری میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی در سطح زمین مقاومت ظاهری برحسب تابعی از فرکانس قابل محاسبه است. منشأ امواج MT ناشی از فعالیت‌های خورشیدی، آذرخش‌ها، شفق‌های قطبی، حرکت‌های نسبی زمین، خورشید و ماه و همچنین میدان‌های ناشی از گردبادهای بزرگ، می‌باشد. امواج ایجاد شده تقریباً بدون تضعیف، پوسته نارسانای هوا را طی کرده و به سطح زمین برخورد می‌کنند. با اندازه‌گیری همزمان مؤلفه‌های متعامد میدان الکترومغناطیسی (دو مؤلفه الکتریکی  $E_x, E_y$  و سه مؤلفه مغناطیسی  $H_x, H_y, H_z$ ) می‌توان تانسور مقاومت ظاهری<sup>۴</sup> یا امپدانس که تابعی از فرکانس است را محاسبه کرد. با این کار دستیابی به ساختار مقاومت ویژه مواد زیر سطحی ممکن می‌شود. هدایت الکتریکی یک پارامتر فیزیکی مهم در شناسایی ویژگی الکتریکی ساختار زیر سطحی می‌باشد (Nabighian, et.al, 1991). لذا اندازه‌گیری و

1- Magneto Telluric

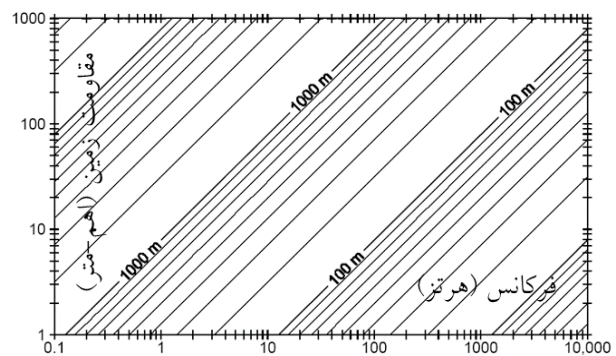
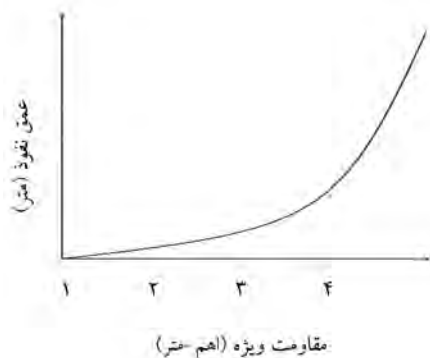
2- Tikhonov

3- Cagniard

4- Impedance tensor

5-Audio-frequency Magneto-Telluric

6-Controlled Source Audio-frequency Magneto-Telluric



نگاره ۴: عمق اکتشافی مؤثر در روش CSAMT (Unsworth, 2007)

نگاره ۵: حداکثر عمق نفوذ میدان VLF (Wright, 1988)

### ۳-۳- معادلات پایه روش‌های الکترومغناطیسی

معادلات پایه مورد استفاده در روش‌های ژئوفیزیک الکترومغناطیسی بر اساس معادلات ماکسول و قانون اهم می‌باشد که با استفاده از تانسور امپدانس که مؤلفه‌های افقی میدان مغناطیسی را به مؤلفه‌های افقی میدان الکتریکی مرتبط می‌کند؛ می‌توان پارامترهای مقاومت ویژه ظاهری و فاز امپدانس را به منظور تفسیر داده‌های مگنتوتلوریک استخراج کرد.

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = Z \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$Z_{ij} = \frac{E_i}{H_j} e^{i\varphi} = Z = \left[ \frac{i\omega\mu}{\sigma + i\varepsilon\omega} \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

در رابطه (۱)،  $Z$  امپدانس ظاهری،  $H_x$  و  $E_x$  مؤلفه‌های میدان‌های مغناطیسی و الکتریکی را در یک ایستگاه اندازه‌گیری مشخص، نشان می‌دهد. امپدانس یک نیم‌فضای همگن در داخل زمین به صورت رابطه (۳) تعریف می‌شود (have, et.al, 2012):

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{\text{Im}(Z_{ij})}{\text{Re}(Z_{ij})} \quad (3)$$

$$Z = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \quad (3)$$

که در آن  $i, j = x, y$  و  $\varphi$  فاز امپدانس می‌باشد. امپدانس در فضای آزاد عبارت است از  $(\sigma = 0)$ :

$$Z = Z_0 = \left[ \frac{\mu_0}{\varepsilon_0} \right]^{\frac{1}{2}} = 120 \cdot \pi \quad (4)$$

با استفاده از درمینان امپدانس مقاومت ویژه ظاهری

روش VLF: از جمله روش‌های الکترومغناطیسی است که در آن از فرستنده صحرائی استفاده نمی‌شود بلکه فرستنده آنتن‌هایی هستند که امواج الکترومغناطیسی را در باند فرکانسی پائین (کمتر از ۳۰ کیلوهرتز) منتشر می‌کنند. این امواج برای مقاصد نظامی و به طور کلی مخابرات دوربرد مورد استفاده قرار می‌گیرند.

