مجله علمی پژوهشی «علوم و فناوری‌های پدافند غیرعامل»
سال سوم، شماره۳، پاییز ۱۳۹۱؛ ص ۱۹۷-۱۸۷

مدل ترکیبی مکان‌یابی سایت‌های راداری سطحی با ملاحظه پدافند عامل و غیرعامل

سید محسن توحیدی[۱*]، اردشیر احمدی[۲]، حسینعلی حسن پور[۲]
۱- دانشجوی کارشناسی ارشد و ۲- استادیار دانشگاه جامع امام حسین (ع)
(دریافت: ۱۳۹۰/۰۸/۱۵، پذیرش: ۰۶/ ۱۳۹۱/۰۹)

چکیده

تحقیق حاضر تلاشی جهت ارائه یک مدل ریاضی جدید و روش ترکیبی برای حل آن به‌منظور مکان‌یابی سایت‌های راداری سطحی است. در این تحقیق پس از بیان مفاهیم، هدف‌ها و روش‌های مکان‌یابی سایت‌های راداری، مدل ریاضی مسئله‌یابی سایت‌های راداری سطحی ارائه می‌شود. سپس روشی دو مرحله‌ای برای حل این مسئله پیشنهاد می‌شود. در مرحله نخست، مؤلفه‌های معیار برای انتخاب محل استقرار سایت‌های راداری بر مبنای اصول پدافند (غیرعامل و عامل) شناسایی، دسته‌بندی، امتیازدهی و اولویت‌بندی می‌شوند و به سبب آن که مسائل مکان‌یابی از نوع NP-hard هستند، در مرحله دوم از الگوریتم فرا ابتکاری شبیه‌سازی تبرید برای حل مدل ریاضی جدید استفاده می‌شود. در روش حل مسئله، جمع امتیازات اکتسابی توسط هر یک از محل‌های پیشنهادی، تعیین‌کننده اولویت آن محل برای ورود به شبکه راداری است تا تمام حالت‌های ممکن آن توسط الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بررسی شود. همچنین با داده‌های فرضی، مسئله مکان‌یابی سایت‌های راداری سطحی در منطقه خلیج فارس با استفاده از روش ترکیبی پیشنهادی حل می‌شود.

کلیدواژه‌ها: مکان‌یابی، سایت راداری، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی شده، پدافند عامل و غیرعامل.

A Combination Model for Surface Radar Sites Location Considering Active and Passive Defence

S. M. Towhidi[*], A. Ahmadi, H. A. Hassanpour
Imam Hossein University
(Received: 06/11/2011; Accepted: 26/11/2012)

Abstract

In this research a mathematical model for surface radar sites' location and a combination methodology for its resolution are presented. Hence after expressing the related conceptions, the goals and radar sites location method, mathematical model for radar sites location is expressed. Then a two-step method for solving this problem is offered. At the first step, the criteria parameters for selecting radar sites' location based on passive and active defense are identified, classified, scored and prioritized. Since these kinds of problems are NP-hard, simulated annealing algorithm for solving this new mathematical model has been used. In this method the total score for each candidate location determines the position priority for radar network. So all of the possible states for the radar network are survived by stimulated annealing algorithm. Finally, a radar sites' location problem in the Persian Gulf beaches using presented simulated annealing algorithm with hypothesis data has been resolved.

Keywords: Location, Radar Sites, Simulated Annealing Algorithm, Passive and Active Defense.

[*] Corresponding author E-mail: MTS5890@gmail.com

۱. مقدمه

تعیین و شناسایی مکان مناسب برای فعالیت‌ها، کار چندان ساده‌ای نیست. برای این مکان‌یابی برنامه‌ریزان باید عوامل اقتصادی، اجتماعی، سیاسی، محیطی، جمعیتی و در عین حال خط مشی‌های بالادست و هدایت کننده را درنظر داشته باشند. انتخاب مکان‌های بهینه دارای سابقه‌ای طولانی و قدمتی به درازای تاریخ بشری دارد، به‌گونه‌ای که از دوران پیش از تاریخ، یکی از موضوعاتی که ذهن بشر را همواره به‌خود مشغول داشته، انتخاب مکان مناسب برای فعالیت‌ها است.

در تحلیل‌های مکانی، سه دیدگاه و روش وجود دارد: اولین روش، تولید نقشه از محل اشیای فضایی است. برای تولید نقشه از مختصات جغرافیایی استفاده می‌شود و در واقع نقشه ظرفی برای نمایش عوارض سطح زمین به‌شمار می‌آید. در این حالت گردآوری، تهیه و گرفتن داده‌های مکانی کار بسیار مهمی محسوب می‌شود. امروزه با استفاده از سامانه‌های اطلاعات جغرافیایی امکان تولید نقشه‌ها و مدل‌سازی فضایی به‌شکل مناسبی میسر شده است، زیرا این سامانه‌ها دارای قابلیت بالایی برای گردآوری، ذخیره، بازیابی، تحلیل و ترسیم داده‌های مکان محور هستند.

روش دوم به تحلیل داده‌های مکانی مربوط می‌شود. در این روش به‌طور عمده به چرایی یا علت موضوع‌های مکانی می‌پردازند. ضمن آنکه به چرایی چنین تصمیم‌گیری مکانی و چیستی نتایج آن می‌اندیشند. این رهیافت، روش تبیینی نام دارد. این رهیافت به تحول‌های فضایی رخ داده در طی زمان پرداخته و بیان می‌دارد، چه اشیایی در فضا شکل گرفته‌اند و فرایند تکاملی آنها چگونه بوده است.

روش سوم تحلیل‌های مکانی، شناسایی بهترین مکان برای فعالیت مورد نظر، یا بهترین مجموعه مکان‌ها برای سامانه فعالیت‌ها است. به چنین روشی از الگوسازی، روش دستوری یا روش معیاری گفته می‌شود. در این روش مشخص می‌شود که بهترین مکان کجاست و یا اینکه علت شکل‌گیری الگوهای مکانی خاص مورد بررسی چیست؟ به‌عبارتی؛ ویژگی اساسی این گونه مدل‌سازی، یاری رساندن به برنامه‌ریزان و تصمیم‌گیران برای حال و آینده است.

مطالعه‌های مکان‌یابی و علوم مکانی به‌طور معمول بین رشته‌ای است، زیرا اغلب تصمیم‌های اتخاذ شده، به‌نوعی به مکان ارتباط می‌یابند و لازم است مختصات مکانی در تحلیل‌ها درنظر گرفته شود. حوزه مورد بررسی در این تحقیق، تلفیقی است از سه شاخه متفاوت، هرچند که در مواردی نیز به‌هم مرتبطاند، ولی سیر و فرایند تکامل کاملی مستقل از یکدیگر داشته‌اند. این سه شاخه عبارت است از: علم مکان، سامانه اطلاعات جغرافیایی و تحقیق در عملیات.

رادار یک سیستم الکترومغناطیسی متشکل از اجزای آنتن، فرستنده، گیرنده و عنصر آشکارساز انرژی است و به‌منظور توسعه توانایی حس‌های چندگانه انسانی برای مشاهده محیط اطراف به‌ویژه حس بصری به‌کار گرفته می‌شود [۳-۱].

بنابراین رادار وسیله‌ای است که می‌تواند وجود یک شیء یا هدفی را در فضا کشف و مختصات آن را از نظر زاویه و برد با استفاده از امواج الکترومغناطیسی تعیین کند. این امر به‌طور معمول توسط یک سیگنال پالسی با فرکانس معین به‌دست می‌آید. سیگنال مزبور به‌وسیله آنتن که قدرت تعیین قسمتی از فضا در جهت کاوش را دارد، ساطع می‌شود [۲]. با ملاحظه و بررسی پایگاه‌های نظامی قدرت‌های خارجی در منطقه، حضور مستقیم ناوگان‌های کشورهای بزرگ در خلیج فارس، خرید تسلیحات انبوه کشورهای حوزه خلیج فارس، ضرورت و اهمیت مکان‌یابی سایت‌های راداری در این منطقه به‌خوبی آشکار می‌شود. بنابراین این تحقیق تلاش دارد با روشی ترکیبی و جدید و همچنین با داده‌های فرضی، به مکان‌یابی سایت‌های راداری در منطقه خلیج فارس بپردازد. در روش ترکیبی، ابتدا عوامل تأثیرگذار در مکان‌یابی سایت‌های راداری شناسایی، دسته‌بندی و اولویت‌بندی می‌شوند و سپس مدل ریاضی جدید مسئله مکان‌یابی، با استفاده از روش فرا ابتکاری حل می‌شود.

