



## Proposing a Bi-level Programming Model for Multi-echelon Supply Chain with an Emphasis on Reliability in Uncertainty

### Mostafa Ekhtiari

Ph.D. Candidate, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: m\_ekhtiari@yahoo.com

### Mostafa Zandieh

\*Corresponding author, Associate Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: m\_zandieh@sbu.ac.ir

### Akbar Alam Tabriz

Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: a-tabriz@sbu.ac.ir

### Masood Rabieh

Assistant Prof., Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: m\_rabieh@sbu.ac.ir

### Abstract

**Objective:** Providing a bi-level programming model to solve the simultaneous problem of supplier selection and order allocation in multi-echelon supply chain is sought. The model will be proposed so that at the leader level, the supplier selection problem with the objective of increasing system reliability and at the follower level, the order allocation problem with the objective of reducing cost of system are formulated and customers' demand at the last echelon of the supply chain is considered as an uncertain parameter.

**Methods:** Modeling the supplier selection and order allocation problem is based on the bi-level programming model, so the robust optimization technique was used to deal with the problem of uncertainty and a bi-level genetic algorithm was used to obtain the optimal solutions.

**Results:** The results obtained from solving a real problem in the steel industry under various scenarios indicated that there is an opposing relationship between reliability and cost objectives, and increasing the number of chain members can lead to an increase in system reliability and cost. On the other hand, as increased reliability can lead to higher system costs, reliability reduction, which is mainly due to lack of quality and deficiency issues, can also lead to an increase in customers' dissatisfaction and, ultimately, an increase in aggregate system costs. Moreover, the results obtained in uncertain conditions, in comparison with definite conditions, indicated an unfavorable situation.

**Conclusion:** In order to improve the reliability of supply chain, the average reliability of the echelons in supply chain, which are at the lowest (highest) level in comparison to other echelons, should increase (decrease) in order to avoid additional costs. Besides, the

interactive approach in proposed methodology provides a suitable solution for maximizing the interests of leader and follower levels.

**Keywords:** Supplier selection and order allocation, Bi-level programming, Reliability, Robust optimization, Bi-level genetic algorithm.

**Citation:** Ekhtiari, M., Zandieh, M., Alam Tabriz, A., & Rabieh, M. (2019). Proposing a Bi-level Programming Model for Multi-echelon Supply Chain with an Emphasis on Reliability in Uncertainty. *Industrial Management Journal*, 11(2), 177-206. (in Persian)

---

Industrial Management Journal, 2019, Vol. 11, No.2, pp. 177-206

DOI: 10.22059/imj.2018.255562.1007414

Received: April 09, 2018; Accepted: November 08, 2018

© Faculty of Management, University of Tehran

Archive of SID



## ارائه یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی برای زنجیره تأمین چند مرحله‌ای با تأکید بر قابلیت اطمینان در شرایط عدم قطعیت

### مصطفی اختیاری

دانشجوی دکتری، گروه مدیریت تولید و عملیات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m\_ektari@yahoo.com

### مصطفی زندیه

\* نویسنده مسئول، دانشیار، گروه مدیریت صنایع، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m\_zandieh@sbu.ac.ir

### اکبر عالم تبریز

استاد، گروه مدیریت صنایع، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: a-tabriz@sbu.ac.ir

### مسعود ربیعه

استاد، گروه مدیریت صنایع، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانامه: m\_rabieh@sbu.ac.ir

## چکیده

**هدف:** در این مقاله، یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی برای حل مسئله هم‌زمان انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش در زنجیره تأمین چندمرحله‌ای ارائه شده است، به‌گونه‌ای که در سطح رهبر، مسئله انتخاب تأمین‌کننده با هدف افزایش قابلیت اطمینان سیستم و در سطح پیرو، مسئله تخصیص سفارش با هدف کاهش هزینه سیستم فرموله شده و تقاضای مشتریان در مرحله آخر زنجیره تأمین، غیرقطعی در نظر گرفته شود.

**روش:** روش مدل‌سازی مسئله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش، مدل برنامه‌ریزی دوسطحی است که در آن از تکنیک بهینه‌سازی استوار برای برخورد با شرایط عدم قطعیت مسئله و از الگوریتم ژنتیک دوسطحی برای دستیابی به جواب‌های بهینه مسئله استفاده می‌شود.

**یافته‌ها:** نتایج به‌دست‌آمده از حل یک مسئله واقعی در صنعت فولاد تحت سناریوهای مختلف، مؤید آن است که اهداف قابلیت اطمینان و هزینه، رابطه متعاضی با یکدیگر داشته و افزایش تعداد اعضای زنجیره به افزایش قابلیت اطمینان و هزینه سیستم منجر می‌شود. از سوی دیگر، همان‌گونه که افزایش قابلیت اطمینان می‌تواند به افزایش هزینه‌های سیستم منتهی شود، کاهش قابلیت اطمینان که به‌طور عمده از عدم رعایت مسائل کیفی و کمبود نشئت می‌گیرد نیز، به افزایش سطح عدم رضایتمندی مشتریان و در نهایت افزایش هزینه کل سیستم می‌انجامد. همچنین نتایج به‌دست‌آمده در شرایط عدم قطعیت در مقایسه با شرایط قطعی، وضعیت نامطلوبی را نشان می‌دهد.

**نتیجه‌گیری:** برای بهبود قابلیت اطمینان زنجیره تأمین باید متوسط قابلیت اطمینان مراحل از زنجیره تأمین که در مقایسه با سایر مراحل در کمترین (بیشترین) سطح قرار دارند، افزایش (کاهش) یابد تا از بروز هزینه‌های اضافه جلوگیری شود. همچنین رویکرد تعاملی در روش‌شناسی پیشنهاد شده، راهکار مناسبی را در پیشینه‌سازی منافع سطوح رهبر و پیرو ارائه می‌دهد.

**کلیدواژه‌ها:** انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش، برنامه‌ریزی دوسطحی، قابلیت اطمینان، بهینه‌سازی استوار، الگوریتم ژنتیک دوسطحی.

**استناد:** اختیاری، مصطفی؛ زندیه، مصطفی؛ عالم تبریز، اکبر؛ ربیعه، مسعود (۲۰۱۸). ارائه یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی برای زنجیره تأمین چند مرحله‌ای با تأکید بر قابلیت اطمینان در شرایط عدم قطعیت. مدیریت صنعتی، ۱۱(۲)، ۱۷۷-۲۰۶.

مدیریت صنعتی، ۱۳۹۸، دوره ۱۱، شماره ۲، صص. ۱۷۷-۲۰۶

DOI: 10.22059/imj.2018.255562.1007414

دریافت: ۱۳۹۷/۰۸/۲۰، پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۷

© دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

## مقدمه

اعضای سیستم‌های زنجیره تأمین امروزی، به‌طور عمده منافع و اهداف متعارضی با یکدیگر دارند و در سه حوزه کلی تأمین و تدارک، تولید و توزیع (پورتر<sup>۱</sup>، ۱۹۸۵) فعالیت می‌کنند. حوزه تأمین و تدارک در سیستم زنجیره تأمین عبارت است از انتخاب بهترین منابع و تأمین‌کنندگان در جهت افزایش کارایی زنجیره، کاهش هزینه‌ها، تحویل به‌موقع محصول با بالاترین کیفیت و افزایش سطح رضایتمندی مشتریان. یکی از موضوعاتی است که امروزه در ایجاد ارزش سیستم زنجیره تأمین نقش مهمی ایفا می‌کند، مقوله افزایش قابلیت اطمینان سیستم است که می‌تواند در مسئله انتخاب تأمین‌کنندگان در کانون توجه قرار گیرد. قابلیت اطمینان سیستم عبارت است از احتمال اینکه سیستم، طی دوره زمانی کارکردش، عملکرد مطلوب خود را تحت شرایط عملیاتی مشخص و با شیوه‌ای که مصرف‌کنندگان آن قبول دارند، انجام دهد (امبری، ۱۳۹۳؛ دیلون<sup>۲</sup>، ۱۹۹۲). حوزه تولید در سیستم زنجیره تأمین عبارت است از نظارت و پیگیری فعالیت‌های مرتبط با تولید و آماده‌سازی برای تحویل محصول. تمرکز جداگانه بر زیرسیستم‌های زنجیره تأمین، موجب ناکارایی و تحویل کالا/خدمت با هزینه زیاد در سیستم می‌شود. از این رو تمرکز زیرسیستم‌های مختلف برای هماهنگی به‌منظور کاهش هزینه و زمان تحویل کالا/خدمات به مصرف‌کننده نهایی، همواره در کانون توجه تصمیم‌گیران قرار دارد. حوزه توزیع در سیستم زنجیره تأمین عبارت است از مجموعه زیرسیستم‌هایی که وظیفه توزیع کالا میان مشتریان نهایی و نیز انتقال اطلاعاتی در خصوص نوع نیاز مشتریان و تعداد تقاضا به سایر زیرسیستم‌ها را بر عهده دارند. از موضوعات مهم در حوزه‌های تولید و توزیع، مسئله تخصیص بهینه سفارش به تأمین‌کنندگان با هدف کاهش هزینه است که می‌تواند به ارزش‌آفرینی در زنجیره تأمین بینجامد، اما پایه و اساس موفقیت در حوزه‌های اصلی زنجیره‌های تأمین امروزی را می‌توان در اتخاذ رویکرد تصمیم‌گیری صحیح در این حوزه‌ها دانست.

