

## ارزیابی آسیب پذیری شریان های حیاتی در برابر سنجنده های صوتی تهدیدات هوایی هوشمند و بدون سرنشین

ابوذر رضانی<sup>۱\*</sup>، محمدرضا ملک<sup>۲</sup>، حبیب اله سهامی<sup>۳</sup>، رضا حسینی<sup>۴</sup>، احمد معدنچی زارع<sup>۵</sup>

۱- دانشجوی دکتری، ۳- استادیار، ۴- دانشیار، ۵- پژوهشگر، دانشگاه صنعتی مالک اشتر، ۲- دانشیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی  
(دریافت: ۹۴/۰۶/۱۸، پذیرش: ۹۵/۰۲/۰۷)

### چکیده

ارزیابی میزان آسیب پذیری زیرساخت های حیاتی همواره دغدغه اصلی رهبران حوزه راهبردی کشور جهت مدیریت، رصد و سنجش مصونیت و امنیت وضعیت موجود است. بدیهی است جهت مقابله با آسیب پذیری زیرساخت ها و احتمال وقوع تهدیدات علیه آن ها و به کارگیری صحیح و نافذ ابزار بازدارنده و کارآمد، لازم است عوامل موثر در کسب اطلاعات نیروی متخاصم یا عوامل آسیب رسان به زیرساخت ها را شناسایی نمود و راه کاری برای مقابله با آن ارائه نمود. یکی از عوامل موثر در شناسایی زیرساخت ها، امواج صوتی منتشر شده از آن زیرساخت است. مهم ترین نوآوری این تحقیق، ارزیابی میزان آسیب پذیری زیرساخت ها در برابر تهدیداتی است که از سنجنده های صوتی استفاده می کنند. باتوجه به وجود عدم قطعیت در پیش بینی رفتار امواج صوتی، سنجنده ها و سامانه های راداری و نیاز به پردازش های مکانی جهت ارزیابی میزان آسیب پذیری، در این تحقیق تلاش گردیده تا از منطق فازی در چارچوب یک سامانه اطلاعات مکانی جهت مدل سازی رفتار پارامترها استفاده شود. مدل ارائه شده برای منطقه ای در اطراف نطنز کاشان و با استفاده از اطلاعات فرضی پیاده سازی شده و در خاتمه نقشه آسیب پذیری ارائه گردیده است. نحوه پراکنش امواج صوتی در اطراف زیرساخت ها، نحوه چیدمان سامانه های راداری، قدرت تشخیص فضای اطراف توسط این سامانه ها و همچنین فضای قابل شناسایی توسط سنجنده ها از عوامل تعیین کننده در آسیب پذیری زیرساخت ها می باشد. با در نظر گرفتن موقعیت فرضی در اطراف زیرساخت یک مسیر قابل دسترسی توسط تهدیدات هوایی بدون سرنشین در سمت جنوب شرقی مشخص شده است. با مکان یابی صحیح سامانه های راداری می توان این مسیرها را پوشش داده و آسیب پذیری زیرساخت ها را به حداقل رسانید.

**کلید واژه ها:** آسیب پذیری، زیرساخت، سنجنده صوتی، سامانه اطلاعات مکانی

## Vulnerability Assessment of Critical Infrastructure against Acoustic Sensor of Smart and Unmanned Aerial Threats

A. Ramezani<sup>1\*</sup>, M. R. Malek, H. Sahami, R. Hosnavi, A. Madanchi Zare

Malek Ashtar University of Technology

(Received: 09/09/2015; Accepted: 26/04/2016)

### Abstract

Vulnerability assessment of critical infrastructure is always a major concern for the country's leaders in the field of strategic management, monitoring and evaluation of the safety and security situation. To deal with the vulnerability of infrastructure and the probability of the threats against them and the use of safe and efficient deterrent, it is necessary to identify the important factors that cause damage to the infrastructure. One of the effective factors contributing to identify infrastructure is sound waves emitted by the infrastructure. The main innovation of this study is the vulnerability assessment of the infrastructure that uses acoustic sensors against threats. Due to the uncertainty in predicting the behavior of acoustic waves, sensors and radar systems and the need to spatial analysis to assess the vulnerability, fuzzy logic has been used to model the behavior of the parameters used in the framework of a Geographic Information System. The model was implemented for the region around Natanz with hypothetical information and vulnerability map was presented at the end. Distribution of acoustic waves around infrastructure, position of radar systems, the ability to define the space around by radars and sensors are effective factors in vulnerability assessment. Considering the hypothetical positioning, infrastructure accessible by unmanned aerial threat in a path on the southeast side, location of radar systems, the ability to define the space around the sensors detected by the system, as well as the vulnerability of infrastructure is a decisive factor. Location of radar systems can be used to cover the access paths to minimize the vulnerability of infrastructure.

**Keywords:** Vulnerability, Acoustic Sensor, Infrastructure, GIS

\*Corresponding Author E-mail: abouzar.ramezani@gmail.com

## ۱. مقدمه

تهدیدات هوایی بدون سرنشین خسارات جبران‌ناپذیری طی دهه گذشته به زیرساخت‌های اساسی کشورهای در حال جنگ وارد نموده‌اند. مطالعات مختلف دلالت بر این موضوع دارد که عدم توجه به پارامترهای موثر در دسترسی تهدیدات هوایی بدون سرنشین باعث ایجاد صدمات سنگینی به زیرساخت‌ها شده است.

در دنیای امروز ما، که تهدیدات هوایی بدون سرنشین خسارات جبران‌ناپذیری به شریان‌های حیاتی وارد آورده و بسیاری از زیرساخت‌های اساسی را در معرض آسیب قرار داده است، مدیریت و ارزیابی آسیب‌پذیری شریان‌های حیاتی در برابر تهدیدات هوایی بدون سرنشین از اهمیت خاصی برخوردار است. یکی از عوامل موثر در دسترسی تهدیدات هوایی به زیرساخت‌ها جهت انهدام و یا کسب اطلاعات، بهره‌گیری از امواج صوتی منتشرشده از تجهیزات در حال فعالیت در درون زیرساخت‌ها می‌باشد [۱]. در طول دهه گذشته، رشد بی‌سابقه‌ای در شمار فعالیت‌هایی رخ داده است که اطلاعات را از طریق واپایی<sup>۱</sup> و اندازه‌گیری و با استفاده از انواع مختلف سنجنده‌ها<sup>۲</sup> به‌دست می‌آورند [۲]. به‌همین جهت تهدیدات هوایی به‌سمت استفاده از سنجنده‌ها جهت کسب اطلاعات و یا انهدام زیرساخت‌ها روی آورده‌اند. بی‌توجهی به ضوابط و استانداردها و یا اصلا نبود ضوابط و بسیاری دیگر از عوامل موجب شده تا تهدید بحران‌های ناشی از تهدیدات هواپایه تشدید شود و بر اثر وقوع آن صدمات فراوانی به زیرساخت‌ها وارد شود.

