مکان‌یابی و مسیریابی تسهیلات اورژانسی با فرض احتمال خرابی مسیرهای ارتباطی در زمان بحران

جمال ارکات : دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان؛ Email: j.arkat@uok.ac.ir
شکوفه زمانی: دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان.
پرک قدس: دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه کردستان.

تاریخ دریافت: ۹۳/۴/۱۴
تاریخ پذیرش: ۹۴/۹/۲۴

چکیده

برنامه‌ریزی برای پیشگیری از وقوع حوادث از یک سو و تصمیم‌گیری‌های درست برای کاهش آثار ناشی از وقوع بحران از سوی دیگر اهداف کلیدی مدیریت بحران‌اند. در این تحقیق، مسئله‌ی مکان‌یابی و مسیریابی تسهیلات اضطراری با در نظر گرفتن احتمال خرابی مسیرهای ارتباطی و ازدحام تسهیلات اورژانسی در زمان وقوع بحران بررسی می‌گردد؛ بدین منظور، یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوهدفه برای انتخاب مکان استقرار تسهیلات، تخصیص تسهیلات به مصدومان و تعیین مسیرهای ارتباطی ارائه می‌شود. در مدل ریاضی ارائه‌شده، فرد مصدوم در صورتی می‌تواند خدمات اورژانسی را دریافت کند که حدّاقل یک سرور آزاد در تسهیل متناظر، مستقر و مسیر ارتباطی از تسهیل تا مکان وی تخریب نشده باشد. توابع هدف مدل ارائه‌شده شامل کمینه کردن مجموع نرخ مصدومان پوشش‌نیافته و کمینه کردن میانگین زمان‌های سفر در واحد زمان است. برای حل مسئله‌ی مورد بررسی، دو الگوریتم حل شامل الگوریتم دقیق محدودیت اپسیلون و الگوریتم فراابتکاری ژنتیک چندهدفه ارائه می‌گردد. صحت مدل ریاضی و کارایی الگوریتم‌های ارائه‌شده از طریق ارائه‌ی مثالی عددی ارزیابی می‌شود.

واژه‌های کلیدی: *مدیریت بحران، مکان‌یابی ـ مسیریابی، تسهیلات اورژانسی (اضطراری)، سیستم‌های صف، روش محدودیت اپسیلون*

Location-routing for emergency facilities considering destruction probabilities for communication paths in crises

Jamal Arkat*[1], Shokoufeh Zamani[2], Parak Qods[3]

Abstract

Planning to prevent and respond to disasters are two key aims of the crisis management. This paper tries to location-routing facilities considering destruction probabilities for communication paths and congestion in facilities, due to the crises. Thus, a bi-objective model is developed to determine the location emergency facilities, assignment of injuries and routing of emergency vehicles. An injury can receive emergency service if there is at least a free server in corresponding facility and also, the route between its location and related facility is not destructed. The objective functions of the proposed model are the minimization of the rate of injuries not being covered and the minimization of the average travelling times per a time unit. The proposed model was solved using two solution procedures, including -constraint method and a multi-objective genetic algorithm. The accuracy of the proposed model and the performance of the proposed algorithms are evaluated using a case study.

Keywords: *Crisis management, Location-routing, Emergency facilities, Queueing systems, ε-constraint method*

1 Assoc. Prof., Department of Industrial Engineering, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran; Email: j.arkat@uok.ac.ir
2 PhD Student of Industrial Engineering, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran.
3 MSc in Industrial Engineering, University of Kurdistan, Kurdistan, Iran.

Archive of SID
www.SID.ir

مقدمه

امروزه مدیریت و برنامه‌ریزی برای کاهش آثار مخرب ناشی از وقوع بحران‌ها به یکی از چالش‌های اصلی دولت‌ها تبدیل شده است. مدیریت بحران به مجموعه اقداماتی اطلاق می‌شود که برای پیشگیری از وقوع حوادث یا برنامه‌ریزی، اجرا و مدیریت مؤثر برای کاهش آثار مخرب ناشی از وقوع بحران انجام می‌شوند. چنین اقداماتی نقش مؤثری در سرعت بخشیدن به تصمیم‌گیری‌ها و کاهش صدمات مالی و جانی در زمان وقوع بحران دارند. کشور ایران جزو ده کشور بلاخیز نخست جهان است. آثار مخرب ناشی از وقوع بحران از یک سو و فراوانی وقوع چنین حوادثی در ایران از سوی دیگر اهمیت بررسی‌ها در زمینه‌ی مدیریت بحران را نشان می‌دهد.

انتخاب مکان مناسب برای استقرار تسهیلات امدادی یا اضطراری (اورژانسی) مانند ایستگاه‌های آمبولانس و آتش‌نشانی از جمله تصمیم‌گیری‌های مهم در مدیریت آثار مخرب ناشی از وقوع بحران است. در سال‌های اخیر، محققان بسیاری به مطالعه و بررسی مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات پرداخته‌اند. مسائل مکان‌یابی در یک بخش‌بندی کلی به دو دسته‌ی مسائل مکان‌یابی تسهیلات ثابت و مکان‌یابی تسهیلات متحرک تقسیم می‌شوند. در مسائل مکان‌یابی تسهیلات ثابت، فرض می‌شود که مشتری برای دریافت خدمت به مکان استقرار تسهیل مراجعه و خدمات مورد نیاز خود را دریافت می‌کند. مکان‌یابی دستگاه‌های خودپرداز بانک (ATM)، بیمارستان‌ها و ایستگاه‌های سوخت‌رسانی از جمله کاربردهای چنین مدل‌هایی هستند. در مسائل مکان‌یابی تسهیلات متحرک، در هر یک از تسهیلات، یک یا چند خدمت‌دهنده مستقرند و برای ارائه‌ی خدمات به محل مشتریان مراجعه و خدمت مربوطه را ارائه می‌کنند. مکان‌یابی ایستگاه‌های آمبولانس، پلیس و آتش‌نشانی از این نوع مسائل‌اند.

در مدل‌های اولیه، که به بررسی مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات متحرک پرداخته‌اند، تأثیر در دسترس (آزاد) نبودن تسهیلات لحاظ نشده است. تورگاس و همکاران [۱] مدل پوشش کامل[۱] و چارچ و رول [۲] مدل حداکثر پوشش[۲] را با در نظر گرفتن چنین تأثیری ارائه نموده‌اند. محمود و ایندریاساری [۳] نیز، بر پایه‌ی فرض نامحدود بودن ظرفیت‌های خدمت‌دهی در هر تسهیل، مدلی با عنوان حداکثر مناطق تحت پوشش[۳] ارائه کرده‌اند. در این مدل، که شکل تعمیم‌یافته از مدل حداکثر پوشش محسوب می‌شود، به‌جای بیشینه نمودن مجموعه نقاط پوشش‌داده‌شده، بیشینه‌سازی مناطق تحت پوشش انجام می‌شود. مدل‌های پوشش ظرفیت محدود نیز از جمله مدل‌هایی هستند که در آن‌ها از فرض در دسترس نبودن خدمت‌دهندگان چشم‌پوشی شده است، اما در مقابل، در نظر گرفتن محدودیت ظرفیت برای تسهیلات به کارایی این دسته از مدل‌ها افزوده است. چانگ و همکاران [۴] اولین مدل حداکثر پوشش ظرفیت محدود[۴] را ارائه کرده‌اند. محدودیت‌های این مدل تضمین می‌کنند که مجموع تقاضای تخصیص‌یافته به هر یک از تسهیلات از ظرفیت هر تسهیل تجاوز نکند. در مدل پیشنهادی پیرکال و اسچیلینگ [۵]، هر مشتری حداقل به یکی از تسهیلات دست می‌یابد و بنابراین تسهیلات باید به گونه‌ای مستقر گردند که، در فاصله‌ی زمانی یا مکانی استاندارد از هر مشتری، حداقل یک تسهیل قرار داشته باشد. ین و مو [۶] دو مدل حداکثر پوشش چندظرفیتی[۵] را ارائه نموده‌اند. در این مدل‌ها، ظرفیت هر تسهیل با توجه به تعداد خدمت‌دهندگان موجود در آن مشخص می‌شود. در مدل نخست، تعداد خدمت‌دهندگان از قبل مشخص بوده و در محدودیت‌ها اعمال می‌گردد. در مدل دوم، علاوه بر اعمال محدودیت بر روی تعداد خدمت‌دهندگان، تعداد ایستگاه‌های احداث تسهیلات نیز محدود شده است.