پژوهشگران انواع رویکردهای تصمیم‌گیری در زنجیره تأمین را به سه دسته، تصمیم‌گیری متمرکز، تصمیم‌گیری نامتمرکز و تصمیم‌گیری مبتنی بر هماهنگ‌سازی طبقه‌بندی کرده‌اند (یانگ، هونگ و لی<sup>۳</sup>، ۲۰۱۴). در رویکرد تصمیم‌گیری متمرکز، فرض می‌شود که کل زنجیره تأمین تحت کنترل یک تصمیم‌گیرنده مرکزی است و کل سیستم زنجیره به‌صورت واحدی یکپارچه فعالیت می‌کند. زنجیره تأمین متمرکز، تنها از لحاظ نظری حالت ایده‌آلی است؛ اما در عمل، زنجیره‌های تأمین در دنیای واقعی بر اساس این رویکرد مدیریت نمی‌شوند، چرا که به‌کارگیری رویکرد تصمیم‌گیری متمرکز در مدیریت زنجیره تأمین با موانعی نظیر افزایش هزینه‌های عملیاتی و نگهداری و کاهش قابلیت اطمینان سیستم روبه‌روست (ارتوگرال و وو<sup>۴</sup>، ۲۰۰۰).

در رویکرد تصمیم‌گیری نامتمرکز، هر یک از اعضای زنجیره تأمین، نهادهای اقتصادی مستقلی فرض می‌شوند که به‌طور مستقل به دنبال بهینه‌سازی سود و منافع خود هستند. به بیان دیگر، تصمیمی که برای عضوی از زنجیره بهینه است، ممکن است به هزینه‌های بسیاری برای سایر اعضای زنجیره منجر شود. این رویکرد موجب تضعیف عملکرد و ناکارایی زنجیره تأمین، کاهش سطح خدمت به مشتریان و در نهایت، افزایش هزینه تولید محصول می‌شود. در حالی که دو رویکرد بالا، حالت‌های غایی از رویکردهای تصمیم‌گیری در زنجیره‌های تأمین امروزی هستند، رویکرد تصمیم‌گیری

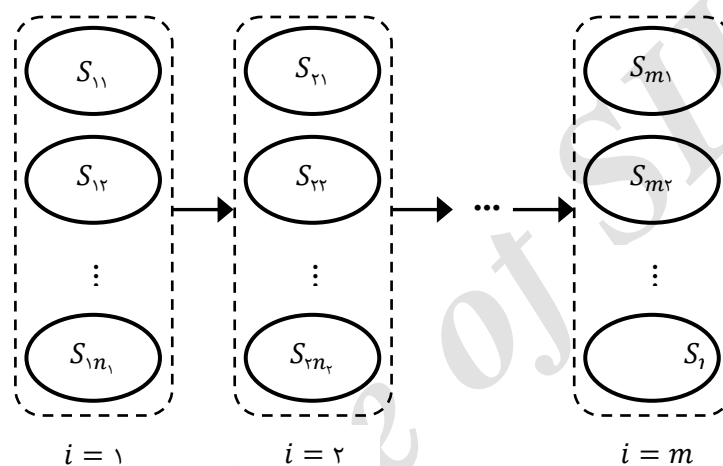
1. Porter  
3. Yang, Hong, & Lee

2. Dhillon  
4. Ertogral, & Wu

بر اساس هماهنگ‌سازی، حالت بینابین دو رویکرد یاد شده به شمار می‌آید. هدف این رویکرد، ایجاد هماهنگی و همکاری در تصمیم‌گیری‌ها و اولویت‌بندی‌های اعضای زنجیره تأمین است، به نحوی که آنها را به مشارکت با هم در جهت بهبود عملکرد کلی زنجیره تأمین ترغیب کند.

موضوع هماهنگ‌سازی در زنجیره تأمین تا کنون بسیار مطالعه و بررسی شده است، اما درباره اهمیت و لزوم هماهنگ‌سازی در زنجیره تأمین بحثی وجود ندارد، در حالی که مسئله اساسی، چگونگی هماهنگ‌سازی در زنجیره تأمین است و در مقاله حاضر به آن پرداخته می‌شود.

سیستم چند مرحله‌ای زنجیره تأمین نشان داده شده در شکل ۱ را در نظر بگیرید:



شکل ۱. سیستم زنجیره تأمین مورد مطالعه

که در آن  $m$  مرحله (نظیر تأمین‌کنندگان مواد اولیه، تولیدکنندگان، توزیع‌کنندگان، خرده‌فروشان) وجود دارد، به‌گونه‌ای که مرحله  $i$  ام متشکل از  $n_i$  عضو (واحد سازمانی) است و به‌صورت موازی با هم در ارتباط بوده و از نظر نوع فعالیت مشابه یکدیگرند. همچنین، کلیه مراحل به‌صورت سری با یکدیگر در ارتباط بوده و نوع فعالیت هر مرحله در مقایسه با سایر مراحل متفاوت است. هدف این مقاله، ارائه مدل برنامه‌ریزی دوسطحی جدید برای سیستم زنجیره تأمین نشان داده شده در شکل ۱ است، به نحوی که در سطح اول بهترین اعضای هر مرحله از زنجیره با هدف افزایش قابلیت اطمینان سیستم انتخاب شده و در سطح دوم مقدار بهینه سفارش قابل تخصیص به اعضای منتخب با هدف کاهش هزینه سیستم تعیین می‌شود.

### پیشینه تجربی پژوهش

در جدول ۱ خلاصه‌ای از تحقیقات انجام شده در خصوص انواع رویکردهای تصمیم‌گیری در سیستم‌های زنجیره تأمین و مدل‌سازی مسائل مرتبط با آنها ارائه شده است.

جدول ۰۱. مروری بر پیشینه تحقیق

| رویکرد مدل سازی و روش حل مسئله   | شرایط مسئله |       | تابع هدف مسئله                   |      |             |              |                    | رویکرد تصمیم‌گیری |         | محقق/محققان   |
|--|-------------|-------|----------------------------------|------|-------------|--------------|--------------------|-------------------|---------|---|
|  | عدم قطعیت   | قطعیت | انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش |      | تخصیص سفارش |              | انتخاب تأمین‌کننده |                   |         |   |
|  |             |       | هزینه و سایر                     | قطعا | اطمینان     | هزینه و سایر | قطعا               | هزینه و سایر      | اطمینان |   |
| فرایند تحلیل شبکه‌های - مدل غیرخطی عدد صحیح مختلطاً                                | ✓           | ✓     | ✓                                |      |             |              |                    |                   |         | زرعی و رفیعی <sup>۱</sup> (۲۰۱۰)                        |
| بهینه‌سازی عدد صحیح مختلطاً استوار - تکنیک تجزیه بندز - تکنیک شاخه و ارزش          | ✓           |       |                                  |      |             | ✓            |                    |                   |         | نگی، سان و فاوور <sup>۲</sup> (۲۰۱۰)                    |
| تحلیل سلسله‌مراتبی قازی  | ✓           |       |                                  |      |             |              |                    | ✓                 |         | پانامورسی، ماتیالاگان و پارتیبان <sup>۳</sup> (۲۰۱۱)    |
| مدل برنامه‌ریزی خطی قازی - SWOT  | ✓           |       | ✓                                |      |             |              |                    |                   |         | حسن‌زاده امین، زرعی و ژانگ <sup>۴</sup> (۲۰۱۱)          |
| مدل برنامه‌ریزی چندهدفه - شبیه‌سازی - بهینه‌سازی استوار                            | ✓           |       |                                  |      |             |              | ✓                  |                   |         | ریبیه، مدرس و آذر <sup>۵</sup> (۲۰۱۱)                   |
| تحلیل پوششی داده‌ها - تاپسیس - SWOT  |             | ✓     | ✓                                |      |             |              | ✓                  |                   |         | چن <sup>۶</sup> (۲۰۱۱)                                  |
| مدل برنامه‌ریزی خطی قازی   | ✓           |       |                                  |      |             | ✓            |                    |                   |         | حاله و حمیدی <sup>۷</sup> (۲۰۱۱)                        |
| مدل برنامه‌ریزی چندهدفه - روش ال. بی. متریک - الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی تریید | ✓           |       | ✓                                |      |             |              |                    |                   |         | اسفندیاری و سیف برقی <sup>۸</sup> (۲۰۱۲)                |
| الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی چند معیاره اصلاح شده - هماهنگی زنجیره تأمین              |             | ✓     |                                  |      |             |              | ✓                  |                   |         | ژانگ، دنگ، چان و ژانگ <sup>۹</sup> (۲۰۱۳)               |
| مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی مختلطاً - تاپسیس                                      |             | ✓     | ✓                                |      |             |              |                    |                   |         | سینگ <sup>۱۰</sup> (۲۰۱۴)                               |
| منطق قازی - تاپسیس - SWOT  | ✓           |       | ✓                                |      |             |              |                    |                   |         | عرب‌زاد، قربانی، زرعی و شیروهندزاد <sup>۱۱</sup> (۲۰۱۵) |

1. Razmi, & Rafiei  
4. Hassanzadeh Amin, Razmi, & Zhang  
7. Haleh, & Hamdi  
10. Singh

2. Ng, Sun, & Fowler  
5. Rabieh, Modarres, & Azar  
8. Esfandiari, & Seifbarghi  
11. Arabzad, Ghorbani, Razmi, & Shirouyehzad