در تعیین و ارزیابی آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها، عوامل مهمی مانند موقعیت سامانه‌های راداری شناسایی تهدیدات و قوانین ساختمانی زیرساخت‌ها و نحوه رفتار تهدیدات باید مورد توجه قرار گیرند. به عبارت دیگر توصیف ماهیت و شدت هر آسیب مورد انتظار فقط بخشی از ارزیابی آسیب‌پذیری است و مرحله مهم‌تر، مطابقت وقوع تهدید در یک منطقه است؛ این مرحله اغلب با ترسیم نقشه‌های آسیب‌پذیری انجام می‌شود [۲]. پژوهش در زمینه شناخت و تبیین نواحی آسیب‌پذیر در قالب تحلیل آسیب‌پذیری با هدف تعدیل و کنترل بحران، مبتنی بر مطالعه عمیق و فراگیر در شریان‌های حیاتی پراهمیت مورد توجه نسبی بوده است. هدف از این تحقیق ارزیابی میزان آسیب‌پذیری شریان‌های حیاتی در برابر تهدیدات هوایی بدون سرنشین است که با استفاده از تحلیل‌های سه‌بعدی و منطق فازی در چارچوب یک سامانه اطلاعات مکانی انجام شده است.

مکان‌یابی منابع صوت یکی از موضوعات نوین و مورد علاقه برای محققان بوده است [۳]. در تحقیقی نحوه مکان‌یابی صوتی منابع صوت با کمک دو سنجنده صوتی مستقر بر روی پهپاد پرداخته شده است [۴]. در پژوهش حاضر، در ادامه این تحقیق آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها در مقابل سنجنده‌های صوتی مورد ارزیابی قرار گرفته است.

در مکان‌یابی با استفاده از سنجنده‌های صوتی مستقر بر روی پهپاد، نسبت سیگنال به نویز پایین است و این مسئله چالش‌هایی را به‌وجود می‌آورد. در تحقیقی جهت کاهش نویز در سنجنده تکنیکی ارائه شده است که مکان‌یابی با کمک سنجنده صوتی را بهبود می‌بخشد. در این تحقیق جهت جلوگیری از برخورد تهدید با سایر اشیاء موجود در فضا، از سنجنده‌های صوتی استفاده شده است [۵]. در پژوهش حاضر، به‌منظور بهبود عملکرد شناخت صدای نویز از صدای اصلی توسط سامانه ال‌دی‌وی اعمال می‌شود. سیگنال صوتی دریافت‌شده، معمولاً آلوده به بیش از یک منبع صدا (صدای موتور و صدای باد و غیره) می‌باشد که این صداها از طریق فیلترهای مختلف در داخل دستگاه از بین می‌رود و صدای حاصل معمولاً قابل درک می‌باشد.

در تحقیقی دیگر، مکان‌یابی منبع صوت در فضای باز با استفاده از چندین سنجنده صوتی بهبود داده شده است. در این تحقیق متدی ارائه شده است که در آن محاسبات جهت شناسایی منبع صوتی با سرعت خیلی بیش‌تری انجام شود. همچنین، تکنیکی جهت کاهش نویز در انجام محاسبات ارائه شده است که دخالت نویز در سیگنال‌های دریافتی را کاهش می‌دهد [۶].

در حوزه نظامی جهت شناسایی از سنسورهای AVS<sup>۳</sup> که دارای دقت خیلی زیادی هستند استفاده می‌شود. این سنسورها امکان شناسایی منابع صوتی با توان صوتی پایین را امکان‌پذیر می‌کنند. برای مطالعه بیش‌تر در مورد نحوه کارکرد این نوع سنجنده‌ها به تحقیق [۷] مراجعه شود. در مجموع تجهیزات جدید این امکان را فراهم نموده‌اند تا در سال‌های اخیر کشورهای مهاجم جهت کسب اطلاعات روی به استفاده از این ابزارها بیاورند. در این پژوهش مشخصات سنجنده مستقر بر روی تهدید مشابه AVS در نظر گرفته شده است.

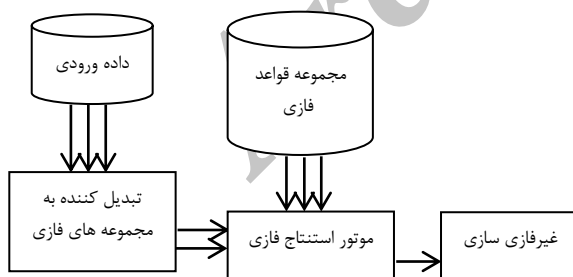
در حوزه آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها در مقابل تهدیدات مختلف، تحقیقات بسیار زیادی صورت گرفته است. در تحقیقی کلاتر و همکارانش [۸] آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها در مقابل انفجارهای تروریستی مورد بررسی قرار داده‌اند. در این تحقیق آسیب‌پذیری در مقابل پدیده‌هایی نظامی و با شناخت قدرت

<sup>۱</sup> Deliberate<sup>۲</sup> Sensor<sup>۳</sup> Acoustic Vector Sensor

استفاده از اطلاعات و ویژگی‌های هدف که توسط سنجنده‌های نهایی به دست می‌آیند، موقعیت دقیق هدف را تشخیص داده و آن را مورد هدف قرار خواهد داد و یا از آن کسب اطلاعات خواهد نمود [۱۰]. یکی از سنجنده‌های به کاررفته در بخش نهایی می‌تواند سنجنده صوتی باشد. تهدیدات هوایی بدون سرنشین با استفاده از این سنجنده‌ها از زیرساخت‌ها به کسب اطلاعات پرداخته و یا آن‌ها را تخریب می‌کنند.

## ۲-۱. منطق فازی

تخمین میزان قطعی آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها به دلیل عدم قطعیت در شناخت عملکرد پارامترهای موثر در آسیب‌پذیری خیلی کارآمد نمی‌باشد. رویکرد فازی ابزار بسیار مناسبی جهت مدل‌سازی و حسابگری روی عدم قطعیت و اطمینان و مدل‌سازی متغیرهای زبان می‌باشد. محاسبات فازی بر ابزاری بنیادی جهت استدلال‌گری تقریبی با استفاده از تئوری مجموعه‌های فازی فراهم می‌آورد [۱۱]. این نظریه قادر است بسیاری از مفاهیم و متغیرها و سامانه‌هایی را که نادقیق و مبهم‌اند، صورت‌بندی ریاضی بخشیده و زمینه را برای استدلال، کنترل و تصمیم‌گیری در شرایط عدم اطمینان فراهم آورد [۱۲]. در ارتباط با به کارگیری منطق فازی باید اشاره کرد که در تحلیل تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره، تئوری فازی معمول‌ترین روش برای بحث و بررسی عدم قطعیت‌ها شناخته شده است. در واقع روشی است برای برگرداندن طیف متنوع و گسترده‌ای از داده‌های عینی، اطلاعات کمی، نظرات و قضاوت‌های ذهنی و یک زبان طبیعی برای توصیف اثرات محیط فراهم می‌آورد. محتوی سامانه قاعده مبنای فازی در تحقیق حاضر مطابق شکل (۱) می‌باشد.



