International Journal of Industrial Engineering & Production Management (2015)

March 2015, Volume 26, Number 4
pp. 525-542

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

LOCATION OF RELIEF STATIONS USING HYPERCUBE QUEUING MODEL AND OPTIMIZATION BY GENETIC ALGORITHM (CASE STUDY: ON TEHRAN-QOM HIGHWAY)

Ali Morovati Sharifabadi*& Reza Meydani

Ali Morovati Sharifabadi, *Assistant Professor of Industrial Management, Yazd, Yazd University, Economic, Accounting & Management Faculty*
Reza Meydani, *MSc Student , Department of Industrial Management of Islamic azad University, Center Branch*

Keywords

Location,
Allocation,
Hypercube Queuing Model,
Mobile Server,
Genetic Algorithm

ABSTRACT

Road relief stations Location and allocation problems are known to have a significant impact upon performance of road victims servicing. The main purpose of this kinds of problems, are optimal road relief stations locating and districting the areas to appropriate servers assignment. These problems are so important, because of improving the performance criteria, such as Customer waiting time and also the objectives of the service provider meets and then Customer and service providers satisfaction will be sought. In this research, Iran Khodro relief stations of Tehran-Qom highway are reallocated, using hypercube queuing model that is the most popular queuing model for locating and allocating problems. For reaching this goal, the different states of the system and the equilibrium equations of each state were determined, using the rate diagrams. Then by using limit probabilities, the system performance criteria such as server's workload and customer waiting time was calculated. Then by designing and running the Genetic Algorithm the optimal changing in atoms size were done with the objectives of minimum server's workload imbalance and minimum customer waiting time.

© 2015 IUST Publication, IJIEPM. Vol. 26, No. 4, All Rights Reserved

نشـــریه بین المللـــی مهنـــدسی صنـــایع و مدیـــریت تولیـــد

شمـــاره ۴، جلـــد ۲۶، زمستان ۱۳۹۴

صفحـــه۵۴۲ -۵۲۶

نشریه بین المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید دانشگاه علم و صنعت ایران

ISSN: 2008-4870

http://IJIEPM.iust.ac.ir/

مکان‌یابی ایستگاه‌های امداد جاده‌ای با استفاده از مدل تلفیقی صف ابرمکعب و الگوریتم ژنتیک (مورد مطالعه: بزرگراه تهران- قم)

علی مروتی شریف‌آبادی* و رضا میدانی

کلمات کلیدی

مکان‌یابی،
تخصیص،
مدل صف ابرمکعب،
خدمت‌دهنده‌ی متحرک،
الگوریتم ژنتیک

چکیده:

تخصیص و مکان‌یابی ایستگاه‌های امداد جاده‌ای، به دلیل داشتن تأثیرات زیاد بر نحوه‌ی خدمت‌دهی به رخدادهای جاده‌ای، مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است. هدف اصلی این مسائل، مکان‌یابی بهینه‌ی ایستگاه‌های امداد جاده‌ای و تقسیم‌بندی نواحی تحت خدمت، جهت تخصیص مناسب آن‌ها به خدمت‌دهنده‌ها است. با حل شدن این مسائل، معیارهای عملکردی سیستم از جمله مدت زمان انتظار مشتری بهبود یافته و از طرفی حل این مسائل منجر به برآورده شدن اهداف سازمان خدمت‌دهنده و رضایت مشتری و خدمت‌دهنده می‌شود. در این تحقیق تخصیص ایستگاه‌های امداد خودرو ایران در طول بزرگراه تهران-قم، با استفاده از مدل صف ابرمکعب (یکی از معروف‌ترین مدل‌های صف در زمینه‌ی مکان‌یابی)، مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور، پس از تعیین تعداد حالات سیستم، معادلات تعادلی هر حالت سیستم با استفاده از نمودارهای آهنگ تعادل استخراج شده است. سپس با استفاده از احتمالات حدی به‌دست آمده، معیارهای عملکردی سیستم، مانند میزان بار کاری هر خدمت‌دهنده و مدت زمان انتظار مشتری جهت دریافت خدمت محاسبه شده است. در ادامه با طراحی و اجرای الگوریتم ژنتیک، تغییر بهینه‌ی قابل اجرا در عمل، در اندازه‌ی نواحی تخصیص‌داده‌شده به هر خدمت‌دهنده، با هدف کمینه کردن میزان عدم توازن بار کاری خدمت‌دهنده‌ها و مدت زمان انتظار مشتری، انجام شده است.

۱. مقدمه

مسأله‌ی مکان‌یابی تسهیلات نوعی مسئله‌ی بهینه‌سازی است که هدف آن انتخاب زیرمجموعه‌ای از یک مجموعه محل‌های کاندید برای قرار دادن تسهیلات است که بیشترین خدمت‌دهی یا کم‌ترین هزینه را فراهم سازد [۱]. به طور کلی انتخاب مکان مناسب یا مکان‌یابی یک تأسیسات خاص در یک منطقه، یکی از مسائل متداول در تصمیم‌گیری است. این مسائل به خصوص در سال‌های اخیر توجه زیادی را به خود جلب کرده است و روش‌های کمی و کیفی زیادی برای حل آن‌ها پیشنهاد شده است [۲]. در طراحی شبکه‌های خدمت‌رسانی از قبیل مراکز درمانی، تسهیلات آتش‌نشانی، تسهیلات امداد خودرو و ایستگاه‌های پلیس، مکان تسهیلات خدمت‌رسانی و تخصیص تقاضاها به خدمت‌دهنده‌ها به‌طور چشم‌گیری در ایجاد ازدحام (سطح خدمت) در سیستم مؤثر است [۵].

هدف بیشتر سیستم‌های ارائه‌ی خدمت، متوازن کردن هزینه‌های ظرفیت خدمت‌دهی در برابر هزینه‌های کیفیت خدمت می‌باشد. مسئله‌ی اساسی مکان‌یابی[۱] و تخصیص[۲] ظرفیت (تعداد خدمت‌دهنده) می‌باشد. در حالی که در مرحله‌ی بعد معیار سنجش مسئله، احتمال ارائه‌ی خدمت به تعداد مشخصی مشتری در طی زمان محدود، تعداد مشتریان درون سیستم، تعداد مشتریان درون صف و متوسط زمان انتظار برای هر مشتری می‌باشد. از دیدگاه مشتری انتخاب یک خدمت‌دهنده، ممکن است تنها بر اساس دسترسی آسان نباشد، بلکه کیفیت خدمت یا

تاریخ وصول: ۹۲/۰۲/۰۹

تاریخ تصویب: ۹۲/۱۲/۰۷

رضا میدانی، دانش‌آموخته‌ی کارشناسی ارشد مدیریت صنعتی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران مرکز

***نویسنده مسئول مقاله: دکتر علی مروتی شریف‌آبادی**، استادیار دانشکده‌ی اقتصاد، مدیریت و حسابداری دانشگاه یزد، آدرس: یزد، دانشکده‌ی اقتصاد، مدیریت و حسابداری دانشگاه یزد، alimorovati@yazd.ac.ir

متوسط مدت زمان انتظار هم مورد نظر باشد. بنابراین طراحی سیستم خدمت‌دهی با هدف کمینه کردن تعداد تسهیلات، تخصیص ظرفیت، زمان دسترسی مشتری و مدت زمان انتظار مشتری منطقی به نظر می‌رسد. این دسته از مسائل به طور مشترک مسائل طراحی سیستم خدمت‌دهی نامیده می‌شوند [۶].

به طور کلی مسائل مکان‌یابی مراکز خدمت‌دهی از لحاظ نوع خدمت ارائه شده به دو نوع مسئله‌ی طراحی سیستم خدمات عمومی و مسئله‌ی طراحی سیستم خدمات اورژانسی تقسیم می‌شوند. نکته‌ی کلیدی در مسائل طراحی خدمات عمومی[۳]، ظرفیت خدمت تسهیلات برای خدمت به تقاضاهای ورودی است که محدودیت اورژانسی ندارد؛ در حالی که در مسائل طراحی خدمات اورژانسی[۴] بیشتر تمرکز بر قابلیت واحدهای خدمت‌دهی (مانند گشت پلیس، ماشین‌های آتش‌نشانی و آمبولانس) برای حرکت سریع به سمت مکان‌های تقاضای اورژانسی است [۷]. وجود عناصر عدم قطعیت در زمان، موقعیت و میزان خدمات مورد نیاز و وجود مناطق دارای ازدحام در سیستم‌های خدمات اورژانسی، منجر به ایجاد عدم قطعیت در خدمات مورد نیاز و منابع محدود خدمت‌دهی می‌شوند. مدیران باید در زمان طراحی و بهبود این‌گونه سیستم‌ها، عواید بهبود خدمت‌دهنده‌ها را هم‌زمان با سرمایه‌گذاری در آن‌ها، متعادل کنند. این اصل مهم علاوه بر سیستم‌های تولیدی، در سیستم‌های خدماتی نیز دارای اهمیت می‌باشد. به طور مشخص، یکی از مهم‌ترین اجزا در سیستم خدمات اورژانسی، میانگین زمان پاسخ‌گویی سیستم در یک تماس تلفنی اورژانسی است [۸].

مدل‌های مکان‌یابی از نظر ماهیت مدل به دو دسته‌ی مدل‌های تحلیلی[۵] و توصیفی[۶] تقسیم می‌شوند. مدل‌های تحلیلی به طور صریح بیان می‌کنند که برای رسیدن به هدف مسئله باید چه تغییراتی در پارامترهای ورودی مسئله انجام داد. مدل‌های بهینه‌سازی (برنامه‌ریزی ریاضی) از جمله مدل‌های تحلیلی به شمار می‌روند. در مقابل، مدل‌های توصیفی همان‌گونه که از نام آن‌ها برمی‌آید، به توصیف ویژگی‌های مسئله و بیان آن‌ها به شکلی که هستند می‌پردازند و سخنی از بایدها و نبایدها به میان نمی‌آورند. به عبارتی دیگر راهکاری برای رسیدن به هدف مسئله ارائه نمی‌دهند، بلکه فقط ویژگی‌های مسئله (مانند معیارهای عملکردی سیستم) را تبیین و توصیف می‌کنند. مدل‌های مبتنی بر شبیه‌سازی و مدل‌های مکان‌یابی با استفاده از تئوری صف در زمره‌ی مدل‌های توصیفی قرار دارند [۹].

مدل‌های مکان‌یابی از نظر نوع پارامترهای مسئله به مدل‌های قطعی و غیرقطعی تقسیم‌بندی می‌شوند. در مدل‌های قطعی تمام پارامترهای مسئله با قطعیت معلوم می‌باشند. در حالی که پارامترهای مدل‌های غیرقطعی دارای نوعی عدم قطعیت می‌باشند. مدل‌های غیرقطعی بسته به نوع عدم قطعیتی که در آن‌ها نهادینه شده است به مدل‌های با پارامترهای احتمالی و فازی تقسیم می‌شوند [۵]. نخستین مدل‌ها در زمینه‌ی مکان‌یابی تسهیلات با امکان ایجاد ازدحام، جنبه‌ی قطعی داشته و بنابراین احتمال مشغول بودن خدمت‌دهنده‌ها را هنگام نیاز در بر نمی‌گرفتند. بنابراین تعداد تسهیلات (خدمت‌دهنده‌ها) به دست آمده از این مدل‌ها کم‌تر از تعداد مورد نیاز در دنیای واقعی بود. با وجود این مدل‌ها، مدل‌های احتمالی امکان مشغول بودن هر یک از خدمت‌دهنده‌ها هنگام نیاز (و در نتیجه ایجاد ازدحام) را در نظر می‌گیرند. در این گونه مدل‌ها عدم قطعیت موجود توسط تئوری صف و یا با استفاده از شبیه‌سازی بیان می‌شود و یا این که پارامترهای احتمالی و متغیرهای تصادفی وارد مدل برنامه‌ریزی ریاضی می‌شود [۱۰].