3. Punniyamoorthy, Mathiyalagan, & Parthiban  
6. Chen  
9. Zhang, Deng, Chan, & Zhang  
12. He, Xie, Wu, Hu, & Dai

ادامه جدول ۱

| رویکرد مدل سازی و روش حل مسئله  | شرایط مسئله |       | تابع هدف مسئله                   |                |              |                |                    |         | رویکرد تصمیم گیری |         |         | محقق/محققان                                      |
|---|-------------|-------|----------------------------------|----------------|--------------|----------------|--------------------|---------|-------------------|---------|---------|--|
|   | عدم قطعیت   | قطعیت | انتخاب تأمین کننده و تخصیص سفارش |                | تخصیص سفارش  |                | انتخاب تأمین کننده |         | هماهنگ سازی       | نامتکرر | متمم کر |  |
|   |             |       | هزینه و سایر                     | قابلیت اطمینان | هزینه و سایر | قابلیت اطمینان | سایر               | اطمینان |                   |         |         |  |
| مدل برنامه ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند هدفه فازی - الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات - پرومیتی فازی | ✓           |       | ✓                                |                |              |                |                    |         |                   |         | ✓       | ونکاتسان و گو (۲۰۱۶)                             |
| فراراداد بازخورد - قابلیت اطمینان - هماهنگی زنجیره تأمین  | ✓           |       |                                  | ✓              |              |                |                    |         | ✓                 |         |         | هی، زی، وو، هو و دای (۲۰۱۶)                      |
| فرایند تحلیل سلسله مراتبی - تاپسیس فازی - مدل بهینه سازی چند هدفه                                 | ✓           |       | ✓                                |                |              |                |                    |         |                   |         | ✓       | حمدان و چایو (۲۰۱۷)                              |
| تحلیل پوششی داده ها - بهینه استوار - برنامه ریزی آرمانی   | ✓           |       |                                  |                |              |                |                    | ✓       |                   |         | ✓       | شعبان پور، پوینی، فرضی پور صانق (۲۰۱۷)           |
| برنامه ریزی چندهدفه - روش استدلال موردگرا   |             | ✓     | ✓                                |                |              |                |                    |         |                   |         | ✓       | فائر، قدسی پور و فاطمی قمی (۱۳۸۵)                |
| مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط - ارزش در معرض خطر   | ✓           |       |                                  | ✓              |              |                |                    |         |                   |         | ✓       | حسینی گودزی و ربانی (۱۳۹۱)                       |
| برنامه ریزی چندهدفه - روش تجزیه بندرز   |             | ✓     | ✓                                |                |              |                |                    |         |                   |         | ✓       | چهارسوقی و اشرفی (۱۳۹۲)                          |
| تاپسیس - برنامه ریزی فازی چند هدفه - مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط                               | ✓           |       |                                  | ✓              |              |                |                    |         |                   |         | ✓       | نصیری و پورمحمدضیا (۱۳۹۴)                        |
| برنامه ریزی چند هدفه - منطقی فازی - مسیریابی سبز  | ✓           |       | ✓                                |                |              |                |                    |         |                   |         | ✓       | رمضان زاده برکی و کیانفر (۱۳۹۴)                  |
| فرایند تحلیل سلسله مراتبی - تاپسیس - الگوریتم ابتکاری فوردیس - ویستر                              |             | ✓     | ✓                                |                |              |                |                    |         |                   |         | ✓       | ابوزری و نیاوندی (۱۳۹۵)                          |
| مدل برنامه ریزی عدد صحیح مختلط - برنامه ریزی چندهدفه - برنامه ریزی آرمانی - تخفیف مقداری          | ✓           |       | ✓                                |                |              |                |                    |         |                   |         | ✓       | نورمحمدی شالکه، پایدار و حاجی آقایی کسنلی (۱۳۹۵) |
| برنامه ریزی دو سطحی - قابلیت اطمینان - مدل SCOR - بهینه سازی استوار - الگوریتم ژنتیک دو سطحی      | ✓           |       | ✓                                | ✓              |              |                |                    |         | ✓                 |         | ✓       | بژوهش حاضر                                       |

1. Venkatesan, S.P. & Goh
2. He, Xie, Wu, Hu, & Dai
3. Hamdan, & Cheaitou
4. Shahampour, Yousefi, & Farzipoor Saen

پژوهش حاضر با در نظر گرفتن اهمیت موضوعاتی نظیر رویکرد تصمیم‌گیری مبتنی بر هماهنگ‌سازی در زنجیره تأمین، اندازه‌گیری و افزایش قابلیت اطمینان سیستم در شرایط عدم قطعیت و نیز، نبود مطالعات کافی در خصوص به‌کارگیری هم‌زمان این موضوعات در مدل‌سازی و حل مسئله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش و ارائه راهکارهای لازم، این نوآوری‌ها را به همراه دارد: ۱. به‌کارگیری رویکرد تصمیم‌گیری مبتنی بر هماهنگی در حل مسائل زنجیره تأمین؛ ۲. مدل‌سازی هم‌زمان مسئله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش بر اساس مدل برنامه‌ریزی دوسطحی در شرایط عدم قطعیت؛ ۳. توجه به مسئله آلودگی نشئت گرفته از تولید محصولات در مدل‌سازی مسئله؛ ۴. اندازه‌گیری قابلیت اطمینان اعضای زنجیره توسط سنج‌های مدل SCOR و در نظر گرفتن قابلیت اطمینان کل سیستم به‌عنوان تابع هدف مسئله انتخاب تأمین‌کننده؛ ۵. تشکیل مدل هم‌تراز مرتبط با مسئله غیر قطعی توسط تکنیک بهینه‌سازی استوار؛ ۶. حل مسئله هم‌تراز غیرقطعی توسط الگوریتم ژنتیک دوسطحی. شایان ذکر است که رویکرد متفاوت این پژوهش در مقایسه با تحقیقات مشابه در خصوص موضوع قابلیت اطمینان در مسائل زنجیره تأمین، علاوه‌بر نحوه اندازه‌گیری آن توسط مدل SCOR، لحاظ کردن قابلیت اطمینان به‌عنوان تابع هدف مسئله انتخاب تأمین‌کننده است.

### پیشینه نظری پژوهش

#### مدل برنامه‌ریزی دوسطحی

در رویکرد تصمیم‌گیری مشترک و مبتنی بر هماهنگی، فرایند تصمیم‌گیری با همکاری اعضای زنجیره تأمین شکل می‌گیرد که به رفع تضاد منافع هر یک از اعضا انجامیده و برای هر یک از اعضای زنجیره، دیدگاه روشنی در خصوص فعالیت‌ها و تصمیمات زنجیره تأمین ایجاد می‌کند. از جمله ابزارهای تصمیم‌گیری مشترک می‌توان به مدل‌های تصمیم‌گیری ریاضی نظیر تئوری بازی‌ها در سطوح رهبر و پیرو اشاره کرد (لنگ و پارلار<sup>۱</sup>، ۲۰۰۵). مسائل دوجانبه که در سطوح رهبر (اول) و پیرو (دوم) تعریف می‌شوند، به بازی‌های استکلبرگ در تئوری بازی‌ها نزدیک‌اند، زیرا در هر دوی آنها به دو سطح مسائل بهینه‌سازی پرداخته می‌شود. در این‌گونه مسائل، فضای محدودیت‌های مسئله سطح بالاتر، به‌طور ضمنی توسط مسئله بهینه‌سازی سطح پایین‌تر مشخص می‌شود (کولسون، مارکوت و ساوارد<sup>۲</sup>، ۲۰۰۷) که در حالت کلی، مدل تصمیم‌گیری ریاضی مربوط به این مسائل را برنامه‌ریزی دوسطحی می‌نامند. در مسائل برنامه‌ریزی دوسطحی دو گونه متغیر تعریف می‌شوند: متغیرهای کنترل و تصمیم (کو و هان<sup>۳</sup>، ۲۰۱۱). متغیر کنترل، متغیری است که تصمیم‌گیرنده در سطح رهبر/پیرو قادر است مقداری برای آن تعیین کند و متغیر تصمیم، متغیر مجهولی است که پس از حل مسئله مقدار آن تعیین می‌شود، به نحوی که متغیر کنترل یک سطح می‌تواند متغیر تصمیم سطح دیگر باشد. در این مقاله به‌منظور مدل‌سازی هم‌زمان مسئله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش، یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی به شرح زیر معرفی می‌شود.

#### مدل‌سازی مسئله انتخاب تأمین‌کننده با هدف افزایش قابلیت اطمینان در سطح رهبر

در این پژوهش، مدل‌سازی مسئله انتخاب تأمین‌کنندگان (اعضای) زنجیره تأمین با هدف افزایش قابلیت اطمینان سیستم

1. Leng, & Parlar  
3. Kuo, & Han

2. Colson, Marcotte, & Savard



به‌گونه‌ای است که از مدل SCOR برای محاسبه قابلیت اطمینان هر یک از اعضا استفاده می‌شود. مدل SCOR ابزاری برای تحلیل و پیکربندی زنجیره تأمین است که توسط انجمن زنجیره تأمین طراحی شده است. مدل SCOR، سنجه‌هایی را در ارتباط با شاخص‌های عملیاتی زنجیره تأمین در سه سطح ارائه می‌دهد. شاخص‌های عملیاتی عبارت‌اند از شاخص‌های زنجیره تأمین که به‌منظور تحلیل و سنجش استراتژی زنجیره در هر سطح و نیز، مقایسه آن با سایر استراتژی‌ها استفاده می‌شود. سنجه‌های سطح یک از نظر سیستمی به پنج طبقه دسته‌بندی می‌شوند که قابلیت اطمینان، انعطاف‌پذیری و پاسخگویی از جمله شاخص‌های حوزه مشتریان و هزینه‌ها و درآمدها از جمله شاخص‌های حوزه داخلی سازمان به شمار می‌آیند. جدول ۲، نحوه محاسبه هر یک از سنجه‌های سه سطح مربوط به شاخص قابلیت اطمینان سیستم زنجیره تأمین را ارائه می‌کند (استفان و بادر<sup>۱</sup>، ۲۰۰۷).

