Ind. Manag. Persp. 2023, 13(2), 211-240; doi: 10.48308/JIMP.13.2.211

Industrial Management Perspective

Journal hompage: https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=en

Original Article

Developing a Model to Optimize Maximum Coverage of Roadside Units Placement in Vehicular Ad–hoc Network for Intelligent Transportation System

Ali Mohaghar*, Hojjat Heydarzadeh Moghaddam**, Rohollah Ghasemi***

Abstract

Roadside units are crucial elements of intelligent transportation systems that provide vehicle–vehicle and vehicle–equipment information communication. Due to the high cost of installation, the deployment of roadside units is the most critical. Aim of this study is developing a model to optimize of roadside units placement to achieve maximum coverage. A multi–objective mathematical model presented, based on the three main parameters. These parameters are traffic volume, incident rate and adjacency to important centers, which determine for alternative points. The maximum coverage problem is NP–hard. Consequently, conventional mathematical methods are not accurate for large scale problem. A meta–heuristic method based on the greedy algorithm was developed which conciders marking points as definitive–select or non–selectable. Result of the model were evaluated through testing of three scenarios, 200, 500 and 1000 meters coverage in District 5 of Tehran by using MATLAB and the best one, 1000 meters was chosen with 71% coverage. Observations showed the effect of various parameters such as equipment coverage radius, number of equipment and budget on the results of distribution. This algorithm makes it possible to solve the problem on a large scale by using the geolocation of the candidate points.

Keywords: Roadside Units; Intelligent Transportation System; VANET; Maximum SET Coverage Problem; Location.

How to Cite: Mohaghar, Ali; Heydarzadeh Moghaddam, Hojjat; Ghasemi, Rohollah (2023). Developing a Model to Optimize Maximum Coverage of Roadside Units Placement in Vehicular Ad–hoc Network for Intelligent Transportation System, *Ind. Manag. Persp.*, 13(2), 211-240 (In Persian).

Received: Feb. 19, 2022; Revised: Mar. 17, 2022; Accepted: May. 20, 2022; Published Online: May. 29, 2022.

* Professor, Department of Industrial management, Faculty of management, University of Tehran. Corresponding author. Email: amohaghar@ut.ac.ir

** Ph.D. Candidate, Department of Industrial management, Alborz Campus, University of Tehran.

*** Ph.D. Department of Industrial management, Faculty of management, University of Tehran.

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۴۰۲، دوره ۱۳، شماره ۲، صص ۲۱۱ – ۲۴۰، doi: 10.48308/JIMP.13.2.211

چشم‌انداز مدیریت صنعتی

Journal hompage: https://jimp.sbu.ac.ir/?lang=fa

نوع مقاله: پژوهشی

ارائه مدلی برای بهینه‌سازی استقرار تجهیزات کنارجاده‌ای در شبکه خودرویی سیستم حمل‌ونقل هوشمند به‌منظور حداکثری‌سازی پوشش شبکه

علی محقر*، حجت حیدرزاده مقدم**، روح‌الله قاسمی***[۱]

چکیده

تجهیزات کنارجاده‌ای از اجزای اصلی سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند هستند که ارتباط اطلاعاتی خودرو ـ خودرو و خودرو ـ تجهیزات را فراهم می‌سازند. با توجه به گران‌بودن، چالش مهم استقرار تجهیزات است. هدف پژوهش حاضر، مدل‌سازی استقرار بهینه تجهیزات کنارجاده‌ای برای دستیابی به حداکثر پوشش است. یک مدل ریاضی چندهدفه بر اساس سه پارامتر اصلی حجم ترافیک، نرخ سوانح و نزدیکی به مراکز (تجاری، اورژانسی و غیره) نقاط کاندیدا، ارائه شده است. با توجه به ماهیت NP–Hard مسئله، امکان ارائه روش‌های مرسوم دقیق و کارآمد برای حل در مقیاس بزرگ وجود ندارد. یک روش فراابتکاری مبتنی بر الگوریتم حریصانه با امکان نشانه‌گذاری نقاط با اولویت انتخاب قطعی و یا غیرقابل‌انتخاب، توسعه داده شد. عملکرد مدل از طریق آزمون سه سناریوی مختلف با شعاع پوششی ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر تجهیزات، در منطقه پنج شهرداری تهران و با نرم‌افزار متلب موردارزیابی قرار گرفت و سناریوی ۱۰۰۰ متر با پوشش امتیازی ۷۱ درصد انتخاب شد. مشاهدات نشان داد که تأثیر پارامترهای مختلف نظیر شعاع پوشش تجهیزات، تعداد تجهیزات و بودجه طرح بر نتایج استقرار تجهیزات تأثیرگذار است. الگوریتم ارائه‌شده با استفاده از موقعیت جغرافیایی نقاط کاندیدا امکان حل مسئله را در مقیاس بزرگ به‌وجود می‌آورد.

کلیدواژه‌ها: تجهیزات کنارجاده‌ای؛ سیستم حمل‌ونقل هوشمند؛ شبکه خودرویی؛ مسئله حداکثر پوشش مجموعه؛ مکان‌یابی.

استناددهی: محقر، علی؛ حیدرزاده مقدم، حجت؛ قاسمی، روح‌الله (۱۴۰۲). ارائه مدلی برای بهینه‌سازی استقرار تجهیزات کنارجاده‌ای در شبکه خودرویی سیستم حمل‌ونقل هوشمند به‌منظور حداکثری‌سازی پوشش شبکه. *چشم‌انداز مدیریت صنعتی*، ۱۳(۲)، ۲۱۱ – ۲۴۰.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۳۰، تاریخ بازنگری: ۱۴۰۰/۱۲/۲۶، تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۳۰، تاریخ اولین انتشار: ۱۴۰۱/۰۳/۰۸.

* استاد، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

نویسنده مسئول: Email: amohaghar@ut.ac.ir

** دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی، پردیس البرز، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

*** دانش‌آموخته دکتری، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت، دانشگاه تهران، تهران، ایران.

Copyright: © 2023 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

۱. مقدمه

با شروع دیجیتالی‌شدن[1] از دهه ۷۰ میلادی و به‌موازات آن استقرار سیستم‌های فناوری اطلاعات، تقریباً همه جنبه‌های زندگی انسان تحت تأثیر قرار گرفت [۱۵]. در نتیجه دیجیتالی‌شدن نوآوری‌های زیادی به‌وجود آمده است که از اینترنت اشیا[2] می‌توان به‌عنوان یکی از این نوآوری‌ها نام برد [۲۱]. استفاده از فناوری‌های نوین در صنایع امروزی ضرورت محسوب می‌شود. این فناوری‌ها در نتیجه ضرورت انطباق محصولات و خدمات با خواسته‌های درحال‌تغییر مشتریان توسعه یافته‌اند [۹].

در دهه‌های اخیر، پیشرفت‌های قابل‌توجه در فناوری ارتباطات بی‌سیم و سیستم‌های اطلاعاتی باعث ظهور فناوری جدیدی به نام «اینترنت اشیا» شده که زندگی بشر را تحت تأثیر قرار داده است. اینترنت اشیا یکی از موضوعات نوظهور در عصر حاضر در زمینه‌های فنی، اجتماعی و مالی است. هدف اصلی اینترنت اشیا، اتصال یک یا چند دستگاه متصل به اینترنت با یکدیگر است [۳۰]. تمرکز اینترنت اشیا بر روی دنیایی به‌هم‌پیوسته است که در آن هر «شیء» به هر «شیء» متصل است [۲]. اینترنت اشیا نیروی محرکه انقلاب در صنعت خودرو و حرکت به سمت خودروهای متصل و خودران[3] است. اینترنت اشیا صنعت خودروسازی را تقویت خواهد کرد و درعین‌حال صنعت خودرو، نمونه موفق و پیشرفته‌ای در اینترنت اشیا خواهد بود [۱۹].

از طرفی ایمنی جاده‌ها یکی از اصلی‌ترین موضوعات جهان است. برای کاهش خطرهای جاده‌ای، فناوری‌های پیشرفته‌ای به‌کار گرفته شده‌اند. خودروهای متصل یکی از این نوآوری‌ها است که می‌تواند اطلاعات ترافیکی مفید را به اشتراک بگذارد و با هشدار، ضمن جلوگیری از تصادفات، مزایای ایمنی زیادی را به‌وجود آورد [۱۳]. علاوه بر مزایای ایمنی، پیشگیری از تصادف می‌تواند عملکرد جریان و تراکم ترافیک را بهبود بخشد [۱۷].

با پیشرفت در ارتباطات بی‌سیم، اکنون می‌توان خودروها را به یکدیگر متصل کرد تا بتوانند با هم ارتباط برقرار کنند. در حوزه خودروهای هوشمند مبتنی بر اینترنت اشیا، فناوری خودروهای متصل، نقش مهمی در فراهم‌آوردن ظرفیت واقعی این خودروها برای جمع‌آوری و نشر داده‌های مربوط به یکدیگر به‌منظور تصمیم‌گیری بهتر و افزایش ایمنی دارند [۲۹]. در شبکه خودرویی[4] هر وسیله نقلیه مجهز به وسیله‌ای است که به آن اجازه می‌دهد تا با سایر اشیا ارتباط برقرار کند و از طریق ارسال پیام‌های ایمنی نظیر هشدار برخورد، گزارش اضطراری، تغییر مسیر و همچنین پیام‌های مدیریت ترافیک، امنیت و سرگرمی، موجب راحتی و بهبود رانندگی شود [۴].

1. Digitalization
2. Internet of Things (IOT)
3. Connected and Autonomous Vehicles
4. Vehicular Ad hoc Network (VANET)

از دیدگاه اقتصادی، حمل‌ونقل نقش مهمی در توسعه اقتصادی کشورها دارد. ازآنجاکه به دلیل تعدد فعالیت‌های حمل‌ونقل، هزینه‌های حمل‌ونقل درصد بالایی از هزینه‌های لجستیک را دربرمی‌گیرد، کارآمدی سیستم‌های حمل‌ونقل از اهمیت زیادی برخوردار است [۲۸]. در سال‌های اخیر، سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند به وسیله‌ای برای حل انواع مسائل ترافیک جاده‌ای تبدیل شده است. در این راستا، شبکه‌های خودرویی به‌عنوان یک راه جالب برای توسعه خدمات سیستم‌های حمل‌ونقل هوشمند، از قبیل برنامه‌های کاربردی ایمنی و غیرایمنی، ظهور پیدا کرده‌اند. این شبکه‌ها عمدتاً از وسایل نقلیه‌ای تشکیل شده‌اند که با یکدیگر و یا با زیرساخت‌ها مانند واحدها و یا تجهیزات کنارجاده‌ای اطلاعات را مبادله می‌کنند. اجزای اصلی شبکه خودرویی شامل واحدها و یا تجهیزات کنارجاده‌ای[1] و تجهیزات داخل خودرو[2] است [۵].

فناوری ارتباطات بی‌سیم خودرو با سایر خودروها و یا زیرساخت این ظرفیت را دارد که کارایی سیستم‌های حمل‌ونقل جاده‌ای را به میزان زیادی بهبود بخشد. این فناوری شامل ارتباط خودرو به خودرو و خودرو به زیرساخت است که به وسایل نقلیه و زیرساخت اجازه می‌دهد تا اطلاعات را در شعاع چندصد متری به‌اشتراک بگذارند [۱۶].

با توجه به وجود محدودیت در برد تجهیزات کنارجاده‌ای و تجهیزات نصب‌شده بر خودروها، هرچقدر تعداد تجهیزات کنارجاده‌ای بیشتر باشد، پوشش مناسبی را به‌وجود خواهد آورد؛ ولی باید توجه داشت که این فناوری نسبتاً جدید بوده و هزینه آن‌ها هنوز زیاد است و استفاده نامحدود از نظر اقتصادی بسیار دشوار و غیرممکن است [۱۰]. هزینه بالای تجهیزات، مسائل مکان‌یابی تجهیزات و یا جابه‌جایی، آن‌ها را به پروژه‌های سرمایه‌گذاری بلندمدت تبدیل کرده است [۲۶].

