

## بررسی اثرات انواع دود<sup>۱</sup> بر امواج راداری

بابک عباسیان<sup>۲</sup>، سید یاسر موسوی<sup>۳</sup>، زرغام رستمی<sup>۴</sup>

تاریخ دریافت: ۹۲/۰۲/۳۰

تاریخ پذیرش: ۹۲/۰۳/۲۰

### چکیده

در این مقاله سعی شده تا با بررسی و مطالعه برخی انواع دود، اثرات آنها را بر امواج راداری از طیف الکترومغناطیس مورد بررسی و آزمایش قرار دهیم. با توجه به استفاده از امواج الکترومغناطیسی در حسگرها و شناساگرهای موجود در جهان، لزوم دفاع غیرعامل و به عبارتی استتار در مقابل چنین تجهیزاتی بیش از پیش احساس می‌شود. استفاده از دود نیز یکی از روش‌ها می‌باشد، لذا جهت انجام استتار، نیازمند شبیه‌سازی یک محیط آزمایشگاهی بوده که میزان استتار دود در مقابل امواج راداری را به شرایط میدانی و عملیاتی نزدیک‌تر نماید. در این مقاله، بررسی قدرت استتارکنندگی چند ماده در مقابل باند X راداری انجام گرفته و در نهایت با بررسی میزان ضریب انعکاسی آنها، الیاف کربن به‌عنوان ماده‌ای که توانست کاهش به میزان ۶ dB را در ضریب انعکاسی ایجاد نماید و به این دلیل می‌تواند به‌عنوان ماده‌ای استتار کننده در برابر امواج راداری مورد استفاده قرار گیرد.

**کلیدواژه‌ها:** طیف الکترومغناطیسی، دود، استتار در برابر امواج راداری، دفاع غیرعامل

۱- منظور از دود، پراکنده نمودن مواد جامد سیاه رنگ در هوا می‌باشد که به‌صورت دود دیده می‌شود.

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد پدافند غیرعامل دانشگاه جامع امام حسین(ع) - b.abasian59@yahoo.com - نویسنده مسئول

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد پدافند غیرعامل دانشگاه جامع امام حسین(ع)

۴- استادیار و عضو هیئت علمی دانشگاه جامع امام حسین(ع)

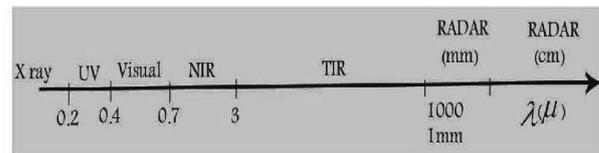
## ۱- مقدمه

با توجه به پیشرفت علم و فناوری و به تبع آن، تغییر ماهیت و پیچیده تر شدن جنگ‌ها و استفاده از سلاح‌های هوشمند، دفاع نیز ماهیتی پیشرفته به خود گرفته است. استفاده از جنگنده‌های مجهز به انواع حسگرهای الکترومغناطیس، موشک‌های هوشمند راداری و حرارتی و همچنین ماهواره‌های جاسوسی و شناسایی مجهز به حسگرهای چندطیفی و فراطیفی، اهمیت بیش از پیش دفاع و به عبارتی دفاع غیرعامل را مشهودتر نموده است [۱].

طرح‌ها و روش‌های متنوعی اعم از تجهیزات مؤثر مانند تورها و پوشش‌های استتار چندطیفی، الیاف کربن، مواد جاذب هوشمند، کنترل تشعشعات راداری، کوچک کردن سطح مقطع راداری (RCS)<sup>۱</sup>، طراحی خاص بدنه تجهیزات، بهره برداری از رنگ‌ها و مواد جاذب راداری و حرارتی، استفاده از چف، فلیر، پرده دود و بخار آب غلیظ، و جلوگیری از هرگونه نشت امواج الکترومغناطیسی، در این ارتباط وجود دارد [۱].

۱-۱- طیف الکترومغناطیس<sup>۲</sup>

تمام اشیا با دمای بالاتر از صفر مطلق (0 K) دارند از خود انرژی الکترومغناطیس ساطع می‌کنند که در طول موج‌های مختلف، مقدار آن متفاوت است [۲]. به بازه‌های امواج الکترومغناطیس بر حسب طول موج یا فرکانس، طیف الکترومغناطیس اطلاق می‌گردد [۳].



شکل ۱- طیف الکترومغناطیسی

## ۲-۱- محدوده رادیویی و مایکروویو

این محدوده از طیف الکترومغناطیسی عمدتاً جهت مخابرات و پخش رادیویی و تلویزیونی مورد استفاده قرار می‌گیرد. بخش مهمی از این محدوده که در سنجش از دور بسیار حائز اهمیت است، مایکروویو (ریزموج) می‌باشد که دارای طول موج‌های یک میلیمتر تا یک متر (فرکانس ۰/۳ تا ۳۰۰ گیگاهرتز) است. (البته بر اساس استاندارد IEEE<sup>۳</sup> محدوده مایکروویو طول موج‌های بین یک میلیمتر تا ۳۰ سانتی‌متر را دربر می‌گیرد.) [۳].

## ۳-۱- تعامل انرژی الکترومغناطیس با اشیاء

هنگامی که انرژی الکترومغناطیسی با اشیاء یا عوارض برخورد می‌نماید، دستخوش سه تغییر می‌شود: بازتاب (انعکاس)، انتقال (عبور) و جذب. نسبت‌های این سه نوع انرژی حاصله بستگی به ماهیت سطح اشیاء، طول موج نور تابیده شده و زاویه تابش دارد [۳].

## ۴-۱- تعامل انرژی با سطح اشیاء و زمین در محدوده

## مایکروویو [۳]

در محدوده فرکانس رادیویی، شدت برگشت امواج ارسال شده به سمت اشیاء و پدیده‌ها اندازه‌گیری می‌شود: و بررسی هندسی بازپراکنش<sup>۴</sup> امواج الکترومغناطیس برخورد یافته با سطح اشیاء دارای اهمیت زیادی است و درجه بازپراکنش به وسیله ضریب بازپراکنش راداری ماده سطحی که به RCS معروف است، مشخص می‌گردد [۳].