شکل ۱. دیاگرام سامانه فازی ممدانی [۱۱]

قسمت فازی‌سازی ورودی‌های معین را تبدیل به مجموعه‌های فازی می‌نماید. این فرایند باتوجه داده‌های ورودی درجه عضویت را محاسبه می‌نماید. موتور استنتاج فازی فرایند استنتاج را اجرا می‌کند. مدل‌های استنتاجی که در بسیاری از موارد مورد استفاده قرار می‌گیرند، مدل‌های ممدانی<sup>۶</sup> و سوگنو<sup>۷</sup>

انفجار این سامانه‌ها توسط مدل هیدروکد<sup>۱</sup> مدل‌سازی شده است. در این تحقیق سناریوهای متفاوت حمله و مواد منفجره گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است.

در حوزه پدافند غیرعامل و تخصیص مکان مناسب برای کاهش آسیب‌پذیری در مقابل حملات تروریستی تحقیقاتی صورت گرفته است. در یکی از این تحقیقات به مکان‌یابی و تخصیص بهینه دارایی‌ها پرداخته شده تا حملات تروریستی را ناموفق و کم اثر تبدیل سازد و قیودی برای حملات تروریستی نیز مطرح شده است [۹]. در این پژوهش نحوه دسترسی تروریست به دارایی که در واقع گام اول در تخریب یا کسب اطلاعات از دارایی می‌باشد مورد بررسی قرار نگرفته است. در تحقیق حاضر، جهت ارزیابی آسیب‌پذیری دارایی، یکی از پارامترهای موثر در دسترسی تهدیدات به دارایی (سنجنده‌های صوتی) و پارامترهای موثر در کنترل دسترسی پدافند غیرعامل (سامانه‌های راداری) شناسایی، مدل‌سازی و ترکیب خواهند شد تا در قالب یک نقشه آسیب‌پذیری، آسیب‌های موجود برای دارایی مشخص شود.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در تحقیقات گذشته تحقیق قابل توجهی در مورد ارزیابی آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها در مقابل تهدیدات هوایی بدون سرنشین جهت کسب اطلاعات یا انهدام هدف با استفاده از سنجنده‌های صوتی انجام نشده است. هدف از این تحقیق بررسی و تحلیل آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها باتوجه به نقش سنجنده‌های صوتی مستقر بر روی عامل تهدید و تاثیر امواج صوت منتشر شده از زیرساخت می‌باشد.

در ادامه و در بخش روش تحقیق، به تبیین مسئله مورد نظر پرداخته شده و در قالب دو زیربخش منطق فازی و مدل‌سازی رفتار زیرساخت در انتشار امواج صوت و رفتار سنجنده در شناسایی و نیز رفتار سامانه‌های شناسایی در شناخت تهدیدات مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته است. در بخش پیاده‌سازی برای منطقه‌ای در نطنز اصفهان این مدل اجرا شده و جهت ارزیابی، یک نقشه آسیب‌پذیری تولید شده است.

## ۲. روش تحقیق

در تهدیدات هوایی بدون سرنشین مانند حمله موشک کروز، ناوبری<sup>۲</sup> به صورت معمول در سه مرحله انجام می‌گیرد. مرحله پرتاب<sup>۳</sup>، مرحله مسیر میانی<sup>۴</sup> و مرحله پایانی<sup>۵</sup>. این نوع تهدیدات پس از پرتاب به کمک روش‌های مختلف ناوبری به ناحیه هدف نزدیک می‌شود. مرحله پایانی زمانی شروع می‌شود که موشک وارد محدوده شناسایی هدف شده باشد. در این مرحله موشک با

<sup>۱</sup> Hydrocode

<sup>۲</sup> Navigation

<sup>۳</sup> Lunch

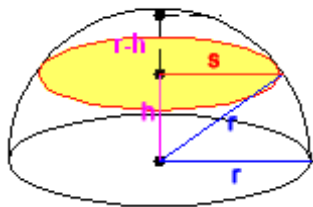
<sup>۴</sup> Midcourse

<sup>۵</sup> Terminal

<sup>۶</sup> Mamdani

<sup>۷</sup> Sugeno

فاصله مشخصی از منبع تولید کننده نویز قرار گرفته‌اند، یکسان است. این مسئله تا زمانی که جو و زمین به‌طور قابل ملاحظه‌ای بر روی ترازها تاثیر ندارند، صادق است [۱۵ و ۱۶].

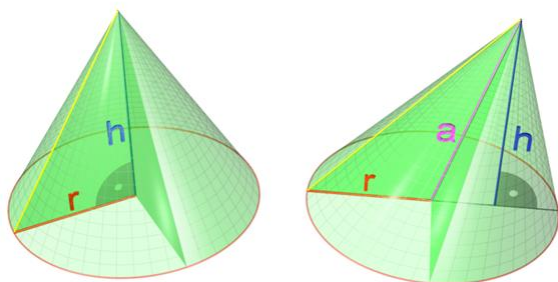


شکل ۳. کره در فضای سه‌بعدی

فاصله هر نقطه‌ای در روی سطح کره و یا داخل آن از مرکز با کمک رابطه (۱) محاسبه می‌شود.

$$R = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (1)$$

بیش‌ترین فاصله‌ای را که سنجنده می‌تواند تشخیص دهد، دامنه اسمی<sup>۲</sup> می‌نامند. فضایی که سنجنده پوشش می‌دهد، به‌شکل یک بیضوی و یا یک مخروط قابل مدل‌سازی باشد. در اینجا برای ساده‌تر شدن مسئله نحوه رفتار سنجنده‌ها به‌صورت مخروطی در نظر گرفته می‌شود و سپس قابل تعمیم به سایر اشکال خواهد بود. مخروط یک شکل هندسی سه‌بعدی است که از پایه تختش به‌آرامی یا به‌سرعت (به سطح قاعده و ارتفاع بستگی دارد) تا راس باریک می‌شود. مخروط می‌تواند دایره‌ای اریب و یا دایره‌ای قائم باشد (شکل ۴).