۲. بررسی مدل‌های مکان‌یابی

یکی از مسائلی که می‌بایست در مراحل اولیه طراحی تسهیلات مورد توجه قرار گیرد، مکان‌یابی تسهیلات است. این امر را می‌توان در سه دسته زیر تقسیم‌بندی کرد:

۱) مسئله مکان‌یابی شامل: تعیین مکان یک یا چندین تسهیلات در یک مکان بالقوه است. واضح است تعداد مکان‌ها می‌بایست حداقل با تعداد تسهیلات جدید جای‌گیر شونده، برابر باشد.

۲) مسئله تخصیص: فرض بر این است که تعداد تسهیلات و مکان آنها از قبل مشخص و چگونگی ارائه خدمت به هر مشتری تعیین شود.

۳) مسائل مکان‌یابی– تخصیص: نه تنها تعیین می‌کند که هر مشتری چه مقدار کالا از هر واحد دریافت می‌کند، بلکه تعداد تسهیلات، محل قرارگیری و ظرفیت آنها را نیز مشخص می‌کند.

حل مسائل مکان‌یابی روش‌های متعددی دارد. در این نوشتار به بررسی کلی روش‌های موجود می‌پردازیم:

- تحلیل کیفی

روش رتبه‌بندی موقعیت‌ها، بسیار مورد توجه همه قرار گرفته و یک ابزاری برای تصمیم‌گیری‌های انتزاعی است [۴].

- تحلیل‌های کمی

برای حل مسائل مکان‌یابی یک واحدی در فضای گسسته چندین روش وجود دارد. هر کدام از این روش‌ها، محدودیت‌ها و هدف‌های خاصی دارند. به‌طور مثال، مدل مکان‌یابی MiniMax برای تعیین مکان تسهیلات ارائه کننده خدمات فوری مناسب است. زیرا هدف، کمینه کردن بیشترین فاصله پیموده شده بین واحد و هر مشتری است. به‌طور مشابه، اگر هدف، کمینه کردن کل مسافت طی شده باشد، مدل حمل و نقل مناسب است [۴].

- تحلیل‌های ترکیبی

نقطه ضعف روش کیفی در تصمیم‌گیری مکان‌یابی به‌طور کامل براساس ارزیابی انتزاعی است. با وجود اینکه روش کمی به این نقطه ضعف فائق آمده، اما این امکان را فراهم نمی‌کند تا فاکتورهایی که قابلیت کمی شدن ندارند و در عین حال برای تصمیم‌گیری در مورد

مکان‌یابی تأثیر زیادی دارند، درنظر گرفته شوند. درنتیجه به روش‌هایی نیاز داریم تا علاوه بر درنظر گرفتن هزینه‌های کمی، هزینه‌های انتزاعی و دیگر فاکتورهای مهم را درنظر بگیرند [۴].

۲-۱. انواع مسائل مکان‌یابی و تخصیص

مسائل مکان‌یابی- تخصیص را می‌توان با توجه به ماهیت مسئله مطرح شده به دسته‌های مختلفی طبقه‌بندی کرد. به برخی از این موارد اشاره می شود [۴]:

۱) دسته‌بندی بر مبنای فضای تخصیص
۲) دسته‌بندی بر مبنای ظرفیت سرویس‌دهنده‌ها
۳) دسته‌بندی بر مبنای تقاضا
۴) دسته‌بندی بر مبنای کالا/خدمات قابل ارائه

مدل‌سازی مسئله به دو بخش کلی مدل عمومی و مدل‌های توسعه‌یافته تقسیم می‌شود که به قرار زیر است:

الف) مدل عمومی [۵]

این مسئله اولین بار توسط کوپر در سال ۱۹۶۳ برای مدلی با دو تسهیل جدید و ۷ تسهیل موجود معرفی و حل شد.

برای مدل کردن این گونه مسائل از روش‌های تحقیق در عملیات استفاده می‌شود که هدف آنها حداقل کردن هزینه‌هاست.

ب) مدل‌های توسعه یافته [۸-۶]

مدل عمومی دارای فرضیاتی است که با تغییر یک و یا بیش از یک مورد از آن، مدل‌سازی مسئله نیز تغییر کرده و به‌طور کلی مسائل پیچیده‌تری شکل می‌گیرد که برای حل آن نیازمند استفاده از محاسبات بیشتری هستند. بنابراین مدل‌های مربوط به تغییرات فرض‌های مسئله که در دنیای واقعی بسیار پرکاربردند، در زیر آورده شده‌اند:

۱. استفاده هر مشتری تنها از یک سرویس‌دهنده

در این مدل فرض بر آن است که هر مشتری می‌بایستی تنها با یک سرویس‌دهنده در ارتباط باشد و بنابراین می‌بایستی تمامی نیاز خود را نیز از این سرویس‌دهنده تأمین کند. در واقع در این مدل با تعیین این که کدام مشتری به کدام سرویس‌دهنده باید تخصیص یابد مقدار جریان کالا/خدمات بین سرویس‌دهنده‌ها و مشتریان خود به خود تعیین می‌شود.

۲. درنظر گرفتن هزینه استقرار تسهیلات جدید

در این مدل، تنها فرض دوم مسئله یعنی هزینه استقرار تسهیلات جدید تغییر می‌کند و با درنظر گرفتن این هزینه، در واقع تعیین تعداد سرویس‌دهنده‌ها نیز در مدل گنجانده شده است.

۳. سرویس‌دهنده‌ها با ظرفیت محدود

تاکنون در تمامی مدل‌های مطرح شده، فرض بر آن بود که سرویس‌دهنده‌ها از نظر ظرفیت دچار محدودیت نیستند. بنابراین مشتریان می‌توانند به هر مقدار که بخواهند از سرویس‌دهنده‌ها کالا/خدمات دریافت کنند. در واقع پس از اینکه مسئله حل شد، با توجه به تخصیص‌های مقرر، ظرفیت سرویس‌دهنده‌ها تعیین می‌شود. اما در اکثر مسائلی که در دنیای واقعی وجود دارند، وضع به‌گونه دیگری است و سرویس‌دهنده‌ها تا حد مشخصی می‌توانند سرویس ارائه کنند. به‌طور مثال یک کلانتری نمی‌تواند تمامی شهر تهران را مورد پوشش خود قرار دهد. در این مدل امکان تأمین تقاضای هر مشتری از چند سرویس‌دهنده وجود دارد، هزینه اولیه استقرار هر یک از تسهیلات جدید درنظر گرفته شده، ظرفیت آن تأمین می‌شود، ضمن آنکه ارتباطی بین تسهیلات جدید وجود ندارد.

همان‌طور که نشان داده شد، با تغییر هر یک از مفروضات مدل پایه مکان‌یابی- تخصیص، می‌توان به مدل جدیدی دست یافت که سه نمونه از این مدل‌ها ذکر شد. سایر فرض‌های ذکر نشده نیز می‌توانند دستخوش تغییر شوند. به‌عنوان مثال وقتی فقط تعداد محدودی نقطه برای استقرار تسهیلات جدید وجود داشته باشد، فرض پیوسته بودن فضای جواب نقض می‌شود. بنابراین می‌بایست مدل شایسته آن را طراحی کرد. در واقع این بدان معنی است که شما در دنیای واقعی ممکن است با مسائلی برخورد کنید که منطبق بر هیچ یک از مدل‌های فوق نباشند. این مدل‌ها می‌توانند دید مناسبی به‌طور خاص جهت مدل‌سازی مسئله به شما اعطا کنند. با تغییر مفروضات بالا رویکردهای کارآمدی در علم مکان‌یابی به‌وجود آمده که در ادامه به تعدادی از آنها که بسیار مرتبط با تحقیق جاری است، اشاره می‌شود.

۲-۲. مکان‌یابی با رویکرد مسئله پوشش مجموعه (SCP)[1]

مسئله مکان‌یابی- تخصیص، یکی از مدل‌های تصمیم‌گیری کارا و مؤثر در ارتباط با بحث طراحی قرارگاه‌هاست. براساس این مدل‌ها تعداد بهینه و مکان بهینه استقرار قرارگاه‌های جدید، با توجه به جریان و تعداد حاضر از قرارگاه‌ها و معیار تصمیم مورد نظر، تعیین می‌شود. به‌طوری که حداقل هزینه (مسافت/زمان) یا حداکثر سود عاید بنگاه اقتصادی شود [۹].