در بحث مکان‌یابی تسهیلات در شرایط تقاضای تصادفی و ازدحام، دو رویکرد وجود دارد. دسته‌ی اول مدل‌های نوع پوششی[۷] و دسته‌ی دوم مدل‌های نوع میانه[۸] هستند. مدل‌های پوششی بیشتر در رابطه با ارائه‌ی پوشش کافی برای مشتریان بوده و بر کاهش هزینه‌های مرتبط با سفر که بیشتر مورد توجه مدل‌های نوع میانه هستند، تمرکز ندارند [۱۱]. مدل‌های مکان‌یابی را می‌توان از نظر نحوه‌ی استقرار خدمت‌دهنده‌ها نیز دسته‌بندی کرد. در دسته‌ی اول خدمت‌دهنده‌ها برای ارائه‌ی خدمت به مشتریان مراجعه می‌کنند. این دسته از مسائل به مسائل مکان‌یابی با خدمت‌دهنده‌ی متحرک معروف می‌باشند. از جمله کاربردهای مهم این دسته می‌توان به مکان‌یابی پایگاه‌های امداد و درمان در طول جاده‌ها یا در سطح شهرها، تعیین مکان ایستگاه‌های آتش‌نشانی، مکان‌یابی پاسگاه‌های پلیس و مکان‌یابی مراکز امداد خودرو اشاره کرد [۱۲]. در نوع دیگری از مسائل مکان‌یابی که با استفاده از تئوری صف فرموله می‌شوند، خدمت‌دهنده‌ها، برعکس حالت قبل، در محل ثابتی مستقر می‌شوند و مشتریان برای دریافت خدمت به آن‌ها مراجعه می‌کنند (خدمت‌دهنده‌ی ثابت یا غیرمتحرک[۹]). از کاربردهای مدل مکان‌یابی با خدمت‌دهنده‌ی ثابت می‌توان به مسائل تعیین مکان دستگاه‌های خودپرداز[۱۰]، مکان‌یابی تعمیرگاه‌های ثابت و مکان‌یابی فروشگاه‌ها اشاره کرد. تفاوت‌های اساسی بین این دو مدل وجود دارد. برای خدمت‌دهنده‌ی متحرک زمان سفر قسمتی از زمان ارائه‌ی خدمت در نظر گرفته می‌شود و از نقطه نظر صف مدل‌های پیچیده‌تری هستند [۱۱]. در حالتی که خدمت‌دهنده‌ها ثابت هستند و تابع هدف حداکثر شدن مشتری جذب شده است، نوع خدمت می‌تواند ضروری باشد (مانند بانک، پمپ بنزین و مراکز خرده‌فروشی). در این حالت اغلب مشتریان از مراکز خاصی خدمت دریافت می‌کنند. از طرف دیگر وقتی که خدمت ضروری نباشد، برخی مشتریان که نیاز

به خدمت دارند تسهیلات با کیفیت پایین را برای دریافت خدمت انتخاب نخواهند کرد [۱۳].

مدل‌های مکان‌یابی صف را می‌توان بر حسب نوع خروجی آن‌ها نیز دسته‌بندی کرد. در دسته‌ای از این مدل‌ها خروجی همان تعیین مکان تسهیلات می‌باشد. ولی در دسته‌ی دیگر خروجی مدل تقسیم‌بندی کل ناحیه‌ی پاسخگویی به زیرناحیه‌ها و تخصیص هر یک از این زیرناحیه‌ها به تسهیلات مستقرشده می‌باشد (مانند تعیین حوزه‌های تحت اختیار هر یک از کلانتری‌های نیروی انتظامی موجود در سطح شهر). دسته‌ی اول مسائل مکان‌یابی و دسته‌ی دوم مسائل تقسیم‌بندی ناحیه[11] نامیده می‌شوند. برخی مدل‌ها نیز هر دو مسئله بالا را با هم در نظر می‌گیرند [۱۴].

مهم‌ترین مدل صف که برای مکان‌یابی تسهیلات استفاده می‌شود، مدل ابرمکعب[12] می‌باشد. این مدل در سال ۱۹۷۴ توسط لارسن در مؤسسه‌ی تکنولوژی ماساچوست[13] طی پروژه‌ای برای مکان‌یابی تسهیلات خدمت‌رسانی اورژانس شهری نیویورک ابداع شد. مدل صف M/M/N در نظر گرفته شده و تخصیص خدمت‌دهنده‌ها با توجه به ترتیب اولویت برای هر ناحیه بوده است. روش حل مسئله، حل دستگاه معادلات خطی احتمالات حالت پایدار سیستم بوده و جواب دقیق حاصل شده است. همچنین تعداد معادلات و مجهولات با افزایش N با سرعت افزایش پیدا می‌کنند. این مدل برای مکان‌یابی تسهیلاتی به کار می‌رود که در آن‌ها خدمت‌دهنده‌ها برای خدمت‌رسانی به مشتری مراجعه می‌کنند (خدمت‌دهنده‌ی متحرک[14]). رابطه‌ی بین حالت‌های یک سیستم صف را می‌توان با نمودار آهنگ نشان داد. در این نمودار گره‌ها معرف حالت سیستم و شاخه‌ها نشان‌دهنده‌ی امکان گذار از هر حالت به حالت دیگر است [۱۵].

در زمینه‌ی مکان‌یابی، مطالعات متفاوتی انجام شده است. مندونکا و مرابیتو در یک مطالعه‌ی موردی در بزرگراه‌های برزیل، برای چیدمان آمبولانس‌ها از مدل ابرمکعب استفاده کردند و معیارهای عملکرد یک سیستم خدمات اورژانسی را با تغییر اندازه‌ی اتم‌های مربوط به هر خدمت‌دهنده، بهبود دادند. یکی از مهم‌ترین فرضیات مدل ابرمکعب این است که مکان اولیه‌ی تسهیلات مشخص است و کل ناحیه‌ی مورد بررسی با توجه به تعداد تسهیلات و مکان آن‌ها به زیرناحیه‌ها تقسیم‌بندی می‌شود. به هر یک از این زیرناحیه‌ها یک اتم جغرافیایی[15] گفته می‌شود. در مطالعه‌ی مندونکا و مرابیتو از توزیع‌های پواسون و نمایی برای توصیف ورودها و زمان‌های خدمت‌دهی استفاده شده و با حل هم‌زمان دستگاه معادلات خطی حالت پایدار سیستم، مسئله را حل کردند. همچنین از تحلیل حساسیت برای بررسی اثر تغییرات در ورودی‌های مسئله بر معیارهای عملکرد استفاده شده است [۸].

جرولیمینیس و همکاران، با تعمیم مدل ابرمکعب، پایگاه‌های امداد جاده‌ای را در شبکه‌ی حمل و نقل، مکان‌یابی کردند. در این مدل بزرگراه‌ها به صورت دوطرفه در نظر گرفته شده و آمبولانس‌ها برای تغییر جهت حرکت از رمپ‌های موجود در طول جاده استفاده می‌کنند. برای حل مدل از یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی و یک مدل ابرمکعب استفاده شده است. مدل ریاضی برای یافتن مکان بهینه‌ی تسهیلات و مدل ابرمکعب برای محاسبه‌ی معیارهای عملکرد به کار رفته است [۱۶].

آتکینسون و همکاران، دو روش ابتکاری را برای ارزیابی سیستم صف توصیف‌کننده خودروهای اورژانسی مکان‌یابی شده در طول بزرگراه‌ها، ارائه دادند. روش ابتکاری اول بر مبنای فرمول ارلنگ[16] برای محاسبه‌ی احتمالات از دست دادن تقاضا برای هر یک از خدمت‌دهنده‌ها توسعه یافته و روش دوم بهبودیافته‌ی روش اول می‌باشد. روش حل این مدل، بر مبنای محاسبه‌ی احتمالات حدی و محاسبه‌ی معیارهای ارزیابی سیستم مطابق فرمول‌های صف می‌باشد. در این مقاله، تغییرات معیارهای ارزیابی به صورت گرافیکی نشان داده شده و ارتباط آن‌ها به خوبی روشن شده است [۱۷]. بوفی و همکاران در مقاله‌ای مروری، مدل‌های ازدحام در مکان‌یابی تسهیلات با خدمت‌دهندگان غیرمتحرک را ارائه دادند. مدل‌های M/M/1، M/G/1، M/M/m و M/G/m در مرور ادبیات در نظر گرفته شدند. در این مقاله بیشتر تأکید بر مدل‌سازی بوده و رویکردی جهت حل مدل‌ها ارائه نشده است. همچنین مدل‌های با قابلیت انتخاب خدمت‌دهنده توسط مشتری و یا توسط سیستم بررسی شده‌اند [۱۸].

یانونی و مرابیتو، تجزیه و تحلیل عملکرد سیستم خدمات درمانی اضطراری را با استفاده از مدل صف ابرمکعب ارائه دادند. در این مدل، از توزیع‌های پواسون و نمایی برای توصیف ورودی‌ها و زمان خدمت‌دهی استفاده شده است. برای حل مدل از حل هم‌زمان دستگاه معادلات خطی حالت پایدار سیستم استفاده شده است. در این مدل چند نوع تقاضا و چند نوع خدمت در نظر گرفته شده و امکان تخصیص چند خدمت‌دهنده‌ی یکسان یا متفاوت به هر مشتری وجود دارد [۱۹].

تاکدا و همکاران با استفاده از مدل ابرمکعب، اثر غیرمتمرکزسازی[17] پایگاه‌های اورژانس در عملکرد سیستم را بررسی کرده و ادعا کردند که می‌توان با استفاده از بهینه‌سازی ریاضی، میزان عدم تمرکز بهینه را پیدا کرد. آن‌ها از توزیع‌های پواسون و نمایی برای توصیف ورودها و زمان خدمت‌دهی استفاده کرده و با حل هم‌زمان دستگاه معادلات خطی حالت پایدار سیستم، مدل را حل کردند [۲۰].

مرابیتو و همکاران با استفاده از مدل ابرمکعب، عملکرد سیستم آمبولانس‌ها را با خدمت‌دهنده‌های ناهمگن[18] ارزیابی کردند. در این مقاله از توزیع‌های پواسون و نمایی برای توصیف ورودها و

زمان خدمت‌دهی استفاده شده است. از آنجا که روش تقریبی لارسن در حالت همگن کاربرد دارد، بنابراین از روش دقیق حل مدل ابرمکعب استفاده شده و مدل ابرمکعب همگن و ناهمگن از نظر عملکرد با هم مقایسه و نشان داده شده است که گروه دوم بهتر جواب می‌دهد [۱۲].

یانونی و همکاران یک مدل صف ابرمکعب را برای یافتن مکان بهینه‌ی ایستگاه‌های آمبولانس در طول بزرگراه‌ها، با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی و مدل ابرمکعب برای محاسبه معیارها، ارائه دادند. الگوریتم ژنتیک برای محاسبه طول بهینه قسمت‌های جاده که به عنوان ناحیه‌ی پاسخگویی اصلی به هر تسهیل تخصیص داده می‌شود، به کار گرفته شده و از توزیع‌های پواسون و نمایی برای توصیف ورودها و زمان خدمت‌دهی استفاده شده است [۲۱].

مک‌لی با استفاده از مدل ابرمکعب، دو نوع خدمت‌دهنده را مکان‌یابی و تعداد خدمت‌دهنده‌های از هر نوع را با هدف حداکثر کردن تقاضای پوشش‌یافته با اولویت اول تعیین کرد. در این مدل، تقاضاها دارای سه اولویت هستند و آمبولانس‌ها دو نوع‌اند. همچنین بین یک نوع از خدمت‌دهنده‌ها و خدمت‌دهنده‌های از نوع دیگر وابستگی وجود دارد. وی با استفاده از مدل ابرمکعب پارامترهای مدل را به دست آورده و مدل را به صورت یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح فرموله کرده است. این مدل با فرض این که خدمت‌دهنده‌ها دو نوع باشند، به واقعیت نزدیک است. به نحوی که یکی بتواند بیمار را جابجا کند و دیگری امکان جابه‌جایی بیمار را نداشته باشد. همچنین با تابع هدف تعریف شده قابلیت بقای بیماران افزایش می‌یابد [۲۲].

راجاگوپالان و سایدام مدلی برای مکان‌یابی بهینه‌ی آمبولانس‌ها با هدف حداقل‌سازی فاصله‌ی سفر آمبولانس‌ها با فرض پوشش تقاضا ارائه دادند. حل مدل با استفاده از یک الگوریتم جستجوی ابتکاری انجام یافته و از توزیع‌های پواسون و نمایی برای توصیف ورودها و زمان خدمت‌دهی استفاده شده است. همچنین احتمال مشغول بودن هر خدمت‌دهنده، با استفاده از مدل ابرمکعب محاسبه شده است [۱۰].

یانونی و همکاران یک روش بهینه‌سازی جهت تعیین مکان و نواحی پاسخگویی بهینه‌ی آمبولانس‌ها در بزرگراه‌ها ارائه دادند. آن‌ها از الگوریتم ژنتیک ترکیبی برای بهینه‌سازی و از مدل ابرمکعب برای محاسبه‌ی معیارها استفاده کردند. آن‌ها در مقاله‌ی خود، علاوه بر مکان‌یابی به تقسیم‌بندی[19] نواحی پاسخگویی نیز پرداختند [۲۳].