در این روش از امواج رادیویی به عنوان یک چشمه انرژی برای مطالعه خواص الکتریکی زمین استفاده می‌شود. فرکانس بکار برده شده در مقایسه با روش‌های الکترومغناطیسی ذکر شده، بالا است؛ اما از آنجا که فرکانس امواج VLF در مقایسه با دیگر امواج رادیویی که فرکانسی در محدوده ۵۴۰ کیلوهرتز تا ۳۰ مگاهرتز دارند، خیلی کم است، به روش الکترومغناطیسی فرکانس خیلی کم، معروف شده است. این امواج در اطراف یک توده‌ی هادی باعث به وجود آمدن میدان مغناطیسی ثانویه می‌شوند. ساختار هادی در داخل زمین حتی اگر به وسیله لایه‌های ضخیم پوشیده شده باشند، به طور موضعی جهت و شدت میدان ایجاد شده به وسیله فرستنده را تحت تأثیر قرار می‌دهد، تأثیر این میدان ثانویه را می‌توان اندازه‌گیری و تجزیه و تحلیل نمود (Telford, et.al, 1989).

نگاره (۵) دیاگرامی برای تعیین عمق نفوذ زمین‌هایی با هدایت الکتریکی مختلف و حداکثر عمق نفوذ میدان VLF را ارائه می‌دهد.

صورت تجربی، فاصله بین فرستنده و گیرنده می‌باید پنج برابر عمق اکتشافی باشد. در یک زمین همگن فاز امپدانس اینگونه می‌شود (Chave, et.al, 2012):

$$Z = \frac{\omega \mu_0}{k} = \frac{\omega \mu_0}{\sqrt{-i\omega \mu_0 \sigma}} = \sqrt{\frac{i\omega \mu_0}{\sigma}} \quad (8)$$

$$\Rightarrow \varphi = \pi/4$$

این تانسور اطلاعاتی، امتداد و بعد ساختارهای رسانا را فراهم می‌سازد (k معرف عدد موج می‌باشد).

با توجه به میرایی امواج الکترومغناطیسی و انجام محاسبات تئوری (که انجام محاسبات در منابع آورده شده است)، می‌توان به فرمولی کلی و عملی برای محاسبه عمق پوسته موثر رسید. در عمل برای تعیین عمق پوسته موثر یا عمق اکتشافی یعنی عمقی که می‌توان بررسی دقیق امواج برگشتی از زمین را انجام داد. برای تعیین این عمق از رابطه (۹) استفاده می‌شود (Chave, et.al, 2012).

$$Z_E = 100 \sqrt{\frac{\rho}{f}} (m) \quad (9)$$

پارامترهایی که حد توان تفکیک مکانی را در روش CSAMT مشخص می‌سازند، شامل مقاومت الکتریکی زمین، هندسه عوارض و نویز زمینه می‌باشند (مردانی و رضوی نژاد، ۱۳۹۰). از آنجایی که موج باید در درون سطح نفوذ کند و به هدف برخورد کرده و سپس به سطح زمین باز گردد تا در گیرنده دریافت شود؛ اگر این هدف در عمقی معادل نصف عمق پوسته در زیر سطح زمین قرار گرفته باشد؛ سیگنال دریافتی معادل موجی است که به اندازه یک عمق پوسته‌ای کامل سیر کرده باشد. بر این اساس، قاعده‌ای برای عمق نفوذ در زمین‌های هادی به صورت زیر مطرح می‌شود: "حداکثر عمق نفوذ میدان VLF برابر با نصف عمق پوسته" (Luo, 2016:76).

بر طبق تحقیقات جرجی و نیومن<sup>۱</sup> (Gregory, et.al, 2002) به صورت یک قاعده تجربی، توان تفکیک مکانی مرتبه‌ای از  $\frac{1}{f}$  به توان یک چهارم می‌باشد. بر طبق مطالعات کاترین و اندرسون<sup>۲</sup>

محاسبه می‌شود (Chave, et.al, 2012):

$$\rho = \frac{1}{\omega \mu_0} |Z|^2 = \frac{1}{\omega \mu_0} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad (5)$$

در معادلات بالا،  $\rho$  مقاومت ویژه بر حسب اهم-متر، E بزرگای میدان الکتریکی بر حسب V/m، H شدت میدان مغناطیسی (متعامد نسبت به میدان الکتریکی) بر حسب A/m و در آن  $\mu_0$  نفوذپذیری مغناطیسی فضای آزاد و  $\omega$  بسامد زاویه‌ای می‌باشد.

