

## Undesirable Facility Location under Uncertainty: Modeling and Algorithm

(Document Type: Research Paper)

**Parisima Pakravan**

MSc, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-Ali Sina  
University, Hamedan, Iran, parisima\_pakravan@yahoo.com

**Javad Behnamian\***

Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Bu-  
Ali Sina University, Hamedan, Iran, behnamian@aut.ac.ir

**Abstract:** In undesirable facility location problem contrary to desirable location, facilities are located far from service receiver facilities as much as possible. The problem of locating such facilities is discussed in this study. This research is focused on the 'not in my backyard' (NIMBY) phrase which refers to the social phenomena in which residents are opposed to locate undesirable facilities around their houses. Examples of such facilities include electric transmission lines and recycling centers. Due to the opposition typically encountered in constructing an undesirable facility, the facility planner should understand the nature of the NIMBY phenomena and consider it as a key factor in determining facility location. Because of the adverse effects of these facilities, coupled with the uncertainty in the real world, it is estimated taking into account the potential uncertainty. This problem has been considered in the discrete space. The mathematical model is presented and methods to deal with uncertainty and stochastic programming problems modeling and methods used in the study are presented. According to the NP-hard problem, Simulated Annealing suggested for solving problems in large-scale. Numerical experiments to evaluate and validate the mathematical modeling and proposed algorithm are considered and operation of the proposed algorithm to solve various problems with genetic algorithms available in the literature about the problem is compared.

**Keywords:** Undesirable Facility Location, Uncertainty, Simulated Annealing, Genetic Algorithm

**Introduction:** From a general point of view, it is possible to investigate locational issues in two categories of optimal and undesirable facilities. There are many location models available for desirable facilities such as warehouses, service centers, police stations, and more. In such instances, customers are attracted to their facilities. Unlike desirable facilities in the location of undesirable facilities, it attempts to facilities as far away as possible from receiving areas. Undesirable facilities, while providing essential services for the people, at the same time, may have negative consequences for their neighborhoods. The proximity of undesirable facilities to residential areas due to their high pollution and hazardousness, will lead to lower quality of life in these areas and increase the health risk for residents of these areas. This type of problem is formulated in order to minimize the adverse effects of a new facility on existing facilities. Given that the degree of pollution from this facility in the real world is associated with uncertainty, in this paper, the mathematical model for the problem of locating undesirable facilities with uncertainty in degree of pollution parameters is presented. Also, the history of the problem of locating facilities in stochastic conditions and undesirable facilities has been presented. In the following, considering the mathematical model in a deterministic and stochastic manner, the proposed algorithm structure is described.

**Materials and Methods:** The problem of locating the undesirable facilities discussed in this paper is based on the article that focuses on the purpose of the term (not in my backyard). This refers to social phenomena in which residents oppose the placement of undesirable facilities around their homes. Considering the opposition to the

---

\* Corresponding author

Copyright © 2019, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

creation of undesirable facilities, the facility planner must understand the nature of the NIMBY phenomena and consider it as a key factor in determining the location of the facility. In this research, the NIMBY phenomena is directly discussed through the structure of the objective function. The purpose function structure allows the residents to speak of the fact that the hosts hosting these facilities are those who are absorbing environmental costs, while other regions enjoy the benefits of this facility.

1- First, uncertainty in the degree of pollution is considered and different scenarios are considered for it and the problem will be solved.

2- According to the mathematical model presented in stochastic mode, the problem is solved for each individual scenario and finally, three scenarios are compared and the objective hope of the target function is obtained for all scenarios. We considered the scenarios based on the degree of difference between these two parameters, which are as follows: The scenario (1): The degree of main contamination (a) 100 times the marginal contamination (b) Scenario (2): both change in close proximity. Scenario (3): The degree of main contamination (a) is 10 times the marginal contamination level (b)

3- Because of the NP-hardness of the nature of the problem studied, it is proposed to solve it in large dimensions for the large-scale simulation of Simulated annealing algorithm. A Heuristic method has been used to generate the initial answer to this question. The method of transfer from a solution to its neighboring solution is characterized by a known key factor called the neighborhood structure. Here, four operators for generating neighboring solutions are used in the Simulated annealing algorithm.

**Results and Discussion:** The problem in small and medium sizes in all experimental samples of the Metaheuristic algorithm has been reached to the optimal solution of the problem Cplex solving software. Due to the fact that the Cplex software was unable to solve test samples for dimensions of 1000 node and larger than this dimension of the problem, the results of numerical tests of the problem were considered by considering 3 scenarios in each sample. Sixteen types of problem in large dimensions are solved with genetic and Simulated annealing meta-heuristic algorithms, and the stopping time of both algorithms is 1 hour. Finally, the results are compared. The genetic algorithm is written according to Sang et al. (Sang et al., 2013). Due to the fact that it was not able to produce feasible answers on large dimensions, the Heuristic method used in the Simulated annealing algorithm to generate the primary solution is also used in this algorithm. In all experimental samples, the Simulated annealing algorithm has the lowest value of the target function in comparison with the genetic algorithm.

**Conclusion:** In this paper, the problem of locating undesirable facilities with a focus on reducing the degree of pollution from these facilities was studied. Considering that in the past and also in the real world, the exact amount of this degree of pollution is uncertain, it was decided to investigate the degree of contamination resulting from this facility in the uncertainty mode. Then, by investigating the methods of dealing with uncertainty and modeling methods of random planning problems, the scenario method was used to consider the uncertainty in this problem and scenarios were designed to take into account the uncertainty in degree of pollution of the facility for the points around them. The problem was solved for various test examples in small to medium size scenarios with Cplex exact solver software and optimal solutions were obtained. Given the complex nature of this problem, a large-scale Simulated annealing algorithm was proposed to solve it in large dimensions and given that the space is large, it is used to generate an initial possible response instead of producing a random solution from an Heuristic method to produce an initial possible answer to this problem. The computational results of Optimal Optimization and Simulated annealing Algorithms in Small and Medium Dimensions were compared. Both methods achieved the optimal response and the difference was during solving these samples. For large dimensions, experimental samples were used using the Simulated annealing, and genetic algorithm available in the literature were compared and the efficiency of Simulated annealing algorithm in convergence to optimal solution and less time to solve in different samples and scenarios has been proved.

## References

- Song, B. D. Morrison, J. R. Ko, Y. D. (2013). Efficient location and allocation strategies for undesirable facilities considering their fundamental properties. *Comput. Ind. Eng.*, 65: 475–484.
- Mirhasani, S. A. (2014). *Stochastic Programming*. First Edition. Amir Kabir University Publishers.

مدیریت تولید و عملیات، دوره ۱۰، پیاپی ۱۸، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۸

دریافت: ۱۳۹۵/۱۱/۰۶ پذیرش: ۱۳۹۷/۰۹/۱۰

صص: ۱-۲۳ (نوع مقاله: پژوهشی)

## مسئله مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب در شرایط عدم قطعیت:

### مدل‌سازی و الگوریتم حل

پری‌سیما پاکروان<sup>۱</sup>، جواد بهنامیان<sup>۲\*</sup>

۱- کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، parisima\_pakravan@yahoo.com

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی، گروه مهندسی صنایع، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران، behnamian@aut.ac.ir

**چکیده:** در مسئله مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب برخلاف تسهیلات مطلوب، تا حد امکان سعی می‌شود تسهیلات دور از مناطق دریافت‌کننده خدمت استقرار یابند. در این پژوهش درباره مسئله مکان‌یابی این قبیل تسهیلات بحث شده است. در این مسائل بر اصطلاح «نه در حیط خلوت من»، تمرکز و به پدیده‌های اجتماعی اشاره دارد. در این پدیده ساکنان با مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب اطراف خانه‌هایشان مخالف‌اند. نمونه‌هایی از این تسهیلات شامل خطوط انتقال برق و مراکز بازیافت است. به دلیل اینکه درجه آلودگی حاصل از این تسهیلات با عدم قطعیت همراه است، در این پژوهش برای نخستین بار عملکرد این مسئله با در نظر گرفتن عدم قطعیت احتمالی ارزیابی شده است. این مسئله در فضای گسسته در نظر گرفته شده است. در این مسئله سه حالت ممکن برای دامنه تغییرات این دو پارامتر در نظر گرفته شده است. باتوجه به اینکه ارتباط و میزان اختلاف درجه آلودگی اصلی و حاشیه‌ای نیز نامشخص است، سناریوها براساس درجه اختلاف این دو پارامتر در نظر گرفته شده‌اند. با در نظر گرفتن این سناریوها، اهمیت درجه اختلاف این دو پارامتر در مسئله مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب بررسی شده است. در این پژوهش مدل ریاضی مسئله، روش‌های مواجهه با عدم قطعیت، مدل‌سازی مسائل برنامه‌ریزی تصادفی و روش استفاده شده در مسئله در حال مطالعه ارائه شده است. باتوجه به NP-hard بودن مسئله، الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید برای حل مسئله در ابعاد بزرگ پیشنهاد شده است. آزمایشات عددی برای ارزیابی و اعتبارسنجی مدل ریاضی و الگوریتم پیشنهادی در نظر گرفته شده است و عملکرد الگوریتم پیشنهادی در حل مسائل مختلف با الگوریتم ژنتیک موجود در ادبیات مسئله در حال مطالعه، مقایسه و برتری آن ارائه شده است.

**واژه‌های کلیدی:** مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب، عدم قطعیت، شبیه‌سازی تبرید، الگوریتم ژنتیک

## مقدمه

از دیدگاهی کلی مسائل مکان‌یابی در دو دسته مکان‌یابی تسهیلات مطلوب و تسهیلات نامطلوب بررسی می‌شوند. مدل‌های مکان‌یابی بسیاری برای تسهیلات مطلوب همچون انبارها، مراکز خدماتی، مراکز پلیس و ... وجود دارند. در این نمونه‌ها، تسهیلات مشتریان را به‌سوی خود جذب می‌کنند. با در نظر گرفتن وجود رابطه مستقیم بین مسافت طی شده و هزینه‌های سفر در این دسته مسائل، معمولاً مهم‌ترین هدف آن است که تسهیلات به‌نحوی مکان‌یابی شوند که توابعی از مسافت یا به‌طور معادل هزینه‌های سرویس‌دهی برای تسهیلات حداقل شوند؛ درحالی‌که در مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب برخلاف تسهیلات مطلوب، سعی می‌شود تا حد امکان، تسهیلات دور از مناطق دریافت‌کننده خدمت استقرار یابند. ارائه تسهیلات نامطلوب در عین حال که جزء خدمات ضروری برای مردم است، ممکن است پیامدهای منفی برای مکان‌های همسایگی آنها داشته باشد؛ بنابراین ساختن یا گسترش چنین تسهیلاتی با مخالفت شدید ساکنان این مناطق مواجه می‌شود (تقوی فرد و همکاران، ۱۳۸۶) این مخالفت معمولاً با اصطلاح (نه در حیات خلوت من (NIMBY)) بیان می‌شود؛ بنابراین هنگام ایجاد تسهیل نامطلوب، تصمیم‌گیرندگان ممکن است با مخالفت شدید ساکنان همسایه خود مواجه شوند. راکتورهای هسته‌ای، صنایع نظامی و کارخانجات شیمیایی مثال‌هایی از این دسته‌اند. نزدیک‌بودن تسهیلات نامطلوب به مناطق مسکونی به دلیل آلاینده‌های زیاد و خطرناک‌بودن آنها، موجب پایین‌آمدن کیفیت زندگی در این مناطق و افزایش خطر سلامتی برای ساکنان این مناطق می‌شود (سانگ و همکاران<sup>۲</sup>، ۲۰۱۳)؛ برای اینکه اثرات نامطلوب تسهیل جدید روی امکانات موجود حداقل شود این نوع از مسئله فرموله می‌شود. باتوجه‌به اینکه درجه آلودگی حاصل از این تسهیلات در دنیای واقعی همراه با عدم قطعیت است (میرحسینی، ۱۳۹۳)، در این مقاله مدلی ریاضی برای مسئله مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب همراه با عدم قطعیت در پارامترهای درجه آلودگی ارائه شده است.

در ادامه، پیشینه مسئله مکان‌یابی تسهیلات در شرایط تصادفی و تسهیلات نامطلوب آورده شده است. در بخش دوم مدل ریاضی در حالت قطعی و تصادفی ارائه می‌شود. در ادامه ساختار الگوریتم پیشنهادی تشریح شده است. در بخش سوم نتایج عددی حل مدل ریاضی در نرم‌افزار سیپلکس و الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید با در نظر گرفتن سناریوهای مختلف آمده است. در نهایت نتیجه‌گیری از کاربرد این روش در حل مسئله و پژوهش‌های آتی آمده است.

## پیشینه موضوع

مرور کوتاهی بر ادبیات مکان‌یابی تسهیلات در شرایط تصادفی و مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب، زمینه لازم برای ورود به بحث نظری درباره آن را فراهم می‌کند؛ از این‌رو برخی جنبه‌های مهم و مرتبط با موضوع در بخش‌های بعدی ارائه می‌شوند.