ماریانو و همکاران عملکرد تسهیلات با قابلیت ازدحام، با خدمت‌دهنده‌های چندگانه را با استفاده از مدل صف M/Er/m/N بهینه کرد. هدف مقاله‌ی وی، فرموله کردن و حل مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات با چند خدمت‌دهنده وقتی که مدت زمان خدمت‌دهی نمایی نباشد، بود. در این مدل ورود مشتریان از توزیع پواسون پیروی کرده، ولی زمان خدمت‌دهی توزیع ارلنگ داشته و تسهیلات چند خدمت‌دهنده می‌باشند. نویسندگان، از یک الگوریتم که ترکیبی از روش SOR[20] و تجمیع و تفکیک[21] می‌باشد، برای حل مدل استفاده کردند. ابتکار این مقاله این است که روش حلی برای مسائلی که مدت زمان خدمت‌دهی توزیع ارلنگ دارد، در حالت چند خدمت‌دهنده ارائه داده است [۲۴].

بیشتر مقالات موجود در ادبیات موضوع، مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات را با فرض‌های ساده‌کننده‌ای در نظر گرفته‌اند (مانند در نظر گرفتن توزیع پواسون و نمایی برای زمان‌های ورود و خدمت‌دهی). این فرضیات با این که حل مسئله را آسان‌تر می‌کند، ممکن است در برخی مسائل نماینده‌ی خوبی برای جهان واقعی نباشند. البته با بررسی مقالات جدیدتر ملاحظه می‌شود که برخی فرض‌های اساسی در مدل‌های صف تغییریافته است و تا حدی مسائل کاربردی‌تر شده‌اند. ولی برای این که مدل‌های توسعه داده‌شده بیشتر و بهتر بتوانند مسائل دنیای واقعی را منعکس کنند، بایستی مدل‌ها فرض‌های بیشتری را تغییر داده و آزاد کنند. البته آزادسازی مسئله از این فرض‌های ساده‌کننده هزینه‌بر است و باید منفعت‌های انجام این کار با هزینه‌های آن مقایسه شوند.

مسائلی که در مقالات مرتبط با موضوع؛ به خصوص برای حالتی که خدمت‌دهنده‌ها متحرک هستند؛ مورد بحث واقع شده‌اند، بیشتر بر مکان‌یابی تسهیلات امدادی اورژانسی می‌باشد. همچنین وقتی که خدمت‌دهنده‌ها ثابت هستند بیشتر بر مسائل بانک و تعمیرگاه‌های خودرو کار شده است. این در حالی است که در بسیاری از مسائل موجود در دنیای واقعی تقاضاها ماهیت احتمالی داشته و با توجه به محدود بودن ظرفیت خدمت‌دهی تسهیلات، ایجاد ازدحام برای دریافت خدمت غیرقابل اجتناب بوده و بایستی در مدل‌های توسعه‌یافته مدنظر قرار گیرد. به نظر می‌رسد می‌توان با تعمیم مدل‌های مربوطه در مورد کاربردهای عملی دیگر، شاهد توسعه‌ی مدل‌هایی بهتر و با قابلیت‌هایی بالاتر بود. همچنین در مورد مسائلی که به دنبال مکان‌یابی و تخصیص ظرفیت برای مراکز خدمت‌دهی (خدمت‌دهنده‌های ثابت) هستند، معمولاً واحدهای مختلف و همچنین رقبا تنها از بُعد تابع هزینه نظیر مدت زمان سفر و مدت انتظار در محل، تحلیل می‌شوند و این در حالی است که عوامل کمّی و عوامل کیفی بسیاری مانند کیفیت خدمت، قیمت خدمت، سیاست‌های مدیریت برای جذب مشتری وجود دارند که در توابع هزینه قابل اعمال شدن هستند.

روش‌های حل مدل برای به دست آوردن احتمالات حدی در مواردی که بُعد مسئله افزایش می‌یابد وقت‌گیر و حتی در بیشتر موارد، با توجه به افزایش بی‌رویه‌ی تعداد معادلات و مجهولات،

غیرقابل حل می‌باشد. استفاده از روش‌های تقریبی نیز دقت جواب‌ها را کاهش می‌دهد. اساساً یکی از دلایلی که مدل‌های ارائه شده کم‌تر به سراغ آزادسازی فرض‌های ساده‌کننده می‌روند سخت شدن حل مدل‌های حاصل از این آزادسازی‌ها می‌باشد. در این راستا، توسعه و استفاده از مدل‌هایی که بتواند این مشکلات را مرتفع کند در بسیاری از زمینه‌های کاربردی مفید واقع خواهد شد. در بیشتر مقالات موجود از مدل ابرمکعب برای به دست آوردن معیارهای عملکرد سیستم فعلی استفاده شده است و پس از محاسبه‌ی این معیارها در راستای بهینه‌سازی مکان تسهیلات اقدامی صورت نگرفته است. یعنی از مدل‌های نام‌برده برای تعیین وضعیت موجود سیستم بهره گرفته شده، نه در راستای بهبود سیستم. فقط در تعداد اندکی از مقالات، بعد از محاسبه‌ی معیارها، مکان بهینه با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی و یا الگوریتم‌های فراابتکاری تعیین شده است. در این تحقیق ابتدا معیارهای عملکرد سیستم فعلی با استفاده از مدل صف ابرمکعب محاسبه می‌شود. سپس برای بهینه‌سازی سیستم و بهبود معیارهای عملکرد از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. نحوه‌ی تلفیق این دو رویکرد در ادامه تشریح شده است.

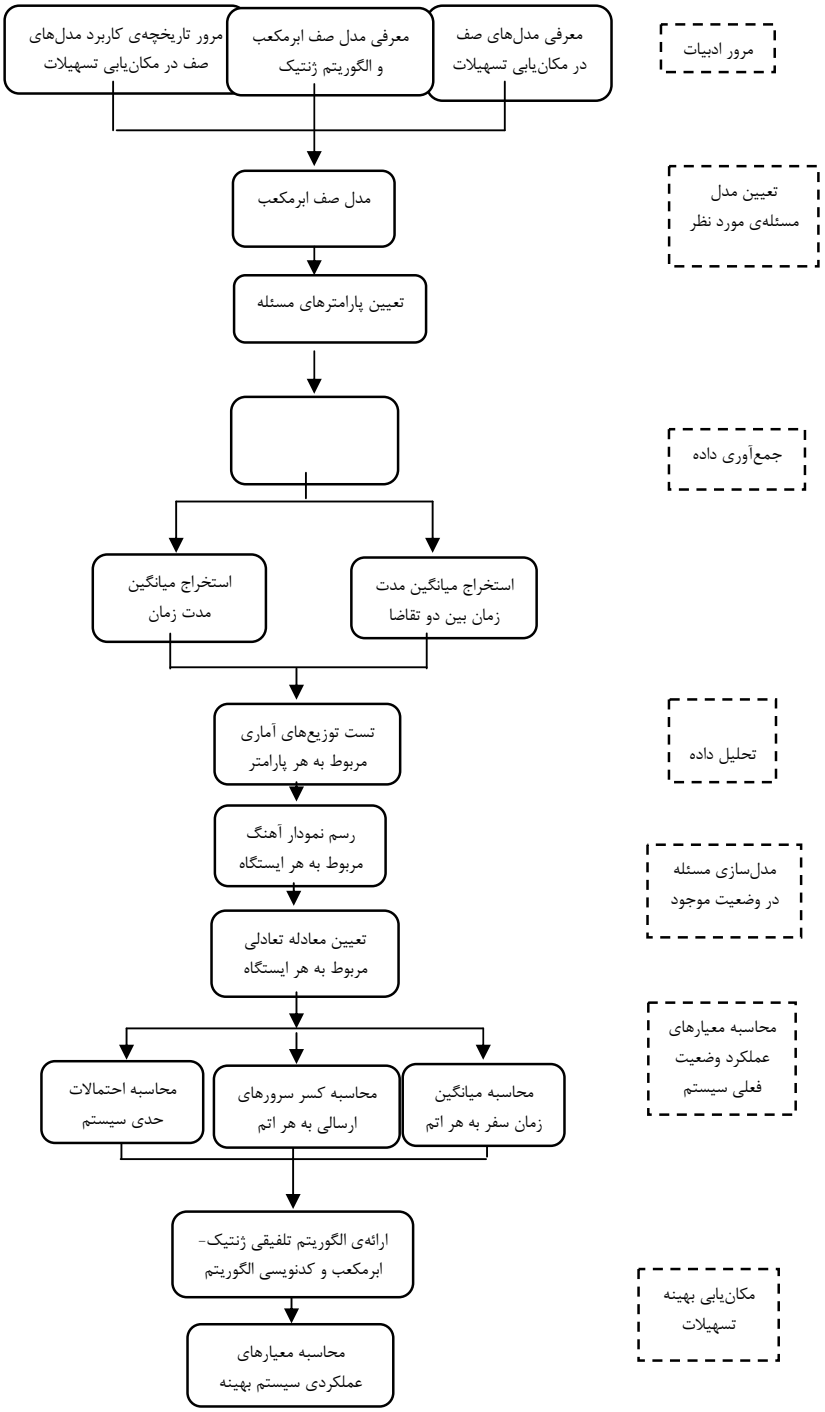
در این تحقیق با در نظر گرفتن مفروضاتی، سعی در تخصیص مراکز خدمت‌دهی خدمات اورژانسی داشته، به طوری که معیارهای عملکرد سیستم به عنوان یک سیستم صف، مانند بار کاری[۲۲] هر خدمت‌دهنده و میانگین زمان سفر هر خدمت‌دهنده که با استفاده از فرمول‌های مدل صف ابرمکعب محاسبه می‌شوند، به توازن برسد. هدف اصلی این تحقیق، تعیین بهترین حالت برای تخصیص ایستگاه‌های امداد خودرو موجود در طول بزرگراه تهران-قم می‌باشد، به نحوی که معیارهای عملکردی سیستم، بهبود یابند. در راستای رسیدن به این هدف، در ابتدا وضعیت فعلی سیستم در طول بزرگراه تهران- قم ارزیابی می‌شود. بدین منظور، زمان ورود بین هر تقاضا برای هر ناحیه و همچنین مدت زمان خدمت‌دهی برای هر تقاضا توسط هر خدمت‌دهنده به دست آمده و توزیع آماری هر یک از این زمان‌ها تعیین می‌شوند. همچنین میزان بار کاری هر ایستگاه با فرض این که سیستم در بلندمدت به پایداری می‌رسد، محاسبه می‌شود. پس از آن با تغییر اندازه‌ی هر یک از نواحی دریافت‌کننده‌ی خدمت توسط الگوریتم ژنتیک، پیکره‌بندی سیستم به گونه‌ای تغییر می‌یابد که بار کاری هر ایستگاه به توازن برسد. نتیجه‌ی مورد انتظار تحقیق، تخصیص ایستگاه‌های موجود به ناحیه‌ها می‌باشد؛ به طوری که با ایجاد توازن در بار کاری هر ایستگاه، معیارهای عملکردی سیستم بهبود یابند.

این پژوهش در چهار بخش تنظیم شده است. در بخش بعدی به تشریح الگوریتم پیشنهادی پرداخته و در بخش سوم نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل داده‌ها به تفصیل توضیح داده شده است. در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی در بخش چهارم ارائه شده است.

۲. الگوریتم پیشنهادی

این تحقیق در رابطه با سیستم خدمات امداد خودرو در بزرگراه تهران-قم صورت گرفته است. بزرگراه تهران-قم، یکی از مهم‌ترین راه‌های ارتباطی کشور می‌باشد که کلان شهر تهران را به استان مذهبی قم متصل می‌کند و در طول آن مراکز مهمی از جمله حرم مطهر امام خمینی و فرودگاه بین‌المللی امام خمینی قرار دارند. با توجه به این مهم، این بزرگراه به عنوان مورد مطالعه تحقیق در نظر گرفته شده است. در حال حاضر طول این بزرگراه به N_A اتم جغرافیایی افراز شده است و تسهیلات امداد خودرو در طول این بزرگراه مستقر شده‌اند که پاسخگوی نیازمندی‌های مشتریان در اتم‌های جغرافیایی می‌باشند. داده‌های مورد بررسی تحقیق مربوط به آمار تابستان سال ۱۳۸۹ می‌باشد، چرا که با توجه به تعطیلی مدارس در این ایام، بیشترین آمار سفرها در این ایام صورت گرفته و ایستگاه‌های امداد جاده‌ای در این ایام استقرار داده می‌شوند.