مسئله مکان‌یابی- تخصیص، در صدد پاسخگویی به پنج موضوع اساسی زیر است [۹]:

الف- در یک شبکه توزیع، مشتریان و قرارگاه‌ها از قبل وجود دارند، اما در این شبکه چند قرارگاه جدید استقرار می‌یابد؟

ب- قرارگاه‌های جدید در کجا باید مستقر شوند؟

ج- قرارگاه جدید، چقدر باید ظرفیت داشته باشد. به‌عبارتی ظرفیت قرارگاه جدید چقدر است؟

د- هر مشتری چگونه باید به قرارگاه جدید و موجود، تخصیص داده شود. به‌عبارت دیگر، کدام قرارگاه کدامین مشتری را تحت پوشش خدمات خود قرار می‌دهد؟

ه- آیا مشتری می‌تواند تحت پوشش بیش از یک قرارگاه قرار گیرد (تا خدمات دریافت کند)؟

معیاری که بهینگی تخصیص هر مشتری به قرارگاه مورد نظر را تضمین کند، بسیار اساسی است. چرا که هدف اصلی، تحت پوشش قرار گرفتن چندین مشتری (منطقه) توسط قرارگاه‌های موجود یا جدید است. تأسیس آن قرارگاه در آن مکان مستلزم صرف هزینه،

[1] Set Covering Problem

وقت یا ... بوده و لازم است شرط پوشش (مسافت، زمان و ...) را رعایت کرده باشد. در علم مکان‌یابی، این مسئله به «مسئله پوشش مجموعه (SCP)» معروف است.

۲-۳. مسئله مکان‌یابی میانه

مسئله‌های مکان‌یابی میانه یکی از بزرگ‌ترین دسته‌های شناخته شده مسئله‌های مکان‌یابی- تخصیص است. این مسائل در صدد پیدا کردن نقاط میانه در بین نقاط پیشنهادی‌اند و تابع هدف در مسائل میانه از نوع MinSum هستند. در واقع در این مسائل سعی می‌شود مجموع فاصله‌ها (هزینه‌ها) کمینه شود. استقرار سرویس‌های عمومی نظیر مدارس، بیمارستان‌ها، آتش‌نشانی‌ها، آمبولانس‌ها، ایستگاه‌های بازرسی فنی خودرو و... از این گونه مسائل‌اند.

۲-۳-۱. مشخصات مسائل میانه

- در مسائل میانه رابطه بین فاصله (فاصله بین گره تقاضا و تسهیل سرویس‌دهنده) و هزینه، اغلب به‌صورت خطی است. هر چند که در بیشتر موارد درنظر گرفتن یک رابطه غیرخطی در مورد هزینه- فاصله به واقعیت نزدیک‌تر است [۱۰].
- در مسائل میانه، هزینه استقرار برای تسهیلات درنظر گرفته نمی‌شود. باید توجه داشت در صورت در نظر گرفتن هزینه، با یک مسئله مکان‌یابی با هزینه ثابت مواجه خواهیم بود.
- مسائل میانه جزء مسائل برون‌زا هستند. مسائل میانه به‌دلیل فرض عدم وجود هزینه استقرار اولیه اگر درون‌زا درنظر گرفته شوند، جواب به‌دست آمده برای تعداد تسهیلات مناسب با تعداد گره‌های تقاضا (یعنی در هر گره یک تسهیل مستقر شود) برابر خواهد بود.
- در مسائل میانه، مکان‌یابی از نوع شبکه‌ای یا گراف است. مسائل میانه بر روی گراف یا شبکه پیوسته بحث نمی‌شود. یعنی امکان اینکه تسهیل بر روی هر نقطه از شبکه یا گراف مستقر شود، وجود ندارد و فقط امکان استقرار تسهیل بر روی گره‌ها وجود دارد.
- تسهیلات مورد نظر برای استقرار، یکسان فرض می‌شوند. تسهیلات می‌توانند از بعد مالکیت، خصوصی و یا عمومی باشند. در بیشتر موارد این مالکیت عمومی است و تسهیلات جنبه خدماتی دارند.

چنانچه ذکر شد، مسائل میانه جزء مسائل گسسته‌اند که فقط بر روی گره‌ها به‌دنبال جواب می‌گردند. ولی در عمل و دنیای واقعی، برای استفاده از این دسته مسائل، باید مفروضاتی را درنظر گرفت. در جدول (۱) تعدادی از مسائل دنیای واقعی مکان‌یابی معرفی شده است.

۲-۳-۲. مدل کلاسیک مسئله میانه

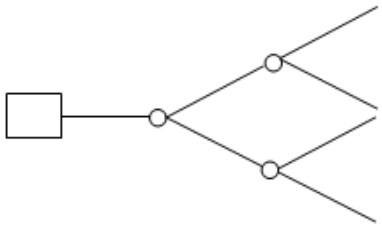
مسائل میانه، از جمله مسائلی هستند که در صدد پیدا کردن مکان P تسهیل بر روی شبکه هستند، به‌گونه‌ای که هزینه کل حداقل شود. منظور از هزینه، هزینه تأمین خدمات یا ارائه سرویس از گره i به نزدیک‌ترین گره‌ای است که در آن تسهیلی مستقر شده باشد [۱۱]. این هزینه به عواملی از قبیل فاصله بین گره سرویس‌دهنده (گره‌ای که در آن تسهیل مستقر شده است) و حجم تقاضای گره iام از تسهیل بستگی دارد.

جدول ۱. مطالعات کاربردی مدل‌های مکان‌یابی با داده‌های واقعی و فرضی

مرجع	فضای کاربردی	داده (سال)
[۱۲]	مکان‌یابی سازمان‌های پیوند عضو	ایتالیا (۲۰۰۶)
[۱۳]	طراحی ساختار لجستیکی برای جمع‌آوری و بازفراوری ضایعات موکت	آلمان (۱۹۹۹)
[۱۴]	برنامه‌ریزی خدمات بهداشتی	انگلیس (۲۰۰۵)
[۱۵]	برنامه‌ریزی تور تسهیلات بهداشتی همراه	سنگال (۲۰۰۷)
[۱۶]	تخلیه پزشکی در نیروی هوایی	داده فرضی (۲۰۰۱)
[۱۷]	مکان‌یابی اعزام آمبولانس‌ها	داده فرضی (۲۰۰۸)
[۱۰]	تعیین مراکز پستی	استرالیا (۲۰۰۶)
[۱۸]	مکان‌یابی محل تسهیلات مربوط به آزمون کارشناسی ارشد	برزیل (۲۰۰۴)

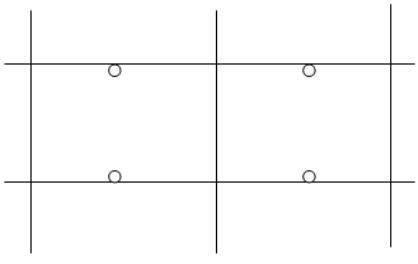
۲-۴. بررسی شبکه‌های راداری و روش‌های مکان‌یابی استقرار سایت‌های راداری

در گذشته شبکه‌های راداری به‌صورت یک الگوی محوری یا شبه هرمی به مانند نمودار شکل (۱) سازمان داده می‌شدند [۳].



شکل ۱. الگوی محوری شبکه‌ها [علامت ○معرف یک مرکز عملیاتی است.]

در این الگو هر مرکز عملیاتی به یک مرکز محلی جمع‌آوری اطلاعات اختصاص داده و فقط به‌همان مرکز اطلاعات ارسال می‌کرد. اشکال الگوی محوری، عدم تبادل اطلاعات توسط مراکز عملیاتی با یکدیگر بود. بنابراین برای رفع این اشکال الگوی ماتریسی ارائه شد [۳].
نمودار شکل (۲) الگوی ماتریسی شبکه‌ها را نمایش می‌دهد. این الگو، دسترسی به اطلاعات هر مرکز عملیاتی را از چند راه ممکن می‌سازد.



شکل ۲. الگوی ماتریسی شبکه‌ها

در اصل الگوی ماتریسی شبکه‌های راداری به‌طور ذاتی بسیار پیچیده و به‌طور معمول بسیار گسترده‌اند. آنها لازم است از مرکز اصلی شبکه به مراکز محلی جمع‌آوری اطلاعات و همچنین به مراکز عملیاتی که ممکن است در فاصله دور یا نزدیک، در فضا یا روی زمین و یا حتی زیر سطح دریا باشند را پوشش دهند. امروزه به‌طور معمول از شبکه‌های مختلط راداری استفاده می‌شود. در شبکه‌های مختلط راداری از هر دو الگوی محوری و ماتریسی برای مکان‌یابی محل استقرار سایت‌های راداری استفاده می‌شود [۱۹]. در تحقیق حاضر نیز شبکه‌های مختلط را مدنظر قرار داده و برای مدل‌سازی مسئله از شبکه‌های موجود استفاده شده است.