برخلاف مدل‌های قطعی اولیه، در مدل‌های مکان‌یابی تسهیلات پرازدحام[۶]، نقش وقوع ازدحام (صف) ناشی از در دسترس نبودن تسهیلات بررسی می‌گردد. مدل‌های مکان‌یابی تسهیلات متحرک مستعد ازدحام به دو دسته‌ی مدل‌های پوشش احتمالی مبتنی بر قابلیت اطمینان و مدل‌های مبتنی بر سیستم‌های صف تقسیم می‌شوند. در مدل‌های پوشش احتمالی، ابتدا درصد مشغول بودن هر خدمت‌دهنده محاسبه می‌شود و سپس قابلیت اطمینان پوشش هر مشتری با توجه به حجم کاری خدمت‌دهندگان برآورد می‌گردد. داسکین [۷] نخستین مدل پوشش احتمالی مبتنی بر قابلیت اطمینان را، با عنوان مدل حداکثر پوشش مورد انتظار[۷]، ارائه نموده است. در این مدل، حجم کاری تمامی خدمت‌دهندگان یکسان در نظر گرفته شده است و هر یک از خدمت‌دهندگان به صورت مستقل به ارائه‌ی خدمت می‌پردازند؛ بدین معنی که مشغول یا بیکار بودن هر یک از خدمت‌دهندگان در مشغول یا بیکار بودن دیگر خدمت‌دهندگان تأثیری ندارد. رول و هوگان [۸] نیز مدلی را با عنوان حداکثر دسترسی‌پذیری[۸] ارائه کرده‌اند که در آن، هر خدمت‌دهنده فقط می‌تواند به نواحی محلی مشخصی امدادرسانی کند و بنابراین حجم کاری هر خدمت‌دهنده با توجه به حجم تقاضای موجود در آن ناحیه تعیین می‌شود. تابع هدف مدل ارائه‌شده مجموع تقاضای پوشش‌یافته را بیشینه می‌سازد. سورنسن و چارچ [۹]، با تلفیق دو مدل قبل، یک مدل حداکثر پوشش مورد انتظار مبتنی بر قابلیت اطمینان محلی ارائه کرده‌اند. در این مدل، همانند مدل حداکثر دسترسی‌پذیری، از نواحی خدمت‌دهی محلی برای تعیین حجم کاری خدمت‌دهندگان استفاده شده است. تابع هدف این مدل، همانند مدل حداکثر پوشش مورد انتظار، قابلیت اطمینان پوشش مشتریان را حداکثر می‌نماید. رپد و برناردو [۱۰] یک مدل حداکثر پوشش مورد انتظار چنددوره‌ای را ارائه کرده‌اند که در آن، مقادیر تقاضا و زمان‌های سفر وابسته به زمان در نظر گرفته شده‌اند. تابع هدف مدل پوشش مورد انتظار در مقاطع مختلف زمانی را بیشینه می‌سازد.

دسته‌ی دوم مدل‌های مکان‌یابی تسهیلات متحرک مستعد ازدحام بر پایه‌ی تحلیل گونه‌های مختلف سیستم‌های صف شکل گرفته‌اند. برمن و همکاران [۱۱] از سیستم صف M/G/1 (ورودهای پواسان، خدمت‌دهی براساس توزیع کلی

Archive of SID
www.SID.ir

و یک خدمت‌دهنده) برای تعیین مکان بهینه‌ی استقرار یک خدمت‌دهنده در شبکه‌ای از گره‌ها و کمان‌های واصل استفاده کرده‌اند. تابع هدف مدل ارائه‌شده از نوع کمینه‌سازی مجموع هزینه‌هاست و علاوه بر هزینه‌های سفر، هزینه‌های انتظار در صف را نیز در نظر می‌گیرد. ماریانوف و رول [۱۲] شکل تعمیم‌یافته‌ای از مدل حداکثر دسترسی‌پذیری را با عنوان مدل حداکثر دسترسی‌پذیری مبتنی بر صف[۹] ارائه کرده‌اند. آن‌ها به منظور برآورد حجم کاری هر خدمت‌دهنده از نتایج تحلیلی سیستم صف M/G/C/C (ورودهای پواسان، خدمت‌دهی براساس توزیع کلی، C خدمت‌دهنده و ظرفیت سیستم C) بهره برده‌اند. تابع هدف مدل ریاضی ارائه‌شده، مجموع تقاضاهایی را که در شعاع پوشش استاندارد از خدمت‌دهندگان قرار دارند، بیشینه می‌نماید. تیموری و همکاران [۱۳] به مطالعه‌ی مسئله‌ی مکان‌یابی دو تسهیل متحرک با در نظر گرفتن یک صف نامحدود پرداخته‌اند. در این مسئله، فرض شده است که هر تسهیل با احتمالی متناسب با فاصله از مشتریان، برای ارائه‌ی خدمت اعزام می‌شود. تابع هدف مدل ارائه‌شده هزینه‌های ثابت استقرار دو تسهیل و هزینه‌های اعزام خدمت‌دهندگان را کمینه می‌سازد. لارسون [۱۴] برای نخستین بار فرض وجود تسهیل پشتیبان را در مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات اورژانسی در نظر گرفته است. وی برای تحلیل سیستم صف موجود در تسهیلات از تعریف وضعیت‌های صفر و یک، معرف بیکار و مشغول به کار بودن تسهیلات استفاده کرده است. چنین سیستم‌های صفی که در آن‌ها وضعیت‌های تمامی تسهیلات به صورت هم‌زمان در نظر گرفته می‌شوند، سیستم‌های صف فوق‌مکعبی[۱۰] نامیده می‌شوند. در سیستم صف فوق‌مکعبی، که آتکینسون و همکاران [۱۵] از آن استفاده کرده‌اند، برای هر خدمت‌دهنده دو نرخ خدمت در نظر گرفته شده است و وضعیت هر تسهیل به صورت صفر، یک یا دو نمایش داده می‌شود؛ بدین معنی که وضعیت صفر نماینده‌ی بیکار بودن تسهیل است، وضعیت یک نشان می‌دهد که تسهیل در حال ارائه‌ی خدمت به یکی از مشتریان درون محدوده‌ی پوششی است و وضعیت دو معرف خدمت‌دهی به یک مشتری در خارج از محدوده‌ی پوشش است. از جمله مطالعات دیگری که در آن‌ها از سیستم‌های صف فوق‌مکعبی در مکان‌یابی تسهیلات اورژانسی با فرض وجود تسهیل پشتیبان استفاده کرده‌اند می‌توان به تحقیقات براندو و لارسون [۱۶] و بورول و همکاران [۱۷] اشاره کرد.

در این مقاله، مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات اورژانسی مستعد ازدحام در زمان وقوع بحران بررسی می‌شود. تخریب و انسداد مسیرهای ارتباطی در زمان وقوع حوادثی همچون زلزله، سیل و جنگ‌ها از جمله مهم‌ترین دلایل عدم پوشش مصدومان است. بنابراین، در این تحقیق فرض می‌شود که هر یک از کمان‌های شبکه‌ی ارتباطی با احتمال مشخصی در زمان وقوع بحران تخریب می‌شود. براساس این مفروضات، یک مدل ریاضی ارائه می‌شود که ضمن تعیین مکان‌های بهینه‌ی استقرار تسهیلات اورژانسی و تخصیص آن‌ها به مصدومان، مسیرهای حرکت سرورها (وسایل نقلیه‌ی اورژانسی) از هر تسهیل تا مکان مصدومان را مشخص می‌کند. ساختار مقاله بدین صورت تنظیم شده است: در بخش آتی، ابتدا تعریف مسئله ارائه می‌شود و براساس مفروضات درنظر گرفته‌شده، یک مدل ریاضی ارائه می‌گردد. در بخش سوم، ساختار روش محدودیت اپسیلون[۱۱] به منزله‌ی روشی کارآمد جهت به دست آوردن مجموعه‌ی کامل راه‌حل‌های مؤثر (پارتویی) تشریح می‌گردد. ازآنجاکه مسئله‌ی مورد بررسی از جمله مسائل ناچندجمله‌ای سخت است، در بخش چهارم مقاله، یک الگوریتم ژنتیک چندهدفه، برای حل مسئله در ابعاد بزرگ، ارائه می‌گردد. در بخش پنجم، صحت مدل ریاضی و کارایی الگوریتم‌های حل ارائه‌شده از طریق مثالی عددی ارزیابی می‌شود. بخش انتهایی مقاله به جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و ارائه‌ی پیشنهادها برای مطالعات آتی می‌پردازد.

بیان مسئله و ارائه‌ی مدل ریاضی

بیان کلی مسئله‌ی مورد بررسی بدین شرح است: شبکه‌ای از گره‌ها و کمان‌ها از قبل مشخص است و طول کوتاه‌ترین مسیر ارتباطی بین هر جفت گره طول مسافت بین آن‌ها تلقی می‌شود. مشتریان (مصدومان) در برخی از نقاط شبکه مستقرند و فاصله زمانی بین تقاضاهای متوالی برای هر مشتری یک متغیر تصادفی است. تعدادی از گره‌های شبکه به منزله‌ی سایت‌های کاندیدا برای استقرار تسهیلات اورژانسی در نظر گرفته می‌شوند. در هر تسهیل، تعدادی خدمت‌دهنده (وسیله‌ی نقلیه‌ی اورژانسی) مستقر می‌گردد و زمان‌های خدمت‌دهی توسط هر یک از آن‌ها از توزیع آماری مشخصی پیروی می‌کند. در هنگام وقوع بحران، خدمت‌دهندگان مستقر در تسهیلات برای خدمت‌رسانی به آسیب‌دیدگان به محل آن‌ها اعزام می‌شوند. خدمت‌دهندگان تا زمانی که برای ارائه‌ی خدمت اعزام شده‌اند، در دسترس نخواهند بود و بنابراین، در هر تسهیل، احتمال مشخصی را می‌توان برای بلوکه شدن (حضور نداشتن خدمت‌دهنده در تسهیل) محاسبه کرد. علاوه بر این، هر یک از کمان‌های شبکه با احتمال مشخصی در زمان وقوع بحران مسدود یا خراب می‌شوند. این احتمال را می‌توان با توجه به عواملی همچون نوع مصالح و زیرسازی‌ها، وجود تونل‌ها و پل‌ها در کمان، گذر از مسیر گسل‌ها و جریان‌های سیلابی و یا نزدیکی به پرتگاه‌ها و مسیرهای کوهستانی برآورد و مشخص کرد. هر یک از مسیرهای ارتباطی از یک یا چندین کمان تشکیل شده است و بنابراین، در صورت انسداد هر یک از کمان‌های شبکه، کلیه‌ی مسیرهای ارتباطی که کمان مذکور بخشی از آن‌هاست، مسدود خواهد شد و امکان تردد از آن‌ها ممکن نخواهد بود. بنابراین، علاوه بر احتمال در دسترس نبودن خدمت‌دهندگان به سبب ازدحام در تسهیلات، تخریب مسیرهای ارتباطی نیز به مثابه‌ی عامل دیگر از دست رفتن تقاضا عمل می‌کند. مشتری فقط زمانی قادر به دریافت خدمت از تسهیل متناظر است که حداقل یک خدمت‌دهنده در آن تسهیل مستقر باشد و مسیر ارتباطی از تسهیل تا مکان مشتری مسدود نباشد. بنابراین، استقرار تسهیلات در مکان‌های مناسب و مسیریابی خدمت‌دهندگان از طریق مسیرهای قابل اطمینان، برای دستیابی