بر اساس آنچه در ادبیات مقاله مطرح شد، مدل مسئله‌ی حاضر از نظر ماهیت مدل، تحلیلی می‌باشد. در واقع بیان می‌شود که برای رسیدن به حالت بهتر سیستم، چه تغییرات و تنظیماتی می‌بایست در پارامترهای ورودی مسئله اتفاق بیافتد. همچنین به دلیل این که در این تحقیق به توصیف ویژگی‌های مسئله (مانند معیارهای عملکردی سیستم) پرداخته و از تئوری صف در مکان‌یابی استفاده می‌شود، می‌توان آن را در زمره‌ی مدل‌های توصیفی قرار داد. مدل مسئله‌ی حاضر از نظر نوع پارامترهای آن، دارای پارامترهای غیرقطعی از نوع احتمالی می‌باشد، چرا که احتمال مشغول بودن خدمت‌دهنده‌ها را هنگام نیاز و در نتیجه ایجاد ازدحام در بر می‌گیرد. در این مسئله عدم قطعیت موجود، توسط تئوری صف مطرح می‌شود. با توجه به شرایط تقاضا و ایجاد ازدحام، مدل مسئله‌ی حاضر از نوع میانه می‌باشد، چرا که پارامترهای ارزیابی سیستم را بهبود می‌دهند. از جمله‌ی این پارامترها، مدت زمان خدمت‌دهی می‌باشد که خود نوعی هزینه است و از نظر نحوه‌ی استقرار خدمت‌دهنده‌ها در زمره‌ی مسائل مکان‌یابی با خدمت‌دهنده‌ی متحرک قرار می‌گیرد. در این حالت، بیشتر ارائه‌ی خدمت در مدت زمان مشخص مد نظر است و حداکثر کردن مشتری جذب شده را مدنظر قرار نمی‌دهد. مدل مسئله‌ی پیش رو، از نظر خروجی‌های مسئله، در زمره‌ی مدل‌های ناحیه‌بندی (تقسیم‌بندی) قرار می‌گیرد و خروجی مدل، تقسیم‌بندی کل ناحیه‌ی پاسخگویی به زیرناحیه‌ها و تخصیص هر یک از این زیرناحیه‌ها به تسهیلات مستقر شده می‌باشد. نقشه‌ی راه این تحقیق به طور خلاصه در شکل ۱ ارائه شده است.



شکل ۱. نقشه‌ی راه تحقیق

در ادامه چارچوب نظری تحقیق بیان می‌شود.

۲-۱. تعیین مکان فعلی پایگاه‌ها و اتم‌ها

یکی از مهم‌ترین فرضیات مدل ابرمکعب این است که در این مدل مکان اولیه‌ی تسهیلات مشخص است و کل ناحیه‌ی مورد بررسی با توجه به تعداد تسهیلات و مکان آن‌ها به زیرناحیه‌ها تقسیم‌بندی می‌شود که به هر یک از این زیرناحیه‌ها یک اتم جغرافیایی گفته می‌شود [۹]. در این مرحله با توجه به اطلاعات و اسناد سازمانی و همچنین مراجعه‌ی حضوری به محل استقرار هر یک از پایگاه‌ها، مکان فعلی هر یک از پایگاه‌ها مشخص شده و

ناحیه‌ای که هر یک از خدمت‌دهنده‌ها در صورت بروز رخداد به آن خدمت‌رسانی می‌کنند، مشخص شد. طبق توضیحات گذشته، به مکان هر امداد خودرو در طول مسیر، پایگاه و به ناحیه‌ای که هر یک از پایگاه‌ها به آن خدمت‌رسانی می‌کنند اتم گفته می‌شود. هر پایگاه بنا به ضرورت، ممکن است به یک ناحیه‌ی دیگر به عنوان خدمت‌دهنده‌ی پشتیبان خدمت‌رسانی کند. در این مرحله همچنین، فواصل هر یک از پایگاه‌ها از یکدیگر و همچنین طول ناحیه‌ی هر اتم مشخص می‌شود.

۲-۲. استخراج لیست خدمت‌دهنده‌های اولویت اول و دوم برای هر اتم

در مدل ابرمکعب، برای هر اتم یک لیست مرتب‌شده‌ی خدمت‌دهندگان (بر اساس اولویت) وجود دارد که بر اساس آن خدمت‌دهندگان به تقاضاهای ایجاد شده در آن اتم تخصیص می‌یابند. به عنوان مثال اگر سیستمی دارای پنج خدمت‌دهنده باشد و لیست اولویت برای یک اتم مشخص به صورت (۲-۵-۴-۳-۱) باشد، بدین معنی است که در صورت ایجاد یک تقاضا در این اتم ابتدا خدمت‌دهنده‌ی شماره‌ی ۱ (در صورت بیکار بودن) به آن پاسخ خواهد داد و اگر این خدمت‌دهنده مشغول باشد، خدمت‌دهنده‌ی شماره‌ی ۳ به این تقاضا تخصیص می‌یابد و بدین صورت ادامه می‌یابد [۹].

در هر پایگاه یک تسهیل وجود دارد که پاسخگوی اصلی برای تقاضاهای ایجاد شده در اتم‌های مجاور می‌باشد ولی قابلیت خدمت‌رسانی به تقاضاهای ایجاد شده در سایر نواحی را نیز دارد. همچنین برای هر تقاضا در صورت تخصیص، فقط و فقط یک خدمت‌دهنده تخصیص پیدا می‌کند.

در این مرحله از تحقیق، لیست امداد خودروهای اولویت اول و دوم برای هر اتم (ناحیه) مشخص می‌شود. به هر اتم، در صورت مشغول بودن امداد خودرو اولویت اول، امداد خودرو اولویت دوم تخصیص داده می‌شود. این اطلاعات از عملکرد مرکز امداد خودرو ایران و با استفاده از آمار مربوط به سه ماهه‌ی تابستان ۸۹ ، قابل استخراج می‌باشند.

۲-۳. معرفی مدل ابرمکعب

در مدل صف ابرمکعب ابتدا احتمالات حدی سیستم در بلند مدت با توجه به تعریف حالت سیستم محاسبه شده و از روی آن‌ها معیارهای ارزیابی سیستم با توجه به مفاهیم موجود در تئوری صف محاسبه می‌شوند. این معیارها با توجه به اینکه یک ارزیابی از وضع موجود عملکرد سیستم را ارائه می‌دهند، منبعی بسیار مناسب جهت کمک به تصمیم‌گیری در سطح مدیریت می‌باشند. دقیقاً به همین دلیل است که مدل ابرمکعب در زمره‌ی مدل‌های توصیفی مکان‌یابی قرار گرفته است [۹]. بعد از محاسبه‌ی معیارهای ارزیابی سیستم باید مکان بهینه‌ی تسهیلات را تعیین کنیم. این کار با استفاده از برنامه‌ریزی ریاضی و استفاده از الگوریتم‌های متاهیوریستیک مثل الگوریتم ژنتیک و الگوریتم آنیل شبیه‌سازی‌شده میسر می‌شود [۲۳]. البته باید اشاره کرد که کاربرد مدل‌های صف به مدل ابرمکعب خلاصه نمی‌شود. برخی از مدل‌های صف نیز مسئله‌ی تعیین ظرفیت را به همراه مکان‌یابی در نظر می‌گیرند. از جمله کاربردهای این مدل‌ها می‌توان به مکان‌یابی و تعیین ظرفیت دستگاه‌های خودپرداز اشاره کرد. در این مسئله منظور از ظرفیت همان تعداد دستگاه‌هایی است که در یک محل باید قرار داده شوند [۲۵].

این مدل معروف‌ترین مدل توصیفی صف در زمینه‌ی مکان‌یابی است که یک سیستم صف گسترده در فضا با خدمت‌دهنده‌های مجزا را توصیف می‌کند. در این مدل برای هر خدمت‌دهنده دو حالت مشغول (۱) و بیکار (۰) درنظر گرفته می‌شود. بنابراین حالت سیستم را می‌توان به صورت یک بردار که مؤلفه‌های آن نشانگر حالت انفرادی هر یک از خدمت‌دهنده‌های سیستم است، نشان داد. با توجه به آنچه گفته شد سیستم مذکور دارای 2^N حالت است که در آن N نشان‌دهنده‌ی تعداد خدمت‌دهنده‌های سیستم است. به عنوان مثال بردار (۱۰۰۱۱) حالتی از یک سیستم با ۵ خدمت‌دهنده را نشان می‌دهد که در آن خدمت‌دهندگان سوم و چهارم بیکار هستند (از راست به چپ) و سایر خدمت‌دهندگان مشغول به کار می‌باشند. اگر سیستم دارای ۳ خدمت‌دهنده باشد می‌توان حالات مختلف آن را با مختصات گوشه‌های یک مکعب واحد نشان داد.

با افزایش تعداد خدمت‌دهنده‌ها حالات مختلف سیستم متناظر با مختصات گوشه‌های یک ابرمکعب[۲۳] خواهد شد که علت نام‌گذاری این مدل به این نام را نشان می‌دهد.

اختلاف بین دو حالت مختلف این سیستم را با فاصله‌ی همینگ[۲۴] بیان می‌کنند. طبق تعریف فاصله‌ی دو حالت برابر تعداد مؤلفه‌های متفاوت در بردار متناظر دو حالت می‌باشد. به عنوان مثال فاصله‌ی همینگ دو حالت (۱۰۰۱۱) و (۰۱۱۱۱) برابر ۳ می‌باشد. در واقع فاصله‌ی همینگ بین دو حالت برابر با تعداد یال‌های ابرمکعب می‌باشد که برای رفتن از یک حالت به حالت دیگر باید طی شود [۱۵].

۲-۴. معرفی فرضیات مدل

در این مرحله از تحقیق فرضیات مدل ابرمکعب جهت بکارگیری آن‌ها در تحلیل مکان‌یابی و تخصیص ایستگاه‌های امداد خودرو در طول بزرگراه تهران - قم، معرفی می‌شوند و مطابقت فضای مسئله با فرضیات مدل مورد بحث و آزمون قرار می‌گیرد.

در مدل ابرمکعب، برای هر اتم یک لیست مرتب‌شده‌ی خدمت‌دهندگان (بر اساس اولویت) وجود دارد که بر اساس آن خدمت‌دهندگان به تقاضاهای ایجاد شده در آن اتم تخصیص می‌یابند [۹]. فرضیات مدل صف ابرمکعب در مکان‌یابی تسهیلات

در ادامه معرفی شده است. اتم‌های جغرافیایی: طول جاده به N_A اتم جغرافیایی که در این تحقیق برابر ۷ می‌باشد، افراز شده است. ورودهای مستقل پواسون: تقاضا برای خدمات اورژانسی در هر اتم j طبق فرایند پواسون با پارامتر λ_j و مستقل از سایر اتم‌ها ایجاد می‌شود که این فرض مورد آزمون قرار گرفته است.

زمان‌های سفر: متوسط زمان سفر از اتم i به اتم j برابر τ_{ij} تخمین زده شده است. نتایج این تخمین‌ها، با تعیین مرکز هر اتم و با توجه به سرعت متوسط بزرگراه (یعنی خط دوم بزرگراه که بیشترین سرعت مجاز در آن برابر با ۱۰۰ کیلومتر در ساعت می‌باشد و با استفاده از استخراج مسافت بین هر یک از مرکز اتم‌ها از سایت www.maps.google.com به صورت دقیق تعیین شده است. نتایج این مرحله در شکل (۴) ارائه شده است.

خدمت‌دهندگان: تعداد $N=4$ خدمت‌دهنده وجود دارد که در فضای مورد بحث مسئله توزیع شده‌اند (شکل ۴).

مکان خدمت‌دهندگان: هر خدمت‌دهنده در زمان بیکاری در پایگاه خود که در مراحل قبلی مشخص شده است؛ در حالت انتظار برای تماس جدید می‌ماند.

تخصیص خدمت‌دهندگان: در پاسخ به هر تماس یک خدمت‌دهنده به محل رخداد اعزام می‌شود. ابتدا نزدیک‌ترین خدمت‌دهنده به محل رخداد (اولین خدمت‌دهنده در لیست اولویت اتم مربوطه) تخصیص داده می‌شود و اگر این خدمت‌دهنده مشغول بود، دومین خدمت‌دهنده (اولویت دوم در لیست ذکرشده) تخصیص می‌یابد. اگر خدمت‌دهنده‌ی پشتیبان نیز مشغول باشد، آن‌گاه تقاضای مربوطه از دست می‌رود و به واحدهای خارج از سیستم (سازمان‌های دیگر امدادخودرو) ارجاع داده می‌شود.

اعزام خدمت‌دهنده‌ها با توجه به لیست ثابت اولویت‌ها: یک لیست ثابت مرتب‌شده از خدمت‌دهنده‌های سیستم برای هر اتم تهیه می‌شود و اگر رخدادی در هر یک از اتم‌ها رخ دهد اعزام خدمت‌دهنده‌ها با توجه به لیست مربوط به آن اتم صورت می‌گیرد.

زمان خدمت‌دهی: زمان خدمت‌دهی شامل زمان آماده‌سازی، زمان سفر از پایگاه به محل رخداد، زمان حضور در محل رخداد، زمان‌های ممکن دیگر مثل انتقال به شهر و زمان برگشت به پایگاه می‌باشد. بنابراین خدمت‌دهنده‌ها دارای میانگین زمان خدمت‌دهی $\mu_N, \ldots, \mu_2, \mu_1$ است که این مقادیر می‌توانند برابر باشند و با توجه به این که این زمان‌ها دارای توزیع نمایی هستند؛ انحراف استاندارد مساوی با میانگین می‌باشد.