پژوهشگران (NRL)[1] کشور آلمان در سال ۱۹۳۳ پیشنهادی ارائه کردند. این پیشنهاد مبتنی بر این است که در موقع استفاده از سایت‌های راداری به‌صورت زنجیره‌ای، از ایستگاه‌های فرستنده و گیرنده در طول یک خط می‌توان اطلاعاتی در مورد فاصله و سرعت به‌دست آورد. در سال ۱۹۳۷ یک سری از ایستگاه‌های زنجیره‌ای رادار (CHR)[2] در کشور بریتانیا با موفقیت در معرض نمایش قرار گرفت. بسیاری از این ایستگاه‌ها در سپتامبر ۱۹۳۸ فعال شدند، مسیر هواپیماهای نوبل چمبرلن، نخست وزیر وقت بریتانیا را که برای مشورت با هیتلر و موسولینی به مونیخ می‌رفت، ترسیم کردند. در همان ماه ایستگاه‌های راداری CHR مأموریت خود را شروع کردند. در سال ۱۹۴۰ مسئولیت تحقیق در زمینه کاربرد رادارهای ماکروویو به‌عهده آزمایشگاه تشعشع تحت نظر دانشگاه MIT گذاشته شد [۲-۱].

در تحقیقات مربوط به کاربردهای رادارها از چگونگی به‌کارگیری این سیستم‌ها صحبتی نبود. بعدها مطرح شد که برای به‌کارگیری رادارها جهت کسب اطلاعاتی چون: فاصله و سرعت هواپیماها، لازم است این سیستم‌ها در نقطه‌ای بالاتر از سطح زمین قرار گیرد. بنابراین دو موضوع در به‌کارگیری رادارها اهمیت پیدا کرد. مورد اول استفاده زنجیره‌ای از ایستگاه‌های راداری و مورد دیگر قرار دادن سیستم‌های راداری در نقاط مرتفع و بالاتر از سطح زمین بود.

۲-۴-۱. روش ارتفاع

در طول جنگ جهانی دوم آلمانی‌ها چند نوع رادار ساختند و پی بردند که: برای کاربرد رادارهای زمینی، به‌عنوان جستجوگر هوایی می‌بایست آنتن فرستنده و گیرنده رادارها در محل‌هایی قرار گیرند که محدوده بالای سطح زمین و حتی کمی بالاتر از سطح زمین را پوشش داده وکاوش کنند. این وضعیت در صورتی امکان‌پذیر است که اشعه ساطع شده توسط فرستنده رادار از نقطه‌ای بالاتر از سطح زمین ساطع شود [۳-۱].

۲-۴-۲. روش پرسشنامه

همان‌گونه که اشاره شد، از سال ۱۹۴۰ آزمایشگاه‌های آمریکا توجه خود را بر روی توسعه رادار و کاربردهای آن معطوف کردند. بعد از جنگ جهانی دوم با تألیف کتاب «دستگاه‌های تاریکی» توسط پرایس -که شرحی جالب از جنگ الکترونیک در جنگ جهانی دوم بود- ارتش آمریکا در استقرار رادارهای زمینی و انتخاب محل استقرار این رادارها از پرسشنامه استفاده کرد. اساس کار در روش پرسشنامه، مبتنی بر دیاگرام پوششی رادارها بود [۳].

جدول (۲) به مقایسه دو روش ارتفاع و پرسشنامه می‌پردازد.

جدول ۲. مقایسه روش‌های مکان‌یابی سایت‌های راداری

ردیف	روش مکان‌یابی	پوشش در ارتفاعات پست	پوشش در منطقه	قابلیت پشتیبانی	پوشش در ارتفاعات بالا
۱	ارتفاع	بدون پوشش	مقدورات سیستم	سخت	محدود
۲	پرسشنامه	به‌نسبت خوب	مقدورات سیستم	مناسب	محدود

با دقت بیشتر در روش‌های مکان‌یابی محل استقرار سایت‌های راداری پی خواهیم برد که در این روش‌ها برای انتخاب محل استقراری سایت راداری بسیار مهم است و چگونگی تأثیر محل انتخابی بر روی ساختار شبکه موجود، قبل از استقرار سایت راداری در محل‌های پیشنهادی یا محل انتخابی، بررسی نمی‌شوند. ورود هر سیستم راداری، ساختارهای جدیدی را برای شبکه به‌وجود خواهد آورد. ورود سیستم جدید به شبکه راداری و عدم سازگاری با آن مستلزم تغییراتی در ساختار آن شبکه است. این اشکال بیشتر در کشورهای مصرف کننده سیستم‌های راداری که خود از تکنولوژی ساخت رادار برخوردار نیستند، مشهود است. سازندگان سیستم‌های راداری براساس نیاز و مقدورات خود به طراحی و تولید یک سیستم می‌پردازند. تحقیق حاضر پس از بررسی معیارهای لازم در انتخاب محل استقرار یک سیستم راداری، محل‌های پیشنهادی را براساس این معیارها اولویت‌بندی نموده تا بتوان کلیه حالت‌های امکان‌پذیر شبکه را مورد مطالعه و بررسی قرار داد.

۳. مدل‌سازی مسئله مکان‌یابی سایت‌های راداری

تحقیق حاضر سعی دارد که با انتخاب هر محل پیشنهادی، آن محل را به‌صورت فرضی وارد شبکه راداری کند و درنتیجه به بررسی ساختارهای جدید شبکه بپردازد. در صورتی که شبکه قادر به تطبیق و پاسخگویی به تغییرات باشد، می‌توان با به‌کارگیری الگوریتم شبیه‌سازی تبرید یک ساختار نزدیک به بهینه از بین ساختارهای امکان‌پذیر شبکه راداری انتخاب کرد. هدف از این انتخاب، بیشینه کردن پوشش راداری شبکه با استفاده از سیستم‌های راداری موجود در شبکه است. به‌دلیل سیار بودن اکثر رادارهای سطحی و همچنین تعدد زیاد نقاط پیشنهادی برای مکان‌یابی آنها، نمی‌توان از الگوریتم‌های بهینه‌سازی دقیق استفاده کرد. در این تحقیق از

[1] National Reference Laboratories
[2] Chain Home RADAR

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به‌دلیل کارایی بالای آن استفاده می‌شود که زمان حل را برای ابعاد وسیع مسئله کاهش داده و قدرت و مانور بیشتری را برای استقرار سایت‌های راداری فراهم خواهد کرد.

۳-۱. مدل‌سازی مسئله

در این مسئله، هدف، بیشینه کردن پوشش راداری در یک شبکه است. برای این منظور، دیاگرام پوششی رادارها در تابع هدف قرار می‌گیرد. یعنی تابع هدف بر مبنای دیاگرام پوششی رادارها تعریف شود. یا می‌توان در صورت ثابت بودن دیاگرام پوششی رادارها، تابع هدف را بر مبنای کمینه کردن انحرافات هر یک از مراکز عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات نسبت به مراکز محلی جمع‌آوری اطلاعات تعریف کرد. در این صورت فرض‌هایی را در مدل‌سازی مسئله خواهیم داشت که به‌شرح زیر می‌باشند:

۳-۲. مفروضات مدل

۱- دیاگرام پوششی رادارها به‌شکل دایره و با شعاع مشخص و ثابت درنظر گرفته می‌شود.
۲- شکل انتشار امواج رادارها به‌صورت دوبعدی فرض می‌شود.
۳- در مدل‌سازی مسئله به‌منظور دوبعدی شدن مسئله، ارتفاع محل‌های استقرار سیستم‌های راداری نسبت به سطح دریا، درنظر گرفته نمی‌شود و فقط طول و عرض جغرافیایی محل در مدل منظور می‌شوند.
۴- انتشار امواج در تمامی جهات از توزیع نرمال تبعیت می‌کند.
۵- در این مدل‌سازی هیچ هزینه‌ای اعم از هزینه استقرار یا بهره‌برداری سیستم‌ها درنظر گرفته نمی‌شود، زیرا تابع هدف بر مبنای بیشینه شدن پوشش راداری و دید شبکه راداری طرح شده است.
۶- مقدورات فنی سیستم‌های راداری به‌صورت ثابت و متشابه درنظر گرفته می‌شوند.
۷- تغییرات باندهای فرکانسی رادارها منظور نشده است و فرض می‌شود رادارها در یک باند فرکانسی ثابت و متشابه کار می‌کنند.
۸- در این مدل‌سازی به‌علت دوبعدی شدن مسئله، فقط رادارهای جستجوگر سطحی مدنظر واقع شده است.
۹- تنوع سیستم‌های راداری بر مبنای سازندگان این سیستم‌ها مدنظر نیستند.
۱۰- برد عملیاتی رادارها ثابت و متشابه درنظر گرفته شده است.