شکل ۴. مخروط دایره اریب و قائم

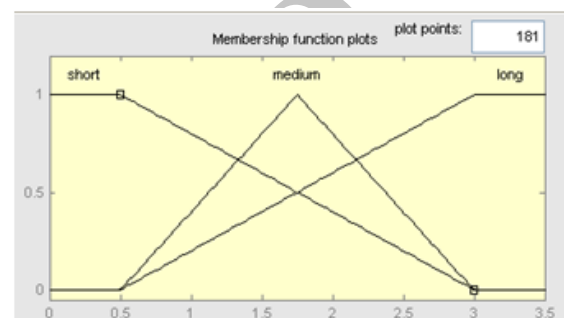
برای یک منبع نقطه‌ای با توان صوتی  $L_w$ ، نزدیک به سطح زمین، تراز فشار صدا  $L_p$  در هر فاصله  $r$  برحسب متر از منبع مذکور از رابطه (۲) قابل محاسبه است [۱۵]:

$$L_p = L_w - 20 \log_{10}(r) - 8 \text{ dB} \quad (2)$$

نقاطی در فضا که در رابطه (۳) قرار بگیرند قابل شناسایی برای سنجنده می‌باشند. توان صوتی منتشرشده توسط زیرساخت با کمک رابطه (۱) محاسبه می‌شود. با مشخص شدن دامنه اسمی سنجنده فضای آسیب‌پذیر زیرساخت قابل محاسبه خواهد بود.

می‌باشد [۱۳]. برای ایجاد قواعد فازی، کارشناسان یک دامنه از متغیرها ایجاد می‌کنند. هر دامنه به‌وسیله یک متغیر زبانی و یک درجه عضویت در مجموعه‌های فازی بیان می‌شود. در واقع محققان برای بیان مجموعه‌های فازی از نوع مثلثی یا ذوزنقه‌ای استفاده می‌کنند [۱۱].

در ارزیابی میزان آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها معیارهای فاصله از زیرساخت‌ها و فاصله از سامانه‌های راداری شناسایی تهدیدات در نظر گرفته شده‌اند. سه تابع عضویت فواصل کوتاه، متوسط و بلند از نوع مثلثی تعریف شده است (شکل ۲).



شکل ۲. توابع عضویت کوتاه، متوسط و بلند

جهت ارزیابی میزان آسیب‌پذیری می‌بایست نحوه دسترسی و کسب اطلاعات تهدیدات از زیرساخت‌ها و همچنین رفتار زیرساخت‌ها از منظر آسیب‌پذیری آن‌ها به‌دقت مورد تحلیل و بررسی قرار گیرند. سامانه اطلاعات مکانی<sup>۱</sup> ابزاری قدرتمند جهت پردازش و آنالیز اطلاعات مکانی می‌باشد که برای شبیه‌سازی دنیای واقعی و مدل‌کردن آن‌ها بسیار سودمند می‌باشد. به‌علت ماهیت مکانی رفتار تهدیدات و ارتباط رفتار تهدیدات با پارامترهای مکانی، بررسی میزان آسیب‌پذیری یک دارایی مشخص، نیاز به تحلیل‌های مکانی دارد. اهمیت سامانه اطلاعات مکانی در تحلیل آسیب‌پذیری دارایی‌ها، در یک پارچه‌سازی اطلاعات تهدید در حمایت از تصمیم‌گیری مکانی است. به‌همین دلیل، علاقه فراوانی برای به‌کارگیری سامانه اطلاعات مکانی و مدل‌های تحلیل مکانی برای تحلیل و بررسی آسیب‌پذیری به‌وجود آمده است [۱۳ و ۱۴].

## ۲-۲. مدل‌سازی

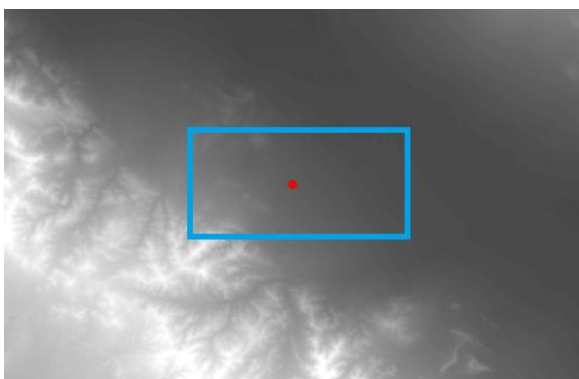
اگر ابعاد منبع تولیدکننده امواج صوت در مقایسه با فاصله تا گیرنده، کوچک باشد، منبع از نوع نقطه‌ای دانسته می‌شود. رفتار زیرساخت‌ها در مقیاس کوچک‌تر به‌صورت یک منبع نقطه‌ای در نظر گرفته می‌شود. در چنین منابعی، انرژی صوتی به‌صورت کروی منتشر می‌شود. لذا، تراز فشار صدا برای تمام نقاطی که در

<sup>2</sup> Nominal Range

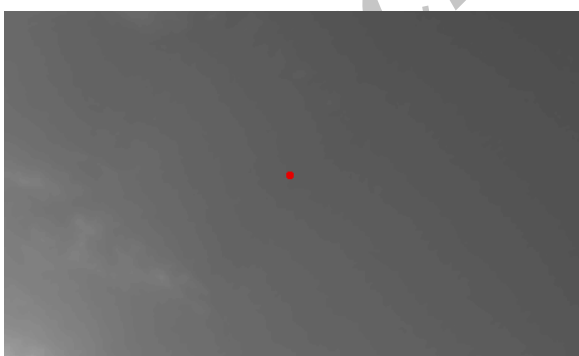
<sup>1</sup> GIS

در این رابطه  $R$  فاصله رادار تا هدف برحسب متر است.  $S/N$  نسبت سیگنال به نویز در رادار است.  $P_p$  قدرت امواج رادیویی ارسالی در رادار برحسب وات است.  $\tau$  مدت زمان پالس در رادار برحسب ثانیه است.  $G_T$  گین<sup>۱</sup> آنتن در رادار است.  $\sigma$  مساحت مقطع راداری هدف برحسب مترمربع است.  $A_R$  مساحت دیافراگم موثر آنتن گیرنده رادار است.  $k$  ثابت بولتزمن<sup>۲</sup> است که برابر  $1.38 \times 10^{-23} J/K$  است.  $T_S$  دمای نویز در سامانه راداری برحسب کلوین است و  $L$  نیز میزان از تضعیف امواج راداری در سامانه راداری است.

وضعیت ارتفاعی منطقه نیز در عملکرد سامانه راداری تاثیرگذار است. معمولا سامانه‌های راداری در مناطق مرتفع و دارای پوشش بیش‌تر مستقر می‌شوند. مدل رقومی ارتفاعی اطراف نیروگاه نطنز در دو نما در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است.

