



مکان‌یابی مراکز درمانی و اورژانسی با استفاده از رویکرد ترکیبی هوش جمعی بر پایه شبکه‌های پیچیده

هادی محمدی: استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران (* نویسنده مسئول) h.mohammadi@pnu.ac.ir
کمال میرزائی: استادیار، گروه مهندسی کامپیوتر، واحد میبد، دانشگاه آزاد اسلامی، میبد، ایران.

چکیده

کلیدواژه‌ها

مکان‌یابی مراکز درمانی و اورژانس، مسئله تخصیص درجه دوم، الگوریتم ازدحام ذرات، شبکه پیچیده

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۱/۱۷

تاریخ چاپ: ۱۴۰۲/۰۴/۲۷

زمینه و هدف: یکی از مسائل بهینه‌سازی تخصیص منابع می‌باشد. بدین معنی که تخصیص منابع در مکان‌های مختلف به گونه‌ای باشد که هزینه تخصیص مسئله کمتر شود. مسئله تخصیص منابع علاوه بر جنبه نظری آن، می‌تواند در مسائل کاربردی مختلف از جمله زمانبندی منابع پروژه، توزیع مواد غذایی در سوپر مارکت‌های سطح شهر، تخصیص مراکز درمانی و اورژانسی در یک شهر و غیره استفاده شود. برای حل این گونه مسائل می‌توان از الگوریتم‌های هوش جمعی استفاده کرد.

روش کار: در این مقاله از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات برای حل مسائل مختلف تخصیص استفاده شده است. به منظور افزایش کارایی الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به کمک جستجوی محلی بهبود یافته است. به منظور تقویت بهتر ارتباط بین ذرات از مفهوم شبکه پیچیده استفاده شده است. برای تصمیم‌گیری برای انتخاب ذرات وضعیت آن ذره در شبکه پیچیده موثر می‌باشد. سنجه درجه برای انتخاب راه حل‌ها در شبکه پیچیده در نظر گرفته شده است. برای ارزیابی نتایج از دو گروه مسائل بهینه‌سازی استفاده شده است. گروه اول مسائل استاندارد و نظری مختلف از کتابخانه QAPLib برای حل مسئله تخصیص درجه دوم می‌باشد. گروه دوم نیز یک مسئله مکان‌یابی مراکز درمانی و اورژانسی با در نظر گرفتن احتمال خرابی مراکز مطابق با شرایط دنیای واقعی پیاده‌سازی شده است. در این مسئله به این موضوع پرداخته می‌شود که با توجه به معیارهای موقعیت، هزینه ساخت و بازسازی و فاصله مراکز درمانی و اورژانسی از یکدیگر در لکه‌های جمعیتی مختلف مراکز درمانی و اورژانسی شهری در کدام لکه جمعیتی ایجاد گردد.

یافته‌ها: نتایج ارزیابی هر دو گروه نشان از میانگین هزینه و درصد خطای کمتر الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی ازدحام ذرات ممیتیکی به همراه شبکه پیچیده با سنجه درجه نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ممیتیکی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات پایه می‌باشد. به طور نمونه، برای حل مسئله Tia60 الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات شبکه‌ای ممیتیکی، الگوریتم ممیتیکی و پایه به ترتیب ۴.۵۵٪، ۴.۵۹٪ و ۸.۱۵٪ درصد خطا دارند.

نتیجه‌گیری: الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی ازدحام ذرات ممیتیکی به همراه شبکه پیچیده با سنجه درجه برای مکان‌یابی مراکز درمانی و اورژانسی نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ممیتیکی و الگوریتم ذرات پایه میانگین هزینه و درصد خطای کمتری دارد.

تعارض منافع: گزارش نشده است.

منبع حمایت‌کننده: حامی مالی ندارد.

شیوه‌نامه استناد به این مقاله:

Mohammadi H, Mirzaie K. Locating Medical and Emergency Centers using the Combined Approach of Collective Intelligence based on Complex Networks. Razi J Med Sci. 2023;30(4): 223-235.

*انتشار این مقاله به صورت دسترسی آزاد مطابق با CC BY-NC-SA 3.0 صورت گرفته است.



Original Article

Locating Medical and Emergency Centers using the Combined Approach of Collective Intelligence based on Complex Networks

Hadi Mohammadi: Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Payame Noor University (PNU), Tehran, Iran. (* Corresponding author) h.mohammadi@pnu.ac.ir
Kamal Mirzaie: Assistant Professor, Department of Computer Engineering, Maybod Branch, Islamic Azad University, Maybod, Iran.

Abstract

Background & Aims: One of the optimization issues is resource allocation. This means that resources should be allocated in different places so that the cost of allocating the problem is reduced. In addition to its theoretical aspect, the issue of resource allocation can be used in various practical issues such as the timing of project resources, the distribution of foodstuffs in city-level supermarkets, the allocation of medical and emergency centers in a city, etc. Collective intelligence algorithms can be used to solve such problems. In the last decade, various collective intelligence algorithms have been used to solve complex problems such as resource allocation. In this article, the PSO algorithm and its improved variants are used. In the PSO algorithm, it refers to each of the components of a particle. To continue moving, each particle uses its previous experience and that of its neighbors. Every particle in space is moving at a speed. At every moment, this movement leads to the change of the current position of each particle in space. In the PSO algorithm, the communication between particles takes place in two parts of the algorithm. One is the personal best fit of each particle and the other is the best global fit. All the particles that are generated at the beginning of the algorithm as the initial population. Then the fit of each particle is calculated and stored as its personal best fit. In the same way, in updating the position of each particle, this value is compared with the fit of the same particle in the new position, if this fit is better than the previous position of the particle, it is stored as the best personal fit of the same particle. If there is a change in the personal best fit, the fit of this solution is compared with the global best fit. Then, the global best fit is updated.

Methods: In this article, the particle swarm optimization algorithm is used to solve various allocation problems. To increase the efficiency, the particle swarm optimization algorithm has been improved with the help of local search. To better strengthen the communication between particles, the concept of a complex network has been used. The status of that particle in the complex network is effective for deciding on the choice of particles. The degree criterion is considered for selecting solutions in the complex network. Two groups of optimization problems have been used to evaluate the results. The first group is different standard and theoretical problems from the QAPLib library for solving the quadratic assignment problem. The second group is also a problem with the location of medical and emergency centers, considering the probability of the center's failure according to real-world conditions. In this issue, it is discussed that according to the criteria of location, cost of construction and reconstruction, and the distance of medical and emergency centers from each other in different population spots, urban medical and emergency centers should be established in which population spot.

Results: In order to compare and evaluate different proposed approaches for resource allocation, two groups of different problems have been used. The first group of standard problems from the QAPLib library is for quadratic assignment. The second group is solving the problem of locating medical and emergency centers in different population spots of the city. The evaluation results of both groups show the average cost and error percentage of the proposed memetic particle swarm optimization algorithm along with the complex network with degree measure compared to the memetic particle swarm optimization algorithm and the

Keywords

Location of Medical and Emergency Centers, Quadratic Allocation Problem, ParticleSwarm Algorithm, Complex Network

Received: 06/04/2023

Published: 18/07/2023

basic particle swarm optimization algorithm. For example, to solve the Tia60 problem, the memetic mesh particle swarm optimization algorithm, the memetic algorithm, and the base algorithm have 4.55%, 4.59%, and 8.15% error percentages, respectively.