جدول ۲. نحوه محاسبه سنجه‌های تعریف شده در سطوح شاخص قابلیت اطمینان مدل SCOR

| سطح     | کد               | سنجه  | نحوه محاسبه   |
|---------|------------------|---|---|
| یک      | RL.۱.۱           | درصد تکمیل سفارش  | نسبت تعداد سفارش تکمیل شده به تعداد کل سفارش‌ها                                     |
|         | RL.۲.۱           | درصد سفارش کامل تحویل داده شده  | نسبت تعداد کل سفارش تحویل شده به‌طور کامل به تعداد کل سفارش تحویل شده               |
|         | RL.۲.۲           | درصد تحویل سفارش به مشتریان در موعد تحویل                                 | نسبت تعداد کل سفارش تحویل شده در موعد مقرر به تعداد کل سفارش تحویل شده              |
|         | RL.۲.۳           | مستندسازی دقیق  | نسبت تعداد کل سفارش تحویل شده با رعایت مستندسازی دقیق به تعداد کل سفارش تحویل شده   |
| دو      | RL.۲.۴           | وضعیت تکمیل   | نسبت تعداد کل سفارش تحویل شده در وضعیت تکمیل به تعداد کل سفارش تحویل شده            |
|         | RL.۳.۱           | دقت در تعداد سفارش تحویل دادنی  | نسبت تعداد کل سفارش تکمیل شده بدون نقص به تعداد کل سفارش‌ها                         |
|         | RL.۳.۲           | دقت در نوع سفارش تحویل دادنی  | نسبت تعداد سفارش تحویل شده بدون نقص به تعداد کل سفارش‌ها                            |
|         | RL.۳.۳           | مدت زمان دریافت سفارش مشتری تا موعد تعهد شده تحویل سفارش                  | نسبت تعداد سفارش تحویل شده بدون تأخیر زمانی به تعداد کل سفارش‌ها                    |
| سه      | RL.۳.۴           | دقت در نوع سفارش تحویل دادنی  | نسبت تعداد سفارش تحویل شده بدون خطای مکانی به تعداد کل سفارش‌ها                     |
|         | RL.۳.۵           | دقت در مستندسازی ارسال سفارش  | نسبت تعداد سفارش تحویل شده بدون خطای مستندسازی ارسال سفارش به تعداد کل سفارش‌ها     |
|         | RL.۳.۶           | دقت در مستندسازی قبول سفارش   | نسبت تعداد سفارش تحویل شده بدون خطای مستندسازی قبول سفارش به تعداد کل سفارش‌ها      |
|         | RL.۳.۷           | دقت در مستندسازی پرداخت وجه خرید  | نسبت تعداد سفارش تحویل شده بدون خطای مستندسازی پرداخت وجه خرید به تعداد کل سفارش‌ها |
|         | RL.۳.۸           | سفارش تحویل شده بدون آسیب   | نسبت تعداد سفارش تحویل شده بدون هرگونه آسیب دیدگی به تعداد کل سفارش‌ها              |
|         | RL.۳.۹           | سفارش تحویل شده بدون عیب و نقص  | نسبت تعداد سفارش تحویل شده بدون هرگونه عیب و نقص به تعداد کل سفارش‌ها               |
|         | RL.۳.۱۰          | درصد نصب‌های بدون خطا   | نسبت تعداد سفارش تحویل شده بدون مشکلات نصب سفارش به تعداد کل سفارش‌ها               |
| RL.۳.۱۱ | ضمانت‌ها و عواید | نسبت تعداد سفارش تحویل شده بدون نقص در گارانتی سفارش به تعداد کل سفارش‌ها |   |

در این مقاله برای محاسبه قابلیت اطمینان کل سیستم زنجیره تأمین نشان داده شده در شکل ۱، به ترتیب زیر عمل می‌شود:

۱. برای هر یک از اعضای سیستم، هر یک از سنجه‌های معرفی شده در جدول ۲ طی ادوار مختلف ارزیابی محاسبه شده و در نهایت، میانگین نتایج هر یک از سنجه‌ها به‌عنوان مقدار سنجه مد نظر قرار می‌گیرد. چنانچه میانگین نتایج مربوط به سنجه سطح  $k$  ام ( $k = 1, 2, 3$ ) و زیر سطح  $l$  ام ( $l = 1, \dots, 11$ ) طی دوره زمانی  $T$  را با  $\overline{RL.k.l}$  نمایش دهیم، آنگاه:

$$\overline{RL.k.l} = \frac{\sum_{t=1}^T RL.k.l_t}{T} \quad \text{رابطه (۱)}$$

۲. چنانچه وزن اهمیت سنجه سطح  $k$  ام و زیر سطح  $l$  ام با  $w_{RL.k.l} \in [0, 1]$  نمایش داده شود، آنگاه قابلیت اطمینان عضو  $z$  ام از زیرسیستم  $i$  ام ( $R_{ij}$ ) برابر است با:

$$R_{ij} = \sum_{k=1}^3 \sum_{l=1}^{11} (w_{RL.k.l} \times \overline{RL.k.l}), (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n_i) \quad \text{رابطه (۲)}$$

۳. قابلیت اطمینان کل سیستم زنجیره تأمین ( $R$ ) برابر است با:

$$R = \prod_{i=1}^m \left( 1 - \prod_{j=1}^{n_i} (1 - R_{ij}) \right) \quad \text{رابطه (۳)}$$

بر این اساس، مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح انتخاب تأمین‌کننده با هدف افزایش قابلیت اطمینان سیستم نشان داده شده در شکل ۱ به صورت رابطه‌های ۴ تا ۸ است.

$$\max R = \prod_{i=1}^m \left( 1 - \prod_{j=1}^{n_i} (1 - R_{ij})^{y_{ij}} \right) \quad \text{رابطه (۴)}$$

s.t.

$$1 \leq \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij} \leq K_i; \forall i (i = 1, \dots, m) \quad \text{رابطه (۵)}$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} C_{ij} y_{ij} \leq B_i; \forall i (i = 1, \dots, m) \quad \text{رابطه (۶)}$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} Q_{ij} \geq \sum_{j=1}^{n_{i+1}} Q_{(i+1)j}; \forall i (i = m - 1) \quad \text{رابطه (۷)}$$

$$y_{ij} \in \{0, 1\}; \forall i, j (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n_i) \quad \text{رابطه (۸)}$$

به‌گونه‌ای که  $n_i$ : تعداد اعضا در مرحله  $i$  ام زنجیره؛  $K_i$ : حداکثر تعداد اعضای قابل تخصیص به مرحله  $i$  ام؛  $B_i$ : کل بودجه در اختیار برای تأمین هزینه فعالیت‌های مورد نیاز در مرحله  $i$  ام؛  $R_{ij}$ : قابلیت اطمینان عضو  $z$  ام از مرحله  $i$

ام؛  $C_{ij}$  : هزینه تأمین فعالیت مورد نیاز در عضو  $Z$  ام از مرحله  $i$  ام و متغیر تصمیم  $y_{ij}$  (اگر عضو  $Z$  ام از مرحله  $i$  ام انتخاب شود  $y_{ij} = 1$ ؛ در غیر این صورت  $y_{ij} = 0$ ).

رابطه‌های ۴ تا ۸ به ترتیب تابع هدف قابلیت اطمینان کل سیستم، قید حداقل و حداکثر تعداد اعضای قابل تخصیص به هر یک از مراحل، قید حداکثر بودجه تخصیص یافته به منظور تأمین هزینه فعالیت‌های مراحل، قید بزرگ‌تر بودن مجموع موجودی‌های هر مرحله از مجموع موجودی‌های مرحله بعدی و قلمرو هر یک از متغیرهای تصمیم مدل را بیان می‌کند.