### ۳-۴- عمق قابل آشکارسازی و توان تفکیک مکانی

میدان الکتریکی افقی در سطح E می‌باشد. بنابراین انتشار میدان در زمین می‌تواند به شکل رابطه (۶) نوشته شود (Chave, et.al, 2012):

$$\vec{E} = \vec{E}_0 e^{-i\alpha z} e^{i\sqrt{\frac{\omega \mu_0 \sigma}{2}} z} e^{-\sqrt{\frac{\omega \mu_0 \sigma}{2}} z} \quad (6)$$

که در این فرمول Z،  $\omega$ ،  $\mu_0$ ،  $\sigma$ ، به ترتیب عمق، فرکانس زاویه‌ای، نفوذپذیری مغناطیسی و رسانایی می‌باشد. جایی که شدت میدان الکتریکی به  $\frac{1}{e}$  مقدار اولیه ( $E_0$ ) کاهش می‌یابد عمق پوسته نامیده می‌شود و عمق پوسته بر حسب فاصله به شکل رابطه (۷) نوشته می‌شود (Chave, et.al, 2012):

$$Z = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}} \approx 5.03 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (7)$$

رابطه (۷) نشان می‌دهد که عمق پوسته و یا میزان میرایی به دو پارامتر وابسته است: ۱- مقاومت ویژه محیط بر حسب اهم ( $\rho$ ) ۲- فرکانس موج بر حسب هرتز (f). عمق پوسته با کاهش مقاومت ویژه و با افزایش فرکانس کاهش می‌یابد. میزان رسانایی می‌تواند موج ورودی در داخل زمین، آب و یونسفر را کنترل کند.

فاکتورهای کنترل کننده عمق اکتشافی، شامل فرکانس سیگنال و مقاومت الکتریکی زمین می‌باشد. اما یکی دیگر از فاکتورهای محدود کننده حداکثر عمق اکتشافی، شدت سیگنال الکتریکی قابل دسترس است. شدت سیگنال با توان سوم فاصله بین فرستنده و گیرنده رابطه معکوس دارد. به

1- Gregory and Newman

2- Katherine and Anderson

سنجش از دور و اکتشافات زیرزمینی با شیوه CSAMT می‌باشند.

از آنجائی که منطقه تابناک شده یونسفری (توسط هارپ) مانند یک آنتن راداری امواج ELF و VLF عمل می‌کند؛ لذا بدیهی است که این پدیده می‌تواند به دو شیوه CSAMT در جهت سنجش از دور و شناسایی اهداف زیرسطحی مورد استفاده قرار گیرد.

#### ۴-۲- بررسی آزمایشات تجربی انجام گرفته در جهان

در حال حاضر استفاده از امواج ELF و VLF برای شناسایی اهداف مورد نظر از راه دور با تعدیل گرمایی یونسفر با چندین سیستم در مقیاس بزرگ امتحان شده است. در سال ۱۹۷۷ استاب و کوبکا<sup>۳</sup> (Stubbe, et.al, 1977) با یک گرم کننده فرکانس بالای قوی، رسانایی لایه D یونسفر در منطقه شفق قطبی و در نزدیکی الکتروجت‌های قطبی را تغییر داده و یک چشمه دوقطبی VLF در یونسفر تولید کردند. فرارو<sup>۴</sup> و همکاران در سال ۱۹۸۲ نتایج کار خود را در پنسیلوانیا<sup>۵</sup> با سیگنال ۲۰۷۳ هرتزی تولید شده توسط گرم کننده ترامسو<sup>۶</sup> در نروژ با فاصله تقریبی ۶۰۰۰ کیلومتر ارائه دادند. همچنین مور<sup>۷</sup> و همکاران در سال ۲۰۰۷ در کاگنا و آلاسکا امواج VLF را در موجبر یونسفر انتشار دادند و در جزایر مرجانی مدوی در ۴۴۰۰ کیلومتری با فرکانس ۲۱۲۵ هرتزی و توان ۴ تا ۳۲ وات شناسایی کردند. همانطور که گفته شد در شیوه CSAMT توان تفکیک مکانی، عمقی حدود ۵ تا ۲۰ درصد عمق اکتشافی و توان تفکیک مکانی عرضی حدود ۱۰ تا ۲۰۰ متر (در عمق حداکثر ۳ کیلومتری) می‌باشد. جدول ۲ و نگاره‌های ۶ و ۷ حداکثر عمق اکتشافی و توان تفکیک مکانی (با ضریب ۰/۲ برابر عمق اکتشافی) را برای آشکارسازی سازه‌های زیرزمینی در عمق‌های مختلف در زیرزمین (معمولی) نشان می‌دهند.