Conclusion: The results of the implementation of the first to third algorithms for locating medical and emergency centers with 100 repetitions and an initial population size of 50 shows. The memetic degree complex grid particle swarm optimization algorithm has reached the optimal value faster than the standard PSO algorithm and PSO with local search. The third method is more suitable than the first and second method for locating medical and emergency centers. The proposed optimization algorithm of memetic particle swarm with the complex network with degree scale for locating medical and emergency centers has a lower average cost and error percentage than the memetic particle swarm optimization algorithm and basic particle algorithm. One of the problems of optimizing the allocation of resources is the location of medical and emergency centers in urban population spots. This problem has been solved with the help of three different meta-heuristic approaches. To allocate medical and emergency centers, a particle swarm optimization algorithm has been used. Then this algorithm has been converted into a memetic algorithm with the help of the proposed local search. To create a connection between particles, the concept of a complex network has been used. In the third proposed method, in addition to the particle swarm optimization algorithm, along with local search, a complex network with a degree scale is used. To evaluate the results, two groups of problems have been used. The first group has been used to solve various quadratic assignment problems from the QAPLib library. In the second group, the practical problem of locating medical and emergency centers of different population spots in the city is considered. To solve both groups, the proposed memetic complex network particle swarm optimization algorithm has a lower average cost and error percentage than the memetic particle swarm optimization algorithm and the basic particle swarm optimization algorithm. To improve the performance of the proposed algorithms, other metrics can be used in the complex network or he used other local search algorithms such as refrigeration simulation, and forbidden search.

Conflicts of interest: None

Funding: None

Cite this article as:

Mohammadi H, Mirzaie K. Locating Medical and Emergency Centers using the Combined Approach of Collective Intelligence based on Complex Networks. Razi J Med Sci. 2023;30(4): 223-235.

*This work is published under CC BY-NC-SA 3.0 licence.

مقدمه

یکی از مسائل بهینه‌سازی، تخصیص منابع است که توسط الگوریتم‌های پیشنهادی مختلف حل شده است. هدف از حل این مسأله، اختصاص منابعی به مکان‌هایی به طوری که هزینه بهینه شود. مسئله تخصیص منابع یک مسئله جایگشت برای تخصیص منابع مختلف در مکان‌های از پیش تعیین شده است (۱). یکی از مسائل استاندارد تخصیص منبع، مسئله تخصیص درجه دوم (QAP) می‌باشد. در این مسئله یک تعداد معین از امکانات (تسهیلات) به همان تعداد مکان، اختصاص داده می‌شود که در آن فاصله بین مکان‌ها و وابستگی بین امکانات، با یک عدد بیان می‌شود. در تعریف ریاضی این مسئله با فرض این که $F = \{f_{ij}\}$ ماتریس هزینه باشد که f_{ij} میزان وابستگی تسهیل i و تسهیل j را نمایش دهد و $D = \{d_{ij}\}$ ماتریس فاصله باشد که d_{ij} فاصله مکان i و مکان j را نمایش دهد و ماتریس $C = \{c_{ij}\}$ ماتریس تخصیص که c_{ij} هزینه تخصیص تسهیل i در مکان j را نشان دهد. مجموعه اعداد صحیح مثبت $1, 2, 3, \dots, n$ در نظر گرفته شود که S_n مجموعه‌ای از جایگشت‌های $1, 2, 3, \dots, n$ باشد. هدف مسئله تخصیص درجه دوم پیدا کردن همه جایگشت‌های $\varphi \in S_n$ می‌باشد، که رابطه ۱ را مینیمم نماید. منظور از نماد φ یک جایگشتی از اعداد صحیح مثبت $1, 2, 3, \dots, n$ است که خود عضوی از مجموعه‌ای از تمام جایگشت‌ها یعنی S_n می‌باشد. منظور از $\varphi(i)$ نیز شماره مکانی است که تسهیل i در آنجا قرار گرفته است. n نشان‌دهنده تعداد مکان‌هاست که تسهیلات در آن جایگذاری می‌شوند. در این مقاله مقدار C_{ij} ها برابر صفر در نظر گرفته شده است (۲).

$$\min(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij} d_{\varphi(i)\varphi(j)} + \sum_{i=1}^n c_{i\varphi(i)}) \quad (1)$$

در دهه اخیر از الگوریتم‌های هوش جمعی مختلفی برای حل مسائل پیچیده مانند تخصیص منابع استفاده شده است. در این مقاله، از الگوریتم PSO و انواع بهبود یافته آن، استفاده شده است. الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات در سال ۱۹۹۵ توسط کندي و ابرهات ابداع شد (۳). در الگوریتم PSO به هر یک از اجزاء یک ذره اطلاق می‌شود. برای ادامه حرکت هر ذره از تجربه قبلی خود و همسایگانش بهره می‌گیرد (۴). هر ذره در فضا با سرعتی در حال حرکت می‌باشد. در هر لحظه این

حرکت منجر به تغییر موقعیت فعلی هر ذره در فضا می‌شود. برای نشان دادن سرعت و موقعیت بعدی هر ذره از رابطه (۲) استفاده می‌شود:

$$V_i^{t+1} = w \cdot V_i^t + c_1 \cdot r_1^t (P_{best} - X_i^t) + c_2 \cdot r_2^t (G_{best} - X_i^t)$$

$$X_i^{t+1} = X_i^t + V_i^{t+1}$$

(۵). w ضریب اینرسی است که نشان‌دهنده میزان تمایل به ملندن در وضعیت فعلی است، C_1, C_2 نیز معمولاً مجموع آنها ۴ در نظر گرفته می‌شود و r_1^t, r_2^t نیز اعداد تصادفی بین صفر تا یک می‌باشند. همچنین P_{best} نشان‌دهنده بهترین موقعیت محلی هر ذره است و G_{best} بهترین موقعیت سراسری را نشان می‌دهد. در بروز رسانی سرعت هر ذره ضرایب مربوط به بهترین موقعیت فعلی هر ذره و بهترین موقعیت سراسری ذرات تعادل بین مفاهیم اکتشاف و استخراج در جستجو را تنظیم می‌کنند (۶). در الگوریتم PSO ارتباط بین ذرات در دو بخش از الگوریتم صورت می‌گیرد. یکی بهترین برازش شخصی هر ذره و دیگری بهترین برازش سراسری (۷). تمام ذراتی که در شروع الگوریتم به عنوان جمعیت اولیه تولید می‌شوند P_{best} آنها با بینهایت مقداردهی می‌شود. سپس برازش هر ذره محاسبه می‌شود و به عنوان بهترین برازش شخصی خود ذخیره می‌شود (۸). به همین ترتیب در بروز رسانی موقعیت هر ذره این مقدار با برازش همان ذره در موقعیت جدید مقایسه می‌شود در صورت بهتر بودن این برازش نسبت به موقعیت قبلی ذره، به عنوان بهترین برازش شخصی همان ذره ذخیره می‌شود (۹). اگر در بهترین برازش شخصی تغییری وجود داشته باشد، برازش این راه حل با بهترین برازش سراسری مورد مقایسه قرار می‌گیرد (۱۰). سپس، بهترین برازش سراسری بروز رسانی می‌شود (۱۱).