## مکان‌یابی تسهیلات در شرایط تصادفی

عوامل بسیاری در مکان‌یابی تسهیلات مؤثرند که متغیر و نامشخص‌اند؛ مانند هزینه‌ها، تقاضاها، زمان سفر و دیگر ورودی‌ها. این عوامل باعث می‌شوند مدل‌هایی توسعه یابد که شرایط عدم قطعیت در آنها در نظر گرفته شود و

عدم قطعیت برای بسیاری از پژوهشگران برای بهینه‌سازی استوار و تصادفی اولویت زیادی داشته باشد؛ درواقع تعداد زیادی از این روش‌ها که برای بهینه‌سازی در شرایط عدم قطعیت است برای مسائل مکان‌یابی تسهیلات به کار رفته است. بسیاری از پارامترها در مسائلی مانند هزینه، تقاضا و فاصله به‌طور گسترده‌ای نوسان دارند. همچنین ممکن است برآورد پارامترها به‌دلیل خطاهای اندازه‌گیری ضعیف و یا گاهی به‌دلیل فرایند مدل‌سازی مانند جمع‌آوری داده‌های مربوط به تقاضا و انتخاب قاعده فاصله با خطا مواجه می‌شود؛ به همین دلیل پژوهشگران درحال توسعه مدل‌ها برای مکان‌یابی تسهیلات در شرایط عدم قطعیت بوده‌اند (اسنیدر<sup>۳</sup>، ۲۰۰۶). با توجه به بررسی کارهای انجام‌شده در گذشته (در جدول ۱ مجموعه آنها قرار داده شده است) مسئله مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب در شرایط عدم قطعیت احتمالی نخستین‌بار در این پژوهش مطالعه شده است. در مطالعات بررسی‌شده، همه مقالات از الگوریتم‌های ابتکاری برای حل این مسئله استفاده کرده‌اند و تنها یک مقاله، الگوریتم فراابتکاری را در حل این مسئله به کار گرفته است. در این پژوهش نیز به‌دلیل ناتوان بودن نرم‌افزار حل دقیق CPLEX برای حل این مسئله در ابعاد بزرگ، از الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید<sup>۴</sup> با استفاده از نرم‌افزار متلب در ابعاد بزرگ استفاده می‌شود. در جدول (۱) جمع‌بندی از کارهای انجام‌شده در مکان‌یابی تسهیلات تصادفی آورده شده است.

جدول ۱- مجموعه کارهای انجام‌شده در مکان‌یابی تسهیلات تصادفی

| نویسنده                                    | مسئله استفاده‌شده                     | روش حل                                 | رویکرد مدل‌سازی عدم قطعیت                              |
|--------------------------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------|--------------------------------------------------------|
| (میرچاندانی و اودنی <sup>۵</sup> ، ۱۹۷۹)   | PMP                                   | روش سناریو                             | برنامه‌ریزی سناریو                                     |
| (لوویاکس و تیسه <sup>۶</sup> ، ۱۹۸۵)       | تابع مطلوبیت خطی                      | برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای          | دومرحله‌ای                                             |
| (کوپر <sup>۷</sup> ، ۱۹۷۴)                 | مسئله ویر                             | یک الگوریتم تکرارشونده                 | تابع هدف محدب، توزیع نرمال<br>دومتغیره برای نقاط تقاضا |
| (شیپارد <sup>۸</sup> ، ۱۹۷۴)               | مکان‌یابی تسهیلات                     | روش سناریو                             | برنامه‌ریزی سناریو                                     |
| (میرچاندانی و واودجیت <sup>۹</sup> ، ۱۹۸۰) | مسئله PMP                             | الگوریتم براساس شمارش<br>جزیی          | برنامه‌ریزی سناریو                                     |
| (ویور و چورچ <sup>۱۰</sup> ، ۱۹۸۳)         | مسئله PMP تصادفی                      | روش آزادسازی لاگرانژ                   | برنامه‌ریزی سناریو                                     |
| (راوی و سینها <sup>۱۱</sup> ، ۲۰۰۴)        | UFLP تصادفی                           | الگوریتم تقریبی <sup>۱۱</sup>          | دو مرحله‌ای                                            |
| (برمن و اودنی <sup>۱۳</sup> ، ۱۹۸۲)        | مکان‌یابی تک‌تسهیلاته                 | روش سناریو                             | برنامه‌ریزی سناریو                                     |
| (کومار و همکاران <sup>۱۴</sup> ، ۲۰۱۲)     | مکان‌یابی تسهیلات<br>ظرفیت‌دار        | روش ابتکاری                            | مدل‌سازی با قیود احتمالی                               |
| (روسا و همکاران <sup>۱۵</sup> ، ۲۰۱۴)      | مکان‌یابی تسهیل ظرفیت‌دار             | ارائه مدل بهینه‌سازی استوار            | برنامه‌ریزی سناریو                                     |
| (جمالیان و صلاحی، ۲۰۱۴)                    | مسئله مکان‌یابی ویر                   | -                                      | بررسی مدل با پارامترهای غیرقطعی                        |
| (گولپمار و همکاران <sup>۱۶</sup> ، ۲۰۱۳)   | مسئله مکان‌یابی تصادفی                | حل مدل با در نظر گرفتن<br>محدودیت شانس | برنامه‌ریزی غیرخطی با محدودیت<br>احتمالی               |
| (هو و همکاران <sup>۱۷</sup> ، ۲۰۱۷)        | مسئله مکان‌یابی دوهدفه<br>دومرحله‌ای  | روش ابتکاری                            | برنامه‌ریزی دومرحله‌ای                                 |
| (مارکویک و همکاران <sup>۱۸</sup> ، ۲۰۱۷)   | مسئله مکان‌یابی تصادفی<br>چندمرحله‌ای | روش ابتکاری لاگرانژ                    | تصادفی چندمرحله‌ای                                     |
| (پوگا و همکاران <sup>۱۹</sup> ، ۲۰۱۷)      | مسئله مکان‌یابی - موجودی              | الگوریتم ابتکاری                       | مدل پیوسته غیرخطی با تقاضای<br>غیرقطعی                 |

## مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب

(ارکات و نیومان<sup>۲۰</sup>، ۱۹۸۹) بیان کردند که بسیاری از مدل‌های مکان‌یابی تنها فاصله به تسهیلات جدید را حداقل می‌کنند و معمولاً برای تسهیلات خدمت‌دهی مدل مناسبی است؛ اما هنگامی که کسی می‌خواهد تسهیل مضر را مکان‌یابی کند (مانند محلی برای انباشتن زباله‌ها یا ایجاد کارخانه شیمیایی یا نیروگاه هسته‌ای) ممکن است تابع هدف حداقل کردن فاصله‌ها مناسب نباشد. به‌طور طبیعی این مسائل چندهدفه‌اند؛ برای مثال علاوه بر حداکثر کردن فاصله وزنی - تقاضا، بین نقاط تقاضا و نزدیک‌ترین نقطه عرضه، ممکن است هدف حداکثر کردن کمترین فاصله وزنی - تقاضا بین نقاط تقاضا و نزدیک‌ترین نقطه عرضه باشد. همان‌طور که واضح است مناطق شهری و پرجمعیت، زباله و ضایعات بیشتری تولید می‌کنند؛ بنابراین برای کاهش هزینه‌های حمل و نقل باید تسهیلات نامطلوب تا حد امکان به این مناطق نزدیک باشند و این موضوع با تابع هدف اولیه در تضاد است (دوربودن تسهیلات نامطلوب از مناطق پرجمعیت). همچنین مسیریابی در مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب موضوع مهمی است؛ زیرا مواد مضر معمولاً مسیری غیر از کوتاه‌ترین فاصله یا کمترین هزینه را طی می‌کنند تا از مواجهه با مراکز پرجمعیت خودداری شود (داسکین<sup>۲۱</sup>، ۱۹۹۷). در جدول (۲) خلاصه‌ای از ادبیات مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب آمده است.

جدول ۲- جایگاه پژوهش موجود

| نویسنده                                      | نوع تابع هدف | روش حل                                      | فازی | احتمالی | چندهدفه | توضیحات       |
|----------------------------------------------|--------------|---------------------------------------------|------|---------|---------|---------------|
| (ملاچرینودیس <sup>۲۲</sup> ، ۱۹۸۵)           | غیرخطی       | روش هندسی / کوهن تاکر                       | -    | -       |         | فضای پیوسته   |
| (ملاچرینودیس و کولینین <sup>۲۳</sup> ، ۱۹۸۵) | غیرخطی       | الگوریتم ابتکاری                            | -    | -       |         | -             |
| (ملاچرینودیس و کولینین، ۱۹۸۶)                | غیرخطی       | ارائه دو الگوریتم ابتکاری                   | -    | -       |         | فضای پیوسته   |
| (ارکت و نیومن، ۱۹۸۹)                         | خطی          | روش حل ترکیبی                               | -    | -       |         | -             |
| (پلاستریا <sup>۲۴</sup> ، ۱۹۹۶)              | خطی          | -                                           | -    | -       |         | فضای پیوسته   |
| (فاربر <sup>۲۵</sup> ، ۱۹۹۸)                 |              | نظریه - مدل ریاضی ارائه نداد                | -    | -       |         | اثرات جانبی   |
| (بریمبرگ و جویل <sup>۲۶</sup> ، ۱۹۹۸)        | غیرخطی       | الگوریتم ابتکاری                            | -    | -       |         | دومعباره      |
| (پلاستریا و کاریزوسا <sup>۲۷</sup> ، ۱۹۹۹)   | خطی          | الگوریتم در زمان چندجمله‌ای                 |      |         |         | فضای پیوسته   |
| (فرناندز و همکاران <sup>۲۸</sup> ، ۲۰۰۰)     | غیرخطی       | شاخه و کران/ آنالیز فاصله‌ای                | -    | -       |         | فضای پیوسته   |
| (ملاچرینودیس و زاهاریس <sup>۲۹</sup> ، ۲۰۰۳) | غیرخطی       | الگوریتم ابتکاری                            | -    | -       | ✓       | دومعباره      |
| (راکاس و همکاران <sup>۳۰</sup> ، ۲۰۰۴)       | خطی          | نرم‌افزار سیپلکس                            | ✓    |         | ✓       | گسسته         |
| (کلبروک و همکاران <sup>۳۱</sup> ، ۲۰۰۵)      | غیرخطی       | الگوریتم چندجمله‌ای                         | -    | -       |         | فضای پیوسته   |
| (ردریگوز و همکاران <sup>۳۲</sup> ، ۲۰۰۶)     | خطی          | الگوریتم در زمان چندجمله‌ای                 | -    | -       |         | فضای پیوسته   |
| (کلبروک و سیکیلیا <sup>۳۳</sup> ، ۲۰۰۷)      | غیرخطی       | الگوریتم چندجمله‌ای                         | -    | -       |         | فضای پیوسته   |
| (توزکایا و همکاران <sup>۳۴</sup> ، ۲۰۰۸)     |              | ANP                                         | -    | -       |         | -             |
| (یاماگوچی <sup>۳۵</sup> ، ۲۰۱۱)              |              | رویکرد چانه‌زنی                             | -    | -       |         | -             |
| (سانگ و همکاران، ۲۰۱۳)                       | خطی          | الگوریتم ژنتیک                              | -    | -       |         | محدودیت ظرفیت |
| (تانگ و همکاران <sup>۳۶</sup> ، ۲۰۱۳)        | -            | MCDM                                        | -    | -       | ✓       | چندمعیاره     |
| (آبسته و همکاران <sup>۳۷</sup> ، ۲۰۱۴)       |              | مجموعه رویکرد مبتنی بر تسلط                 | -    | -       |         | -             |
| (ویچاپا و همکاران <sup>۳۸</sup> ، ۲۰۱۷)      | خطی          | روش سلسله مراتبی تحلیلی فازی                | ✓    |         | ✓       | فضای گسسته    |
| پژوهش جاری                                   | خطی          | حل مدل در CPLEX و ارائه الگوریتم فراابتکاری |      | ✓       |         | فضای گسسته    |

## بیان مسئله و مدل‌سازی

مسئله مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب بحث‌شده در این پژوهش باتوجه‌به مقاله‌ای است که محوریت هدف را اصطلاح «نه در حیاط خلوت من» قرار داده است. این موضوع اشاره به پدیده‌های اجتماعی دارد که در آن ساکنان با مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب اطراف خانه‌هایشان مخالف‌اند. مثال‌هایی از این تسهیلات شامل خطوط انتقال برق، مراکز بازیافت، پتروشیمی، سطل زباله و کوره‌اند که به‌طور معمول ساخت این تأسیسات نامطلوب با مخالفت مواجه می‌شوند. باتوجه‌به مخالفتی که در ساختن تسهیلات نامطلوب وجود دارد برنامه‌ریز تسهیلات باید ماهیت پدیده NIMBY را درک کند و آن را عاملی کلیدی در تعیین محل تسهیلات در نظر بگیرد؛ سپس ویژگی‌های پدیده NIMBY را بررسی و مدل بهینه‌سازی ریاضی را با هدف به حداقل رساندن مجموع درجات پدیده پیشنهاد کند. درجه پدیده NIMBY برای ساکنان میزبان تسهیلات به‌خاطر جذب مستقیم اثرات منفی برای هر فرد افزایش می‌یابد. با این حال اگر تسهیلات نامطلوب در هر مکان قرار گیرد و تنها تقاضای منطقه خود را پوشش دهند، درجه پدیده NIMBY در محل داده‌شده به نسبت کمتر می‌شود.