۳-۳. متغیرها و پارامترها

نمادهای مدل ارائه شده به‌شرح زیر می‌باشند:
i: نمایانگر مراکز محلی جمع‌آوری اطلاعات است.
j: نمایانگر مراکز عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات است.
Rij: نمایانگر رادار مستقر در مرکز عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات jام بوده که به مرکز محلی جمع‌آوری اطلاعات iام تخصیص داده شده است.
C_i: نمایانگر ظرفیت هر مرکز محلی جمع‌آوری اطلاعات است.
C_j: نمایانگر ظرفیت هر مرکز عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات است.
R_L: نمایانگر شعاع عملیاتی هر مرکز محلی جمع‌آوری اطلاعات است.
T_S: تعداد کل سیستم‌های راداری موجود.
X_i: نمایانگر طول جغرافیایی مرکز محلی جمع‌آوری اطلاعات iام است.
X_j: نمایانگر طول جغرافیایی مرکز عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات jام است.
Y_i: نمایانگر عرض جغرافیایی مرکز محلی جمع‌آوری اطلاعات iام است.
Y_j: نمایانگر عرض جغرافیایی مرکز عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات jام است.

۳-۴. محدودیت‌های مدل

محدودیت‌های مدل عبارت است از:
۱- اختصاص هر مرکز عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات، فقط به یک مرکز محلی مجاز است. این مرکز برگرفته از مدل‌های توسعه یافته مکان‌یابی- تخصیص است و بیان می‌کند: هر سرویس‌دهنده تنها می‌تواند به یک مشتری خدمات ارائه دهد [۸-۶].

$$\sum_{i=1}^{n} R_{ij} \le 1,\ j = 1,2,...,m \qquad \forall j \qquad (۱)$$

مجموع مراکز عملیاتی اختصاص داده شده به هر مرکز جمع‌آوری اطلاعات، برابر یا کمتر از نسبت ظرفیت هر مرکز محلی بر ظرفیت هر مرکز عملیاتی است. این محدودیت با توجه به مدل‌های توسعه یافته مکان‌یابی- تخصیص که نشان‌دهنده ظرفیت سرویس‌دهنده‌ها بوده، برگزیده شده است [۸-۶].

$$\sum_{j=1}^{m} R_{ij} \le \frac{C_i}{C_j} \quad ,i=1,2,\ldots,n \quad \forall i \qquad (۲)$$

۲- حفظ هم‌جواری مراکز عملیاتی اختصاص داده شده به یک مرکز محلی جمع‌آوری اطلاعات الزامی است. این محدودیت نشان‌دهنده بیشینه شعاع پوششی است که یک مرکز عملیاتی قادر به دریافت اطلاعات آن است.

$$\left[(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2\right]^{\frac{1}{2}} \times R_{ij} \le R_L \forall i, j \qquad (۳)$$
$$i=1,2,\ldots\ldots,n \ , j=1,2,\ldots\ldots\ldots,m$$

۳- تعداد مراکز عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات به تعداد سیستم‌های راداری موجود محدود می‌شود. این محدودیت برگرفته از مدل کلاسیک مسئله میانه است [۱۱].

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} R_{ij} \le T_S \qquad (۴)$$

۴- در صورت تخصیص هر مرکز عملیاتی j به هر مرکز جمع‌آوری اطلاعات i برای R_{ij} عدد یک منظور می‌شود در غیر این صورت عدد صفر منظور خواهد شد.

$$R_{ij}=0, \quad i=1,2,\ldots\ldots,n \quad , \quad j=1,2,\ldots\ldots,m \qquad (۵)$$

۳-۵. مدل ریاضی

مدل ریاضی جدید مسئله مکان‌یابی سایت‌های راداری سطحی به‌صورت زیر است:

تابع هدف:

$$R_{Max} = Min\left\{\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m}[(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2]^{\frac{1}{2}} * R_{ij}\right\} \quad (۱)$$

محدودیت‌ها:

$$\sum_{i=1}^{n} R_{ij} \le 1,\ j = 1,2,...,m \qquad \forall j \quad (۲)$$

$$\sum_{j=1}^{m} R_{ij} \le \frac{C_i}{C_j} \quad ,i=1,2,\ldots,n \quad \forall i \quad (۳)$$

$$\left[(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2\right]^{\frac{1}{2}} \times R_{ij} \le R_L \forall i, j \quad (۴)$$

i=1,2,……,n , j=1,2,……,m

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} R_{ij} \le T_S \quad (۵)$$

$R_{ij}=0,\ \ i=1,2,\ldots\ldots,n \quad , \quad j=1,2,\ldots\ldots,m \quad (۶)$

تابع هدف مسئله، بیشینه‌سازی پوشش رادارها است که از طریق کمینه کردن فاصله مراکز عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات از مراکز محلی جمع‌آوری اطلاعات امکان‌پذیر شده است. محدودیت‌ها هم در بخش (۳-۴) معرفی شدند.

۴. روش ترکیبی حل مسئله

در این تحقیق از روش ترکیبی جدید برای مکان‌یابی سایت‌های راداری استفاده می‌شود. در مرحله اول، عوامل تأثیرگذار در مکان‌یابی سایت‌های راداری شناسایی، دسته‌بندی، امتیازدهی و اولویت‌بندی می‌شوند. جمع امتیازات اکتسابی، تعیین کننده اولویت محل برای ورود به شبکه راداری است تا تمام حالت‌های ممکن شبکه راداری در مرحله دوم توسط الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بررسی شوند. این الگوریتم با تخصیص محل انتخابی به یکی از مراکز محلی جمع‌آوری اطلاعات، ساختارهای امکان‌پذیر شبکه راداری را در حالت‌های جدید بررسی می‌کند و به معرفی ساختاری مطلوب و نزدیک به بهینه برای شبکه راداری در وضعیت جدید می‌پردازد.

مدیران و برنامه‌ریزان می‌توانند با به‌کارگیری الگوی پیشنهادی، قبل از صرف هزینه‌های کلان برای استقرار یک سیستم راداری در یک منطقه، تمامی شرایط و اصول پدافند عامل و غیرعامل اعم از شرایط جوی، جغرافیایی، ارتفاعات موجود در منطقه، نقاط کور راداری، وضعیت پوشش رادار، دسترسی جاده‌ای، مقدورات سیستم و مسائل پشتیبانی و الزامات ارتباطی را درنظر بگیرند.

۵. تعیین اولویت محل‌های پیشنهادی

مؤلفه‌های معیار در انتخاب محل استقرار سیستم‌های راداری در بخش قبل معرفی شدند. در این بخش مؤلفه‌ها به‌صورت مجزا دسته‌بندی و در جداول مختلف جای گذاری می‌شوند. سپس روش تعیین امتیاز برای هر مؤلفه در جداول تشریح خواهد شد. به هر مؤلفه با توجه به شرایط موجود در محل، یک امتیاز خاص منظور می‌شود. امتیاز منظور شده، در ستون مربوطه ثبت خواهد شد. با درنظر گرفتن امتیاز ثبت شده برای هر محل پیشنهادی، رتبه هر یک از محل‌های پیشنهادی، تعیین می‌شود. با تعیین ترتیب اولویت انتخاب محل، هر محل پیشنهادی مطابق اولویت خود به‌صورت فرضی وارد شبکه راداری موجود شده تا حالت‌های امکان‌پذیر و وضعیت‌های احتمالی شبکه توسط الگوریتم شبیه‌سازی تبرید مورد بررسی قرار گیرد. نتیجه اینکه در پایان مکان‌های نزدیک به بهینه، از محل‌های پیشنهادی، توسط الگوریتم شبیه‌سازی تبرید انتخاب خواهد شد.

جدول (۳) برای امتیازدهی و اولویت‌بندی محل‌ها برای ورود به شبکه راداری طراحی شده است.

جدول ۳. بررسی محل‌های پیشنهادی

ردیف	عامل تحت بررسی	ضریب اهمیت	امتیاز محل اول	امتیاز محل دوم
۱	پوشش راداری			
۲	امکان دفاع مؤثر			
۳	پدافند غیرعامل			
۴	حداقل شدن نقاط کور راداری			
۵	تأمین پوشش جانبی و مشترک			
۶	الزامات ارتباطی			
۷	عوارض زمین			
۸	مسائل پشتیبانی			
۹	انعطاف پذیری			
۱۰	امکانات پرسنلی			
۱۱	جمع امتیازها			

در ستون دوم این جدول، مؤلفه اصلی مکان‌یابی سایت‌های راداری دسته‌بندی شده است. در ستون سوم، ضریب اهمیت هر مؤلفه ثبت می‌شود. در ضمن، ضریب اهمیت هر یک از مؤلفه‌ها از طریق پرسشنامه به‌وسیله خبرگان تعیین می‌شوند. در ستون‌های بعد، امتیاز هر محل پیشنهادی متناظر با مؤلفه درج می‌شود. امتیاز اختصاصی به هر مؤلفه می‌تواند اعداد ۰، ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰ باشد. امتیاز هر مؤلفه در ضریب اهمیت هر عامل ضرب شده و درنهایت در سطر آخر این جدول جمع امتیازهای هر محل پیشنهادی ثبت می‌شود تا بتوان با مقایسه جمع امتیازها ترتیب اولویت محل‌های پیشنهادی را به‌صورت نزولی به‌دست آورد.