روش کار

در مرجع (۱۲) به محدودیت منابع موجود در شبکه‌های رادیویی شناختی (CRN) اشاره شده است. از میان همه محدودیت‌ها، مهم‌ترین آن‌ها دخالت‌دادن دسترسی‌های مجاز به کاربران اولیه است. برای کاهش تاثیر محدودیت‌ها به دنبال رسیدن به بهره‌وری بالاتر هستند. تنوع مشارکتی قادر است در شبکه‌های بی‌سیم

درجه دوم دارد. در مرجع (۱۵) یک الگوریتم ACO ساده که الگوریتم کلونی ماکزیمم-مینیمم (max-min) نامیده شده است برای حل مسئله QAP ارائه شده است. در این مقاله، نشان داده شده است که الگوریتم کلونی مورچگان نسبت به الگوریتم جستجوی محلی با همسایگی دو جابه‌جایی (2-exchange) روی نمونه‌های QAP عملکرد مناسب‌تری دارد. در مرجع (۱۶) مسئله تخصیص منابع در یک سلول سه بخشی در نظر گرفته شده است. تکنیک انتقال مالتی پلکس تقسیم فرکانسی قائم (OFDM) در شبکه‌های بی‌سیم مانند LTE و 5G آینده مورد مطالعه قرار گرفته است. یک استراتژی جدید برای طرح تخصیص منابع مبتنی بر بهینه‌سازی ازدحام ذرات و زمانبندی منصفانه تناسبی ترکیبی (PSO-PFS) پیشنهاد شده است. این امر به کاربرانی که در موقعیت‌های بحرانی هستند و توزیع بهینه منابع نیاز دارند کمک می‌کند. این طرح الگوریتم PFS در شرایط کانال وضعیت کاربران بکار می‌برد و الگوریتم PSO یک راه حل بهینه برای مسئله تخصیص فراهم می‌کند و کارایی کاربران را براساس وضعیت کانال شان بهبود می‌بخشد. الگوریتم‌های پیشنهادی براساس شبکه پیچیده یا بدون شبکه پیچیده برای حل مسئله تخصیص منابع ارائه شده است. در ابتدا از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استاندارد با کمی تغییر در نتیجه هر ذره استفاده شده است. پس از آن روش پیشنهادی الگوریتم PSO با جستجوی محلی و روش شبکه پیچیده‌ای برای حل مسئله تخصیص منابع استفاده شده است.

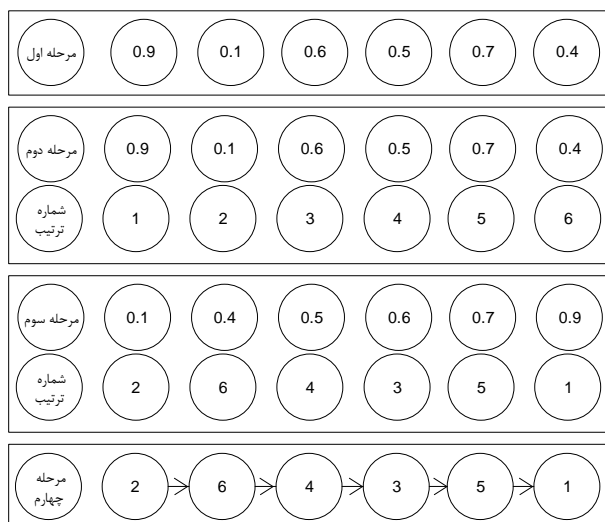
روش اول: الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات پایه به کمک جهش ساده: فلوجارت این الگوریتم در شکل ۱ نشان داده شده است.

ابتدا پارامترها و متغیرهای مسئله تخصیص درجه دوم تعریف می‌شود. سپس به تعداد ذرات که نشان‌دهنده جمعیت اولیه می‌باشد، به طور تصادفی ذرات تولید می‌شود و موقعیت آنها مشخص می‌شود و در فضای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات قرار می‌گیرند. در این حال سرعت هر ذره با صفر مقداردهی می‌شود. طبق سرعت هر ذره و موقعیتش براساس تابع هزینه، مسیر

تنوع را افزایش دهد. بنابراین، در این مقاله از تنوع مشارکتی برای بهره‌وری بالاتر در شبکه‌های CRN مورد استفاده قرار می‌گیرد. برای تحقیق این امر، از یک مدل تخصیص منابع ایجاد می‌شود و شبکه‌های CRN مشارکتی و ناهمگن را تجزیه و تحلیل می‌کند. در این مدل، در طول همکاری، بهترین تقویتی (relay) برای کمک به کاربران ثانویه‌ای که شرایط کانالی ضعیفی دارند، استفاده می‌شود. نتایج نشان می‌دهد زمانی که از مشارکت به جای ارتباط مستقیم در شبکه‌های CRN استفاده می‌شود، کارایی تخصیص منابع به طور قابل توجهی افزایش می‌یابد. در مرجع (۱۳) در جاهایی که درخواست‌های ناهمگن و رقابت برای سرویس‌های با کیفیت بالا وجود دارد به تخصیص منابع و چالش‌های کسب و کار در سیستم‌های محاسبات لبه موبایل (MEC) پرداخته می‌شود. مسئله تخصیص منابع لبه (ERAP) به عنوان برنامه خطی عدد صحیح ترکیبی فرموله می‌شود. نشان داده می‌شود که ERAP یک مسئله NP-hard است. دو مکانیزم تخصیص منبع پیشنهاد شده است. اول، مکانیزم مبتنی بر مزایده که به طور کاملاً رابطه‌ای و تخصیص‌های منصفانه را تولید می‌کند. دوم، یک مکانیزم تقریبی مبتنی بر LP پیشنهاد داده شده است که منصفانه بودن تخصیص را تضمین نمی‌کند ولی راه حل‌های نزدیک به بهینه را تضمین می‌کند. برای ارزیابی کارایی مکانیزم‌های پیشنهادی، آنالیزهای تجربی گسترده‌ای روی نمونه‌های ERAP با اندازه‌های مختلف انجام شده است. آنالیزها نشان می‌دهد که مکانیزم‌های پیشنهادی راه حل‌های نزدیک به بهینه برای نمونه‌های نسبتاً بزرگ با مدت زمان معقول را بدست می‌آورند. در مرجع (۱۴) از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام پرستو برای حل مسئله تخصیص درجه دوم استفاده شده است. این الگوریتم به وسیله یک سلسله مراتبی از جستجو مشخص شده است که به آن اجازه جستجو در فضای جستجو را می‌دهد. برای ارزیابی کارایی الگوریتم پیشنهادی، مسئله با الگوریتم خفاش برای حل مسائل QAPLib مقایسه شده است. بررسی‌ها نشان از عملکرد بهتر الگوریتم پیشنهادی نسبت به الگوریتم خفاش برای حل مسئله تخصیص

توجه به مسیر طی شده میان مکان‌ها طول مسیر محاسبه شود. به دلیل اینکه مسئله تخصیص منابع جزو مسائل گسسته است باید الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات پیوسته به گسسته تبدیل شود (۱۵). بدین منظور به تعداد مکان‌ها عدد تصادفی بین صفر تا یک تولید می‌شود. حال به هر کدام از اعداد تصادفی تولید شده به ترتیب از یک تا آخرین عدد تصادفی، شماره تخصیص داده می‌شود. سپس این اعداد تصادفی به همراه شماره ترتیب تولیدشان براساس اعداد تصادفی به صورت صعودی مرتب می‌شوند. در این مرتب‌سازی، جابه‌جائی عدد تصادفی به همراه شماره ترتیب‌شان می‌باشد. در شکل ۲ برای شش مکان به کمک موقعیت هر ذره یک راه حل تولید شده است.