Archive of SID
www.SID.ir

به حداکثر نرخ مشتریان پوشش‌داده‌شده (یا به عبارتی حداقل نرخ مشتریان ازدست‌رفته) هدف نخست منظور می‌شود. از سویی، با توجه به ماهیت اضطراری مسئله، کاهش زمان‌های پاسخگویی در قالب کمینه کردن میانگین زمان‌های سفر در واحد زمان هدف دوم در نظر گرفته می‌شود. مفروضات زیر در مدل‌سازی مسئله مد نظر قرار می‌گیرند:

- مختصات گره‌های شبکه و، در نتیجه، طول کوتاه‌ترین مسیر بین هر جفت گره از قبل مشخص است.
- مشتریان در گره‌هایی از شبکه مستقرند و فواصل زمانی بین تقاضاهای متوالی هر مشتری از یک توزیع نمایی با نرخ مشخص پیروی می‌کند.
- تعدادی سایت کاندیدا برای استقرار تعداد مشخصی تسهیل در نظر گرفته شده‌اند.
- تعداد خدمت‌دهندگان در هر یک از تسهیلات از قبل مشخص و یکسان است.
- زمان‌های خدمت‌دهی برای هر خدمت‌دهنده از توزیعی کلی با میانگین مشخص پیروی می‌کند.
- در زمان وقوع بحران، هر یک از کمان‌های شبکه با احتمال مشخصی مسدود می‌گردند.
- نظام خدمت‌دهی در هر تسهیل از نوع نوبتی است و صف‌ها در حالت پایدار بررسی می‌شوند.

نمادگذاری به‌کاررفته در مدل ریاضی به شرح زیر است:

مجموعه‌ی اندیس‌ها

V مجموعه‌ی نقاط شبکه (n و m اندیس نقاط شبکه).

A مجموعه‌ی کمان‌های شبکه ((n,m) کمان واصل میان جفت گره n و m).

$I \subset V$ مجموعه‌ی مشتریان (i اندیس مشتریان).

$J \subset V$ مجموعه‌ی سایت‌های کاندیدا (j اندیس سایت).

پارامترها

d_i نرخ تقاضا (تعداد تقاضا در واحد زمان) برای مشتری i .

μ نرخ خدمت‌دهی برای هر خدمت‌دهنده.

c تعداد خدمت‌دهندگان مستقر در هر یک از تسهیلات.

t_{nm} زمان طی کردن کمان (n,m).

f_{nm} احتمال خرابی کمان (n,m).

S تعداد تسهیلات.

متغیرهای تصمیم

x_{ij} اگر مشتری i به تسهیل مستقر در سایت j تخصیص یابد، برابر ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

y_j اگر تسهیلی در سایت j مستقر گردد، برابر ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

z_{nm}^{ij} اگر کمان (n,m) در مسیر انتقال تقاضای مشتری i به تسهیل مستقر در سایت j قرار داشته باشد، برابر ۱ و در غیر این صورت ۰ است.

q_{ij} احتمال سالم بودن مسیر تسهیل مستقر در سایت j تا مشتری i.

p_j احتمال حدی حضور نداشتن خدمت‌دهنده در تسهیل مستقر در سایت j .

λ_j مجموع نرخ تقاضا برای دریافت خدمت از تسهیل مستقر در سایت j .

ρ_j نسبت نرخ تقاضا به نرخ خدمت‌دهی در تسهیل مستقر در سایت j .

پیش از ارائه‌ی مدل ریاضی، لازم است سیستم صف موجود در تسهیلات بررسی و تحلیل گردد. فواصل زمانی بین تقاضاهای متوالی در هر گره مشتری از یک توزیع نمایی پیروی می‌کند؛ بنابراین، ورودی هر تسهیل یک فرآیند پواسان است. همچنین، در هر تسهیل، تعداد مشخصی خدمت‌دهنده مستقر است و زمان‌های خدمت‌دهی توسط هر یک از آن‌ها از توزیعی کلی با میانگین مشخص پیروی می‌کند. به علت ماهیت اضطراری مسئله، ظرفیت هر تسهیل برابر با تعداد خدمت‌دهندگان موجود در تسهیل در نظر گرفته می‌شود. به عبارتی، هر تسهیل تا زمانی قادر به ارائه‌ی خدمت به مشتریان است که حداقل یک خدمت‌دهنده در آن حضور داشته باشد؛ بنابراین، در صورتی که در زمان اعلام نیاز مشتری تسهیل خالی از خدمت‌دهنده باشد، مشتری قادر به دریافت خدمت نخواهند بود و تقاضای وی ازدست‌رفته تلقی می‌شود. با این اوصاف، سیستم صف هر یک از تسهیلات یک سیستم M/G/c/c است. با توجه به سیستم صف موجود در هر تسهیل، مدل ریاضی مسئله در قالب یک مدل دوهدفه به صورت زیر ارائه می‌شود:

رابطه‌ی ۱:
$$\min w_1 = \sum_{i\in I}\left(d_i - \sum_{j\in J} d_i x_{ij} q_{ij} \left(1-p_j\right)\right)$$

رابطه‌ی ۲:
$$\min w_2 = \sum_{i\in I}\sum_{j\in J}\sum_{(n,m)\in A} t_{nm} z_{nm}^{ij}$$

رابطه‌ی ۳:
$$p_j = \frac{\frac{\rho_j^c}{c!}}{\sum_{r=0}^{c}\frac{\rho_j^r}{r!}} \qquad \forall j \in J$$

رابطه‌ی ۴:
$$\rho_j = \frac{\lambda_j}{\mu} \qquad \forall j \in J$$

رابطه‌ی ۵:
$$\lambda_j = \sum_{i\in I} d_i x_{ij} \qquad \forall j \in J$$

رابطه‌ی ۶:
$$q_{ij} = \prod_{(n,m)\in A}\left(1 - z_{nm}^{ij} f_{nm}\right) \qquad \forall i \in I,\ j \in J$$

رابطه‌ی ۷:
$$\sum_{j\in J} x_{ij} = 1 \qquad \forall i \in I$$

رابطه‌ی ۸:
$$\sum_{n|(i,n)\in A} z_{in}^{ij} = x_{ij} \qquad \forall i \in I,\ j \in J,\quad i \neq j$$

رابطه‌ی ۹:
$$\sum_{m|(m,j)\in A} z_{mj}^{ij} = x_{ij} \qquad \forall i \in I,\ j \in J,\quad i \neq j$$

Archive of SID
www.SID.ir

رابطه‌ی ۱۰:
$$\sum_{n} z_{nm}^{ij} - \sum_{n|n\neq i} z_{mn}^{ij} = 0 \qquad \forall i \in I,\ j \in J,\ m \in V \,|\, i \neq j,\ m \neq i, j$$

رابطه‌ی ۱۱:
$$z_{nm}^{ij} \leq x_{ij} \qquad \forall i \in I,\ j \in J,\ (n, m) \in A$$

رابطه‌ی ۱۲:
$$x_{ij} \leq y_j \qquad \forall i \in I,\ j \in J$$

رابطه‌ی ۱۳:
$$\sum_{j \in J} y_j = S$$

رابطه‌ی ۱۴:
$$x_{ij},\ y_j,\ z_{nm}^{ij} \in \{0,1\} \qquad \forall i \in I,\ j \in J,\ (n, m) \in A$$

رابطه‌ی ۱۵:
$$p_j,\ \rho_j,\ \lambda_j,\ q_{ij} \geq 0 \qquad \forall i \in I,\ j \in J$$

رابطه‌ی ۱، به عنوان تابع هدف نخست، مجموع نرخ مشتریان ازدست‌رفته‌ی ناشی از ازدحام در تسهیلات و انسداد مسیرهای ارتباطی را کمینه می‌نماید که این مقدار از کم کردن نرخ تقاضای پوشش‌یافته از کل نرخ تقاضا به دست می‌آید. رابطه‌ی ۲، به عنوان تابع هدف دوم، میانگین زمان‌های سفر در واحد زمان را کمینه می‌سازد. رابطه‌ی ۳، که در واقع رابطه‌ی ارلنگ C برای سیستم صف M/G/c/c است، احتمال حدی بلوکه شدن (مشغول بودن تمامی خدمت‌دهندگان) را برای هر یک از تسهیلات محاسبه می‌کند. این احتمال برابر با درصد زمان‌هایی است که مشتریان با تسهیل خالی مواجه می‌شوند و قادر به دریافت خدمت نیستند. رابطه‌ی ۴ ضریب بهره‌وری (نسبت نرخ مراجعه‌ی مشتریان به نرخ خدمت‌دهی) برای هر تسهیل را محاسبه می‌کند. رابطه‌ی ۵ مجموع نرخ مراجعه‌ی مشتریان به هر تسهیل را محاسبه می‌کند. احتمال سالم بودن هر یک از مسیرهای ارتباطی بین تسهیلات و مشتریان با رابطه‌ی ۶ محاسبه می‌شود. هر مسیر ارتباطی فقط زمانی سالم و قابل تردد است که تمامی کمان‌های موجود در آن مسیر سالم باشند. بنابراین، احتمال سالم بودن هر مسیر با توجه به احتمال خرابی در هر یک از کمان‌های موجود در امتداد آن مسیر محاسبه می‌شود. رابطه‌ی ۷ تضمین می‌کند که هر مشتری به یکی از تسهیلات تخصیص یابد. روابط ۸ تا ۱۰ پیوستگی جریان[۱۲] در کمان‌های شبکه را تضمین می‌نمایند [۱۸]. رابطه‌ی ۱۱ تضمین می‌کند که متغیرهای تعیین مسیر صرفاً برای سایت‌هایی که در آن‌ها تسهیل مستقر گردیده است، فعال گردند. رابطه‌ی ۱۲ تضمین می‌کند که مشتریان فقط از سایت‌های فعال‌شده خدمت دریافت کنند. محدودیت ۱۳ تعداد کل تسهیلات احداث‌شده را محدود می‌نماید. روابط ۱۴ و ۱۵ دامنه‌ی متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند.