## ۲- دود و تیره‌کننده‌ها

معمولاً به ذرات بسیار ریز جامد که در محیط پخش شده باشد، دود گفته می‌شود. ابعاد ذرات دود در کاربردهای مختلف به طور معمول از یک میکرومتر تا ۱۵ میکرومتر تغییر می‌کند. ذرات دود، سرعت سقوط بسیار کمی داشته و در هنگام حرکت در هوا، بار الکتریکی را جذب می‌کنند. دود در محیطی که تولید شده است باقی می‌ماند مگر در صورتی که باد یا اثرات حرارتی وجود داشته باشد. در عملیات نظامی، رفتار استتاری دود مورد توجه خاص می‌باشد. تیره‌کننده‌ها ذرات معلق موجود در هوا هستند که بخش یا بخش‌هایی از طیف الکترومغناطیس را مسدود کرده و یا تقلیل می‌دهند [۱۰].

انتخاب دودهای مناسب برای نواحی مختلف طیفی بر اساس پارامترهای عدم سمیت، قدرت پوشاندگی، قیمت و... انجام می‌گیرد. انواع دودهای استتار بر اساس کاربرد در مقابل حسگرهای نواحی مختلف طیف الکترومغناطیس عبارت‌اند از: [۶].

- مؤثر در مقابل حسگرهای مرئی (۰/۴ - ۰/۷۵ میکرومتر)

- مؤثر در مقابل حسگرهای فروسرخ شامل نواحی:

الف) NIR = (۲/۵ - ۰/۷۵ میکرومتر) با طول موج کم یا فروسرخ

نزدیک

ب) MIR = (۱۵ - ۲/۵ میکرومتر) دو پنجره ترمال ۱۲ - ۸ و ۵ -

۳ میکرومتر با طول موج متوسط

ج) FIR = (۱۰۰۰ - ۱۵ میکرومتر) با طول موج بالا یا فروسرخ

دور

- مؤثر در مقابل حسگرهای رادار MMW (۱۰۰ - ۱۱۰۰) میکرومتر

- مؤثر در مقابل حسگرهای لیزر (نواحی‌ای از طیف مرئی و

فروسرخ)

الف) ماده نسبتاً ارزان در ناحیه رادار برای پخش در مقیاس وسیع و پیوسته می‌باشد.

ب) غیرسمی بودن

ج) قابلیت پخش از طریق سیستم‌های موتوریزه

د) قابلیت استفاده در حالت آفندی و پدافندی

### ۳- رادار

رادار (Radar) مخفف Radio Detection And Ranging می‌باشد و وسیله‌ای است برای جمع‌آوری اطلاعات از اشیاء یا اهداف به‌ویژه در فواصل دور که در آن تجزیه و تحلیل امواج الکترومغناطیس برگشتی، فاصله، سرعت و بسپاری از خواص هدف مورد نظر تعیین می‌شود. به‌طور کلی رادار شامل یک فرستنده و یک گیرنده و یک یا چند آنتن است. فرستنده قادر است که توان زیادی را توسط آنتن ارسال کرده و گیرنده تا حد امکان، انرژی برگشتی از هدف را جمع‌آوری می‌کند [۴].

از مزایای رادار، می‌توان به عملکرد رادار در شب یا روز و همچنین قابلیت تصویربرداری در شرایط آب و هوایی مختلف اشاره کرد. امواج مایکروویو قادر به نفوذ در ابر، مه، گرد و غبار و باران می‌باشند [۷].

### ۳-۱- معادله کلاسیک رادار [۵]

معادله کلاسیک رادار، روابط بین توان آنتن، طول موج، برد و سطح مقطع راداری را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه در معادله (۱) تنها می‌توانیم بر روی متغیر  $\sigma$  مؤثر باشیم و سایر متغیرها در دست اپراتور رادار است، در نتیجه، دیگر متغیرها با ثابتی مانند  $K$  نشان داده شده‌اند تا روابط ساده‌تر شود.

طبق معادله کلاسیک رادار، تنها عاملی که در این رابطه می‌توان در آن تغییری ایجاد نمود،  $\sigma$  است، یک ماده جاذب طبق معادلات کلاسیک رادار می‌تواند با تاثیر بر روی سطح مقطع راداری ( $\sigma$ ) و اتلاف امواج، سطح مقطع راداری ( $\sigma$ ) را کاهش دهد.

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad \text{معادله (۱)}$$

$$P^4 = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 p_r} \quad \text{معادله (۲)}$$

$$R \propto K \sqrt[4]{\sigma} \quad \text{معادله (۳)}$$

که در این معادلات:

$P_r$  مقدار توان انعکاسی

$P_t$  مقدار توان انتقال

### ۲-۱- مواد دودزای مؤثر در مقابل حسگرهای رادار

تاریخچه استفاده از موادی برای گمراه کردن یا استتار از دید رادار حداکثر به حدود ۶۰ سال پیش برمی‌گردد. اولین بار در جنگ جهانی دوم، نیروهای متفقین برای گمراه کردن رادارهای دشمن تعداد زیادی نوارهای فلزی (که تحت عنوان Chaff شناخته می‌شد و اهداف کاذبی را می‌ساخت) در فضا پخش می‌کردند. به‌مرور و با پیشرفت فناوری و با توجه به طول موج‌های استفاده شده در رادارهای نظامی، ابعاد ذرات چف تغییر کرد و با توجه به کوچک شدن آنها، از این ذرات علاوه‌بر عملیات گمراه کردن در عملیات استتاری نیز استفاده می‌شد. بدین ترتیب که با افزودن این ذرات به مواد دودزای پیروتکنیک، ابر (دود) استتاری ساخته می‌شد که جهت استتار و کور کردن رادارهای دشمن به کار می‌رفت [۱۱].

### ۲-۲- پیشینه تحقیق در به‌کارگیری دودهای استتاری در مقابل رادار

با بررسی مراجع مختلف، ترکیبات مختلفی از دود یافت شد که بعضی در محدوده دید و IR عمل می‌کنند ولی با افزودن موادی می‌توان از آنها برای مقاصد استتاری در برابر رادار نیز استفاده نمود. در آزمایشی برای جذب یا تفرق امواج رادار، از فیبرهای بسیار نازک از گرافیت استفاده شده است. [۱۲].

در آزمایش دیگری از پرکلرات آمونیم، کلرید آمونیم، پودرهای آلومینیوم، منگنز و مس برای محدوده فروسرخ استفاده شده است. اگر به این ترکیب، فیبرهای شیشه (Glass Fiber) به طول ۲-۳۰ mm افزوده شود این دود در محدوده رادار عمل می‌کند [۱۳].