روش دوم: الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به



شکل ۲- تولید یک مسیر از مکان‌ها به کمک موقعیت هر ذره

همراه جستجوی محلی: به منظور بدست آوردن موقعیت‌های مختلف یک ذره می‌توان به جای انتخاب تصادفی از حالت تئوری آشوب استفاده نمود. نحوه عملکرد این تئوری در رابطه ۳ آورده شده است:

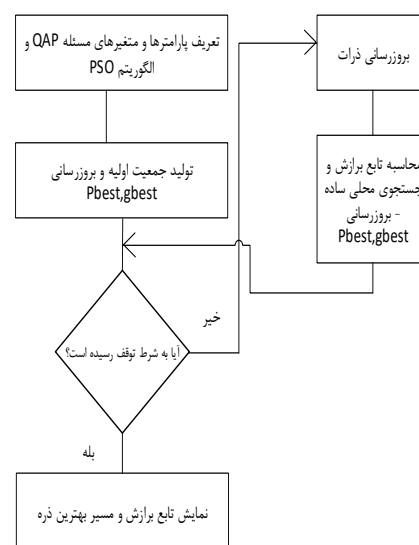
$$X(j) = M * X(j-1) * (1 - X(j-1)) \quad (3)$$

که در آن M یک عدد صحیح کوچک می‌باشد. $X(j)$ و $X(j-1)$ به ترتیب موقعیت فعلی و پیشین ذره را نشان می‌دهد. در این روش از تعیین موقعیت آشوبی ذره برای بدست آوردن جمعیت اولیه استفاده شده است. همچنین در ادامه الگوریتم به ازاء سه مورد از ذره‌های

حل مسئله تخصیص درجه دوم به همراه تابع برازش آن ذره بدست می‌آید. حال باید بهترین برازش شخصی هر ذره و بهترین برازش سراسری ذرات برورسانی شود. برای هر ذره نیز یک جهش ساده در راه‌حل‌ها به کمک یکی از جهش‌های جابه‌جائی، درجی و معکوس صورت می‌گیرد. سپس برازش راه حل محاسبه می‌شود در صورت بهبود جایگزین بهترین برازش شخصی ذره می‌شود. در جدول ۱ پارامترهای بکار رفته به همراه خلاصه‌ای از آن پارامترها آورده شده است.

جدول ۱- پارامترهای مسئله QAP و الگوریتم PSO

نام پارامتر	مقدار	توضیحات
MaxIt	۵۰۰	تعداد تکرار الگوریتم PSO
nPOP	۱۵۰	تعداد ذرات فضای الگوریتم PSO
W	۱	وزن اینرسی
Wdamp	۰/۹۹	ضریب کاهش وزن اینرسی
C1	۰/۲	ضریب یادگیری شخصی
C2	۰/۴	ضریب یادگیری عمومی
nVar	متناسب با اندازه مسئله در نظر گرفته می‌شود	تعداد مکان‌ها



شکل ۱- فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات پایه به کمک جهش ساده

ضریب اینرسی می‌تواند ثابت یا متغیر باشد. در این مقاله به کمک پارامتر $Wdamp$ در هر تکرار این ضریب کاهش می‌یابد. فاصله بین مکان‌ها در یک ماتریسی $n * n$ نگهداری می‌شود و سپس مسیر طی شده توسط تخصیص درجه دوم به تابع هزینه داده می‌شود تا با

ذره جایگزین می‌شود. حال این راه حل با بهترین برآزش شخصی خودش مقایسه می‌شود اگر بهبود داشته باشد به عنوان بهترین برآزش شخصی همان ذره جایگذاری می‌شود. در این حالت با بهترین برآزش سراسری ذرات نیز مقایسه می‌شود اگر بهبود داشته باشد به عنوان بهترین برآزش سراسری ذرات جایگذاری می‌شود. سپس همین عملیات جستجوی محلی مختلف جابجایی، معکوس و درجی برای بهترین برآزش سراسری ذرات نیز انجام می‌شود.

روش سوم: الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات شبکه پیچیده‌ای براساس درجه ذرات هر نسل به همراه جستجوی محلی برای حل مسئله تخصیص منابع:

در این روش برای تولید جمعیت اولیه از اعداد تصادفی یکنواخت استفاده شده‌است. معمولاً از گراف برای مدلسازی پدیده‌های واقعی مانند گراف شهرها و ارتباطات شهرها استفاده می‌شود. در دنیای واقعی گراف‌های متعددی دیده می‌شود که بر اساس ویژگی‌ها یا معیارهایی مختلفی مانند موقعیت، توزیع درجه، متوسط درجه و غیره تشکیل می‌شود. به این نوع شبکه‌ها، شبکه پیچیده گفته می‌شود (۱۶). در دو دهه اخیر جنبش جدیدی بر مطالعه شبکه پیچیده مانند شبکه‌هایی که نامنظم، پیچیده و پویا هستند، ایجاد شده‌است. تمرکز اصلی شبکه‌های پیچیده با حرکت از آنالیز و تجزیه و تحلیل شبکه‌های کوچک با سیستم‌هایی که دارای هزاران یا میلیون‌ها گره است آغاز شده‌است. این فعالیت با دو مقدمه که در سال ۱۹۹۸ توسط واتس (Watts) و استراگوتز (Strogatz) در مورد شبکه‌های جهان کوچک و یک سال بعد از آن توسط بارآباسی و آلبرت روی شبکه‌های مقیاس آزاد آغاز شده‌است (۱۷، ۱۸). در شبکه‌های پیچیده اجزاء به صورت خودسازمانده عمل می‌کنند. می‌توان آن را با روش‌هایی مانند شبکه منظم، تصادفی، جهان کوچک و مقیاس آزاد مدل کرد. برای اندازه‌گیری شبکه از سنجه‌های مختلفی مانند متوسط درجه گره‌ها، ضریب خوشگی، تابع توزیع درجه، تشکیل مولفه بزرگ استفاده

فضای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام از تئوری آشوب از رابطه ۴ در محاسبه سرعت ذره استفاده شده است:

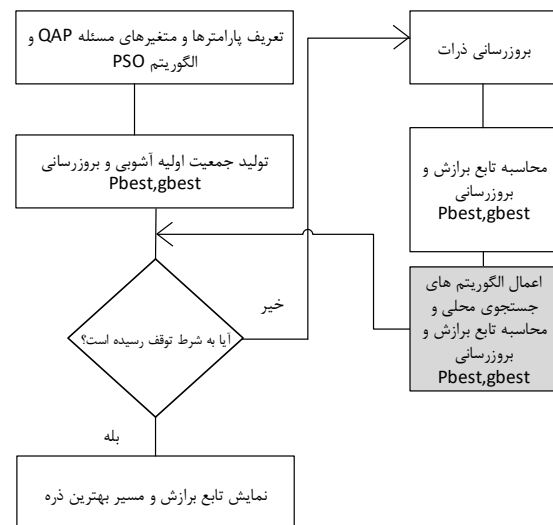
$$V_i^{t+1} = w \cdot V_i^t + cr_i \cdot (P_{best} - X_i^t) + (1 - cr_i) \cdot (G_{best} - X_i^t) \quad (4)$$