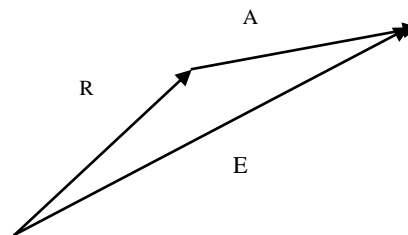


شکل ۶. نمایی دور تر از مدل رقومی ارتفاعی نطنز



شکل ۷. نمایی نزدیک تر از مدل رقومی ارتفاعی نطنز

همان‌طور که در شکل‌های (۶) و (۷) نشان داده شده است، در شعاع ده کیلومتری اطراف نیروگاه نطنز شکل عوارض زمین تقریبا مسطح است و به همین دلیل پستی بلندی‌های موجود تاثیر آنچنانی بر عملکرد سامانه راداری ندارد.

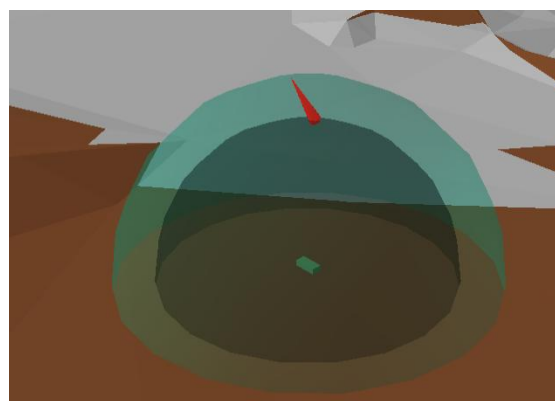


$$R + A = E \quad (۳)$$

$$E = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (۴)$$

در رابطه (۳) شعاع  $R$  شعاع کره منطقه حامل امواج صوت قابل شناسایی و  $A$  طول یال مخروط محدوده قابل شناسایی توسط سنجنده می‌باشد. نوع و زاویه قرارگیری سنجنده در افزایش و کاهش  $E$  تاثیرگذار خواهد بود. حالت بیشینه  $E$  زمانی خواهد بود که مخروط سنجنده بر مماس کره در نقطه تماس عمود باشد. شکل (۵) پراکنش امواج صوت در اطراف زیرساخت (کره مشکی‌رنگ)، سنجنده مستقر بر روی تهدید هوایی بدون سرنشین (مخروط قرمز رنگ) و محدوده آسیب‌پذیر زیرساخت (کره سبزرنگ) را نشان می‌دهد.

در مدل پیشنهادی سرعت پهپاد به علت تاثیر کم، به‌عنوان یک پارامتر تاثیرگذار نبوده و فرض شده است که در رنج سرعتی پهپادهای معمول حرکت می‌کنند.



شکل ۵. تصویرسازی مناطق آسیب‌پذیر در مقابل سنجنده‌های صوتی

رادار یک سامانه الکترومغناطیسی متشکل از اجزای آنتن، فرستنده، گیرنده و عنصر آشکارساز انرژی است به و منظور توسعه توانایی حس‌های چندگانه انسانی برای مشاهده محیط اطراف به‌ویژه حس بصری به‌کار گرفته می‌شود [۱۷]. در رابطه (۵) برد موثر سامانه راداری نشان داده شده است [۱۸].

$$R = \left[ \frac{P_p \tau G_T \sigma A_R}{(4\pi)^2 \left(\frac{S}{N}\right) k T_S L} \right] \quad (۵)$$

<sup>۱</sup> Gain

<sup>۲</sup> Boltzmann's constant

قلمداد می‌شود و از این حیث یکی از مناطق پراهمیت از جهت زیرساختی در کشور می‌باشد. لازم به ذکر است، منطقه نظنز به‌عنوان یک مطالعه موردی در نظر گرفته شده است و مدل پیشنهادی برای تاسیسات زیرزمینی که توان صوت تولیدشده آن‌ها بالا است، قابل تعمیم بوده و امکان تهیه نمای آسیب‌پذیری برای آن‌ها وجود دارد.

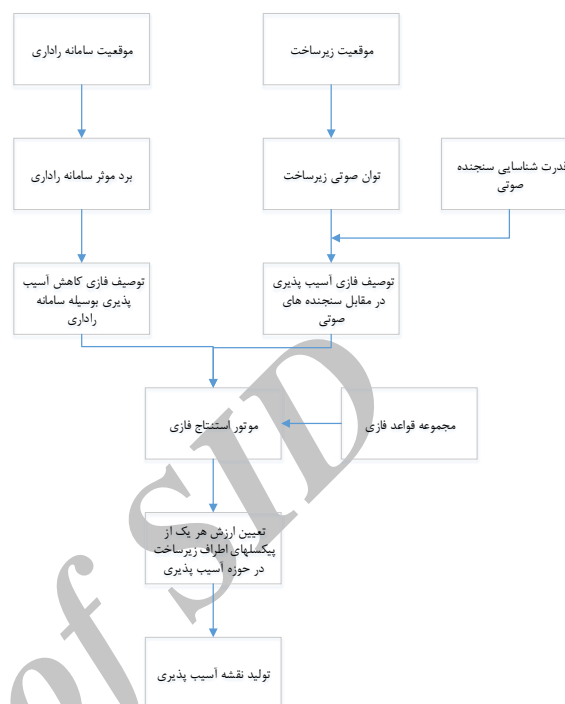
معمولاً در اطراف زیرساخت‌های حیاتی سامانه‌های شناسایی تهدیدات هوایی بدون سرنشین به کار گرفته می‌شود. در این منطقه نیز با چیدمان فرضی سامانه‌های شناسایی به ارزیابی آسیب‌پذیری شریان‌های حیاتی پرداخته می‌شود. با استفاده از مدل پیشنهادی رفتار تهدیدات و سامانه‌ها با کمک منطق فازی مدل‌سازی شده و سپس پیاده‌سازی خواهد شد. مناطق اطراف زیرساخت به جهت انتشار امواج صوت، منجر به دسترسی تهدیدات می‌شوند. جهت استفاده از منطق فازی در توصیف مناطقی که در معرض انتشار امواج صوت قرار دارند، ورودی‌های قطعی به درجه عضویت در توابع فازی تبدیل شده‌اند. با استفاده از رابطه (۲) توان صوت در فواصل مختلف مشخص می‌شود. برای این نیروگاه فرض شده است که توان صوتی برابر ۱۰۲ دسی‌بل است. با توجه به قدرت شناسایی سنجنده‌های صوتی مستقر بر روی تهدیدات هوایی بدون سرنشین که بین ۲ تا ۱۲۰ دسی‌بل است، شعاع آسیب‌پذیری مشخص می‌شود [۱۹]. سنجنده‌های صوتی AVS تراز فشار صوت کم‌تر از ۲۰ دسی‌بل را خیلی ضعیف شناسایی می‌کنند. ۲۰ تا ۴۰ دسی‌بل را در حد متوسط شناسایی می‌کنند و بالای ۴۰ دسی‌بل را خیلی خوب شناسایی و کشف می‌کنند. به این ترتیب، سطح شناسایی تراز فشار صوت در فواصل مختلف با استفاده از رابطه (۲) محاسبه می‌شود. در جدول (۱) توصیف فازی آسیب‌پذیری برای فاصله از زیرساخت‌ها ارائه شده است.