در این پژوهش، مدل ریاضی بهینه‌سازی تک‌معیاره برای مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات نامطلوب مطرح شده است. پدیده NIMBY به‌طور مستقیم از طریق ساختار تابع هدف مطرح شده است. ساختار تابع هدف این اجازه را می‌دهد تا از این حقیقت سخن گفته شود که ساکنان میزبان این تسهیلات کسانی‌اند که هزینه‌های زیست‌محیطی را جذب می‌کنند؛ درحالی‌که سایر مناطق از مزایای این تسهیلات لذت می‌برند. درجه پدیده NIMBY برای ساکنان میزبان این تسهیلات، به دلیل جذب اثرات منفی به‌طور مستقیم زیاد است. هزینه پدیده NIMBY برای یک تسهیل تابعی از تعداد کل گره‌هایی است که به وسیله تسهیل نامطلوب پوشش داده شده است. با استفاده از این بینش اولیه، مدل‌های ریاضی به صورت توابع خطی، محدب و مقعر برای نشان دادن هزینه پدیده NIMBY گسترش داده شده است. در این پژوهش از تابع هدف خطی استفاده شده است. باتوجه‌به اینکه میزان درجه آلودگی تسهیلات نامطلوب در دنیای واقعی به‌طور قطعی تعیین‌شدنی نیست و در مقالات گذشته و در واقعیت، اطلاعاتی در ارتباط با میزان این درجه آلودگی وجود نداشت، تصمیم گرفته شد تا عدم قطعیت در میزان درجه آلودگی این تسهیلات اعمال شود (سانگ و همکاران، ۲۰۱۳)؛ برای مثال شهری در نظر گرفته شده است و قرار است برای خانه‌های موجود (گره‌های تقاضا) در آن در فواصل مناسبی به تعداد بهینه سطل زباله (تسهیلات نامطلوب) قرار داده شوند؛ به گونه‌ای که میزان درجه آلودگی حاصل از این سطل زباله‌ها برای همسایه‌های این تسهیلات در کمترین حالت ممکن باشد. در شکل (۱) تصویری برای نمایش این مسئله آورده شده است و مکان‌های تسهیلات نامطلوب (در این نمونه سطل زباله فرض شده است) و پوشش‌دهی نقاط با این سطل زباله‌ها در شکل نشان داده شده است.

## مفروضات مسئله

در شروع برنامه‌ریزی برای حل مسئله، مفروضات این مسئله به شرح زیر است:

- ۱- هیچ گونه تسهیلات نامطلوبی وجود ندارد و باید تازه ساخته شوند.
- ۲- گره‌های تقاضا (برای مثال در یک شهر گره‌های تقاضا خانه‌ها هستند) وجود دارند. هر گره تقاضا مقدار تقاضای خود و اطلاعات محلی دوبعدی خود را دارد.

۳- تمام گره‌های تقاضا برای مکان تسهیلات نامطلوب کاندید هستند.

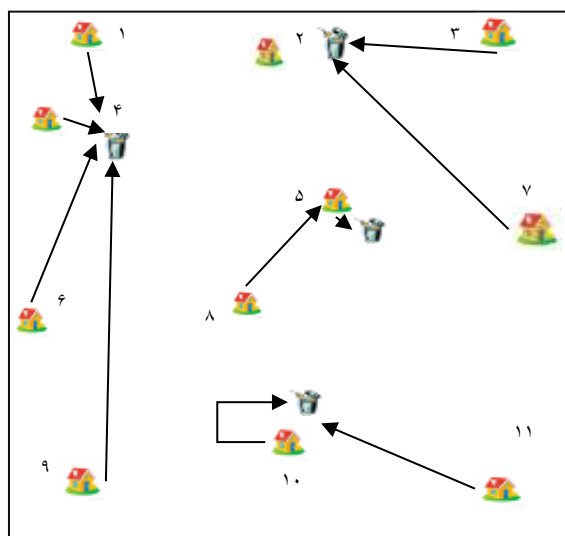
۴- هر گره تقاضا می‌تواند یک تسهیل نامطلوب باشد.

۵- حداکثر تعداد تسهیلات داده‌شده کمتر از تعداد کل گره‌های کاندید است.

۶- تسهیلات واقع در یک گره، همه تقاضا برای آن گره را پوشش می‌دهند.

۷- برای هر گره تقاضا که به‌عنوان مکان برای تسهیل نامطلوب انتخاب می‌شود، یک درجه آلودگی اصلی برای پوشش‌دهی تقاضای خودش و یک درجه آلودگی حاشیه‌ای برای پوشش‌دهی گره اضافی با این تسهیل نامطلوب در نظر گرفته شده است (سانگ و همکاران، ۲۰۱۳).

نمادگذاری استفاده‌شده در مدل ریاضی به‌صورت جدول (۳) است.



شکل ۱- نمایش مسئله

جدول ۳- معرفی نمادها، متغیرها و پارامترهای به‌کاررفته در مسئله

| نمادها، پارامترها و متغیرها | تعریف                                                                                                                   |
|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $i, j$                      | شاخص گره‌های تقاضا                                                                                                      |
| $J$                         | تعداد کل گره‌های تقاضا                                                                                                  |
| $d_{ij}$                    | فاصله اقلیدسی بین گره $i$ و $j$                                                                                         |
| $a_j$                       | درجه آلودگی اصلی از پدیده NIMBY در گره $j$ هنگامی که تسهیل مکان داده‌شده در گره $j$ تنها تقاضای گره $j$ را پوشش می‌دهد. |
| $b_j$                       | درجه آلودگی حاشیه‌ای از روند خطی پدیده NIMBY در گره $j$ هنگامی که گره اضافی با تسهیل نامطلوب واقع در $j$ پوشش داده شود. |
| $R$                         | محدودیت حداکثر فاصله خدمت تسهیل نامطلوب (یکسان برای تمام تسهیلات)                                                       |
| $K$                         | حداکثر تعداد تسهیلات نامطلوب که می‌تواند تأسیس شود.                                                                     |
| $y_j$                       | متغیر صفر و یک نشان‌دهنده تسهیل نامطلوب است که در گره $j$ قرار دارد.                                                    |
| $x_{ij}$                    | متغیر صفر و یک نشان‌دهنده گره $i$ تخصیص داده‌شده به تسهیل در گره $j$ است.                                               |
| $M$                         | عدد غیرمنفی و بزرگ                                                                                                      |

## مدل ریاضی مسئله در شرایط قطعی

مدلی که برای موضوع مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب در این مقاله استفاده شده است براساس مدل زیر است (سانگ و همکاران، ۲۰۱۳).

$$\min z = \sum_{j=1}^J \left( a_j y_j + b_j \left( \sum_{i=1}^J x_{ij} - y_j \right) \right) \quad (1)$$

$$s. t: \sum_{j=1}^J d_{ij} x_{ij} \leq R \quad \forall i \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^J x_{ij} = 1 \quad \forall i \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^J x_{ij} \leq M y_j \quad \forall j \quad (4)$$

$$x_{jj} = y_j \quad \forall j \quad (5)$$

$$\sum_{j=1}^J y_j \leq K \quad (6)$$

$$x_{ij}, y_j \in \{0, 1\} \quad \forall i, j \quad (7)$$

(۱): تابع هدف شامل دو بخش است، بخش نخست مربوط به درجه آلودگی اصلی حاصل از تأسیس تسهیل نامطلوب است و بخش دوم مربوط به درجه آلودگی حاشیه‌ای حاصل از پوشش‌دهی گره اضافی با تسهیل نامطلوب است. درجه‌های آلودگی تابعی از تعداد گره‌های موجود هستند. (۲): حداکثر محدودیت شعاع خدمات را اعمال می‌کند. (۳): هر گره  $i$  تنها می‌تواند به یک تسهیل  $j$  تخصیص داده شود. (۴): هر گره  $i$  در صورتی می‌تواند به یک تسهیل در گره  $j$  تخصیص داده شود که چنین تسهیلی وجود داشته باشد. (۵): این محدودیت مستلزم آن است که اگر یک تسهیل در گره  $j$  اختصاص یافته باشد، گره  $j$  از خودش خدمت می‌گیرد. (۶): حداکثر تعداد تسهیلات نامطلوب که می‌تواند استقرار یابد. (۷): همه متغیرهای تصمیم تخصیص و مکان‌یابی به متغیرهای باینری محدود می‌شوند (سانگ و همکاران، ۲۰۱۳).

ماهیت درجه آلودگی: بیوگاز تولیدی محل‌های دفن زباله شهری دارای اجزای آلی و درصد بالایی از گاز متان فرار هستند که باعث آسیب به لایه ازن می‌شوند. گازهای محل دفن از انجام مجموعه‌ای از واکنش‌های زیست شیمیایی روی مواد آلی تجزیه‌پذیر موجود در زباله در شرایط بی‌هوازی به دست می‌آید. این گازها شامل متان، دی اکسید کربن و گازهای هیدروژن، هیدروژن سولفاید، ترکیبات آلی فرار و غیره است. متان ۶۰-۵۰ درصد کل گاز محل دفن زباله را تشکیل می‌دهد که در اثر تجزیه بی‌هوازی پسماند تولید می‌شود. ۵۰-۴۰ درصد بقیه را عمدتاً دی اکسید کربن و جزء اندکی را گازهای دیگر از جمله سولفید هیدروژن تشکیل می‌دهند. ترکیبات آلی فرار گازهای محل دفن دارای اثرات سوئی بر سلامتی انسان‌ها هستند. این ترکیبات برای سلامتی انسان مضر است و بر مناطقی که در نزدیکی یا در محل‌های دفن ساخته شده‌اند و یا برای مناطق مسکونی با فاصله کمتر از ۱۰۰ متری آن، اهمیت

دارند. مدل ریاضی استفاده شده در این پژوهش برای یافتن مکان‌های بهینه سطل‌های زباله است. درجه آلودگی که در تابع هدف این مدل ریاضی در نظر گرفته شده است نشان‌دهنده میزان گازهای متصاعد شده از زباله‌ها است که به صورت برداری شامل بازه‌ای از اعداد تصادفی تعریف می‌شوند. هر مکانی که به عنوان قرارگرفتن تسهیل نامطلوب انتخاب شود به ازای گره‌های اضافی که زیر پوشش خود قرار دهد شامل درجه آلودگی حاشیه‌ای می‌شود که در نهایت در مکانی که تسهیل نامطلوب قرار گرفته است آلودگی بیشتری ایجاد می‌شود.

### مدل‌سازی در شرایط عدم قطعیت

باتوجه به ساختار مسئله مطالعه شده در این پژوهش، اگر مدل به مدل قطعی تبدیل شود و مقدار درجه آلودگی که در این مسئله پارامتری تصادفی در نظر گرفته شده است، با بهترین مقدار آن جایگزین و مدل ریاضی ارائه شده با درجه آلودگی کم حل شود، در این صورت مسئله به جواب خوشبینانه‌ای می‌رسد که در واقع دیدگاه مناسبی را برای مکان بهینه تسهیلات نامطلوب برای تصمیم‌گیرنده فراهم نمی‌کند (میرحسینی، ۱۳۹۳). همچنین در نظر گرفتن بدترین حالت یا مقدار میانگین نیز تصمیم‌گیرنده را به بدترین حالت یا مقدار تعادلی هدایت می‌کند. در این صورت نیز ممکن است مکان‌های مناسبی برای تسهیلات نامطلوب انتخاب نشود. باتوجه به اینکه در مسئله مطالعه شده در این پژوهش، تغییرات دو پارامتر به طور هم‌زمان باید بررسی شوند و در روش تحلیل حساسیت اثر تغییر یک پارامتر وقتی بررسی می‌شود که سایر پارامترها ثابت فرض شده‌اند، این روش نیز در این مسئله کارا نیست. به دلیل برتری روش سناریو بر سایر روش‌های مواجهه با عدم قطعیت، همچنین ساختار گسسته در مسئله مطالعه شده در این پژوهش، برای در نظر گرفتن مسئله در حالت تصادفی، بهتر است از روش سناریو استفاده شود؛ به این دلیل که می‌توان تغییرات دو پارامتر درجه آلودگی اصلی و حاشیه‌ای را هم‌زمان بررسی کرد. همچنین از بین تعداد حالات زیادی که می‌توان برای میزان تغییرات این دو پارامتر در این مسئله در نظر گرفت، چند حالت مختلف از این دو پارامتر انتخاب می‌شود که در گذشته بیشتر استفاده شده است یا از طریق تجربه این نتیجه حاصل شده است که این حالات کاربرد بیشتری در این مسئله دارد. سپس مدل در حالت‌های مختلف پارامترها حل و نتایج حاصل از سناریوها تجزیه و تحلیل می‌شود.