استقلال زمان خدمت از مسافت سفر: مقدار تغییرپذیری در زمان خدمت‌دهی که حاصل از تغییرپذیری در مسافت سفر می‌باشد در مقایسه با تغییرپذیری در زمان آماده‌سازی، زمان حضور در صحنه و زمان‌های دیگر، از درجه‌ی دوم تلقی شده است. البته این به معنی عدم محاسبه‌ی زمان سفر در زمان خدمت‌دهی نمی‌باشد. با توجه به این مفروضات و پارامترهای موجود در مقاله‌های مطالعه شده، پارامترهای مسئله تعریف می‌شوند.

۲-۵. معرفی پارامترهای مسئله

در این مرحله پارامترهای مورد استفاده در مسئله معرفی خواهند شد و نماد ریاضی هر یک از آن‌ها ارائه می‌شود. در این مرحله سعی می‌شود از پارامترهای موجود در مقالات مطالعه شده جهت تعریف پارامترها استفاده شود تا پارامترهای مسئله با پارامترهای مقالات موجود مطابقت داشته باشند.

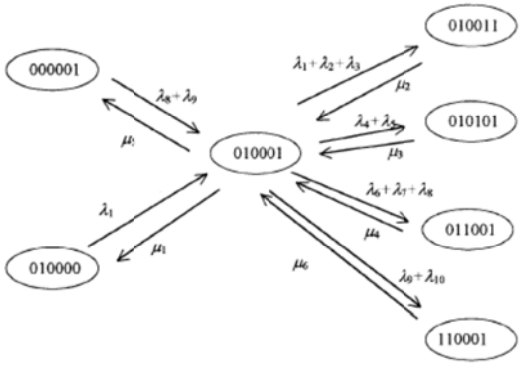
جدول ۱. پارمترهای مدل صف ابرمکعب [۲۱]

N	تعداد خدمت‌دهنده‌ها (در این مسئله برابر تعداد تسهیلات می‌باشد).
N_A	تعداد اتم‌ها (ناحیه‌ها)
E_{ij}	مجموعه‌ای از حالت‌ها است که در آن خدمت‌دهنده‌ی i نزدیک‌ترین خدمت‌دهنده‌ی در دسترس برای اتم j می‌باشد.
K	مجموعه‌ی تمام حالت‌های سیستم: $\lvert K\rvert=2^N$
f_{ij}	کسری از سفرها که در آن خدمت‌دهنده‌ی i به اتم j سفر می‌کند، $i=1,2,\ldots,N$
Λ	نرخ کلی تقاضا
λ_j	نرخ تقاضای تولیدشده در اتم j، $j=1,2,\ldots,N_A$
μ_i	نرخ خدمت‌دهی خدمت‌دهنده‌ی i، $i= 1, 2,..., N$
P_B	احتمال حدی قرار داشتن سیستم در حالت B
P_p	احتمال کمبود در سیستم[۲۵] (احتمال از دست دادن تقاضا)
t_{ij}	میانگین مدت زمان سفر خدمت‌دهنده‌ی i، برای رفتن به اتم j[۲۶] (این پارامتر به آسانی با استفاده از متوسط زمان‌های سفر داخل اتم‌ها[۲۷] (τ_{ij}) قابل محاسبه است.)

۲-۶. رسم نمودارهای آهنگ هر حالت

رابطه‌ی بین حالت‌های یک سیستم صف را می‌توان با نمودار آهنگ نشان داد. در این نمودار گره‌ها معرف حالت سیستم و شاخه‌ها نشان‌دهنده‌ی امکان گذار از هر حالت به حالت دیگر است [۳]. در این مرحله نمودارهای آهنگ هر حالت ترسیم خواهد شد. به عنوان مثال با داشتن شش خدمت‌دهنده، برای

حالت (۰۱۰۰۰۱)، نمودار آهنگ به صورت شکل (۲) می‌باشد. در این نمودار آهنگ وقتی حالت سیستم از (۰۱۰۰۰۱) به حالت (۰۰۰۰۰۱) انتقال می‌یابد که خدمت‌دهنده‌ی پنجم، با نرخ μ_5 خدمت‌رسانی کند. برای شاخه‌های دیگر نیز با توجه به اولویت‌های هر خدمت‌دهنده در خدمت‌دهی، نمودار آهنگ انتقال قابل تفسیر می‌باشد.



شکل ۲. جریان‌های ورودی و خروجی حالت (۰۱۰۰۰۱) [۸]

۲-۷. تعیین معادلات تعادلی

برای نوشتن معادلات تعادلی باید جمع جریان ورودی را برابر جمع جریان خروجی قرار داد. به عنوان مثال رابطه‌ی (۱) برای حالت (۰۱۰۰۰۱)، با توجه به نمودار آهنگ شکل (۲) محاسبه می‌شود:

$$(\lambda_8+\lambda_9)\ p_{000001}+\lambda_1 P_{010000}+\mu_2 P_{010011}+\mu_3 P_{010101}+\mu_4 P_{011001}+\mu_6 P_{110001} = ((\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3+\lambda_4+\lambda_5+\lambda_6+\lambda_7+\lambda_8+\lambda_9+\lambda_{10})+(\mu_1+\mu_5))\ P_{010001} \quad (1)$$

۲-۸. استخراج آمار فرایند ورودی برای هر اتم و تست توزیع پواسون برای نرخ ورود

رابطه‌ی ۲ (میزان بار کاری خدمت‌دهنده‌ی i (ρ_i))

رابطه‌ی ۳ (میزان عدم توازن بار کاری خدمت‌دهندگان در هر ناحیه)

رابطه‌ی ۴ (کسری از سفرها که در آن خدمت‌دهنده‌ی i به اتم j سفرمی‌کند[۳۰])

رابطه‌ی ۵ (میانگین زمان سفر خدمت‌دهنده‌ی i[۳۱] (TU_i))

در این مرحله با توجه به فرض مدل ابرمکعب که تقاضا برای خدمات امداد خودرو در هراتم j طبق فرایند پواسون با پارامتر λ_j و مستقل از سایر اتم‌ها ایجاد می‌شوند، اطلاعات مربوط به تقاضای هر ناحیه (اتم) از آمار مربوط به تابستان سال ۸۹ استخراج می‌شود. این اطلاعات از مرکز امداد خودرو ایران قابل استخراج بوده و تقاضای هر ناحیه به صورت جداگانه موجود می‌باشد. برای هر تقاضا، زمان تقاضا و محل دقیق آن در ناحیه‌ی مربوطه مشخص می‌باشد. برای آزمون فرضیه‌ی اینکه داده‌ها واقعاً از توزیع پواسون پیروی می‌کنند، آزمون‌های نکویی برازش مربع‌کای[۲۸] وکولموگروف- اسمیرنوف[۲۹] روی داده‌ها انجام می‌شود تا مشخص شود که این تست‌ها نمی‌توانند در سطح ۵٪ فرض مذکور را رد کنند.

۲-۹. استخراج آمار فرایند خدمت‌دهی هر پایگاه و تست توزیع نمایی برای نرخ خدمت‌دهی

زمان خدمت‌دهی شامل زمان آماده‌سازی، زمان سفر از پایگاه به محل حادثه، زمان حضور در محل حادثه، زمان‌های ممکن دیگر (مثل انتقال خودرو به شهر)، و زمان برگشت به پایگاه می‌باشد. این داده‌ها برای هر امداد خودرو ثبت شده و در آمار مرکز امداد خودرو ایران موجود می‌باشد. برای آزمون فرضیه‌ی اینکه داده‌ها واقعاً از توزیع نمایی پیروی می‌کنند، آزمون‌های نیکویی برازش مربع‌کای و کولموگروف- اسمیرنوف روی داده‌ها انجام می‌شود تا مشخص شود که این تست‌ها نمی‌توانند در سطح ۵٪ فرض مذکور را رد کنند.

۲-۱۰. محاسبه‌ی معیارهای عملکرد سیستم فعلی

با جایگذاری یکی از 2^N معادله‌ی تعادلی سیستم به دست آمده با $\sum_B P_B = 1$ یک دستگاه معادلات 2^N معادله‌ای با 2^N مجهول به دست می‌آید که حل آن، احتمالات حدی را به دست می‌دهد. با استفاده از این احتمالات تمام معیارهای عملکرد سیستم از جمله موارد زیر قابل محاسبه است:

$$\rho_i = \sum_{\{B:server\ i\ is\ busy\}} P_B$$

$$\Delta W = \left|\rho_{mean} - \rho_i\right|$$

$$f_{ij} = \frac{\frac{\lambda_j}{\lambda}\sum B \in E_{ij} P_B}{1-P_p}$$

$$TU_i = \frac{\sum_{j=1}^{N_A} f_{ij} t_{ij}}{\sum_{j=1}^{N_A} f_{ij}}$$

رابطه‌ی ۶ (میانگین زمان سفر برای رسیدن به اتم j، (T_j)[۳۲])

$$T_j = \frac{\sum_{i=1}^{N} f_{ij} t_{ij}}{\sum_{i=1}^{N} f_{ij}}$$

رابطه‌ی ۷ (میانگین مدت زمان سفر سیستم[۳۳] (T))

$$T = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N_A} f_{ij} t_{ij}$$

رابطه‌ی ۸ (کسر سفرها به هر ناحیه که از ناحیه‌های دیگر صورت می‌گیرد)

$$F_j = \frac{\sum \{i : i \, is \, out \, of \, district\} \, f_{ij}}{\sum_{i=1}^{N} f_{ij}}$$

رابطه‌ی ۹ (کسر سفرهای هر خدمت‌دهنده که به ناحیه‌های دیگر صورت می‌گیرد)

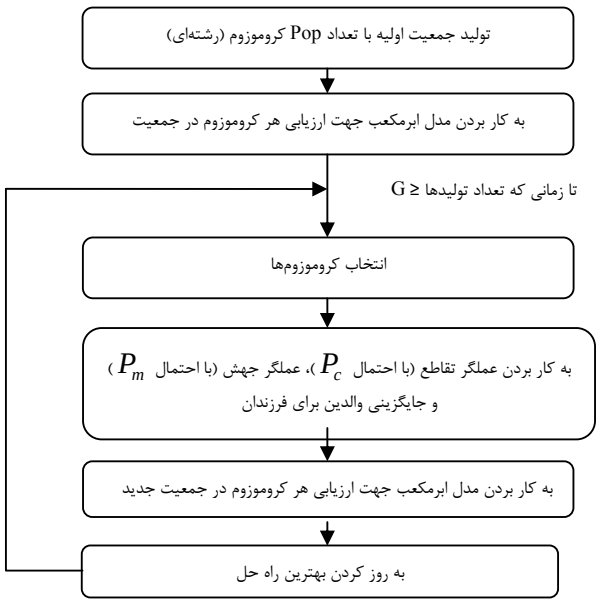
$$F_j = \frac{\sum \{i : i \, is \, out \, of \, district\} \, f_{ij}}{\sum_{j=1}^{N_A} f_{ij}}$$

۲-۱۱. الگوریتم تلفیقی ژنتیک- ابرمکعب جهت بهینه‌سازی

در این مرحله با بررسی مقالات و منابع مختلفی که در صدد بهینه‌سازی سیستم‌های صف با خدمت‌دهنده‌ی متحرک بوده‌اند، از الگوریتمی تلفیقی از مدل صف ابرمکعب و الگوریتم ژنتیک با هدف بهینه‌سازی اندازه‌ی اتم‌ها در سیستم استفاده می‌شود. انتخاب الگوریتم ژنتیک به دلیل اجرای موفق تلفیق آن با مدل صف ابرمکعب استفاده شده در مسئله‌ی مکان‌یابی آمبولانس‌ها در تحقیق [۲۶] می‌باشد.