روش محدودیت اپسیلون

به طورکلی، مسئله‌ی بهینه‌سازی دوهدفه در حالت کمینه‌سازی را می‌توان به صورت زیر نشان داد:

رابطه‌ی ۱۶:
$$\min f(X) = \left(f_1(X), f_2(X)\right) \quad s.t. \quad X \in D$$

که در آن $X = (x_1, x_2, .., x_n)$ برداری از متغیرهای تصمیم و D فضای شدنی مسئله است. مقایسه‌ی دو راه‌حل مختلف در یک مسئله‌ی دو یا چندهدفه به‌مراتب پیچیده‌تر از مسائل یک‌هدفه است. مسائل دو یا چندهدفه اغلب فاقد یک جواب بهینه‌ی واحدند و بنابراین مجموعه‌ای از راه‌حل‌های بهینه‌ی پارتویی به عنوان مجموعه‌ی راه‌حل‌های مؤثر[۱۳] مسئله ارائه می‌گردد. در یک مسئله‌ی کمینه‌سازی با m تابع هدف، راه‌حل $u \in D$ را بر راه‌حل $v \in D$ غالب پارتویی[۱۴] می‌گویند اگر و فقط اگر راه‌حل u در تمامی توابع هدف معادل یا بهتر از راه‌حل v باشد و حداقل به ازای یکی از توابع هدف، اکیداً بهتر از آن باشد. روابط زیر این شرایط را نشان می‌دهند:

رابطه‌ی ۱۷:
$$u \begin{cases} f_i(u) \leq f_i(v) & \forall i \in \{1,2,\ldots,m\} \\ f_j(u) < f_j(v) & \exists j \in \{1,2,\ldots,m\} \end{cases}$$

همچنین، راه‌حل u را راه‌حل بهینه‌ی پارتویی[۱۵] می‌نامند اگر و فقط اگر هیچ راه‌حلی همچون v بر آن غالب نباشد. به عبارت دیگر، راه‌حل بهینه‌ی پارتویی راه‌حلی است که در آن، با بهتر شدن مقدار یکی از توابع هدف، برای حداقل یکی دیگر از توابع هدف، مقداری بدتر به دست می‌آید. راه‌حل بهینه‌ی پارتویی را راه‌حل مؤثر یا راه‌حل نامغلوب[۱۶] نیز می‌نامند. مجموعه‌ی مؤثر به مجموعه‌ی تمامی راه‌حل‌های مؤثر مسئله گفته می‌شود. در ادامه، ساختار روش محدودیت اپسیلون برای حل مدل ریاضی ارائه‌شده تشریح می‌گردد.

روش محدودیت اپسیلون یکی از معروف‌ترین روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه است. در این روش، به‌جای ترکیب کردن توابع هدف در قالب یک تابع، بهینه‌سازی یک هدف مد نظر قرار می‌گیرد و دیگر توابع هدف به محدودیت‌هایی که «اپسیلون» نامیده می‌شوند، تبدیل می‌گردند [۱۹]. این روش نخستین بار به کوشش هیمز و همکاران [۲۰] توسعه داده شد و جزئیات آن در تحقیق چانکونگ و هیمز [۲۱] تشریح شده است. در حالتی که مدل ریاضی دارای دو تابع هدف و مسئله از نوع ترکیباتی باشد، روش کار الگوریتم ساده و سرراست است و در این حالت، مجموعه‌ی دقیق و کامل نقاط مؤثر به دست می‌آیند [۲۲].

با فرض آنکه مدل ریاضی دارای شکل کلی رابطه‌ی ۱۶ باشد، مراحل الگوریتم با انتخاب یکی از توابع هدف به عنوان تابع اصلی شروع می‌شود. فرض کنید که تابع هدف $f_1(X)$ به عنوان تابع هدف اصلی انتخاب شده باشد؛ در این صورت، برنامه‌ریزی ریاضی یک‌هدفه‌ی زیر به منزله‌ی اولین مدل ریاضی حل می‌گردد:

رابطه‌ی ۱۸:
$$\min f_1(X) \quad s.t. \quad X \in D$$

با فرض آنکه X_1 راه‌حل بهینه‌ی برنامه‌ی فوق باشد، مقادیر عددی $f_1(X_1)$ و $f_2(X_1)$ محاسبه می‌گردند. در صورتی که راه‌حل X_1 یکتا باشد و برنامه‌ی ۱۸ فاقد راه‌حل‌های بهینه‌ی چندگانه باشد، مقادیر $f_1(X_1)$ و $f_2(X_1)$ به ترتیب مقدار

Archive of SID
www.SID.ir

ایده‌آل[17] تابع هدف اول و بدترین مقدار (حضیض[18]) تابع هدف دوم‌اند و راه‌حل X_1 اولین راه‌حل مؤثر خواهد بود. در صورتی که برنامه‌ی ۱۸ راه‌حل بهینه‌ی چندگانه داشته باشد، ممکن است راه‌حل X_1 راه‌حل مؤثر نباشد؛ زیرا این امکان وجود دارد که راه‌حل بهینه‌ی دیگری مانند X_2 برای برنامه‌ی ۱۸ به گونه‌ای باشد که مقدار تابع هدف دوم به ازای آن از $f_2(X_1)$ کمتر باشد و بنابراین X_1 به واسطه‌ی X_2 مغلوب خواهد بود. به منظور حصول اطمینان از به دست آوردن اولین نقطه‌ی مؤثر و رفع مشکل بهینه‌های چندگانه برای تابع اول، مدل ریاضی زیر به عنوان مدل دوم حل می‌گردد:

$$\min f_2(X)$$

رابطه‌ی ۱۹:
$$s.t. \quad X \in D$$
$$f_1(X) \le f_1(X_1)$$

از آنجاکه مقدار بهینه‌ی تابع هدف $f_1(X)$ برابر با $f_1(X_1)$ است، مدل ریاضی فوق بهترین مقدار تابع هدف دوم را، به شرط آنکه مقدار تابع هدف اول از مقدار ایده‌آل خود بدتر نشود، به دست می‌آورد. X_2 به عنوان راه‌حل بهینه‌ی برنامه‌ی فوق بهترین راه‌حل بهینه‌ی چندگانه‌ی مدل ۱۸ از منظر تابع هدف دوم و بنابراین اولین راه‌حل مؤثر مسئله است. مدل زیر سومین مدل ریاضی است که باید حل شود:

$$\min f_1(X)$$

رابطه‌ی ۲۰:
$$s.t. \quad X \in D$$
$$f_2(X) \le \varepsilon$$

که در آن ε برابر با مقدار $f_2(X_2)-\Delta$ در نظر گرفته می‌شود و Δ یک عدد مثبت کوچک است. در مدل فوق، سعی شده است مقدار تابع هدف دوم بهبود یابد که، به علت وجود تعارض بین توابع هدف، چنین بهبودی باعث بدتر شدن تابع هدف اول خواهد شد. فرض کنید X_3 راه‌حل بهینه‌ی برنامه‌ی فوق باشد؛ در این صورت، همانند استدلالی که در مورد X_1 مطرح شد، لازم است بهترین راه‌حل بهینه‌ی چندگانه‌ی برنامه‌ی فوق (اگر راه‌حل‌های بهینه‌ی چندگانه وجود داشته باشند) از منظر تابع هدف دوم به دست آید. بنابراین، مدل ریاضی زیر به عنوان چهارمین مدل حل می‌گردد:

$$\min f_2(X)$$

رابطه‌ی ۲۱:
$$s.t. \quad X \in D$$
$$f_1(X) \le f_1(X_3)$$

از حل مدل فوق، X_4 به دست می‌آید که، بر اساس استدلال مطرح‌شده در مورد X_2، دومین راه‌حل مؤثر مسئله است. مراحل فوق (یعنی حل کردن مدل‌های ریاضی یک‌هدفه به‌ترتیب با توابع هدف اول و دوم) تا جایی ادامه می‌یابد که یکی از مدل‌های ریاضی فاقد راه‌حل شدنی باشد. کلیه‌ی راه‌حل‌هایی که در مراحل زوج این رویه به دست می‌آیند، راه‌حل‌های مؤثر مسئله‌اند.

انتخاب مقدار عددی Δ در انجام مراحل فوق اهمیت بسیاری دارد. هر اندازه این مقدار کوچک‌تر انتخاب شود، احتمال آنکه یکی از راه‌حل‌های مؤثر در روند اجرای الگوریتم به دست نیاید، کمتر خواهد بود. در صورتی که مقدار عددی تابع هدف دوم به ازای هر راه‌حل شدنی، عدد صحیح باشد، آن‌گاه می‌توان مقدار Δ را برابر با عدد ۱ در نظر گرفت [۲۲]. در این حالت، روش محدودیت اپسیلون به دست آوردن کلیه‌ی راه‌حل‌های مؤثر مسئله را تضمین می‌کند. در مدل ریاضی ارائه‌شده، مقادیر عددی تابع هدف اول، به سبب وجود عبارت‌های احتمالی، ممکن است عدد صحیح نباشد. در مقابل، تابع هدف دوم از مجموع حاصل‌ضرب طول کمان‌ها در متغیرهای دودویی به دست می‌آید. واضح است که اگر مقادیر طول کمان‌ها به صورت عدد صحیح در نظر گرفته شوند، مقدار تابع هدف دوم همواره عدد صحیح مثبت خواهد بود. در صورتی که در داده‌های مسئله طول برخی از کمان‌ها دارای ارقام اعشاری باشند، می‌توان با ضرب کردن طول تمامی کمان‌ها در توان‌های متوالی، توان مناسبی از عدد ۱۰، بدون آنکه راه‌حل‌های مؤثر مسئله تغییر کنند، طول کلیه‌ی کمان‌ها را به عدد صحیح تبدیل کرد. با این اوصاف، برای استفاده از روش محدودیت اپسیلون، تابع هدف اول (کمینه‌سازی نرخ تقاضای ازدست‌رفته) به عنوان تابع اصلی و تابع هدف دوم (کمینه‌سازی میانگین زمان‌های سفر در واحد زمان) تابع فرعی در نظر گرفته می‌شوند.

