مهندسی صنایع و مدیریت شریف، (زمستان ۱۳۹۵)
دوره‌ی ۱-۳۲، شماره‌ی ۲/۲، ص. ۲۷-۳۳

Original Article

بهینه‌سازی قابلیت اطمینان و هزینه‌ی سیستم در مسئله مکان‌یابی شبکه‌یی دوهدفه پرازدحام

پرویز فتاحی * **(دانشیار)**
گروه مهندسی صنایع، دانشگاه الزهراء
وحید حاجی‌پور (دانشجوی دکتری)
گروه مهندسی صنایع، دانشگاه بوعلی سینا همدان

در این نوشتار یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح دوهدفه برای مسئله‌ی مکان‌یابی شبکه‌یی با تقاضای تصادفی و خدمت‌دهنده‌های ثابت برای تسهیلات پرازدحام ارائه می‌شود. هدف استقرار تسهیلات با صرفه‌ی اقتصادی مناسب و نیز قابلیت اطمینان بالاست. بدین منظور مسئله به‌صورت یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی دوهدفه برای بهینه‌سازی هزینه‌ی کل سیستم شامل هزینه‌ی ایجاد تسهیلات و هزینه‌ی به‌کارگیری خدمت‌دهنده‌ها و نیز بیشینه‌کردن قابلیت اطمینان سیستم، ارائه می‌شود. ازجمله کاربردهای متنوع در این زمینه می‌توان به مکان‌یابی شبکه‌های ارتباطی، ماشین‌های فروش خودکار و دستگاه‌های خودپرداز بانک‌ها اشاره کرد. با توجه به NP-Hard بودن مسئله، یک الگوریتم جریان آب چندهدفه به‌منظور حل مدل پیشنهادی ارائه شده است. در نهایت، عملکرد روش حل ارائه شده در مسائل آزمایشی تولید شده با ابعاد مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرارگرفته و با رویکردهای موجود در ادبیات مورد مقایسه و تجزیه و تحلیل قرارگرفته است.

واژگان کلیدی: قابلیت اطمینان، مکان‌یابی شبکه، نظریه‌ی صف، الگوریتم جریان آب.

p.fattahi@alzahra.ac.ir
v.hajipour@basu.ac.ir

۱. مقدمه

مسائل مکان‌یابی شبکه‌یی امروزه شرایط مسائل دنیای واقعی را به‌گونه‌یی مناسب‌تر نشان می‌دهد، بدین طریق که در این مسائل فرض می‌شود تردد بین تسهیلات صرفاً از طریق شبکه‌یی از راه‌های موجود امکان‌پذیر است.[۱] لاو و موریس[۲] مدل‌ها و روش‌های مختلفی برای مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات ارائه کردند. مسائل مکان‌یابی شبکه‌یی به دو دسته تسهیلات ثابت و متحرک تقسیم می‌شود. در مکان‌یابی تسهیلات متحرک، این تسهیلات هستند که به سمت مشتریان حرکت می‌کنند و خدمت مربوطه را ارائه می‌دهند؛ و ازجمله کاربردهای آن مکان‌یابی اغلب تسهیلات اضطراری مانند آمبولانس‌ها و آتش‌نشانی است. در این راستا، گستره‌ی وسیعی از مسائل مکان‌یابی خدمات اورژانسی مورد بحث و بررسی قرارگرفته است.[۳] در مقابل، در مکان‌یابی تسهیلات ثابت مشتری به‌منظور انجام خدمت به سمت تسهیل حرکت می‌کند. مکان‌یابی ایستگاه‌های سوخت‌رسانی و خودپردازها ازجمله کاربردهای مکان‌یابی تسهیلات ثابت است. در این راستا نیز مدلی به‌منظور مکان‌یابی تابلوهای اعلانات شهری ارائه شده[۴] و مسائل مختلفی از کاربرد مکان‌یابی در شبکه‌های حمل و نقل نیز مورد مطالعه قرارگرفته است.

امروزه ترکیب مسائل مکان‌یابی تسهیلات با رویکردهای دیگر نظیر ساختار صف‌بندی، نظریه‌ی قابلیت اطمینان، مباحث قیمت‌گذاری و زنجیره‌ی تأمین بیشتر مورد توجه قرارگرفته و ترکیب این موارد سبب افزایش جذابیت موضوع مکان‌یابی برای محققان شده است. لذا از دیدگاهی دیگر، مسائل مکان‌یابی براساس معیار ازدحام یا تشکیل صف در سیستم خدمت‌دهی به دو دسته تقسیم می‌شود؛ در دسته‌ی اول مسائلی همچون p میانه، p مرکز و پوشش قرار دارد که فرض در این نوع مسائل این است که خدمت‌دهی به هر مشتری بلافاصله پس از ورود به تسهیل انجام شده و هیچ‌گونه صفی تشکیل نمی‌شود. دسته‌ی دوم مسائلی هستند که در آن‌ها مدت زمان خدمت‌دهی در مقایسه با فواصل زمانی مراجعات متوالی مشتریان قابل ملاحظه است و ایجاد ازدحام و تشکیل صف امری اجتناب‌ناپذیر است. لذا به‌دلیل عدم قطعیت‌های موجود در زمان‌های خدمت‌دهی و زمان بین دو ورود متوالی، مسائل مکان‌یابی برای تسهیلات مستعد ازدحام از زمره مسائل پیچیده در مدل‌سازی و حل محسوب می‌شود. کاربردهای مختلف و متنوع ترکیب مسائل مکان‌یابی با ساختار صف در دنیای واقعی اهمیتی دوچندان پیدا کرده است. برمن و همکاران[۵] مکان بهینه‌ی خدمت‌دهنده‌ها را در شبکه‌ی صف با ساختار M/G/۱ تعیین کردند، و شاندیکیومر و یاو[۶] نیز مدل‌های تخصیص خدمت‌دهنده در فرایندهای تولیدی را مورد تحلیل قرار دادند. این نوع مسائل یکی از انواع مسائل در محیط‌های تولیدی است که در آن تخصیص بهینه‌ی تعداد خدمت‌دهنده به مراکز کار طوری تعیین می‌شود که عملکرد شبکه‌ی صف بیشینه شود. وانگ و همکاران[۷] با بررسی و مطالعه‌ی کاربرد مکان‌یابی خدمت‌دهنده‌ها

* نویسنده مسئول
تاریخ: دریافت ۱۳۹۳/۴/۱، اصلاحیه ۱۳۹۳/۱۱/۱۲، پذیرش ۱۳۹۴/۲/۵.