در اینجا عدم قطعیت در میزان درجه آلودگی و سناریوهای مختلف برای آن در نظر گرفته است و مسئله حل می‌شود. به دلیل گسسته بودن سناریوها و یک مرحله‌ای بودن، این مسئله برنامه‌ریزی تصادفی در نظر گرفتن هم‌زمان سناریوها و حل جداگانه آنها تفاوتی در شرایط حل مسئله و جواب آن وجود ندارد و حل مدل گسترده در این حالت، تنها باعث افزایش زمان حل مسئله می‌شود. به این منظور از روش صبر و مشاهده برای مدل‌سازی این مسئله در حالت تصادفی استفاده می‌شود. این مسئله  $S$  بار، هر دفعه برای یک سناریو حل شده است. در ادامه جواب‌های به دست آمده حاصل از سناریوها مقایسه شده و در نهایت امید ریاضی جواب سناریوها به دست آمده است. باتوجه به توضیحات ارائه شده تغییرات زیر در تابع هدف مدل ارائه شده به وجود آمده است.

$$\min z = \sum_{j=1}^J \left( a_j^s y_j^s + b_j^s \left( \sum_{i=1}^J x_{ij}^s - y_j^s \right) \right) \quad (8)$$

تابع هدف شامل دو بخش است. بخش نخست مربوط به درجه آلودگی اصلی حاصل از تأسیس تسهیل نامطلوب است و بخش دوم مربوط به درجه آلودگی حاشیه‌ای حاصل از پوشش‌دهی گره اضافی به تسهیل نامطلوب است. این درجه‌های آلودگی تابعی از تعداد گره‌های موجود و گسسته‌اند و به‌صورت برداری شامل بازه‌ای از اعداد تصادفی تعریف می‌شوند. در حالت تصادفی این مسئله، به‌ازای سناریوهایی که برای این دو بردار درجه آلودگی تعریف می‌شوند، بازه تغییرات این دو بردار متفاوت است. همان‌طور که در مدل ریاضی تصادفی نشان داده شده است، به‌ازای هر سناریو متغیرهای باینری مکان تسهیلات نامطلوب و تخصیص متفاوت‌اند. در نهایت  $z_{ws}$  برابر مقدار متوسط مقادیر  $z^{*s}$  تعریف می‌شود و رابطه ۹ به‌صورت زیر برقرار است.

$$z_{ws} = \sum_{s \in S} p^s z^{*s} \quad (9)$$

$$\sum_{s \in S} p^s = 1 \quad (10)$$

### دامنه تعریف سناریوها

طبق مدل ریاضی ارائه‌شده در حالت تصادفی، مسئله برای هر سناریو به‌صورت جداگانه حل و در نهایت سه سناریو مقایسه شده است و امید ریاضی تابع هدف برای کلیه سناریوها به دست می‌آید. باتوجه به مطالعات انجام‌شده در مقالات و همچنین مقاله اصلی که پایه کار این پژوهش بوده است، در ارتباط با میزان درجه آلودگی اصلی و حاشیه‌ای و ارتباط عددی این دو پارامتر، اطلاعاتی در دسترس نبوده است. همچنین به‌دلیل اینکه در نظر گرفتن کل حالات ممکن برای تغییرات این دو پارامتر کاری وقت‌گیر و غیرممکن است و در روش سناریو معمولاً چند حالت از بین حالت‌های ممکن در نظر گرفته می‌شود و همه حالات بررسی نمی‌شود، در این مسئله نیز سه حالت ممکن برای دامنه تغییرات این دو پارامتر در نظر گرفته می‌شود. باتوجه به اینکه ارتباط و میزان اختلاف درجه آلودگی اصلی و حاشیه‌ای نیز در مقالات گذشته نامشخص بوده است، در این پژوهش سناریوها براساس درجه اختلاف این دو پارامتر در نظر گرفته شده است که به‌شرح زیر است:

سناریوی (۱): درجه آلودگی اصلی (a) ۱۰۰ برابر درجه آلودگی حاشیه‌ای (b)؛

سناریوی (۲): هر دو در بازه نزدیک به هم تغییر می‌کنند؛

سناریوی (۳): درجه آلودگی اصلی (a) ۱۰ برابر درجه آلودگی حاشیه‌ای (b).

### ساختار الگوریتم پیشنهادی

در این بخش به‌دلیل NP-hard بودن ماهیت مسئله در حال مطالعه، برای حل آن در ابعاد بزرگ الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید پیشنهاد شده است.

### نمایش راه‌حل

نخستین مرحله در طراحی روش فراابتکاری، کدبندی مناسب برای تولید راه‌حل‌های امکان‌پذیر و کارا است. همان‌طور که گفته شد، در این مسئله  $n$  گره وجود دارد و تمام گره‌ها برای قرارگرفتن مکان تسهیل نامطلوب

کاندید هستند. برای نمایش راه حل در این مسئله، بردار  $1 \times n$  با اعداد صفر و یک در نظر گرفته شده است. این بردار برای نشان دادن گره‌هایی است که به عنوان مکان قرار گرفتن تسهیل نامطلوب انتخاب شده‌اند. صفر بودن عدد در هر خانه به این معنی است که این گره برای مکان قرار گرفتن تسهیل نامطلوب انتخاب نشده است و اگر عدد یک بگیرد برای مکان قرار گرفتن تسهیل نامطلوب انتخاب شده است. این بردار جواب وارد الگوریتم می‌شود و طبق ساختاری که برای تابع هزینه تعریف شده است، برای تخصیص گره‌ها به تسهیلات نامطلوب انتخاب شده ماتریس  $n \times n$  تشکیل می‌شود؛ این ماتریس، ماتریس تخصیص نامیده می‌شود و شامل اعداد ۰ و ۱ است؛ برای نمونه در شکل (۱) نمایش بردار جواب برای  $n=10$  گره آمده است. همان طور که در شکل (۱) مشخص است این بردار شامل ۱۰ گره است و گره‌های ۱، ۲، ۶، ۷ برای مکان قرار گرفتن تسهیل نامطلوب انتخاب شده‌اند.

|   |   |   |   |   |   |   |   |   |    |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|
| ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ | ۷ | ۸ | ۹ | ۱۰ |
| ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰  |

شکل ۱- نمایش بردار جواب برای  $n=10$

### تولید راه حل اولیه

جمعیت اولیه یکی از ویژگی‌های الگوریتم‌های تکاملی است که بر سرعت هم‌گرایی و کیفیت راه حل نهایی تأثیر می‌گذارد؛ بنابراین تولید جمعیت اولیه با کیفیت قدم مهمی برای الگوریتم محسوب می‌شود. در این مسئله به دلیل تولید جواب‌های نشدنی زیاد اگر راه حل اولیه، تصادفی تولید شود الگوریتم از فضای شدنی خارج می‌شود؛ همچنین به دلیل بزرگ بودن فضای جواب، نشدنی باقی می‌ماند؛ به همین دلیل راه حلی ابتکاری برای تولید جواب اولیه به شرح زیر ارائه شده است:

۱- یک ماتریس  $n \times n$  فاصله تشکیل می‌شود. همان طور که ذکر شد  $n$  تعداد کل گره‌ها است و تمام گره‌ها برای قرار گرفتن تسهیل نامطلوب کاندید هستند.

۲- برای کل گره‌ها محدودیت شعاع خدمات چک می‌شود تا مشخص شود هر گره می‌تواند کدام یک از گره‌های دیگر را پوشش دهد؛ بنابراین در این مرحله یک ماتریس ۰ و ۱ تشکیل می‌شود. عدد ۱ در خانه‌هایی از ماتریس به این معنی است که این گره با تسهیل مذکور پوشش‌دهی می‌شود و عدد ۰ به معنای عدم پوشش‌دهی این گره با تسهیل مذکور است.

۳- در گام بعدی تعداد یک‌های هر ستون شمارش می‌شود. در نهایت برای هر ستون (هر گره) یک عدد وجود دارد. این عدد نشان‌دهنده تعداد گره‌هایی است که این گره می‌تواند به عنوان تسهیل نامطلوب پوشش دهد.

۴- از بین این اعداد، حداکثر آن انتخاب می‌شود. در نتیجه این گره به عنوان مکان قرار گرفتن تسهیل نامطلوب انتخاب می‌شود.

۵- تمام گره‌هایی که در ستون مربوط به این تسهیل نامطلوب عدد یک را گرفته‌اند، زیر پوشش این تسهیل نامطلوب قرار می‌گیرند.

۶- بعد از تخصیص گره‌ها به این تسهیل، سطرها و ستون‌های مربوط به گره‌هایی حذف می‌شوند که پوشش داده شده‌اند.

۷- شرط توقف بررسی می‌شود: اگر تمام گره‌ها پوشش داده شده‌اند (ماتریس اولیه ۰ و ۱ تھی شود) الگوریتم پایان می‌یابد؛ در غیر این صورت به گام ۸ می‌رود.

۸- شمارش یک‌ها در ستون‌های باقی‌مانده به‌روزرسانی می‌شود و به گام ۴ می‌رود.  
در پایان این الگوریتم، بردار  $1 \times n$  وارد الگوریتم SA می‌شود و طبق این بردار ماتریس تخصیص شکل می‌گیرد.

### روش تخصیص

ابتدا بردار جواب با روش ابتکاری به دست می‌آید. همان‌طور که گفته شد این بردار شامل اعداد ۰ و ۱ است و وارد الگوریتم می‌شود. برای تشکیل ماتریس تخصیص، برای تسهیلات نامطلوب انتخاب‌شده محدودیت شعاع حداکثر خدمات برای کل گره‌های موجود چک می‌شود. هرکدام از گره‌ها که بتوانند زیر پوشش این تسهیلات نامطلوب باشند در این ماتریس مشخص می‌شوند. سپس برای تخصیص گره‌ها به تسهیلات نامطلوب باتوجه‌به محدودیتی که در این مسئله ذکر شده است، هر گره‌ای که برای تسهیل نامطلوب انتخاب شود گره خود را حتماً پوشش می‌دهد؛ بنابراین درایه مربوط به این گره در ماتریس ۱ می‌شود. سپس برای سایر گره‌ها برای پوشش‌دهی با تسهیلات نامطلوب انتخاب‌شده سه حالت پیش می‌آید:

حالت نخست: این گره در شعاع پوشش‌دهی هیچ‌کدام از تسهیلات نامطلوب انتخاب‌شده نیست؛ در این صورت جواب‌نشدنی تولید می‌کند.

حالت دوم: این گره می‌تواند از طریق یکی از تسهیلات نامطلوب انتخاب‌شده خدمت بگیرد؛ بنابراین فقط یک انتخاب دارد و درایه مربوط به این گره و تسهیل نامطلوب ۱ می‌شود.

حالت سوم: این گره می‌تواند از طریق دو یا تعداد بیشتری از تسهیلات خدمت بگیرد؛ در این صورت باتوجه‌به اینکه پوشش‌دهی این گره از طریق کدام تسهیل درجه آلودگی کمتری داشته باشد، تسهیل مدنظر را برای خدمت‌گرفتن انتخاب می‌کند و درایه مربوطه عدد ۱ را می‌گیرد.