اولویت محل‌های پیشنهادی، جهت انجام ادامه بررسی‌های بعدی برای هر محل پیشنهادی به‌منظور تخصیص آن محل به هر یک از مراکز محلی جمع‌آوری اطلاعات راداری و همچنین ورود آن محل به شبکه راداری خواهد بود.

۶. حل مدل پیشنهادی

مدل ریاضی جدید مسئله مکان‌یابی محل استقرار سیستم‌های راداری در بخش (۳) ارائه شد. در این بخش یک مسئله نمونه با داده‌های فرضی با استفاده از روش پیشنهادی حل و نتیجه‌های آن تحلیل می‌شود. برای حل مسئله نمونه، بخشی از شبکه راداری در منطقه خلیج فارس به‌عنوان شبکه موجود مد نظر قرار می‌گیرد. شبکه مورد بررسی تعداد ۵ محل واقع در ۵ جزیره مختلف را شامل خواهد شد. این ۵ جزیره عبارت است از: قشم، لارک، هرمز، هنگام و جزیره پنجم یکی از دو محل پیشنهادی یعنی ابوموسی و تنب بزرگ می‌باشند. با این فرض که محل‌های پیشنهادی، جزء شبکه راداری کشور نبوده و هیچ سیستم راداری نیز در آن محل‌ها مستقر نیست. تصمیم این است که یکی از دو جزیره پیشنهادی، به‌منظور محل استقرار یک سیستم راداری، انتخاب و وارد شبکه راداری کشور شود. بر همین اساس دو جزیره لارک و قشم را به‌عنوان مراکز محلی جمع‌آوری اطلاعات تعیین کرده و بقیه جزیره‌های فوق به‌عنوان مراکز عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات به این دو جزیره طوری تخصیص داده می‌شوند که مطابق تابع هدف، بیشترین پوشش راداری را در شبکه دارا بوده و تمام محدودیت‌های ذکر شده در قسمت مدل‌سازی مسئله تأمین شود. بنابراین جزیره‌های ابوموسی و تنب بزرگ با موقعیت جغرافیایی مشخص به‌عنوان محل‌های پیشنهادی برای استقرار یک سیستم راداری اند که با حل مسئله بر مبنای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید، بهترین مکان برای استقرار سیستم راداری انتخاب می‌شوند.

فرض می‌شود که اطلاعات محل‌های پیشنهادی توسط متخصصین جمع‌آوری شده و مطابق جدول (۳) بر مبنای ده، مؤلفه معیار امتیازدهی شده‌اند و این دو محل پیشنهادی به‌صورت زیر اولویت‌بندی شده‌اند:

۱- ابوموسی

۲- تنب بزرگ.

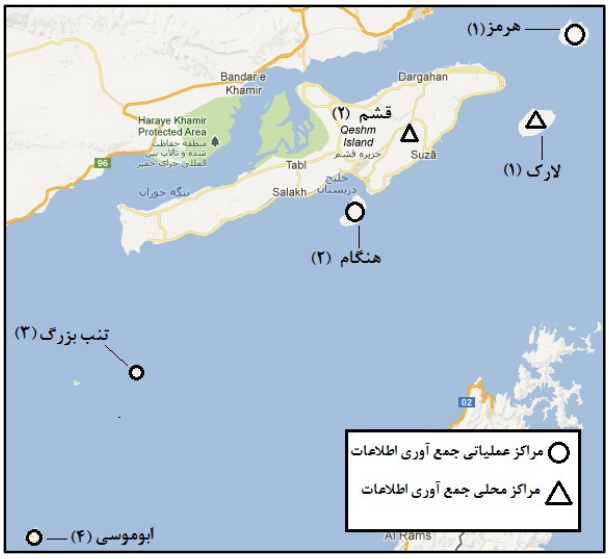
حال تابع هدف مسئله و محدودیت‌های آن مشخص می‌شوند. تابع هدف مطابق با معادله (۱) می‌باشد که در این مسئله نمونه به صورت زیر است:

$$R_{Max} = MIN\ \{[(X_1 - X_1)^2 + (Y_1 - Y_1)^2]^{\frac{1}{2}} \times R_{11} +$$
$$[(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2]^{\frac{1}{2}} \times R_{12} +$$
$$[(X_1 - X_3)^2 + (Y_1 - Y_3)^2]^{\frac{1}{2}} \times R_{13} +$$
$$[(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2]^{\frac{1}{2}} \times R_{21} +$$
$$[(X_2 - X_2)^2 + (Y_2 - Y_2)^2]^{\frac{1}{2}} \times R_{22} +$$
$$[(X_2 - X_3)^2 + (Y_2 - Y_3)^2]^{\frac{1}{2}} \times R_{23}\}$$

در تابع هدف فوق X نشان‌دهنده طول جغرافیایی یک نقطه و Y نشان‌دهنده عرض جغرافیایی یک نقطه است. اندیس i=۱ نشان‌دهنده مرکز محلی جمع‌آوری اطلاعات ۱ است که در این مسئله جزیره لارک می‌باشد. اندیس i=۲ نشان‌دهنده مرکز محلی جمع‌آوری اطلاعات ۲ است که در این مسئله جزیره قشم است. اعداد اندیس هر کدام نشان‌دهنده یک مرکز عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات است.

اندیس j=۱ نشان‌دهنده مرکز عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات واقع در جزیره هرمز، اندیس j=۲ نشان‌دهنده مرکز عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات واقع در جزیره هنگام، اندیس j=۳ نشان‌دهنده مرکز عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات فرضی واقع در یکی از دو جزیره کاندیدا (یعنی جزایر ابوموسی و تنب بزرگ) است، در شکل (۳) مراکز محلی و عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات راداری نمایش داده شده است.

در تابع، R_{ij} نمایانگر رادار مستقر در مرکز عملیاتی jام که به مرکز محلی جمع‌آوری اطلاعات iام تخصیص داده شده است.



شکل ۳. مراکز فرضی محلی و عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات راداری

محدودیت‌های مسئله طبق مدل کلی ارائه شده به‌شرح زیر می‌باشند:

۱- اختصاص هر مرکز عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات، فقط به یک مرکز محلی جمع‌آوری اطلاعات مجاز است.

$$\sum_{i=1}^{n} R_{ij} \le 1,\ j = 1,2,...,m$$

این محدودیت در مسئله به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$R_{11}+R_{21}\ge 0$, $R_{11}+R_{21}\le 1$, $R_{12}+R_{22}\ge 0$, $R_{12}+R_{22}\le 1$, $R_{13}+R_{23}\ge 0$, $R_{13}+R_{23}\le 1$

در این مسئله از دو محل واقع در جزایر لارک و قشم به‌عنوان مراکز محلی جمع‌آوری اطلاعات استفاده می‌شود.

۲- مجموع مراکز عملیاتی اختصاص داده شده به هر مرکز جمع‌آوری اطلاعات، برابر یا کمتر از نسبت ظرفیت هر مرکز محلی به ظرفیت هر مرکز عملیاتی است.

$$\sum_{j=1}^{m} R_{ij} \le \frac{C_i}{C_j},\ i=1,2,\ldots,n\ \ \forall i$$

این محدودیت در این مسئله به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

طبق ظرفیت تعیین شده برای هر مرکز محلی جمع‌آوری اطلاعات، حداقل یک و حداکثر دو مرکز عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات را می‌توان به هر مرکز محلی جمع‌آوری اطلاعات تخصیص داد.