در جای دیگر، یک ترکیب دود پیروتکنیکی ارائه شده که برای مقاصد استتاری مورد استفاده می‌باشد. دود تولیدشده در محدوده دید مرئی، IR و رادارهای موج میلیمتری (۳۰ تا ۱ میلیمتر) عمل می‌کند. برای عمل در محدوده رادار به ترکیب دود، فیبرهای گرافیت افزوده شده است که این فیبرها قابلیت انبساط حرارتی دارند. فیبرهای منبسط‌شده همراه محصولات احتراق، آزاد شده و دودی را تولید می‌کنند که برای مقاصد استتاری در محدوده‌های فوق‌الذکر مورد استفاده قرار می‌گیرند [۱۴].

در مجموع، ترکیباتی که در ناحیه رادار مورد استفاده قرار می‌گیرند را می‌توان به ۴ دسته عمده زیر تقسیم نمود [۱۵]:

- الیاف میکرونی گرافیت

- الیاف میکرونی پلیمری بخصوص

- الیاف میکرونی شیشه و نایلون پوشش‌شده با نیکل و آلومینیوم

- الیاف میکرونی فلزات مانند آهن

از بین موادی که در ناحیه رادار مورد استفاده قرار می‌گیرند، به دلایل زیر الیاف گرافیت بهترین انتخاب می‌باشد.

G تقویت آنتن

$\lambda$  طول موج

$\sigma$  سطح مقطع راداری

و R میزان فاصله آنتن از هدف می‌باشد.

### ۳-۳- فاصله‌یابی

فاصله‌یابی به‌وسیله اندازه‌گیری تأخیر زمانی بین سیگنال ارسالی از رادار و سیگنال دریافتی از اهداف انجام می‌شود که در شکل (۳) نشان داده شده است [۵].

به‌طور نرمال، زمان از مرکز پالس ارسالی تا مرکز پالس دریافتی از هدف و همچنین، گاهی از لبه جلویی سیگنال ارسالی تا لبه جلویی سیگنال اکوی دریافتی از هدف اندازه‌گیری می‌شود.

$$R = \frac{CT_p}{2} \quad \text{(متر)} \quad \text{معادله (۴)}$$

که در آن:

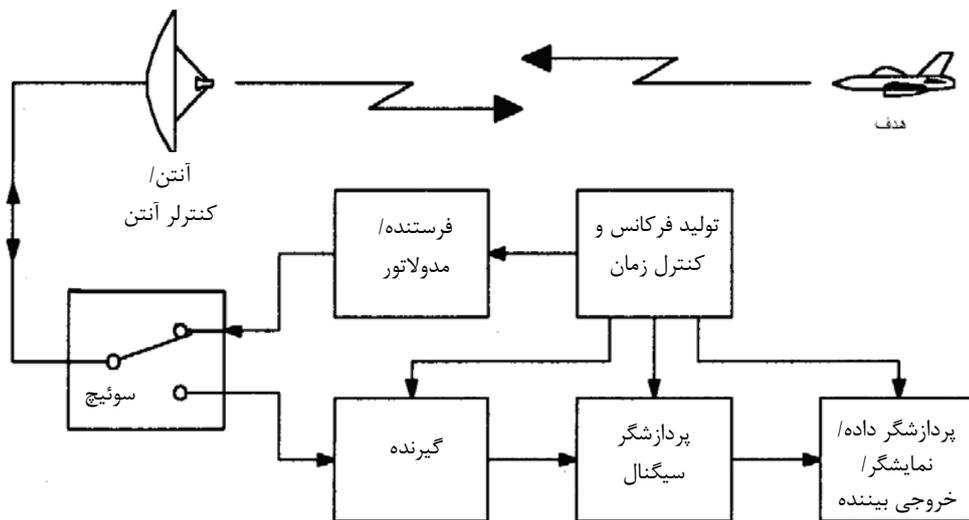
R، فاصله هدف (متر)

$T_p$ ، زمان ارسال و دریافت (ثانیه)

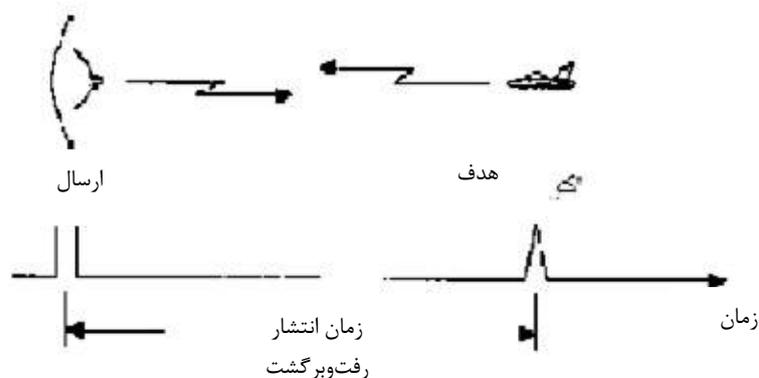
و  $C$  ( $\frac{m}{s}$ )، سرعت نور می‌باشد

### ۳-۲- چگونگی عملکرد رادارها

اصول کار کلیه سیستم‌های رادار، از جهت فرستنده و گیرنده یکسان است و تنها موج ارسالی آن‌هاست که رادارها را از هم متمایز می‌کند. فرستنده رادار، امواج خود را به سمت آنتن ارسال می‌کند که در بین مسیر از یک سیرکولاتور عبور داده می‌شود. بخشی از انرژی ارسال شده توسط آنتن که با توان بالایی ارسال شده است توسط هدف منعکس شده و یا دوباره از راه همان آنتن و یا آنتن گیرنده دیگر دریافت می‌شود [۸].