در شبکه‌های ارتباطاتی و دستگاه خودپرداز، چندین مدل برای تجهیزات مکان‌هایی با ظرفیت محدود ارائه کردند. در واقع این مدل‌ها برای حالت‌هایی که مکان خدمت‌دهی ثابت، ظرفیت خدمت‌دهنده محدود، و تقاضا تصادفی باشد گسترش یافت. در ارائه‌ی مدل مکان‌یابی و تخصیص فازی برای سیستم‌های پرازدحام با محدودیت ظرفیت،[۸] نظریه‌ی مجموعه‌ی فازی به‌منظورگسترش مدل‌های مکان‌یابی با بیشترین پوشش صف‌بندی مورد استفاده قرارگرفت. مسئله‌ی مکان‌یابی مجموعه‌یی از تجهیزات روی شبکه با تقاضای تصادفی و ظرفیت محدود تجهیزات به‌منظور بیشینه‌سازی تعداد تقاضای مورد انتظار مشتریان مورد بررسی قرار گرفت[۹] و مدلی برای مسائل مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات در چارچوب مدل صف با ساختار ورود گروهی ارائه شد.[۱۰] در صورت‌مسئله‌ی این تحقیق تقاضای مشتریان تصادفی، و مکان خدمت‌دهنده‌ها و نرخ خدمت‌دهی ثابت در نظر گرفته شد. محققین یک مدل مکان‌یابی تسهیلات رقابتی با ساختار صف $M/M/m/k$ را مدل‌سازی کرده و برای حل آن از الگوریتم ژنتیک و جست‌وجوی ممنوع استفاده کردند.[۱۱]

هدف نوشتار حاضر، تعیین تعداد خدمت‌دهنده‌های بهینه، مکان بهینه‌ی استقرار تسهیلات، و تخصیص بهینه‌ی مشتریان به تسهیلات فعال شده است، طوری که نه‌تنها هزینه‌ی ایجاد تسهیلات و به‌کارگیری خدمت‌دهنده کمینه شود بلکه سیستمی با بیشترین قابلیت اطمینان داشته باشیم. در ادبیات مسائل مکان‌یابی تسهیلات پایا، پایایی سیستم به‌صورت کمینه‌سازی خرابی تسهیلات دیده شده است در حالی که در این تحقیق قابلیت اطمینان با رویکرد تخصیص افزونگی مورد مطالعه قرارگرفته است.

در این مقاله، به دلیل NP-Hard بودن مسئله، از رویکردهای فراابتکاری در حل مدل بهره جسته‌ایم. الگوریتم جریان آب (WFA)[۱] یک الگوریتم تکاملی مبتنی بر عملکرد سازهای موسیقی است که اولین بار توسط یانگ و وانگ[۱۲] معرفی شد. بعدها محققین این الگوریتم را برای بهینه‌سازی مسئله‌ی تولید سلولی به‌کار بردند.[۱۳] برخی محققان این الگوریتم را برای حل مسئله‌ی زمان‌بندی جریان کارگاهی پیاده‌سازی کرده و برتری عملکرد آن را در مقابل الگوریتم ژنتیک مورد مطالعه قرار دادند.[۱۴] تاکنون تحقیقات زیادی روی این الگوریتم در ادبیات مسائل مهندسی صنایع برای حل مسائل مکان‌یابی صورت نگرفته است. حاجی پور و پسندیده[۱۵] یک مدل دوهدفه ترکیبی صف و مکان‌یابی ارائه کردند و برای حل آن از تکنیک معیار جامع و الگوریتم بهینه‌سازی اجتماع ذرات بهره جستند. در ادامه نیز یک مدل چندهدفه‌ی ترکیبی صف و مکان‌یابی ارائه شد[۱۶] که در آن سه رویه ــ ازجمله الگوریتم جست‌وجوی هارمونی را مورد استفاده قرار دادند.

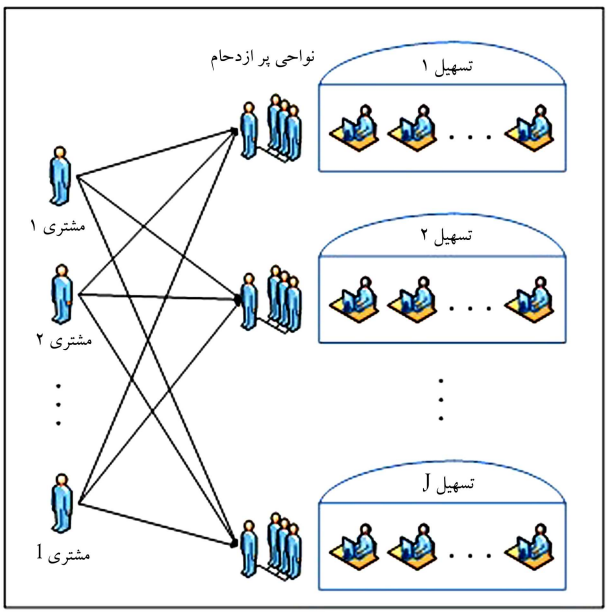
امروزه با توجه به خرابی اجتناب‌ناپذیر تسهیلات، هدف سیستم‌ها نباید منحصراً از بعد هزینه بررسی شود و بنابراین باید سیستم از قابلیت اطمینان بالایی نیز برخوردار باشد. در اکثر این تحقیقات قابلیت اطمینان سیستم درکمینه‌سازی خرابی تسهیلات مورد مطالعه قرارگرفته است. در واقع هدف آن‌ها افزایش دسترس‌پذیری تسهیلات است. محققین دو مدل قابلیت اطمینان برای مسئله‌ی p میانه و مکان‌یابی تسهیلات با هزینه‌ی ثابت ارائه کردند[۱۷] و مروری جامع بر این مسائل به انجام رساندند؛[۱۸] آنان ضمن گسترش دو مدل ارائه‌شده، یک الگوریتم حل مبتنی بر روش آزادسازی لاگرانژ ارائه کردند.[۱۹] در این مقاله، هدف ما مکان‌یابی و تخصیص m تسهیل پرازدحام بین n متقاضی است تا از این طریق علاوه بر کمینه شدن کل هزینه‌ی سیستم، قابلیت اطمینان تسهیلات بیشینه شود. هدف تعیین مکان‌های با صرفه‌ی اقتصادی و همچنین قابل اطمینان به‌منظور استقرار تسهیلات است.