**جدول ۱.** توصیف فازی آسیب‌پذیری برای فاصله از زیرساخت‌ها برای سنجنده‌های صوتی

توصیف فازی آسیب‌پذیری	فاصله از زیرساخت
زیاد	$X < 320$
متوسط	$320 < X < 3200$
کم	$3200 < X$

در جدول (۱) فواصل کم‌تر از ۳۲۰ متر با توجه به این که توان صوت بالای ۴۰ دسی‌بل است دارای آسیب‌پذیری بالا بوده و به همین ترتیب با افزایش فاصله و کاهش توان صوت آسیب‌پذیری کاهش می‌یابد. با توجه به جدول (۱) روابط محاسبه درجه عضویت برای هریک از توابع کوتاه، متوسط و بلند برای هر نقطه در فضا تعریف می‌شود (جدول ۲). سپس درجه عضویت برای توابع با کمک روابط جدول (۲) محاسبه می‌شود.

بلوک دیاگرام مربوط به روش پیشنهادی در شکل (۸) نشان داده شده است.



شکل ۸. بلوک دیاگرام روش پیشنهادی

در روش پیشنهادی موقعیت سامانه‌های راداری به همراه برد موثر این سامانه‌ها به‌عنوان یکی از پارامترهای تاثیرگذار در نظر گرفته شده و به‌عنوان اطلاعات ورودی فازی‌سازی می‌شوند. از آنجایی که عملکرد سامانه‌های راداری تحت تاثیر عوامل مختلفی قرار دارد و در مدل‌سازی آن‌ها عدم قطعیت وجود دارد، رویکرد فازی به‌عنوان ابزار مناسب مدل‌سازی رفتار این سامانه‌ها انتخاب می‌شود. سپس توان صوتی زیرساخت مشخص شده و با استفاده از رابطه (۲) تراز فشار صوت در فواصل مختلف تعیین می‌گردد. با توجه به قدرت شناسایی سنجنده‌های صوتی مستقر بر روی تهدیدات هوایی هوشمند و بدون سرنشین، توصیف فازی آسیب‌پذیری زیرساخت در مقابل این سنجنده‌ها تعریف می‌شود. سپس در مرحله بعد این توصیفات وارد موتور استنتاج فازی شده و با تعریف قواعد فازی و تعیین وزن قواعد مختلف، ضرایب بر روی مجموعه‌های فازی اعمال شده و در نهایت نیز نقشه آسیب‌پذیری زیرساخت در مقابل سنجنده‌های صوتی تولیدشده است.

### ۳. نتایج و بحث

محدوده مورد مطالعه منطقه نظنز در استان اصفهان می‌باشد. این منطقه در میانه راه کاشان به اصفهان در دامنه کوهستان کرکس و در شمال غربی اردستان قرار دارد. این منطقه در محافل بین‌الملل به‌عنوان یک منطقه استراتژیک برای کشور ایران

جدول ۲. تعریف توابع عضویت برای نقاط اطراف زیرساخت باتوجه به شدت امواج صوت

درجه عضویت	دامنه	درجه عضویت	دامنه	درجه عضویت	دامنه	نوع تابع عضویت سنجنده‌های صوتی (H)
0	$R > 3200$	$(3200 - R) / 2880$	$320 < R < 3200$	1	$R < 320$	تابع عضویت کوتاه (S)
$(3200 - R) / 2200$	$1000 < R < 3200$	$(R - 320) / 680$	$320 < R < 1000$	0	$R < 320$ $R > 3200$	تابع عضویت متوسط (M)
1	$R > 3200$	$(R - 320) / 2880$	$320 < R < 3200$	0	$R < 320$	تابع عضویت بلند (L)

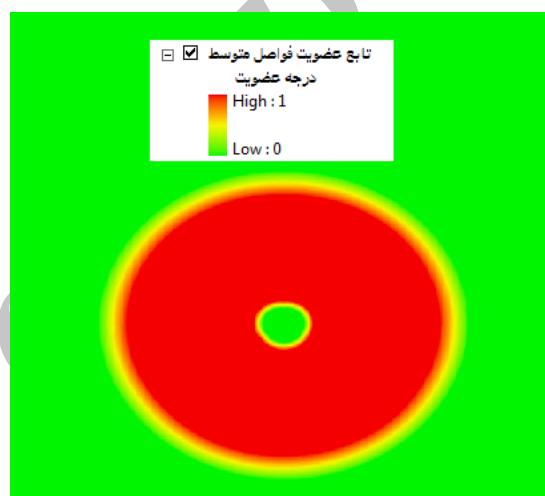
سپس برای سامانه‌های راداری باتوجه به قدرت شناسایی در فواصل مختلف توابع فازی ایجاد می‌شوند (جدول ۳).

در جدول (۳)، نشان داده شده است که نقاطی که فاصله کم‌تری از سامانه راداری دارند، آسیب‌پذیری کم‌تری داشته و با افزایش فاصله از سامانه راداری آسیب‌پذیری افزایش می‌یابد. همچنین، توابع عضویت کوتاه، متوسط و بلند برای هر نقطه در فضا تعریف می‌شود (جدول (۴)). در این جدول برای هر یک از توابع فضا به سه قسمت تقسیم شده و درجه عضویت در آن قسمت از فضا مدل شده است.

جدول ۳. توصیف فازی آسیب‌پذیری برای سامانه‌های راداری

توصیف فازی آسیب‌پذیری	فاصله از سامانه‌های راداری
کم	$X < 1000$
متوسط	$1000 < X < 5000$
زیاد	$5000 < X$

شکل (۹) درجه عضویت برای تابع عضویت متوسط فاصله از زیرساخت را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل مشاهده می‌شود در مناطق قرمز رنگ درجه عضویت ۱ بوده و باتوجه به دور شدن یا نزدیک شدن به زیرساخت صفر می‌شود.