توان تفکیک مکانی عمقی حدود پنج درصد عمق مورد بررسی و توان تفکیک مکانی عرضی حدود ۱۰ تا ۲۰۰ متر (در عمق حداکثر ۳ کیلومتری) می‌باشد (Katherine, et.al, 2008).

#### ۴- بررسی و تحلیل داده‌های تحقیق

در این قسمت به بررسی و تحلیل قابلیت‌ها و تهدیدات سامانه‌های پر قدرت گرم کننده‌ی الکترومغناطیسی یونسفری (هارپ) در خصوص سنجش از دور و شناسایی اهداف زیر سطحی می‌پردازیم. این بررسی و تحلیل از دیدگاه مبانی علمی و تئوری، نتایج آزمایشات تجربی انجام گرفته، بررسی و تحلیل گزارشات رسمی و معتبر منتشر شده و نظر خبرگان و صاحب نظران جامعه نمونه آماری تحقیق، صورت می‌پذیرد.

#### ۴-۱- بررسی و تحلیل از دیدگاه مبانی علمی و تئوری

بر اساس مفاهیم تئوری فیزیکی، امواج رادیویی ELF و VLF گسیل شده از سوی منطقه گداخته شده یونسفر (توسط هارپ) در زیر زمین تا چندین کیلومتر نفوذ می‌کنند و پس از برخورد این امواج با اهداف واقع در زیر سطح، بازتاب آن‌ها توسط گیرنده‌های بسیار حساس دریایی، زمینی یا هوایی شناسایی و ثبت می‌شوند تا بر روی این داده‌ها، پردازش‌های مورد نیاز جهت آشکارسازی اهداف زیر سطحی صورت گیرد. پردازش‌های اصلی می‌تواند آشکارسازی ناهنجاری‌ها<sup>۱</sup> و تغییرات باشد (Cole, 2015:103).

با توجه به توضیحات ارائه شده در خصوص سامانه‌های پر قدرت گرم کننده‌ی الکترومغناطیسی یونسفری (هارپ)، می‌توان بیان داشت که به طور کلی، هارپ یک سنجش از دور و پرتونگاری زیرزمینی<sup>۲</sup> در سطح جهانی را فراهم می‌سازد و با توجه به عملکرد، هارپ کاملاً مشابه با شیوه CSAMT عمل می‌نماید (Annan, 2001).

به بیانی دیگر امواج یونسفری هارپ گزینه مناسبی برای

3- Stubbe and Kopka

4- Ferraro

5- Pennsylvania

6- Tromso

7- Moore

1- Anomaly detection

2- Earth-penetrating tomography



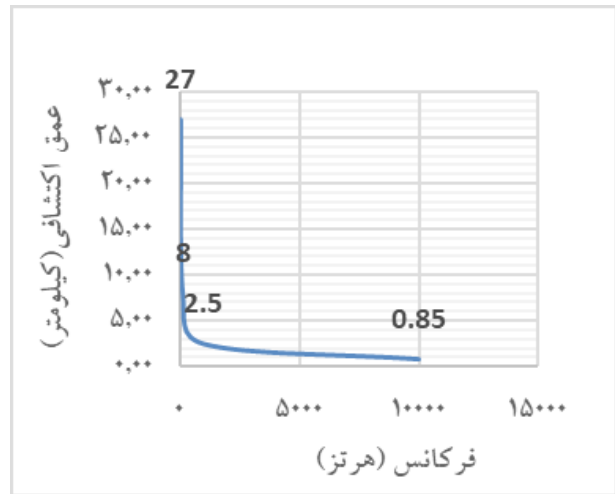
بنابراین با توجه به جدول ۲ و نگاره‌های ۶ و ۷ میتوان استنباط نمود که عمق اکتشافی در این شیوه بسیار بیشتر از روش GPR میباشد و با توجه به عمق زیر یک کیلومتری سازه‌های زیرزمینی متداول، احتمال آشکارسازی در این شیوه توسط هارپ، بالا است.