در ادامه، ابتدا مدل مکان‌یابی شبکه‌یی پایا با تسهیلات پرازدحام تشریح می‌شود. سپس الگوریتم جریان آب چندهدفه (MOWFA)[۲] به‌عنوان رویه‌ی حل به تفصیل تشریح شده و روی مسائل مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار می‌گیرد. در نهایت نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی در بخش انتهایی ارائه می‌شود.

۲. مدل پیشنهادی

مسئله‌ی مکان‌یابی شبکه‌یی پایا برای تسهیلات پرازدحام به‌تفصیل در این بخش تشریح می‌شود. هدف تعیین تعداد خدمت‌دهنده‌های بهینه، مکان بهینه‌ی استقرار تسهیلات و تخصیص بهینه‌ی مشتریان به تسهیلات فعال شده است به‌گونه‌یی که نه‌تنها هزینه‌ی ایجاد تسهیلات و به‌کارگیری خدمت‌دهنده کمینه شود بلکه سیستمی با بیشترین قابلیت اطمینان داشته باشیم. در این راستا از مسئله‌ی معروف تخصیص افزونگی در نظریه‌ی پایایی استفاده کردیم.[۲۰] در شکل ۱ شماتیک مسئله‌ی مکان‌یابی شبکه‌یی پایا با تسهیلات پرازدحام نشان داده شده است. در ادبیات مسائل مکان‌یابی شبکه‌یی با خدمت‌دهنده‌های ثابت، بهینه‌سازی قابلیت اطمینان با دیدگاه افزونگی کم‌تر مورد توجه قرارگرفته است. لذا خروجی مدل، استقرار تسهیلاتی است که هم از منظر اقتصادی به‌صرفه است و هم قابل اطمینان باشد.

از مهم‌ترین کاربردهای مدل می‌توان به مکان‌یابی ایستگاه‌های سوخت‌رسانی، مکان‌یابی دستگاه‌های خودپرداز اتوماتیک، ماشین‌های فروش خودکار، رستوران‌ها، هتل‌ها و مراکز رفاهی بین شهری اشاره کرد. فرضیات مطرح در این مسئله بدین قرار است که به‌منظور دریافت خدمت، مشتری به سمت تسهیلات حرکت می‌کند و هر مشتری فقط می‌تواند به یک خدمت‌دهنده تخصیص داده شود. نرخ مراجعه‌ی مشتریان به‌منظور دریافت خدمت به هریک از تسهیلات از توزیع پواسان تبعیت می‌کند. هر تسهیل انتخاب شده m خدمت‌دهنده دارد که ازجمله متغیرهای تصمیم مسئله‌ی مورد مطالعه است. زمان خدمت‌دهی هر تسهیل نیز از توزیع نمایی پیروی می‌کند. در ادامه پارامترها و متغیرهای تصمیم مدل را تعریف، و مدل ریاضی ارائه‌شده را تشریح می‌کنیم.



شکل ۱. شماتیک مسئله‌ی مکان‌یابی شبکه‌یی پایا با تسهیلات پرازدحام.

۱.۲. اندیس‌ها

i: شاخص مشتریان $i = ۱, ۲, ..., I$؛

j: شاخص تجهیزات بالقوه $j = ۱, ۲, ..., J$.

۲.۲. پارامترها

P: تعداد خدمت‌دهنده‌هایی که می‌توانند خدمت ارائه کنند؛

γ_j: نرخ تقاضا برای تسهیل انتخاب شده j؛

λ_i: نرخ تقاضای سرویس‌های درخواست شده از مشتری i؛

μ_j: نرخ خدمت‌دهی برای تسهیل j؛

v_j: پارامتر مقیاس توزیع گاما برای تسهیل j؛

k_j: پارامتر شکل توزیع گاما برای تسهیل j؛

r_j: قابلیت اطمینان هر خدمت‌دهنده در تسهیل j؛

R_j: قابلیت اطمینان کل تسهیل j؛

$\pi_{۰,j}$: احتمال بیکاری تسهیل j؛

UM: حد بالای تعداد خدمت‌دهنده موجود در هر تسهیل؛

T: حد بالای زمان انتظار مشتریان؛

cs_j: هزینه‌ی به‌کارگیری خدمت‌دهنده‌ها در تسهیل j.

۳.۲. متغیرهای تصمیم

y_{ij}: ۱ اگر مشتری i به تسهیل j تخصیص داده شود و صفر در غیر این صورت؛

x_j: ۱ اگر تسهیل j انتخاب شود و صفر در غیر این صورت؛

m_j: تعداد خدمت‌دهنده در تسهیل j.