شکل ۲- بلوک دیاگرام یک رادار پالسی ساده [۸]



شکل ۳- مفهوم فاصله‌یابی رادار

### ۳-۴- روش‌های استتار در ناحیه راداری

در یک شناسایی راداری یا رهگیری هدف، انرژی الکترومغناطیسی فرستنده راداری به سمت هدف گسیل گردیده، هدف، مقداری از انرژی را پخش ساخته، مقداری از انرژی پخش شده به رادار برگشته و گیرنده، انرژی بازگشتی را شناسایی و نمایش می‌دهد. شناسایی هدف، تنها در صورتی حاصل می‌شود که بازگشت از هدف به‌منظور مشاهده شدن از بین کلاتر، به اندازه کافی بزرگ بوده و در صورتی که بعد از شناسایی بتوان آن را از بازگشت‌های غیر از هدف تمیز داد. دو شیوه کاملاً مشخص عملکرد راداری، شامل کاهش بزرگی بازگشت از هدف و افزایش تعداد یا بزرگی بازگشت‌های کلاتر می‌باشد. استتار در برابر امواج راداری به‌معنای پنهان نمودن ابزار، تجهیزات، خودروها یا سامانه‌های هوایی مانند پهپادها یا هواپیماها و... در برابر سامانه‌های راداری می‌باشد؛ به‌طوری که سامانه راداری نتواند آنها را تشخیص دهد یا به سختی تشخیص دهد [۱۰].

اقدامات متقابل در برابر طیف راداری شامل اقداماتی است که بر امواج راداری اثر گذاشته و بیشترین اتلاف را داشته باشند و در نتیجه، امواج به گیرنده امواج رادار برنگردد؛ به‌عبارتی ساده‌تر، هدف از این اقدامات، دیده نشدن مواضع ما (اهداف زرهی، سنگرها، تأسیسات یا هر چیزی که توسط رادار شناسایی می‌شود) است و می‌بایست با این اقدامات، کمترین انعکاس موج راداری از مواضع ما صورت گیرد. از این اقدامات می‌توان موارد ذیل را نام برد [۶]:

- استفاده از مواد جاذب راداری (RAM)<sup>۱</sup> گویند.
- استفاده از موادی که پخش راداری آنها مطلوب است.
- تغییر شکل دادن به‌منظور کاهش سطح مقطع راداری یا RCS<sup>۲</sup>
- استفاده از پوشش‌ها (دود، تور، چف‌ها)
- ایجاد ایستگاه تاکتیکی
- مکان‌یابی مناسب، استفاده مناسب از عوارض زمین (تپه، غلزارها، جنگل و...)
- استفاده از اهداف فریبنده راداری
- ایجاد پس‌زمینه‌های مصنوعی مانند اینکه اهداف در میان تانک‌های منهدم‌شده یا یک شهر منهدم‌شده قرار بگیرند.
- پراکنده‌سازهای مصنوعی مانند تنسیل<sup>۳</sup> که همانند چف عمل می‌کند اما تفاوت آن با چف این است که چف در هوا معلق می‌شود ولی تنسیل‌ها می‌توانند در روی زمین نیز قرار بگیرند [۶].

برای استتار، اهدافی چون جلوگیری از دیده‌شدن، افزایش احتمال بقاء در میدان نبرد و افزایش امکان فریب دشمن متصور است. جهت نیل به این اهداف، شیوه‌ها، روش‌ها و ملزومات متفاوتی وجود دارد.

یکی از روش‌های استتار در مقابل امواج راداری، ایجاد دود می‌باشد که در زمان جنگ، عامل مؤثری برای دیده نشدن (تیره و تار کردن دید دشمن)، کنترل سرعت دشمن، ارسال علامت برای نیروهای خودی (علامت‌دهی) و پنهان کردن مکان فعالیت نیروهای خودی است [۹].

### ۴- آزمایش عملی

#### ۴-۱- اهداف آزمایش

یکی از مشکلات عمده تست‌های عملی، ایجاد شرایط مناسب برای تست سیستم‌های استتار مدرن، از نظر محیط و اهداف است. بسیاری از این شرایط در عمل قابل تحقق نیستند و یا این‌که تهیه آنها با صرف هزینه‌های گزاف و زمان زیاد میسر می‌شود. همچنین تکرارپذیر نبودن شرایط تست در محیط، اعتبار و نتیجه‌گیری از چنین تست‌هایی را دچار مشکل می‌کند.

هدف از این آزمایش، بررسی قدرت پوشاندگی و پنهان‌سازی اهداف در برابر امواج راداری (با انواع دودهایی که در دسترس بوده و یا پس از مطالعه و بررسی اولیه، برای استتار انتخاب شده‌اند) می‌باشد.

#### ۴-۲- نیازمندی‌های آزمایش

نیازمندی‌های این آزمایش برای انجام عبارت‌اند از:

- تونل یا اتاقک تست
- ژنراتور تولید دود
- دستگاه اندازه‌گیری راداری
- هدف راداری
- مواد مورد نیاز جهت ایجاد دود

#### ۴-۳- تونل یا اتاقک تست

با جستجو در منابع خارجی مشاهده گردید که مرکز مهندسی تحقیق و توسعه ایجوود (وابسته به مرکز مهندسی توسعه و تحقیقات ارتش ایالات متحده<sup>۴</sup>) دارای یک تونل آتروسول در زمین تست آبردین مریلند می‌باشد. شکل (۴) یک وسیله منحصربه‌فرد برای تعیین توانایی دودهایی استتار پخش‌شده در هوا، جهت مشخص نمودن حداقل مواد مصرفی و خصوصیات سامانه پخش مواد است [۱۶].

#### ۴-۴- نمونه تونل آماده‌شده

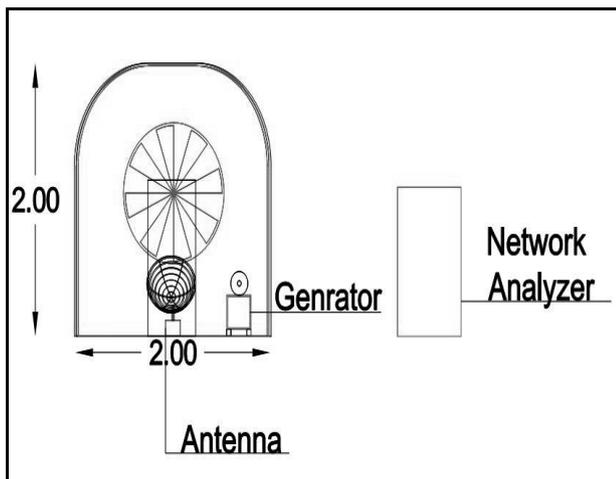
جهت انجام آزمایش بررسی انواع دودهایی استتاری در مقابل امواج طیف الکترومغناطیسی، ایجاد یک تونل امری ضروری بود. برای عملیاتی نمودن پروژه، به‌دلیل اینکه هدف از ایجاد و استقرار آن، بررسی اثرات دودهایی استتارکننده بود، نمونه‌ای با شرایط زیر ساخته شد.