### مدل سازی مسئله تخصیص سفارش به اعضای منتخب با هدف کاهش هزینه در سطح پیرو

پس از انتخاب تأمین‌کنندگان سیستم، باید مسئله تخصیص سفارش به هر یک از اعضای منتخب با هدف کاهش هزینه‌های سیستم بررسی شود، اما به دلیل اهمیت پارامتر تقاضای محصول در تصمیم‌گیری‌ها و از آنجا که نوسان‌های تقاضا موجب می‌شود که اطلاعات دقیقی در خصوص این پارامتر در اکثر زنجیره‌های تأمین در دسترس نباشد، در مدل‌سازی مسئله تخصیص سفارش، پارامتر تقاضا به صورت غیرقطعی در نظر گرفته می‌شود (حاله و حمیدی، ۲۰۱۱؛ شاه و سونی، ۲۰۱۱). مدل ارائه شده در رابطه‌های ۹ تا ۱۴، مسئله غیرقطعی تخصیص سفارش با هدف کاهش هزینه سیستم نشان داده شده در شکل ۱ را ارائه می‌کند.

$$\min TC = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \left( H_i(Q_{ij} - Q_{i+1}) + H_m(Q_{mj} - \bar{D}_m) + S_{ij} \left( \frac{Q_{ij}}{v_{ij}} \right) + P_{ij}Q_{ij} + \right. \quad \text{رابطه ۹}$$

$$\left. E_{pj} g_{pj} Q_{p+1} + w_i(Cap_i - Q_{ij}) \right);$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^{n_i} Q_{ij} \geq \bar{D}_i; \quad \forall i (i = m) \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} Q_{ij} \leq Cap_i; \quad \forall i (i = 1, \dots, m) \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$\sum_{j=1}^{n_p} E_{pj} \leq U_{pe} \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$Q_{ij} \geq m_{ij}y_{ij}; \quad \forall i, j (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n_i) \quad \text{رابطه ۱۳}$$

$$Q_{ij} \leq M_{ij}y_{ij}; \quad \forall i, j (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n_i) \quad \text{رابطه ۱۴}$$

به گونه‌ای که  $H_{ij}$  هزینه نگهداری محصول در انبار عضو  $Z$  ام از مرحله  $i$  ام؛  $Q_{ij}$  متغیر تصمیم تعداد محصول تأمین شده توسط عضو  $Z$  ام از مرحله  $i$  ام؛  $Q_{pj}$  متغیر تصمیم تعداد محصول تأمین شده توسط عضو  $Z$  ام از مرحله تولیدکننده؛  $\bar{D}_i$  تقاضای غیرقطعی سالانه در مرحله  $i$  ام؛  $\bar{D}_p$  تقاضای غیرقطعی سالانه در مرحله تولیدکننده؛  $Cap_i$  حداکثر ظرفیت تأمین در مرحله  $i$  ام؛  $S_{ij}$  هزینه سفارش‌دهی (ثبت سفارش، حمل و نقل، پیگیری، بارگذاری، باربرداری و غیره) توسط عضو  $Z$  ام از مرحله  $i$  ام؛  $P_{ij}$  هزینه خرید محصول توسط عضو  $Z$  ام از مرحله  $i$  ام؛  $v_{ij}$  مقدار ظرفیت حمل توسط حمل‌کننده

مستقر در عضو  $z$  ام از مرحله  $i$  ام؛  $n_p$  تعداد اعضای مرحله تولیدکننده؛  $E_{pj}$  سطح تولید آلودگی گازهای گلخانه‌ای توسط عضو  $z$  ام از مرحله تولیدکننده، به گونه‌ای که  $E_{pj} = Q_{pj} \times \alpha$ ؛  $\alpha$  فاکتور تابع آلودگی (تن آلودگی بر تعداد محصول)؛  $t_{pj}$  هزینه جریمه تولید آلودگی گازهای گلخانه‌ای توسط عضو  $z$  ام از مرحله تولیدکننده؛  $U_{pe}$  حداکثر سطح مجاز تولید آلودگی گازهای گلخانه‌ای توسط مرحله تولیدکننده؛  $m_{ij}$  حداقل تعداد سفارش محصول از عضو  $z$  ام از مرحله  $i$  ام؛  $M_{ij}$  حداکثر تعداد سفارش محصول از عضو  $z$  ام از مرحله  $i$  ام؛  $w_i$  هزینه عدم استفاده از حداکثر فضای (ظرفیت) موجود در مرحله  $i$  ام؛  $TC$  هزینه کل سیستم زنجیره تأمین و متغیر تصمیم  $y_{pj}$  (اگر عضو  $z$  ام از مرحله تولیدکننده انتخاب شود  $y_{pj} = 1$ ، در غیر این صورت  $y_{pj} = 0$ ).

رابطه‌های ۹ تا ۱۴ به ترتیب تابع هدف هزینه کل سیستم (شامل هزینه‌های نگهداری، سفارش‌دهی، خرید، جریمه تولید آلودگی هوا و عدم استفاده از حداکثر فضای موجود)، قید تقاضای غیرقطعی مرحله آخر، قید حداکثر ظرفیت تأمین موجودی در هریک از مراحل، قید حداکثر سطح مجاز تولید آلودگی گازهای گلخانه‌ای در مرحله تولیدکننده و بازه تغییرات مجاز تعداد سفارش تأمین شده توسط هریک از اعضای زنجیره را بیان می‌کند. عبارتهای  $\sum_{j=1}^{n_p} E_{pj} g_{pj} Q_{p+1}$  و  $\sum_{j=1}^{n_p} E_{pj} \leq U_{pe}$  به ترتیب تابع هزینه‌ای و محدودیت آلودگی هوا در مرحله تولیدکننده هستند (روزبه نیا، همتی‌فر و اخوان نیایی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۵). در نهایت، مدل برنامه‌ریزی دوسطحی پیشنهاد شده در مقاله حاضر، برای حل مسئله هم‌زمان انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش مطابق با رابطه ۱۵ است.  $y_{ij}$  و  $Q_{ij}$  در مدل رابطه ۱۵، به ترتیب متغیرهای تصمیم (مجهول) در سطوح رهبر و پیرو هستند که با حل مسئله، مقدار آنها مشخص می‌شود. هدف از مدل رابطه ۱۵، حداکثر کردن تابع هدف قابلیت اطمینان در سطح رهبر و حداقل کردن تابع هدف هزینه در سطح پیرو است. مدل یاد شده به دلیل وجود پارامتر  $\bar{D}_i$  از نوع غیرقطعی است که در این مقاله از تکنیک بهینه‌سازی استوار به منظور برخورد با این پارامتر استفاده می‌شود.

$$\max R = \prod_{i=1}^m \left( 1 - \prod_{j=1}^{n_i} (1 - R_{ij})^{y_{ij}} \right) \quad \text{رابطه ۱۵}$$

s.t.

$$1 \leq \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij} \leq K_i; \quad \forall i (i = 1, \dots, m)$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} C_{ij} y_{ij} \leq B_i; \quad \forall i (i = 1, \dots, m)$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} Q_{ij} \geq \sum_{j=1}^{n_{i+1}} Q_{(i+1)j}; \quad \forall i (i = 1, \dots, m-1)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}; \quad \forall i, j (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n_i)$$

$$\min TC = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \left( H_i(Q_{ij} - Q_{i+1}) + H_m(Q_{mj} - \bar{D}_m) + S_{ij} \left( \frac{Q_{ij}}{v_{ij}} \right) + P_{ij} Q_{ij} + E_{pj} g_{pj} Q_{p+1} + w_i(Cap_i - Q_{ij}) \right)$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^{n_i} Q_{ij} \geq \bar{D}_i; \quad \forall i (i = m)$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} Q_{ij} \leq Cap_i; \forall i (i = 1, \dots, m)$$

$$\sum_{j=1}^{n_p} E_{pj} \leq U_{pe}$$

$$Q_{ij} \geq m_{ij} y_{ij}; \forall i, j (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n_i)$$

$$Q_{ij} \leq M_{ij} y_{ij}; \forall i, j (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n_i)$$

### تکنیک بهینه‌سازی استوار

مسائل مربوط به تصمیم‌گیری، اغلب به دلیل بی‌دقتی، تغییرپذیری مستمر و ناتوانی در پیش‌بینی وقایع آتی، با عدم قطعیت‌هایی روبه‌رو است. تکنیک بهینه‌سازی استوار از جمله روش‌های مشهور در حل مسائل غیرقطعی به شمار می‌آید که وجود مزایایی نظیر عدم وابستگی به توزیع دقیق پارامترهای غیرقطعی و عدم حساسیت زیاد خروجی مدل به مقدار دقیق پارامترها به دلیل استواری مدل، موجب تمایز بیشتر این تکنیک و سایر روش‌های مرتبط شده است. در این مقاله یکی از مدل‌های جدید بهینه‌سازی استوار با عنوان مدل برنامه‌ریزی استوار منعطف - امکان‌پذیری ترکیبی (پیشوایی و فضلی خلف<sup>۱</sup>، ۲۰۱۶) استفاده می‌شود که بر اساس آن، مدل همتراز استوار مسئله فرموله شده در مدل رابطه ۱۵ مطابق با مدل رابطه ۱۶ است.

$$\max_Q R = \prod_{i=1}^m \left( 1 - \prod_{j=1}^{n_i} (1 - R_{ij})^{y_{ij}} \right) \quad \text{رابطه ۱۶}$$

s.t.