۴.۲. مدل‌سازی مسئله

به‌منظور مدل‌سازی تابع هدف از جنس قابلیت اطمینان در مسئله‌ی مکان‌یابی تسهیلات پرازدحام ارائه شده، در هر تسهیل ساختار خدمت‌دهنده‌ها به‌صورت موازی فرض شده است. لذا با توجه به ساختار موازی خدمت‌دهنده‌های موجود در هر تسهیل و یک مرحله‌یی بودن سیستم خدمت‌رسانی، توزیع گاما با پارامتر شکل برابر ۱ (یا همان توزیع نمایی) قابلیت اطمینان هر خدمت‌دهنده و در نهایت قابلیت اطمینان هر تسهیل مطابق روابط ۱ و ۲ به دست می‌آید.

$$r_j(t) = e^{(-v_j.t)}; \qquad j = ۱, ..., J \tag{۱}$$

$$R_j = (۱ - (۱ - r_j(t))^{m_j}); \qquad j = ۱, ..., J \tag{۲}$$

بنابراین فرمول‌بندی مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عددصحیح ارائه شده به‌صورت یک مدل دوهدفه ارائه می‌شود.

$$\text{Min } Z_۱ = \sum_{j=۱}^{J} c_j x_j + cs_j m_j \tag{۳}$$

$$\text{Max } Z_۲ = \frac{\sum_{j=۱}^{J} [۱ - (۱ - r_j(t))^{m_j}]\, x_j}{\sum_{j=۱}^{J} x_j} \tag{۴}$$

Subject to :

$$\sum_{j=۱}^{J} x_j \le P \tag{۵}$$

$$\sum_{j=۱}^{J} y_{ij} = ۱; \quad i = ۱, ..., I \tag{۶}$$

$$\sum_{i=۱}^{I} \lambda_i y_{ij} \le m_j \mu_j x_j; \quad j = ۱, ..., J \tag{۷}$$

$$\sum_{i=۱}^{I}\sum_{j=۱}^{J} \lambda_i y_{ij} \left[\frac{\pi_{۰,j}}{m_j!}\left(\frac{\gamma_j}{\mu_j}\right)^{m_j} \frac{m_j\mu_j}{(m_j\mu_j - \gamma_j)^۲} + \frac{۱}{\mu_j}\right] \le T \tag{۸}$$

$$۱ \le m_j \le UM; \quad j = ۱, ..., J \tag{۹}$$

$$x_j \in \{۰, ۱\}; \qquad j = ۱, ..., J$$

$$y_{ij} \in \{۰, ۱\}; \qquad i = ۱, ..., I, \quad j = ۱, ..., J$$

$$m_j \text{ integer}; \quad j = ۱, ..., J$$

$$\psi_j = \sum_{i=۱}^{I} \lambda_i y_{ij}; \quad j = ۱, ..., J \tag{۱۰}$$

- تابع هدف ۳ نشان‌دهنده‌ی کمینه‌سازی کل هزینه‌ی سیستم شامل هزینه‌ی ایجاد تسهیلات و هزینه‌ی به‌کارگیری خدمت‌دهنده‌هاست.
- تابع هدف ۴ نشان‌دهنده‌ی بیشینه‌سازی متوسط قابلیت اطمینان تسهیلات است.
- محدویت ۵ نشان‌دهنده‌ی بیشترین تعداد تجهیزاتی است که می‌توان انتخاب کرد.
- محدویت ۶ اطمینان می‌دهد که تقاضای هرگره مشتری فقط به یک تسهیل تخصیص داده شود.
- محدویت ۷ تضمین می‌کند که تقاضای هر تجهیز انتخاب شده کم‌تر از نرخ خدمت‌دهی آن تسهیل باشد.
- محدودیت ۸ تضمین می‌کند که بیشینه‌ی مدت زمان انتظار هر مشتری در سیستم برابر T واحد زمانی باشد که ازجمله اهداف کلان سیستم در راستای رضایت‌مندی مشتری است.
- محدودیت ۹ حد بالای تعداد خدمت‌دهنده‌ها در هر تسهیل را نشان می‌دهد.
- محدودیت ۱۰ نیز دامنه‌ی متغیرهای تصمیم مسئله را نشان می‌دهد.

۳. الگوریتم جریان آب (WFA)

این الگوریتم از رفتار طبیعی جریان آب از نقاط مرتفع به نواحی کم‌ارتفاع الهام گرفته است. الگوریتم WFA عامل‌های حل (جواب‌ها) را که نواحی ترسیم شده از روی تابع هدف را طی می‌کنند، به‌صورت جریان‌های آب شبیه‌سازی می‌کند. براساس قانون جاذبه، آب از مناطق مرتفع‌تر به مناطق پست‌تر جریان می‌یابد، و لذا اندازه حرکت سیال، جریان‌های آب، شکل‌بندی و جهت‌گیری‌هایشان در مواجهه با تغییرات سطح زمین از طریق انشعاب به جریان‌های دیگر و یا ادغام جریان‌های دیگر تعدیل و تطبیق می‌شود. جریان آب، درصورت دارا بودن انرژی جنبشی کافی (اندازه حرکت) برای غلبه بر موانع بالقوه، می‌تواند به ارتفاعات بیشتری گسیل یابد.