درنهایت در ماتریس تخصیص، درایه‌های زیر پوشش تسهیلات نامطلوب مقدار ۱ را به‌خود اختصاص می‌دهند و سایر درایه‌های ماتریس ۰ می‌شوند و یک ماتریس ۰ و ۱ که شامل تخصیص گره‌ها به تسهیلات نامطلوب است به وجود می‌آید. برای نشان‌دادن روش تخصیص، نمونه‌ای با  $n=6$  گره آورده شده است. در شکل (۲) بردار نمایش جواب برای این نمونه آورده شده است.

| ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ |
|---|---|---|---|---|---|
|   | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ |

شکل ۲- بردار نمایش جواب با  $n=6$  گره

بردار موجود در شکل (۲) از دو روش ساخته می‌شود: (i) به‌صورت تصادفی؛ (ii) از طریق روش ابتکاری. در این پژوهش بردار جواب اولیه با استفاده از روش ابتکاری ساخته شده است. در این نمونه با ۶ گره، گره‌های ۱ و ۳

به عنوان تسهیل نامطلوب انتخاب شده اند و مقدار ۱ را به خود اختصاص داده اند. صفر بودن سایر درایه ها به این معنی است که این گره ها برای مکان قرار گرفتن تسهیل نامطلوب انتخاب نشده اند. این بردار وارد الگوریتم می شود و طبق توضیحات داده شده برای تسهیلات نامطلوب ۱ و ۳ شعاع پوشش دهی برای کلیه گره ها چک می شود. شکل (۳) نمایش ماتریس فاصله برای مثال ذکر شده است و شعاع حداکثر خدمات  $R=40$  است.

|   | ۱  | ۲   | ۳   | ۴  | ۵   | ۶   |
|---|----|-----|-----|----|-----|-----|
| ۱ | ۰  | ۲۰  | ۳۰  | ۵۰ | ۲۰  | ۳۰  |
| ۲ | ۲۰ | ۰   | ۶۰  | ۳۰ | ۱۰۰ | ۲۰  |
| ۳ | ۳۰ | ۶۰  | ۰   | ۳۰ | ۲۰  | ۱۰۰ |
| ۴ | ۵۰ | ۳۰  | ۳۰  | ۰  | ۲۰  | ۸۰  |
| ۵ | ۲۰ | ۱۰۰ | ۲۰  | ۲۰ | ۰   | ۱۰  |
| ۶ | ۳۰ | ۲۰  | ۱۰۰ | ۸۰ | ۱۰  | ۰   |

شکل ۳- ماتریس فاصله برای  $n=6$  گره

در شکل (۳)، برای تسهیلات نامطلوب ۱ و ۳ با توجه به ماتریس فاصله و  $R$ ، برای تمامی گره ها شعاع پوشش دهی خدمات چک می شود. مطابق شکل (۴) درایه های مربوط به گره هایی که بتوانند زیر پوشش این تسهیلات باشند مقدار ۱- می گیرند و سایر درایه ها مقدار ۰ را می گیرند. پس از به وجود آمدن ماتریس در شکل (۴) درایه های روی قطر اصلی مربوط به تسهیلات نامطلوب انتخاب شده، ۱ می شود. به این دلیل که تسهیلات نامطلوب موجود در هر گره باید تمام تقاضای گره خود را پوشش دهد، ماتریس موجود در شکل (۵) به وجود می آید.

در گام بعدی باید مشخص شود سایر گره هایی که در شعاع پوشش دهی تسهیلات نامطلوب انتخاب شده هستند از طریق کدام تسهیل تقاضای خود را برآورده کنند. طبق مسائلی که در روش تخصیص ذکر شد، نحوه پوشش دهی این گره ها مشخص می شود. همان طور که در شکل (۵) مشخص شده است گره ۲ تنها می تواند از تسهیل ۱ خدمت بگیرد؛ بنابراین درایه سطر ۲ و ستون ۱، مقدار ۱ می گیرد. گره ۴ تنها می تواند از تسهیل ۳ خدمت بگیرد؛ بنابراین درایه مربوط به آن مقدار ۱ را می گیرد. گره ۵ می تواند از هر دو تسهیل انتخاب شده خدمت بگیرد؛ بنابراین گره ای را برای خدمت گرفتن انتخاب می کند که میزان درجه آلودگی حاشیه ای تولید شده با این تسهیل کمتر باشد. در این نمونه فرض می شود از طریق تسهیل ۳ درجه آلودگی کمتری دارد؛ بنابراین درایه سطر ۵ و ستون ۳ مقدار ۱ می گیرد. همچنین گره ۶ که تنها در شعاع پوشش دهی تسهیل ۱ است، درایه سطر ۶ و ستون ۱ مقدار ۱ را می گیرد و سایر درایه ها ۰ می شوند. در نهایت ماتریس موجود در شکل (۶) به وجود می آید. در این ماتریس تخصیص همه گره ها به تسهیلات نامطلوب انتخاب شده، مشخص شده است.

|  | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ |
|--|---|---|---|---|---|---|
|  | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ |

|   | ۱  | ۲ | ۳  | ۴ | ۵ | ۶ |
|---|----|---|----|---|---|---|
| ۱ | -۱ | ۰ | -۱ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۲ | -۱ | ۰ | ۰  | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۳ | -۱ | ۰ | -۱ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۴ | ۰  | ۰ | -۱ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۵ | -۱ | ۰ | -۱ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۶ | -۱ | ۰ | ۰  | ۰ | ۰ | ۰ |

شکل ۴- ماتریس برای چک کردن شعاع پوشش‌دهی گره‌ها از طریق تسهیلات نامطلوب

|  | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ |
|--|---|---|---|---|---|---|
|  | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ |

|   | ۱  | ۲ | ۳  | ۴ | ۵ | ۶ |
|---|----|---|----|---|---|---|
| ۱ | ۱  | ۰ | -۱ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۲ | -۱ | ۰ | ۰  | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۳ | -۱ | ۰ | ۱  | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۴ | ۰  | ۰ | -۱ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۵ | -۱ | ۰ | -۱ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۶ | -۱ | ۰ | ۰  | ۰ | ۰ | ۰ |

شکل ۵- ماتریس پوشش‌دهی تقاضای هر گره از طریق تسهیلات نامطلوب واقع در همان گره

|  | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ |
|--|---|---|---|---|---|---|
|  | ۱ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ |

|   | ۱ | ۲ | ۳ | ۴ | ۵ | ۶ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۲ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۳ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۴ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۵ | ۰ | ۰ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ |
| ۶ | ۱ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ | ۰ |

شکل ۶- ماتریس ۰ و ۱ تخصیص گره‌ها به تسهیلات نامطلوب

## ساختار همسایگی

روش انتقال از یک راه حل به راه حل همسایه آن از طریق عامل کلیدی شناخته شده با ساختار همسایگی مشخص می شود. در اینجا از چهار عملگر برای تولید راه حل همسایه در الگوریتم شبیه سازی تبرید استفاده شده است. ساختارهای همسایگی به شرح زیرند:

ساختار همسایگی جابه جایی<sup>۳۹</sup>: این ساختار همسایگی با جابه جاکردن موقعیت دو عضو در رشته حل کاندیدا، راه حل جدیدی تولید می کند. به این صورت که دو عضو را به تصادف انتخاب می کند و موقعیت این دو عضو جابه جا می شود.

ساختار همسایگی معکوس<sup>۴۰</sup>: این ساختار همسایگی دو عضو را به تصادف انتخاب می کند و ترتیب قرارگرفتن موقعیت عناصر را در بین این دو عضو معکوس می کند.

ساختار همسایگی جایگذاری<sup>۴۱</sup>: در این ساختار همسایگی دو عضو به تصادف انتخاب می شود.

ساختار همسایگی جهش<sup>۴۲</sup>: یک عضو به تصادف انتخاب می شود و اگر مقدار این خانه از بردار ۱ باشد، ۰ می شود و اگر ۰ باشد، ۱ می شود.

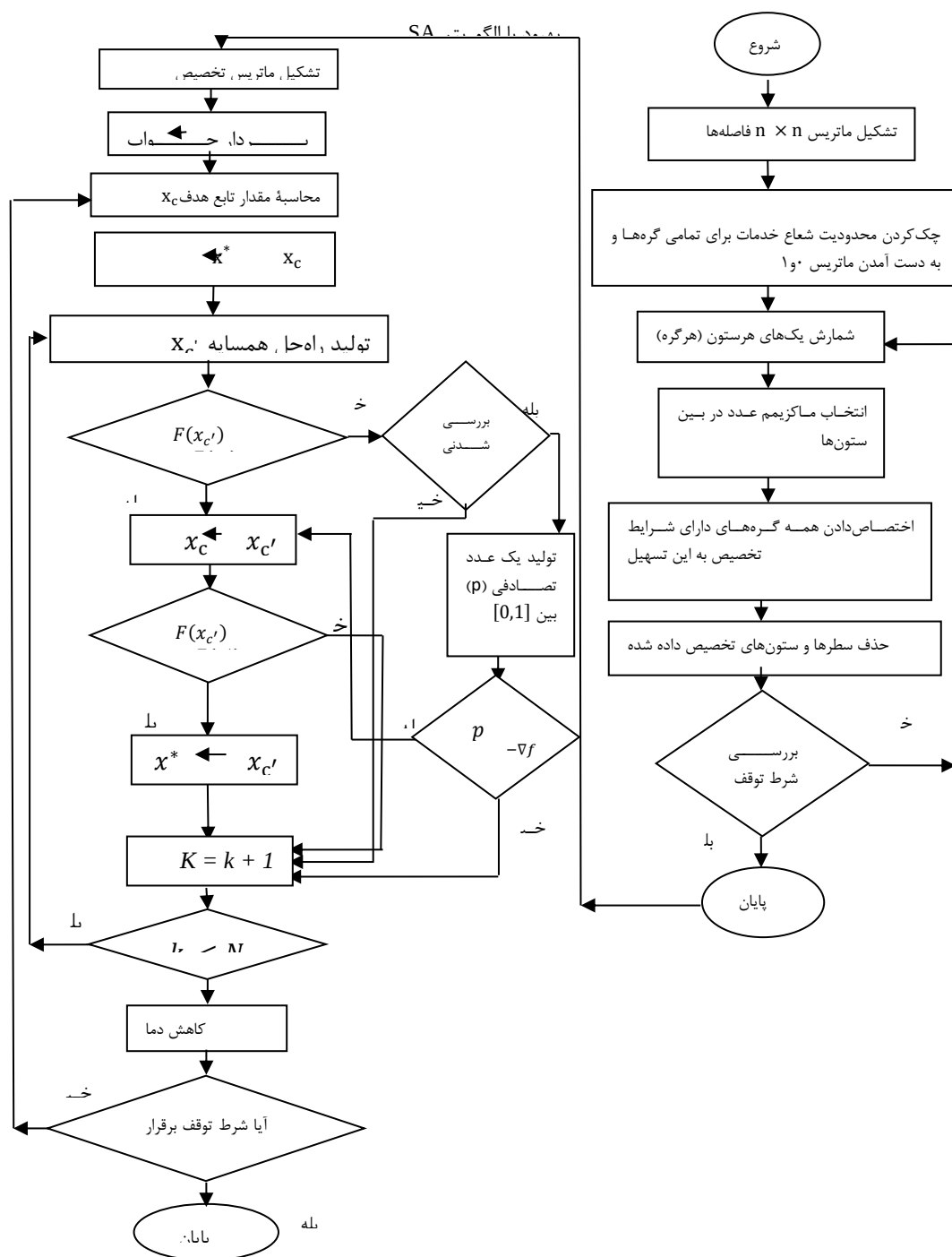
## ساختار کلی الگوریتم پیشنهادی

فلوچارت الگوریتم ابتکاری و الگوریتم پیشنهادی در شکل (۷) آورده شده است.

## تحلیل و نتایج محاسباتی

در این بخش عملکرد و کارایی مدل ریاضی مسئله مکان یابی تسهیلات نامطلوب با در نظر گرفتن شرایط عدم قطعیت در پارامتر درجه آلودگی و الگوریتم پیشنهادی با استفاده از نرم افزار بهینه سازی سیپلکس (۱۲،۶) و MATLAB (R2015b) ارزیابی می شوند. با وجود آنکه در مدل ارائه شده متغیرها وابسته به سناریو هستند، برای هر سناریو باتوجه به آنکه مقدار پارامترهای درجه آلودگی سناریو برای آنها تعریف شده است، ورودی مسئله اند؛ به همین دلیل حالت مجهولی در سناریوها وجود ندارد و در نتیجه با نرم افزار IB ILOG حل شدنی است. همچنین در اینجا هر سناریو جداگانه در نرم افزار حل شده است؛ در نتیجه حالت قطعی دارد. همچنین درحالتی که چند سناریو هم زمان با هم حل شده اند (به دلیل ماهیت مسئله که سناریوها برای پارامتر درجه آلودگی تعریف شده است) سناریوها دارای مقادیر معلوم هستند.

بدین منظور نحوه تولید نمونه های تصادفی شرح داده شده است. در این بخش ۱۲ نمونه مسئله در ابعاد کوچک و متوسط برای مقایسه حل دقیق سیپلکس و الگوریتم فراابتکاری شبیه سازی تبرید و ۱۶ نمونه مسئله برای مقایسه کارایی الگوریتم فراابتکاری شبیه سازی تبرید و ژنتیک در ابعاد بزرگ به صورت تصادفی تولید شده است. الگوریتم فراابتکاری ژنتیک که در این مقاله استفاده شده است مربوط به مقاله سانگ و همکاران (۲۰۱۳) است.



شکل ۷- فلوچارت الگوریتم پیشنهادی

### تولید داده‌های آزمایشی

باتوجه به اینکه اطلاعات مربوط به مسائل حل شده در مقالات مشابه برای مسئله مدنظر موجود نبوده است؛ همچنین به دلیل در دسترس نبودن اطلاعات نمونه‌های واقعی، لازم است داده‌های آزمایشی برای بررسی و اعتبارسنجی مدل ریاضی و کیفیت نتایج الگوریتم‌های فراابتکاری تولید شوند. در این پژوهش باتوجه به الگوی موجود در ادبیات موضوع برای ارزیابی و مقایسه نتایج مدل ریاضی و الگوریتم‌های فراابتکاری از نمونه‌های تصادفی استفاده شده است. نحوه تولید آنها در جدول (۴) و (۵) آمده است.