$R_{11}+R_{12}+R_{13}\ge 1$, $R_{11}+R_{12}+R_{13}\le 2$, $R_{21}+R_{22}+R_{23}\ge 1$, $R_{21}+R_{22}+R_{23}\le 2$

۳- حفظ هم‌جواری مراکز عملیاتی اختصاص داده شده به یک مرکز محلی جمع‌آوری اطلاعات الزامی است.

$$\left[(X_i - X_j)^2 + (Y_i - Y_j)^2\right]^{\frac{1}{2}} \times R_{ij} \le R_L$$

i=1,2,……,n , j=1,2,…….,m

$$\left[(X_1 - X_1)^2 + (Y_1 - Y_1)^2\right]^{\frac{1}{2}} \times R_{11} \le 400$$

$$\left[(X_1 - X_2)^2 + (Y_1 - Y_2)^2\right]^{\frac{1}{2}} \times R_{12} \le 400$$

$$\left[(X_1 - X_3)^2 + (Y_1 - Y_3)^2\right]^{\frac{1}{2}} \times R_{13} \le 400$$

$$\left[(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2\right]^{\frac{1}{2}} \times R_{21} \le 400$$

$$\left[(X_2 - X_2)^2 + (Y_2 - Y_2)^2\right]^{\frac{1}{2}} \times R_{22} \le 400$$

$$\left[(X_2 - X_3)^2 + (Y_2 - Y_3)^2\right]^{\frac{1}{2}} \times R_{23} \le 400$$

۴- تعداد مراکز عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات به تعداد سیستم‌های راداری موجود محدود می‌شود.

$$\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{m} R_{ij} \le T_S$$

این محدودیت در مسئله به‌صورت زیر تعریف می‌شود:

$R_{11}+R_{12}+ R_{13} + R_{21}+R_{22} +R_{23} \ge ۲$

$R_{11}+R_{12}+ R_{13} + R_{21}+R_{22} +R_{23} \le ۳$

۵- در صورت تخصیص هر مرکز عملیاتی j به هر مرکز جمع‌آوری اطلاعات i برای R_{ij} عدد یک منظور می‌شود، در غیر این صورت عدد صفر منظور خواهد شد.

$R_{ij}=0, \quad i=1,2 , \quad j=1,2,……,5$

تابع هدف و محدودیت‌های مسئله به‌طور واضح مشخص شدند، اکنون به‌تشریح عملکرد الگوریتم پیشنهادی پرداخته می‌شود. تمامی حالت‌های ممکن برای مسئله، مجموعه جواب‌های مسئله را تشکیل می‌دهند. الگوریتم ابتدا یک دمای اولیه T_0 را دریافت کرده و در این دمای اولیه، از بین مجموعه جواب‌ها یا حالت‌های امکان‌پذیر جواب اولیه‌ای به‌صورت تصادفی انتخاب می‌کند. به‌عنوان نمونه برای این کار مطابق جدول (۴) دو محل واقع در جزایر لارک (۱) و قشم (۲) را به‌عنوان دو مرکز محلی جمع‌آوری اطلاعات انتخاب کرده و این دو محل ستون اول جدول را تشکیل می‌دهند و تعداد ۴ محل تعیین شده به‌ترتیب شماره در سطر اول جدول قرار می‌گیرند و باید درنظر داشت که محل پنجم یکی از دو شماره ۳ یا ۴ هستند که هر یک محل‌های واقع در دو جزیره کاندیدا بوده و بهتر است از محلی شروع شود که امتیاز بیشتر را به‌خود اختصاص داده است. مختصات جزایر بدین شرح می‌باشند:

۱- هرمز به مختصات جغرافیایی ۲۵ درجه و ۳۰ دقیقه شمالی و ۲۳ درجه و ۴۰ دقیقه شرقی

۲- هنگام به مختصات جغرافیایی ۲۶ درجه و ۴۰ دقیقه شمالی و ۵۲ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی

۳- قشم به مختصات جغرافیایی ۲۶ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی و ۵۵ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی

۴- لارک به مختصات جغرافیایی ۲۶ درجه و ۵۰ دقیقه شمالی و ۵۶ درجه و ۲۰ دقیقه شرقی

۵- ابوموسی به مختصات جغرافیایی ۲۵ درجه و ۵۲ دقیقه شمالی و ۵۵ درجه و ۲ دقیقه شرقی

۶- تنب بزرگ به مختصات جغرافیایی ۲۶ درجه و ۳۲ دقیقه شمالی و ۵۵ درجه و ۳۰ دقیقه شرقی

در صورتی که یک مرکز عملیاتی به مرکز محلی جمع‌آوری اطلاعات تخصیص داده شود، در خانه مربوطه به جدول (۴) عدد یک درج خواهد شد، در غیر این صورت عدد صفر درج می‌شود.

جدول ۴. جواب یا حالت اولیه شبکه

عملیاتی / محلی	۱ هرمز	۲ هنگام	۳ ابوموسی	۴ تنب بزرگ
۱ / لارک	۱	۰	۱	۰
۲ / قشم	۰	۱	۰	۰

جدول (۴) جواب اولیه‌ای برای مسئله است.

الگوریتم شبیه‌سازی تبرید این جواب را به‌عنوان جواب بهینه یا Z_O انتخاب کرده و در ادامه به‌دنبال یک جواب همسایه می‌رود، جواب همسایه به‌عنوان جواب جدید یا Z_C درنظر گرفته و سطح انرژی آن محاسبه می‌شود. در مقایسه دو سطح انرژی Z_C و Z_O، در صورتی که Z_C کمتر از Z_O باشد، Z_C را به‌عنوان جواب بهینه انتخاب و جایگزین Z_O می‌شود. در غیر این صورت Z_O به‌عنوان جواب بهینه باقی می‌ماند. الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای اینکه از دام بهینه محلی خارج شود، به‌صورت احتمالی جواب‌های بد را هم انتخاب می‌کند. به‌عبارت دیگر، با احتمال معینی حتی جواب‌هایی که Z_C کمتر از Z_O نیست، به‌عنوان یک جواب پذیرفته می‌شوند. سپس الگوریتم شبیه‌سازی تبرید دمای اولیه T_0 را کاهش داده، تمام مراحل فوق را در دمای جدید اجرا می‌کند، تا اینکه به دمای نهایی T_f رسیده و متوقف می‌شود. در دماهای متفاوت برای هر یک نیز سطح انرژی را محاسبه و با جواب بهینه مقایسه می‌کند [۲۲-۲۱].

جدول (۵) نتایج بررسی حالت‌های امکان‌پذیر شبکه را با ورود فرضی محل‌های کاندیدا با امتیاز برتر به شبکه راداری موجود نشان می‌دهد. ستون اول جدول مربوط به ردیف و ستون دوم اندازه مسئله را بیان می‌کند. در این تحقیق اندازه مسئله ۲×۴ درنظر گرفته شده است. زیرا در این مسئله تعداد ۲ مرکز محلی جمع‌آوری اطلاعات و ۴ مرکز عملیاتی جمع‌آوری اطلاعات وجود دارد. همچنین ۲ مرکز از این ۴ مرکز، کاندیدای مکان‌یابی سایت جدید راداری هستند. ستون سوم ضریب کاهش دما در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید را نشان می‌دهد. لازم به‌ذکر است که این ضریب متغیر بوده و تغییرات آن تأثیر بسیار زیادی در دمای اولیه و زمان رسیدن به جواب بهینه خواهد داشت. به‌همین منظور در حالت‌های مختلف الگوریتم، با ضریب‌های متفاوت بررسی شده و جواب‌های حاصل و نیز تأثیرات آن بر روی دمای اولیه، در جدول ثبت می‌شود. ستون چهارم دمای اولیه را نشان می‌دهد. این دمای اولیه طوری انتخاب می‌شود که با توجه به ضریب تغییر دمای درنظر گرفته شده، بتوان در زمان مناسبی به جواب بهینه و یا نزدیک به بهینه دست یافت.

جدول ۵. نتایج حاصل با ورود جزیره تنب بزرگ به شبکه راداری

ردیف	اندازه مسئله	M (ضریب کاهش دما)	T (دما)	جزیره بهینه	جواب بهینه
	۴×۲	۰/۹۵	۶۸۰	تنب بزرگ	۰۰۳۶/ ۳۶
	۴×۲	۰/۹	۱۶۰۰۰	تنب بزرگ	۰۰۳۶/ ۳۶
	۴×۲	۰/۸۵	۶۰۰۰۰۰	تنب بزرگ	۰۰۳۶/ ۳۶
	۴×۲	۰/۸	۳۳۰۰۰۰	تنب بزرگ	۰۰۳۶/ ۳۶

با درنظر گرفتن تابع هدف مسئله و با دقت در جدول (۵) چنین نتیجه می‌شود که هر چند محل واقع در جزیره تنب بزرگ، در مرحله کسب امتیاز اولویت دوم را به‌خود اختصاص داده بود، ولی در تست ساختارهای امکان‌پذیر شبکه براساس الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به‌عنوان جواب بهینه تعیین و معرفی شده است. بر اساس این جواب بهینه، بهترین حالت شبکه به‌صورت جدول (۶) است.

جدول ۶. حالت بهینه شبکه با حل مسئله توسط شبیه‌سازی تبرید

عملیاتی / محلی	۱ هرمز	۲ هنگام	۳ ابوموسی	۴ تنب بزرگ
۱ / لارک	۱	۰	۰	۰
۲ / قشم	۰	۱	۰	۱

همچنین با حل مسئله توسط نرم‌افزار Lingo جواب بهینه در جزیره تنب بزرگ قرار می‌گیرد که به مرکز محلی قشم تخصیص می‌یابد. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که الگوریتم شبیه‌سازی تبرید جواب نزدیک به بهینه را پیشنهاد می‌دهد.