به‌طور عام، دست کم یک جریان می‌تواند به پست‌ترین بخش از ناحیه‌ی مورد نظر جاری شود. در طبیعت، مقداری از آب هر جریان ممکن است تبخیر شود و سپس از طریق باران (میعان) به زمین بازگردد. با الهام گرفتن از جریان آب در طبیعت، WFA به‌عنوان یک الگوریتم بهینه‌سازی که از عملیات انشعاب جریان آب، ادغام آن‌ها و بارش باران از بخارات حاصله برای پیمودن فضای جواب الهام گرفته است[۱۲] معرفی شد. در واقع این الگوریتم یک الگوریتم تکاملی و شامل چهار عملیات جریان آب است: ۱. انشعاب و حرکت؛ ۲. ادغام؛ ۳. تبخیر؛ ۴. میعان (بارش). هنگامی که جریانات آب به‌عنوان عامل‌های جواب، و تغییرات سطح زمین به‌عنوان نمای تابع هدف تلقی می‌شود، آبی را که به سمت یک موقعیت پایین‌تر می‌رود می‌توان به‌عنوان یک جست‌وجوی جواب برای بهینگی در نظرگرفت. چنین رفتار طبیعی جریان‌های آب در طراحی WFA مورد استفاده قرارگرفته است. از جمله مفاهیمی که در حلقه‌ی اصلی این الگوریتم نوین مد نظر قرارگرفته، می‌توان اشاره کرد به:

- براساس نیروی جاذبه و قانون بقای انرژی، آب دائماً به سمت مناطق پست‌تر جاری می‌شود. بنابراین، جست‌وجوی جواب به‌صورت بازگشتی از جواب‌های نامرغوب به جواب‌های برتر در تکرارهای متوالی حرکت می‌کند.
- اندازه حرکت سیال، پیشروی آب از میان نواحی ناهموار را هدایت می‌کند. یک جریان هنگام مواجهه با نواحی ناهموار و در حالتی که اندازه حرکت آن بیش از یک مقدار معین (از قبل تعیین شده) برای انشعاب باشد، به چندین زیرجریان تقسیم می‌شود. الگوریتم WFA این رفتار را به‌صورت عملیات انشعاب عامل‌ها شبیه‌سازی می‌کند که در نتیجه‌ی آن از یک عامل، بیش از دو عامل به دست می‌آید. یک جریان دارای اندازه حرکت بزرگ‌تر، نسبت به جریان با اندازه حرکت کوچک‌تر، زیرجریان‌های بیشتری تولید می‌کند. جریان دارای اندازه حرکت محدود تسلیم تغییرات سطح زمین است و یک جریان واحد باقی می‌ماند. بنابراین، اندازه حرکت یک جریان دوباره محاسبه شده و برای تعیین تعداد زیرجریان‌هایی که بعد از هر حرکت می‌توانند انشعاب یابند، به‌کار می‌رود.
- آب به سمت مناطق پست‌تر جریان می‌یابد و گاهاً درصورت بزرگ‌تر بودن انرژی جنبشی از انرژی پتانسیل لازم، به سمت مناطق مرتفع‌تر جاری می‌شود (متورم شدن). برای اجتناب از گیر افتادن در یک کمینه‌ی محلی، الگوریتم برای وسیع‌تر کردن منطقه‌ی تفحص و جست‌وجو، این اجازه را به آب می‌دهد تا به یک مکان بدتر جریان یابد.
- تعدادی از جریان‌ها هنگامی که با هم به یک موقعیت یکسان می‌رسند ادغام شده و یک جریان واحد را تشکیل می‌دهند. هنگامی که چندین عامل به یک موقعیت یکسان می‌روند، الگوریتم برای اجتناب از جست‌وجوهای زاید، تعداد عامل‌های جواب را کاهش می‌دهد.
- جریان‌های آب به‌طور طبیعی در معرض تبخیر آب قرارگرفته و آب بخار شده از طریق باران (میعان) به زمین برمی‌گردد. در WFA، قسمتی از جریان به‌منظور شبیه‌سازی تبخیر آب، به‌صورت دستی حذف شده و عملیات میعان در WFA برای شبیه‌سازی باران طبیعی پیاده‌سازی شده تا منطقه‌ی وسیع‌تری جست‌وجو شود.

با توجه به دوهدفه بودن مدل ریاضی ارائه شده در این تحقیق، در ادامه روند پیاده‌سازی الگوریتم WFA چندهدفه ارائه شده به‌تفصیل تشریح می‌شود.

۱.۳. ساختار و نحوه‌ی نمایش جواب

روش تعریف ساختار کدگذاری مسئله ازجمله تأثیرگذارترین بخش‌ها برای افزایش کارایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی ترکیباتی است. هرجواب مسئله شامل مجموعه‌یی از تسهیلات انتخاب شده، تعداد بهینه‌ی خدمت‌دهندگان در هر تسهیل و استراتژی تخصیص گره‌های مشتری تخصیص داده شده به آن تسهیلات است. نحوه‌ی نمایش جواب و فرایند رمزگشایی مورد استفاده در این مطالعه برگرفته از روشی مشابه در دیگر مطالعات[۱۰] است.

۲.۳. حلقه‌ی اصلی WFA

در اینجا عملگرهای بیان شده در مطالعات پیشین[۱۲] را برای حل مسئله‌ی مطرح شده در نظرگرفته‌ایم تا بتوانیم از ویژگی تعداد عامل‌های چندگانه و پویای رویکرد WFA برای بهینه‌سازی هزینه و قابلیت اطمینان کل سیستم استفاده کنیم. بدین منظور عملگرهای پیاده‌سازی شده در ادامه آمده است.