1- Radar Absorption Material

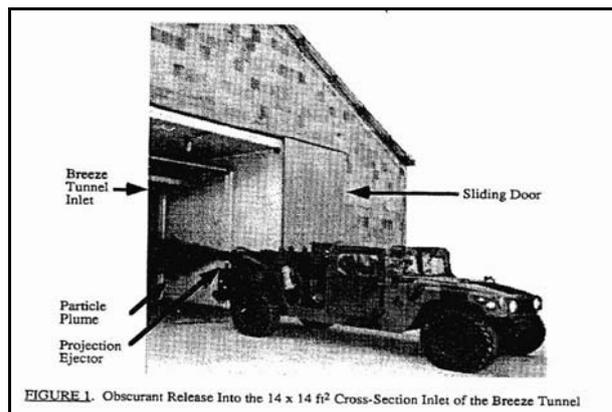
2- Radar Cross Section

3 -Tensil

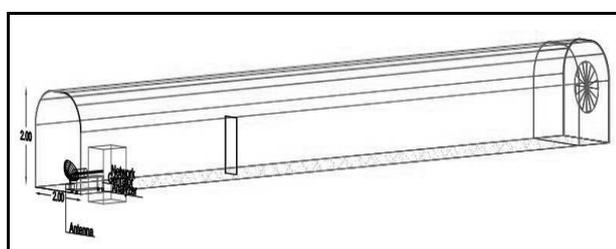
4- Edgewood Reserch Development Center (ERDC)



شکل ۷- نمای شماتیکی تونل



شکل ۴- ورودی تونل نسیم

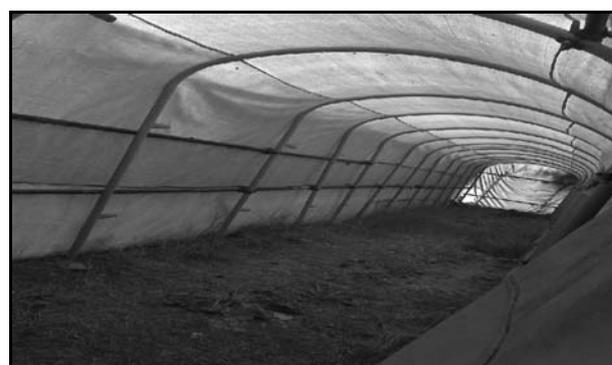


شکل ۸- نمای طولی تونل

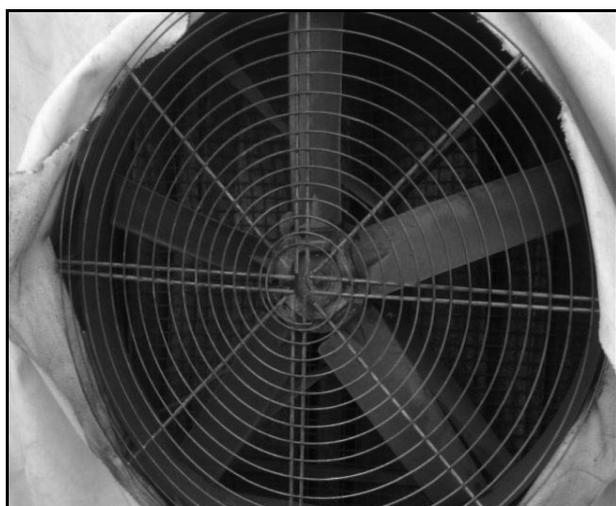


شکل ۵- نمای بیرونی تونل

فن تهویه‌ای تعبیه شد که در دیواره روبروی ورودی قرار دارد. این فن جهت تخلیه دود و تأمین سرعت باد، مورد نیاز آزمایش بود. با شروع به کار آن و تنظیم دریچه‌های اضافی تونل، سرعت نسیم ایجادشده در داخل تونل به ۲ متر بر ثانیه می‌رسد که این امر باعث می‌شود تا دود ایجادشده در ابتدای مسیر نشست ننماید (شکل ۹).



شکل ۶- نمای داخلی تونل



شکل ۹- فن تهویه

۴-۴-۱- مشخصات و تجهیزات مورد نیاز تونل  
سطح مقطع تونل ۲ × ۲ متر و طول آن ۱۵ متر می‌باشد (شکل‌های ۷ و ۸).

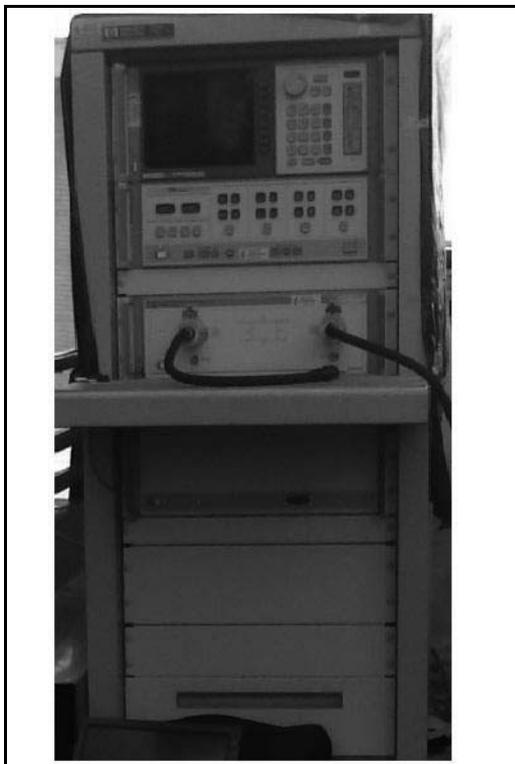
۴-۴-۲- فن تهویه  
جهت تخلیه، تهویه و همچنین جهت تأمین سرعت باد به اندازه لازم،

#### ۴-۶- دستگاه فرستنده و گیرنده راداری

دستگاه جایگزین راداری مورد استفاده در این تست، Network Analyzer مدل HP8510c همراه با آنتن رفلکتوری است که در ورودی درب تونل، کنار ژنراتور قرار گرفته و قسمت اصلی آن در کنار ورودی قرار دارد (شکل‌های ۱۱ و ۱۲). فرکانس دستگاه در محدوده ۱۰ مگاهرتز تا ۵۰ گیگاهرتز است. فرکانس مورد استفاده در این تست، ۸ الی ۱۲ گیگاهرتز و توان ارسالی آن ۱۰ میلی‌وات می‌باشد.