الگوریتم ژنتیک دوهدفه

هالند [۲۳] الگوریتم ژنتیک را یک روش جست‌وجوی مؤثر و نشئت‌گرفته از فرآیند تکامل طبیعی معرفی کرد. این رویه‌ی تکامل با تولید نسل اول، که معمولاً به صورت تصادفی تولید می‌شود، آغاز می‌گردد. بعد از تولید نسل اولیه، کروموزوم‌هایی که شرایط همگذری[19] و جهش[20] را دارند انتخاب می‌شوند و به منظور تولید کروموزوم‌های جدید، فرآیند همگذری و جهش بر روی آن‌ها اعمال می‌گردد. کروموزوم‌های جدید (فرزندان[21]) همراه با کروموزوم‌های اولیه (والدین[22]) در داخل یک استخر[23] قرار می‌گیرند. اندازه‌ی استخر مذکور از اندازه‌ی نسل بزرگ‌تر است؛ بنابراین، تعدادی از کروموزوم‌های موجود در استخر توسط عملگر انتخاب[24] تعیین می‌شوند و نسل بعد را تشکیل می‌دهند. معمولاً جمعیت جدید برازندگی[25] بیشتری در مقایسه با نسل پیشین خود دارد؛ این بدان معناست که، از نسلی به نسل دیگر، جمعیت تکامل می‌یابد. جست‌وجو هنگامی نتیجه‌بخش خواهد بود که همگرایی حاصل شود و یا معیارهای توقف برآورده گردند.

الگوریتم‌های تکاملی و به‌ویژه الگوریتم ژنتیک برای حل مسائل بهینه‌سازی چندهدفه نیز توسعه یافته و در تحقیقات بسیاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند. یکی از رایج‌ترین الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه نسخه‌ی دوم الگوریتم ژنتیک مبتنی بر مرتب‌سازی نامغلوب[26] یا به‌اختصار NSGAII است. نسخه‌ی اولیه‌ی NSGA به کوشش سرینیواس و دب [۲۴] توسعه داده شده است. مهم‌ترین ویژگی این الگوریتم، که آن را در مقابل الگوریتم ژنتیک متعارف (برای مسائل یک‌هدفه) قرار می‌دهد، مرتب کردن راه‌حل‌ها بر اساس معیار غلبگی (به‌جای شایستگی) است. در هر نسل، کروموزوم‌هایی که در برابر هیچ یک از کروموزوم‌های

Archive of SID
www.SID.ir

موجود در نسل فعلی مغلوب نیستند، سطح اول غلبگی را تشکیل می‌دهند. با حذف موقتی کروموزوم‌های سطح اول، به طریقی مشابه، کروموزوم‌های سطح دوم غلبگی مشخص می‌شوند. روند تشکیل یک سطح غلبگی، حذف موقتی کروموزوم‌های سطح فعلی و جست‌وجو برای یافتن کروموزوم‌های نامغلوب تا زمانی که تمامی راه‌حل‌ها سطح‌بندی شوند، ادامه می‌یابد. نسخه‌ی دوم NSGA را دب و همکاران [۲۵] برای رفع نواقص نسخه‌ی اولیه توسعه دادند. مهم‌ترین ویژگی‌هایی که باعث برتری NSGAII بر NSGA شده‌اند، استفاده از روشی سریع‌تر برای تشکیل سطوح غلبگی، استفاده از معیار فاصله‌ی ازدحامی[۲۷] برای مرتب‌سازی کروموزوم‌های موجود در یک سطح غلبگی، استفاده از عملگر انتخاب رقابت دودویی[۲۸] و انتخاب مبتنی بر نخبه‌گرایی[۲۹] است.

ساختار کلی NSGAII به این صورت است: نخست بر اساس شیوه‌ای کاملاً تصادفی یا نظام‌مند، جمعیت نسل اول تولید می‌شود. در هر نسل، بر اساس روش انتخاب رقابت دودویی، والدین برای شرکت در عملگرهای همگذری و جهش انتخاب می‌شوند. در این نوع انتخاب، هر بار دو کروموزوم به صورت تصادفی انتخاب و به‌ترتیب، نخست بر مبنای رتبه (سطح غلبگی) و سپس فاصله‌ی ازدحامی، با یکدیگر مقایسه می‌شوند. با تکرار این عملگر، تعداد مشخصی از کروموزوم‌های نسل فعلی برای تولید فرزندان انتخاب می‌شوند. والدین انتخاب‌شده به دو دسته جهت انجام عملیات جهش و همگذری تقسیم می‌شوند. این دسته‌بندی به گونه‌ای انجام می‌گیرد که تعداد فرزندان تولیدشده با اندازه‌ی جمعیت هر نسل برابر گردد.

آخرین مرحله از حلقه‌ی تکرار الگوریتم انتخاب کروموزوم‌های نسل آتی از مجموعه کروموزوم‌های نسل فعلی و فرزندان تولیدشده است. راهبرد انتخاب در NSGAII راهبردی نخبه‌گراست. در این راهبرد، نخست کروموزوم‌های موجود در استخر، بر مبنای سطح غلبگی و سپس فاصله‌ی ازدحامی، مرتب‌سازی می‌شوند. ایجاد نسل آتی با انتقال کروموزوم‌های موجود در سطح غلبگی اول آغاز می‌گردد. سپس، کروموزوم‌های سطح دوم و به همین ترتیب کروموزوم‌های دیگر سطوح به نسل آتی منتقل می‌شوند. این رویه تا جایی ادامه می‌یابد که کروموزوم‌های موجود در سطح غلبگی فعلی از تعداد کروموزوم‌های لازم برای تکمیل نسل آتی بیشتر گردد. در این حالت، از معیار فاصله‌ی ازدحامی برای انتخاب کروموزوم‌های سطح غلبگی مذکور استفاده می‌شود. حلقه‌ی بهبود الگوریتم تا رسیدن به معیار توقف ادامه می‌یابد و در آخرین نسل، کروموزوم‌های سطح اول غلبگی به منزله‌ی خروجی الگوریتم گزارش می‌شوند. در ادامه، اجزای اصلی NSGAII برای کاربرد در مسئله‌ی مورد بررسی تشریح می‌شوند.

نمایش راه‌حل

یکی از مهم‌ترین بخش‌های طراحی هر الگوریتم فرااابتکاری تعیین شیوه‌ی نمایش راه‌حل است. این نحوه‌ی نمایش با تصویر کردن خصوصیات راه‌حل در رشته‌ای از نمادها ارتباطی منطقی بین فضای اصلی مسئله و فضای جست‌وجو با الگوریتم حل برقرار می‌کند. در الگوریتم‌های تکاملی، به هر راه‌حل رمزنگاری‌شده یک کروموزوم گفته می‌شود. نحوه‌ی نمایش باید چنان باشد که بتواند تمامی راه‌حل‌های ممکن را نمایش دهد و از سوی دیگر با تغییر مقادیر مربوط به یک راه‌حل بتوان راه‌حل‌های دیگر مسئله را تولید کرد. در مسئله‌ی مورد بررسی، هر راه‌حل به کمک یک آرایه با $n+1$ (n: تعداد مشتریان) سطر نمایش داده می‌شود. سطر نخست هر راه‌حل شماره‌ی سایت‌هایی را نشان می‌دهد که تسهیلات در آن‌ها مستقر می‌گردند. بنابراین، این سطر به صورت رشته‌ای به طول m (m: تعداد تسهیلات) در نظر گرفته می‌شود که در هر آرایه‌ی آن، شماره‌ی یکی از سایت‌های منتخب ذکر می‌گردد. هر یک از n سطر بعدی، مسیرهای انتقال تقاضا میان مشتریان و تسهیلات را مشخص می‌نماید؛ بنابراین، هر یک از سطرهای دوم تا $n+1$ به‌ترتیب مسیرهای انتقال تقاضای مشتریان اول تا nام را تعیین می‌کنند. مسیر انتقال تقاضا از هر مشتری تا تسهیل متناظر به کمک شماره‌ی گره‌هایی که در آن مسیر قرار دارند، مشخص می‌شود. بنابراین، اولین عنصر هر سطر شماره‌ی مشتری و آخرین عنصر شماره‌ی تسهیلی را که مشتری به آن تخصیص یافته است مشخص می‌سازد. تصویر ۱ شیوه‌ی نمایش راه‌حل را در مسئله‌ای با ۳ تسهیل و ۵ مشتری نشان می‌دهد. با توجه به شیوه‌ی نمادگذاری مسئله، تسهیلات در سایت‌های ۲ و ۴ مستقر می‌گردند. همچنین، در راه‌حل نشان‌داده‌شده، تقاضای مشتری اول به تسهیل مستقر در سایت ۴ تخصیص می‌یابد و در مسیر انتقال، ابتدا از گره ۳ و سپس از گره ۵ عبور می‌کند. دیگر سطرها به‌ترتیب مسیرهای انتقال تقاضای مشتریان ۲ تا ۵ را نشان می‌دهند.