۱.۲.۳. عملگر انشعاب و حرکت جریان آب

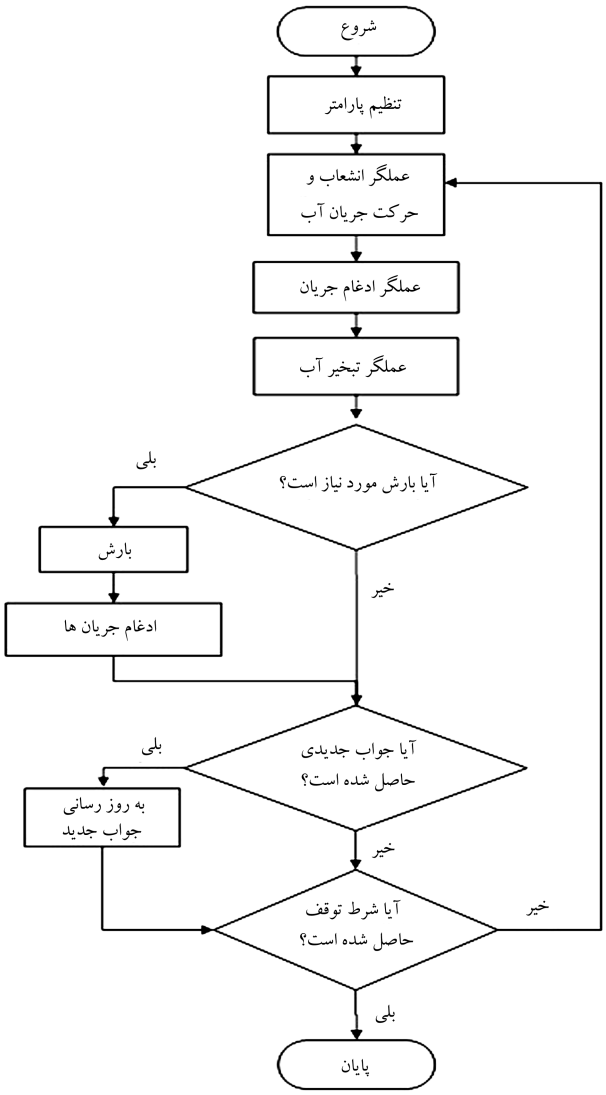
در شروع کار الگوریتم فرض می‌شود که تنها یک جریان در یک نقطه‌ی تصادفی داریم. عملگر حرکت و انشعابی مبتنی بر انرژی جنبشی تعریف شده که براساس سرعت و حجم جریان آب عمل می‌کند.[۱۳]

۲.۲.۳. عملگر ادغام جریان

وقتی دو جریان یا بیشتر از آن به یک نقطه می‌رسند، در هم ادغام شده و تشکیل یک جریان را می‌دهند. این شرایط هنگامی حاصل می‌شود که جواب‌ها با مقدار تابع هدف برابر باشد. با استفاده از این عملگر WFA تعداد عامل‌های حل کاهش می‌یابد و از جست‌وجوی زائد جلوگیری می‌شود.

۳.۲.۳. عملگر تبخیر و بارش

عملگر تبخیر موجود در WFA پیشنهادی برای شبیه‌سازی تبخیر طبیعی جریان آب به هوا مورد استفاده قرار می‌گیرد. پس از مدتی، آب تبخیر شده با بارش به زمین برمی‌گردد. مکان بارش به‌صورت تصادفی در اطراف نقطه آب قبل از تبخیر خواهد بود. تبخیر و بارش آب به‌طور همزمان سازوکاری جهت خروج از بهینه‌ی محلی و گیر نکردن در آن ارائه می‌دهند. در واقع اگر بهبود در جریانی حاصل نشد آن جریان پس از مدتی تبخیر می‌شود و دوباره با بارش به نقطه‌ی دیگری در فضای جواب بازمی‌گردد. در این تحقیق، سه سازوکار برای شبیه‌سازی تبخیر و بارش آب براساس روش‌های تبخیر و زمان بارش ارائه شده است: بارش فوری، بارش احتمالی و بارش فصلی. بارش فوری زمانی به‌کار می‌رود که فوراً بخواهیم تغییری در جریان‌های متوقف شده اعمال کنیم و تنوع و پراکندگی بیشتری به فضای مورد جست‌وجو بدهیم. در بارش احتمالی یک آستانه احتمال برابر ۰٫۳ تعریف شده و هر بار یک عدد تصادفی تولید می‌کنیم؛ اگر عدد تولید شده کم‌تر از این آستانه‌ی احتمال بود جریان متوقف شده را به جریان دیگری تبدیل می‌کنیم. بارش فصلی به‌صورت دوره‌یی در موازنه با تبخیر آب به‌کار می‌رود. عملگر بارش دوره‌یی زمانی اجرا می‌شود که حجم جریان‌های تبخیر شده به یک سطح از پیش تعیین شده برسد (مثل ۱۰۰ جریان بخار شده) تا کسری از آب‌های تبخیر شده (مثل ۲۰٪ جریان‌های تبخیر شده) را با بارش به زمین برگرداند. در تمام روش‌های بارش مورد اشاره، مکان این جریان‌های بازگشتی به‌صورت تصادفی در اطراف نقاط اولیه خواهد بود که ممکن است چندین جریان جدید در یک نقطه تولید کند و با عملگر ادغام از جست‌وجوی زائد این جواب‌ها جلوگیری شود.



شکل ۲. فلوچارت الگوریتم **WFA**.

۳.۳. انشعاب و حرکت جریان‌ها

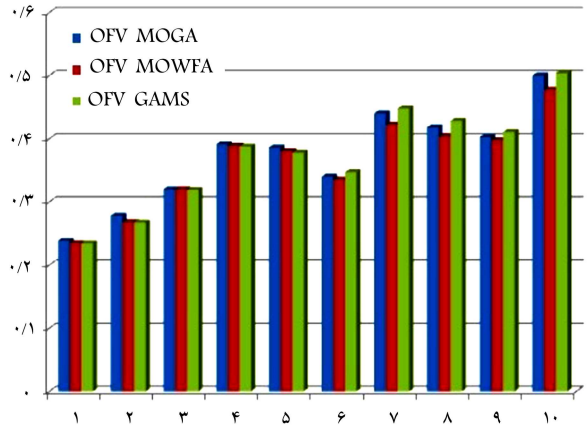
در میان چهار عملگر WFA، هدف عملگر حرکت و انشعاب جست‌وجو، یافتن حل‌های بهتر و نهایتاً انتخاب بهترین حل از بین حل‌های ممکن است. برای ارزیابی جواب‌ها، هر دو تابع هدف را با استفاده از تکنیک معیار جامع[۱۰] و با $p = ۲$ یکپارچه کرده و مورد استفاده قرار می‌دهیم. در واقع این عملگر مشابه ایجاد ساختار همسایگی در دیگر الگوریتم‌های فرابتکاری عمل می‌کند. با استفاده از این عملگر می‌توانیم به‌طور مرتب حل‌های تصادفی تولید شده را به زیرجریان‌هایی تقسیم کرده و در فضای حل جریان دهیم تا به جواب بهینه نزدیک شویم. در نهایت نحوه‌ی پیاده‌سازی الگوریتم WFA با جزئیات در شکل ۲ نمایش داده شده است.

