نشریه علمی- پژوهشی مهندسی هوانوردی
سال بیست و چهارم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۱

مدلسازی اختلال بر موشک کروز با درنظرگرفتن اثر زمین مسطح و ارتفاع اخلالگر در جنگ الکترونیک

لاریسا کشیش[۱] ، مژده مهدوی *[۲]، احمد اسماعیلخواه [۳]
۱- گروه الکترونیک، واحد شهرقدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۲-گروه الکترونیک، واحد شهرقدس، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران
۳- گروه مهندسی برق، دانشگاه ارومیه، ایران
(دریافت مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۰۲ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۰/۰۲)

چکیده
سامانه‌های پرنده هوشمند از زیرساخت‌های ناوبری متعدد مانند GPS برای موقعیت‌یابی خود در حین پرواز، استفاده می‌کنند. سامانه GPS برخلاف سامانه ناوبری مبتنی بر اینرسی، یک سامانه مخابراتی است و همواره احتمال ایجاد اختلال عمدی امواج الکترومغناطیس و جنگ الکترونیک بر روی آن وجود دارد. امواج الکترومغناطیس در جنگ الکترونیک باعث می‌شود که ورودی گیرنده GPS که بر روی بستر پرنده قراردارد، اشباع شده و عمل تصحیح خطای ذاتی سامانه ناوبری مبتنی بر اینرسی صورت نپذیرد. درخصوص سامانه‌های پرنده خاص مانند موشک‌های کروز، انجام این عمل باعث افزایش میزان خطای ناوبری آنها شده که نهایتا می‌تواند منجر به عدم هدفگیری دقیق در فاز برخورد به هدف گردد. علی‌رغم کلیه کارهایی که در گذشته در خصوص موضوع اختلال بر سامانه‌های موقعیت‌یاب ماهواره‌ای انجام شده است، لیکن هیچکدام از آنها اثرات زمین را بر امواج الکترومغناطیس در عملیات جنگ الکترونیک به صورت ریاضی مدل نکرده‌اند. هدف اصلی این مقاله بررسی اثرات اجتناب‌ناپذیر سطح صاف زمین بر روی کارایی اخلالگر به‌کار رفته در عملیات جنگ الکترونیک است. به این منظور یک نرم‌افزار شبیه‌ساز برای تحلیل نتایج، پیاده‌سازی شده است که با اخذ پارامترهای اولیه در خصوص نقشه پروازی موشک، اقدام به محاسبه توان دریافت شده توسط آنتن GPS می‌کند و اثرات زمین و ارتفاع اخلالگر بر روی نحوه تابش الکترومغناطیسی آنتن اخلالگر را به‌صورت ریاضی مدل می‌نماید.

واژه‌های کلیدی: *موشک کروز، GPS ، اثر زمین مسطح، امواج الکترومغناطیس، جنگ الکترونیک.*

Modeling Jamming against Cruise Missile Considering Flat Earth Effect and Jammer Altitude in Electronic Warfare

Larisa Keshish, Mojdeh Mahdavi*, Ahmad Esmailkhah

Abstract
Guided flying objects use various positioning systems such as GPS for airborne navigation. Unlike inertial navigation systems, GPS is a satellite-based radio navigation system that can be intentionally jammed in electronic warfare (EW). Electromagnetic interference saturates the airborne GPS receiver so that the inherent error correction cannot be performed. In the case of guided weapons, such as cruise missiles, EW increases the navigation error, which can lead to inaccurate targeting in the final impact phase. None of previous studies on GPS jamming have mathematically modeled the effect of earth on electromagnetic waves during EW operations. The main purpose of this paper is to investigate the effect of earth flat surface on the jammer performance in EW. Accordingly, a computer software is implemented to calculate the power received by the GPS antenna using the initial input parameters of the missile flight profile. Moreover, this software mathematically models the effects of the earth and the jammer altitude on the radiation of the jammer antenna.

Key words: *Cruise Missile, GPS, Effects of earth smooth, Electromagnetic radiation, Electronic warfare*

* نویسنده مسئول: مژده مهدوی، پست الکترونیک: mahdavi.qodsiau@gmail.com

این مقاله تحت لیسانس آفرینندگی مردمی (Creative Commons License) در دسترس شما قرار گرفته است. برای جزئیات این لیسانس از آدرس https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode دیدن فرمایید.

مقدمه

از اوایل قرن بیستم، جنگ الکترونیک در منازعات عمده به صورت‌های گوناگون دیده شده است. درحقیقت از زمانی که ارتباطات رادیویی در جنگ، مورد استفاده قرار گرفت، جنگ الکترونیک نیز رواج چشمگیری پیدا کرد. تکنیک‌های اولیه به‌کارگیری امواج رادیویی، ابتدایی بود و به تدریج پیشرفت کرده و روز به روز هم بر تکامل آن افزوده شد [۱]. اختلال[1]، تأثیر ارتباط را از طریق کم‌کردن یا از بین‌بردن توانایی دشمن در ارسال اطلاعات در زمان‌های حساس کاهش می‌دهد و می‌تواند باعث سردرگمی دشمن در طول عملیات‌های پدافندی و عقب نشینی گردد. اخلالگر یا مسدودکننده سیگنال یک سامانه منتشرکننده فرکانس با مقاصد گوناگون است، این سامانه با ایجاد سیگنالی هم‌فرکانس با سیگنال هدف باعث اختلال در کار تجهیزات هدف می‌شود [۱]. بنابراین جنگ الکترونیک عبارت است از استفاده موثر از امواج الکترومغناطیس جهت نفوذ به حریم هوایی دشمن، مقابله کردن با اقدامات دشمن و بهره‌برداری از این امواج جهت تشخیص هدف. اخلالگر پدافندی، جهت مقابله با حملات موشکی بکار می‌رود. یکی از پارامترهایی که موشک‌های هدایت‌شونده برای اصابت به نقطه از پیش تعیین‌شده استفاده می‌کنند سامانه GPS می‌باشد. این سامانه ناوبری جهانی به موشک شلیک شده، اجازه می‌دهد که موقعیت جغرافیایی خود را تشخیص دهد و به کمک موتورها مسیر خود را اصلاح کند. سامانه پدافند پس از رهگیری این موشک می‌تواند در گام اول با مسدودکردن سیگنال GPS موشک را دچار سردرگمی کند و در گام بعدی نسبت به انهدام آن اقدام نماید [۱]. یکی از اولین تلاشها در ایالات متحده آمریکا صورت گرفت که طی آن سعی شد مقاومت یک گیرنده GPS در برابر اختلال سنجیده شود [۱]. طی این تحقیق مشخص گردید که براساس روش پیشنهادی می‌توان به سادگی کارکرد یک گیرنده GPS را در محیط آزمایشگاهی مختل نمود. پس از این موضوع، مقالات متعددی در خصوص خطر اختلال گیرنده‌های GPS منتشر شد که هرکدام به تکنیک‌های مختلفی در جنگ الکترونیک می‌پرداختند [۲-۳]. برخی از محققین به پژوهش اختلال برگیرنده‌های دریاپایه پرداختند و خطرات ناشی از آن را مورد بحث قرار دادند [۴]. از سوی دیگر خطای ذاتی سامانه INS[2] باعث شد که از گیرنده های GPS برای رفع آن استفاده شود [۵-۶]. موشک کروز نوعی هواگرد بی‌سرنشین هدایت‌شونده است که مسیر آن تا رسیدن به هدف قابل تغییر و هدایت است. موشک‌های کروز به‌دلیل به‌کارگیری سامانه‌های ناوبری و هدایت پیشرفته دقیق نظیر GPS، باعث شده تا نسبت به موشک‌های بالستیک دقت بیشتری را دارا بوده و به همین دلیل از توسعه و تولید بیشتری نیز برخوردار باشند [۷].