شکل ۱۱- نمایی از آنتن رفلکتوری، ژنراتور و هدف



شکل ۱۲- دستگاه Network Analyzer مدل HP8510c

در داخل و انتهای تونل (نزدیک فن) یک سری از پارچه‌های کتان برای جذب ذرات دود که موازی با طول و ارتفاع تونل بود از سقف تا کف تونل تعبیه شد.

#### ۴-۳- بادسنج

جهت اندازه‌گیری سرعت باد، از بادسنج دیجیتالی مدل لوترون LM-81AM استفاده شد. در هر مرحله از آزمایش، جهت یکنواخت بودن شرایط اندازه‌گیری، سرعت باد اندازه‌گیری می‌شد.

#### ۴-۵- سامانه پخش یا ژنراتور تولید دود

مشخصات: مجموعه موتور شامل شاسی، پوشش خارجی، توربوشارژر، محفظه احتراق، استارت، باتری، سیستم سوخت‌رسانی، سیستم روغنکاری، ECU، سنسورهای فشار و دما، درپوش‌ها و اتصالات می‌باشد و ۷۰ تا ۸۰ کیلوگرم وزن دارد (شکل ۱۰).

در این موتور می‌توان از انواع سوخت‌ها نظیر انواع سوخت جت، نفت سفید، گازوییل، بنزین و یا الکل استفاده کرد.

سیستم پاشش مواد از یک دستگاه توربوجت با قدرت موتور ۲۳ هزار دور در دقیقه تشکیل شده است. در این سیستم، یک سیلندر مواد تعبیه شده تا مواد داخل آن ذخیره گردد. این سیلندر هنگام روشن شدن موتور و شروع آزمایش توسط کمپرسور باد، بالا آمده و مواد را در مسیر مکش سیلندر خروجی قرار می‌دهد. کمپرسور باد در قسمت تحتانی سیستم پاشش قرار دارد. سیستم فرمان موتور توربوجت برای پاشش مواد، علاوه بر دستی بودن، به صورت کنترل از راه دور نیز طراحی شده است، که البته در همه آزمایش‌ها برای احتیاط از ریموت استفاده شد. در آزمایش‌ها از ماکزیمم قدرت موتور استفاده شد.

ژنراتور تولیدکننده دود در ورودی تونل قرار داشته و توانایی پخش ۲ کیلوگرم مواد را در دقیقه دارد.



شکل ۱۰- ژنراتور تولید دود در لحظه استارت

## ۴-۷- هدف

فاصله ۳ متری از آنتن قرار گرفت. سپس برای به دست آوردن مقدار ضریب انعکاسی مرجع، در غیاب ماده استتار کننده، تستی به روش Time Domain انجام گرفت و مقدار بازگشتی آن ثبت شد، که نمودار آن در شکل (۱۳) نشان داده شده است.

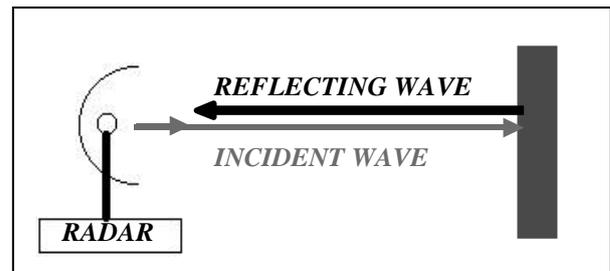
صفحه فلزی به ابعاد ۲ در ۱ متر، در فاصله ۳ متری از آنتن قرار داشت.

## ۴-۷-۱- نحوه انتخاب هدف و فاصله آن از آنتن

با توجه به آنتن رفلکتوری استفاده شده در این آزمایش، می بایست یک حداقل سطح مقطع راداری (RCS) تأمین می شد. ابعاد هدف با معلوم بودن پهنای پرتو آنتن و فاصله بین آنتن و هدف به دست می آید

$$L \geq R\theta \quad \text{معادله (۵)}$$

که در آن،  $\theta$  زاویه (HPBW) آنتن است که برابر با  $4^\circ$  می باشد. با توجه به فاصله ۳ متری هدف از آنتن، مقدار  $L$  (حداقل سطح مقطع هدف)، برابر ۲۰ سانتی متر می باشد.



جدول ۱- مواد مورد استفاده در تست

رنگ ظاهری	اندازه ذرات (میکرون)	نوع ماده	شماره
سفید	۴۰	بنتونیت	۱
سیاه	۴۰	پودر کربن بلک	۲
سیاه	۳۰۰	الیاف پشم سنگ پوشش شده با کربن بلک به همراه بنتونیت	۳
سیاه	۳۰۰	الیاف پشم سنگ پوشش شده با کربن بلک به همراه بنتونیت و الیاف کربن	۴
نوک مدادی	قطر ۱۲ میکرون طول ۱ سانت	الیاف کربن	۵

با توجه به یکی بودن آنتن فرستنده و گیرنده در این آزمایش و از معادله (۶)، تأخیر زمانی انرژی گرفته شده از هدف که نتیجه اصابت پالس ویژه ای به هدف می باشد، موقعیت هدف روی نمودار، با پیک مشخصی که در فاصله ۲۰ تا ۳۰ ns قرار دارد، مشخص می شود.

$$\Delta t = \frac{2R}{C} \quad \text{معادله (۶)}$$

که در اینجا  $R$  فاصله رادار تا هدف و  $C$  سرعت نور می باشد. همانطور که اشاره شده آزمایش به روش Time Domain انجام گرفت و در شکل (۱۳) محور عرض ها نشان دهنده ضریب انعکاسی گاما ( $\Gamma$ ) و محور طول ها نشان دهنده تأخیر زمانی (مدت زمان لازم برای برخورد امواج به هدف و بازگشت آنها به گیرنده) می باشد.

۱- ضریب انعکاسی: از نسبت توان برگشتی از هدف به توان ارسالی حاصل می گردد که آن را با  $\Gamma$  نشان می دهند، در واقع این محاسبات در داخل سیستم به صورت اتوماتیک انجام می شود.

تنظیم آنتن جهت به کارگیری در تست با استفاده از صفحه فلزی کوچکی انجام گرفت. انتخاب فاصله ۳ متری از آنتن برای هدف به این دلیل بود که از آن فاصله به بعد، با توان تنظیم شده برای دستگاه راداری، دیگر امواج بازگشتی در صفحه مشاهده نمی شدند.