#### ۴-۳- بررسی و تحلیل گزارشات رسمی و معتبر

در سال ۱۹۹۶ سنای آمریکا مبلغ ۱۵ میلیون دلار را برای توسعه قابلیت سنجش از دور و شناسایی زیرسطحی هارپ تخصیص می‌دهد. این موضوع تأییدیه مهمی در خصوص تهدیدات و قابلیت‌های هارپ در خصوص مقاصد شناسایی زیرسطحی می‌باشد.

در گزارش سال ۱۹۹۵ با عنوان "یک راز در آلاسکا" (Farmer, 1995) نیز بیان شده است که امواج یونسفری هارپ می‌توانند تا چندین کیلومتر در زیر زمین نفوذ کنند و با استفاده از هواپیماها و ماهواره‌های شناسایی حامل تجهیزات اندازه‌گیری، شناسایی تأسیسات هسته‌ای کره شمالی و عراق صورت گیرد.

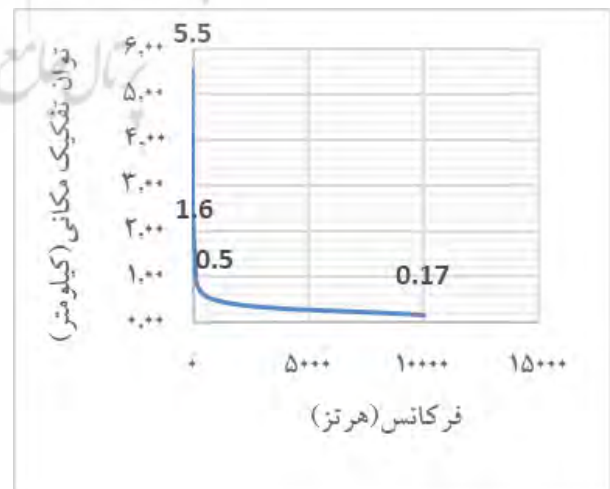
همچنین در یک گزارش منتشر شده در سال ۲۰۰۲ یک آزمایش موفقیت آمیز در سال ۱۹۹۹ مورد بررسی قرار می‌گیرد. در این آزمایش ۱۲ سایت از ایالت آلاسکا واقع در فواصل ۵۰، ۱۰۰، ۱۵۰ و ۲۰۰ کیلومتری از مقر اصلی هارپ مورد بررسی اکتشافی نفت و گاز در اعماق چند ده کیلومتری با استفاده از امواج یونسفری هارپ قرار گرفته است. طبیعی است که برای انرژی متصاعد شده از ناحیه گرم شده یونسفر در شرایط یکسان محیطی، شناسایی برای فواصل نزدیکتر، بهتر از فواصل دور انجام می‌گیرد (تضعیف با نسبت مجذور فاصله رابطه دارد). در این مورد اکتشافی از روش CSAMT و امواج با فرکانس ۴ هرتز تا ۴ کیلوهرتز استفاده شده است. بهترین نسبت سیگنال به نویز در فرکانس ۴ تا ۳۲ هرتز و ۱ تا ۴ کیلوهرتز بدست آمد (حداقل نیز در فرکانس‌های ۶۴ تا ۵۱۲ هرتز بدست آمد). این کار نشان داد که هارپ می‌تواند برای تعیین خواص مقاومت ویژه زمین نسبت به عمق در فواصل ۲۰۰ کیلومتری مورد استفاده



نگاره ۶: منحنی حداکثر عمق نفوذ اکتشافی نسبت به فرکانس

جدول ۲: توان تفکیک مکانی مورد نیاز برای آشکارسازی سازه‌های زیرزمینی در عمق‌های مختلف ( $\bar{n} = \Omega m 600$ )

توان تفکیک مکانی عرضی	عمق اکتشافی (کیلومتر)	فرکانس (هرتز)
۵/۵ کیلومتر	۲۷	۱۰
۱/۶ کیلومتر	۸	۱۰۰
۵۰۰ متر	۲/۵	۱۰۰۰
۱۷۰ متر	۰/۸۵	۱۰۰۰۰



نگاره ۷: منحنی توان تفکیک مکانی نسبت به فرکانس

اعلام آمادگی نمود. متعاقب این اعلام آمادگی و موافقت وزارتخانه، قرارداد منعقد و بر اساس آن مقرر گردید که در دو نقطه دلخواه که توسط وزارت خانه تعیین گردید؛ روس‌ها با استفاده از سامانه گرم کننده یونسفری ایجاد بارش نمایند. این اقدام توسط روس‌ها در این دو نقطه با موفقیت انجام گرفت؛ و وجود و توانمندی این پدیده اثبات گردید (مصاحبه با معاون وقت آب وزارت نیرو).