این موشک در عین داشتن تکنولوژی بالا، در مقابل انواع ضعیف‌تری از مبارزات الکترونیکی شکننده است. در جنگ الکترونیکی می‌توان با ارسال پالس‌های مخرب حاوی اطلاعات غلط، موشک را مورد هدف قرار داد که در این حال مسیر حرکت موشک تغییر می‌کند [۸-۱۰]. در سال ۲۰۰۵ میلادی اولین مقاله در خصوص بررسی اثر اختلال بر روی موشک کروز منتشر گردید که در آن انواع مختلفی از اختلال، شامل اختلال سدی و نقطه‌ای معرفی و بررسی شد[۱]. در سال ۲۰۱۸ میلادی اولین تحلیل مستقل سامانه در خصوص نحوه اثر اخلالگر GPS بر روی گیرنده نصب‌شده روی بستر پرنده منتشر گردید. بر اساس این تحقیق، میزان موفقیت عملیات جنگ الکترونیک بر علیه یک موشک کروز، وابسته به مشخصات پروازی موشک است، لیکن در آن پژوهش، اثرات بازتاب از سطح زمین صاف بر امواج الکترومغناطیس موجود در جنگ الکترونیک دیده نشده است [۱۱]. علی‌رغم کلیه کارهایی که در گذشته در خصوص موضوع اختلال بر سامانه‌های موقعیت‌یاب ماهواره‌ای انجام شده است، لیکن هیچکدام از آنها اثرات زمین را بر امواج الکترومغناطیس در عملیات جنگ الکترونیک به صورت ریاضی مدل نکرده‌اند.

تکمیل تئوری اختلال در جنگ الکترونیک، می‌تواند زیرساخت لازم برای تقویت توان دفاعی کشورمان در برابر تهدیدات احتمالی در حوزه جنگ الکترونیک را فراهم آورد. هدف اصلی کاستن از آسیب‌پذیری انسانی و تجهیزات حیاتی و حساس کشور است [۱۲]. باتوجه به اینکه هیچکدام از پژوهش های گذشته تاثیر محیط بر عملکرد لینک ارتباطی حامل سیگنالهای اختلال را برگیرنده موشک کروز بررسی نکرده‌اند، برای این‌منظور در این مقاله اثرات زمین بر روی نحوه تابش الکترومغناطیسی آنتن اخلالگر، مدل شده است. به این

[1] Jamming

[2] Inertial Navigation System

ترتیب علاوه بر تکمیل مدل‌های قبل، نرم افزار شبیه‌ساز نهایی دارای توانایی کامل‌تری برای تحلیل نقاط نصب اخلالگرها، خواهد بود.

علاوه براین، این مقاله دست‌آوردهای دیگری نیز از قبیل محاسبه نقشه پروازی در فضای سه بعدی دارد که نتایج آن به واقعیت نزدیکتر است.

در بخش بعدی این مقاله، ابتدا مدل ریاضی برای مشخصات پروازی حامل گیرنده GPS که می‌تواند یک موشک کروز باشد، طبق پیشینه تحقیق بیان می‌گردد، سپس به ارایه مدل ناوبری به کمک عوارض زمین می‌پردازیم و سپس مدل ریاضی، شبیه‌سازی شده و در نهایت نیز بحث و نتیجه‌گیری آمده است.

بررسی پیشینه و سوابق تحقیق

موشک‌های بالستیک پس از خروج از جو تا زمان ورود مجدد به جو زمین، دارای برنامه از پیش تعیین‌شده هستند و نمی توانند میسر خود را تغییر دهند، اما موشک های کروز نه تنها از جو خارج نمی‌شوند بلکه قادرند در کل مسیر دائما حرکت و خط سیر خود را تغییر دهند. این تغییر مسیر از سوی موشک‌های کروز توسط سامانه‌های ردیابی، موقعیت‌یاب و جهت‌یاب جغرافیایی انجام می‌شود. نکته مهم در مورد موشک کروز این است که این موشک به ساعت ها پرواز نیاز دارد. با این وضعیت با توجه به هدایت اینرسی اولیه این امکان وجود دارد که موشک صدها متر از مسیر اصلی منحرف شود زیرا اگرچه با هدایت از طریق این نوع اینرسی، امکان انحراف برای موشکی که ده‌ها دقیقه پرواز می‌کند کم است، اما برای موشکی که ساعت‌ها باید ادامه طریق دهد، مناسب نیست. برای رفع عیب باید نوعی تصحیح در مسیر انجام شود تا در عمل مکمل هدایت اصلی آن باشد [۱]. این موشک در عین داشتن تکنولوژی بالا، در مقابل انواع ضعیف تری از مبارزات الکترونیکی شکننده است. به معنای دیگر در جنگ الکترونیک، می‌توان با ارسال پالس‌های مخرب حاوی اطلاعات غلط (غیر حقیقی یا مجازی) آن را مورد هدف قرار داد، بدین صورت که بلندی‌ها را پست و پستی‌ها را ارتفاع نشان داد. در این حال مسیر حرکت موشک تغییر می کند، اما باز می توان فرکانس ارسالی ماهواره را برای موشک شناسایی کرد و به آن دستور اشتباه داد. موشک‌های کروز می‌توانند تا ۴۵۰ کیلوگرم مواد منفجره حمل کنند که این خود اهمیت موضوع اختلال در GPS هواپایه را بیشتر آشکار می‌کند [۲]. مسیر موشک کروز، مسیری است که در آن پرنده حداکثر زمان پروازش را با سرعت و ارتفاع ثابت حرکت کند. قابلیت پنهان کاری از انحنای زمین حاصل می شود، از آنجا که امواج الکترومغناطیس به طور مستقیم حرکت می کنند، انحنای زمین باعث می شود که پرنده در صورت پرواز در نزدیکی سطح زمین، خارج از ناحیه دید رادار قرارگیرد [۱۳-۱۵].