طبق گزارش‌ها، هزینه هر واحد تجهیز کنار جاده‌ای ساده بین ۱۳۰۰۰ تا ۱۵۰۰۰ دلار است و هزینه بهره‌برداری و نگهداری هر یک از آن‌ها نیز تا ۲۴۰۰ دلار در سال برآورد می‌شود؛ بنابراین یافتن مکان‌های بهینه برای نصب تجهیزات کنارجاده‌ای و استفاده حداکثری از تمامی این تجهیزات ضروری است [۳۹].

استقرار شبکه عمدتاً در محیط‌هایی انجام می‌شود که بتواند حداکثر استفاده از این تجهیزات را به‌وجود آورده و بیشترین نرخ بازده سرمایه‌گذاری را به‌همراه داشته باشد؛ درنتیجه باید بین هزینه‌های سرمایه‌گذاری و پوشش ایجادشده توسط شبکه خودرویی، یک توازن مناسبی صورت پذیرد [۱۰].

اگر تجهیزات کنارجاده‌ای در مکان‌های مناسب مستقر شوند، خودروهای بیشتری در زمان واقعی می‌توانند به آن‌ها متصل شوند و تبادل اطلاعات لازم را انجام دهند. این کار باعث افزایش کارایی شبکه خودرویی و همچنین کاهش هزینه‌های استقرار می‌شود.

---

1. Road Side Units (RSU)
2. On Board Unit (OBU)

بر این اساس، پژوهش حاضر با ارائه مدلی درصدد مکان‌یابی تجهیزات کنارجاده‌ای با تمرکز بر تعیین امتیاز نقاط کاندیدا از طریق پارامترهای بیشتر و همچنین استفاده از امتیاز نقاط کاندیدای هم‌جوار است؛ به‌طوری‌که امکان انتخاب هم‌زمان نقاط هم‌جوار را فراهم کند و در نقطه مقابل همپوشانی نقاط کاندیدای انتخاب‌شده را به حداقل برساند؛ همچنین در این مدل محدودیت‌ها و اولویت‌های فنی و اجتماعی موجود در امکان انتخاب و عدم‌انتخاب نقاط کاندیدا مدنظر قرار گرفته است. این موارد در پژوهش‌های قبلی در نظر گرفته نشده بود. در بخش دوم، مبانی نظری و پیشینه پژوهش ارائه خواهد شد. در بخش سوم، روش‌شناسی پژوهش تعریف و مدل ریاضی پیشنهادی فرموله می‌شود. در بخش چهارم به حل مدل، تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش پرداخته خواهد شد و درنهایت بخش پنجم به نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادها اختصاص دارد.

۲. مبانی نظری و پیشینه پژوهش

مفهوم شبکه خودرویی. شبکه خودرویی فناوری جدیدی است که از وسایل نقلیه به‌عنوان گره برای ایجاد یک شبکه متحرک استفاده می‌کند و هر خودرو را به یک گره بی‌سیم تبدیل می‌کند. این شبکه می‌تواند ایمنی رانندگی را با تبادل اطلاعات حمل‌ونقل در زمان واقعی افزایش دهد و باید پس از اجرا، اطلاعات ایمنی را جمع‌آوری و توزیع کند تا با هشداردادن به رانندگان در مورد خطر، قبل از اینکه واقعاً با آن مواجه شوند، تعداد تصادفات را کاهش دهد [۳۱].

تجهیز کنارجاده‌ای یک دستگاه محاسباتی است که در کنار جاده و در مکان مشخصی مانند تقاطع‌ها نصب‌شده و برای ایجاد اتصال محلی با وسایل نقلیه عبوری مورداستفاده قرار می‌گیرد. این دستگاه متشکل از تجهیزات شبکه‌ای برای ارتباطات بردکوتاه اختصاصی[1] و بر پایه فناوری رادیویی IEEE 802.11p[2] است. به‌طور خاص، تجهیزات کنارجاده‌ای همچنین می‌توانند برای ارتباط با سایر دستگاه‌های شبکه‌ای در سایر شبکه‌های زیرساخت استفاده شوند [۳۵].

تجهیزات داخل خودرو یک دستگاه ردیابی مبتنی بر سامانه موقعیت‌یاب جهانی[3] است که در خودروها برای به‌اشتراک‌گذاری اطلاعات خودرو با تجهیزات کنارجاده‌ای و سایر خودروها نصب می‌شود. این دستگاه از بسیاری از اجزای الکترونیکی مانند پردازنده، حسگر و رابط کاربری تشکیل شده است [۳۵].

1- Dedicated Short-Range Communication (DSRC)
2- Institute of Electrical and Electronics Engineers
3- Global Positioning System (GPS)

مسئله پوشش مجموعه. مسئله پوشش مجموعه یک مسئله اساسی در تحقیق در عملیات است [۲۰]. مسئله پوشش مجموعه مکان نخستین بار توسط حکیمی[1] (۱۹۶۵)، ارائه شد. هدف او یافتن «بهترین» مکان‌ها در یک شبکه خیابانی برای استقرار پلیس به‌منظور پوشش شبکه جاده‌ای بود. اگرچه این مسئله به‌دنبال یافتن نقاط تقاضا در خیابان‌ها بود، حکیمی (۱۹۶۵)، با انتقال تقاضاها به گره‌ها مسئله را حل کرد [۱۲].

پوشش مجموعه یک مسئله رایج در زمینه علوم رایانه‌ای است. پوشش مجموعه به‌معنای انتخاب حداقل تعداد زیرمجموعه‌ها به‌گونه‌ای است که همه عناصر را از یک مجموعه جهانی بپوشاند. عامل اصلی در این فرآیند، کاهش هزینه زیرمجموعه انتخاب‌شده است. کاربردهای مختلفی از پوشش مجموعه وجود دارد [۲۷]

مسائل پوشش حداکثر یکی از مهم‌ترین مسائل مکان‌یابی است که در آن مکان تعدادی تجهیز به‌گونه‌ای تعیین می‌شود که بیشترین مقدار تقاضا را پوشش دهد. این‌گونه مسائل در انتخاب محل مناسب برای استقرار مراکز صنعتی، اقتصادی یا خدماتی کاربردهای فراوانی دارند و یکی از ابزارهای قدرتمند در تصمیم‌گیری مدیران محسوب می‌شوند [۲۵].

روش‌های حل مسائل پوشش مجموعه. الگوریتم‌های مربوط به مسائل بهینه‌سازی معمولاً از یک سری مراحل با مجموعه‌ای از انتخاب‌ها در هر مرحله تشکیل می‌شود [۷].

برای حل این مسئله به‌طور معمول دو راه وجود دارد: رویکردهای دقیق و روش‌های ابتکاری. الگوریتم‌های دقیق آن‌هایی هستند که می‌توانند راه‌حل بهینه برای مسئله بهینه‌سازی ارائه دهند؛ اما در مسائل ترکیبی، روش‌های متداول به‌اندازه کافی کارآمد نیستند؛ به‌ویژه هنگامی که مسئله بزرگ و پیچیده باشد. روش ابتکاری به‌معنای مجموعه‌ای از مراحل است که راه‌حل بهینه را تضمین نمی‌کند. الگوریتم تقریب، الگوریتمی است که پژوهشگر را به‌طور منطقی به یک راه‌حل بهینه نزدیک کند [۲۷].

با توجه به اینکه مسئله حداکثر پوشش[2] یک مسئله NP–hard[3] است، باید یک روش حل اکتشافی و ابتکاری برای حل آن به کار گرفته شود [۶، ۱۹، ۲۵، ۲۷، ۳۸]. مسئله پوشش مجموعه یک مسئله NP–hard به‌معنای واقعی بوده و الگوریتم‌های زیادی نظیر الگوریتم حریصانه[4]، الگوریتم تبرید شبیه‌سازی‌شده[5]، الگوریتم ژنتیک[6] و شبکه‌های عصبی[7] برای حل آن

1. Hakimi
2. Maximum Coverage Problem
3. Non-Deterministic Polynomial-time Hard (NP–hard)
4. Greedy Algorithm
5. Simulated Annealing Algorithm
6. Genetic Algorithm
7. Neural Networks

توسعه داده شده است. الگوریتم حریصانه، طبیعی‌ترین رویکرد اکتشافی برای حل سریع مسائل ترکیبی بزرگ و با امکان کدنویسی است. الگوریتم حریصانه، راه‌حل بهینه و یا تقریب مناسبی از آن را ارائه می‌دهد. ساختار این الگوریتم ساده و در مقایسه با سایر روش‌ها کارآمد بوده و سرعت حل مسئله آن بالا است [۲۰].

پیشینه پژوهش‌ها در حوزه مکان‌یابی و استقرار تجهیزات کنارجاده‌ای. در مبانی نظری، آثار متعددی در خصوص مسائل مربوط به شبکه‌های بی‌سیم خودرویی و مباحث فنی مرتبط با آن با درنظرگرفتن معیارهای متعدد فناورانه ارائه شده است. یکی از موارد مدنظر در این پژوهش‌ها مسئله موقعیت‌یابی فرستنده‌ها است. معیارهای رایج مورداستفاده در این شبکه‌ها عبارت از تعداد فرستنده‌های مستقر، پوشش و اتصال است. برای دستیابی به این اهداف، مسئله استقرار با فرمول‌بندی آن به‌عنوان یک مسئله ترکیبی به‌طور بهینه حل می‌شود. ازآنجاکه راه‌حل بهینه زمان‌بر است، برخی از کارها برای حل تقریباً بهینه مسئله از طریق الگوریتم‌های اکتشافی کارآمد پیشنهاد شده‌اند. برخی از پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه به شرح زیر است:

جیانگ و همکاران[1] (۲۰۲۱)، معیارهایی را برای تعیین کمّیت میزان پیش‌بینی ترافیک موجود به‌وسیله واحدهای کنارجاده‌ای و از طریق ارتباط خودرو ـ زیرساخت ایجاد کرده و از ابزارهای تحلیلی و عددی برای ارزیابی این معیارها به‌عنوان تابعی از موقعیت واحدهای کنارجاده‌ای، محدوده ارتباطی واحدهای کنارجاده‌ای و نرخ نفوذ خودروهای متصل به جاده استفاده کردند و با توسعه استراتژی‌هایی برای استقرار واحدهای کنارجاده‌ای در امتداد بزرگراه‌ها در پی افزایش کارایی پیش‌بینی ترافیک بودند [۱۶].

عبدالکاظم و همکاران[2] (۲۰۲۱) برای جلوگیری از هدررفت داده‌ها، سازوکاری را برای بهینه‌سازی استقرار واحدهای کنارجاده‌ای و بر اساس پروتکل کارآمد ارائه کردند تا در زمان ازدست‌رفتن ارتباط واحدهای کنارجاده‌ای، از تلفن‌های همراه هوشمند به‌عنوان یک پروتکل پشتیبانی استفاده شود [۱].

شیء و همکاران[3] (۲۰۲۰)، الگوریتم جست‌وجوی منطقه‌ای مرکزمحور را برای استقرار واحدهای کنار جاده‌ای در سناریوهای اضطراری ارائه دادند که مکان‌های کاندیدا را برای استقرار در برخی از شبکه‌های جاده‌ای پیدا کرده و سپس برخی از این مکان‌ها را برای نصب نهایی با بودجه مشخص انتخاب می‌کند تا میانگین زمان گزارش پیام‌های اضطراری در شبکه‌های ارتباط خودرو به اشیا را به حداقل برساند [۳۶].

1. Jiang, et al.
2. Abdulkadhim, et al.
3. Shi, et al.

لیانگ و همکاران[1] (۲۰۲۰)، به مسئله بهینه‌سازی استقرار واحد کنارجاده‌ای برای تعیین جریان بهینه ارتباط پرداختند و با درنظرگرفتن خطای جریان ارتباطی ناشی از خطاهای اندازه‌گیری و استنباط، به دنبال بهینه‌سازی استقرار با حداقل‌سازی این خطاها بودند [۲۲].

هئو و همکاران[2] (۲۰۱۹)، با پیشنهاد توازن[3] عملکرد ـ هزینه در استفاده از واحدهای کنارجاده‌ای سیار برای ارتباطات خودرو به اشیا، ایجاد توازن بین هزینه و کارایی استفاده از اتوبوس‌ها به‌عنوان واحدهای کنارجاده‌ای متحرک را بررسی کردند [۱۴].