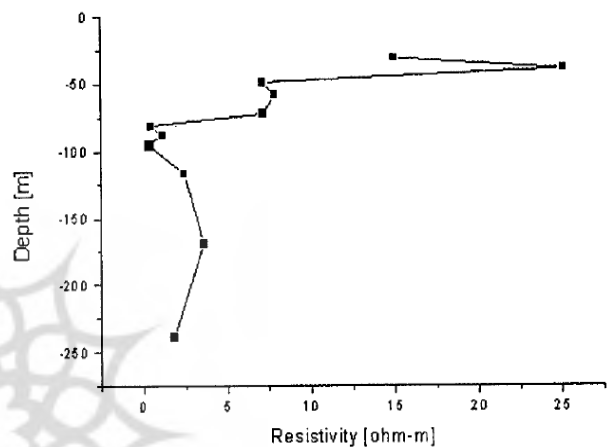
#### ۴-۵- نظر خبرگان و صاحب نظران

در این مرحله از تحقیق، با توجه به جمع بندی نتایج حاصل از مبانی علمی و تئوری، نتایج آزمایشات تجربی انجام گرفته در جهان و ایران، بررسی و تحلیل گزارشات رسمی و معتبر منتشر شده، این نتایج با استفاده از روش دلفی و همچنین مصاحبه، در معرض نظر ۳۲ نفر از خبرگان و صاحب نظران جامعه نمونه آماری تحقیق قرار گرفت و پس از چند مرحله اصلاح و اعمال نظرات، نهایتاً با نظر اکثریت خبرگان و صاحب نظران مذکور، نتایج نهایی به شرح زیر مورد تأیید قرار گرفت.

#### ۵- تجزیه و تحلیل نهایی داده‌ها

با توجه به جمع بندی نتایج حاصل از مبانی علمی و تئوری، نتایج آزمایشات تجربی انجام گرفته، بررسی و تحلیل گزارشات رسمی و معتبر منتشر شده و نظر نهایی خبرگان و صاحب نظران جامعه نمونه آماری تحقیق، می‌توان نتیجه گرفت که سامانه‌های پر قدرت گرم کننده‌ی الکترومغناطیسی یونسفری (هارپ)، می‌تواند سیگنال‌های ELF و VLF با رنج فرکانسی قابل تنظیم در یونسفر تولید کنند. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که امواج یونسفری سامانه‌های پر قدرت گرم کننده‌ی الکترومغناطیسی یونسفری (هارپ) می‌توانند تا چندین کیلومتر در زیر زمین نفوذ کرده و با استفاده از هواپیماها و ایستگاه‌های حامل تجهیزات اندازه‌گیری، شناسایی تأسیسات مورد نظر را انجام دهند. نتایج پژوهش بیانگر این است که استفاده از

قرار گیرد. نگاره (۸) نسبت مقاومت الکتریکی به عمق را برای یک منطقه واقع در ۷۶ کیلومتری از هارپ، نشان می‌دهد (Eugene, et.al, 2001). این تحقیق همچنین نشان داد که در حالی که مقاومت زمین ثابت است، اما مقاومت‌های اندازه‌گیری شده (در زمان‌های مختلف) احتمالاً به دلیل تغییرات در یونسفر یا جهت جریان الکتروجت ثابت نیست.



نگاره ۸: پروفیل مقاومت الکتریکی نسبت به عمق برای یک منطقه در ۷۶ کیلومتری از هارپ. (Paul, et.al, 2003)

#### ۴-۶- بررسی و تجزیه و تحلیل اقدامات و آزمایشات انجام گرفته در کشور

با توجه به گزارشات رسیده به وزارت نیرو در خصوص توانمندی و قابلیت سامانه‌های گرم کننده یونسفری در مورد مهندسی یونسفر و ایجاد تغییرات مصنوعی آب و هوا، یک گروه تخصصی در معاونت آب این وزارتخانه تشکیل و مطالعه و بررسی پیرامون این پدیده را شروع نمود. این گروه علاوه بر بررسی‌های علمی و گزارشات تأیید کننده و رد کننده پدیده مذکور، به این نتیجه رسید که با صاحبان این فناوری وارد مذاکره شود. در این راستا کشور روسیه انتخاب و مذاکرات فنی شروع گردید. نتیجه مذاکرات گروه تخصصی وزارتخانه را در خصوص قابلیت‌ها و توانمندی‌های این سامانه متقاعد ساخت؛ بطوری که در نهایت برای آزمایش توانمندی این پدیده در ایران، روسیه