۴. نتایج محاسباتی

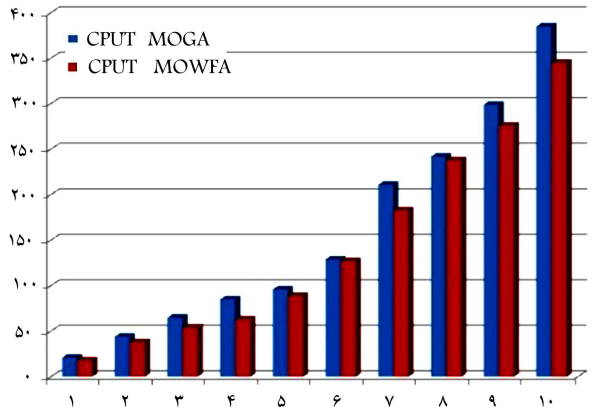
به‌منظور حل مدل پیشنهادی یک الگوریتم جریان آب چندهدفه ارائه شد. در جدول ۱ ساختار ۱۰ مسئله‌ی آزمایشی تولید شده را برای پیاده‌سازی الگوریتم پیشنهادی بر

جدول ۱. مسائل آزمایشی تولید شده.

شماره مسئله	I	J	P
۱	۱۶	۷	۵
۲	۳۵	۱۲	۹
۳	۴۲	۱۵	۱۱
۴	۶۲	۲۱	۱۴
۵	۷۷	۲۵	۱۸
۶	۸۸	۳۴	۲۲
۷	۱۱۰	۵۵	۴۲
۸	۲۵۰	۱۴۵	۱۱۰
۹	۳۴۰	۲۲۰	۱۸۰
۱۰	۴۲۰	۳۶۰	۲۸۰



شکل ۳. مقایسه‌ی رویه‌های حل برحسب کیفیت جواب.



شکل ۴. مقایسه‌ی **MOWFA** و **MOGA** برحسب زمان اجرای الگوریتم.

روی این نوع مسائل نشان می‌دهد. در ضمن، نرخ تقاضای (ورود) مشتری i از توزیع یکنواخت به‌صورت $\lambda_j \sim Uniform[۲, ۵]$ تبعیت می‌کند. نرخ خدمت‌دهی تسهیل j از توزیع یکنواخت به‌صورت $\mu_j \sim Uniform[۶۰, ۹۰]$ تبعیت می‌کند. الگوریتم پیشنهادی با استفاده از نرم‌افزار MATLAB برنامه‌نویسی شده و روی یک نوت بوک با هشت گیگابایت RAM و پردازنده‌ی دوگیگاهرتز اجرا شده است.

از آنجا که الگوریتم پیشنهادی از جمله الگوریتم‌های جدید برای حل مسائل

جدول ۲. نتایج محاسباتی پیاده‌سازی رویه‌های حل.

شماره مسئله	GAMS		MOGA		MOWFA	
	OFV	CPUT(s)	OFV	CPUT(s)	OFV	CPUT(s)
۱	۰/۲۳۴۸	۱	۰/۲۳۸۶	۲۱	۰/۲۳۴۸	۱۸
۲	۰/۲۶۷۷	۸۹	۰/۲۷۸۲	۴۴	۰/۲۶۷۹	۳۸
۳	۰/۳۱۹۲	۱۴۳	۰/۳۲۰۱	۶۵	۰/۳۱۹۸	۵۴
۴	۰/۳۸۸۱	۵۴۰	۰/۳۹۱۲	۸۵	۰/۳۸۸۹	۶۳
۵	۰/۳۷۸۱	۲۱۰۰	۰/۳۸۶۳	۹۶	۰/۳۸۰۵	۸۹
۶	۰/۳۴۷۲	۳۶۰۰	۰/۳۴۰۱	۱۲۹	۰/۳۳۵۴	۱۲۷
۷	۰/۴۴۸۳	۳۶۰۰	۰/۴۴۰۳	۲۱۱	۰/۴۲۲۲	۱۸۳
۸	۰/۴۲۸۳	۳۶۰۰	۰/۴۱۸۱	۲۴۲	۰/۴۰۳۸	۲۳۸
۹	۰/۴۱۰۷	۳۶۰۰	۰/۴۰۲۸	۲۹۹	۰/۳۹۷۷	۲۷۶
۱۰	۰/۵۰۴۲	۳۶۰۰	۰/۵۰۰۱	۳۸۵	۰/۴۷۸۰	۳۴۵

مکان‌یابی شبکه‌یی است، مسائل را در ابعاد مختلف با استفاده از نرم‌افزار GAMS حل، و با الگوریتم پیشنهادی مقایسه کرده‌ایم. علاوه بر آن، کارایی WFA چندهدفه‌ی پیشنهادی با الگوریتم ژنتیک چندهدفه (MOGA)[3] ارائه شده در دیگر منابع موجود[10] مقایسه و تجزیه و تحلیل کردیم. در جدول ۲، نتایج محاسباتی پیاده‌سازی الگوریتم‌ها با توجه به دو معیار زمان اجرای روش حل (CPUT) و مقدار تابع هدف یکپارچه شده (OFV) با روش معیار جامع ارائه شده است. لازم به ذکر است GAMS برای مسائل ۶ تا ۱۰ موفق به گزارش جواب نهایی نشده، لذا جوابی که نرم‌افزار پس از یک ساعت به آن رسیده، گزارش شده است.