جدول ۴- مقادیر داده‌های تصادفی

| مقادیر          | نمادها | پارامترها              |
|-----------------|--------|------------------------|
| $\{۴۰...۹۰۰۰\}$ | N      | تعداد کل گره‌های موجود |
| $\{۵...۸۰۰\}$   | K      | حداکثر تسهیلات نامطلوب |
| $\{۱۰۰...۷۵۰\}$ | R      | حداکثر شعاع پوشش‌دهی   |
| $(۱\ ۱۰۰۰)$     | d      | فاصله بین گره‌ها       |

سناریوها برای دامنه تغییرات درجه آلودگی اصلی و حاشیه‌ای براساس درجه اختلاف این دو پارامتر در نظر گرفته شده و به شرح زیر است.

سناریوی (۱): درجه آلودگی اصلی (a) ۱۰۰ برابر درجه آلودگی حاشیه‌ای (b)

سناریوی (۲): هر دو در بازه نزدیک به هم تغییر می‌کنند.

سناریوی (۳): درجه آلودگی اصلی (a) ۱۰ برابر درجه آلودگی حاشیه‌ای (b)

جدول ۵- بردار درجه آلودگی در سناریوها

| سناریوها  | دامنه تغییرات درجه آلودگی اصلی | دامنه تغییرات درجه آلودگی حاشیه‌ای |
|-----------|--------------------------------|------------------------------------|
| سناریوی ۱ | $a=(۱۰۰۰,۳۰۰۰۰)$               | $b=(۱۰,۳۰۰)$                       |
| سناریوی ۲ | $a=(۱۰۰,۵۰۰)$                  | $b=(۵۰,۴۰۰)$                       |
| سناریوی ۳ | $a=(۱۰۰,۳۰۰۰)$                 | $b=(۱۰,۳۰۰)$                       |

### تنظیم پارامتر الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

در این مقاله برای سه مثال در سطح کوچک، متوسط و بزرگ مقادیر مختلف فاکتورهای تأثیرگذار بر عملکرد الگوریتم، آزمایش شده است. عوامل مؤثر بر عملکرد الگوریتم و سطوح آنها در جدول ۶ و ۷ نشان داده شده است. در جدول ۶ برای هر عملگر، احتمالی در نظر گرفته شده است. درواقع این احتمالات و ترکیب‌هایی که برای هر سطح عملگرها در نظر گرفته شده است به دو دلیل است: (۱) به صورت آزمایش و خطا و نتایج مطلوب به دست آمده برای نمونه‌های آزمایشی، ترکیب‌های مناسب احتمالات چهار عملگر به دست آمده است؛ (۲) باتوجه به اینکه باید مجموع احتمال عملگرها یک باشد، اگر احتمال هر عملگر به تنهایی یک سطح تعیین شود، ممکن است در آزمایش تاگوچی طرحی انتخاب شود که مجموع احتمال عملگرها بیشتر از یک شوند.

جدول ۶- سطوح مختلف عملگرهای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

| عملگرهای الگوریتم | سطوح مختلف ترکیب احتمال عامل‌ها |     |     |
|-------------------|---------------------------------|-----|-----|
|                   | ۱                               | ۲   | ۳   |
| جابه‌جایی         | ۰/۴                             | ۰/۳ | ۰/۲ |
| جایگذاری          | ۰/۲                             | ۰/۲ | ۰/۲ |
| معکوس             | ۰/۲                             | ۰/۲ | ۰/۲ |
| جهش               | ۰/۲                             | ۰/۳ | ۰/۴ |

جدول ۷- سطوح مختلف پارامترهای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

| سطوح مختلف عامل‌ها |      |      | پارامترهای الگوریتم |
|--------------------|------|------|---------------------|
| ۳                  | ۲    | ۱    |                     |
| ۶۰                 | ۴۰   | ۵۰   | Max sub IT          |
| ۵۰                 | ۳۰   | ۱۰   | T0                  |
| ۰/۷۹               | ۰/۸۹ | ۰/۹۹ | Alfa                |

برای تعیین سطوح مطلوب و اقتصادی پارامترهای الگوریتم با توجه به سطوح تعیین‌شده در جداول ۶ و ۷، از طرح تاگوچی  $L_{27}$  برای انتخاب سطوح بهینه پارامترها استفاده شده است. همچنین برای رسیدن به نتایج قابل اطمینان‌تر، هر ترکیب ۱۰ بار اجرا شده است و میانگین آنها برای نتیجه حاصل از این ترکیب ثبت می‌شود. در نمودار میانگین SN Ratios، سطحی از فاکتورها که بیشترین مقدار SN Ratios را دارند، بهترین سطح فاکتور انتخاب می‌شود. این مقادیر در جدول (۸) نشان داده شده است.

جدول ۸- فاکتورها و مقادیر مناسب پارامترهای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید

| طبقه‌بندی مسائل |         |       |         |      |         | پارامترها  |
|-----------------|---------|-------|---------|------|---------|------------|
| کوچک            |         | متوسط |         | بزرگ |         |            |
| ۳               | ۶۰      | ۲     | ۴۰      | ۲    | ۴۰      | Max sub IT |
| ۲               | ۳۰      | ۱     | ۱۰      | ۱    | ۱۰      | T0         |
| ۱               | ۰/۹۹    | ۳     | ۰/۷۹    | ۳    | ۰/۷۹    | Alfa       |
| ۱               | ترکیب ۱ | ۱     | ترکیب ۱ | ۲    | ترکیب ۲ | Operators  |

### شاخص بررسی کارایی الگوریتم‌ها

برای بررسی عملکرد الگوریتم‌ها از شاخص PRD استفاده می‌شود. این معیار از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$PRD = \frac{\text{Algorithm solution} - \text{Minimum solution}}{\text{Minimum solution}} \quad (11)$$

در این رابطه،  $\text{Algorithm solution}$  تابع هدف حاصل از حل یک نمونه با استفاده از الگوریتم مدنظر و  $\text{Minimum solution}$  کمترین مقدار تابع هدف حاصل از حل آن نمونه با استفاده از روش‌های حل مختلف است.

### نتایج در ابعاد کوچک و متوسط

در این بخش نتایج آزمایش‌های عددی مسئله با در نظر گرفتن ۳ سناریو در هر نمونه برای ۱۲ نوع مسئله در ابعاد کوچک و متوسط با نرم‌افزار بهینه‌سازی سیپلکس و الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید آمده است. در نهایت نتایج مقایسه شده‌اند. در ابعاد کوچک و متوسط، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید به جواب بهینه سیپلکس می‌رسد. در جدول (۹) نتایج عددی نمونه‌های آزمایشی آمده است.

جدول ۹- نتایج محاسباتی مسائل نمونه در ابعاد کوچک و متوسط در نرم افزار سیپلکس و الگوریتم شبیه سازی تبرید

| سناریو ۳ |       |       |       | سناریو ۲ |        |        |        | سناریو ۱ |        |      |         | مسئله |     |      |
|----------|-------|-------|-------|----------|--------|--------|--------|----------|--------|------|---------|-------|-----|------|
| T(s)     | SA    | T(s)  | Cplex | T(s)     | SA     | T(s)   | Cplex  | T(s)     | SA     | T(s) | Cplex   | R     | K   | N    |
| ۱۸       | ۱۱۹۱۹ | ۰/۴۵  | ۱۱۹۱۹ | ۳۷/۴۳    | ۴۱۶۶   | ۰/۴۲   | ۴۱۶۶   | ۲۶/۱۷    | ۴۱۹۸۴  | ۰/۶۷ | ۴۱۹۸۴   | ۲۳۰   | ۵   | ۴۰   |
| ۸۳       | ۲۴۶۱۹ | ۶۲    | ۲۴۶۱۹ | ۵۸       | ۴۲۳۳۳  | ۰/۳۱   | ۴۲۳۳۳  | ۴۷/۰۰۳   | ۳۲۶۷۳۷ | ۲۱۸  | ۳۲۶۷۳۷  | ۲۰۰   | ۱۰  | ۷۰   |
| ۷۵       | ۳۶۶۴۶ | ۱۵۸   | ۳۶۶۴۶ | ۳۲       | ۳۰۵۸۱  | ۰/۵۳   | ۳۰۵۸۱  | ۱۱۵/۳    | ۷۰۴۳۱  | ۳/۴۵ | ۷۰۴۳۰/۹ | ۱۰۰   | ۳۰  | ۱۰۰  |
| ۷۰       | ۷۹۴۳  | ۲۲    | ۷۹۴۳  | ۲۸       | ۱۱۶۷۸  | ۹      | ۱۱۶۷۸  | ۷۲/۶۴۳   | ۲۹۲۹۶  | ۵۳۲  | ۲۹۲۹۶   | ۳۰۰   | ۳۰  | ۲۰۰  |
| ۳۳۰      | ۸۰۳۲  | ۲۹۲   | ۸۰۳۲  | ۲۵۰      | ۱۷۳۰۵  | ۱۴/۳۲  | ۱۷۳۰۵  | ۲۳۰      | ۱۹۸۹۹  | ۱۵۷  | ۱۹۸۹۹   | ۲۵۰   | ۴۰  | ۳۰۰  |
| ۲۵۰      | ۷۸۸۹  | ۹۹/۱۴ | ۷۸۸۹  | ۶۴       | ۸۲۷۶۹  | ۸۶     | ۸۲۷۶۹  | ۴۶۰      | ۲۳۶۱۵  | ۵۷۷  | ۲۳۶۱۵   | ۳۵۰   | ۱۰۰ | ۴۰۰  |
| ۴۹۰      | ۱۶۱۰۴ | ۵۸۶   | ۱۶۱۰۴ | ۳۰۰      | ۱۰۲۰۷۷ | ۱۴۴    | ۱۰۲۰۷۷ | ۴۰۰      | ۲۳۴۸۵  | ۵۷۷  | ۲۳۴۸۵   | ۴۰۰   | ۱۰۰ | ۵۰۰  |
| ۴۵۰      | ۹۷۱۶  | ۶۸    | ۹۷۱۶  | ۵۰۰      | ۱۲۱۸۰۱ | ۲۲۱    | ۱۲۱۸۰۱ | ۷۰۰      | ۲۳۱۱۵  | ۶۵۸  | ۲۳۱۱۵   | ۴۰۰   | ۱۰۰ | ۶۰۰  |
| ۴۰۰      | ۱۲۱۳۱ | ۳۰۹   | ۱۲۱۳۱ | ۶۰۰      | ۱۴۳۵۶۵ | ۱۷۵    | ۱۴۳۵۶۵ | ۳۵۱      | ۲۲۹۹۵  | ۲۸۷۵ | ۲۲۹۹۵   | ۴۵۰   | ۱۰۰ | ۷۰۰  |
| ۶۰۰      | ۱۰۶۷۸ | ۵۶۲   | ۱۰۶۷۸ | ۵۰۰      | ۱۶۱۵۶۲ | ۲۷۳    | ۱۶۱۵۶۲ | ۴۰۰      | ۵۷۶۶۹  | ۱۲۰۱ | ۵۷۶۶۹   | ۶۰۰   | ۱۰۰ | ۸۰۰  |
| ۶۹۰      | ۴۷۸۲۴ | ۲۷۵   | ۴۷۸۲۴ | ۸۰۰      | ۴۵۱۲۰۲ | ۱۰۵,۳۸ | ۴۵۱۲۰۲ | ۵۴۷      | ۱۰۱۴۱۹ | ۷۸۵  | ۱۰۱۴۱۹  | ۷۵۰   | ۱۱۰ | ۹۰۰  |
| ۹۰۰      | ۱۱۶۰۷ | ۴۸۱   | ۱۱۶۰۷ | ۹۰۰      | ۲۰۱۱۷۱ | ۱۴۷    | ۲۰۱۱۷۱ | ۷۷۴      | ۹۵۲۶۷  | ۵۴۶۰ | ۹۵۲۶۷   | ۷۰۰   | ۲۸۰ | ۱۰۰۰ |

### تحلیل نتایج در ابعاد کوچک و متوسط

همان طور که از جدول نتایج عددی مشخص است در همه نمونه های آزمایشی، الگوریتم فراابتکاری به جواب بهینه نرم افزار حل دقیق سیپلکس رسیده است. نتایج مقایسه مقدار تابع هدف در سه سناریو برای نمونه های آزمایشی در شکل (۸) آمده است. در سناریوی ۱ که مقدار درجه آلودگی اصلی ۱۰۰ برابر درجه آلودگی حاشیه ای فرض شده است، در ابعاد کوچک، نرم افزار سیپلکس در زمان کمتری به جواب بهینه رسیده است و در ابعاد متوسط، الگوریتم فراابتکاری در زمان کمتر به جواب بهینه رسیده است. در سناریوی ۲ (درجه آلودگی اصلی و حاشیه ای هر دو در یک دامنه تغییرات) و سناریوی ۳ (درجه آلودگی اصلی ۱۰ برابر درجه آلودگی حاشیه ای) است، نرم افزار سیپلکس در همه نمونه ها به جز یک مورد در زمان کمتری به جواب بهینه رسیده است.