همان‌طور که در الگوریتم مورد نظر (شکل ۳) مشخص می‌باشد، مراحل زیر که گام‌های مربوط به الگوریتم ژنتیک می‌باشد، با در نظر گرفتن معیارهای عملکرد مدل صف ابرمکعب اجرا شده و در نهایت جواب نزدیک به بهینه‌ی حاصل از اجرای الگوریتم برنامه‌نویسی شده ارائه خواهد شد:

تولید و نمایش کروموزوم، ارزیابی و تابع برازش، انتخاب کروموزوم، تقاطع و جهش، تنظیم پارامتر



شکل ۳. ساختار اصلی الگوریتم تلفیقی ژنتیک- ابرمکعب [۲۱]

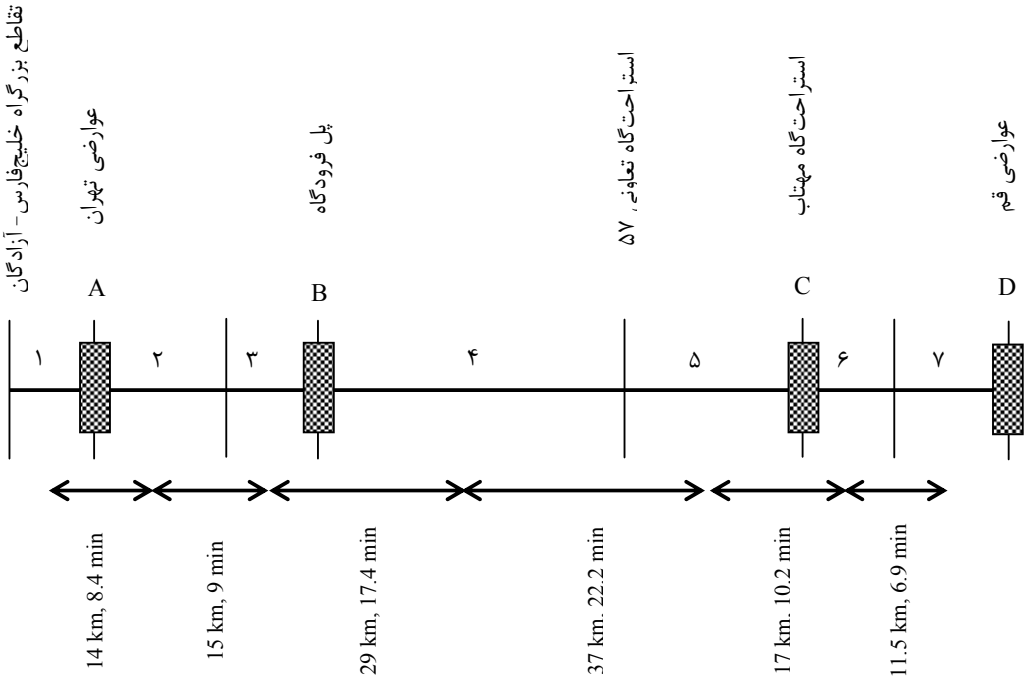
۲-۱۲. محاسبه‌ی معیارهای عملکرد سیستم بهینه

در این بخش کلیه معیارهای عملکرد سیستم معرفی شده در بند ۲-۱۰ در حالت بهینه محاسبه شده و با وضعیت فعلی مقایسه می‌شود.

۳. تجزیه و تحلیل داده‌ها

در این تحقیق داده‌های ورودی مسئله از جمله میانگین مدت زمان بین دو تقاضا و همچنین میانگین مدت زمان پاسخگویی به تقاضاها با استفاده از آزمون‌های نیکویی برازش مربع کای[۳۴] و کولموگروف-اسمیرنوف[۳۵] مورد ارزیابی قرار گرفتند. این آزمون‌ها با استفاده از نرم افزار SPSS در سطح معناداری ۵٪ فرض پواسون یا نمایی بودن آن‌ها را رد نکردند. همچنین به منظور ارزیابی عملکرد سیستم فعلی و سیستم بهینه از مدل صف ابرمکعب استفاده می‌شود.

در مرحله‌ی اول با توجه به اطلاعات و اسناد سازمانی، مراجعه به نقشه‌های اینترنتی موجود در سایت www.maps.google.com و همچنین مراجعه‌ی حضوری به محل استقرار هر یک از پایگاه‌ها، مکان فعلی هر یک از پایگاه‌ها مشخص شده و ناحیه‌هایی که هر یک از خدمت‌دهنده‌ها در صورت بروز رخداد به آن‌ها خدمت‌رسانی می‌کنند، در شکل (۴) مشخص شده است.



شکل ۴. فاصله و متوسط زمان سفر از اتم i به اتم j

در جدول (۲)، طول ناحیه‌ی هر اتم و همچنین فواصل هر یک از پایگاه‌ها از یکدیگر مشخص شده است.

جدول ۲. طول ناحیه‌ی هر اتم (فاصله‌ی هر یک از پایگاه‌ها)

شماره‌ی اتم	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	جمع طول اتم‌ها
طول اتم (km)	۸	۲۰	۱۰	۴۸	۲۶	۸	۱۵	۱۳۵

در این مرحله از تحقیق، خدمت‌دهنده‌های اولویت اول و دوم برای هر اتم (ناحیه) مشخص شده است. به هر اتم، در صورت اشغال بودن خدمت‌دهنده‌ی اولویت اول، خدمت‌دهنده‌ی اولویت دوم تخصیص داده می‌شود. این داده‌ها در جدول (۳) ارائه شده است.

جدول ۳. خدمت‌دهنده‌های اولویت اول و دوم برای هر ناحیه

شماره‌ی اتم	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
خدمت‌دهنده‌ی اولویت اول	A	A	B	B	C	C	D
خدمت‌دهنده‌ی اولویت دوم	-	B	A	C	B	D	C

در این مدل برای هر خدمت‌دهنده دو حالت مشغول (۱) و بیکار (۰) در نظر گرفته شده است. بنابراین حالت سیستم را می‌توان یک بردار که مؤلفه‌های آن نشان‌گر حالت انفرادی هر یک از خدمت‌دهنده‌های سیستم است، نشان داد. با توجه به آن‌چه گفته شد سیستم مذکور دارای ۲۴ حالت می‌باشد. به عنوان مثال بردار (۰۰۱۱) حالتی از سیستم را نشان می‌دهد که در آن خدمت‌دهندگان سوم و چهارم بیکار هستند (از راست به چپ) و سایر خدمت‌دهندگان مشغول به کار می‌باشند. با افزایش تعداد خدمت‌دهنده‌ها حالت‌های مختلف سیستم متناظر با مختصات گوشه‌های یک ابرمکعب[۳۶] خواهد شد که علت نام‌گذاری این مدل به ابرمکعب را نشان می‌دهد.

در این مرحله با بررسی مقالات و منابع مختلفی که در صدد بهینه‌سازی سیستم‌های صف با خدمت‌دهنده‌ی متحرک بوده‌اند، از الگوریتم تلفیقی مدل صف ابرمکعب و الگوریتم ژنتیک با هدف بهینه‌سازی اندازه‌ی اتم‌ها در سیستم استفاده می‌شود. الگوریتم ژنتیک به دسته روش‌هایی تعلق دارد که از تکامل موجودات زنده برای جستجوی جواب مسئله تقلید می‌کند [۴]. انتخاب الگوریتم ژنتیک به دلیل تلفیق موفق آن با مدل صف ابرمکعب در مسئله‌ی مکان‌یابی آمبولانس‌ها در تحقیقات سایدام و آیتاک می‌باشد [۲۶]. نتایج استخراج شده مربوط به نرخ تقاضای هر یک از اتم‌ها در جدول (۴) ارائه شده است.

جدول ۴. آمار فرایند ورود تقاضا به هر اتم

اتم j	تعداد رخدادها	میانگین زمان ورود تقاضا (دقیقه)	انحراف استاندارد (دقیقه)	ضریب تغییرات	نرخ ورود تقاضا (λ_j)
۱	۱۱۸	۱۱۲۲/۸	۷۰۹/۲	۰/۶	۰/۰۰۰۹
۲	۱۸۵	۷۲۱/۸	۵۸۰/۶	۰/۸	۰/۰۰۱۴

پس از حل دستگاه ۱۶ معادله و ۱۶ مجهولی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB احتمالات حدی برای هر یک از حالت‌ها به دست آمده و بر اساس روابط شماره (۱) تا (۹) شاخص‌های مهم وضعیت موجود شامل احتمال کمبود سیستم، احتمال بیکاری سیستم، احتمال مشغول بودن سیستم، TU_{mean} خدمت‌دهنده، T_{mean} اتم، T_{total} سیستم، F_{mean} خدمت‌دهنده و F_{mean} اتم به شرح جدول (۶) محاسبه شد:

۳	۱۵۲	۸۷۷/۶	۷۵۰/۴	۰/۹	۰/۰۰۱۱
۴	۲۵۰	۵۳۳	۴۵۷/۶	۰/۹	۰/۰۰۱۹
۵	۱۳۱	۱۰۱۴/۶	۸۵۳/۸	۰/۸	۰/۰۰۱۰
۶	۱۲۲	۱۰۸۸/۲	۹۲۲/۴	۰/۸	۰/۰۰۰۹
۷	۱۲۰	۱۱۱۱/۲	۱۳۶۷/۶	۱/۲	۰/۰۰۰۹

نتایج استخراج شده مربوط به نرخ خدمت‌دهی هر یک از خدمت‌دهنده‌ها در جدول (۵) ارائه شده است. لازم به ذکر است نرخ ارائه‌ی خدمت برای خدمت‌دهنده‌ها ثابت می‌باشد.

جدول ۵. آمار فرایند خدمت‌دهی هر خدمت‌دهنده

خدمت‌دهنده‌ی i	تعداد خدمت‌دهی‌ها	میانگین زمان خدمت‌دهی (دقیقه)	انحراف استاندارد (دقیقه)	ضریب تغییرات	نرخ خدمت‌دهی (μ_i)
A	۲۷۲	۷۹/۹	۴۹/۲	۰/۶	۰/۰۱۳
B	۳۷۵	۶۲/۴	۴۲/۸	۰/۷	۰/۰۱۶
C	۲۹۵	۹۰/۵	۴۱/۶	۰/۵	۰/۰۱۱
D	۱۱۷	۱۱۹/۷	۵۳/۹	۰/۵	۰/۰۰۸

بر اساس داده‌های حاصل می‌توان عملکرد سیستم در وضعیت فعلی را مورد ارزیابی قرار داد. با جایگذاری یکی از ۱۶ معادله‌ی تعادلی به دست آمده برای سیستم با $\sum_B P_B = 1$ که در رابطه‌ی (۱۰) ارائه شده است، یک دستگاه معادلات ۱۶ معادله‌ای با ۱۶ مجهول به دست می‌آید که حل آن احتمالات حدی را به دست می‌دهد.

$$\sum_B P_B = P_{0000} + P_{0001} + P_{0010} + P_{0100} + P_{1000} + P_{0011} + P_{0101} + P_{1001} + P_{0110} + P_{1010} + P_{1100} + P_{0111} + P_{1011} + P_{1101} + P_{1110} + P_{1111} = 1 \quad (۱۰)$$

جدول ۶. میانگین شاخص‌های مهم سیستم در وضعیت موجود

افزایش تقاضا (درصد)	احتمال کمبود سیستم (P_p)	احتمال بیکاری سیستم (P_{0000})	احتمال مشغول بودن سیستم (P_{1111})	TU_{mean} خدمت‌دهنده (min)	T_{mean} اتم (min)	T_{total} سیستم (min)	F_{mean} خدمت‌دهنده	F_{mean} اتم
وضعیت موجود	۰/۰۵۳۶۰۸	۰/۵۲۴۵۳	۰/۰۰۳۹۲	۷/۷۵۰۸۹۳	۷/۲۷۵۱۶۹	۸/۴۱۵۵۱۵	۰/۱۲۶۴۲۵	۰/۱۱۳۵۹۷

اکنون که وضعیت موجود سیستم با شاخص‌های متعدد مورد بررسی قرار گرفت؛ در این بخش از الگوریتم تلفیقی پیشنهادی، برای جستجوی اندازه‌ی نزدیک به بهینه‌ی اتم‌ها در سیستم استفاده می‌شود.

برای شناسایی و معرفی کروموزوم که یکی از اجزای اصلی الگوریتم ژنتیک می‌باشد، روشی جهت تغییر و اصلاح اندازه‌ی اتم‌ها برای تولید پیکربندی‌های مختلف امکان‌پذیر اتم‌ها (کروموزوم) در سیستم معرفی می‌شود. هر کروموزوم (پیکربندی‌های امکان‌پذیر سیستم) به عنوان یک بردار $x=(x_1,x_2,...,x_{N-1})$ معرفی می‌شود که در آن x_i کسری از فاصله‌ی بین دو پایگاه خدمت‌دهی i و $i+1$ است. اندازه‌ی اتم ترجیحی برای خدمت‌دهنده‌ی i با $x_i d_i$ مشخص شده و فاصله‌ی باقیمانده بین پایگاه‌های ۱ و ۲ به عنوان اتم ترجیحی برای خدمت‌دهنده‌ی $i+1$ تخصیص داده می‌شود. در این روابط d_i فاصله‌ی بین ایستگاه i و $i+1$ است. برای محدود کردن ناحیه‌ی ترجیحی برای هر خدمت‌دهنده‌ی i بین ۱۰ تا ۹۰ درصد از فاصله‌ی d_i، فرض $0.1 \le x_i \le 0.9$ در نظر گرفته شده است.