$$1 \leq \sum_{j=1}^{n_i} y_{ij} \leq K_i; \forall i (i = 1, \dots, m)$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} C_{ij} y_{ij} \leq B_i; \forall i (i = 1, \dots, m)$$

$$\sum_{j=1}^{n_i} Q_{ij} \geq \sum_{j=1}^{n_{i+1}} Q_{(i+1)j}; \forall i (i = 1, \dots, m-1)$$

$$y_{ij} \in \{0,1\}; \forall i, j (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n_i)$$

$$\min_{TC} TC = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{n_i} \left[ H_i(Q_{ij} - Q_{i+1}) + H_m \left( Q_{mj} - \left( \frac{D_m^{(p)} + D_m^{(m)} + D_m^{(o)}}{3} \right) \right) + S_{ij} \left( \frac{Q_{ij}}{v_{ij}} \right) + P_{ij} Q_{ij} + E_{pj} g_{pj} Q_{p+1} + w_i (Cap_i - Q_{ij}) \right]$$

$$+ \pi \left[ H_i(Q_{ij} - Q_{i+1}) + H_i(Q_{ij} - D_m^{(o)}) + S_{ij} \left( \frac{Q_{ij}}{v_{ij}} \right) + P_{ij} Q_{ij} + E_{pj} g_{pj} Q_{p+1} + w_i (Cap_i - Q_{ij}) \right]$$

$$- \left( H_i(Q_{ij} - Q_{i+1}) + H_i \left( Q_{ij} - \left( \frac{D_m^{(p)} + D_m^{(m)} + D_m^{(o)}}{3} \right) \right) + S_{ij} \left( \frac{Q_{ij}}{v_{ij}} \right) + P_{ij} Q_{ij} + E_{pj} g_{pj} Q_{p+1} + w_i (Cap_i - Q_{ij}) \right) \Bigg]$$

$$+ \omega \left[ D_m^{(m)} - \delta \left( \frac{D_m^{(m)} + D_m^{(o)}}{2} \right) - (1 - \delta) \left( \frac{D_m^{(p)} + D_m^{(m)}}{2} \right) \right] + \gamma \left[ \left( \frac{t_m^{(o)} + t_m^{(m)} + t_m^{(p)}}{3} \right) (1 - \alpha) \right]$$

s.t.

$$\sum_{j=1}^{n_m} Q_{mj} \geq \left[ \delta \left( \frac{D_m^{(m)} + D_m^{(o)}}{2} \right) + (1 - \delta) \left( \frac{D_m^{(p)} + D_m^{(m)}}{2} \right) \right] - \left( \frac{t_m^{(o)} + t_m^{(m)} + t_m^{(p)}}{3} \right) (1 - \alpha)$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{n_i} Q_{ij} &\leq Cap_i; \quad \forall i (i = 1, \dots, m) \\ \sum_{j=1}^{n_p} E_{pj} &\leq U_{pe} \\ Q_{ij} &\geq m_{ij}y_{ij}; \quad \forall i, j (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n_i) \\ Q_{ij} &\leq M_{ij}y_{ij}; \quad \forall i, j (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n_i) \\ 0 &\leq \alpha \leq 1, \quad 0.5 < \delta \leq 1 \end{aligned}$$

به‌گونه‌ای که  $\alpha$  حداقل سطح برآورده‌شدن محدودیت غیرقطعی تقاضا و  $\pi$ ،  $\omega$  و  $\gamma$  ضرایب اهمیت اجزای استواری در تابع هدف هزینه است.

با توجه به ماهیت غیرخطی مدل رابطه ۱۶ که با افزایش تعداد متغیرهای صفر و یک آن، حل مسئله با پیچیدگی همراه می‌شود و نیز، مستند به مبانی نظری تحقیق، ماهیت مسائل برنامه‌ریزی دوسطحی (نظیر مسئله فرموله شده در رابطه ۱۶)، از جمله مسائل ان-پی سخت به شمار می‌آید (حسینی و نخعی کمال آبادی<sup>۱</sup>، ۲۰۱۵؛ بارد<sup>۲</sup>، ۱۹۹۱)؛ در این مقاله به‌منظور حل مسئله فرموله شده در رابطه ۱۶ از یک الگوریتم ژنتیک دوسطحی استفاده می‌شود.

### الگوریتم ژنتیک دو سطحی

الگوریتم ژنتیک از مهم‌ترین تکنیک‌های جست‌وجوی تصادفی مبتنی بر جمعیت است که از تکامل ژنتیکی به‌عنوان الگوی حل مسئله استفاده می‌کند (هالند<sup>۳</sup>، ۱۹۷۵). با توجه به اینکه مسئله فرموله شده در رابطه ۱۶، در قالب مدل برنامه‌ریزی دوسطحی است که در سطح رهبر، متغیرهای عدد صحیح صفر و یک و در سطح پیرو، متغیرهای پیوسته وجود دارند؛ الگوریتم ژنتیک استفاده شده در این مقاله نیز در قالب ساختار دوسطحی است. این الگوریتم، الگوریتم ژنتیک پیوسته را با الگوریتم ژنتیک گسسته در یک ساختار سلسله‌مراتبی و دوسطحی ترکیب می‌کند. در هر بار اجرای این الگوریتم، هم‌زمان دو تصمیم‌گیری می‌شود: ۱. تصمیم‌گیری درباره انتخاب تأمین‌کنندگان (در سطح رهبر)؛ ۲. تصمیم‌گیری درباره تخصیص سفارش به تأمین‌کنندگان منتخب (در سطح پیرو).

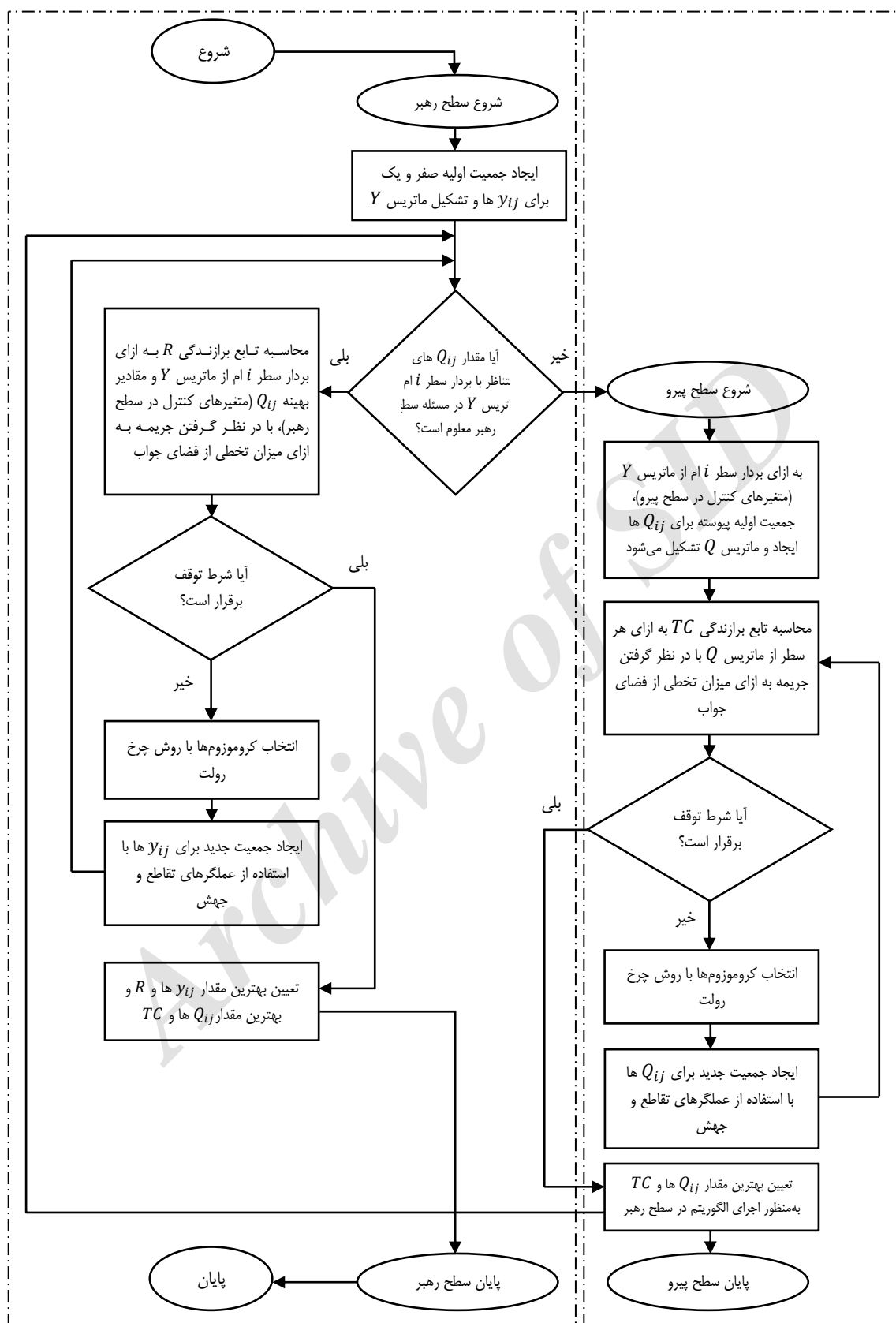
شکل ۲ روند اجرای الگوریتم ژنتیک دوسطحی در خصوص مسئله فرموله شده در رابطه ۱۶ را نشان می‌دهد. در شکل ۲، به ازای هر جواب ایجاد شده در الگوریتم ژنتیک سطح رهبر، الگوریتم ژنتیک سطح پیرو به‌طور کامل به اجرا درمی‌آید و بهترین جواب به‌دست‌آمده برای مسئله سطح پیرو، به‌منظور ارزیابی جواب تولید شده در سطح رهبر، به الگوریتم ژنتیک سطح رهبر اعلام می‌شود.

### نمایش جواب‌ها

برای یک سیستم زنجیره تأمین چهار مرحله‌ای که به‌ترتیب شامل  $n_1$  تأمین‌کننده مواد اولیه،  $n_2$  تولیدکننده،  $n_3$  توزیع‌کننده و  $n_4$  خرده‌فروش است، برای مثال، نحوه نمایش جواب‌ها در الگوریتم ژنتیک دوسطحی مربوط به مسئله فرموله شده در رابطه ۱۶ مطابق شکل ۳ است.