کروموزوم‌های نسل اول به صورت تصادفی تولید می‌شوند. برای تولید هر کروموزوم، ابتدا m شماره سایت کاندیدا به صورت تصادفی انتخاب و در سطر اول کروموزوم قرار داده می‌شود. برای تولید دیگر سطرهای کروموزوم، که مسیرهای ارتباطی مشتری تا تسهیل متناظر را نشان می‌دهند، شماره‌ی مشتری متناظر در ژن اول قرار می‌گیرد. برای مشخص شدن ژن دوم، یکی از گره‌هایی که به صورت مستقیم با گره ژن اول مرتبط‌اند به صورت تصادفی انتخاب و شماره‌ی آن در ژن دوم قرار داده می‌شود. دیگر ژن‌های سطر مذکور به شیوه‌ای مشابه تکمیل می‌گردند. افزودن گره به هر

۲	۴		
۱	۳	۵	۴
۲			
۳	۱	۲	
۴			
۵	۳	۱	۴

تصویر ۱: مثالی از نحوه‌ی نمایش راه‌حل

سطر تا جایی ادامه می‌یابد که شماره‌ی یکی از تسهیلاتی که در سطر اول کروموزوم قرار دارد، رؤیت شود. شایان ذکر است از آنجا که مسیرهای ارتباطی به صورت کاملاً تصادفی تولید می‌شوند، این امکان وجود دارد که در یک مسیر، زیرحلقه تشکیل شود. پیش از آنکه هر یک از کروموزوم‌های تولیدشده به جمعیت نسل اول

Archive of SID
www.SID.ir

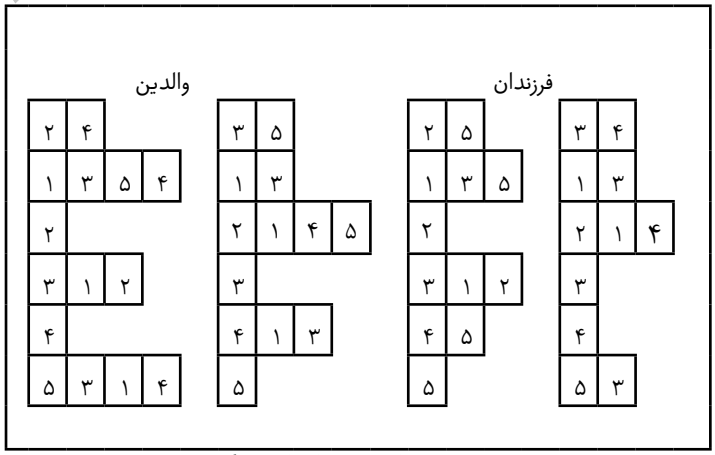
منتقل شود، با رویه‌ای ساده، زیرحلقه‌های تشکیل‌شده در هر مسیر حذف می‌گردند. کلیه‌ی کروموزوم‌هایی که به این شیوه تولید می‌شوند، کروموزوم‌های شدنی هستند.

عملگرهمگذری

عملگر همگذری بر روی دوکروموزوم انتخاب‌شده از جمعیت اعمال می‌شود و اطلاعات این دوکروموزوم را به منظور تولید دوکروموزوم جدید ترکیب می‌کند. در این تحقیق، با توجه به شیوه‌ی نمایش راه‌حل‌ها، عملگر همگذری بر روی سطر اول از بردار نمایش والدین اعمال می‌شود. بدین منظور، نخست سطرهای اول از دوکروموزوم والد با استفاده از عملگر همگذری جایگشتی که نخستین بار دیویس [۲۶] ارائه کرده است، ترکیب و سطرهای نخست دوکروموزوم فرزند تولید می‌شوند. پس از مشخص شدن سطرهای نخست فرزندان، دیگر سطرهای کروموزوم والد اول و دوم به‌ترتیب به کروموزوم‌های فرزند اول و دوم منتقل می‌شوند. واضح است که برخی از مسیرهای ارتباطی مربوط به فرزندان باید اصلاح شوند؛ زیرا تسهیلاتی که در سطر اول یک فرزند وجود دارد ممکن است با تسهیلات موجود در سطر اول والد متناظر یکسان نباشند. برای هر یک از سطرهای دوم به بعد، از هر یک از کروموزوم‌های فرزند، مسیر ارتباطی هر مشتری از مقصد (شماره‌ی مشتری) به سمت مبدأ (تسهیل متناظر) کنترل می‌گردد؛ در این پیمایش، در صورت رسیدن به یکی از شماره تسهیلات مشخص‌شده در سطر اول کروموزوم، مسیر کامل می‌شود و دیگر اعداد موجود در سمت راست این شماره حذف می‌گردند. در صورتی که هیچ یک از شماره تسهیلات مشخص‌شده در سطر اول در مسیر وجود نداشته باشند، مسیر ناقص است و باید با افزودن تعدادی گره (به صورت تصادفی) به یک مسیر کامل تبدیل گردد. تصویر ۲ نمونه‌ای از همگذری را در مسئله‌ای با سه تسهیل و پنج مشتری نشان می‌دهد. در این تصویر، دو آرایه‌ی سمت چپ و دو آرایه‌ی سمت راست به‌ترتیب والدین و فرزندان را نشان می‌دهند. سطرهای اول کروموزوم‌های فرزند با استفاده از همگذری جایگشتی به دست آمده‌اند. در فرزند اول، گره‌های ۲ و ۵ به منظور احداث تسهیلات در نظر گرفته شده‌اند. پس از انتقال سطرهای دوم تا ششم والد اول به این فرزند، رویه‌ی اصلاح به این صورت انجام می‌شود: مشتری مستقر در گره‌ی ۱ مسیر ۴-۵-۳-۱ را طی می‌کند. از آنجاکه در کروموزوم فرزند اول گره ۵ برای احداث تسهیل انتخاب شده است، گره‌های پس از این گره از مسیر مشتری اول حذف می‌شوند و در نتیجه مسیر این مشتری به ۵-۳-۱ تغییر می‌یابد. برای گره‌ی ۲، چون یک تسهیل در این گره مستقر شده است، مسیر مشتری گره‌ی ۲ تغییر نمی‌کند. سطر چهارم، که مسیر مشتری گره‌ی ۳ را نشان می‌دهد، مسیری صحیح است و نیازی به اصلاح ندارد. از آنجاکه در والد اول گره‌ی ۴ برای احداث تسهیل انتخاب شده است، مسیر این مشتری صرفاً یک گره دارد. از طرفی، چون در فرزند اول، به‌جای گره‌ی ۴، گره‌ی ۵ برای احداث تسهیل انتخاب شده است، لازم است مسیر متناظر این مشتری اصلاح شود که این تغییر با توجه به شکل شبکه و با انتخاب تصادفی گره‌های مسیر به صورت ۵-۴ تغییر یافته است. در نهایت، با توجه به آنکه در گره‌ی ۵ یک تسهیل احداث شده است، مسیر ۴-۱-۳-۵ در والد اول به مسیر ۵ در فرزند اول تغییر داده می‌شود. رویه‌ی اصلاح مسیرهای مربوط به کروموزوم فرزند دوم نیز به گونه‌ای مشابه انجام می‌شود.

عملگرجهش

این عملگر به منظور اعمال تغییرات جزئی در ساختار ژنتیکی کروموزوم به کار می‌رود. جهش از طریق تولید اطلاعات جدید موجب ایجاد تنوع در جمعیت می‌شود. برای اجرای عملگر جهش، نخست یکی از سطرهای کروموزم والد به صورت تصادفی انتخاب می‌شود. در صورتی که سطر نخست کروموزوم، که نشان‌دهنده‌ی سایت‌های فعال است، انتخاب شود، یکی از ژن‌های این سطر به صورت تصادفی انتخاب و عدد موجود در آن به عددی دیگر که در سطر اول وجود ندارد، تغییر داده می‌شود. این نوع جهش معادل تغییرمکان یکی از تسهیلات است. با تغییر سطر نخست کروموزوم، لازم است دیگر سطرها نیز در صورت نیاز به همان شیوه‌ای که در عملگر همگذری گفته شد، تغییر داده شوند. در صورتی که در مرحله‌ی اول جهش یکی از سطرهای غیر از سطر اول (که معادل مسیرهای ارتباطی هستند) انتخاب شود، کل مسیر فعلی حذف و، به صورت تصادفی، مسیری دیگر برای مشتری مذکور تولید می‌شود. از آنجاکه انتخاب سطر اول ممکن است سبب تغییراتی عمده در کروموزوم گردد، احتمال انتخاب این سطر در مقایسه با دیگر سطرها باید کمتر در نظر گرفته شود.



تصویر ۲: مثالی از نحوه‌ی اجرای همگذری

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۱: اطلاعات مربوط به مثال عددی

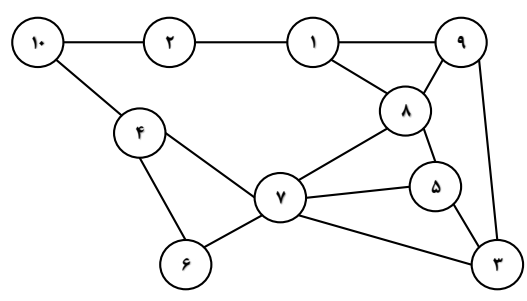
	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱		۰/۱۵						۰/۲۹	۰/۰۵	
۲	۲۹									۰/۰۴
۳					۰/۲۴		۰/۲۲		۰/۱۵	
۴						۰/۴۷	۰/۶۳			۰/۳۹
۵			۷				۰/۰۹	۰/۵۹		
۶				۱۲			۰/۱۲			
۷			۳۹	۱۹	۳۲	۲۷		۰/۱۸		
۸	۴۲				۸		۲۵		۰/۲۲	
۹	۲۵		۳۳					۳۴		
۱۰		۲۱		۳۷						
d_i	۱۳	۱۵	۴۳	۱۲	۶	۱۸	۳۹	۳۵	۱۵	۹

کلیه‌ی کروموزوم‌هایی که از عملگرهای همگذری و جهش تولید می‌شوند، کروموزوم‌های شدنی هستند و بنابراین نیازی به جریمه، اصلاح یا غربال راه‌حل‌ها نیست.