شکل ۹. درجه عضویت برای تابع عضویت متوسط فاصله از زیرساخت

جدول ۴. تعریف توابع عضویت برای نقاط اطراف سامانه باتوجه به قدرت تشخیص سامانه

درجه عضویت	دامنه	درجه عضویت	دامنه	درجه عضویت	دامنه	نوع تابع عضویت سامانه راداری (R)
0	$R > 3200$	$(5000 - R) / 4000$	$1000 < R < 5000$	1	$R < 1000$	تابع عضویت کوتاه (S)
$(5000 - R) / 2000$	$3000 < R < 5000$	$(R - 3000) / 2000$	$1000 < R < 3000$	0	$R < 1000$ $R > 5000$	تابع عضویت متوسط (M)
1	$R > 3200$	$(R - 320) / 2880$	$320 < R < 3200$	0	$R < 320$	تابع عضویت بلند (L)

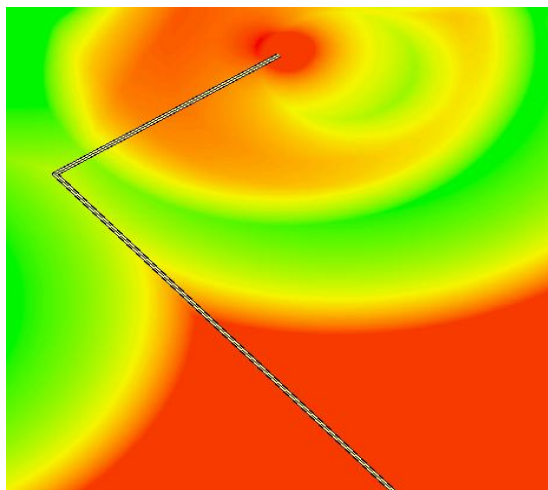
مرحله غیرفازی کردن انجام شود. بیش‌ترین وزن در نظر گرفته‌شده مربوط به قاعده ضرب فاصله کوتاه از سنجنده و فاصله بلند از سامانه راداری است.

در جدول (۵)، وزن نهایی هر یک از قواعد به‌عنوان ورودی‌های نهایی مدل نشان داده شده است. همان‌طور که پیداست، وزن‌های در نظر گرفته‌شده بر اساس طیف فازی بین ۱ تا ۹ می‌باشد تا

جدول ۵. اوزان نهایی قواعد در مدل فازی

قاعده	$H_M \text{ AND } R_M$	$H_S \text{ AND } R_M$	$H_L \text{ AND } R_S$	$H_M \text{ AND } R_S$	$H_S \text{ AND } R_S$
وزن	۵	۶	۱	۴	۵
قاعده	$H_M \text{ AND } R_L$	$H_S \text{ AND } R_L$	$H_L \text{ AND } R_M$	$H_L \text{ AND } R_L$	
وزن	۷	۹	۳	۵	

محدوده کاملاً سبزرنگ می‌باشد. با در نظر گرفتن قدرت مانور تهدیدات هوایی بدون سرنشین امکان عبور از این منطقه نیز وجود دارد. با تغییر موقعیت سامانه‌های شناسایی و استفاده از این مدل در ارزیابی آسیب‌پذیری می‌توان موقعیت بهینه سامانه‌ها را یافت و آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها را کاهش داد.



شکل ۱۱. مسیر قابل استفاده توسط تهدیدات جهت شناسایی

#### ۴. نتیجه‌گیری

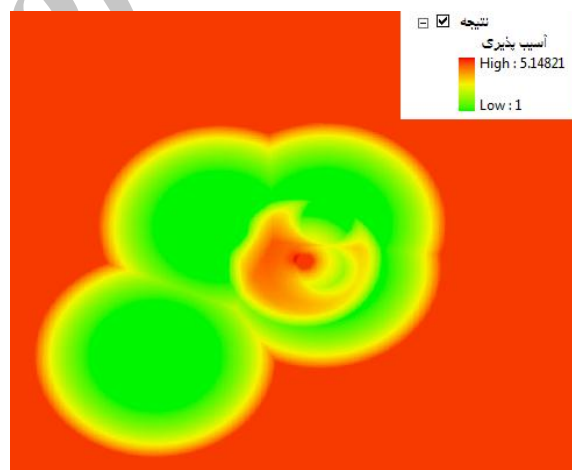
تهدیدات هوایی هوشمند و بدون سرنشین می‌توانند پس از دسترسی به زیرساخت‌ها، آن‌ها را مورد تخریب و انهدام قرار دهند و یا از آن‌ها کسب اطلاعات کنند. یکی از نکاتی که در آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها در نظر گرفته نمی‌شود، بحث کسب اطلاعات از زیرساخت‌ها است. تهدیدات هوایی در مرحله ترمینال با کمک سنجنده‌ها از زیرساخت‌ها کسب اطلاعات می‌کنند. در این تحقیق با تحلیل امواج صوت منتشر شده توسط زیرساخت‌ها و نحوه رفتار سنجنده‌های صوتی در کسب اطلاعات از زیرساخت‌ها و همچنین رفتار سامانه‌های راداری در پوشش فضای اطراف زیرساخت‌ها به ارزیابی آسیب‌پذیری آن‌ها پرداخته شد. نقاطی برای استقرار سامانه‌های شناسایی در نظر گرفته شد و با کمک منطق فازی در چارچوب سامانه اطلاعات مکانی به مدل‌سازی پارامترهای موثر در دسترسی پرداخته شد. در اطراف زیرساخت چهار سامانه شناسایی راداری هوایی بدون سرنشین با موقعیت فرضی در نظر گرفته شد و به ارزیابی آسیب‌پذیری پرداخته شد. نتایج حاصل از این تحقیق با توجه به وجود ۴ سامانه شناسایی در اطراف زیرساخت، موید تنها یک مدخل ورودی برای تهدیدات می‌باشد که در این مدخل نیز احتمال شناسایی تهدید وجود دارد. با جایابی موقعیت سامانه‌های راداری می‌توان آسیب‌پذیری زیرساخت را به کم‌ترین حد ممکن رساند. ارزیابی آسیب‌پذیری در این مسئله به صورت یک نقشه دوبعدی صورت پذیرفت. با در نظر گرفتن رفتار کروی انتشار امواج صوت و سامانه‌های راداری می‌توان نقشه‌های آسیب‌پذیری را در ارتفاعات مختلف ارائه داد که این مسئله به تحقیقات آینده واگذار می‌شود.