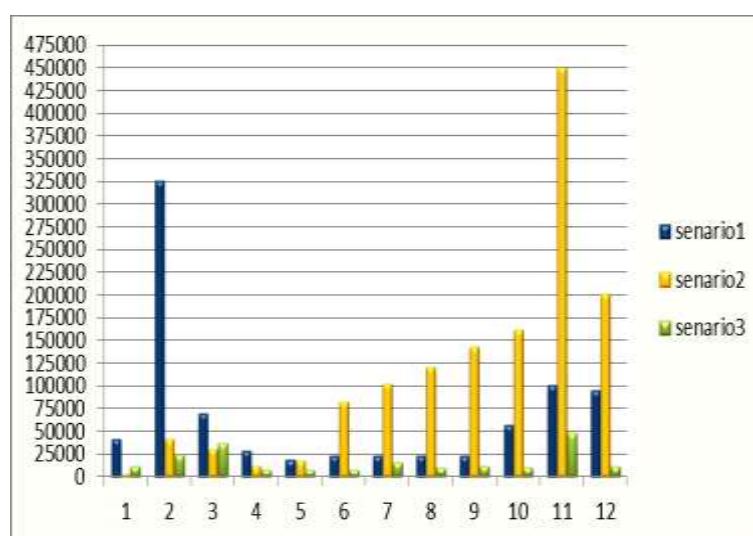
باتوجه به اینکه مسئله در حال مطالعه در این مقاله برنامه ریزی تصادفی یک مرحله ای است، از شاخصی با عنوان  $EVPI^{۲۳}$  (متوسط ارزش اطلاعات کامل) استفاده می شود که مبین اهمیت پرداختن به عدم قطعیت اطلاعات است. این شاخص به صورت زیر تعریف می شود و نشان می دهد تا چه اندازه کمبود و نقصان اطلاعات تأثیرگذار است.

$$EVPI = z_{HN} - z_{ws} \quad (۱۲)$$

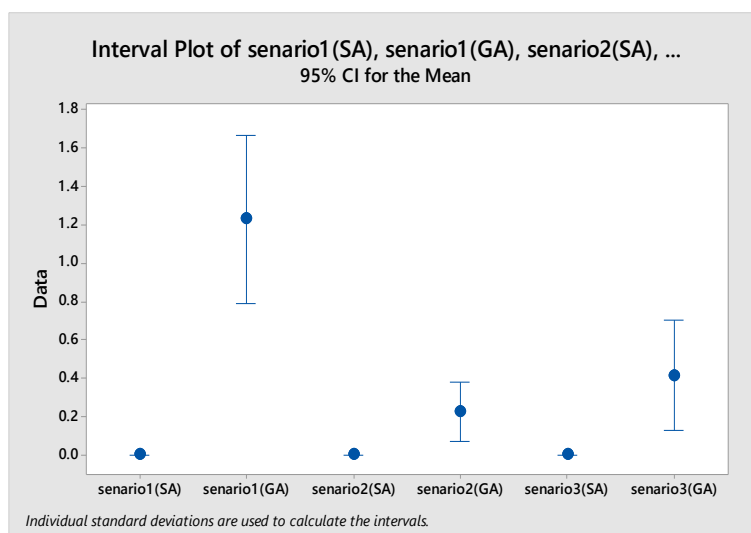
در این رابطه،  $z_{HN}$  مقدار تابع هدف اینجا و اکنون است؛ به این معنی است که اگر در مدل هم زمان همه سناریوها با احتمال مربوطه در نظر گرفته شود، در نهایت مقداری که می دهد  $z_{HN}$  نامیده می شود.  $z_{ws}$  مقدار تابع هدف صبر و مشاهده است که همچنان به این معنی است که اگر مسئله  $S$  بار و هر بار برای یک سناریو حل شود،  $z_{ws}$  برابر با مقدار متوسط مقادیر  $z^s$  است. در مسئله مکان یابی تسهیلات نامطلوب در حال مطالعه در این پژوهش به دلیل گسسته بودن سناریوها مقدار این دو تابع هدف یکسان است ( $z_{HN} = z_{ws}$ )؛ بنابراین مقدار شاخص  $EVPI = 0$  است. کوچک بودن این شاخص نشان می دهد که به دست آوردن اطلاعات درباره آینده تأثیر درخور توجهی ندارد.

## نتایج در ابعاد بزرگ

در این بخش به دلیل اینکه نرم‌افزار سیپلکس قادر به حل نمونه‌های آزمایشی برای ابعاد ۱۰۰۰ گره و بزرگتر از این بُعد از مسئله نیست، نتایج آزمایش‌های عددی مسئله با در نظر گرفتن ۳ سناریو در هر نمونه برای ۱۶ نوع مسئله در ابعاد بزرگ با الگوریتم‌های فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید و ژنتیک حل شده است. زمان توقف هر دو الگوریتم ۱ ساعت است. در نهایت نتایج حاصل مقایسه شده‌اند. الگوریتم ژنتیک براساس مقاله سانگ و همکاران (سانگ و همکاران، ۲۰۱۳) نوشته شده است و به دلیل اینکه در ابعاد بزرگ قادر به تولید جواب‌های شدنی نبوده است، از روش ابتکاری استفاده می‌شود که در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید برای تولید جواب اولیه استفاده شده است. هر نمونه برای هر سناریو ۱۰ بار اجرا شده و میانگین نتایج برای هر سناریو در جدول نتایج آمده است. همان طور که از جدول نتایج عددی و نمودارهای ترسیم‌شده مشخص است، در تمام نمونه‌های آزمایشی، الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در مقایسه با الگوریتم ژنتیک کمترین مقدار تابع هدف را دارد. در ابعاد بزرگ هرچه نمونه بزرگتر می‌شود کارایی الگوریتم ژنتیک به شدت پایین‌تر می‌آید و در زمان ۱ ساعت که معیار مقایسه دو الگوریتم است در ابعاد ۴۰۰۰ - ۵۰۰۰ گره، تنها قادر به تولید یک جواب شدنی است و در ابعاد ۵۰۰۰ - ۷۸۰۰ گره، الگوریتم ژنتیک در زمان یک ساعت قادر به تولید یک جواب شدنی نیست و ۲ ساعت زمان لازم داشته است. در ابعاد ۷۸۰۰ گره، ۳ ساعت و برای ۹۰۰۰ گره، در مدت زمان ۳ ساعت موفق به تولید یک جواب شدنی هم نبوده است. در صورتی که الگوریتم شبیه‌سازی تبرید قادر به تولید جواب‌های بهتر در زمان کمتری است و سرعت همگرایی و عملکرد بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک در تمام نمونه‌های آزمایشی مسئله دارد. همان طور که برای ابعاد کوچک و متوسط، شاخص EVPI توضیح داده شد، برای ابعاد بزرگ نیز مقدار شاخص  $EVPI = 0$  است و کوچک بودن این شاخص نشان می‌دهد به دست آوردن اطلاعات درباره آینده، تأثیر درخور توجهی ندارد. نمودار متوسط مقادیر PRD برای مسائل با ابعاد بزرگ در شکل (۹) ترسیم شده است. همان طور که در شکل نشان داده شده است، مقادیر PRD برای الگوریتم شبیه‌سازی تبرید صفر است؛ به این دلیل که در تمامی نمونه‌ها مقدار تابع هدف حداقل را دارد.



شکل ۸- نمودار مقایسه مقدار تابع هدف سناریوها



شکل ۹- نمودار میانگین مقادیر PRD برای الگوریتم‌های شبیه‌سازی تبرید و ژنتیک

جدول ۱۰- نتایج محاسباتی مسائل نمونه در ابعاد بزرگ در الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و ژنتیک

| سناریو ۳ |        |          | سناریو ۲ |         |         | سناریو ۱ |        |        | مسئله |     |      |
|----------|--------|----------|----------|---------|---------|----------|--------|--------|-------|-----|------|
| PRD      | GA     | SA       | PRD      | GA      | SA      | PRD      | GA     | SA     | R     | K   | N    |
| ۰/۵۲۵    | ۸۸۹۰۳  | ۵۸۲۸۳    | ۰/۹۹۸    | ۳۶۴۷۳   | ۱۸۲۴۸   | ۳/۰۵     | ۱۴۱۰۳۴ | ۳۴۸۰۳  | ۷۰۰   | ۱۸۰ | ۱۲۰۰ |
| ۰/۳۳     | ۱۳۱۱۴۵ | ۹۸۱۳۲    | ۰/۰۷۳    | ۸۸۲۵۳   | ۸۲۲۰۸   | ۱/۶۷     | ۹۹۳۶۱۴ | ۳۷۱۱۳۶ | ۲۵۰   | ۱۷۰ | ۱۵۰۰ |
| ۰/۰۸۷    | ۱۲۲۳۳۸ | ۱۱۲۴۸۷,۶ | ۰/۰۱۷    | ۲۹۳۶۱۵  | ۲۸۸۵۹۴  | ۲/۰۱۲    | ۴۷۷۴۱۴ | ۱۵۸۴۶۱ | ۷۰۰   | ۲۰۰ | ۱۸۰۰ |
| ۰/۰۹۵۸   | ۱۱۶۳۲۶ | ۱۰۶۱۵۴   | ۰/۰۱۱    | ۶۰۸۷۹۸  | ۶۰۲۰۰۰  | ۱/۷۱۴    | ۶۷۰۱۴۴ | ۲۴۶۸۵۵ | ۴۵۰   | ۲۵۰ | ۲۰۰۰ |
| ۰/۱۹۹    | ۱۲۴۵۳۱ | ۱۰۳۷۸۴   | ۰/۰۴۱    | ۱۵۶۵۶۴  | ۱۵۰۳۳۱  | ۰/۶۲۶    | ۲۹۶۸۲۷ | ۱۸۲۴۶۷ | ۷۵۰   | ۳۵۰ | ۲۵۰۰ |
| ۰/۱۴۲    | ۱۷۸۵۰۱ | ۱۵۶۲۲۷   | ۰/۰۸۸    | ۱۶۴۸۷۱  | ۱۵۱۴۶۰  | ۲/۱۱     | ۱۷۶۵۱۴ | ۵۶۷۳۸  | ۷۰۰   | ۴۰۰ | ۳۰۰۰ |
| ۰/۳۴۳    | ۶۶۷۲۷  | ۴۹۶۶۱    | ۰/۱۵۸    | ۴۴۷۱۱۵  | ۳۸۶۰۳۱  | ۱/۹۵۳    | ۱۵۱۹۵۵ | ۵۱۴۵۷  | ۶۵۰   | ۵۰۰ | ۳۵۰۰ |
| ۰/۴۷۸    | ۱۹۵۶۱۶ | ۱۳۲۲۷۹   | ۰/۰۷۲    | ۵۱۶۶۰۲  | ۴۸۱۸۵۵  | ۰/۸۴     | ۲۹۹۴۰۶ | ۱۶۲۶۹۹ | ۵۵۰   | ۷۱۰ | ۴۰۰۰ |
| ۰/۵۱۶    | ۲۹۸۲۰۷ | ۱۹۶۵۸۳   | ۰/۱۰۳    | ۵۰۰۱۹۰  | ۴۵۳۴۴۹  | ۰/۷۵۷    | ۴۴۲۴۰۹ | ۲۵۱۷۳۱ | ۵۰۰   | ۷۶۰ | ۴۵۰۰ |
| ۰/۳۱۱    | ۴۰۵۴۳۶ | ۳۰۹۰۶۵   | ۰/۱۵۵    | ۲۸۸۶۸۴  | ۲۴۹۸۴۹  | ۰/۶۵۵    | ۴۶۴۹۹۷ | ۲۸۰۹۶۰ | ۴۲۰   | ۶۰۰ | ۵۰۰۰ |
| ۲/۲۱     | ۱۸۸۱۱۱ | ۵۸۶۰۱    | ۰/۱۴۴    | ۴۹۰۲۸۹  | ۴۲۸۳۸۶  | ۰/۴۷۸    | ۵۰۲۶۰۹ | ۳۴۰۰۴۶ | ۵۰۰   | ۶۰۵ | ۵۳۰۰ |
| ۰/۲۲     | ۶۹۲۶۳۳ | ۵۶۶۰۷۳   | ۰/۲۸     | ۶۹۷۴۲۸  | ۵۴۲۴۵۹  | ۰/۵۱۲    | ۷۹۱۰۸۸ | ۵۲۳۰۹۱ | ۶۲۰   | ۶۱۵ | ۶۰۰۰ |
| ۰/۲۰۷    | ۶۱۳۳۰۶ | ۵۰۷۸۷۵   | ۰/۰۷۸    | ۵۶۹۳۵۸  | ۵۲۸۰۵۴  | ۰/۶۱۴    | ۸۲۵۲۴۲ | ۵۱۱۱۸۶ | ۶۰۰   | ۶۱۰ | ۶۵۰۰ |
| ۰/۳۳۶    | ۶۹۳۴۸۶ | ۵۱۸۸۵۴   | ۰/۴۹۷    | ۵۳۲۴۷۳۰ | ۳۵۵۵۴۳۰ | ۰/۴۴۹    | ۶۳۷۱۳۷ | ۴۳۹۶۳۸ | ۷۱۵   | ۶۸۰ | ۷۱۰۰ |
| ۰/۱۹۷    | ۸۵۸۰۵۱ | ۷۱۶۵۴۴   | ۰/۶۶۲    | ۱۳۵۳۱۰  | ۸۱۴۰۶   | ۰/۹۶۴    | ۶۸۰۶۱۶ | ۳۴۶۴۰۰ | ۶۹۰   | ۷۵۰ | ۷۸۰۰ |
| -        | -      | ۹۲۴۸۶۹   | -        | -       | ۴۵۱۵۸۳  | -        | -      | ۳۰۳۴۳۶ | ۶۴۰   | ۸۰۰ | ۹۰۰۰ |