کیمورا و همکاران[4] (۲۰۱۸)، با ارائه مدلی، عملکرد ارتباطات وسایل نقلیه به زیرساخت را در بزرگراهی که در آن فاصله انتقال بین یک واحد کنارجاده‌ای و یک وسیله نقلیه به‌دلیل حرکت وسایل نقلیه به‌سرعت تغییر می‌کند، بررسی و تحلیل کردند. آن‌ها با تجزیه‌وتحلیل نظریه تداخل دریافت‌شده در تجهیزات کنارجاده‌ای، یک معیار عملکرد مطلوب ارتباطات به‌دست آوردند و با انجام ارزیابی از طریق شبیه‌سازی‌های عددی، اثربخشی دامنه انتقال بهینه نشان داده شد [۱۸].

مک‌کاوی و همکاران[5] (۲۰۱۵)، برای استقرار تجهیزات کنارجاده‌ای الگوریتمی را ارائه دادند که به دنبال حذف همپوشانی میان نواحی تقاضا بود [۲۳]. فاگ و همکاران[6] (۲۰۱۸)، استفاده از الگوریتم ژنتیک را برای استقرار واحدهای کنار جاده‌ای پیشنهاد دادند و الگوریتمی را به‌کار بردند که بر اساس زمان اعلان هشدار (زمان لازم برای اطلاع مراجع شرایط اضطراری در وضعیت خطرناک ترافیکی)، به‌طور خودکار استقرار تجهیزات کنارجاده‌ای مناسب را ارائه دهد [۱۱].

رِیس و همکاران[7] (۲۰۱۸)، از ماشین‌های پارک‌شده به‌عنوان واحدهای کنارجاده‌ای استفاده کردند و سازوکارهای جدیدی را برای پارک‌کردن وسایل نقلیه به‌منظور سازمان‌دهی خودکار و تشکیل شبکه‌های پشتیبانی کارآمد از وسایل نقلیه معرفی کردند تا پوشش گسترده‌ای را برای یک شهر فراهم سازد [۳۲].

ریوس و همکاران[8] (۲۰۱۵)، پیشنهاد قراردادن واحدهای ثابت کنارجاده‌ای را در یک شبکه حمل‌ونقل اتوبوس برای حداکثرکردن احتمال ارتباط آن‌ها ارائه دادند و با محاسبه احتمال ارتباط خودرو با یک واحد کنارجاده‌ای به‌صورت مستقیم و یا از طریق یک خودروی دیگر به دنبال بهینه‌سازی محل استقرار واحدهای کنار جاده‌ای با حداکثر احتمال ارتباط بودند [۳۳].

1. Liang, et al.
2. Heo, et al.
3. Trade Off
4. Kimura, et al.
5. Makkawi, et al.
6. Fogue, et al.
7. Reis, et al.
8. Rios, et al.

صالحی‌کیا و صالح‌نمدی (۱۳۹۶)، مدلی را توسعه دادند تا بر اساس آن بتوان پیام‌ها را در محدوده تأخیر انتشار به واحدهای کنارجاده‌ای انتقال داد و بر اساس تحلیل تأخیر انتشار، در محیط‌های شهری، مسئله جایگذاری بهینه تجهیزات کنار جاده‌ای را اجرا کرد [۳۴].

در سال ۱۳۹۶، با همکاری «سازمان تنظیم مقررات و ارتباطات رادیویی کشور» و «پژوهشگاه ارتباطات و فناوری اطلاعات»، پژوهشی در خصوص الزامات فنی، مقرراتی و سیاست‌گذاری اکوسیستم اینترنت اشیا در کشور ایران صورت گرفت و پیشنهاد راهبردی برای آن ارائه شد که منتج به تصویب طیف فرکانسی شد.

مدل‌های توسعه‌داده‌شده برای استقرار بهینه واحدهای کنارجاده‌ای در جدول ۱، ارائه شده که در این مدل‌ها پارامترهای مختلفی برای طراحی مدل مدنظر قرار گرفته است.

جدول ۱. مرور مبانی نظری و مقایسه مدل‌های ارائه‌شده برای استقرار بهینه واحدهای کنارجاده‌ای بر اساس پارامترهای مورداستفاده

پژوهشگر (سال)	موضوع	تراکم ترافیک	حوادث	ظرفیت خودروها	تلفن همراه	کسب امتیاز از نقاط هم‌جوار	حذف همپوشانی	کاهش همپوشانی
جیانگ و همکاران، (۲۰۲۱)	استقرار واحدهای کنارجاده‌ای برای پیش‌بینی ترافیک	✓		✓				
عبدالکاظم و همکاران، (۲۰۲۱)	بهینه‌سازی استقرار واحدهای کنار جاده‌ای در شبکه با پروتکل کارآمد برای جلوگیری از ازدست‌دادن داده‌ها	✓	✓		✓			
شیء و همکاران، (۲۰۲۰)	الگوریتم جستجوی منطقه مرکز محور برای استقرار واحدهای کنارجاده‌ای در سناریوهای اضطراری	✓	✓	✓				
لیانگ و همکاران، (۲۰۲۰)	بهینه‌سازی مکان واحدهای کنار جاده‌ای برای تعیین بهینه جریان ارتباط	✓		✓				
فاگ و همکاران، (۲۰۱۸)	بهبود استقرار واحدهای کنارجاده‌ای در شبکه‌های خودرویی با بهره‌گیری از الگوریتم ژنتیک		✓					
رِیس و همکاران، (۲۰۱۸)	شهرهای هوشمندتر با ماشین‌های پارک‌شده به‌عنوان واحدهای کنارجاده‌ای	✓		✓				
صالحی‌کیا و صالح‌نمدی،	مکان‌یابی مناسب تجهیزات کنارجاده‌ای شبکه‌های خودرویی با هدف کاهش زمان			✓				

پژوهشگر (سال)	موضوع	تراکم ترافیک	حوادث	ظرفیت خودروها	تلفن همراه	کسب امتیاز از نقاط هم‌جوار	حذف همپوشانی	کاهش همپوشانی
(۱۳۹۶)	تبادل دیتا							
ریوس و همکاران، (۲۰۱۵)	قراردادن واحدهای ثابت کنارجاده‌ای در یک شبکه حمل‌ونقل اتوبوس برای حداکثرکردن ارتباط	✓		✓				
مک‌کاوی و همکاران، (۲۰۱۵)	استقرار واحدهای کنارجاده‌ای با استفاده از روش حریصانه مبتنی بر همپوشانی برای جاده‌ها	✓	✓				✓	
تحقیق حاضر		✓	✓			✓		✓

هدف از این پژوهش، حداکثرکردن پوشش تجهیزات در شبکه خودرویی است. با توجه به جدول ۱، در پژوهش‌های پیشین مدلی که پارامتر هم‌جواری را به‌عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در استقرار مدنظر قرار داده باشد و به‌صورت هم‌زمان انتخاب دو نقطه هم‌جوار را برای استقرار محتمل سازد، ارائه نشده است. دانش‌افزایی این مطالعه از دو بُعد روش‌شناختی و مفهومی است. مشارکت روش‌شناختی شامل تغییراتی در طراحی مطالعات گذشته است و درنتیجه برای تعیین پارامتر و یا اهمیت وزنی اختصاصی هر مکان از ترکیب سه عامل حجم ترافیک، حادثه‌خیزبودن و نزدیکی مراکز مهم (نظیر تجاری و اورژانسی) استفاده شده است؛ درحالی‌که در بیشتر پژوهش‌ها تنها یک عامل و اغلب میزان ترافیک موردنظر بوده است. در دانش‌افزایی مفهومی نیز سازه‌های جدید شناسایی و به چارچوب مفهومی اضافه می‌شود. بر این اساس تخصیص پارامتر تأثیرپذیری از نقاط متقاضی هم‌جوار برای هر نقطه و کاهش همپوشانی نقاط منتخب نهایی از طریق خنثی‌کردن پارامتر تأثیرپذیری برای انتخاب دو نقطه مجاور و همچنین تأثیر محدودیت‌های فنی و اجتماعی از طریق امکان تعیین حداقل فاصله میان نقاط استقرار، انتخاب نقاطی به‌عنوان نقاط با اولویت انتخاب و یا غیرقابل‌انتخاب نیز سهم دانش‌افزایی مفهومی این پژوهش است.

۳. روش‌شناسی پژوهش

بر اساس پیاز فرایند پژوهش، فلسفه پژوهش از نوع اثبات‌گرایی و رویکرد آن قیاسی است [۸]. استراتژی این پژوهش از نوع توصیفی پیمایشی و در مرحله آزمون مدل، کاربردی است. روش پژوهش پیمایشی بوده و گردآوری داده‌ها از طریق مطالعات کتابخانه‌ای شامل بررسی کتاب‌ها،

پایان‌نامه‌ها، مقاله‌ها، پایگاه داده‌ها، سایت‌های اینترنتی، گزارش‌ها و مصاحبه با خبرگان صورت گرفت.

مدل ریاضی استقرار تجهیزات کنارجاده‌ای. در این پژوهش مسئله مکان‌یابی و استقرار تجهیزات کنارجاده‌ای از طریق مسئله حداکثر پوشش مجموعه مدل‌سازی می‌شود. مدل ریاضی مسئله مکان‌یابی حداکثر پوشش، یک مدل بهینه‌سازی کلاسیک از مبانی نظری دانش مکان‌یابی است که توسط چرچ و ریول[1] (۱۹۷۴) ارائه شده است. این مدل به‌دنبال یافتن مکانی برای استقرار تجهیزات است تا پاسخگوی نیازهای عمومی باشند. این مدل در مجموعه متنوعی از حوزه‌های کاربردی از قبیل مکان‌یابی بهینه امکانات، خدمات، وسایل نقلیه اورژانسی، شبکه‌های ارتباطی، فروشگاه‌های خرده‌فروشی و حسگرهای نظارت امنیتی مورداستفاده قرار گرفته است. در این مدل ریاضی با دردست‌داشتن امتیاز هر نقطه متقاضی استقرار تجهیزات که می‌تواند از طریق عوامل مختلفی به‌دست آید، تعداد تجهیزات دردسترس که بر اساس بودجه طرح مشخص می‌شود، می‌توان نقاط استقرار تجهیزات را مشخص کرد [۳۷].

برای ارائه مدل ریاضی به‌منظور استقرار تجهیزات کنارجاده‌ای، مفروضات زیر در نظر گرفته شده است:

۱. در هر سناریو تمامی تجهیزات کنارجاده‌ای مشابه هم بوده و شعاع ارسال و دریافت اطلاعات این تجهیزات یکسان است؛

۲. هزینه صرف‌شده برای دراختیارگرفتن و استفاده از این تجهیزات با یکدیگر برابر است؛

۳. با توجه به اینکه هزینه نصب و راه‌اندازی پروژه استقرار تجهیزات محدود است، تعداد تجهیزات دردسترس محدود خواهد بود.

برای تعیین پارامترهای و محدودیت‌های مدل، علاوه بر بررسی مبانی نظری پژوهش از منظر تجربی و نظری، پارامترها و متغیرهای به‌دست‌آمده از مبانی نظری به تعداد ۸ نفر از خبرگان صنایع خودرو و حمل‌ونقل تشریح شد و پس از انتخاب نهایی پارامترها و متغیرها، مدل ریاضی تدوین شد. در ادامه برای تأیید روایی مدل، روش روایی محتوا به‌کار رفت و با استفاده از نظر خبرگان روایی مدل به‌دست آمد. برای بررسی پایایی مدل نیز تحلیل حساسیت مورداستفاده قرار گرفت و ارزیابی مناسب‌بودن مشخصات مدل و قدرت نتیجه‌گیری آن صورت پذیرفت.