طبق بررسی‌هایی که در گذشته بر روی موشک کروز انجام شده است، میزان موفقیت عملیات جنگ الکترونیک بر علیه یک موشک کروز، وابسته به مشخصات پروازی موشک و همچنین ارتفاع اخلالگر است، همچنین عوامل موثر بر روی سناریوی جنگ الکترونیک براساس نقشه پرواز، زاویه دریافت سیگنال و الگوی تشعشعی آنتن دسته‌بندی شده است که در ادامه بصورت مختصر، به توضیح هرکدام از این عوامل پرداخته می‌شود [۱۱].

نقشه پروازی

با در نظرگرفتن این که بستر موشک‌های کروز، هدایت‌شونده و قابل برنامه‌ریزی هستند، سه نوع مسیر حرکتی برای انواع مختلف موشک‌های کروز در نظرگرفته‌شده است. در حالت زمین به دریا (یا دریا به دریا) موشک کروز در ابتدا اوج گرفته و از بالا بر سر هدف فرود می‌آید. بر خلاف این دسته از موشک‌ها، برخی دیگر از موشک‌های هوا به زمین (یا زمین به زمین) مستقیما" با کاهش ارتفاع و از پهلو به هدف خود اصابت می‌کنند. بنابراین نقشه پروازی موشک کروز برحسب نوع شلیک به سه دسته تقسیم می‌شود:

- شلیک مستقیم [۳](DH)
- شلیک از بالای سر[۴](OH)
- شلیک از بالای سر با افزایش ارتفاع و فرود ناگهانی بر هدف[۵](EOH)

در سناریو شلیک مستقیم، موشک اغلب با مسیر هواپایه راه‌اندازی می‌شود، مانند هواپیمای بمب افکن، و به مرور ارتفاع خود را کم می‌کند تا به هدف برخورد کند. از سوی دیگر در حالت شلیک از بالای سر و نوع پیشرفته آن، موشک در آخرین فاز و در آخرین کیلومترهای پروازی، مانورهای خود را آغاز می‌کند.

[3] Direct Hit attack
[4] Over-Head Hit attack
[5] Enhanced Over-Head Hit attack

رنج گسترده انتخابی برای گیرنده‌های GPS و تجهیزات جانبی و پیکربندی نصب آن‌ها، در کنار تکنیک‌های مختلف برای ایجاد اختلال بر GPS و پیکربندی اخلالگر اطراف زمین، باعث شده که مشکل مورد بررسی، همیشه در بدترین حالت، مدل‌سازی شود که در وضعیت‌های دیگر نیز قابل بررسی باشد.

در مدل‌سازی با استفاده از روش "بدترین شرایط[6]" ، تمامی پارامترهای کارآمد مرتبط با اخلالگر و گیرنده GPS اعم از قطبی شدن آنتن‌ها تا فرکانس رزونانس آن کاملا" سازگار هستند. در رابطه (۱) نوع نقشه پروازی براساس پارامترهای قابل تنظیم مشخص شده است:

$$\boldsymbol{h(x)} = \boldsymbol{Sin\left(e^{\frac{-C_{DF}}{C_{PP}}x}\right)\left(C_{MA}\left(1-e^{\frac{-x}{C_{PP}}}\right)\right)+C_{CA}\left(1-e^{\frac{-x}{C_{PP}}}\right)} \quad (۱)$$

C_{DF} [7] متغیر کنترل‌کننده شیرجه، C_{MA} [8]متغیر کنترل‌کننده حداکثر ارتفاع اوج‌گیری، C_{PP} [9]متغیر کنترل‌کننده محل اوج مسیر و C_{CA} متغیر کنترل‌کننده ارتفاع کروز است که موشک بیشتر مسیر را در آن ارتفاع طی می‌کند [۱۱].

زاویه دریافت سیگنال

بهره آنتن وابسته به زاویه‌ای است که توان از آن زاویه به آنتن تابیده شده است. اگر بخواهیم بدانیم که از اخلالگر چه مقدار توان به GPS موشک می‌رسد، باید زاویه AOA[10] را نسبت به خط عمود $\frac{\pi}{2}$ و$\frac{-\pi}{2}$ محاسبه نماییم. زاویه دریافتی سیگنال اخلالگر بر حسب درجه، به عنوان تابعی از فاصله بر حسب کیلومتر است.

معادله نهایی برای محاسبه AOA می‌تواند به صورت رابطه (۲) بیان شود [۱۱].

$$AOA=Q_6=\theta(x,h_jammer)=\pi/2-S(x)-H(x,h_jammer) \quad (۲)$$

که در این رابطه $S(X)$ از رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$S(x)=\left[-\frac{C_{DF}}{C_{PP}}e^{\frac{-C_{DF}}{C_{PP}}x}cos\left(e^{\frac{-C_{DF}}{C_{PP}}x}\right)\left(C_{MA}\left(1-e^{\frac{-x}{C_{PP}}}\right)\right)+\frac{C_{MA}}{C_{PP}}e^{\frac{-x}{C_{PP}}}sin\left(e^{\frac{-C_{DF}}{C_{PP}}x}\right)\right] \quad (۳)$$

و رابطه (۴) بیانگر مقدار H است.

$$H(x,h_{jammer})=tan^{-1}\left[\frac{sin\left(e^{\frac{-C_{DF}}{C_{PP}}x}\right)\left(C_{MA}\left(1-e^{\frac{-x}{C_{PP}}}\right)\right)}{x}+\frac{C_{CA}\left(1-e^{\frac{-x}{C_{PP}}}\right)}{x}\right] \quad (۴)$$

S در واقع شیب h(x) است ، و رابطه‌ای مستقل از ارتفاع اخلالگر است. اما در H فاصله LOS[11] همزمان به x و h_{jammer} وابسته است. فرض می‌کنیم محاسبات در صفحه دو بعدی xz صورت می‌گیرد و برای اخلالگر، ارتفاع و همچنین فاصله مشخصی داریم که به ترتیب با h_j و x_j نمایش داده می‌شوند.