پس از وزندهی به قوانین جهت غیرفازی کردن قوانین با یکدیگر ترکیب شده و برای وزن‌های نهایی بازه محدوده‌ها از خیلی آسیب‌پذیر تا کم‌آسیب‌پذیر تعریف می‌شوند. (جدول ۶)

جدول ۶. تعیین درجه آسیب‌پذیری باتوجه به نتایج

تعریف درجه آسیب‌پذیری	توصیف آسیب‌پذیری
$1 < D < 2$	خیلی کم
$2 < D < 3$	کم
$3 < D < 4$	متوسط
$4 < D < 5$	زیاد

جهت ارزیابی میزان آسیب‌پذیری منطقه مورد نظر در برابر تهدیدات هوایی بدون سرنشین، موتور استنتاج فازی ممدانی مورد استفاده قرار گرفته است. با کدنویسی قاعده در محیط GIS و استفاده از موتور استنتاج فازی ممدانی نقشه آسیب‌پذیری مربوط به منطقه نظیر تولید می‌شود. شکل (۱۰) میزان آسیب‌پذیری زیرساخت‌ها باتوجه به موقعیت سامانه‌های شناسایی و انتشار امواج صوت در اطراف دارایی را نشان می‌دهد.



شکل ۱۰. نمای آسیب‌پذیری منطقه‌ای در نظیر

رنگ سبز نشان‌دهنده مناطق دارای آسیب‌پذیری کم‌تر و رنگ قرمز مناطق با آسیب‌پذیری بیش‌تر را نشان می‌دهد. مناطق ناامن درون مناطقی قرار گرفته‌اند که پوشش داده شده‌اند و تهدیدات جهت ورود به این مناطق می‌بایست از محل‌هایی که دارای پوشش هستند عبور کنند. اما در شکل مناطقی وجود دارند که تهدیدات هوایی با ریسک می‌توانند از آنجا وارد محدوده آسیب‌پذیر شده و از دارایی کسب اطلاعات کنند و یا آن را مورد تخریب قرار دهند. این مسیر در شکل (۱۱) نشان داده شده است. مسیر دسترسی در حفاصل بین دو سامانه شناسایی است. دسترسی به زیرساخت‌ها از طریق این مسیر با ریسک همراه است، زیرا در یک قسمت از مسیر آسیب‌پذیری صفر بوده و



## ۵. مراجع

- [12] Lee, G.; Jun, K.; Cung, E. "Group decision-Making Approach for Flood Vulnerability Identification Using the Fuzzy VIKOR Method"; *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions* 2014, 2, 6141-6171.
- [13] Biass, S.; Frischknecht, C.; Bonadonna, C. "A Fast GIS-Based Risk Assessment for Tephra Fallout: The Example of Cotopaxi Volcano, Ecuador"; *Natural Hazards* 2013, 65, 497-521.
- [14] Taramelli, A.; Valentini, E.; Sterlacchini, S. "A GIS-Based Approach for Hurricane Hazard and Vulnerability Assessment in the Cayman Islands"; *Ocean & Coastal Management* 2015, 108, 116-130.
- [15] Azimi-Sadjadi, M. R., Pezeshki, A.; Scharf, L. L.; Hohil, M. E. "Wideband DOA Estimation Algorithms for Multiple Target Detection and Tracking Using Unattended Acoustic Sensors in Defense and Security"; *Proc. SPIE 5417, Unattended/Unmanned Ground, Ocean, and Air Sensor Technologies and Applications VI 2004*.
- [16] Magrab, E. B. "Environmental Noise Control"; Wiley: New York, 1975.
- [17] Sadeghnezhad, A. "Introduction to Radar Systems"; Air Force Press, 2003 (In Persian).
- [18] [18] Curry, G. R. "Radar System Performance Modeling"; Second Edition, Artech House, 2004.
- [19] Li, J.; Chen, L.; Gong, Z.; Xin, S.; Hong, M. "A Low-Noise MEMS Acoustic Vector Sensor"; *IEEE International Conference on Optoelectronics and Microelectronics (ICOM)*, 2013, 121-124.
- [20] Gupta, H.; Das, R. S.; Gu, Q. "Connected Sensor Cover: Self-Organization of Sensor Networks For Efficient Query Execution"; *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 2006, 14, 55-67.
- [21] Gray, S.; Gagnon, A.S.; Gray, S. A.; O'Dwyer, B.; O'Mahony, C.; Muir, D.; Devoy, R. J. N.; Falaleeva, M.; Gault, J. "Are Coastal Managers Detecting the Problem? Assessing Stakeholder Perception of Climate Vulnerability using Fuzzy Cognitive Mapping"; *Ocean & Coastal Management* 2014, 94, 74-89.
- [22] Pathak, D. R.; Hiratsuka, A. "An integrated GIS Based Fuzzy Pattern Recognition Model to Compute Groundwater Vulnerability Index for Decision Making"; *J. Hydro-Environ. Res.* 2011, 5, 63-77.
- [1] Stillion, J.; Orletsky, D. T. "Airbase Vulnerability to Conventional Cruise-Missile and Ballistic-Missile Attacks"; Rand Corporation, 1999.
- [2] Kim, A.; Wampler, B.; Goppert, J.; Hwang, I. "Cyber Attack Vulnerabilities Analysis for Unmanned Aerial Vehicles"; *Infotech@Aerospace* 2012, 1-30.
- [3] Tuma, J.; Janecka, P.; Vala, M.; Richter, L. "Sound Source Localization"; *IEEE 13th International in Carpathian Control Conference* 2012, 740-743.
- [4] Hausamann, P. "UAV Sound Source Localization"; *Computational Neuro Engineering Project Laboratory*, 2014.
- [5] Marmaroli, P.; Falourd, X.; Lissek, H. "A UAV Motor Denoising Technique to Improve Localization of Surrounding Noisy Aircrafts: Proof of Concept For Anti-Collision Systems"; *Acoustics* 2012.
- [6] Ohata, T.; Nakamura, K.; Mizumoto, T.; Taiki, T.; Nakadai, K. "Improvement in outdoor Sound Source Detection Using a Quadrotor-Embedded Microphone Array"; *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*; 2014, 1902-1907.
- [7] Kaushik, B.; Nance, D.; Ahuj, K. K. "A Review of the Role of Acousticsensors in the Modern Battlefield"; *11th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (26th AIAA Aeroacoustics Conference)*, 2015, 1-13.
- [8] Clutter, J. K.; Stahl, M. "Hydrocode Simulations of Air and Water Shocks for Facility Vulnerability Assessments"; *J. Hazard. Mater.* 2004, 106, 9-24.
- [9] Tudor, F. "Role of Customs and Border Cooperation in Fighting the Terrorism Financing and Funding Proliferation"; *Agora Int. J. Juridical Sci.* 2014, 8, 181-183.
- [10] Driels, M. R. "Weaponneering: Conventional Weapon System Effectiveness"; *American Institute of Aeronautics and Astronautics, Virginia*, 2004.
- [11] Martino, F. D.; Sessa, S. "Type-2 Interval Fuzzy Rule-Based Systems in Spatial Analysis"; *Information Sciences* 2014, 279, 199-212.