با توجه به مدل پیشنهادی و مفروضات بیان‌شده، مجموعه‌ها، شاخص‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم مسئله برای مدل‌سازی استقرار تجهیزات بر اساس حداکثر پوشش مجموعه به‌صورت زیر است:

1. Church & ReVelle

مجموعه‌های مسئله

S: مجموعه تمام نقاط کاندیدا

$S_{definite}$: مجموعه نقاط با اولویت برای انتخاب ($S_{definite} \subset S$)

$S_{impermissible}$: مجموعه نقاط غیرقابل‌انتخاب ($S_{impermissible} \subset S$)

U: مجموعه انواع تجهیزات

شاخص‌های مسئله

i, j: شاخص مرتبط با نقاط کاندید ($i, j \in S$)

u: شاخص مرتبط با انواع تجهیزات ($u \in U$)

پارامترهای مسئله

Tr_i: امتیاز متأثر از حجم ترافیک نقطه i

Inc_i: امتیاز متأثر از سانحه‌خیزبودن نقطه i

Ip_i: امتیاز متأثر از نزدیکی به محل‌های مهم (مراکز تجاری، مراکز اورژانسی و غیره) نقطه i

tr_i: امتیاز حجم ترافیک موزون نرمال‌شده نقطه i

inc_i: امتیاز سانحه‌خیزی موزون نرمال‌شده نقطه i

ip_i: امتیاز نزدیکی به محل‌های مهم (مراکز تجاری، مراکز اورژانسی و غیره) موزون نرمال‌شده نقطه i

w_{tr}: وزن پارامتر حجم ترافیک

w_{inc}: وزن پارامتر سانحه‌خیزی

w_{ip}: وزن پارامتر نزدیکی به محل‌های مهم (مراکز تجاری، مراکز اورژانسی و غیره)

cs_i: امتیاز تجمعی (موزون نرمال‌شده) نقطه i

pr_i: امتیاز اختصاصی نقطه i

nb_{ij}: امتیاز هم‌جواری (همسایگی) نقطه i از نقطه j

nb_i: امتیاز تجمعی هم‌جواری نقطه i

d_{lim}: حداقل فاصله بین دو تجهیز

d_{ij}: فاصله هاورسین[1] بین دو نقطه i و j

r: شعاع پوشش تجهیزات

rc_i: شعاع بخش متراکم (شعاع کانونی) نقطه i

Af_i: ناحیه متراکم (ناحیه کانونی) نقطه i

1. Haversine

Ar_i: سطح پوشش‌داده‌شده از ناحیه متراکم (کانونی) نقطه i توسط تجهیز نصب‌شده در نقطه i
Ar: حداکثر سطح پوشش توسط یک تجهیز
A_{ij}: سطح همپوشانی تجهیز مستقر در نقطه i با ناحیه متراکم (ناحیه کانونی) نقطه j
R_{earth}: شعاع کره زمین بر حسب متر
$rlat_i$: عرض جغرافیایی نقطه i بر حسب رادیان
$rlong_i$: طول جغرافیایی نقطه i بر حسب رادیان
c_u: هزینه نصب یک تجهیز از نوع u
C: کل بودجه دردسترس

متغیرهای مسئله

x_i: اگر نقطه i برای استقرار تجهیز موردبهره‌برداری قرار گیرد، مقدار آن یک و در غیر این صورت صفر است
$x_i = ۱$: اگر نقطه‌ای با اولویت انتخاب باشد ($i \in S_{definite}$)، مقدار آن قطعا یک است.
$x_i = ۰$: اگر نقطه‌ای غیرقابل‌انتخاب باشد ($i \in S_{impermissible}$)، مقدار آن قطعا صفر است.
y_u: اگر تجهیز نوع u برای استقرار انتخاب شود، مقدار آن یک و در غیر این صورت صفر است.

با توجه به فرضیه‌های ارائه‌شده، مسئله حداکثر پوشش مجموعه برای استقرار تجهیزات کنارجاده‌ای به‌صورت زیر فرموله می‌شود:

رابطه (۱) $$Max\ Z_۱ = \sum_i x_i(pr_i + nb_i)$$

رابطه (۲) $$Min\ Z_۲ : \sum_{i \neq j} x_i x_j nb_{ij}$$

Subject to:

رابطه (۳) $$Ar_i = min(Af_i, Ar)$$

رابطه (۴) $$pr_i = cs_i \times Ar_i$$

رابطه (۵) $$d_{ij} = R_{earth} \times arccos[sin(rlat_i)\, sin(rlat_j) + cos(rlat_i)\, cos(rlat_j)\, cos(rlong_i - rlong_j)]$$

رابطه (۶) $$nb_i = \sum_{i \neq j} nb_{ij}$$

رابطه (۷) $$nb_{ij} = cs_j \times \begin{cases} ۰ & r + rf_j \leq d_{ij} \\ A_{ij} & |r - rf_j| \leq d_{ij} < r + rf_j \\ Ar_j & d_{ij} \leq |r - rf_j| \end{cases}$$

رابطه (۸) $$x_i x_j d_{ij} \geq x_i x_j d_{lim}$$

رابطه (۹) $$x_i = ۰ \quad \forall\, i \in S_{impermissible}$$

$$x_i = ۱ \quad \forall i \in S_{definite}$$ رابطه (۱۰)

$$S_{impermissible}, S_{definite} \subset S$$ رابطه (۱۱)

$$S_{impermissible} \cap S_{definite} = \emptyset$$ رابطه (۱۲)

$$\sum_u y_u \, c_u \sum_i x_i \leq C$$ رابطه (۱۳)

$$\sum_u y_u = ۱$$ رابطه (۱۴)

$$y_u \in \{۰,۱\} \quad \forall u \in U$$ رابطه (۱۵)

$$x_i \in \{۰,۱\}$$ رابطه (۱۶)

در این مدل دو تابع هدف تعریف شده است. رابطه ۱، نخستین تابع هدف است که به حداکثرسازی سطح پوشش تجهیزات می‌پردازد. مطابق مدل ارائه‌شده توسط چرچ و ریول (۱۹۷۴)، به هر نقطه‌ای امتیازی تخصیص داده شده و تابع هدف، حداکثرسازی مجموع امتیازات نقاط استقرار است [۳۷]. در این پژوهش با استفاده از توسعه رابطه ارائه‌شده توسط مک‌کاوی و همکاران (۲۰۱۵)، امتیازدهی به هر نقطه از مجموع معیار اختصاصی[1] (امتیاز کسب‌شده از موقعیت مکانی هر نقطه) و معیار هم‌جواری[2] (امتیاز کسب‌شده از موقعیت مکانی نقاط مجاور هر نقطه) صورت پذیرفته است تا نقاطی برای استقرار انتخاب شوند که علاوه بر پوشش آن نقطه، حداکثر پوشش برای نقاط مجاور را نیز ایجاد کنند [۲۳]. رابطه ۲، دومین تابع هدف است که برای کمّینه‌کردن سطح همپوشانی تجهیزات تعریف شده است. بر این اساس اگرچه در رابطه ۱، معیار همسایگی برای کسب امتیاز از نقاط هم‌جوار مدنظر قرار گرفته است، اما برای کمّینه‌سازی همپوشانی نقاط مجاور و جلوگیری از تکرار این امتیاز در انتخاب دو نقطه همسایه، تابع هدف رابطه ۲، تعریف شده است تا میزان همپوشانی تجهیزات مجاور را به حداقل برساند. بر این اساس در صورتی که تنها یکی از دو نقطه هم‌جوار انتخاب شده باشند، امتیاز هم‌جواری به‌درستی اِعمال شده است؛ ولی در صورتی که دو نقطه هم‌جوار هم‌زمان کاندیدای انتخاب شوند، این تابع سعی در جلوگیری همپوشانی دارد؛ به‌عبارت‌دیگر با توجه به اینکه سطح مشترک بین دو نقطه همسایه، تنها با یک تجهیزی که در هر کدام از این نقاط نصب شود، تحت پوشش قرار می‌گیرد، این تابع هدف از طریق خنثی‌کردن پارامتر تأثیرپذیری در زمان انتخاب هم‌زمان نقاط مجاور، از تکرار تخصیص امتیاز سطح مشترک نقاط مجاور برای این نقاط جلوگیری می‌کند.

همان‌گونه که در بالا به آن اشاره شد، دو پارامتر معیار اختصاصی و معیار نقاط هم‌جوار برای امتیازدهی به نقاط تعیین شده است. روابط ۳ و ۴، معیار اختصاصی را برای هر یک از نقاط مشخص می‌کنند. معیار اختصاصی به‌عنوان یکی از عوامل مهم و تأثیرگذار در انتخاب نقاط

1. Privative (pr)
2. Neighbor (nb)

منتخب برای نصب تجهیزات به ویژگی‌ها و وضعیت جاده‌ها مربوط می‌شود. بر همین اساس باید ویژگی‌هایی مدنظر قرار گیرد تا با انتخاب مکان‌هایی، اهداف تعیین‌شده بر اساس ویژگی‌های موجود تحقق یابد. شاید بتوان موارد متعددی را بسته به هدف برای این موضوع در نظر گرفت. در این پژوهش، معیار اختصاصی برای هر یک از نقاط کاندیدا از سه عامل حجم و فشردگی ترافیک (Tr_i)[1]، حادثه‌خیزبودن نقاط (Inc_i)[2] و نزدیکی به محل‌ها و مراکز تجاری، مراکز اورژانسی و غیره (Ip_i)[3] حاصل می‌شود. این مقادیر بعد از نرمال‌سازی به‌صورت زیر خواهند بود:

رابطه (۱۷) حجم ترافیک موزون نرمال‌شده: $$tr_i = w_{tr} \times \frac{Tr_i - Tr_{Min}}{Tr_{Max} - Tr_{Min}}$$

رابطه (۱۸) سانحه‌خیزی موزون نرمال‌شده: $$inc_i = w_{inc} \times \frac{Inc_i - Inc_{Min}}{Inc_{Max} - Inc_{Min}}$$

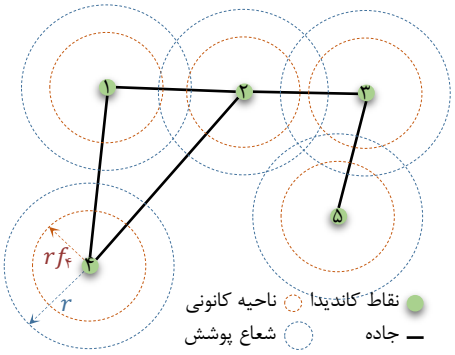
رابطه (۱۹) نزدیکی به محل‌های مهم موزون نرمال‌شده: $$ip_i = w_{ot} \times \frac{Ip_i - Ip_{Min}}{Ip_{Max} - Ip_{Min}}$$

رابطه (۲۰) امتیاز تجمعی[4] (موزون نرمال‌شده): $$cs_i = tr_i + inc_i + ip_i$$

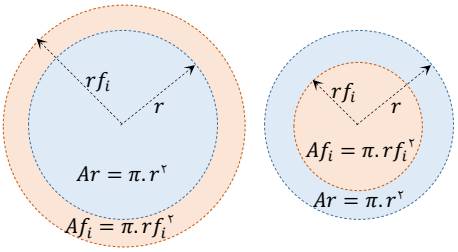
رابطه (۲۱) مجموع وزن سه عامل $$w_{tr} + w_{inc} + w_{ip} = ۱$$

به دلیل اینکه معمولاً مرکز سطح پوشش تجهیزات دارای بیشترین تراکم ترافیکی است و با فاصله‌گرفتن از مرکز اثر آن‌ها نیز این تراکم کاهش می‌یابد، مساحت پوشش‌داده‌شده یک نقطه توسط تجهیز نصب‌شده در آن نقطه برابر با حداقل مقدار سطح پوشش تجهیز و سطح ناحیه کانونی[5] یک نقطه است که در رابطه ۳، نشان داده شده است. امتیاز اختصاصی هر نقطه از حاصل‌ضرب امتیاز تجمعی آن نقطه در مساحت پوشش‌داده‌شده ناحیه کانونی آن به‌دست می‌آید و در رابطه ۴، قابل‌ملاحظه است. دو رابطه ۳ و ۴، با توجه به شکل‌های ۱ و ۲ و با درنظرگرفتن rf_i به‌عنوان شعاع ناحیه کانونی نقطه i و r به‌عنوان حداکثر شعاع پوشش هر یک از تجهیزات کنارجاده‌ای و از طریق روابط ۲۲ و ۲۳، به‌دست آمده است.