که در آن تاثیر تئوری آشوب برای بهترین موقعیت فعلی ذره روی P_{best} و برای بهترین موقعیت سراسری ذرات روی G_{best} اعمال شده است. به ازاء $nPop=150$ برای ذرات ۵۰، ۱۰۰ و ۱۵۰ برای محاسبه سرعت بعدی از تئوری آشوب استفاده شده است. برای بقیه ذرات از رابطه ۵ برای بروزرسانی سرعت استفاده شده است:

$$V_i^{t+1} = w \cdot V_i^t + L \cdot c_1 \cdot (P_{best} - X_i^t) + G \cdot c_2 \cdot (G_{best} - X_i^t) \quad (5)$$

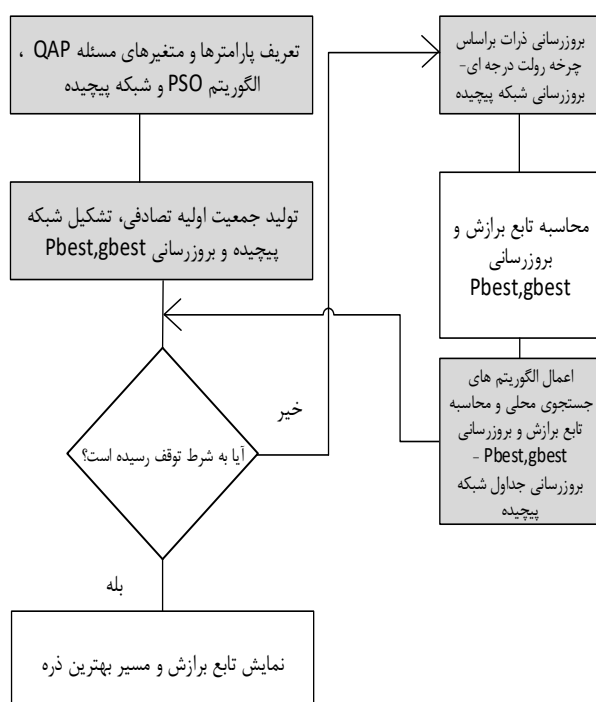
که در آن مقادیر اولیه L, G با یک مقداردهی شده است و در هر تکرار مقدار L با ضرب در 0.99 خودش بروزرسانی می‌شود.

فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به کمک جستجوی محلی برای حل مسئله تخصیص درجه دوم در شکل ۳، آورده شده است.



شکل ۲- فلوچارت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات به کمک جستجوی محلی برای حل مسئله تخصیص درجه دوم

در این روش از سه نوع مختلف جستجوی محلی مختلف جابجایی، معکوس و درجی استفاده شده است. راه‌حلی که بهترین برآزش را دارد به عنوان راه حل بروز شده ذخیره می‌شود. سپس، با راه حل اصلی در این ذره مقایسه می‌شود اگر بهبود داشت به عنوان راه حل این



شکل ۴- فلوجارت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات شبکه پیچیده‌ای بر اساس درجه ذرات هر نسل به کمک جستجوی محلی برای حل مسئله تخصیص درجه دوم

پیچیده درجه گره i یک واحد افزایش خواهد داشت چون قرار است گره i_1 به آن متصل شود. دوم این که تغییراتی در شبکه پیچیده به ترتیب زیر اعمال خواهد شد: با اضافه کردن یک واحدی به شماره راه حل ذره i_1 به عنوان راه حل جدید در جدول nPop ذخیره خواهد شد. همچنین، گره i_1 به لیست گره‌هایی که به ذره i ام متصل است اضافه می‌شود. در ادامه همه تغییرات روی ذره i ام در جدول allPop اضافه خواهد شد. تغییراتی که در محاسبه سرعت ذره i ام ایجاد خواهد شد به صورت رابطه ۶ است:

$$V_i^{t+1} = w \cdot V_i^t + L \cdot c_1 \cdot r_1 (P_{i1} - X_i^t) + G \cdot c_2 \cdot r_2 (G_{best} - X_i^t) \quad (6)$$

که در آن منظور از P_{i1} موقعیت ذره i امی باشد که از طریق چرخه رولت درجه‌ای انتخاب شده بود. مقادیر r_1 و r_2 نیز اعداد تصادفی بین صفر تا یک می‌باشد. همچنین مقادیر c_1 و c_2 به گونه‌ای تنظیم شده است که حاصل جمع آنها برابر عدد ۴ باشد. در ادامه نیز بر روی هر راه حل عملیات جستجوهای محلی جابه‌جائی، معکوس و درجی اعمال می‌شود. و در نهایت همین عملیات جستجوی محلی بر روی بهترین برازش سراسری ذرات

۲۳۰

می‌شود (۱۹، ۲۰). اطلاعات ذراتی که در جمعیت بروز می‌شوند در جدول nPop نگهداری می‌شود. جدول ۲ پارامترهای مورد استفاده در شبکه پیچیده را نشان می‌دهد. که در آن NumberSolution شماره راه حل، Position موقعیت ذره در فضای الگوریتم، Cost هزینه راه حل، Degree درجه راه حل و NumberNode شماره گره‌هایی که به راه حل NumberNode شماره i متصل می‌باشد را نشان می‌دهد.

یکی دیگر از جداولی که در شبکه پیچیده برای نگهداری اطلاعات شبکه لازم است allPop نام دارد که اندازه آن به تعداد کل راه حل‌های تولید شده در طی اجرای الگوریتم می‌باشد. پارامترهای آن نیز همانند جدول nPop می‌باشد. به منظور تشکیل شبکه پیچیده در ابتدا باید اطلاعات جدول nPop برای هر ذره تکمیل شود. در آن برای راه حل جدید یک شماره راه حل (NumberSolution) اختصاص داده می‌شود. شماره راه حل از بعلاوه یک شماره راه حل قبلی بدست می‌آید. همچنین مسیر راه حل و هزینه ذره i ام نیز به ترتیب در Position و Cost جدول nPop قرار داده می‌شود. در ابتدای کار نیز درجه راه حل جدید با یک مقداره می‌شود. هر تغییری که در راه حل i ام رخ می‌دهد در جدول allPop نیز به همان ترتیب اعمال می‌شود.

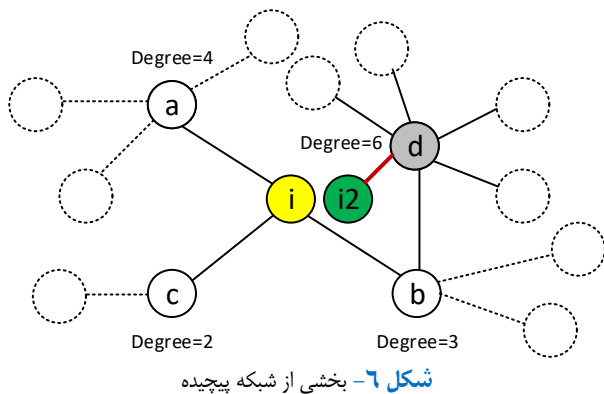
جدول ۲- پارامترهای شبکه پیچیده در جدول nPop

NumberSolution	Position	Cost	Degree	NumberNode
----------------	----------	------	--------	------------

در شکل ۴ فلوجارت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات شبکه پیچیده‌ای براساس درجات هر نسل به کمک جستجوی محلی برای حل مسئله تخصیص درجه دوم ترسیم شده است.