#### ۷- نتیجه‌گیری

هدف اصلی این تحقیق تحلیل قابلیت سنجش از دور سامانه‌های پر قدرت گرم کننده‌ی الکترومغناطیسی یونسفری (هارپ)، در شناسایی اهداف زیرسطحی می‌باشد. سامانه هارپ از میدان‌های الکترومغناطیسی با سیگنال‌هایی در محدوده فرکانسی ۳ تا ۱۰ مگاهرتز استفاده می‌کند و می‌تواند مشابه روش‌های ژئوفیزیکی الکترومغناطیسی حوزه فرکانس عمل نماید. سامانه هارپ به عنوان یک گرم کننده یونسفری با تعدیل گرمایش یونسفر و با استفاده از الکترومغناطیسی‌های قطبی امواج با فرکانس مورد نظر را تولید نموده و از آن به عنوان یک چشمه تولید امواج برای سنجش از دور و شناسایی اهداف زیرسطحی استفاده می‌کند. به طور کلی، هارپ قابلیت یک سامانه سنجش از دور و پرتونگاری زیرسطحی در سطح جهانی را فراهم می‌سازد و گزینه مناسبی برای اکتشافات زیرزمینی با شیوه CSAMT می‌باشد. در این پژوهش با بهره‌گیری از روش ترکیبی تجزیه و تحلیل داده‌های چندگانه بر مبنای توصیف و تحلیل داده‌های جمع آوری شده از منابع علمی و تئوریک، گزارشات رسمی و معتبر، بررسی نتایج آزمایشات تجربی انجام گرفته و در نهایت اخذ نظر خبرگان و صاحب نظران جامعه آماری تحقیق به روش میدانی، به سؤال اصلی تحقیق پاسخ داده شده است. نتایج حاصل از این تحقیق نشان می‌دهد که سامانه‌های پر قدرت گرم کننده‌ی الکترومغناطیسی یونسفری (هارپ)، قابلیت سنجش از دور و امکان شناسایی اهداف زیرسطحی را دارند. بر این اساس، این سامانه‌ها تهدیدی جدی برای شناسایی اهداف زیر سطحی محسوب می‌شوند؛ و لذا در ادامه تحقیق، راهکارهای دفاع غیرعامل در برابر این تهدید نیز ارائه گردیده است.

همچنین نتایج تحقیق نشان داد که اگر تجهیزات مورد نظر مدفون در زمینی با رسانایی بالا قرار گرفته باشند؛ با امواج VLF هارپ، قابل سنجش از دور و شناسایی نیستند. اگر امواج مورد نظر سامانه هارپ از نوع امواج ELF مورد استفاده در شیوه‌ی CSAMT باشند؛ می‌توان جهت

الکترومغناطیسی‌های استوایی، احتمالاً موضوع پروژه‌های بعدی هارپ خواهد بود. همچنین نتایج تحقیق نشان می‌دهد که پروژه هارپ در حال توسعه بوده تا بتواند توان فرکانسی و همچنین آرایه‌های خود را تا چهار برابر تقویت کند و جریان الکترومغناطیسی قوی تر و متعاقب آن امواج VLF و ELF با شدت بیشتری را تولید کند. بنابراین سامانه‌ی هارپ امکان کاوش خود را با استفاده از امواج و توان قوی‌تر برای هدف‌های زمینی و مگنتوسفری توسعه خواهد داد.

#### ۶- راهکارهای دفاع غیرعامل

برای مخفی ماندن اهداف زیرسطحی از شناسایی توسط امواج الکترومغناطیسی هارپ، با توجه به رابطه ۶ می‌توان به این نتیجه رسید که با افزایش رسانایی (کاهش مقاومت ویژه زمین) از میزان عمق نفوذ امواج VLF در درون زمین کاسته می‌شود. یعنی اگر اهداف زیرسطحی در زمینی با رسانایی بالا قرار گرفته باشند، توسط امواج VLF که با رنج فرکانسی ۱۴ تا ۳۰ کیلوهرتز هستند قابل شناسایی نمی‌باشند. همچنین اگر امواج ساطع شده از سامانه هارپ از نوع امواج ELF مورد استفاده در شیوه‌ی CSAMT باشد (در محدوده فرکانسی ۱۰ هرتز تا ۱۰ هزار هرتز)؛ نیز می‌توان علاوه بر زمینی رسانا، به قرارگیری تجهیزات در اعماق بیشتر از ۱۵۰ متر متکی بود. به عنوان مثال در محیط‌های شور با رسانایی در حدود ۱۰۰ اهم متر و با موجی با فرکانس ۱۰۰۰ هرتز با توجه به فرمول مربوطه، عمق نفوذ از ۱۵۰ متر تجاوز نمی‌کند؛ که این رنج فرکانسی در محدوده امواج CSAMT می‌باشد.