تحلیل نتایج و مقایسات بیان می‌دارد که الگوریتم پیشنهادی در ابعاد کوچک، مقادیر بهینه را گزارش می‌دهد و این امر بیانگر اثبات کارایی روش حل به‌کار گرفته می‌باشد که این کارایی در ابعاد بزرگ خود را بیشتر نشان می‌دهد. همچنین برای اثبات هوشمندی الگوریتم ارائه شده در مقابل الگوریتم‌های فرابتکاری موجود، مقایسات با الگوریتم ژنتیک چندهدفه انجام شد؛ مقایسات گرافیکی روش‌ها در شکل‌های ۳ و ۴ بیانگر کارایی الگوریتم پیشنهادی برای حل مسائل چندهدفه در معیارهای کیفیت جواب و زمان محاسباتی اجرای الگوریتم است.

۵. نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در این نوشتار یک مدل دوهدفه‌ی مکان‌یابی شبکه‌یی پایا با تقاضای تصادفی و خدمت‌دهنده‌های ثابت برای تسهیلات پرازدحام ارائه شد. در مدل مسئله هدف کمینه‌کردن هزینه‌ی کل سیستم و بیشینه کردن قابلیت اطمینان آن است. در ادامه برای حل مدل ارائه شده، یک الگوریتم جریان آب چندهدفه مبتنی بر رفتار طبیعی جریان آب از نقاط مرتفع به نواحی کم ارتفاع ارائه شد. خروجی نتایج، کارایی الگوریتم ارائه شده را برای حل مدل پیشنهادی نشان می‌دهد. برای تحقیقات آتی، مسئله را در شرایط کلاسه کردن مشتریان با توجه به اعتبار آن‌ها در سیستم‌های بانکداری می‌توان مدل‌سازی کرد.

پانوشت‌ها

1. water flow-like algorithm (WFA)
2. multi-objective WFA (MOWFA)
3. multi-objective genetic algorithm (MOGA)

منابع (References)

1. Francis, R.L., Megginis, L.F., and White, J.A., *Facility Layout and Location: An Analytical Approach*, (2nd ed.), Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall (1992).
2. Love, R.L., Morris, J.G. and Wesolowsky, G.O., *Facility Location: Models and Methods*, North-Holland Publishing Company, New York (1988).
(Cited by: Francis, R.L., Megginis, L.F. and White, J.A., *Facility Layout and Location: An Analytical Approach*, (2nd ed.), Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall (1992).
3. Marianov, V. and ReVelle, C. "Siting emergency services", *Facility Location: A Survey of Applications and Methods*, Springer Series in Operations Research, **1**, pp. 199-223 (1995).
4. Hodgson, M.J. and Berman, O. "A billboard location model", *Geographical and Environmental Modeling*, **1**(1), pp. 25-43 (1997).
5. Berman, O., Larson, R.C. and Chiu, S.S. "Optimal server location on A network operating as an M/G/1 Queue", *Operations Research*, **33**(4), pp. 746-771 (1985).
6. Shanthikumar, J.G. and Yao, D.D. "Optimal server allocation in a system of multi- server stations", *Management Science,* **12**, pp. 1173-1191 (1987).

7. Wang, Q., Batta, R. and Rump, C.M. "Facility location models for immobile servers with stochastic demand", *Naval Research Logistic,* **51**, pp. 137-152 (2004).

8. Shavandi, H. and Mahlooji, H. "A fuzzy queuing location model with a genetic algorithm congested systems", *Applied Mathematics and Computation,* **181**, pp. 440-456 (2006).

9. Berman, O., Huang, R., Kim, S. and Menezes, M.B.C. "Locating capacitated facilities to maximize captured demand", *Journal IIE Transactions*, Taylor and Francis Online, **15**, pp. 1015-1029 (2007).

10. Pasandideh, S.H.R, Niaki, S.T.A. and Hajipour, V. "A multi-objective facility location model with batch arrivals: two parameter-tuned meta-heuristic algorithms", *Journal of Intelligent Manufacturing*, **24**(2), pp. 331-348 (2013).

11. Zarrinpoor, N. and Seifbarghy, M. "A competitive location model to obtain a specific market share while ranking facilities by shorter travel time", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **55**(5-8), pp. 807-816 (2011).

12. Yang, F.C. and Wang, Y.P. "Water flow-like algorithm for object grouping problems", *Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers*, **24**(6), pp. 475-488 (2007).

13. Wu, T.H., Chung, S.H. and Chang, C.C. "A water flow-like algorithm for manufacturing cell formation problems", *European Journal of Operational Research*, **205**(2), pp. 346-360 (2010).

14. Pargar, F. and Zandieh, M. "Bi-criteria SDST hybrid flow shop scheduling with learning effect of setup times: water flow-like algorithm approach", *International Journal of Production Research*, **50**(10), pp. 1-15 (2011).

15. Hajipour, V. and Pasandideh, S.H.R. "Proposing an adaptive particle swarm optimization for a novel bi-objective queuing facility location model", *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, **47**(3), pp. 223-240 (2012).

16. Rahmati, S.H.A., Hajipour, V. and Niaki, S.T.A. "A soft-computing pareto-based meta-heuristic algorithm for a multi-objective multi-server facility location problem", *Applied Soft Computing,* **13**, pp. 1728-1740 (2013).

17. Snyder, L.V. and Daskin, M.S. "Reliability models for facility location: The expected failure cost case", *Transportation Science*, **39**, pp. 400-416 (2005).

18. Snyder, L.V. "Facility location under uncertainty: A review", *IIE Transactions*, **38**, pp. 537-554 (2006).

19. Li, Q., Zeng, B. and Savachkin, A. "Reliable facility location design under disruptions", *Computers & Operations Research*, **40**, pp. 901-909 (2013).

20. Coit, D.W. "Maximization of system reliability with a choice of redundancy strategies", *IIE Transactions*, **35**(6), pp. 535-543 (2003).