به منظور انتخاب راه حل‌ها از چرخه رولت درجه‌ای، استفاده شده است. آن ذره‌ای که درجه بزرگ‌تری دارد شانس انتخاب بیشتری را دارد. در واقع هم اکنون ذره i در حال پردازش می‌باشد که با چرخه رولت درجه‌ای ذره دیگری به طور مثال i_1 انتخاب می‌شود. حال دو اتفاق در شبکه پیچیده خواهد افتاد: یکی در شبکه

به منظور مقایسه و ارزیابی رویکردهای مختلف



پیشنهادی برای تخصیص منابع از دو گروه مسائل مختلف استفاده شده است. گروه اول مسائل استاندارد از کتابخانه QAPLib برای تخصیص درجه دوم می‌باشد. گروه دوم نیز حل مسئله مکان‌یابی مراکز درمانی و اورژانسی در لکه‌های جمعیتی مختلف شهر می‌باشد.

گروه اول: مسائل استاندارد کتابخانه QAPLib

در این گروه سه روش الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ممیکی مختلف مطرح‌شده برای حل مسئله تخصیص درجه دوم استفاده‌شده است. برای ارزیابی نتایج از شش مسئله مختلف کتابخانه QAPLib با تعداد مکان ۲۰ تا ۱۰۰ استفاده‌شده است. هر روش ۳۰ بار متوالی اجرا شده است. به منظور ارزیابی میزان خطای روش‌های پیشنهادی با بهترین نتیجه موجود در QAPLib معیاری بنام Gap استفاده می‌شود. نحوه محاسبه آن در رابطه (۸) نشان داده شده است:

$$Gap = \frac{ProposedSolution - BKS}{BKS} * 100 \quad (8)$$

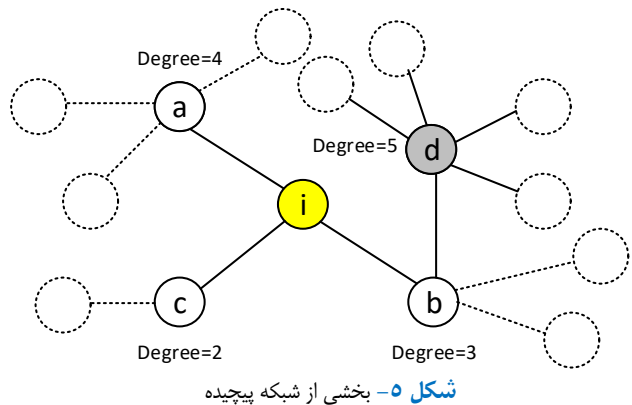
که در آن ProposedSolution میزان برآزش راه حل پیشنهادی و BKS بهترین راه حل موجود در پایگاه QAPLib می‌باشد. هرچه این مقدار به صفر میل کند نشان از نتیجه بهتر می‌باشد.

در شکل ۷ فرآیند حل مسئله Tia60 با تعداد تکرار ۱۰۰۰ نشان داده شده است. در آن روش سوم نسبت به روش اول و دوم برآزش بهتری را دارد.

گروه دوم: مکان‌یابی مراکز درمانی و اورژانسی

با در نظر گرفتن احتمال خرابی هر مرکز: برای حل مسئله کاربردی مکان‌یابی مراکز درمانی و اورژانسی در لکه‌های جمعیتی شهری تعداد لکه‌های جمعیتی،

نیز برای بهبود هزینه اعمال می‌شود. در این روش به منظور برورسانی موقعیت یک ذره مانند گره i از میان جمعیت فعلی آنکه درجه بیشتری دارد با احتمال بیشتر به عنوان گره اتصال به گره i انتخاب می‌شود. به منظور نمایش بهتر این روش شکل ۵ را در نظر بگیرید:



اگر گره های a, b, c, d گره های جمعیت فعلی باشند به دلیل اینکه گره d درجه بیشتری نسبت به بقیه گره ها دارد به احتمال زیاد به عنوان گره اتصالی به گره i انتخاب می‌شود. همچنین در رابطه بهینه‌سازی ازدحام ذرات استاندارد گره d جایگزین بهترین موقعیت فعلی می‌شود. به همین دلیل تاثیر انتخاب گره با بیشترین درجه در محاسبه موقعیت ذره i در رابطه ۷ نشان داده شده است:

$$V_i^{t+1} = w \cdot V_i^t + L \cdot c_1 \cdot r_1 (P_{allPop}(i_1) - X_i^t) + G \cdot c_2 \cdot r_2 (G_{best} - X_i^t) \quad (7)$$

که در آن منظور از $P_{allPop}(i_1)$ همان موقعیت ذره i_1 در جدول allPop می‌باشد. و i_1 نیز شماره گره‌ای است که از میان جمعیت فعلی با چرخه رولت درجه ای انتخاب شده است (در این مثال گره d). همان طور که در شکل ۶ نشان داده شده است، ذره جدیدی بنام i_2 براساس تغییر مکان ذره i ایجاد می‌شود. گره جدید i_2 به گره d که قبلاً به واسطه بیشترین درجه از میان جمعیت فعلی انتخاب شده بود، متصل می‌شود. تاثیر این عملیات در وضعیت شبکه این است که ابتدا i_2 به عنوان راه حل جدید تعریف می‌شود و درجه گره i_2 یکی اضافه می‌شود و سپس شماره گره i_1 به عنوان گره ای که به i_2 متصل است در لیست گره های متصل شده به i_2 اضافه می‌گردد.

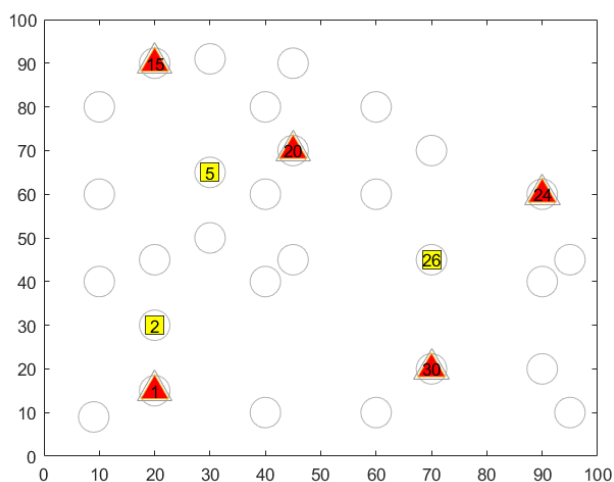
جدول ۴- هزینه های مرتبط با مراکز درمانی

شماره مرکز	۲	۵	۸	۱۲	۲۶
CapD(d)	۲۰	۳۰	۵۰	۴۰	۴۵
CapU(d)	۱۰	۱۲	۱۵	۱۰	۱۶
CDc	۱۰۰	۱۲۰	۱۵۰	۱۳۰	۱۶۰
RDC	۰.۲۵	۰.۲۰	۰.۱۸	۰.۲۲	۰.۳

جدول ۵- هزینه های مرتبط با مراکز اورژانسی

شماره مرکز	۱	۳	۷	۱۵	۲۰	۲۴	۲۸	۳۰
DEu	۵	۸	۵	۴	۵	۶	۸	۵
CUc	۸۰	۸۵	۹۰	۷۵	۶۵	۷۰	۹۵	۸۰
RUc	۰.۲۰	۰.۳۰	۰.۲۵	۰.۱۸	۰.۲۲	۰.۲۵	۰.۳۳	۰.۲۸