۷. اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی

برای مقایسه کیفیت جواب و زمان حل مدل پیشنهادی لازم است مسئله در ابعاد بزرگ حل شود. از این رو جواب دقیق مسئله از طریق نرم‌افزار Lingo 8 با جواب الگوریتم شبیه‌سازی تبرید با نرم‌افزار Matlab 2010 طی چهار مرحله تست و اجرا شد. در هر مرحله زمان مسئله توسط الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بهبود پیدا کرد و کیفیت جواب در ابعاد بسیار وسیع کاهش یافت، اما درصد اختلاف ناچیزی مشاهده شد. از آنجایی که برای مکان‌یابی سایت‌های راداری مهم‌ترین عامل کاهش زمان برای استقرار مدنظر است، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید کمک شایانی در کاهش زمان داشته و جوابی نزدیک به بهینه ارائه می‌دهد.

در جدول (۷) ابعاد گوناگون مسئله تشریح و بیان شده است.

جدول ۷. اعتبارسنجی الگوریتم پیشنهادی

مسئله		P1	P2	P3	P4	متوسط درصد اختلاف
تعداد مراکز محلی		۲	۲	۲	۲	
تعداد مراکز عملیاتی		۱۰	۱۲	۱۵	۲۴	
S.A	تابع هدف	۹۰/۲۵۷۹۳	۱۵۲/۳۶۱۹	۱۷۶/۱۶۷۴	۴۵۰/۵۱۴۵	
	زمان (ثانیه)	کمتر از یک ثانیه	کمتر از یک ثانیه	کمتر از یک ثانیه	کمتر از یک ثانیه	
Lingo 8	تابع هدف	۹۰/۲۵۷۹۳	۱۵۲/۳۶۱۹	۱۷۶/۱۶۷۴	۴۴۶/۴۳۰۶	
	زمان (ثانیه)	کمتر از یک ثانیه	۱	۱	۲	
درصد اختلاف		۰	۰	۰	۰/۹۱	۰/۲۳

۸. نتیجه‌گیری

در این تحقیق، یک مدل ریاضی جدید و یک روش ترکیبی برای مکان‌یابی سایت‌های راداری سطحی ارائه شد. در روش ترکیبی، ابتدا عوامل تأثیرگذار برای انتخاب محل استقرار سایت‌های راداری (بر مبنای اصول پدافند عامل و غیرعامل) دسته‌بندی شدند و سپس محل‌های پیشنهادی برای استقرار، براساس معیارها امتیازدهی و اولویت‌بندی شدند.

در مرحله دوم از الگوریتم فرا ابتکاری شبیه‌سازی تبرید برای حل مدل ریاضی جدید استفاده شد. امتیازدهی در مرحله اول، مبنای اولویت ورود محل به شبکه راداری است تا تمام حالت‌های ممکن شبکه راداری در مرحله دوم توسط الگوریتم شبیه‌سازی تبرید بررسی شود.

همچنین با استفاده از روش ترکیبی (امتیازدهی و شبیه‌سازی تبرید) و با داده‌های فرضی، مسئله مکان‌یابی سایت‌های راداری در منطقه خلیج فارس حل شد. به‌منظور تأیید صحت نتیجه‌ها، مسئله نمونه با نرم‌افزار Lingo حل شد که نتیجه‌های به‌دست آمده منطبق بر نتیجه‌های روش ترکیبی و شبیه‌سازی تبرید است.

برخی از پیشنهادهای برگرفته از این نوشتار به شرح زیر ارائه می‌شود:

۱- عامل ارتفاع در تابع هدف تأثیر داده و مسئله سه‌بعدی شود تا بتوان نقاط کور را بیشتر پوشش داده و به نتیجه‌های مطلوب‌تری دست یافت.

۲- هزینه‌های آماده‌سازی، استقرار و پشتیبانی را می‌توان در مدل تأثیر داد تا به‌عنوان یک عامل کلیدی در استقرار بررسی شود.

۳- این مدل برای انواع مختلف رادار با شعاع و فرکانس‌های مختلف بسط داده شود تا میزان دقت رادار افزایش یابد و پوشش آن بیشینه شود.

۴- از الگوریتم‌های دیگر مثل الگوریتم ژنتیک (G.A) و جستجو ممنوع (T.S) در حل مسئله مکان‌یابی بهینه سایت‌های راداری سطحی استفاده شود.

۵- الگوریتم‌های مختلف به‌منظور حل مسئله مکان‌یابی سایت‌های راداری سطحی در جهت رسیدن به جواب مطلوب در مدت زمان کوتاه‌تر ادغام شود.

۹. منابع

[1] Soleymani, H. M. "Introduction to Radar Systems"; Shahid Beheshti Elect. Research Press, 1991 (In Persian).

[2] Sadeghnezhad, A. "Introduction to Radar Systems"; Air Force Press, 2003 (In Persian).

[3] Hajizadeh, H. "Site Tracking Radar"; Shahid Sattari Univ. Press, 1992 (In Persian).

[4] Heragu, S. S. "Facilities Design"; Boston, PWS Pub. 1997, 32, 221-372.

[5] Cooper, L. "Location-Allocation Problems"; Operations Research 1963, 23, 331-343.

[6] Jian, Zh.; Boading, L. "New Stochastic Models for Capacitated Location-Allocation Problem"; Computer & Industrial Eng. 2003, 45, 111-125.

[7] Salhi, S.; Gamal, M. D. H. "A Genetic Algorithm Based Approach for the Uncapacited Continuous Location-Allocation Problem"; Annals of Operations Research 2003, 31, 203-222.

[8] Liu, C. M.; Kao, R. L.; Wang, A. H. "Solving Location-Allocation Problems with Rectilinear Distances by Simulated Annealing"; J. Operation Research 2005, 45, 1304-1315.

[9] Hassanpour, H. "Design Modeling to Possible Location-Routing and Solutions With Integrated Approach"; Ph.D. Thesis, Imam Hossein Univ., 2008 (In Persian).

[10] Alba, E.; Dominquez, E. "Comparative Analysis of Modern Optimization Tools for the P-Median Problem"; J. Statistics and Computing 2006, 16, 251-260.

[11] Revelle, C.; Swain, R. "Central Facilities Location"; Geographical Analysis 1970, 2, 30-42.

[12] Bruni, M. E.; Conforti; D.; Sicilia; N.; Trotta, S. "A new Organ Transplantation Location-Allocation Policy: A Case Study of Italy"; Health Care Manage Sci. 2006, 9, 125-142.

[13] Louwers, D.; Kip, B. J.; Peters, E.; Souren, F.; Flapper, S. D. P. "A Facility Location- Allocation Model for Reusing Carpet Materials"; Computers & Industrial Eng. 1999, 36, 855-869.

[14] Harper, P. R.; Shahani, A. K. "Gallagher, J. E. and Bowie, C, Planning Health Services with Geographic Considerations: a Stochastic Location-Allocation Approach"; Omega 2005, 33, 141-152.

[15] Doerner, K.; Focke, A.; Gutjahr, W. J. "Multicriteria Tour Planning For Mobile Healthcare Facilities in a Developing Country."; Eur. J. Operational Research 2007, 179, 1078-1096.

[16] Chan, Y.; Carter, W. B; Burnes, M. D. "A Multiple – Depot, Multiple – Vehicle, Location- Routing Problem with Stochastically Processed Demands"; Computers & Operations Research 2001, 28, 803-826.

[17] Rajagoplan, H. K; Saydam, C; Xiao, J. "A Multiperiod Set Covering Location Model for Dynamic Redeployment of Ambulances"; Computers & Operations Research 2008, 35, 814-826.

[18] Teresinha, A. M.; Steiner, A.; Alex, A. "A Genetic Algorithm for Solving a Capacitated P-Median"; Numerical Algorithm 2004, 35, 373 – 388.

[19] Tomoji, C. "Radar Principles"; Iran Univ. Sci. Tech., 1991 (In Persian).

[20] Kamran, H. "Military Geography of Islands"; Society of Geography Iran Press, 2009 (In Persian).

[21] Yildiz, H. "Simulated Annealing & Applications to Scheduling Problems"; Bilkent Univ., 2000.

[22] Persson, P.; Nordeno, S. "Combinatorial Optimization Using Simulated Annealing Applied to Active Noise Control System Configuration"; Active Control J. Combinatorial Optimization 2002, 3, 229-250.

[23] Towhidi, S. M. "Mathematical Modeling for Surface Radar Sites' Location for Persian Gulf Region"; M. Sc. Thesis, Imam Hossein Univ. 2012 (In Persian).