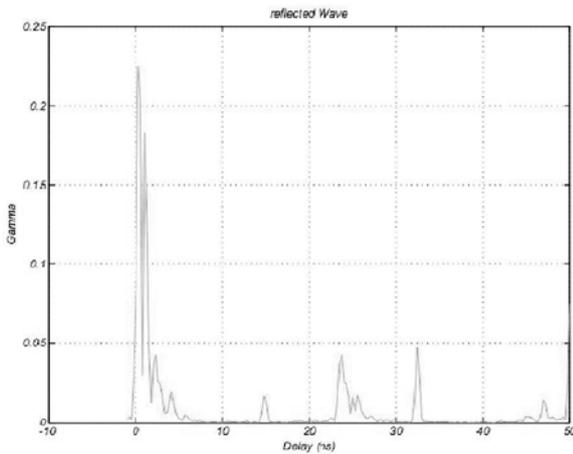
## ۴-۸- مواد به کار رفته به عنوان دود

موادی که به عنوان دود در آزمایش مورد استفاده قرار گرفتند عبارت بود از (جدول ۱):

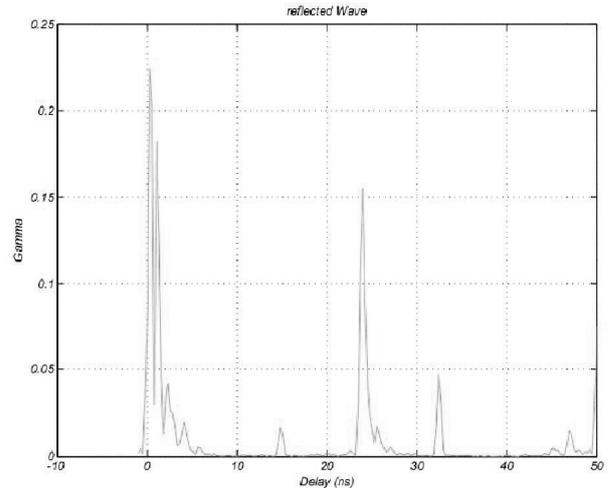
## ۴-۹- آماده سازی تجهیزات

روش های تست مرئی و حرارتی به صورت غیرفعال انجام می گیرد و از سیستم تصویربرداری که فقط به عنوان گیرنده هستند استفاده می گردد. در تست رادار از سیستم فعال استفاده می شود، لذا در سناریوی تست می بایست یک فرستنده و گیرنده وجود داشته باشد.

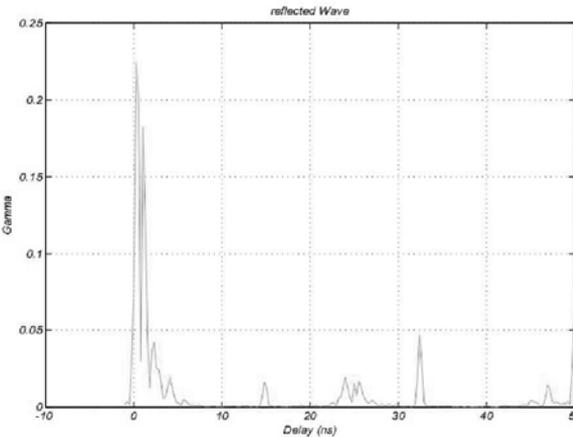
پس از انتخاب رادار در باند  $X$  راداری با فرکانس کار ثابت ۱۰ گیگاهرتز و توان ارسالی ۱۰ mw، ابتدا صفحه ای به ابعاد ۱×۲ متر در



شکل ۱۴- نمودار میزان ضریب انعکاسی از هدف در حضور پودر حاوی پشم سنگ، کربن بلک به همراه بنتونیت + الیاف کربن



شکل ۱۳- میزان افت ضریب انعکاسی در غیاب دود



شکل ۱۵- نمودار میزان ضریب انعکاسی از هدف در حضور الیاف کربن

#### ۵-۱- تحلیل نتایج تست راداری

معمولاً دود استتار چند طیفی در حوزه رادار برای مقابله با موشک‌های مجهز به رادارهای موج میلی‌متری، ۳۵ و ۹۴ گیگاهرتز می‌باشد. به لحاظ اینکه برای این ناحیه set up تست در کشور موجود نمی‌باشد، تست کاهش راداری برای ناحیه باند پرتیهدید x انجام گرفت. البته قابل ذکر است که مقابله با فرکانس x توسط دود به مراتب مشکل‌تر از مقابله با نواحی موج میلیمتری می‌باشد و معمولاً ترکیباتی که در باند x جواب خوبی می‌دهند، به احتمال قریب به یقین در ناحیه میلیمتری نیز پاسخ خوبی خواهند داشت. بهترین حالت برای مقابله با رادارهای شناسایی و هدفگیری این است که رادار، تفکیکی بین هدف و محیط حس نکند.

چون نمودارها بیانگر میزان  $\Gamma$  (گاما) بوده و توانایی جذب موج الکترومغناطیس به وسیله افت انعکاس با نسبت  $\Gamma^2$  رابطه دارد؛

#### ۴-۱۰- روش آزمایش

ابتدا مقدار ۲ کیلوگرم از پودر بنتونیت، جهت تست، داخل سیلندر دستگاه پاشش ریخته و تجهیزات آماده شدند. سپس از مواد کربن بلک مقدار ۲ کیلوگرم را در داخل سیلندر تغذیه دستگاه پاشش ریخته و عملیات دودزایی انجام گرفت. به همین ترتیب آزمایش برای مواد زیر تکرار گردید.

- پودر حاوی پشم سنگ کوت‌شده با کربن بلک به همراه بنتونیت
- الیاف پشم سنگ پوشش‌شده با کربن بلک به همراه بنتونیت و الیاف کربن
- الیاف خالص کربن

#### ۵- نتایج تست راداری

با توجه به آزمایش‌های فوق، پس از هر مرحله آزمایش، نتیجه آن به صورت الگوهای نموداری در دستگاه Network Analyzer ذخیره شد که نتایج آن به صورت نمودارهای زیر می‌باشد.

در مراحلی از مواد زیر استفاده شد.