الگوی تشعشعی آنتن

رابطه الگوی آنتن براساس محاسبات در رابطه (۵) مشخص شده است[۱۱].

$$g(\theta)=\frac{|SincC_{MLFZ}\theta|}{g_{max}}\left[C_{BLS}\left(e^{-|C_{ST}\theta-C_{SP}\pi|}+e^{-|C_{ST}\theta+C_{SP}\pi|}\right)+C_{MLS}e^{-|C_{ST}\theta|}\right] \quad (۵)$$

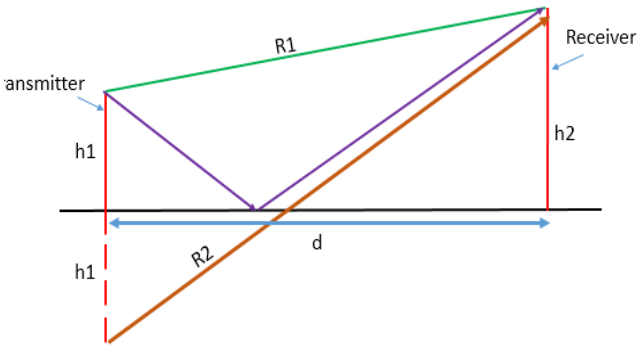
استفاده از اخلالگر GPS در ارتفاعات پایین برای شبیه‌سازی نقشه پروازی و الگوی انتشار گیرنده‌ی آنتن GPS موثر نبوده و اثر عملیات جنگ الکترونیک را به صورت چشمگیری تغییر خواهد داد.

بررسی اثر زمین مسطح بر جنگ الکترونیک

ناوبری به کمک پستی و بلندی‌های زمین، یک روش کمکی برای بالا بردن دقت سامانه‌های ناوبری هواپیماها، موشک‌ها، زیر دریایی‌ها و غیره می‌باشد. در این روش از تغییرات پستی و بلندی‌های زمین در طول مسیر حرکت، برای یافتن موقعیت دقیق استفاده می‌شود. استفاده از سامانه‌های مکان‌یابی بر مبنای پستی و بلندی، همواره به عنوان یکی از روش‌های کامل می‌تواند باعث افزایش دقت تعیین موقعیت سامانه INS گردد. در این روش ابتدا قبل از پرتاب پرنده، یک بانک اطلاعاتی از پستی و بلندی‌های مسیر حرکت آن در حافظه سامانه بارگذاری می‌شود و با تشخیص موقعیت دقیق سامانه پرنده در بانک اطلاعاتی، این موقعیت را برای بروزرسانی سامانه INS استفاده می‌کند [۱۶-۱۸].

[6] Worst Case
[7] Dive Factor
[8] Maximum Altitude Factor
[9] Peak position
10 Modeling the Angle of Arrival
[11] Line Of Sight

هدف از این مقاله، بررسی اثرات اجتناب ناپذیر زمین مسطح بر روی کارایی اخلالگر به کار رفته در عملیات جنگ الکترونیک است. مسیر، در دو حالت تابش مستقیم و تابش رفلکت شده از سطح زمین مورد بررسی می‌گیرد که در شکل ۱ و به ترتیب با $R1$ و $R2$ مشخص شده است.



شکل ۱ - مسیر انتشار موج

با توجه به شکل **۱** تابع موردنظر در پیاده‌سازی اثر زمین مسطح، در روابط (۶) آورده شده است.

$$k_0 = \omega = 2\pi f_{jammer} \quad (۶)$$

عدد موج در فضا $\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}$

$$F = 2\left|sin\, k_0 h_1\, tan\frac{h_2}{d}\right|$$

به این منظور نرم افزار شبیه سازی برای تحلیل نتایج پیاده سازی شده است که با اخذ پارامترهای اولیه در خصوص نقشه پروازی موشک، بهره‌های آنتن و ... اقدام به محاسبه توان نرمالیزه دریافت شده توسط آنتن GPS می‌کند. برای این کار سعی شده اثرات زمین مسطح بر روی نحوه تابش آنتن اخلالگر و امواج الکترومغناطیس موجود در جنگ مدل شود که یکی از اهداف اصلی این مقاله است، ابزار تجزیه و تحلیل داده‌ها با نرم‌افزارهای Matlab و Origin 2016 *pro* خواهد بود.

نتایج و بحث

مسیر حرکت کروز، مسیری است که در آن پرنده حداکثر زمان پروازش را با سرعت و ارتفاع ثابت حرکت می‌کند. قابلیت پنهان‌کاری از انحنای زمین حاصل می‌شود. از آنجا که امواج الکترومغناطیس به طور مستقیم حرکت می‌کنند، انحنای زمین باعث می‌شود که پرنده در صورت پرواز در نزدیکی سطح زمین، خارج ازناحیه دید رادار قرارگیرد. بنابراین موشک کروز از یکی از سه روش زیر برای نزدیک شدن به اهداف استفاده می‌کند:

تقرب خطی: در این روش موشک به صورت خطی به سمت هدف، ارتفاع کم می‌کند. کاهش ارتفاع در نقطه شیرجه شروع شده و به هدف ختم می‌شود. به دلیل آن که در مراحل پایانی مسیر، ارتفاع کم موشک ممکن است باعث برخورد آن به موانع موجود در مسیر شود، غیر از موشک کروز اولیه در انواع دیگر موشک ها از این روش استفاده نشده و سعی می شود که زاویه حمله تا حد ممکن افزایش داده شود.

تقرب نمایی بدون ارتفاع‌گیری در مرحله برخورد: در این روش موشک از نقطه شیرجه طی یک الگوی نمایی شروع به کاهش ارتفاع می‌کند. نرخ تغییر ارتفاع وابسته به پارامترهای متفاوتی از جمله سرعت موشک است.

تقرب نمایی با ارتفاع‌گیری در مرحله برخورد: در برخی از انواع موشک کروز مانند کروزهای دریایی شیرجه عملا" با کاهش ارتفاع همراه نیست، بلکه ابتدا موشک اوج گرفته و با زاویه حمله بسیار بالا در حدود ۷۵ درجه به هدف برخورد می‌کند. میزان افزایش ارتفاع تا ۵۰۰ متر نیز گزارش شده است [۲].