از رابطه ۶ می‌توان متوجه شد که هر چه فرکانس کاهش پیدا کند، عمق نفوذ بیشتر می‌شود؛ ولی استفاده از امواج کم فرکانس نیز محدودیت دارد؛ زیرا قدرت سیگنال ارسالی با کاهش فرکانس کم می‌شود و نسبت سیگنال به نویز کم می‌گردد. همچنین می‌توان نویزهایی همچون خطوط انتقال نیروی برق قوی، سپرهای سیمی و لوله‌ها و یا رو لایه‌ای رسانا در منطقه ایجاد کرد تا امواج الکترومغناطیسی دچار اختلال شوند.

distance of 4400 km. JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH, VOL. 112, 2007.

13- Nabighian, M. N., (Ed). (1991). Electromagnetic methods in applied geophysics applications/ parts A and B, Society of Exploration Geophysicists.

14- Papadopoulos, D. (2005). Basic Ionospheric VLF/ELF Generation. PARS Summer School 2005.

15- Palatino, M., Inane, U. S., Bell, T. F., Pickett, J., Kennedy, E. J., Trotignon, J. G., Rauch, J. L., and Cantu, P. (2004). Cluster observations of ELF/VLF signals generated by modulated heating of the lower ionosphere with the HAARP HF transmitter.

16- Paul, A., and James, C. (2003). HAARP Diagnostic Instruments; High Frequency Active Aurora Research Program. Environmental Research Papers, No. 1249.

17- Resell, Ned, "Under new management, Alaska's HAARP facility open for business again". Alaska Dispatch News. Retrieved 10 September 2015.

18- Stubble, P. and Kopka, H. (1977). Modulation of the polar electro jet by powerful HF waves, J. Geophysics. Res., 82, 2319-2325.

19- Telford, W.M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. (1989). Applied geophysics, Cambridge University Press. New York.

20- Tikhonov A. N. (1950). On determining electrical characteristics of the deep layers of the Earth's crust. Doklady, 73, 281-285(8).

21- Unworthy, M. (2007). Magnetotelluric-field techniques.

22- Wright, J.L. (1988). "VLF interpretation Manual".

23- Zonge, K.L. Hughes, L.H. (1991). Controlled-source audio-frequency magnetotellurics. In: Nabighian, M.C. (ed.), Electromagnetic Methods in Applied Geophysics, Vol. 2: Applications, Part B. Tulsa: Society of Exploration Geophysicists, 713-809.

جلوگیری از آشکارسازی علاوه بر زمینی رسانا، سازه‌ها را در اعماقی بیشتر از ۱۵۰ متر مستقر نمود.

## ۸- منابع و مأخذ

۱- مردانی شهر بابک، رضوی نژاد؛ محمد، روح اله. (۱۳۹۰).

"سامانه‌های گرم کننده یونسفری (هارپ)", انتشارات واحد الکترونیک دانشگاه آزاد اسلامی، چاپ اول.

2- Annan, A.P. (2001). "Ground Penetrating Radar", Sensors & Software Inc.

3- Cagniard, L., (1953). Basic theory of the magnetotelluric method in geophysical prospecting. Geophysics, 8, 605-635.(7)

4- Cole, Dermot "HAARP closure postponed until 2015". Alaska Dispatch News. Retrieved 2015-06-03.

5- Chang, Z. Zhu, B. Ni, X. Cao, W. Luo, Resonant scattering of energetic electrons in the outer radiation belt by HAARP-induced ELF/VLF waves, Advances in Space Research, 2016

6- Chavez, A. D., Jones, A. G. (2012). The magnetotelluric method Theory and practice. Cambridge University Press.

7- Eugene, M., Westcott, D., Sentman, D. (2001). "Geophysical Electromagnetic Sounding Using HAARP", Final report, 2001.

8- Farmer, M. (1995). "Mystery in Alaska", Popular Science, Sept. 1995.

9- Gregory, A., Newman. (2002). High Frequency Electromagnetic Impedance Imaging for Vadose zone and Groundwater Characterization, Final report, Sandia National Laboratories.

10- Katherine, E., Anderson, Russell, D., Edge, Abigail, J., Hackston, Shoba Maraj, Michal, J., Romanowski, and Seamons, R.L. (2008). Controlled Source Audio Magneto-Telluric (CSAMT) Geophysical Investigation of The Middle San Pedro River Basin, Southeastern Arizona, and Geophysics Field Camp.

11- McCoy, Robert. Institute". American Geophysical Union Fall Meeting 2015. Retrieved 10 September 2015.

12- Moore, R.c., Inane, U. S., Bell, T. F., and Kennedy, E. J. (2007). ELF waves generated by modulated HF heating of the aurora electro jet and observed at a ground