1. Traffic (Tr)
2. Incident (Inc)
3. Important Places (Ip)
4. Cumulative Score (cs)
5. Focal Area (Af)



شکل ۱. نقاط کاندیدا برای نصب تجهیزات کنارجاده‌ای



شکل ۲. مقایسه مساحت ناحیه کانونی (سطح صورتی‌رنگ) و مساحت ناحیه پوشش تجهیز[1] (سطح آبی‌رنگ)

$$Af_i = \pi.rf_i^۲$$ رابطه (۲۲)

$$Ar = \pi.r^۲$$ رابطه (۲۳)

رابطه ۵، فاصله بین نقاط را از طریق فرمول هاورسین نشان می‌دهد. با استفاده از این رابطه می‌توان برای تمامی ترکیبات زوجی نقاط، فاصله بین دو نقطه را مشخص کرد. فرمول هاورسین، معادله‌ای است که از طریق به‌کارگیری طول و عرض جغرافیایی نقاط برای اندازه‌گیری فاصله بین دو نقطه استفاده می‌شود. این فرمول به‌عنوان فاصله دایره بزرگ نیز شناخته می‌شود [۲۴].

رابطه ۶، معیار کلیدی دیگری به‌عنوان تأثیرپذیری از نقاط همسایه در انتخاب را مدنظر قرار داده است. برای محاسبه پارامتر تأثیرپذیری هر مکان از نواحی همسایه خود نیز از میزان همپوشانی سطح ارتباطی آن‌ها استفاده شده است. رابطه ۷، امتیاز هم‌جواری هر نقطه با سایر نقاط را محاسبه می‌کند؛ درنتیجه برای هر نقطه موردنظر، رابطه ۶ تجمیع نتایج به‌دست‌آمده برای آن نقطه توسط رابطه ۷ است. برای ارائه رابطه ۷، از فرمول همپوشانی دو دایره استفاده

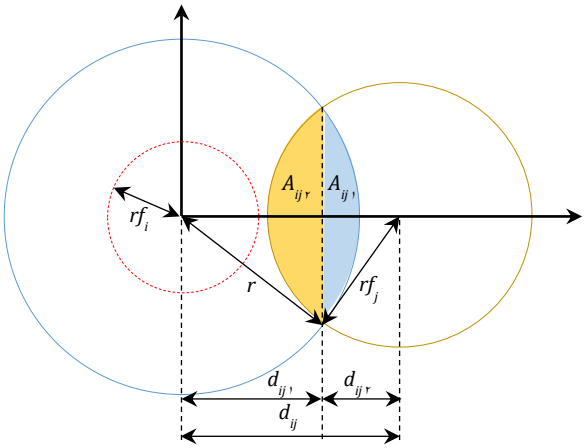
1. RSU Coverage Area (Ar)

شده است. همان‌طور که اشاره شد، مرکز سطح پوشش تجهیزات دارای بیشترین تراکم است و درنتیجه امتیاز حاصل از نقاط هم‌جوار فقط در صورتی که تجهیز نصب‌شده در یک نقطه، نواحی کانونی نقاط همسایه را موردپوشش قرار دهد، محاسبه خواهد شد (شکل ۳). برای این منظور، مطابق روش آسنسیو[1] (۲۰۱۷)، سطح A_{ij} را که نشان‌دهنده سطح همپوشانی تجهیز مستقرشده در نقطه i با ناحیه کانونی نقطه j است، مطابق رابطه ۲۴، به دو سطح A_{ij1} و A_{ij2} تفکیک شده و با استفاده از روابط ۲۵و ۲۶، مساحت سطح همپوشانی A_{ij} محاسبه می‌شود [۳].

رابطه (۲۴) $$A_{ij} = A_{ij1} + A_{ij2}$$

رابطه (۲۵) $$A_{ij1} = r^2 cos^{-1}\left(\frac{d_{ij1}}{r}\right) - d_{ij1}\sqrt{r^2 - {d_{ij1}}^2} \quad d_{ij1} = \frac{r^2 - rf_j^2 + d_{ij}^2}{2d_{ij}}$$

رابطه (۲۶) $$A_{ij2} = rc_j^2 cos^{-1}\left(\frac{d_{ij2}}{rf_j}\right) - d_{ij2}\sqrt{rf_j^2 - {d_{ij2}}^2} \quad d_{ij2} = \frac{rf_j^2 - r^2 + d_{ij}^2}{2d_{ij}}$$



شکل ۳. سطح همپوشانی بین دو نقطه مجاور

رابطه ۸، محدودیتی است که اگر مجریان طرح تصمیم بگیرند حداقل فاصله‌ای را برای نصب تجهیزات در نظر بگیرند با اضافه‌کردن آن، خواسته خود را برآورده کنند. در این محدودیت دو نقطه i و j تنها در صورتی می‌توانند به‌عنوان نقاط موردنظر انتخاب شوند که فاصله بین آن‌ها از حداقل فاصله درنظرگرفته‌شده بیشتر باشد. روابط ۹ و ۱۰، محدودیت‌هایی هستند که محدودیت‌های فنی و اجتماعی موجود در طرح را مدنظر قرار می‌دهند. با توجه به اینکه در برخی

1. Assencio

از نقاط کاندیدا، به‌دلیل وجود محدودیت‌های فنی و یا اجتماعی امکان نصب تجهیزات وجود ندارد و انتخاب این نقاط غیرمجاز است[1]، این محدودیت را می‌توان از طریق رابطه ۹ و تخصیص عد صفر به متغیر آن نقطه ایجاد کرد. در نقطه مقابل اگر مجریان طرح تصمیم بگیرند که با توجه به استراتژی و سیاست کلی طرح، حتماً نقاطی را به‌عنوان نقاط انتخاب قطعی[2] طرح لحاظ کنند، با استقاده از رابطه ۱۰ و تخصیص عدد یک به متغیر آن مکان می‌توان به این هدف نائل شد.

با توجه به اینکه نقاط غیرقابل‌انتخاب و نقاط انتخاب قطعی حتما باید زیرمجموعه نقاط کاندیدا باشند، رابطه ۱۱، این محدودیت‌ها را ایجاد می‌کنند و محدودیت رابطه ۱۲، از درنظرگرفته‌شدن هم‌زمان یک نقطه به‌عنوان نقطه غیرقابل‌انتخاب و نقطه انتخاب قطعی ممانعت به‌عمل می‌آورد.

رابطه ۱۳، محدودیت بودجه مدل را ایجاد می‌کند. اگرچه استفاده از تجهیزات بیشتر می‌تواند مساحت بیشتری را تحت پوشش قرار دهد، ولی با توجه به اینکه همواره در پروژه‌های توسعه حمل‌ونقل محدودیت بودجه وجود دارد، پس مدل‌سازی باید به‌گونه‌ای صورت پذیرد که محدودیت بودجه را نیز شامل شود. محدودیت انتخاب یک نوع تجهیز از میان تجهیزات مختلف نیز از طریق رابطه ۱۴، برآورده می‌شود. اگرچه سناریوهای مختلفی را می‌توان بر اساس مشخصات فنی تجهیزات و با شعاع‌های پوششی متفاوتی مدنظر قرار داد، این محدودیت برای انتخاب تنها یک نوع تجهیز که سطح پوشش بیشتری را بر اساس بودجه دردسترس ایجاد می‌کند در نظر گرفته شده است.

رابطه ۱۵، متغیر مربوط به انتخاب یک نوع تجهیز است که با توجه به صفر و یک بودن آن، در صورتی که مقدار آن یک باشد، یعنی این تجهیز برای استقرار انتخاب شده و در صورتی که صفر باشد، یعنی تجهیز انتخاب نخواهد شد. به همین ترتیب رابطه ۱۶، نیز متغیری است که انتخاب و عدم‌انتخاب یک نقطه برای استقرار تجهیزات را نشان می‌دهد و مقدار آن نیز صفر و یک است.

۴. تحلیل داده‌ها و یافته‌های پژوهش

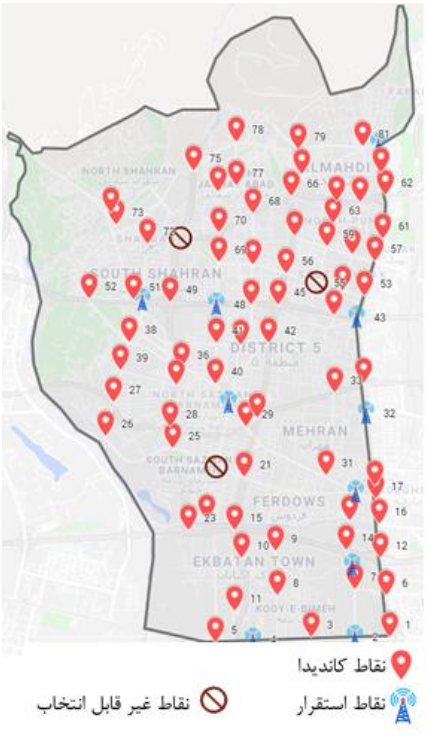
فرایند استقرار تجهیزات کنارجاده‌ای. در این پژوهش منطقه پنج شهرداری تهران به‌عنوان منطقه موردمطالعه انتخاب شده است. بر این اساس ۸۳ نقطه برای استقرار تجهیزات شناسایی شد. با توجه به شکل ۴، از ۸۳ نقطه کاندیدا، دو نقطه به‌عنوان نقاط با اولویت انتخاب و سه نقطه نیز به‌عنوان نقاط غیرقابل‌انتخاب مدنظر قرار گرفتند. در این پژوهش الگوریتم کشف نقاط استقرار بر اساس استراتژی حریصانه پایه‌گذاری و از طریق نرم‌افزار متلب حل می‌شود.

1. Impermissible
2. Definite

الگوریتم حریصانه، روشی است که در عین سادگی، کارآمد است. توصیف و کدنویسی این روش معمولاً آسان‌تر از سایر الگوریتم‌ها است و اغلب می‌توان آن را کارآمدتر از الگوریتم‌های دیگر اجرا کرد. یک الگوریتم حریصانه همیشه انتخابی را انجام می‌دهد که در حال حاضر بهترین به نظر می‌رسد؛ یعنی در هر مرحله یک انتخاب بهینه محلی انجام می‌دهد؛ به این امید که این انتخاب به یک راه‌حل بهینه نهایی منجر شود. اگرچه این الگوریتم همیشه راه‌حل‌های بهینه را ارائه نمی‌دهند، اما برای بسیاری از مسائل جواب آن‌ها بهینه و یا نزدیک به بهینه است. روش حریصانه بسیار قدرتمند است و برای گستره وسیعی از مسائل به‌خوبی کار می‌کند [۷].

الگوریتم در ابتدا تقاطع‌های با اولویت انتخاب را به‌عنوان نقاط استقرار تجهیزات در نظر می‌گیرد و درنتیجه تمام و یا بخشی از ناحیه کانونی این نقطه و نقاط مستقر در سطح پوشش این تجهیزات را از نواحی کانونی حذف می‌کند؛ سپس بر اساس بالاترین امتیاز کل گره‌ها، نسبت به انتخاب نقاط استقرار بعدی اقدام می‌کند و اینکار تا زمانی که تعداد نقاط استقرار به تعداد تجهیزات کنارجاده‌ای قابل‌تأمین مطابق با بودجه پروژه برسد، تکرار می‌شود. درنهایت مجموعه نقاط استقرار را به‌عنوان محل قرارگیری و خروجی الگوریتم (شکل ۵) ارائه می‌دهد.