اثرات زمین بر روی نحوه تابش آنتن اخلالگر، همچنین توان دریافتی و احتمال بروز اختلال را بر حسب سه نقشه پروازی می‌توان مدل کرد که در ادامه به توضیح هریک از نقشه‌های پروازی خواهیم پرداخت. موشک کروز در حین پرواز قادر به تغییر ارتفاع و مسیر بوده و این عمل را می‌تواند بارها تکرار کند. انحنای زمین باعث می‌شود که پرنده در صورت پرواز در نزدیکی سطح زمین خارج از ناحیه دید رادار قرار گیرد و بنابراین فاصله کمی در حدود ۲۰۰ الی ۵۰۰ متر با زمین را انتخاب می‌کند. به همین ترتیب ارتفاع موشک کروز در این پژوهش، در همین محدوده انتخاب شده است. برای افزایش شدت سیگنال اخلالگر در اطراف هدف، اخلالگر GPS برای عملکرد مناسب عملا" در مجاورت اهداف مهم قرار می‌گیرد. همچنین در برابر فاصله بین محل شلیک شدن موشک و هدف ثابت، مسافت کوچکی که بین هدف و محل قرارگیری اخلالگر قرار دارد قابل صرف نظر کردن می‌باشد. در این جا به دلیل این سنجش، فرض شده است که اخلالگر دقیقا" در محل قرارگیری هدف قرار دارد، اما در ارتفاعی واقع شده که از ارتفاع هدف بالاتر است.

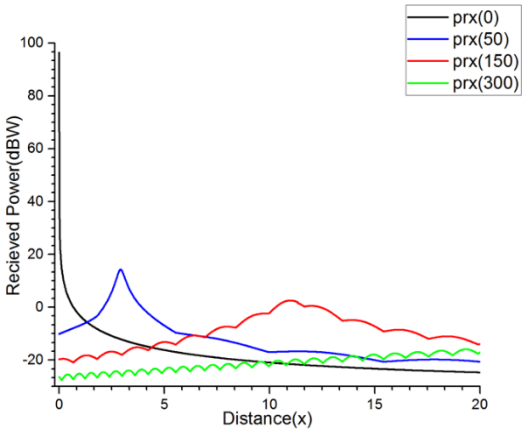
سناریوی برخورد مستقیم DH

برخورد مستقیم به عنوان آسان‌ترین روش حمله به اهداف ثابت، آسیب‌پذیرترین سناریو در محیط جنگ الکترونیک می‌باشد. نتایج نرم افزاری حاصل برای ۴ سناریو که در هر کدام اخلالگر در موقعیتی بالای سر هدف اما در ارتفاع‌های متعدد واقع شده، بدست آمده است.

نتایج حاصل از توان دریافتی از گیرنده GPS برای سناریوی اول که موقعیت اخلالگر دقیقا" روی هدف واقع شده است، در شکل **۲** مشخص شده است. همان طور که در شکل مشخص است اثرات زمین دیده نمی‌شود، وقوع اختلال نیز در این حالت احتمال بسیار کمی دارد زیرا سطح توان دریافتی بسیار پایین می‌باشد.

نتایج حاصل از سناریو دوم که موقعیت اخلالگر دقیقا" بالای سر هدف و در ارتفاع ۵۰ متری قرار گرفته است، نشان می‌دهد که سطح توان دریافتی نسبت به حالت قبل افزایش داشته است و احتمال بروز اختلال نیز در تقریبا" ۵ متری هدف بسیار زیاد است اما این فاصله، مناسب نمی‌باشد چون در این صورت موشک می‌بایست به ۵ متری هدف برسد تا اختلال روی آن رخ دهد که این موضوع از نظر امنیتی خطرات بسیاری به همراه دارد. نتایج حاصل از سناریو سوم که موقعیت اخلالگر دقیقا" بالای سر هدف و در ارتفاع ۱۵۰ متری قرار گرفته است نشان‌دهنده این است که هرچه اخلالگر در ارتفاع بالاتری نسبت به سطح زمین قرار گیرد اثر زمین در آن بیشتر شده و اختلال در فاصله دورتری نسبت به هدف قابل رخ دادن است. در این حالت اختلال در حدود ۱۰ متری از هدف به اوج خود رسیده و بیشترین سطح توان دریافتی را دارد.

نتایج حاصل از سناریو چهارم که موقعیت اخلالگر دقیقا" بالای سر هدف و در ارتفاع ۳۰۰ متری قرار گرفته است که در این حالت توان دریافتی بسیار بالا رفته یعنی هرچه اخلالگر در این نوع برخورد، در نقطه بالاتری باشد به GPS موشک نزدیکتر بوده و سطح توان دریافتی از آن بیشتر است و احتمال بروز اختلال و همچنین اثر زمین در آن نیز بیشتر قابل مشاهده می‌باشد. در این حالت که اخلالگر دقیقا" در بالای سر هدف قرار دارد و تنها ارتفاع قرارگیری اخلالگر تغییر کرده می‌توان گفت هر چه اخلالگر در ارتفاع بالاتری قرارگیرد نوسانات نمودار بیشتر شده است.



شکل ۲- مقایسه سطح توان دریافتی در سناریوهای مختلف در برخورد مستقیم

در این نوع برخورد، می‌توان مشاهده کرد هر چه اخلالگر به هدف نزدیک باشد اثر ناشی از زمین بر روی توان دریافتی توسط گیرنده GPS کمتر بوده و امکان اختلال هم وجود ندارد و لازم است تا موشک به هدف نزدیک شده و تقریبا در ۳ کیلومتری هدف قرار گیرد تا اختلال رخ دهد که در این حالت احتمال اصابت به هدف نیز بیشتر می‌باشد.

سناریو برخورد از بالای سر OH

ویژگی شیرجه سریع روی هدف، دلیل شکل‌گیری سناریو OH برای عملیات اختلال پیچیده است. موشک و گیرنده GPS در اطراف مسیر رسیدن به هدف، سطوح مختلفی از توان را از سمت منبع اخلال تجربه می‌کنند. در این حالت از نقشه پروازی نیز مجددا" سناریوهای قبلی، تعریف شده و نتایج نرم افزاری حاصل از آن در ادامه نمایش داده شده است.