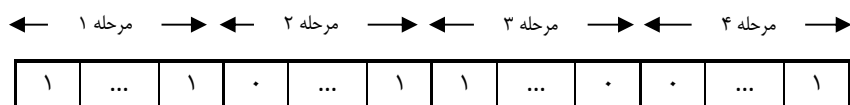
1. Hosseini, & Nakhai Kamalabadi  
3. Holland

2. Bard



شکل ۲. روند اجرای الگوریتم ژنتیک دوسطحی مورد مطالعه در این تحقیق

مسئله انتخاب تأمین‌کنندگان در سطح رهبر:



مسئله تخصیص سفارش در سطح پیرو:

|          |     |            |          |     |            |          |     |            |          |     |            |
|----------|-----|------------|----------|-----|------------|----------|-----|------------|----------|-----|------------|
| $Q_{11}$ | ... | $Q_{1n_1}$ | $Q_{21}$ | ... | $Q_{2n_2}$ | $Q_{31}$ | ... | $Q_{3n_3}$ | $Q_{41}$ | ... | $Q_{4n_4}$ |
|----------|-----|------------|----------|-----|------------|----------|-----|------------|----------|-----|------------|

شکل ۳. نمایش جواب مسئله برنامه‌ریزی دو سطحی برای یک زنجیره تأمین چهار مرحله‌ای

در شکل ۳، نمایش جواب متغیرهای تصمیم  $y_{ij}$  در مسئله انتخاب تأمین‌کنندگان به صورت صفر و یک و نمایش جواب متغیرهای تصمیم  $Q_{ij}$  در مسئله تخصیص سفارش به صورت مقادیر پیوسته بر اساس بازه تعریف شده هر یک از آنهاست.

### ایجاد جواب‌های اولیه

بر اساس ماهیت صفر و یک بودن متغیرهای تصمیم  $y_{ij}$  و نیز، بازه تعریف شده برای متغیرهای تصمیم  $Q_{ij}$ ، جواب‌های اولیه برای متغیرهای مجهول  $y_{ij}$  (در سطح رهبر) و  $Q_{ij}$  (در سطح پیرو) به صورت تصادفی ایجاد می‌شوند.

### محاسبه برازندگی جواب‌ها

متغیرهای تصمیم (مجهول) و کنترل (معلوم) سطوح رهبر و پیرو در الگوریتم ژنتیک دو سطحی این مقاله مطابق با جدول ۳ تعریف می‌شوند.

جدول ۳. تعریف متغیرهای تصمیم و کنترل در الگوریتم ژنتیک دوسطحی

| سطح  | متغیر کنترل | متغیر تصمیم |
|------|-------------|-------------|
| رهبر | $Q_{ij}$    | $y_{ij}$    |
| پیرو | $y_{ij}$    | $Q_{ij}$    |

پس از هر بار ایجاد متغیرهای تصمیم  $y_{ij}$  در سطح رهبر، الگوریتم وارد سطح پیرو شده و پس از اجرای کامل  $\max\_iter2$  تکرار و ارزیابی جواب‌های تولید شده از طریق تابع برازندگی مسئله سطح پیرو، بهترین مقدار ممکن برای متغیرهای تصمیم  $Q_{ij}$  را با در اختیار داشتن مقدار معلوم متغیرهای  $y_{ij}$  تعیین می‌کند، سپس به سطح رهبر باز می‌گردد. در نهایت با معلوم بودن مقدار متغیرهای  $y_{ij}$  و  $Q_{ij}$ ، جواب‌های ایجاد شده از طریق تابع برازندگی مسئله سطح رهبر ارزیابی می‌شوند. در این مقاله، توابع برازندگی مسائل سطح رهبر و پیرو الگوریتم ژنتیک دو سطحی، به ترتیب توابع ریاضی تعریف شده قابلیت اطمینان و هزینه در مدل رابطه ۱۶ است. به منظور جلوگیری از ایجاد جواب‌های نشدنی، از تابع برازندگی قابلیت اطمینان مقداری به عنوان متوسط جریمه تخطی از محدودیت‌های مسئله سطح رهبر کسر می‌شود و به تابع برازندگی هزینه نیز مقداری به عنوان متوسط جریمه تخطی از محدودیت‌های مسئله سطح پیرو افزوده می‌شود. با توجه به رویکرد تکاملی و تدریجی الگوریتم ژنتیک، روند حل مسائل سطوح رهبر و پیرو به گونه‌ای است که الگوریتم



به سمت ایجاد جواب‌های شدنی این مسائل پیش رفته و در نهایت میزان تختی از محدودیت‌ها و مقدار جریمه به صفر می‌انجامد. با این حال در هر بار حل مسئله توسط الگوریتم، چنانچه مشاهده شود کلیه جواب‌های به‌دست‌آمده در تکرارها نشدنی هستند، این اجرا مد نظر قرار نگرفته و از آن صرف نظر می‌شود.

### عملگر انتخاب

عملگر انتخاب جواب‌ها در سطوح رهبر و پیرو الگوریتم ژنتیک دوسطحی، بر اساس روش چرخ رولت است که با در نظر گرفتن فشار انتخاب، برای انتخاب کروموزوم‌های والد در عملگرهای تقاطع و جهش استفاده می‌شود. فشار انتخاب به معنای میزان مطلوبیتی است که یک جواب بهتر ایجاد می‌کند. هر چه مقدار این پارامتر بزرگ‌تر باشد، مطلوبیت جواب‌های با برازندگی زیاد، بیشتر و مطلوبیت جواب‌های با برازندگی کم، کمتر خواهد بود (سیواندام و دیپا، ۲۰۰۸). اگر مقدار پارامتر فشار انتخاب کم در نظر گرفته شود، همگرایی الگوریتم طولانی شده و برای دستیابی به جواب نهایی زمان غیرضروری صرف می‌شود. چنانچه مقدار این پارامتر زیاد باشد، الگوریتم دچار همگرایی زودرس شده و احتمال قرارگیری الگوریتم در دام جواب‌های بهینه محلی بیشتر افزایش خواهد یافت (سیواندام و دیپا، ۲۰۰۸). اگر پارامتر فشار انتخاب را با  $(\beta \geq 0)$  نمایش دهیم، احتمال انتخاب جواب  $i$ ام جمعیت از رابطه ۱۷ به دست می‌آید.

$$\Pr(i) = \frac{Fit(i)^\beta}{\sum_{i=1}^{nPop} Fit(i)^\beta}, \quad i = 1, \dots, nPop \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

به گونه‌ای که

$$\Pr(i) = \begin{cases} \frac{1}{nPop}, & \text{اگر } \beta = 0 \text{ باشد} \\ 1, & \text{اگر } \beta = \infty \text{ و جواب } i \text{ ام بهترین جواب جمعیت باشد} \\ 0, & \text{اگر } \beta = \infty \text{ و جواب } i \text{ ام بهترین جواب جمعیت نباشد} \end{cases}$$

$nPop$  تعداد جواب‌های جمعیت و  $Fit(i)$  مقدار برازندگی جواب  $i$ ام است.

### عملگر تقاطع

از آنجا که جواب‌های مسئله انتخاب تأمین‌کنندگان از نوع صفر و یک هستند، نوع عملگر تقاطع در خصوص الگوریتم ژنتیک سطح رهبر یکنواخت است. از این رو، در هر تکرار الگوریتم ژنتیک در سطح رهبر، تعداد  $N_{c1}$  جواب از جمعیت فعلی با استفاده از روش چرخ رولت برای تقاطع یکنواخت انتخاب می‌شود. اگر احتمال تقاطع یکنواخت در سطح رهبر (از پارامترهای الگوریتم ژنتیک) را با  $P_{c1}$  نمایش دهیم،  $N_{c1}$  از رابطه ۱۸ به دست می‌آید.

$$N_{c1} = 2 \times \left\lfloor \frac{P_{c1} \times nPop}{2} \right\rfloor \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

چنانچه  $\mathcal{Y}_1 = (Y_{11}, Y_{12}, \dots, Y_{1n})$  و  $\mathcal{Y}_2 = (Y_{21}, Y_{22}, \dots, Y_{2n})$  به ترتیب کروموزوم‌های والد ۱ و ۲ با تعداد  $n$  ژن در سطح رهبر باشند و برای هر ژن از این کروموزوم‌ها مقداری تصادفی از  $\alpha \in \{0, 1\}$  انتخاب شود، کروموزوم‌های فرزند ۱ و ۲ مطابق رابطه‌های ۱۹ و ۲۰ ایجاد می‌شوند.

$$\hat{y}_{1j} = \alpha_j y_{1j} + (1 - \alpha_j) y_{2j}, j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۱۹}$$

$$\hat{y}_{2j} = \alpha_j y_{2j} + (1 - \alpha_j) y_{1j}, j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۲۰}$$

برای مثال، برای هر ژن مربوط به کروموزوم فرزند ۱، یک عدد تصادفی از میان مجموعه گسسته  $\{0 \text{ و } 1\}$  انتخاب می‌شود. اگر عدد انتخاب شده برابر عدد صفر (عدد ۱) باشد، ژن متناظر در کروموزوم والد ۲ (والد ۱) انتخاب می‌شود. همچنین برای هر ژن مربوط به کروموزوم فرزند ۲، اگر عدد انتخاب شده برابر عدد صفر (عدد ۱) باشد، ژن متناظر در کروموزوم والد ۱ (والد ۲) انتخاب می‌شود. عملگر تقاطع یکنواخت از بهترین روش‌های ایجاد کروموزوم در خصوص مسائل صفر و یک است که به افزایش تنوع بخشی الگوریتم منجر می‌شود.