شکل ۴. نقشه منطقه ۵ تهران و نقاط کاندیدا



شکل ۵. گره‌های پیشنهادی برای استقرار بهینه

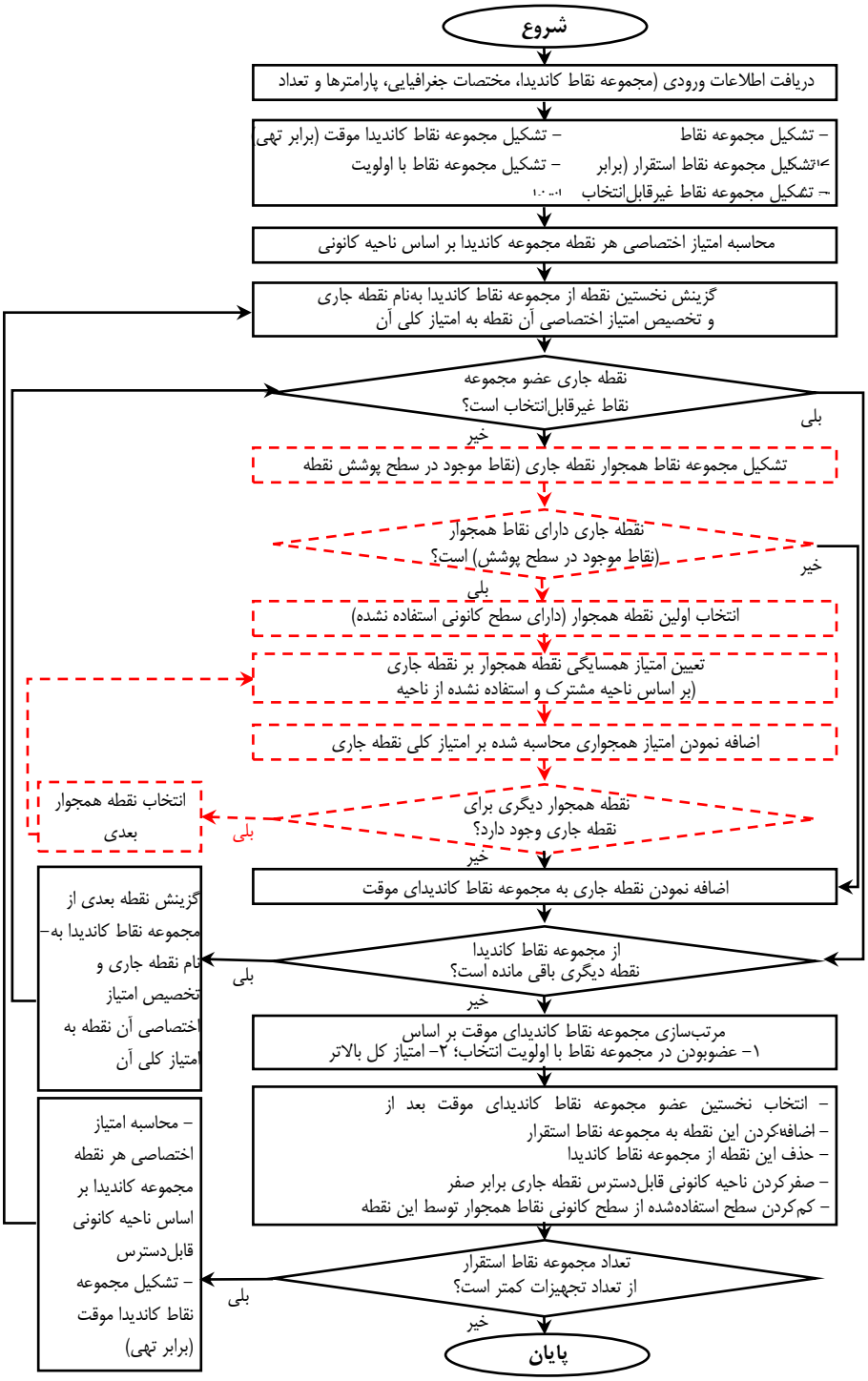
شکل ۶، الگوریتم و مراحل انتخاب تجهیزات را نشان می‌دهد. برای اجرای الگوریتم و تعیین نقاط بهینه، از نرم‌افزار متلب[1] استفاده شد و برنامه‌نویسی صورت گرفت.

ورودی‌های این برنامه، نقاط کاندیدا با طول و عرض جغرافیایی مشخص، پارامترهای نقاط، شعاع ناحیه بحرانی گره‌ها، گره‌های با اولویت انتخاب و یا غیرقابل‌انتخاب، بودجه تخصیص‌یافته به طرح و انواع تجهیزات با شعاع پوششی متفاوت و هزینه خرید هر تجهیز است. برنامه پس از دریافت ورودی‌ها و عملیات اجرا، تعداد قابل‌انتخاب هر نوع تجهیز را بر اساس هزینه تجهیز و بودجه طرح محاسبه کرده و گره‌های پیشنهادی برای استقرار بهینه را ارائه می‌کند و شکل آن را نشان می‌دهد و با توجه به امتیاز پوششی هر نوع تجهیز، نوع تجهیز بهینه را نیز مشخص می‌سازد.

با توجه به اینکه روش حریصانه در هر مرحله، انتخابی را انجام می‌دهد که در آن مرحله بهینه است، الگوریتم پیشنهادی این پژوهش به‌صورتی توسعه داده شده است تا در صورت انتخاب یک نقطه در یکی از مراحل اجرا، تمامی ناحیه‌هایی را که تحت پوشش تجهیز نصب‌شده در این نقطه قرار می‌گیرند، علامت‌گذاری شوند تا در مراحل بعدی، امتیاز حاصل از این نواحی صفر شود و به‌صورت مجدد مورداستفاده قرار نگیرد. این اقدام در راستای برآورده‌کردن تابع هدف دوم مدل است.

در پژوهش‌های قبلی که امتیاز هم‌جواری برای هر نقطه کاندیدا مدنظر قرار گرفته است، پس از انتخاب هر نقطه، نقاط هم‌جوار آن برای انتخاب‌های آتی حذف شده‌اند. باید به این نکته توجه داشت که استقرار دو نقطه در مجاورت هم که دارای امتیاز بالاتری هستند، کارایی بیشتری را نسبت به حالت انتخاب دو نقطه که در مجاورت هم نیستند و یکی از این نقاط امتیاز پایین‌تری دارد، خواهد داشت. این مورد یکی دیگر از موارد قابل‌بهبود بود و در الگوریتم پیشنهادی به‌جای حذف نقاط مجاور یک نقطه منتخب، تنها نواحی پوشش‌داده‌شده توسط تجهیز مستقر در آن مشخص شده و امتیاز مربوط به آن نواحی برابر صفر قرار داده شده است.

1. Matlab



شکل ۶. الگوریتم انتخاب نقاط استقرار تجهیزات از میان گره‌ها

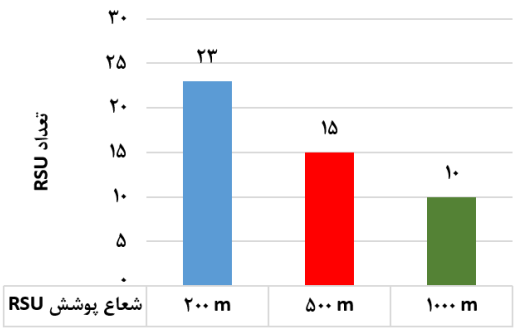
اجرای الگوریتم و آزمون نتایج. در این بخش در خصوص آزمون نتایج بحث خواهد شد. هدف از آزمون نتایج، بررسی تأثیر پارامترهای مسئله، نظیر شعاع پوششی تجهیزات و شعاع ناحیه کانونی گره‌ها است. بر همین اساس سه نوع تجهیز کنارجاده‌ای با شعاع پوششی ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر انتخاب شده است.

بودجه کل طرح برابر با ۳۰۰ هزار دلار و هزینه نصب هر تجهیز به‌ترتیب ۱۳ هزار، ۲۰ هزار و ۳۰ هزار دلار قرار داده شده است (قابل‌ذکر است که هزینه نصب تجهیزات به عوامل مختلفی نظیر شعاع پوشش، سرعت انتقال داده، حداکثر ارتباط در لحظه، کیفیت تجهیزات و سایر عوامل بستگی دارد که این هزینه‌ها به‌صورت برآوردی محاسبه شده‌اند)؛ درنتیجه ۳ سناریوی مختلف برای این مسئله وجود خواهد داشت که در جدول ۲، تمامی این سناریوها نشان داده شده است.

جدول ۲. سناریوهای آزمایش پژوهش

سناریو	شعاع پوششی تجهیزات	هزینه نصب هر تجهیز
۱	۲۰۰	۱۳۰۰۰
۲	۵۰۰	۲۰۰۰۰
۳	۱۰۰۰	۳۰۰۰۰

بر اساس سناریوهای ارائه‌شده در بالا و با توجه به اینکه پروژه دارای محدودیت بودجه است، تعداد تجهیزات قابل‌نصب بر اساس شعاع پوششی هر یک از تجهیزات به شرح شکل ۷، خواهد بود.



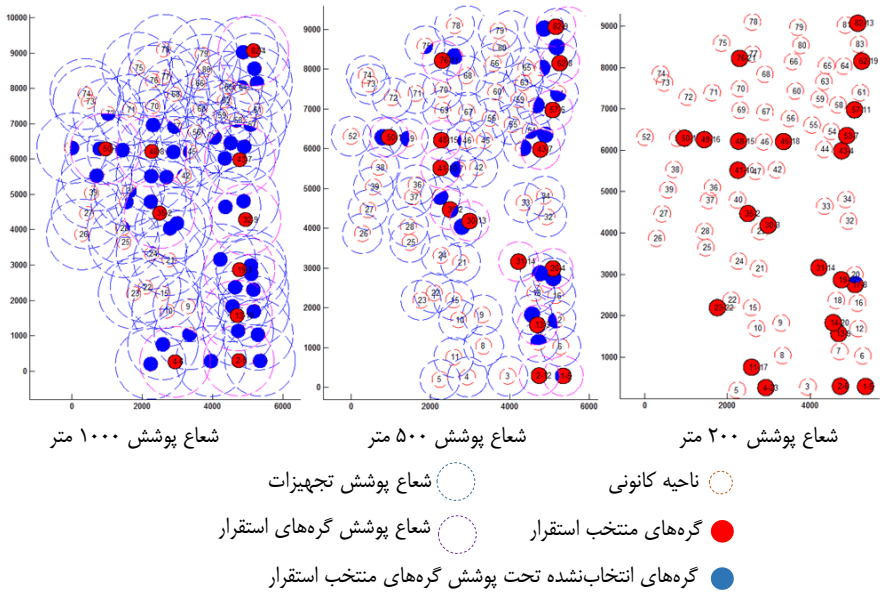
شکل ۷. تعداد تجهیزات در سه سناریوی استقرار

برای ارزیابی مدل ارائه‌شده، نقاط استقرار و سطح پوشش سه سناریوی پیشنهادی تعیین شد. بر اساس استراتژی پیشنهادی پژوهش، ناحیه‌های پوشش‌داده‌شده در مقایسه با حذف نواحی هم‌جوار نقاط استقرار بیشتر خواهد شد؛ همچنین با توجه به امکان‌پذیری تعیین نقاط با اولویت

انتخاب و یا غیرقابل‌انتخاب، بر اساس جدول ۳، ۲ گره ۳۵ و ۵۰ به‌عنوان گره‌های با اولویت انتخاب و ۳ گره ۲۴، ۵۵ و ۷۱ به‌عنوان گره‌های غیرقابل‌انتخاب در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۳. تعداد و وضعیت گره‌های کاندیدای استقرار

عنوان	وضعیت
گره‌های کاندیدا	۸۳ گره
گره‌های با اولویت انتخاب	۲ گره (گره‌های ۳۵ و ۵۰)
گره‌های غیرقابل‌انتخاب	۳ گره (گره‌های ۲۴، ۵۵ و ۷۱)
شعاع ناحیه کانونی گره‌ها	۲۰۰ متر



شکل ۸. نقاط استقرار برای تجهیزات با شعاع پوششی ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر

با توجه به شکل ۸، گره‌های شماره ۵۰ و ۳۵ به‌عنوان اولویت‌های اول و دوم انتخاب شده و در ادامه سایر نقاط استقرار مشخص شده‌اند؛ همچنین ۳ گره ۲۴، ۵۵ و ۷۱ به‌دلیل اینکه جزو نقاط غیرقابل‌انتخاب در نظر گرفته شده بودند، هیچکدام به‌عنوان گره‌های استقرار انتخاب نشدند.