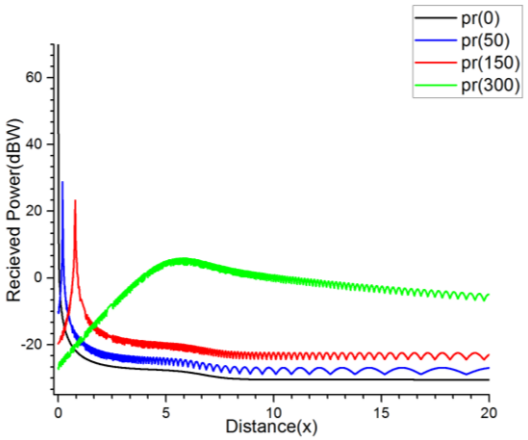
نتایج حاصل از سناریو اول که موقعیت اخلالگر دقیقا" روی هدف واقع شده است موید این مطلب است که در این حالت از نقشه پروازی نیز همانند حالت قبل، احتمال بروز اختلال بسیار کم بوده و اثر زمین در توان دریافتی قابل مشاهده نمی‌باشد.

نتایج حاصل از سناریو دوم که موقعیت اخلالگر دقیقا" بالای سر هدف و در ارتفاع ۵۰ متری قرار گرفته است بیانگر آن است که بر خلاف حالت قبل، احتمال بروز اختلال پایین می‌باشد اما اثرات زمین روی نمودار حاصل از توان دریافتی، قابل مشاهده است.

نتایج حاصل از سناریو سوم که موقعیت اخلالگر دقیقا" بالای سر هدف و در ارتفاع ۱۵۰ متری قرار گرفته است بیانگر آن است که در این حالت نیز احتمال بروز اختلال تنها در نزدیکی هدف وجود دارد و در بقیه نقاط هر چه از هدف دورتر می‌شویم سطح توان دریافتی بسیار پایین است.

نتایج حاصل از سناریو چهارم که موقعیت اخلالگر دقیقا" بالای سر هدف و در ارتفاع ۳۰۰ متری قرار گرفته است موید این مطلب است که زمانی که اخلالگر در این نوع شلیک در ارتفاع بالایی قرار دارد میزان سطح توان دریافتی نیز بالا رفته و احتمال وقوع اختلال در فاصله دورتر از هدف، به میزان قابل توجهی وجود دارد و اثر زمین نیز مشاهده می‌شود.

نتایج حاصل از این سناریو در شکل ۳ مشاهده می‌شود.



شکل ۳ – مقایسه سطح توان دریافتی در سناریو های مختلف در برخورد از بالای سر *OH*

سناریو برخورد از بالای سر پیشرفته EOH

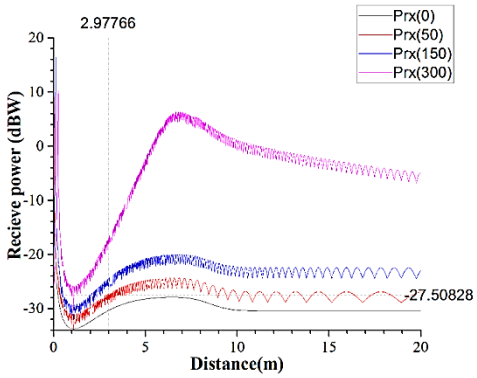
زمانی که موشک روی نقشه EOH پرواز می‌کند، سطح توان دریافتی برای اخلالگر زمین پایه و در ارتفاع پایین تقریبا" یکسان است و اثر زمین در آن ناچیز می‌باشد و در واقع اختلال رخ نداده یا به سختی و در نقاط کمی شاهد اختلال خواهیم بود. در این حالت از نقشه پروازی مجددا" سناریوهای قبلی تعریف شده و نتایج نرم‌افزاری حاصل از آن در ادامه در شکل ۴ نمایش داده شده است.

نتایج حاصل از سناریو اول که موقعیت اخلالگر دقیقا" روی هدف واقع شده است، شباهت چشمگیری با اولین سناریو از نقشه پروازی حالت قبلی دارد و احتمال بروز اختلال در آن بسیار پایین بوده و سطح توان دریافتی نیز پایین است، همچنین اثر زمین نیز در آن قابل ملاحظه نمی‌باشد.

نتایج حاصل از سناریو دوم که موقعیت اخلالگر دقیقا" بالای سر هدف و در ارتفاع ۵۰ متری قرار گرفته است بیانگر آنست که تقریبا"از ۳ متری هدف سطح توان دریافتی رو به افزایش بوده و احتمال بروز اختلال در این حالت وجود دارد.

نتایج حاصل از سناریو سوم که موقعیت اخلالگر دقیقا" بالای سر هدف و در ارتفاع ۱۵۰ متری قرار گرفته است که در این حالت، احتمال بروز اختلال از نزدیکی هدف وجود دارد.

نتایج حاصل از سناریو چهارم که موقعیت اخلالگر دقیقا" بالای سر هدف و در ارتفاع ۳۰۰ متری قرار گرفته است بیانگر آنست که در این حالت، سطح توان دریافتی افزایش چشمگیری داشته و از فاصله نزدیکی به هدف، احتمال اختلال به نهایت خود رسیده است. همچنین در این نوع شلیک، هر چه اخلالگر در ارتفاع فرضی بالاتری قرار می‌گیرد به دلیل نزدیکی بیشتر به GPS، سطح توان دریافتی در آن بالا رفته و اثرات زمین مسطح، در آن مشخص‌تر می‌باشد.

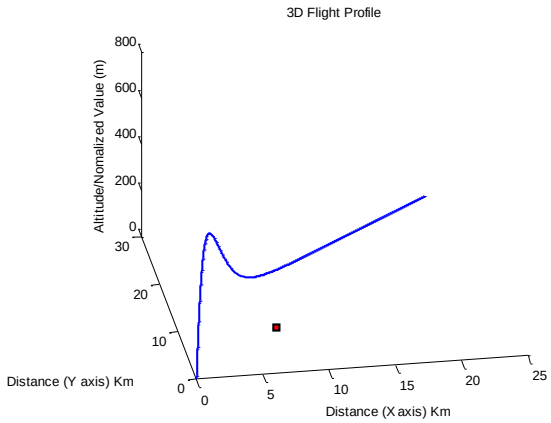


شکل ۴ – مقایسه سطح توان دریافتی در سناریو های مختلف در برخورد از بالای سر پیشرفته EOH

با نگاهی اجمالی به نمودار ۴ می‌توان دریافت که در سناریوی برخورد از بالای سر پیشرفته هرچه اخلالگر در ارتفاع بالاتری نصب شده باشد، سطح توان بیشتری دریافت کرده و در نتیجه احتمال اختلال بیشتر است.