نتایج محاسباتی

در این بخش، برای ارزیابی صحت مدل و کارایی الگوریتم‌های حل ارائه‌شده، مثالی عددی ارائه می‌گردد. تصویر ۳ شبکه‌ی مربوط به مثال عددی را با ۱۰ گره و کمان‌های واصل میان آن‌ها نشان می‌دهد.

مشتریان در گره‌های شبکه مستقرند و تقاضای هر یک با نرخ مشخصی ایجاد می‌شود. هر یک از گره‌های شبکه به صورت یک سایت کاندیدا برای استقرار یک تسهیل اورژانسی در نظر گرفته شده است. هدف تعیین مکان استقرار دو تسهیل در شبکه است که در هر یک از آن‌ها سه خدمت‌دهنده به ارائه‌ی خدمت می‌پردازند. نرخ خدمت‌دهی هر خدمت‌دهنده معادل ۷۰ مشتری در واحد زمان است. هر یک از کمان‌های شبکه با احتمال مشخصی مستعد خرابی در زمان وقوع بحران‌اند. جدول ۱ اطلاعات مربوط به مثال عددی را نشان می‌دهد. در این جدول، اعداد بالای قطر اصلی مقادیر احتمالات خرابی کمان و اعداد پایین قطر اصلی طول هر یک از کمان‌ها را نشان می‌دهند. همچنین، آخرین سطر از جدول مقادیر نرخ تقاضا در واحد زمان را برای هر یک از گره‌های مشتری نشان می‌دهد.

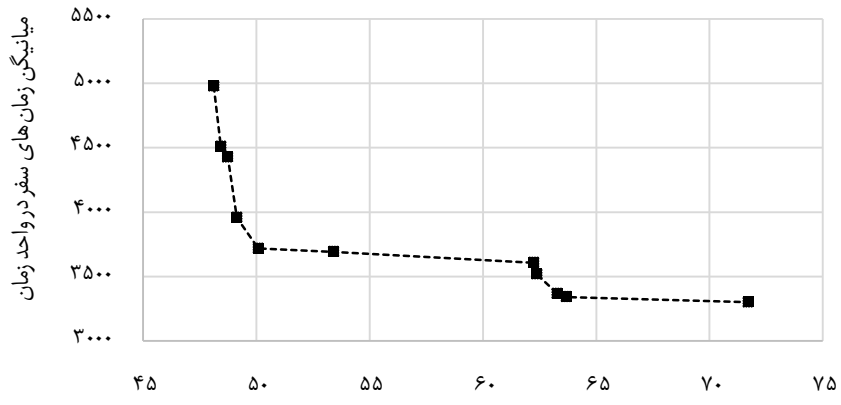


تصویر ۳: شبکه‌ی گره‌ها و کمان‌ها در مثال عددی

مثال عددی با استفاده از روش محدودیت اپسیلون و با به‌کارگیری نرم‌افزار بهینه‌ساز GAMS و حل‌کننده‌ی BARON حل شده است. در تکرارهای متوالی روش محدودیت اپسیلون، ۱۱ نقطه‌ی مؤثر برای مسئله به دست آمده است که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ نشان داده شده‌اند. در این جدول، ستون‌های دوم و سوم به‌ترتیب مقادیر توابع هدف اول و دوم و ستون‌های سوم و چهارم به‌ترتیب زمان‌های اجرای الگوریتم برای بهینه‌سازی توابع هدف اول و دوم را برای هر یک از نقاط مؤثر نشان می‌دهند. مدت‌زمان کل برای اجرای روش محدودیت اپسیلون در مثال عددی ارائه‌شده حدود ۱۷ ساعت است. مقادیر توابع هدف ارائه‌شده در سطر اول و آخر این جدول مقادیر ایده‌آل و حضیض را برای دو تابع هدف نشان می‌دهد؛ سطر اول (دوم) مقادیر ایده‌آل و حضیض را به‌ترتیب برای توابع هدف اول (دوم) و دوم (اول) نشان می‌دهد. همچنین، تصویر ۴ نمودار پراکندگی این نقاط را نشان می‌دهد. در این تصویر، خطوطی که نقاط مؤثر را به یکدیگر متصل کرده‌اند، صرفاً به منظور نشان دادن نحوه‌ی حرکت از یک راه‌حل مؤثر به راه‌حلی دیگر ترسیم شده‌اند و جزو مرز مؤثر مسئله محسوب نمی‌شوند؛ در واقع، صرفاً ۱۱ نقطه‌ای که مشخصات آن‌ها در جدول ۲ آمده است نقاط مؤثر مسئله‌اند.

برای اجرای الگوریتم ژنتیک ارائه‌شده بر روی مثال‌های عددی، لازم است نخست پارامترهای ورودی الگوریتم تنظیم شوند. برای تنظیم پارامترهای نرخ همگذری، نرخ جهش و اندازه‌ی جمعیت از طراحی آزمایش فاکتوریل کامل استفاده شده است. سطوح مربوط به نرخ همگذری از ۳۰ تا ۹۰ درصد (و در مقابل نرخ جهش از ۱۰ تا ۷۰ درصد) در نظر گرفته شده است؛ به گونه‌ای که مجموع نرخ‌های همگذری و جهش برابر ۱۰۰ درصد گردد. همچنین، سطوح $5n$، $10n$ و $20n$ برای اندازه‌ی

Archive of SID
www.SID.ir



تصویر ۴: نمودار پراکندگی نقاط مؤثر به‌دست‌آمده برای مثال عددی

جمعیت در نظر گرفته شده است که در آن n تعداد مشتریان است. پس از انجام آزمایش‌ها، مقادیر ۹۰ درصد، ۱۰ درصد و $10n$ به‌ترتیب به منزله‌ی سطوح مناسب برای نرخ همگذری، نرخ جهش و اندازه‌ی جمعیت انتخاب شده‌اند. معیار توقف الگوریتم بر مبنای همگرا شدن و عدم تغییر کروموزوم‌های سطح اول غلبگی تنظیم شده است؛ بدین معنی که در صورتی که در ۲۰ تکرار آخر الگوریتم هیچ راه‌حل نامغلوب جدیدی به مجموعه‌ی راه‌حل‌های سطح اول غلبگی افزوده نشود، الگوریتم متوقف و کروموزوم‌های سطح اول غلبگی به مثابه‌ی خروجی الگوریتم گزارش می‌شوند. با در نظر گرفتن پارامترهای ورودی عنوان‌شده، الگوریتم ژنتیک ده بار اجرا شده است. شایان ذکر است که الگوریتم طراحی‌شده در محیط برنامه‌نویسی MATLAB کدنویسی و کلیه‌ی محاسبات بر روی یک رایانه با پردازنده‌ی مرکزی به مشخصات Intel-corei3 3.2Ghz و RAM 4GB انجام شده است. ده ستون آخر جدول ۲ نتایج اجرای الگوریتم ژنتیک را نشان می‌دهند. در این ستون‌ها، دوایر موجود در هر سطر نشان‌دهنده‌ی نقاط مؤثری هستند که در هر بار اجرای الگوریتم ژنتیک به دست آمده‌اند. مجموع زمان اجرای الگوریتم ارائه‌شده برای ده بار اجرا حدود ۱۵۰ ثانیه بوده است. نتایج نشان می‌دهد که الگوریتم ژنتیک توانسته است در سه اجرا از ده اجرا تمامی نقاط مؤثر را به دست آورد و در مابقی اجراها نیز الگوریتم همواره ۹ یا ۱۰ نقطه از ۱۱ نقطه‌ی مؤثر را به دست آورده است. زمان اجرای بسیار کوتاه الگوریتم ژنتیک (در مقابل زمان حل الگوریتم دقیق) و توانایی آن در به دست آوردن مجموعه‌ی کامل نقاط مؤثر حاکی از کارایی مطلوب الگوریتم ژنتیک است.

نتیجه‌گیری

وقوع حوادث ناگهانی همانند بلایای طبیعی و یا بروز جنگ‌ها و حملات نظامی خسارات مالی و جانی بسیاری را به دنبال دارد. با وجود آنکه در مطالعات بسیاری به بررسی ابعاد گوناگون مسائل مرتبط با مدیریت بحران پرداخته شده است، به سبب اهمیت و تأثیر برنامه‌ریزی در پیشگیری از چنین وقایعی و یا مدیریت آن‌ها، مدیریت بحران همچنان به صورت یک حوزه‌ی جذاب مطالعاتی مطرح بوده است. در تحقیق حاضر، به مسئله‌ی مکان‌یابی مراکز خدمات اورژانسی و مسیریابی وسایل نقلیه‌ی اورژانسی با فرض وقوع ازدحام در تسهیلات و همچنین امکان تخریب مسیرهای ارتباطی پرداخته شد. در هر تسهیل، تعداد مشخصی خدمت‌دهنده وجود دارد که در زمان وقوع حادثه برای ارائه‌ی خدمت به