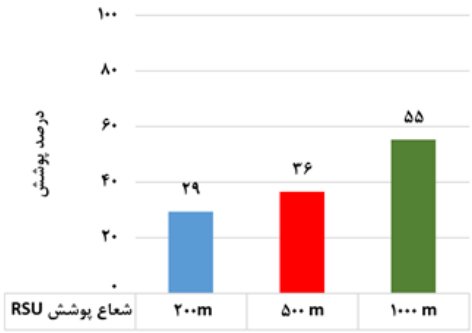
به‌عنوان نمونه برای تجهیزات با شعاع پوششی ۲۰۰ متر، گره‌های ۱۷ و ۱۹، برای تجهیزات با شعاع پوششی ۵۰۰ متر، گره‌های ۱ و ۲ برای تجهیزات با شعاع پوششی ۱۰۰۰ متر، گره‌های ۱۹ و ۳۲ (شکل ۸) اگرچه هم‌جوار بوده و دارای شعاع پوششی مشترکی هستند، ولی به‌دلیل امتیاز اختصاصی بالاتر در مجموعه نقاط استقرار قرار داده شده‌اند.

در انتها سه سناریوی پیشنهادی بر اساس درصد پوشش مقایسه شد. با توجه به اینکه شعاع کانونی تمامی نقاط کاندیدا ۲۰۰ متر است، در ای نصورت حداکثر پوشش ساده موردنیاز (بدون درنظرگرفتن امتیاز هر نقطه کاندیدا) برابر مجموع مساحت ناحیه کانونی تمامی نقاط کاندیدا و مساوی با ۱۰،۴۳۰،۰۸۸ متر مربع خواهد شد و حداکثر پوشش امتیازی موردنیاز (با درنظرگرفتن امتیاز هر نقطه کاندیدا) برابر مجموع حاصل‌ضرب امتیاز در مساحت ناحیه کانونی تمامی نقاط کاندیدا و مساوی با ۳،۱۷۳،۰۰۹ خواهد شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، مقدار حداکثر پوشش ساده از حداکثر پوشش امتیازی بالاتر است؛ چراکه امتیاز تمامی نقاط کاندیدا عددی بین صفر و یک است. جواب به‌دست‌آمده برای سه سناریو در جدول ۴، مشاهده می‌شود.

جدول ۴. مقایسه جواب سه سناریوهای مختلف

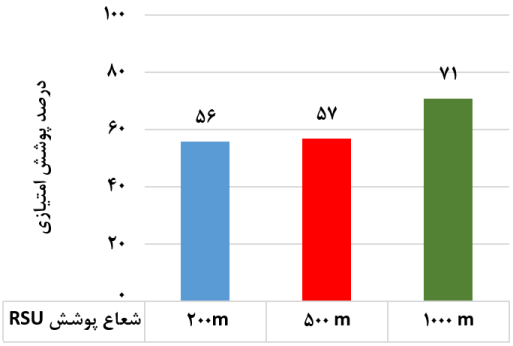
سناریو	۱	۲	۳
شعاع تجهیزات (متر)	۲۰۰	۵۰۰	۱۰۰۰
هزینه نصب (دلار)	۱۳،۰۰۰	۲۰،۰۰۰	۳۰،۰۰۰
تعداد تجهیزات قابل‌نصب	۲۳	۱۵	۱۰
درصد تجهیزات قابل‌نصب به نقاط کاندیدا	۲۸	۱۸	۱۲
پوشش ایجادشده (مترمربع)	۳،۰۶۰،۶۶۵	۳،۸۰۵،۳۷۴	۵،۷۵۹،۰۲۱
درصد پوشش	۲۹	۳۶	۵۵
پوشش ایجادشده امتیازی	۱،۷۶۹،۵۳۷	۱،۸۰۰،۰۷۳	۲،۲۴۴،۲۵۹
درصد پوشش امتیازی	۵۶	۵۷	۷۱
درصد همپوشانی	۲	۴	۹

با توجه به جدول ۴، اگر چه تعداد تجهیزات برای سه سناریوی ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر به‌ترتیب برابر ۲۸، ۱۸ و ۱۲ درصد کل گره‌های کاندیدا است، ولی درصد پوشش صورت‌گرفته برای این سه سناریو برابر ۲۹، ۳۶ و ۵۵ درصد است. درصد پوشش هر یک از سناریوها در جدول ۹، نشان داده شده است.



شکل ۹. درصد پوشش تجهیزات در سه سناریوی استقرار

درصد سطح پوشش امتیازی (بر اساس امتیاز اختصاصی هر کدام از گره‌ها) به‌ترتیب برابر ۵۶، ۵۷ و ۷۱ درصد است که حداکثرسازی سطح پوشش را نشان می‌دهد (شکل ۱۰).



شکل ۱۰. درصد پوشش امتیازی تجهیزات در سه سناریوی استقرار

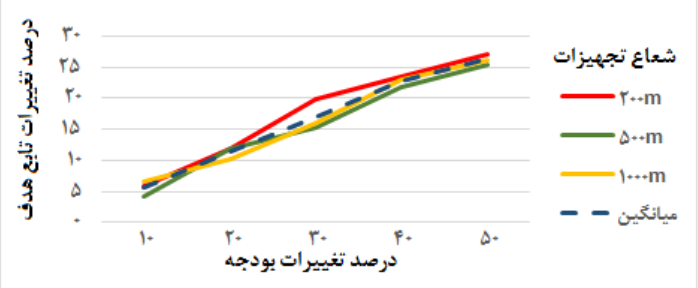
در انتهای جدول ۴، میزان همپوشانی هر یک از سناریوها نیز نشان داده شده است که به‌ترتیب برابر ۲، ۴ و ۹ درصد است. این موضوع نشان می‌دهد که با افزایش شعاع تجهیزات میزان همپوشانی آن‌ها نیز بیشتر می‌شود که این امری طبیعی است. با این حال هدف اصلی مدل داشتن بالاترین پوشش امتیازی تجهیزات است و بر این اساس سناریوی سوم، یعنی تجهیزات با شعاع پوششی ۱۰۰۰ متر، به‌عنوان جواب بهینه انتخاب می‌شود.

تحلیل حساسیت. برای انجام تحلیل حساسیت مدل پیشنهادی این پژوهش، تأثیر تغییرات دو پارامتر مهم و اثرگذار بودجه پروژه و شعاع پوشش تجهیزات بر تابع هدف بررسی شد که نتایج این تغییرات در جدول ۵، نشان داده شده است.

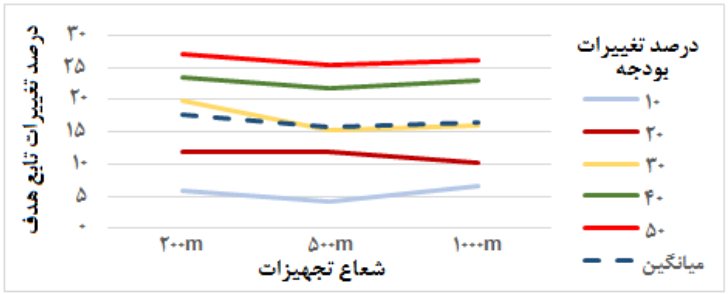
جدول ۵. تأثیر تغییرات بودجه بر درصد تغییرات تابع هدف (سطح پوشش) در سه سناریوی استقرار

درصد افزایش بودجه / سناریو	۲۰۰ متر	۵۰۰ متر	۱۰۰۰ متر	میانگین سه سناریو
۱۰	۵/۹	۴/۲	۶/۵	۵/۵
۲۰	۱۱/۸	۱۱/۹	۱۰/۱	۱۱/۳
۳۰	۱۹/۷	۱۵/۳	۱۶/۰	۱۷/۰
۴۰	۲۳/۴	۲۱/۶	۲۳/۰	۲۲/۷
۵۰	۲۷/۰	۲۵/۵	۲۶/۲	۲۶/۲
میانگین	۱۷/۶	۱۵/۷	۱۶/۴	

دو شکل ۱۱ و ۱۲، تحلیل حساسیت تابع هدف (سطح پوشش) را نسبت به تغییرات بودجه بر اساس سناریوهای موجود نشان می‌دهند.



شکل ۱۱. تحلیل حساسیت درصد تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات بودجه (به تفکیک سناریوها)



شکل ۱۲. تحلیل حساسیت تغییرات تابع هدف نسبت به تغییرات بودجه (به تفکیک تغییرات بودجه)

بر اساس نمودارهای تحلیل حساسیت در دو شکل بالا می‌توان عنوان کرد:

ـ با افزایش بودجه پروژه، تابع هدف (میزان پوشش تجهیزات) نیز افزایش می‌یابد؛

ـ نمودار تغییرات تابع هدف در سه سناریوی موردمطالعه و میانگین آن‌ها رفتار تقریباً مشابهی دارد؛

ـ میزان تغییرات تابع هدف برای یک تغییر بودجه مشخص، در سه سناریو تقریباً برابر است و اختلاف معناداری در آن ملاحظه نمی‌شود.

مقایسه روش ارائه‌شده با روش‌های قبلی. برای مقایسه از پژوهش‌های پیشین استفاده شد. پژوهش نخست، مطالعه فاگ و همکاران (۲۰۱۸) بود که در آن همپوشانی نقاط مدنظر قرار نگرفته بود و پژوهش بعدی، پژوهش مک‌کاوی و همکاران (۲۰۱۵) بود که در آن اگرچه همپوشانی در نظر گرفته شده بود، ولی در صورت انتخاب یک گره برای استقرار، نقاط هم‌جوار آن حذف شده بودند. بر اساس مقایسه صورت‌گرفته نتایج زیر به‌دست آمد:

۱. در پژوهش جاری و مدل ارائه‌شده در آن، امکان انتخاب نقاط هم‌جوار به‌صورت هم زمان میسر شده است. دلیل این موضوع نیز امتیاز بالای این نقاط در مقایسه با سایر گره‌ها است. مدل ارائه‌شده درصد پوشش بیشتری را در مقایسه با روش‌های قبلی ایجاد کرد و در گام بعدی همپوشانی تجهیزات را کاهش داد.
۲. در پژوهش حاضر امکان مقایسه سناریوهای مختلف با انواع تجهیزات که دارای شعاع پوششی متفاوت هستند، به‌صورت هم‌زمان موردبررسی قرار گرفت و بهترین سناریو انتخاب شد که این موضوع در پژوهش‌های قبلی مدنظر قرار نگرفته بود.
۳- در مقایسه با پژوهش‌های قبلی، امکان نشانه‌گذاری نقاط با اولویت بالای انتخاب برای اینکه این نقاط به‌طور قطعی به‌عنوان نقاط استقرار انتخاب شوند و یا امکان نشانه‌گذاری نقاط غیرقابل‌انتخاب به‌عنوان دو گزینه اضافه شده است. این قابلیت امکان درنظرگرفتن محدودیت‌های فنی و اجتماعی را در مدل فراهم می‌آورد.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، مدل و الگوریتم پیشنهادی برای بهینه‌سازی استقرار تجهیزات کنارجاده‌ای در شبکه خودرویی سیستم حمل‌ونقل هوشمند ارائه شد. روش ارائه‌شده بر اساس استراتژی حریصانه بود که بر اساس امتیاز محاسبه‌شده برای هر گره که تحت تأثیر ترافیک، حادثه‌خیزبودن و سایر عوامل و همچنین همسایگی با گره‌های مجاور است، نسبت به شناسایی و انتخاب گره‌های استقرار اقدام می‌کند. هدف این روش، پوشش حداکثری تجهیزات کنارجاده‌ای است؛ به‌صورتی که همپوشانی آن‌ها کمترین میزان ممکن را داشته باشد. در این پژوهش تلاش شد تا انتخاب نقاط استقرار بر اساس موارد زیر صورت پذیرد:
۱. تعیین امتیاز اختصاصی برای هر نقطه کاندیدا بر اساس حجم ترافیک، سانحه‌خیزبودن، نزدیکی به مراکز تجاری و اورژانسی؛
۲. تعیین امتیاز حاصل از نقاط هم‌جوار که می‌توانند در شعاع پوشش یک نقطه کاندیدا پس از استقرار تجهیزات قرار گیرند.

این پژوهش شامل دو بخش اصلی بود که در بخش نخست با مطالعه و مرور سیستماتیک مبانی نظری و پیشینه پژوهش، مدل‌های توسعه‌یافته و ابعاد هر یک از آن‌ها شناسایی شد. در فاز دوم نیز مدل جدید طراحی و ارائه شد.