برای اصلاح داده‌های ورودی به مدل صف ابرمکعب بر اساس پیکربندی‌های مختلف سیستم، روشی ارائه شده که با توجه به تغییرات اندازه‌ی اتم، مقادیر نرخ ورود به سیستم را تعیین می‌کند. در این محاسبه، الگوریتم مورد نظر برای هر پیکربندی سیستم، نرخ ورود تقاضا به هر اتم را با توجه به نرخ ورود تقاضا در وضعیت موجود و مقادیر اولیه و ثانویه‌ی اندازه‌ی هر اتم مشخص می‌کند. بعد از تغییر در اندازه‌ی اتم‌های j و $j+1$ که بین دو پایگاه خدمت‌دهی i و $i+1$ قرار دارند، نرخ‌های ورود تقاضای جدید λ_j و λ_{j+1} با در نظر گرفتن نرخ‌های ورود تقاضای وضعیت موجود (${\lambda^0}_j$ و ${\lambda^0}_{j+1}$) توسط روابط زیر محاسبه می‌شوند [۲۱].

$$\begin{aligned} &if\ z_j < {z^0}_j \quad then \begin{cases} \lambda_j = z_j({\lambda^0}_j / {z^0}_j) \\ \lambda_{j+1} = {\lambda^0}_{j+1} + (z_{j+1} - {z^0}_{j+1})({\lambda^0}_i / {z^0}_j) \end{cases} \\ &if\ z_j > {z^0}_j \quad then \begin{cases} \lambda_j = {\lambda^0}_j + (z_j - {z^0}_j)({\lambda^0}_{j+1} / {z^0}_{j+1}) \\ \lambda_{j+1} = z_{j+1}({\lambda^0}_{j+1} / {z^0}_{j+1}) \end{cases} \end{aligned} \qquad (۱۱)$$

روش ارزیابی در الگوریتم ژنتیک- ابرمکعب، محاسبه‌ی معیارهای عملکرد سیستم برای هر پیکربندی سیستم که توسط مدل صف ابرمکعب معرفی شده است، می‌باشد. برخی از معیارهای عملکرد که توسط مدل صف ابرمکعب معرفی شدند، ممکن است برای علاقه‌های مختلف متناقض باشند. برای مثال، توازن بار کاری خدمت‌دهنده‌ها یک معیار عملکرد داخلی سیستم است که مورد نظر مدیران عملیاتی می‌باشد. از طرف دیگر زمان پاسخگویی به تقاضا یک معیار عملکرد خارج از سیستم است که به‌طور عمومی برای مشتریان دارای اهمیت می‌باشد. بدین منظور، در این مطالعه دو تابع هدف با دو مقدار متفاوت (تابع برازش $f(x)$ از کروموزوم x)، جهت ارزیابی پیکربندی‌های تولید شده در نظر گرفته می‌شود. در تابع هدف اول، هدف کمینه کردن میانگین زمان سفر در سیستم است که تابع برازش آن به شکل رابطه‌ی ۱۲ می‌باشد.

$$\min f(x) = \bar{T}(x)\ \bar{T}(x) = \sum_{i=1}^{N}\sum_{j=1}^{N_A} f_{ij}t_{ij} \qquad (۱۲)$$

در تابع هدف دوم، هدف کمینه کردن عدم توازن بار کاری خدمت‌دهنده‌ها با استفاده از انحراف استاندارد از میانگین است که به شکل زیر معرفی می‌شود.

$$\min f(x) = \sigma_\rho(x)\ \sigma_\rho(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N}(\rho_i - \bar{\rho})^2}{N}} \qquad (۱۳)$$

که در این رابطه مقدار $\bar{\rho}$ برابر با عبارت $(\sum_{i=1}^{N}\rho_i)/N$ می‌باشد [۲۳]. انتخاب والدین در اجرای الگوریتم از طریق روش چرخ رولت، با احتمالاتی بر اساس مقدار تابع برازش انجام گرفته است. بعد از انتخاب دو والدین با احتمال p_c، عملگر تقاطع از روش معروف یک- نقطه‌ای با احتمال $(1-p_c)$ برای تولید بعدی لحاظ شد. عملگر جهش نیز با احتمال p_m برای هر ژن در کروموزوم در نظر گرفته شده است [۲۱].

در تنظیم پارامترهای بحرانی الگوریتم ژنتیک- ابرمکعب، مانند احتمال تقاطع (p_c)، احتمال جهش (p_m)، تعداد تولید (G) و اندازه‌ی جمعیت (Pop)، در ابتدا تست‌های وسیعی با مقادیر مختلف این پارامترها در محدوده‌ی مشخصی انجام شد، که در اکثر تست‌ها مجموعه مقادیر زیر بهترین نتایج را به‌دست می‌دادند [۲۱]:

$$p_c = 0/5$$
$$p_m = 0/06$$
$$G = 100 \quad generations$$
$$Pop = 20 \quad chromosomes$$

پس از بهینه کردن سیستم به کمک الگوریتم تلفیقی، طول ناحیه‌ی هر اتم مطابق جدول (۷) حاصل شده است.

جدول ۷. مقایسه‌ی برخی معیارهای عملکردی مربوط به خدمت‌دهنده‌ها با تغییر وضعیت سیستم

خدمت‌دهنده	وضعیت	میزان بار کاری خدمت‌دهنده i (ρ_i)	میزان عدم توازن بار کاری خدمت‌دهنده i (ΔW_i)	میانگین زمان سفر خدمت‌دهنده i بر حسب دقیقه (TU_i)	کسر سفرهای هر خدمت‌دهنده که به ناحیه‌های دیگر صورت می‌گیرد
A	واقعی	۰/۱۷۲۳۵	۰/۰۱۳۰۳	۵/۳۹۸۳۴۲	۰/۰۷۷۵۳۵
	بهینه	۰/۱۶۹۹۵	۰/۰۰۴۷۰	۵/۳۳۶۶۵۸	۰/۰۷۷۲۸۵
B	واقعی	۰/۱۸۰۵۸	۰/۰۲۱۲۶	۱۱/۴۲۷۲۵	۰/۱۱۰۸۳۵
	بهینه	۰/۱۶۶۸۳	۰/۰۰۱۵۸	۱۱/۳۹۲۲۸	۰/۱۴۲۲۸۱
C	واقعی	۰/۱۷۲۶۶	۰/۰۱۳۳۵	۸/۶۸۹۹۳۴	۰/۱۷۴۱۳۵
	بهینه	۰/۱۶۷۹۵	۰/۰۰۲۷۰	۹/۳۱۹۴۰۶	۰/۱۹۲۹۴۳
D	واقعی	۰/۱۱۱۶۸	۰/۰۴۷۶۴	۵/۴۸۸۰۴۶	۰/۱۴۳۱۹۵
	بهینه	۰/۱۵۶۲۸	۰/۰۰۸۹۷	۷/۶۸۹۹۷۹	۰/۰۳۰۶۶۲
میانگین	واقعی	۰/۱۵۹۳۲	۰/۰۲۳۸۲	۷/۷۵۰۸۹۳	۰/۱۲۶۴۲۵
	بهینه	۰/۱۶۵۲۵	۰/۰۰۴۴۸	۷/۶۸۹۹۷۹	۰/۱۱۰۷۹۳

در جدول (۸) برخی معیارهای عملکردی مربوط به اتم‌ها با تغییر وضعیت سیستم مقایسه شده است.

جدول ۸. مقایسه برخی معیارهای عملکردی مربوط به اتم‌ها با تغییر وضعیت سیستم

اتم j	وضعیت	طول بازه (KM)	نرخ ورود تقاضا (λ_j)	(T_j)	(F_j)
۱	واقعی	۸	۰/۰۰۰۹	۲/۴	۰
	بهینه	۸	۰/۰۰۰۹	۲/۴	۰
۲	واقعی	۲۰	۰/۰۰۱۴	۶/۸۱۸۶۲۱	۰/۱۳۶۴۳۷
	بهینه	۱۸	۰/۰۰۱۳	۶/۸۱۵۵۸۴	۰/۱۳۵۹۳۱
۳	واقعی	۱۰	۰/۰۰۱۱	۴/۷۴۰۲۰۹	۰/۱۴۵۰۱۷
	بهینه	۱۲	۰/۰۰۱۲	۴/۵۹۲۲۰۶	۰/۱۳۲۶۸۴
۴	واقعی	۴۸	۰/۰۰۱۹	۱۶/۶۲۸۹۸	۰/۱۴۲۸۸۳
	بهینه	۳۶	۰/۰۰۱۴	۱۶/۴۳۹۰۲	۰/۱۳۰۷۰۷
۵	واقعی	۲۶	۰/۰۰۱۰	۱۱/۶۷۶۶۸	۰/۱۳۴۶۰۷
	بهینه	۳۸	۰/۰۰۱۵	۱۱/۵۹۷۹۷	۰/۱۳۱۸۷۴
۶	واقعی	۸	۰/۰۰۰۹	۳/۷۴۵۱۹۵	۰/۱۴۹۴۶۶
	بهینه	۳	۰/۰۰۰۳	۳/۶۴۳۹۰۴	۰/۱۳۸۲۱۲
۷	واقعی	۱۵	۰/۰۰۰۹	۴/۹۱۶۴۹۷	۰/۰۸۶۷۷۰
	بهینه	۲۰	۰/۰۰۱۵	۵/۱۰۵۴۲۷	۰/۱۲۶۱۳۱
میانگین	واقعی	-	-	۷/۲۷۵۱۶۹	۰/۱۱۳۵۹۷
	بهینه	-	-	۷/۲۲۷۷۳۱	۰/۱۱۳۶۴۸

در جدول (۹) برخی معیارهای عملکردی کل سیستم با تغییر وضعیت سیستم مقایسه شده است.

جدول ۹. مقایسه‌ی برخی معیارهای عملکردی کل سیستم با تغییر وضعیت سیستم

معیار عملکرد	سیستم واقعی	سیستم بهینه
T_{mean}	۸/۴۱۵۵۲	۸/۱۸۹۳۶
ΔW_{mean}	۰/۰۲۳۸۲	۰/۰۰۴۴۸
P_p	۰/۰۵۳۶۱	۰/۰۵۳۵۸

همان‌طور که از تمام شاخص‌های سیستم پس از بهینه‌سازی با الگوریتم تلفیقی و مقایسه‌ی آن با وضعیت موجود مشهود است بهبود قابل توجهی در شاخص‌ها با استفاده از الگوریتم تلفیقی قابل دست‌یابی است.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در این تحقیق از مدل‌های مبتنی بر تئوری صف در مکان‌یابی برای مطالعه‌ی وضع موجود و تحلیل ایستگاه‌های امداد جاده‌ای بزرگراه تهران-قم و از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه‌سازی آن استفاده شد. در این پژوهش ابتدا معیارهای ارزیابی عملکرد سیستم در وضعیت موجود محاسبه شده و در ادامه با انجام تغییرات در ناحیه‌ی پاسخگویی تسهیلات، به‌وسیله‌ی معرفی و اجرای الگوریتم تلفیقی ژنتیک- ابرمکعب معیارهای عملکرد سیستم بهبود داده شد. همان‌گونه که در جدول (۷) مشاهده می‌شود، با تغییر پیکربندی

سیستم، بارکاری خدمت‌دهنده‌ی ۲، به میزان ۸ درصد کاهش یافته است و بارکاری خدمت‌دهنده‌ی ۴، به میزان ۴۰ درصد افزایش یافته است. البته تغییر اندازه‌ی ناحیه‌ها تغییراتی جزئی بر بار کاری دیگر خدمت‌دهنده‌ها نیز گذاشته است و میانگین عدم توازن بارکاری خدمت‌دهنده‌ها را به میزان ۲۰ درصد کاهش داده است. همچنین با اعمال تغییر در اندازه اتم‌ها، میانگین زمان سفر خدمت‌دهنده‌ها، از ۷/۷۵۰۹ دقیقه به ۷/۶۹۰۰ دقیقه کاهش یافته است. در سیستم بهینه کسر سفرهای هر خدمت‌دهنده به عنوان پشتیبان به نواحی دیگر نیز کاهش یافته است و میزان آن از ۰/۱۲۶۴ به ۰/۱۱۰۸ رسیده است.