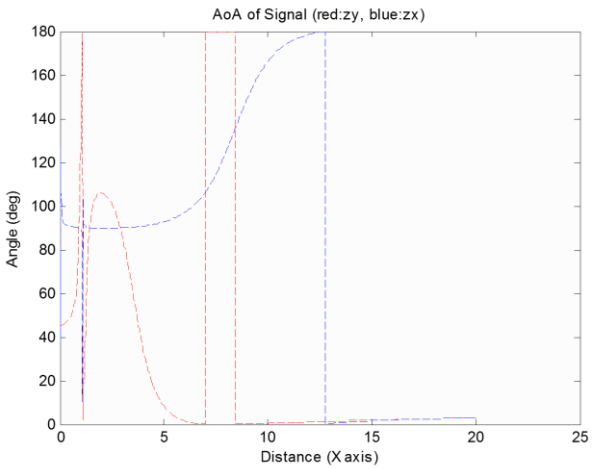
برای بررسی دقیقتر نتایج، محاسبات در فضای سه‌بعدی نیز به روش نرم افزاری و طی یک سناریوی مشخص، پیاده‌سازی شده است و نتایج آن برای سناریویی که در آن اخلالگر در ارتفاع ۵۰ متری از هدف و در موقعیتی به مختصات (۷،۷) واقع شده است، نمایش داده شده است. نقشه پرواز سه‌بعدی برای سناریوی تعریف شده، در شکل ۵ مشاهده می‌شود. در محاسبات سه‌بعدی باید در نظر داشته باشیم که

موشک دارای دو الگوی عمود بـرهم اسـت کـه در حـین پـرواز موشک، الگوی آن در صفحه zx با چرخش همراه بـوده و زاویـه آن تغییر می‌کند و این در حالی است که بـا نزدیـک شـدن بـه هدف، الگوی موشک در صـفحه zy تنهـا بـا افـزایش و کـاهش ارتفاع، همراه می‌باشد.



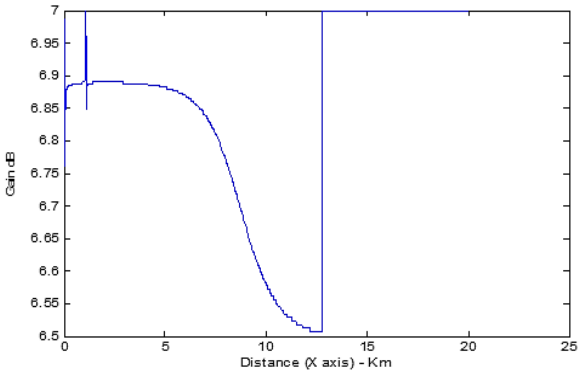
شکل ۵ – نقشه پروازی سه بعدی

زاویه ی دریافت سیگنال اخلالگر AoA در دو صفحه zx و yz به صورت شکل **۶** بدست آمده است .

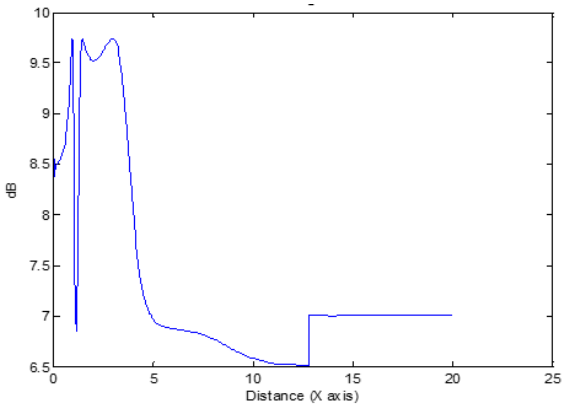


شکل ۶ – زاویه سیگنال دریافتی در حالت سه بعدی (صفحه zy به رنگ قرمز و صفحه zx به رنگ آبی)

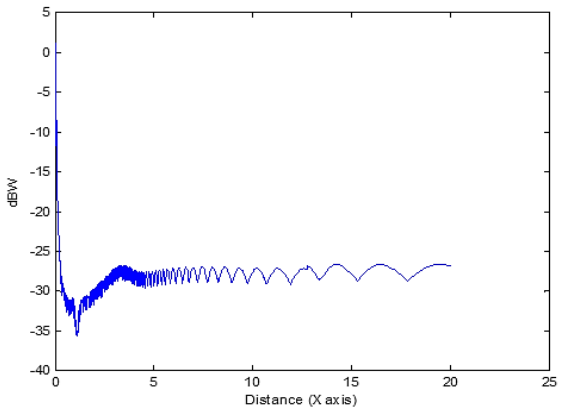
نتایج حاصل از زاویه AoA که بـر اسـاس بهـره دریـافتی الگوی تشعشعی آنتن، بهره مجمـوع و تـوان دریـافتی، نیـز بـه صورت شکل **۷** تا **۹** نمایش داده می‌شود.



شکل ۷ – بهره دریافتی الگوی تشعشعی آنتن

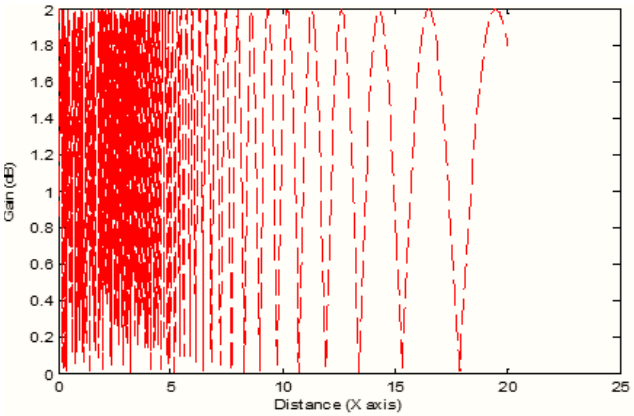


شکل ۸ – بهره مجموع



شکل ۹ – توان دریافتی مجموع

نتایج اثر زمین مسطح نیز به صورت شکل **۱۰** حاصل شده است. نتایج حاصل از تمامی نمودارهـا بیـانگر اثرگـذاری زمـین مسطح در امواج الکترومغناطیس موجـود در اخـتلال بـر GPS هواپایه دارد.



شکل ۱۰ - اثر زمین مسطح

برای هر سه سناریوی DH,OH و EOH در هر یک از ارتفاع‌های تعریف شده، تقریبا" در سه حالت اول به‌دلیل سطح توان بسیار پایین، شاهد هیچ اختلالی نبوده‌ایم. این درحالی است که در بقیه سناریوها توان افزایش یافته و اختلال رخ می‌دهد. در سناریو آخر که اخلالگر در ارتفاع ۳۰۰ متری از هدف قرار دارد، امکان اختلال وجود دارد و به دلیل نزدیکی به گیرنده آنتن GPS، توان دریافتی توسط آنتن به میزان قابل ملاحظه‌ای بالا رفته است، همچنین اثر زمین نیز به‌وضوح قابل مشاهده بوده و نوسانات بیشتری را در نمودار برای سناریوی چهارم شاهد هستیم.