۱- بنتونیت

۲- کربن بلک

۳- پودر حاوی پشم سنگ کوت‌شده با کربن بلک به همراه بنتونیت

هیچگونه تغییری در میزان ضریب انعکاسی نسبت به شکل (۱۳) مشاهده نشد.

در حضور دود حاصل از الیاف پشم سنگ پوشش‌شده با کربن بلک به همراه بنتونیت و الیاف کربن، افت قابل توجهی به میزان حدود ۰/۱۱ در ضریب انعکاسی مشاهده گردید (شکل ۱۴).

در مرحله بعد، در حضور دود حاصل از الیاف کربن، افت ضریب انعکاسی به ۰/۱۳ افزایش یافت (شکل ۱۵).

۵. جی سی، تامی؛ ترجمه سلیمانی، محمد، انتشارات دانشگاه علم و صنعت، (۱۳۷۵).
۶. قنبری، فیروز؛ استتار روش‌ها و فناوری‌ها و مواد، انتشارات قرارگاه خاتم الانبیا(ص)، (۱۳۸۹).
7. Brookner, E, " radar technology ",Dedham, MA, Artech house, (1978).
8. M. I. Skolnik (ed.), Radar Handbook, 2nd ed, New York: McGraw-Hill, (1990).
9. THERMOELECTRIC INFRARED SENSORS (THERMOPILES) FOR REMOTE TEMPERATURE MEASUREMENTS; PYROMETRY, pdf, 12 pages.
10. "Smoke Obscurants, Non-Lethal and Flame", FM3-100, Chapter 5.
11. US Patent, US2011/0095931 A1; "Radar CAMUFLAGE FABRIC", (2011).
12. www.sew-lexicon.com/gloss-ahtm#absorptive\_chaff.
13. US Patent No. 4, 622, 899.
14. US Patent No. 5,656,794.
15. Fiber optic sensors: An introduction and overview, pdf, 12 pages.
16. Syed Q. A. Rizvi, A Comperhensive Review of Lubricant Chemistry, Technology, Selection, and Design, ASTM International, West Conshohocken, PA, Chap. 6,pp. 308-311, (2009).

بنابراین می‌توان میزان افت ضریب انعکاسی را در مقایسه دو نمودار (با مواد دودزا و بدون مواد دودزا) محاسبه نمود. به‌طور مثال در مورد ترکیب ۴ در جدول (۱)، اگر افت انعکاس به میزان ۱۰dB باشد به معنی کاهش برد رادار به میزان ۵۶٪ در مقایسه با حالت بدون مواد دودزا خواهد بود.

در این آزمایش می‌توان چنین نتیجه‌گیری نیز کرد که: اگر مواد دودزای به‌کار رفته در آزمایش، به‌عنوان بازتاب‌کننده و مانع در مقابل هدف عمل می‌کردند می‌بایست در فاصله زمانی صفر تا ۲۵ns، به‌صورت یک پیک خود را نشان می‌دادند. لذا با توجه به فرایند فیزیکی برخورد امواج با ذرات و نیز با توجه به اندازه ذرات و همچنین طول موج امواج ارسالی (۳ سانتی‌متر)، امواج در برخورد با ذرات معلق دود، دچار پراکندگی نامنظمی می‌شوند که این خود باعث اتلاف در امواج ارسالی و همچنین امواج برگشتی از هدف می‌شود و از طرف دیگر، پدیده جذب نیز در این میان صورت گرفته است. پس افت انعکاسی حاصل، ناشی از پراکندگی و جذب می‌باشد.

با توجه به مطالب فوق، هر دو ترکیب استفاده‌شده در ردیف‌های (۴ و ۵) جدول (۱) مورد تأیید و قابل کاربرد است. ولی به لحاظ ارزان بودن، استفاده از ترکیب (۴) برای ناحیه رادار پیشنهاد می‌گردد.

## ۵-۲- نتیجه‌گیری

سامانه‌های راداری، یکی از تهدیدات تسلیحاتی مدرن روز می‌باشد. این سامانه‌ها با استفاده از امواج الکترومغناطیسی برای شناسایی، جاسوسی، هدف‌گیری و دیدبانی استفاده می‌شوند و به همین دلیل کاربرد این سامانه‌ها به‌عنوان تسلیحات نظامی، روزبه‌روز بیشتر شده است. در نتیجه، مقابله با این نوع سیستم‌ها یک ضرورت می‌باشد که برای استتار آن روش‌های مختلفی وجود دارد که استفاده از دود، یکی از آنها می‌باشد.

## مراجع

- عباس‌ور نیسیانی، جمشید؛ مقدمه‌ای بر اصول و مبانی پدافند غیرعامل، انتشارات قرارگاه خاتم الانبیا(ص)، (۱۳۸۴).
- فاطمی، سید باقر؛ رضایی، یوسف؛ مبانی سنجش از دور، انتشارات آزاده، (۱۳۸۹).
- خزائی، صفا؛ سنجش از دور با نگرشی بر شناسایی و مراقبت، انتشارات دانشگاه امام حسین(ع)، (۱۳۸۸).
- میر شکار، م؛ داداش‌زاده، س؛ "اصول علمی و عملی رادار"، (۱۳۵۹).

---

## The Study of Smokes Effects on Radar

B. Abbasian<sup>1</sup>

S. Y. Moosavi<sup>2</sup>

Z. Rostami<sup>3</sup>

### Abstract

This essay is intended to investigate and test the effects of different kinds of smoke on radar wave portion of the electromagnetic spectrum. In regards to the use of electromagnetic waves in the world's current sensors and detectors, the necessity of passive defense and in other words, camouflage against these equipments, is of utmost importance. The use of smoke is one of these ways. Therefore, to perform camouflage, the simulation of a laboratory environment is required which can approximate the smoke camouflage against radar waves as much to the field and operational conditions, as possible. In this essay, a review of the camouflage strength of several material against the radar X- band has been implemented and eventually, taking their reflective coefficient rate into consideration, the carbon fiber as the material which could cause a reduction of 6db in the reflexive coefficient and hence, can be used as a camouflaging material against radar waves.

**Key Words:** *Radar, Camouflage, Passive Defense, Electromagnetic Sensors, Carbon Fiber*

---

1- MS in Passive Defense Engineering (Email:b.abasian59@yahoo.com) - Writer in Charge

2- MS in Passive Defense Engineering, Imam Hossein Comprehensive University

3- Assistant Professor and Academic Member of the Faculty of ICT, Imam Hossein Comprehensive University