با مقایسه وضعیت سیستم واقعی با سیستم بهینه، در جدول (۸) مشاهده می‌شود که میانگین زمان سفر برای رسیدن به اتم‌ها، از ۷/۲۷۵ به ۷/۲۲۸ کاهش یافته که بهبود سیستم خدمت‌دهی سیستم را نشان می‌دهد. اما کسر سفرها به هر ناحیه که از ناحیه‌های دیگر صورت می‌گیرد، به مقدار ناچیزی افزایش یافته است. در نهایت همان‌گونه که در جدول (۹) مشاهده می‌شود، میانگین مدت زمان سفر کل سیستم از ۸/۴۱۵۵۲ دقیقه به ۸/۱۸۹۳۶ دقیقه کاهش یافته است. این تغییر به دلیل تغییر قابل اجرا و کم هزینه در تقسیم‌بندی ناحیه‌ها صورت گرفته است و بی شک با تخصیص هزینه بیشتر جهت ایجاد یک پایگاه و افزایش تعداد خدمت‌دهنده‌ها در کل مسیر، این میزان بیشتر کاهش خواهد یافت. همچنین احتمال از دست رفتن تقاضا در سیستم به میزان ۰/۰۰۰۳ کاهش یافته است که با وجود این که بسیار ناچیز است، بهبود وضعیت خدمت‌دهی را نشان می‌دهد. تغییر در مقدار عدم توازن بارکاری خدمت‌دهنده‌ها که یکی از اهداف اصلی ارزیابی در الگوریتم بود نیز نشان‌دهنده‌ی بهبود وضعیت سیستم می‌باشد. موارد بسیاری را می‌توان برای تحقیقات آتی پیشنهاد داد که در ادامه به مواردی اشاره شده است:

۱. این تحقیق با محدودیت‌هایی چون ثابت بودن ایستگاه‌های محل استقرار خدمت‌دهنده‌ها و ثابت بودن تعداد خدمت‌دهنده‌ها در مکان مورد مطالعه انجام گرفت که با وجود بهبود دادن سیستم مواردی جهت بهبود هر چه بیشتر سیستم می‌توان با در نظر گرفتن متغیر بودن مکان ایستگاه‌ها و تعداد خدمت‌دهنده‌ها این تحقیق را تکرار کرد.
۲. استفاده از مدل‌های عمومی‌تر صف (مانند مدل‌های با توزیع عمومی) برای مدل‌سازی ماهیت احتمالی سیستم جهت تطابق بیشتر مدل‌ها با واقعیت.
۳. آزادسازی مسئله از فرض‌هایی که مسئله را از واقعیت دور می‌کنند و مدل‌سازی مسائل واقعی‌تر مانند در نظر گرفتن مشتری‌های متفاوت (با نیاز به خدمات متفاوت)، نرخ‌های خدمت‌دهی متفاوت برای خدمت‌دهندگان متفاوت و جهت ارائه‌ی خدمات متفاوت.
۴. توسعه‌ی مدل‌هایی که قابلیت انجام هم‌زمان مکان‌یابی و تقسیم‌بندی ناحیه را داشته باشند. می‌توان از مدل‌های بر پایه‌ی تکرار به این منظور استفاده کرد.
۵. با توجه به اینکه در بسیاری از مسائل دنیای واقعی چندین هدف به‌صورت هم‌زمان دنبال می‌شوند و در اغلب موارد این اهداف در تعارض با هم می‌باشند، توسعه‌ی مدل‌های چندهدفه در حل مسائل واقعی بسیار مفید خواهد بود.
۶. در نظر گرفتن خدمت‌دهندگان با قابلیت ارائه‌ی چند نوع خدمت (مانند خدمت‌دهنده‌های با قابلیت ارائه‌ی خدمات برای موارد حاد و عادی).
۷. استفاده از مدل‌های شبیه‌سازی گسسته پیشامد جهت محاسبه‌ی معیارهای عملکرد سیستم در حالتی که استخراج مدل صف مناسب، دشوار و یا غیرممکن باشد.
۸. توسعه‌ی الگوریتم‌های حل کارا (مانند روش‌های ابتکاری و فراابتکاری و یا ترکیبی) با توجه به زمان‌بر بودن و حتی غیر قابل حل بودن برخی مدل‌ها با روش‌های دقیق تئوری صف.
۹. یکی دیگر از روش‌های حل مدل‌های بزرگ دنیای واقعی تجزیه‌ی مسئله به مسائل با سایز کوچک و دستیابی به جواب مسئله‌ی کلی از طریق حل مسائل کوچک (که بالطبع آسان‌تر حل می‌شوند) می‌باشد. این روش که به وفور از آن در تحقیق در عملیات استفاده می‌شود، در اصطلاح روش تجزیه و تسخیر[۳۷] نامیده می‌شود.
۱۰. یکی دیگر از تکنیک‌های کارا در حل مسائل با سایز بزرگ استفاده از روش‌های تقریبی تخمین معیارهای عملکردی مسئله است. این روش در صورتی که دقت جواب‌ها را کاهش زیادی ندهد، بسیار مفید واقع خواهد شد.
۱۱. استفاده از سایر مدل‌های صف که بیشتر به واقعیت نزدیک باشند، یعنی از مدل‌های صف کاربردی‌تر استفاده شود. البته به دلیل سخت شدن حل مدل‌ها نیاز به توسعه الگوریتم‌های تکراری برای به دست‌آوردن احتمالات حدی وجود خواهد داشت.
۱۲. ارائه‌ی مدل‌هایی که در آن‌ها ظرفیت تسهیلات (تعداد خدمت‌دهنده) نیز محاسبه شود.
۱۳. استفاده از رویکرد برنامه‌ریزی پویا و افزودن دوره‌های زمانی به مدل‌ها.
۱۴. در نظر گرفتن شرایطی که هم اکنون تعدادی تسهیل جانمایی شده و بخواهیم علاوه بر تسهیلات جدید با در نظر گرفتن هزینه‌های جابه‌جایی، تسهیلات موجود را نیز دوباره مورد بازنگری قرار دهیم.
۱۵. استفاده از رویکرد تئوری بازی‌ها در شرایط رقابتی به خصوص برای حالتی که خدمت‌دهنده‌ها ثابت هستند.

۱۶. غیرقطعی در نظر گرفتن سایر پارامترهای مدل‌های موجود که معمولاً قطعی در نظر گرفته می‌شوند، برای مثال مدت زمان سفر به مکان‌های مختلفی و یا مدت زمان منتهی به از دست رفتن مشتری (خروج مشتری از صف به دلیل طولانی شدن مدت انتظار به عنوان مثال از دست رفتن بیمار اورژانسی).

۱۷. در نظر گرفتن ملاک‌هایی مانند کیفیت سرویس، قیمت سرویس، سیاست‌های مدیریت برای جذب مشتری در تابع هزینه برای تعیین مراکز سرویس‌دهی ثابت.

۱۸. از منظر کاربردی پیشنهاد می‌شود که مدل صف ابرمکعب همانند کشورهایی چون برزیل، امریکا و پرتغال به صورت نرم‌افزاری تلفیقی با GIS تهیه شود تا تمامی سیستم‌های خدمت‌دهنده متحرک مانند آتش‌نشانی، گشت پلیس، امداد خودرو و آمبولانس‌ها از آن استفاده کنند. می‌توان با بررسی هزینه‌ی آن نسبت به خرید یا برنامه‌نویسی آن اقدام کرد.

پی‌نوشت

1. Location
2. Allocation
3. General Service Design Problem (GSDP)
4. Emergency Service Design Problem (ESDP)
5. Analytic
6. Descriptive
7. Covering-Type Model
8. Median-Type Models
9. Immobile Server
10. Automated Teller Machine(ATM)
11. Districting problem
12. Hypercube
13. Massachusetts Institute of Technology(MIT)
14. Mobile Servers
15. Geographical Atom
16. Erlang
17. Decentralization
18. Non-homogeneous
19. Districting
20. Successive Over-Relaxation
21. Aggregation - Disaggregation
22. Workload
23. Hypercube
24. Hamming Distance
25. System Loss Probability
26. Mean time required to ambulance i, when available, to travel to atom j
27. Mean interatom travel times
28. Chi-Square
29. Kolmogorov-Smirnov
30. The fraction of all dispatches that send ambulance n to atom j
31. The mean travel time for ambulance i
32. The mean travel time to atom j
33. The mean travel time of system
34. Chi-Square
35. Kolmogorov-Smirnov
36. Hypercube
37. Divide and Conquer

مراجع

[۱] سیدحسینی، سید محمد، حیدری، روح‌اله، حیدری، طاهره. حل مسأله مکان‌یابی پایانه‌های شبکه اتوبوس‌رانی دورن شهری با استفاده از الگوریتم ژنتیک، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، (۱۳۸۸)، شماره‌ی ۳، جلد ۲۰، صص. ۷۵-۸۶.

[۲] محسنی، نصیر؛ بهزادیان، کوروش؛ اردشیر، عبداله. مکان‌یابی محل ساخت پل با استفاده از فرآیند تحلیل سلسله مراتبی و منطق فازی در GIS، نشریه بین‌المللی مهندسی صنایع و مدیریت تولید، (۱۳۹۰)، شماره‌ی ۱، جلد ۲۲، صص. ۲-۱۲.

[۳] مدرس یزدی، محمد. نظریه‌ی صف، مرکز نشر دانشگاهی. تهران، (۱۳۷۵).

[۴] افشار، محمدهادی؛ ستوده، محمدهادی. طراحی بهینه شبکه‌های فاضلاب با استفاده از الگوریتم ژنتیک، نشریه بین‌المللی علوم مهندسی دانشگاه علم و صنعت ایران، (۱۳۸۷)، شماره‌ی ۲، جلد ۱۹، صص. ۳۷-۴۸.

[5] Shavandi H, Mahlooji H, Eshghi K, Khanmohammadi S. A fuzzy coherent hierarchical location-allocation model for congested systems, Scientia Iranica, (2006), Vol. 13, pp. 14-24.

[6] Elhedhli S. Service system design with immobile servers, stochastic demand, and congestion, Manufacturing & Service Operations Management, (2006), Vol. 8, pp. 92-97.

[7] Rajagopalan HK, Saydam C, Xiao J. A multiperiod set covering location model for dynamic redeployment of ambulances, Computers & Operations Research, (2008), Vol. 35, 814-826,.

[8] Mendonca FC, Morabito R. Analysing emergency medical service ambulance deployment on a Brazilian highway using the hypercube model, Journal of the Operational Research Society, (2001), Vol. 52, pp. 261-270.

[9] Drezner Z. Facility location: a survey of applications and methods, Springer Verlag, New York, (1995), Vol. 23, pp. 356-367.

[10] Rajagopalan HK, Saydam C. A minimum expected response model: Formulation, heuristic

solution, and application, Socio-Economic Planning Sciences, (2009), Vol. 23, pp. 1–10.

[11] Berman O, Drezner Z. The multiple server location problem, Operational Research Society, (2007), Vol. 58, pp. 91–99.

[12] Morabito R, Chiyoshi F, Galvao RD. Non-homogeneous servers in emergency medical systems: Practical applications using the hypercube queueing model, Socio-Economic Planning Sciences, (2008), Vol. 42, pp. 255-270.

[13] Fang Y, Bian Y, Xuefeng W. Solving service facilities location problem with elastic demand and congest effect, 6th International Conference on Service Systems and Service Management, (2009).

[14] Geroliminis N, Karlaftis MG, Skabardonis A. A spatial queuing model for the emergency vehicle districting and location problem, Transportation Research, (2009) Vol. 43, pp. 798–811,.

[15] Larson CR. A hypercube queuing model for facility location and redistricting in urban emergency services, Computers & Operations Research, (1974), Vol. 1, pp. 67-95.

[16] Geroliminis N, Karlaftis MG, Skabardonis A. A generalized hypercube queueing model for locating emergency response vehicles in urban transportation networks, For Presentation 85th Annual Meeting Transportation Research Board. Washington, D.C, (2006).

[17] Atkinson JB, Kovalenko IN, Kuznetsov NYu, Mikhalevich KV. Heuristic methods for the analysis of a queuing system describing emergency medical service deployed along a highway, Cybernetics and Systems Analysis, (2006), Vol. 42, pp. 325-343.

[18] Boffey B, Galvao R, Espejo L. A review of congestion models in the location of facilities with immobile servers, European Journal of Operational Research, (2007), Vol. 178, pp. 643–662.

[19] Iannoni AP, Morabito R. A multiple dispatch and partial backup hypercube queuing model to analyze emergency medical systems on highways, Transportation Research, (2007), Vol. 43, pp. 755-771.

[20] Takeda RA, Widmer JA, Reinaldo M. Analysis of ambulance decentralization in an urban emergency medical service using the hypercube queueing model, Computers & Operations Research, (2007), Vol. 34, pp. 727-741.

[21] Iannoni AP, Morabito R, Saydam C. A hypercube queueing model embedded into a genetic algorithm for ambulance deployment on highways, Annals of Operations Research, (2008), Vol. 157, pp. 207–224.

[22] McLay LA. A maximum expected covering location model with two types of servers, IIE Transactions, (2009), Vol. 41, 730-741.

[23] Iannoni AP, Morabito R, Saydam C. An optimization approach for ambulance location and the districting of the response segments on highways, European Journal of Operational Research, (2009), Vol. 195, 528–542.

[24] Marianov V, Boffey TB, Galvão RD. Optimal location of multi-server congestible facilities operating as M/Er/m/N queues, Journal of the Operational Research Society, (2009), Vol. 60, pp. 674-684.

[25] Baron O, Berman O, Krass D. Facility location with stochastic demand and constraints on waiting time, Manufacturing & Service Operations Management, (2007), Vol. 10, pp. 484-505.

[26] Saydam C, Aytug H. Accurate estimation of expected coverage: revisited, SocioEconomic Planning Sciences, (2003).