می‌توان تصور کرد که چنین تخمینی در صورت پیاده‌سازی کاربردی در جنگ الکترونیک دارای اهمیت بسیار زیادی بر عملکرد طرفین درگیری خواهد داشت:

- طرفی که قصد دارد با استفاده از اخلالگر بر دقت هدفگیری سامانه پرنده اثر بگذارد، می‌تواند ارتفاع اخلاگر را بر اساس شرایط موجود در صحنه و مشخصات پروازی، به گونه‌ای انتخاب کند که حداکثر تاثیر را در اختلال داشته باشد.
- طرفی که استفاده کننده از سامانه پرنده است، می‌تواند بر اساس آرایش اخلالگرهای طرف مقابل، مشخصات پروازی مناسب را برای نزدیکی به هدف به نحوی انتخاب کند که عملیات جنگ الکترونیک دارای کمترین اثر ممکن باشد.

نتیجه گیری

در این پژوهش، مدلسازی اثر زمین مسطح بر گیرنده GPS نصب شده روی یک موشک کروز، در شرایطی انجام می‌شود که اخلالگر قابلیت تغییر ارتفاع را داشته باشد. از آنجا که امواج الکترومغناطیس به طور مستقیم حرکت می کنند، انحنای زمین باعث می شود که موشک کروز در صورت پرواز در نزدیکی سطح زمین، خارج از ناحیه دید رادار قرارگیرد. بنابراین سناریوهای فرض شده، بیانگر حالتهای اصلی پرواز موشک کروز بوده و اثرات زمین مسطح در امواج الکترومفناطیس اخلالگر برای ارتفاعات پایین و بالا در این سه سناریو بررسی شده است. نتایج حاصل از توان دریافتی از گیرنده GPS برای سناریوهای مختلف، بیانگر اثرات مختلف زمین مسطح و ارتفاع اخلالگر برحسب مشخصات پرواز موشک کروز می‌باشد. بنابراین در جنگ الکترونیک با انتخاب ارتفاع مناسب اخلالگر می‌توان حداکثر اختلال را علیه موشک کروز بکار بست و صحنه نبرد را بنفع خود تغییر داد.

مراجع

[۱]. کریمی، محمد. «تکنیک های مخابراتی اقدامات ضد ضد الکترونیک»، *معاونت فاوا ارتش جمهوری اسلامی ایران*، ۱۳۹۶.

[۲]. طلعتی، سعید؛ اصلی‌نژاد، مهدی؛ و سمواتی، علیرضا «اصول جنگ الکترونیک»، *انتشارات پشتیبان*، ۱۳۹۶.

[۳]. کلهر، احمد؛ و دهقان، سید محمد مهدی، «استفاده از فیلتر فعال جرم-نقطه برای تطبیق تصاویر راداری با نقشه عوارض زمین»، *فصلنامه دانش و فناوری هوافضا*، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۱۳۹۱.

[4]. H. Moga, M. Boscoianu, Delia Ungureanu, F. Sandu and R. Boboc, "Refined concepts of Massive and Flexible Cyber-attacks with information warfare strategies", *Journal of Communication*, vol.12, no.6, pp. 364-370, 2017.

[5]. B. Ozkan, M. Ozgoren and G. Mahmutyazicioglu, "Modeling of dynamics, guidance, and control systems of air-to-surface missiles", *The Journal of Defense Modeling and Simulation: Applications, Methodology, Technology*, vol. 9, no.2, pp.101-112, 2011.

[6]. A. Vadlamani and M. Haag, "Terrain elevation data integrity monitor and referenced navigation", *Journal of*

Aerospace Information Systems, vol. 5, no.4, pp.1-21, 2008.

[7]. R. Poisel, "Information warfare and electronic warfare systems", *Journal of Information Warfare*, vol. 1, no.1, pp.11-22, 2013.

[8]. Z. M. Ponos and M. L. Dukic, "Pulse jamming of GPS receiver", *4th International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services. TELSIKS'99 (Cat. No.99EX365)*, pp. 415-418, vol. 2, 1999 doi: 10.1109/TELSKS.1999.806243.

[9]. A. Grant, N. Ward, "GPS jamming and the impact on maritime navigation", *Journal of Navigation*, vol. 62, no. 2, pp.1-15, 2009 .

[10]. D. Chung, J. Gyu Lee, C. Gook Park and H. Won Park, "Strapdown INS error model for multiposition alignment", in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 32, no. 4, pp. 1362-1366, 1996.

[11]. A. Esmailkhah and N. Lavasani, "Jamming efficacy of variable altitude GPS jammer against airborne GPS receiver, theoretical study and parametric simulation", *Journal of Advanced Electromagnetic*, vol. 7, no.1, pp. 57-64, 2018.

[12]. R. Gaffarpour and S. Zamanian, "Implementation of an optimized earthing system to minimize step and touch voltage of telecommunication sites in rocky and high-altitude environments (Case Study: Bamo Site)", *Journal of Applied Electromagnetics*, vol. 8, no.2, pp.107-117, 2021. (In Persian)

[13]. Y. Yang et al., "Consensus-based distributed target tracking in the presence of active false targets", *"2021 IEEE 2nd International Conference on Big Data, Artificial Intelligence and Internet of Things Engineering (ICBAIE)*: pp. 753-757, 2021.

[14]. A. Yildirim and S. Kiranyaz. "1D convolutional neural networks versus automatic classifiers for known LPI radar signals under white gaussian noise", *IEEE Access*, vol. 8, pp. 534-543, 2020.

[15]. W. Chuanzhang and B. Chen, "A recognition algorithm of VGPO jamming based on discrete chirp-Fourier transform", *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, pp.1-18. 2020.

[16]. S. Park, I. Nam and S. Noh, "Modeling and simulation for the investigation of radar responses to electronic attacks in electronic warfare environments", *Security and Communication Networks*, vol. 1, PP. 1-13, 2018.

[17]. S. Vardhan and A. Garg, "Information jamming in Electronic warfare: operational requirements and techniques", *International Conference on Electronics, Communication and Computational Engineering (ICECCE)*, pp. 49-54, 2014.

[18]. S. Choie and J. Kwon, "Method for effectiveness assessment of electronic warfare systems in cyberspace", *Agency for Defense Development (ADD)*, vol. 12, pp. 49-54, 2020.