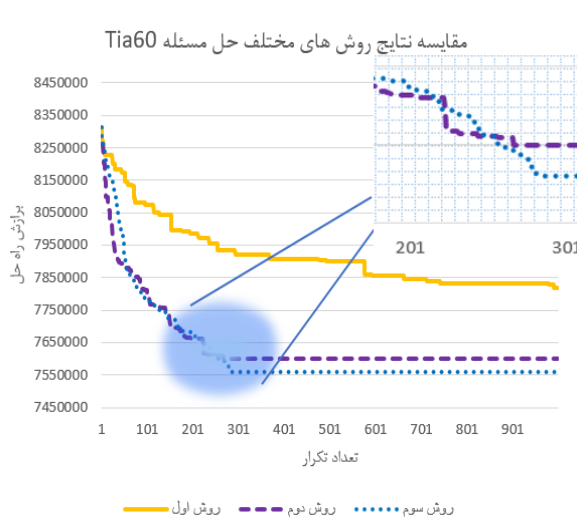
اورژانسی لکه‌های جمعیتی که به کمک سه الگوریتم محاسبه شده است، نشان داده شده است. مربع‌های زرد رنگ نشان دهنده مراکز درمانی و مثلث‌های قرمز رنگ نشان دهنده مراکز اورژانسی لکه‌های جمعیتی است. در این مسئله لکه‌های جمعیتی ۲، ۵ و ۲۶ به عنوان مراکز درمانی و ۱، ۳، ۷، ۱۵، ۲۰، ۲۴ و ۲۸ به عنوان مراکز اورژانسی انتخاب شده‌اند.



شکل ۸- مکان مراکز درمانی و اورژانسی انتخابی به کمک سه الگوریتم فراابتکاری از میان ۳۰ لکه جمعیتی

یافته‌ها

در جدول ۳ مقایسه نتایج الگوریتم PSO مختلف برای حل شش مسئله QAP آورده شده است. میانگین هزینه الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ممیکی شبکه پیچیده‌ای پیشنهادی نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی



شکل ۷- مقایسه نتایج روش های اول، دوم، سوم برای حل مسئله Tia60 با ۱۰۰۰ تکرار

مراکز درمانی و مراکز اورژانسی به ترتیب ۳۰، ۵ و ۳ نظر گرفته شده است. برای احداث مراکز درمانی لکه‌های جمعیتی ۲، ۵، ۸، ۱۲ و ۲۶ و مراکز اورژانسی لکه‌های جمعیتی ۱، ۳، ۷، ۱۵، ۲۰، ۲۴، ۲۸ به عنوان نقاط بالقوه شناسایی شدند. در مسئله پارامترهای زیر استفاده شده است:

- CapD(u): ظرفیت پذیرش بیمار در مرکز درمانی d
- CapU(d): ظرفیت پذیرش بیمار اورژانسی در مرکز درمانی d
- Mc: تعداد تخمین زده شده بیماران نیازمند به خدمات درمانی لکه جمعیتی c
- DTC, c': هزینه لازم برای مسافت موجود بین لکه جمعیتی c و لکه جمعیتی c'
- CDc: هزینه احداث مرکز درمانی در نقطه جمعیتی c
- CUc: هزینه احداث مرکز اورژانسی در نقطه جمعیتی c

DEu: میزان تقاضای تخمینی مراکز اورژانسی u
 RUC: هزینه بازسازی (راه اندازی مجدد) مرکز اورژانسی در صورتی که در لکه جمعیتی c احداث گردد.
 M: عددی دلخواه و مثبت و به اندازه کافی بزرگ
 در جدول ۴ و ۵ اطلاعات لازم برای حل مسئله آورده شده است.
 در شکل ۸ مکان‌های مناسب برای مراکز درمانی و

تبدیل شده است. به منظور ایجاد ارتباط بین ذرات از مفهوم شبکه پیچیده استفاده شده است. در روش سوم پیشنهادی علاوه بر الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات همراه با جستجوی محلی از شبکه پیچیده‌ای با سنجه درجه استفاده شده است. به منظور ارزیابی نتایج از دو گروه مسائل استفاده شده است. گروه اول برای حل مسائل مختلف از تخصیص درجه دوم از کتابخانه QAPLib استفاده شده است. گروه دوم نیز مسئله

ازدحام ممتیکی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات پایه مناسب‌تری برای حل مسئله تخصیص درجه دوم دارد. به طور نمونه، برای حل مسئله Tia60 الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات شبکه‌ای ممتیکی، الگوریتم ممتیکی و پایه به ترتیب ۴.۵۵٪، ۴.۵۹٪ و ۸.۱۵٪ درصد خطا دارند. در شکل‌های ۹ و ۱۰ و ۱۱ به ترتیب نتایج حاصل از اجرای الگوریتم‌های اول تا سوم برای مکان‌یابی مراکز

جدول ۳- مقایسه روش‌های مختلف پیشنهادی برای حل مسئله تخصیص درجه دوم

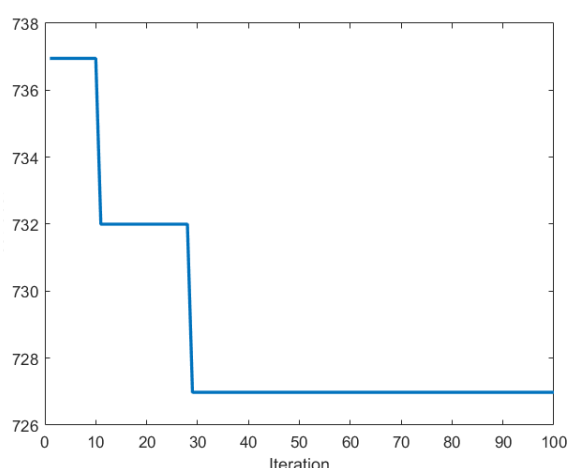
روش سوم	روش دوم	روش اول	نام روش
۷۴۳۳۰۸	۷۴۵۰۲۳	۷۴۳۳۶۲	Tia20 میانگین هزینه
۵/۶۶	۵/۹۱	۵/۶۸	Tia20 درصد خطا
۱۹۰۳۴۳۴	۱۹۰۲۳۴۵	۱۹۱۷۲۲۶	Tia30 میانگین هزینه
۴/۶۹	۴/۶۹	۵/۴۵	Tia30 درصد خطا
۵۱۶۷۴۱۹	۵۱۷۵۹۵۱	۵۳۲۵۷۷۵	Tia50 میانگین هزینه
۴/۸۱	۹/۸۶	۷/۸۴	Tia50 درصد خطا
۷۵۳۳۹۶۶	۷۵۳۶۷۰۴	۷۷۹۳۵۵۷	Tia60 میانگین هزینه
۴/۵۵	۴/۵۹	۸/۱۵	Tia60 درصد خطا
۱۴۰۴۰۰۱۴	۱۴۰۳۳۴۵۶	۱۴۶۳۲۴۰۹	Tia80 میانگین هزینه
۴/۰۱	۳/۹۶	۴/۳۹	Tia80 درصد خطا
۱۱۱۹۱۱۱۸۴۷	۱۱۲۰۱۴۵۲۴۵	۱۳۱۷۳۴۶۴۴۹	Tia100b میانگین هزینه
-۵/۶۴	-۵/۵۵	۱۱/۰۸	Tia100b درصد خطا

کاربردی مکان‌یابی مراکز درمانی و اورژانسی لکه‌های جمعیتی مختلف در شهر در نظر گرفته شده است. برای حل هر دو گروه، الگوریتم پیشنهادی بهینه‌سازی ازدحام

درمانی و اورژانسی با ۱۰۰ تکرار و اندازه جمعیت اولیه ۵۰ را نشان می‌دهد. روش الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات شبکه پیچیده درجه‌ای ممتیکی سریع‌تر از الگوریتم PSO استاندارد و PSO همراه با جستجوی محلی به مقدار بهینه رسیده است. روش سوم نسبت به روش اول و دوم برای مکان‌یابی مراکز درمانی و اورژانسی عملکرد مناسب‌تری دارد.