## نتیجه‌گیری و پیشنهادات آتی

در این مقاله مسئله مکان‌یابی تسهیلات نامطلوب با محوریت کاهش درجه آلودگی حاصل از این تسهیلات درحال مطالعه قرار گرفت. همچنین این مسئله به‌صورت کامل تشریح و مدل ریاضی آن ارائه شد. باتوجه‌به اینکه در مقالات گذشته، همچنین در دنیای واقعی میزان دقیق این درجه آلودگی نامشخص است، تصمیم گرفته شد این مسئله در حالت عدم قطعیت در میزان درجه آلودگی حاصل از این تسهیلات بررسی شود. سپس با بررسی روش‌های مواجهه با

عدم قطعیت و روش‌های مدل‌سازی مسائل برنامه‌ریزی تصادفی، روش سناریو برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در این مسئله به کار گرفته شد. از طرف دیگر سناریوهایی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در میزان درجه آلودگی این تسهیلات برای نقاط اطراف آنها طراحی شد. مسئله برای نمونه‌های آزمایشی مختلف در سناریوهای طراحی شده در ابعاد کوچک و متوسط با نرم‌افزار حل دقیق سیپلکس حل شد و جواب‌های بهینه به دست آمد. باتوجه به ماهیت پیچیده این مسئله، برای حل آن در ابعاد بزرگ، الگوریتم فراابتکاری شبیه‌سازی تبرید پیشنهاد داده شد. باتوجه به اینکه فضای جواب بزرگ است، برای تولید جواب اولیه به جای تولید راه‌حل تصادفی از راه‌حلی ابتکاری برای تولید جواب اولیه شدن در این مسئله استفاده شد. نتایج محاسباتی حل بهینه سیپلکس و الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در ابعاد کوچک و متوسط مقایسه شدند. هر دو روش به جواب بهینه دست یافتند و تفاوت در زمان حل این نمونه‌ها بود. برای ابعاد بزرگ نمونه‌های آزمایشی با استفاده از الگوریتم شبیه‌سازی تبرید و الگوریتم ژنتیک که در ادبیات این مسئله موجود بود، مقایسه شدند و کارایی بهتر الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در همگراشدن به جواب بهینه و زمان حل کمتر در نمونه‌ها و سناریوهای مختلف به اثبات رسید. محورهای پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی به شرح زیر است:

- ۱- پیاده‌سازی مدل در یک مطالعه موردی واقعی برای ایجاد درک بهتر از مسئله؛
- ۲- اضافه کردن محدودیت ظرفیت برای نزدیک‌تر شدن به دنیای واقعی؛
- ۳- بررسی مسئله مکان‌یابی - مسیریابی برای تعیین مسیرهای بهینه حمل و نقل بین تسهیلات و نقاط زیر پوشش.

## References

- Taqavi Fard, M.T. Mousavi, S.E. Heydar, M. Mojtahedi, S.M.H. (2008). "A new fuzzy multi-objective model to undesirable facility location". *5th International Conference on Industrial Engineering*. Iran University of Science and Technology. (In Persian).
- Mirhassani, S.A. (2014). *Stochastic programming. First Edition*. Amirkabir University of Technology Press. (In Persian).
- Abastante, F. Bottero, M. Greco, S. Lami, I. (2014). "Addressing the Location of Undesirable Facilities through the Dominance-based Rough Set Approach". *J. Multi-Crit. Decis. Anal.*, 21(1-2): 3-23.
- Brimberg, J. Juel, H. (1998). "On Locating a Semi-desirable Facility on the Continuous Plane". *Int. Trans. Opl. Res.*, 5(1): 59-66.
- Berman, O. Odoni, A. R. (1982). "Locating mobile servers on a network with Markovian properties". *Networks*, 12(1): 73-86.
- Cooper, L. (1974). "A random locational equilibrium problem". *Journal of Regional Science*, 14(1): 47-54.
- Colebrook, M. Gutierrez, J. Sicilia, J. (2005). "A new bound and an O(mn) algorithm for the undesirable 1-median problem (maxian) on networks". *Computers & Operations Research*, 32(2): 309-325.
- Daskin, M. (1997). "Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications". New York, John Wiley & Sons Inc.
- Erkut, E. Neuman, S. (1989). "Analytical models for locating undesirable facilities". *European Journal of Operational Research*, 40(3): 275-291.
- Fernandez, J. Fernandez, P. Pelegr, B. (2000). "A continuous location model for siting a nonnoxious undesirable facility within a geographical region". *European Journal of Operational Research*, 121(2): 259-274.

- Farber, S. (1998). "Undesirable facilities and property values: a summary of empirical studies". *Ecological Economics*, 24(1): 1-14.
- Gulpinar, N. Pachamanova, D. Canakoglu, E. (2013). "Robust strategies for facility location under uncertainty". *European Journal of Operational Research*, 225(2): 21–35.
- Hu, Ch. Liu, X. Lu, J. (2017). "A bi-objective two-stage robust location model for waste-to energy facilities under uncertainty". *Decision Support Systems*, 99(1):37-50.
- Jamalian, A. Salahi, M. (2014). "Robust solutions to multi-facility Weber location problem under interval and ellipsoidal uncertainty". *Applied Mathematics and Computation*, 242(1): 179–186.
- Lawrence, V. S. (2006). "Facility Location Under Uncertainty: A Review". *IIE Transactions*, 38(1): 537-554.
- Louveaux, F. Thisse, J. F. (1985). "Production and location on a network under demand uncertainty". *Operations Research Letters*, 4(4): 145-149.
- Mirchandani, P. B. Odoni, A. R. (1979). "Locations of medians on stochastic networks". *Transportation Science*, 13(2): 85-97.
- Mirchandani, P. B. Oudjit, A. (1980). "Localizing 2-medians on probabilistic and deterministic tree networks". *Networks*, 10(4): 329-350.
- Markovi, N. Ryzho, O. Schonfeld, P. (2017). "Evasive flow capture: A multi-period stochastic facility location problem with independent demand.". *European Journal of Operational Research*, 257(2): 687-703.
- Melachrinoudis, E. (1984). "Determining an optimum location for an undesirable facility in a workroom environment". *Appl. Math. Model*, 9(5): 365-369.
- Melachrinoudis, E. Cullinane, T.P. (1985). "Locating an Undesirable Facility within a Geographical Region Using the Maximin Criterion". *Journal of Regional Science*, 25(1): 115-127.
- Melachrinoudis, E. Cullinane, T.P. (1986). "Locating an Obnoxious Facility within a Polygonal Region". *Annals of Operations Research*, 6(5): 137-145.
- Melachrinoudis, E. Xanthopoulos, Z. (2003). "Semi-obnoxious Single Facility Location in Euclidean Space". *Computers & Operations Research*, 30(4): 2191-2209.
- Marcos, C. Joaquín, S. (2007). "Undesirable facility location problems on multicriteria networks". *Computers & Operations Research*, 34(5): 1491-1514.
- Pavankumar, M. Ordonezb, F. Dessouky, M. M. (2012). "Facility location under demand uncertainty: Response to a large-scale bio-terror attack". *Socio-Economic Planning Sciences*, 46(1):78-87.
- Pugaa, M. Tancreza, J. (2016). "A heuristic algorithm for solving large location-inventory problems with demand uncertainty". *European Journal of Operational Research*, 259(2): 413-423.
- Plastria, F. (1996). "Optimal Location of Undesirable Facilities: A Selective Overview". *Belgian Journal of Operations Research Statistics and Computer Science*, 36(1): 109-127.
- Plastria, F. Carrizosa, E. (1999). "Undesirable facility location with minimal covering objectives". *European Journal of Operational Research*, 119(1): 158-180.
- Ravi, R. Sinha, A. (2006). "Hedging uncertainty: Approximation algorithms for stochastic optimization problems". *Mathematical Programming*, 108(1): 97–114
- Rosa, V.D. Hartmann, E. Gebhard, M. Wollenweber, J. (2014). "Robust capacitated facility location model for acquisitions under Uncertainty". *Computers & Industrial Engineering*, 72(1): 206–216.
- Rakas, J. Teodorovi, D. Kim, T. (2004). "Multi-objective modeling for determining location of undesirable facilities". *Transportation Research Part D*, 9(2): 125-138.
- Rodriguez, J.J. S. Garcia, C. G. Perez, J. M. Casermeiro, E. M. (2006). "A general model for the undesirable single facility location Problem". *Operations Research Letters*, 34(4): 427 – 436.

- Song, B. D. Morrison, J. R. Ko, Y. D. (2013). "Efficient location and allocation strategies for undesirable facilities considering their fundamental properties". *Comput. Ind. Eng.*, 65(3): 475–484.
- Sheppard, E. S. (1974). "A conceptual framework for dynamic location-allocation analysis". *Environment and Planning A*, 6(1): 547-564.
- Tuzkaya, G. Onut, S. Tuzkaya, R. Gulsun, B. (2008). "An analytic network process approach for locating undesirable facilities: An example from Istanbul, Turkey". *Journal of Environmental Management*, 88(4): 970–983.
- Tang, S.H. Boyer, O. Pedram, A. Yusuff, R. Zulkifli, N. (2013). "A Review on Multiple Criteria Undesirable Facility Location Problems". *J. Basic. Appl. Sci. Res.*, 8(3): 708-713.
- Weaver, J. R. Church, R. L. (1983). "Computational procedures for location problems on stochastic networks". *Transportation Science*, 17(2): 168-180.
- Wichapa, N. Khokhajaikiat, P. (2017). "Solving multi-objective facility location problem using the fuzzy analytical hierarchy process and goal programming: a case study on infectious waste disposal centers". *Operations Research Perspectives*, 4(1): 39–48.
- Yamaguchi, K. (2011). "Location of an undesirable facility on a network: A bargaining approach". *Mathematical Social Sciences*, 62(2): 104–108.

<sup>1</sup> Not in my backyard (NIMBY)

<sup>2</sup> Song et al

<sup>3</sup> Snyder

<sup>4</sup> Simulated annealing

<sup>5</sup> Mirchandani & otoni

<sup>6</sup> Louveaux & Thisse

<sup>7</sup> cooper

<sup>8</sup> Sheppard

<sup>9</sup> Mirchandani & Oudjit

<sup>10</sup> Weaver and church

<sup>11</sup> Approximation Algorithm

<sup>12</sup> Ravi & Sinha

<sup>13</sup> Berman and Otoni

<sup>14</sup> Pavankumar et al

<sup>15</sup> Rosa et al

<sup>16</sup> Gulpmar et al

<sup>17</sup> Hu et al

<sup>18</sup> N Markovic et al

<sup>19</sup> Puga & Tancrez

<sup>20</sup> E. Erkut, S. Neuman

<sup>21</sup> Daskin

<sup>22</sup> E Melachrinoudis

<sup>23</sup> E Melachrinoudis & TP Cullinane

<sup>24</sup> F Plastria

<sup>25</sup> Farber

<sup>26</sup> J Brimberg & H Juel

<sup>27</sup> F Plastria, E Carrizosa

<sup>28</sup> J Fernández, P Fernández & B Pelegrin

<sup>29</sup> E Melachrinoudis & Zaharias

<sup>30</sup> Rakas, J., Teodorović, D., & Kim

<sup>31</sup> Colebrook, M., Gutiérrez, J., & Sicilia, J

<sup>32</sup> Rodríguez et al

<sup>33</sup> Colebrook, M., & Sicilia, J

<sup>34</sup> G Tuzkaya et al

<sup>35</sup> K Yamaguchi

<sup>36</sup> Tang et al

<sup>37</sup> F Abastante et al

<sup>38</sup> Wichapa, N., & Khokhajaikiat, P

<sup>39</sup> Swap

<sup>40</sup> Reversion

<sup>41</sup> Insertion

<sup>42</sup> Mutation

<sup>43</sup> The Expected Value of Perfect Information (EVPI)