عملکرد و قابلیت مدل ارائه‌شده از طریق آزمون سناریوهای مختلف در منطقه پنج شهرداری شهر تهران مشاهده شد. سناریوهای موجود در این مدل شامل استفاده از تجهیزات با شعاع پوششی ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر بود که سناریوی استفاده از تجهیزات با شعاع پوششی ۱۰۰۰ متر بر اساس پارامترهای موجود امتیاز بالاتری را کسب کرد. با استفاده از برنامه‌نویسی توسط

نرم‌افزار متلب، سناریوهای مختلف بر اساس الگوریتم مدل توسعه‌داده‌شده موردبررسی قرار گرفت و نتایج به‌دست‌آمده از هر سناریو به‌صورت تصویر گرافیکی و نقشه ارائه شد.

اگرچه شعاع پوششی تجهیزات با شعاع ۵۰۰ متر ۲/۵ برابر تجهیزات با شعاع ۲۰۰ متر است، ولی سطح پوشش امتیاز این دو نوع تجهیزات با هم اختلاف بسیار کمی دارد. در نقطه مقابل سطح پوشش تجهیزات با شعاع پوششی ۱۰۰۰ متر اختلاف معناداری نسبت به دو نوع تجهیزات قبلی دارند. قابل‌ذکر است با توجه به بودجه پروژه تعداد تجهیزات قابل‌تأمین برای هر یک از تجهیزات با شعاع پوشش ۲۰۰، ۵۰۰ و ۱۰۰۰ متر به‌ترتیب ۲۳، ۱۵ و ۱۰ تجهیز بود. این ارزیابی‌ها و نتایج نشان داد که تأثیر پارامترهای مختلف نظیر شعاع پوششی تجهیزات، تعداد تجهیزات و بودجه طرح بر نتایج توزیع و استقرار تجهیزات تأثیرگذار است. بر اساس تحلیل حساسیت نیز مشخص شد که با افزایش بودجه پروژه، تابع هدف افزایش می‌یابد و میزان تغییرات تابع هدف برای یک تغییر بودجه مشخص، در سه سناریو اختلاف معناداری ندارد.

یکی از محدودیت‌های این پژوهش، تعداد تجهیزات است که در رابطه ۱۴، نشان داده شده است. همان‌گونه که اشاره شد، این محدودیت برای انتخاب تنها یک نوع تجهیز و با شعاع پوششی مشخص از میان تجهیزات موجود و دارای شعاع‌های پوششی متفاوت است؛ اما باید توجه داشت که در حالت استفاده از چند نوع تجهیز به‌صورت هم‌زمان، احتمال بهبود جواب وجود دارد. از طرف دیگر با توجه به اینکه برای هر تجهیز مشخص، تعداد تجهیز استفاده‌شده می‌تواند بر قیمت خرید آن نیز تأثیرگذار باشد، استفاده از بیش از یک نوع تجهیز به‌طور هم‌زمان نیازمند بررسی سناریوهای قیمتی آن‌ها نیز است؛ درنتیجه به‌عنوان پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی می‌توان به‌کارگیری هم‌زمان چندین نوع تجهیزات کنارجاده‌ای با شعاع‌های پوششی متفاوت را بررسی کرد؛ به‌طوریکه هر یک از این تجهیزات دارای شعاع پوششی متفاوت نسبت به یکدیگر هستند تا بتوان ترکیب مناسب استقرار را برای حداکثر پوشش تجهیزات ارائه کرد.

تعارض منافع. برای ارائه مطالب و نگارش این مقاله هیچ‌گونه کمک مالی از هیچ فرد، نهاد و سازمانی دریافت نشده است و نتایج و دستاوردهای این مقاله به نفع یا ضرر سازمان یا فردی خاص نخواهد بود. حضور نویسندگان در این پژوهش به عنوان شاهدی بی‌طرف ولی متخصص بوده است و نویسندگان هیچ‌گونه تعارض منافعی ندارند.

منابع

1. Abdulkadhim, F. G., Yi, Z., Onaizah, A. N., Rabee, F., & Al‑Muqarm, A. M. A. (2021). Optimizing the Roadside Unit Deployment Mechanism in VANET with Efficient Protocol to Prevent Data Loss. *Wireless Personal Communications, 2021*.
2. Alam, M., Ara Shakil, K., & Khan, S. (2020). Internet of Things (IoT) Concepts and Applications. *Springer Nature Switzerland AG.*
3. Assencio, D., (2017). The intersection area of two circles, *available at: https://diego.assencio.com (accessed 25 March 2022).*
4. Azees, M., Vijayakumar, P., & Deboarh, L. J. (2017). EAAP: Efficient Anonymous Authentication with Conditional Privacy–Preserving Scheme for Vehicular Ad Hoc Networks. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 18(9),* 2467–2476.
5. Chaabene, S. B., Yeferny, T., & Yahia, S. B. (2021). A roadside unit deployment framework for enhancing transportation services in Maghrebian cities. *Concurrency and Computation: Practice and Experience, 33(1),* 1–17.
6. Chandu, P., D. (2015). Big Step Greedy Heuristic for Maximum Coverage Problem. *International Journal of Computer Applications, 125(7),* 19-24.
7. Cormen, T. H., Leiserson, C. E., Rivest, R. L. & Stein, C. (2003). Introduction to algorithms, 3rd edition, *London, England, The MIT press.*
8. Danaiefard, H., Alvani, M., & Azar, A. (2019). Quantitative research methodology in management. *Tehran: Saffar Publications* (In Persian).
9. Daneshvar, A., Homayounfar, M., Nahavandi, B., & Salahi, F. (2021). A Multi–objective Approach to the Problem of Subset Feature Selection Using Meta–heuristic Methods. *The Journal of Industrial Management Journal, 13(2),* 278– 299 (In Persian).
10. Farsi, A., & Szczechowiak, P. (2014). Optimal deployment of Road Side Units in urban environments. *3rd International Conference on Connected Vehicles and Expo, ICCVE, Vienna, Australia, 2014, Nonember 3–7,* 815–820.
11. Fogue, M., Sanquesa, J. A., Martinez, F. J., & Marquez–Barja, J. M. (2018). Improving Roadside Unit Deployment in Vehicular Networks by Exploiting Genetic Algorithms, *Applied Sciences, 8(1),* 1–21.
12. Fröhlich, N., Maier, A., & Hamacher, H. W. (2020). Covering edges in networks. *Networks, 75(3),* 278–290.
13. Giuffrè, T., Trubia, S., Canale, A., & Severino, A. (2017). Automated Vehicle: a Review of Road Safety Implications as Driver of Change. *27th CARSP Conference, Toronto, Canada, 2017, June 18–21*.
14. Heo, J., Kang, B., Yang, J., Paek, J., & Bahk, S. (2019). Performance–Cost Tradeoff of Using Mobile Roadside Units for V2X Communication. *IEEE Transactions on Vehicular Technology, 68(9),* 9049–9059.
15. Isaksson, J., Harjunkoski, I., & Sand, G. (2018). The impact of digitalization on the future of control and operations. *Computers and Chemical Engineering, 114,* 122–129.
16. Jiang, L., Molnár, T. G., & Orosz, G. (2021). On the deployment of V2X roadside units for traffic prediction. *Transportation Research Part C, 129,* 1–14.
17. Jo, Y., Jang, J., Park, S., & Oh, C. (2021). Connected vehicle–based road safety information system (CROSS): Framework and evaluation. *Accident Analysis and Prevention, 151,* 1–12.
18. Kimura, T., Saito, H., & Honda, H. (2018). Optimal transmission range for V2I communications on congested highways. *28th IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications, PIMRC, Montreal, Canada, 2017, October 8–13,* 1–7.
19. Krasniqi, X., & Hajrizi, E. (2016). Use of IoT Technology to Drive the Automotive Industry from Connected to Full Autonomous Vehicles. *IFAC–PapersOnLine, 49(29),* 269–274.
20. Lan, G., DePuy, G. W. & Whitehouse, G. E. (2007). Effective and simple heuristic for the set covering problem, *European Journal of Operational Research, 176,* 1387-1403.

21. Li, S., Xu, L. Da, & Zhao, S. (2015). The internet of things: a survey. *Information Systems Frontiers*, *17*, 243–259.
22. Liang, Y., Wu, Z., & Hu, J. (2020). Road side unit location optimization for optimum link flow determination. *ComputerAided Civil and Infrastructure Engineering*, *35*, 61–79.
23. Makkawi, A., Daher, R., & Rizk, R. (2015). RSUs placement using cumulative weight based method for urban and rural roads. *7th International Workshop on Reliable Networks Design and Modeling, RNDM, Munich, Germany 2015, October 5–7*, 307–313.
24. Maria, E., Budiman, E., Haviluddin and Taruk, M. (2020), "Measure distance locating nearest public facilities using Haversine and Euclidean Methods", *Journal of Physics: Conference Series*, 1450(1).
25. Mohaghar, A., Ariaee, S. (2017). Locating using Geographical Information System and Weighted Maximal Covering Model. *The Journal of Indusrtial Management Perspective, 7(2),* 9-32 (In Persian).
26. Mortazavi, S. & Seif Barghy, M. (2018). Two-Objective Modeling of Location-Allocation Problem in a Green Supply Chain Considering Transportation System and CO2 Emission. *The Journal of Indusrtial Management Perspective, 8(1),* 163-185. (In Persian)
27. Naval S., S. (2019). Variation In Greedy Approach To Set Covering Problem. *M.S. Thesis, University of Windsor, Ontario, Canada*.
28. Nikbakhsh, E., Zegordi, S.H. (2014). Hub Arc Covering Location Problem under Disruption. *The Journal of Indusrtial Management Perspective, 4(1),* 9-29. (In Persian)
29. Outay, F., Kammoun, F., Kaisser, F., & Atiquzzaman, M. (2017). Towards safer roads through cooperative hazard awareness and avoidance in connected vehicles. Proceedings, *31st IEEE International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops, WAINA, Taipei, Taiwan, 2017, March 27–29,* 208–215.
30. Peng, S., Pal, S., & Huang, L. (2020). Principles of Internet of Things (IoT) Ecosystem: Insight Paradigm. *Springer Nature Switzerland AG*.
31. Pourkiani, M., Jabbehdari, S., & Khademzadeh, A. (2016). Vehicular Networks : A Survey on Architecture. *Journal of Advances in Computer Engineering and Technology, 2(3),* 43–53.
32. Reis, A. B., Sargento, S. & Tonguz, O. K. (2018). Smarter Cities with Parked Cars as Roadside Units, *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *19(7),* 2338–2352.
33. Rios, M., Marianov, V., & Pérez, M. (2015). Locating fixed roadside units in a bus transport network for maximum communications probability, *Transportation Research Part C, 53,* 35–47.
34. Salehikia, Z., & Salehinamad, M. (2017). Optimal Deployment of Roadside Units for Vehicular Networks Based on data exchange time reducing, *2nd National Conference on Intelligent Industrial Robots, Ahar, Iran, 2017, November 23.* (In Persian).
35. Sheikh, M. S., & Liang, J. (2019). A Comprehensive Survey on VANET Security Services in Traffic Management System. *Wireless Communications and Mobile Computing, 2019,* 1–23.
36. Shi, Y., Lv, L., Yu, H., Yu, L., & Zhang, Z. (2020). A center–rule–based neighborhood search algorithm for roadside units deployment in emergency scenarios. *Mathematics, 8(10),* 1–27.
37. Snyder, S. A., & Haight, R. G. (2016). Application of the Maximal Covering Location Problem to Habitat Reserve Site Selection: A Review. *International Regional Science Review, 39(1),* 2847.
38. Trullols, O. Fiore, M. Casetti, C. Chiasserini, C.F. & Barcelo, O. J. M. (2010). Planning roadside infrastructure for information dissemination in intelligent transportation systems, *Computer Communication. 33(4),* 432–442.
39. Xue, L., Yang, Y., & Dong, D. (2017). Roadside Infrastructure Planning Scheme for the Urban Vehicular Networks. *Transportation Research Procedia, 25,* 1380–1396.