نتیجه‌گیری

یکی از مسائل بهینه‌سازی تخصیص منابع، مکان‌یابی مراکز درمانی و اورژانسی در لکه‌های جمعیتی شهری می‌باشد. این مسئله به کمک سه رویکرد فراابتکاری مختلف حل شده است. به منظور تخصیص مراکز درمانی و اورژانسی از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات استفاده شده است. سپس این الگوریتم به کمک جستجوی محلی پیشنهادی به یک الگوریتم ممتیک



شکل ۹- مکان‌یابی مراکز درمانی و اورژانسی به کمک الگوریتم روش اول از میان ۳۰ لکه جمعیتی

Of Single-Cell Cytometry Data-How Unsupervised Are These Analyses Really? *Cytometry A*. 2020r;97(3):219-221.

3. Licen S, Astel A, Tsakovski S. Self-organizing map algorithm for assessing spatial and temporal patterns of pollutants in environmental compartments: A review. *Sci Total Environ*. 2023;878:163084.

4. Li P, Zhao X. Self-organizing map models of language acquisition. *Front Psychol*. 2013;4:828.

5. Cai W, Zhao D, Zhang M, Xu Y, Li Z. Improved Self-Organizing Map-Based Unsupervised Learning Algorithm for Sitting Posture Recognition System. *Sensors (Basel)*. 2021;21(18):6246.

6. Rahman ATMS, Kono Y, Hosono T. Self-organizing map improves understanding on the hydrochemical processes in aquifer systems. *Sci Total Environ*. 2022;846:157281.

7. Diaz Ramos A, Lopez-Rubio E, Palomo EJ. The Forbidden Region Self-Organizing Map Neural Network. *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*. 2020;31(1):201-211.

8. Yuan S, Zhao H, Liu J, Song B. Self-organizing map based differential evolution with dynamic selection strategy for multimodal optimization problems. *Math Biosci Eng*. 2022;19(6):5968-5997.

9. Ferles C, Papanikolaou Y, Naidoo KJ. Denoising Autoencoder Self-Organizing Map (DASOM). *Neural Netw*. 2018;105:112-131.

10. Kvist T, Voutilainen A, Eneh V, Mäntynen R, Vehviläinen-Julkunen K. The self-organizing map clustered registered nurses' evaluations of their nurse leaders. *J Nurs Manag*. 2019;27(5):981-991.

11. Kim HH. A dynamic analysis of household debt using a self-organizing map. *Empir Econ*. 2022;62(6):2893-2919.

12. Kohonen T. Self-organizing neural projections. *Neural Netw*. 2006;19(6-7):723-33.

13. Creux C, Zehraoui F, Hanczar B, Tahiri F. A3SOM, abstained explainable semi-supervised neural network based on self-organizing map. *PLoS One*. 2023;18(5):e0286137.

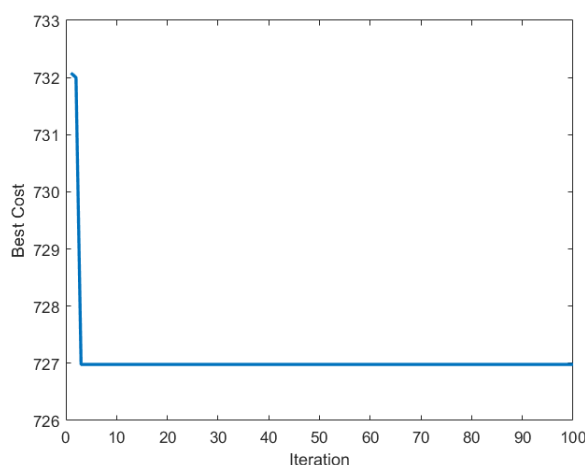
14. Ferles C, Stafylopatis A. Self-Organizing Hidden Markov Model Map (SOHMMM). *Neural Netw*. 2013;48:133-47.

15. Yao P, Zhu Q, Zhao R. Gaussian Mixture Model and Self-Organizing Map Neural-Network-Based Coverage for Target Search in Curve-Shape Area. *IEEE Trans Cybern*. 2022;52(5):3971-3983.

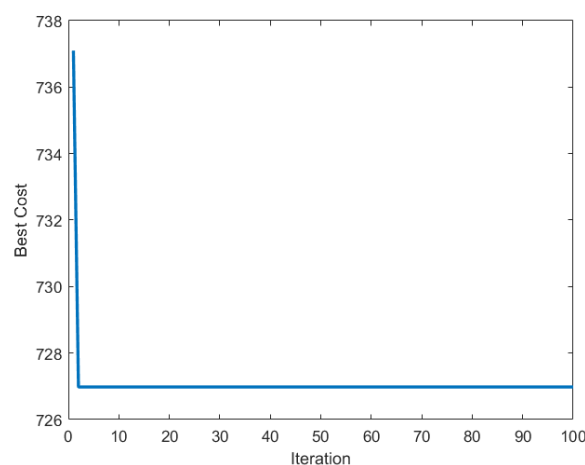
16. Kohonen T. Essentials of the self-organizing map. *Neural Netw*. 2013;37:52-65.

17. Detorakis G, Chaillet A, Rougier NP. Stability analysis of a neural field self-organizing map. *J Math Neurosci*. 2020;10(1):20.

18. Cheung YM, Law LT. Rival-model penalized self-organizing map. *IEEE Trans Neural Netw*.



شکل ۱۰- مکان یابی مراکز درمانی و اورژانسی به کمک الگوریتم روش دوم از میان ۳۰ لکه جمعیتی



شکل ۱۱- مکان یابی مراکز درمانی و اورژانسی به کمک الگوریتم روش سوم از میان ۳۰ لکه جمعیتی

ذرات شبکه پیچیده‌ای ممتیکی نسبت به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات ممتیکی و الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات پایه میانگین هزینه و درصد خطای کمتری داشته است. به منظور بهبود عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی می‌توان از سنج‌های دیگری در شبکه پیچیده استفاده کرد. یا اینکه از الگوریتم‌های جستجوی محلی دیگری مانند شبیه‌سازی تبرید، جستجوی ممنوعه استفاده نمود

References

1. Rougier NP, Detorakis GI. Randomized Self-Organizing Map. *Neural Comput*. 2021;33(8):2241-2273.
2. Pedersen CB, Olsen LR. Algorithmic Clustering

2007;18(1):289-95.

19. Abe T, Akazawa Y, Toyoda A, Niki H, Baba T. Batch-Learning Self-Organizing Map Identifies Horizontal Gene Transfer Candidates and Their Origins in Entire Genomes. *Front Microbiol.* 2020;11:1486.

20. Krämer S, Busch W, Schüttler A. A Self-Organizing Map of the Fathead Minnow Liver Transcriptome to Identify Consistent Toxicogenomic Patterns across Chemical Fingerprints. *Environ Toxicol Chem.* 2020;39(3):526-537.