جدول ۲: مشخصات مجموعه‌ی نقاط مؤثر به‌دست‌آمده برای مثال عددی

EF	ε-constraint method				NSGAII									
	OF1	OF2	T1	T2	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷	۸	۹	۱۰
۱	۱۳/۴۸	۴۹۷۷	۳۷۱۴۹	۲۰۹۹		●			●	●	●			●
۲	۴۴/۴۸	۴۵۰۹	۳۱۷۳	۱۵۷۲	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
۳	۷۴/۴۸	۴۴۲۵	۲۸۹۸	۱۷۳۶	●	●				●			●	●
۴	۱۵/۴۹	۳۹۵۷	۲۰۳۵	۱۴۲۸	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
۵	۰۹/۵۰	۳۷۱۷	۱۳۶۴	۷۹۷	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
۶	۴۲/۵۳	۳۶۹۱	۷۳۹	۹۵۹	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
۷	۲۴/۶۲	۳۶۰۷	۶۱۴	۱۶۱۱	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
۸	۳۸/۶۲	۳۵۱۷	۴۳۶	۶۹۱	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
۹	۲۸/۶۳	۳۳۶۷	۶۴۸	۴۹۱	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
۱۰	۶۸/۶۳	۳۳۴۱	۲۰۸	۲۱۰	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
۱۱	۷۲/۷۱	۳۳۰۰	۱۱۹	۲۵۷	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●

Archive of SID
www.SID.ir

مشتریان اعزام می‌شوند. هر یک از کمان‌های شبکه که مسیرهای ارتباطی را شکل می‌دهند، با احتمال مشخصی در زمان وقوع بحران خراب و مسدود می‌شوند. این احتمال با توجه به عوامل جغرافیایی و یا نوع زیرسازی‌ها و مصالح به‌کاررفته در ساخت کمان تعیین می‌گردد. تخریب مسیرهای ارتباطی و ازدحام در تسهیلات به منزله‌ی دو منبع از دست رفتن تقاضا در زمان وقوع بحران در نظر گرفته شده است. هر مشتری فقط در صورتی قادر به دریافت خدمت خواهد بود که حداقل یک خدمت‌دهنده در تسهیل متناظر در دسترس باشد و مسیر ارتباطی از تسهیل تا مکان وی سالم باشد. برای بررسی این مسئله، نخست سیستم صف تسهیلات تحلیل شد و احتمالات حدی در دسترس نبودن خدمت‌دهندگان بر مبنای نتایج سیستم صف M/G/c/c محاسبه گردید. سپس، مدل ریاضی مسئله بر پایه‌ی سیستم صف و محاسبه‌ی قابلیت اطمینان مسیرهای ارتباطی ارائه گردید. مدل ریاضی ارائه‌شده، ضمن تعیین مکان استقرار تسهیلات و تعیین شیوه‌ی تخصیص مشتریان به آن‌ها، مسیرهای بهینه‌ی خدمت‌رسانی را به گونه‌ای تعیین می‌کند که نرخ تعداد مشتریان پوشش‌داده‌نشده و میانگین زمان‌های سفر در واحد زمان، به مثابه‌ی دو تابع هدف مدل، کمینه گردند. ازآنجاکه مدل ارائه‌شده دوهدفه است، برای حل آن از روش محدودیت اپسیلون در حکم یکی از پرکاربردترین روش‌های حل مدل‌های چندهدفه استفاده شد. همچنین، به علت ناچندجمله‌ای سخت بودن مسئله‌ی مورد بررسی، برای حل مسئله در ابعاد بزرگ، یک الگوریتم ژنتیک دوهدفه ارائه گردید. در نهایت، صحت مدل و کارایی الگوریتم‌های حل ارائه‌شده، از طریق حل مثالی عددی، مورد ارزیابی قرار گرفت.

در مدل ریاضی ارائه‌شده، برای مشتریانی که در تسهیل متناظر خود موفق به دریافت خدمت نمی‌گردند، تسهیل پشتیبانی در نظر گرفته نشده است. در نظر گرفتن تسهیل پشتیبان برای چنین مشتریانی، مفروضات مسئله را به وضعیت دنیای واقعی نزدیک می‌کند، اما از سویی پیچیدگی مدل ریاضی را نیز به‌شدت افزایش می‌دهد. توسعه‌ی مدل ارائه‌شده در این مقاله با در نظر گرفتن تسهیلات پشتیبان برای هر مشتری شرایط آن را دارد که زمینه‌ی مناسبی برای ادامه‌ی مطالعات در این حوزه باشد. همچنین، توسعه‌ی دیگر الگوریتم‌های فراابتکاری چندهدفه برای حل مسئله در ابعاد بزرگ از دیگر زمینه‌هایی است که برای مطالعات آتی پیشنهاد می‌شود.

پی‌نوشت

1 . Set Covering Location Problem (SCLP)
2 . Maximal Covering Location Problem (MCLP)
3 . Maximal Service Area Problem (MSAP)
4 . Capacitated Maximal Covering Location Problem (CMCLP)
5 . Multiple Capacitated Maximal Covering Location Problem (MCMCLP)
6 . congested facilities
7 . Maximum Expected Covering Location Problem (MEXCLP)
8 . Maximum Availability Location Problem (MALP)
9 . Queueing Maximal Availability Location Problem (QMALP)
10 . hypercube queue systems
11 . ε-constraint method
12 . network flow conservation
13 . efficient solution
14 . Pareto dominance
15 . Pareto optimal solution
16 . non-dominated solution
17 . ideal
18 . nadir
19 . crossover
20 . mutation
21 . offspring
22 . parents
23 . pool
24 . selection
25 . fitness
26 . Non-dominated Sorting Genetic Algorithm
27 . crowding-distance
28 . binary tournament
29 . Elitist-preserving

منابع

1. Toregas, C. et al. (1971). The Location of Emergency Service Facilities. Operations Research, 19 (6), 1363-1373.
2. Church, R.; Velle, C. R. (1974). The Maximal Covering Location Problem. Papers in Regional Science, 32 (1), 101-118.
3. Mahmud, A. R.; Indriasari, V. (2009). Facility Location Models Development to Maximize Total Service Area. Theoretical and Empirical Researches in Urban Management, 87.
4. Chung, C. H.; Schilling, D. A.; Carbone, R. (1983). The Capacitated Maximal Covering Problem: A Heuristic. Proceedings of Fourteenth Annual Pittsburgh Conference on Modeling and Simulation, 1423-1428.
5. Pirkul, H.; Schilling, D. A. (1991). The Maximal Covering Location Problem with Capacities on Total Workload. Management Science, 37 (2), 233-248.
6. Yin, P.; Mu, L. (2012). Modular Capacitated Maximal Covering Location Problem for the Optimal Siting of Emergency Vehicles. Applied Geography, 34, 247-254.
7. Daskin, M. S. (1983). A Maximum Expected Covering Location Model: Formulation, Properties and Heuristic Solution. Transportation Science, 17 (1), 48-70.
8. ReVelle, C.; Hogan, K. (1989). The Maximum Availability Location Problem. Transportation Science, 23 (3), 192-200.
9. Sorensen, P.; Church, R. (2010). Integrating Expected Coverage and Local Reliability for Emergency Medi-

Archive of SID
www.SID.ir

cal Services Location Problems. Socio-Economic Planning Sciences, 44 (1), 8-18.

10. Repede, J. F.; Bernardo, J. J. (1994). Developing and Validating a Decision Support System for Locating Emergency Medical Vehicles in Louisville, Kentucky. European Journal of Operational Research, 75 (3), 567-581.

11. Berman, O.; Larson, R. C.; Chiu, S. S. (1985). Optimal Server Location on a Network Operating as an M/G/1 Queue. Operations Research, 33 (4), 746-771.

12. Marianov, V.; ReVelle, C. (1996). The Queueing Maximal Availability Location Problem: A Model for the Siting of Emergency Vehicles. European Journal of Operational Research, 93 (1), 110-120.

13. Teimoury, E. et al. (2011). Two-Facility Location Problem with Infinite Retrial Queue. International Journal of Strategic Decision Sciences (IJSDS), 2 (3), 38-54.

14. Larson, R. C. (1974). A Hypercube Queuing Model for Facility Location and Redistricting in Urban Emergency Services. Computers & Operations Research, 1 (1), 67-95.

15. Atkinson, J. B. et al. (2008). A Hypercube Queueing Loss Model with Customer-Dependent Service Rates. European Journal of Operational Research, 191 (1), 223-239.

16. Brandeau, M. L.; Larson, R. C. (1986). Extending and Applying the Hypercube Queueing Model to Deploy Ambulances in Boston. National Emergency Training Center.

17. Burwell, T. H.; Jarvis, J. P.; McKnew, M. A. (1993). Modeling Co-Located Servers and Dispatch Ties in the Hypercube Model. Computers & Operations Research, 20 (2), 113-119.

18. Contreras, I.; Fernández, E.; Reinelt, G. (2012). Minimizing the Maximum Travel Time in a Combined Model of Facility Location and Network Design. Omega, 40 (6), 847-860.

19. Ehrgott, M. (2005). Multicriteria Optimization. Berlin: Springer, vol. 2.

20. Haimes, Y. Y.; Ladson, L. S.; Wismer, D. A. (1971). Bicriterion Formulation of Problems of Integrated System Identification and System Optimization. IEEE Transactions on Systems Man and Cybernetics, (3), 296-297.

21. Chankong, V.; Haimes, Y. Y. (1983). Multiobjective Decision Making: Theory and. Methodology. New York: Elsevier Science Publishing Co., Inc.

22. Bérubé, J. F.; Gendreau, M.; Potvin, J. Y. (2009). An Wxact -Constraint Method for Bi-Objective Combinatorial Optimization Problems: Application to the Traveling Salesman Problem with Profits. European Journal of Operational Research, 194 (1), 39-50.

23. Holland, J. (1992). Adaptation in Natural and Artificial Systems. Second Edition, University of Michigan: MIT Press.

24. Srinivas, N.; Deb, K. (1995). Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting Genetic Algorithms. Evol. Comput. 2 (3), 221-248.

25. Deb, K.; Pratap, A.; Agarwal, S. (2002). Meyarivan, T. A. M. T. A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II. Evol. Comput. 6 (2), 182-197.

26. Davis, L. (1991). Handbook of Genetic Algorithms. Van Nostrand Reinhold New York.

Archive of SID

www.SID.ir