از آنجا که جواب‌های مسئله تخصیص سفارش از نوع پیوسته است، نوع عملگر تقاطع در خصوص الگوریتم ژنتیک سطح پیرو محاسباتی است. از این رو، در هر تکرار الگوریتم ژنتیک در سطح پیرو، تعداد  $N_{c2}$  جواب از جمعیت فعلی با استفاده از روش چرخ رولت برای تقاطع محاسباتی انتخاب می‌شود. اگر احتمال تقاطع محاسباتی در سطح پیرو (از پارامترهای الگوریتم ژنتیک) را با  $P_{c2}$  نمایش دهیم،  $N_{c2}$  از رابطه ۲۱ به دست می‌آید.

$$N_{c2} = 2 \times \left\lceil \frac{P_{c2} \times nPop2}{2} \right\rceil \quad \text{رابطه ۲۱}$$

چنانچه  $Q_1 = (Q_{11}, Q_{12}, \dots, Q_{1n})$  و  $Q_2 = (Q_{21}, Q_{22}, \dots, Q_{2n})$ ، به ترتیب کروموزوم‌های والد ۱ و ۲ با تعداد  $n$  ژن در سطح پیرو باشند و برای هر ژن از این کروموزوم‌ها، یک مقدار تصادفی از بازه پیوسته  $[0, 1]$   $\lambda_j$  انتخاب شود، کروموزوم‌های فرزند ۱ و ۲ مطابق رابطه‌های ۲۲ و ۲۳ ایجاد می‌شوند (کاکسوی و یالکینوز، ۲۰۰۸):

$$\hat{Q}_{1j} = \lambda_j Q_{1j} + (1 - \lambda_j) Q_{2j}, j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۲۲}$$

$$\hat{Q}_{2j} = \lambda_j Q_{2j} + (1 - \lambda_j) Q_{1j}, j = 1, \dots, n \quad \text{رابطه ۲۳}$$

بدیهی است با انتخاب تصادفی  $\lambda_j \in [0, 1]$ ، هریک از ژن‌های کروموزوم‌های فرزند، مقداری بین مقدار ژن‌های کروموزوم‌های والد خود را خواهند داشت. در این مقاله به منظور افزایش تنوع بخشی به جواب‌های جدید، مقدار  $\lambda_j$  به طور تصادفی از بازه  $(0, 1 + \gamma_j]$   $[\gamma_j, 1 + \gamma_j]$  انتخاب می‌شود. با انتخاب  $\gamma_j$  بزرگ‌تر، امکان ایجاد مقادیر کمتر یا بیشتر از کروموزوم‌های والد فراهم شده و تنوع جواب‌های ایجاد شده افزایش و تمرکزدهی کاهش می‌یابد.

### عملگر جهش

در هر تکرار الگوریتم ژنتیک در سطح رهبر، تعداد  $N_{m1}$  جواب (کروموزوم والد) از جمعیت فعلی با استفاده از روش چرخ رولت برای اعمال جهش انتخاب می‌شود. اگر احتمال جهش در سطح رهبر (از پارامترهای الگوریتم ژنتیک) را با  $P_{m1}$  نمایش دهیم،  $N_{m1}$  از رابطه ۲۴ به دست می‌آید.

$$N_{m1} = \lceil P_{m1} \times nPop1 \rceil \quad \text{رابطه ۲۴}$$

برای هر کروموزوم والد  $i$  ام، تعداد ژن‌های متأثر از عملگر جهش در سطح رهبر از رابطه ۲۵ به دست می‌آید.

$$n_{m1(i)} = \pi_{m1(i)} \times n, \quad i = 1, \dots, N_{m1} \quad \text{رابطه ۲۵}$$

$\pi_{m1(i)} (\pi_{m1(i)} \in [0, 1])$  نرخ تأثیر جهش برای کروموزوم والد  $i$  در سطح رهبر است. در خصوص هریک از ژن‌های متأثر از عملگر جهش در کروموزوم والد  $i$  ام در سطح رهبر، چنانچه مقدار ژن بررسی شده عدد صفر (عدد ۱) باشد، ژن متناظر در کروموزوم فرزند مقدار ۱ (صفر) خواهد داشت.

در سطح پیرو نیز، تعداد  $N_{m2}$  جواب (کروموزوم والد) از جمعیت فعلی با استفاده از روش چرخ رولت برای اعمال جهش انتخاب می‌شود. اگر احتمال جهش در سطح پیرو (از پارامترهای الگوریتم ژنتیک) را با  $P_{m2}$  نمایش دهیم،  $N_{m2}$  از رابطه ۲۶ به دست می‌آید.

$$N_{m2} = [P_{m2} \times nPop2] \quad \text{رابطه ۲۶}$$

برای هر کروموزوم والد  $i$  ام، تعداد ژن‌های متأثر از عملگر جهش در سطح پیرو از رابطه ۲۷ به دست می‌آید:

$$n_{m2(i)} = \pi_{m2(i)} \times n, \quad i = 1, \dots, N_{m2} \quad \text{رابطه ۲۷}$$

$\pi_{m2(i)} (\pi_{m2(i)} \in [0, 1])$  میزان تأثیر جهش برای کروموزوم والد  $i$  در سطح پیرو است. مقدار هریک از ژن‌های متأثر از عملگر جهش در کروموزوم والد  $i$  ام در سطح پیرو طی فرایند جهش تغییر یافته و مقدار تصادفی جدیدی را در محدوده مجاز تغییرات  $Q_{ij}$  (بازه  $[m_{ij}, M_{ij}]$ ) می‌گیرد.

### تشکیل جمعیت جدید و توقف الگوریتم

جمعیت جدید جواب‌ها در هر یک از سطوح رهبر و پیرو الگوریتم ژنتیک دوسطحی بر اساس رویکرد نخبه‌گرایی (ادغام جواب‌های فعلی و ایجاد شده توسط عملگرهای تقاطع و جهش و انتخاب  $nPop$  جواب بهتر) صورت می‌گیرد. همچنین شرط توقف الگوریتم ژنتیک در سطوح رهبر و پیرو، به ترتیب بر اساس دستیابی به  $\max\_iter1$  و  $\max\_iter2$  تعداد تکرار است که از جمله پارامترهای الگوریتم ژنتیک دو سطحی به شمار می‌آیند.

### تنظیم پارامترها

به منظور تنظیم پارامترهای موجود در الگوریتم ژنتیک دوسطحی، از طرح‌های ترکیبی تاگوچی  $L_{36}(3^1 \times 3^4)$  و  $L_{36}(3^1 \times 3^5)$  در نرم‌افزار MINITAB 17 به ترتیب برای الگوریتم ژنتیک سطح رهبر و پیرو استفاده می‌شود. برای هریک از ۳۶ آزمایش در هر طرح، ۴ تکرار از مسائل کوچک، ۳ تکرار از مسائل متوسط و ۲ تکرار از مسائل بزرگ توسط الگوریتم ژنتیک دوسطحی در محیط نرم‌افزار MATLAB R2015b تحت سیستم عامل ویندوز ۱۰ با مشخصات Intel(R) Core i5-7500 CPU, 3.40 GHz و RAM 8.00 GB اجرا شد. جدول ۴ سطوح در نظر گرفته شده برای پارامترهای الگوریتم را برای مسائل کوچک، متوسط و بزرگ نشان می‌دهد، به گونه‌ای که مقدار پارامترهای  $P_c$  و  $P_m$  بر مبنای الگوریتم ژنتیک در وضعیت پایدار تعیین شده است.

نتایج اجرای آزمایش‌ها پس از بی‌مقیاس‌سازی توسط معیار درصد انحراف نسبی (RPD)، بر اساس دو معیار

میانگین درصد انحراف نسبی و نسبت علامت به نوفه (S/N) بررسی و تحلیل شد. از آنجا که الگوریتم ژنتیک سطح پیرو به مقدار متغیرهای تصمیم الگوریتم ژنتیک سطح رهبر وابسته است، در هر یک از آزمایش‌های اجرا شده ابتدا بر اساس مقدار تصادفی پارامترهای الگوریتم سطح رهبر، پارامترهای الگوریتم سطح پیرو را تنظیم کرده، سپس پارامترهای الگوریتم در سطح رهبر تنظیم می‌شوند. جدول ۵ نتایج تنظیم پارامترهای الگوریتم ژنتیک دوسطحی را ارائه می‌کند.

جدول ۴. سطوح پارامترهای الگوریتم ژنتیک دوسطحی

| $\gamma$ | $\pi_m$ | $\beta$ | $P_m$ | $P_c$ | (nPop, max_iter) | نام پارامتر | سطح الگوریتم | نوع مسئله |
|----------|---------|---------|-------|-------|------------------|-------------|--------------|-----------|
| -        | ۰/۱۵    | ۱       | ۰/۴۵  | ۰/۶   | (۳۰ و ۱۰۰)       | سطح ۱       | رهبر         | کوچک      |
| -        | ۰/۲     | ۱/۵     | ۰/۵۵  | ۰/۷   | (۴۰ و ۷۵)        | سطح ۲       |              |           |
| -        | ۰/۲۵    | ۲       | ۰/۶   | ۰/۸   | -                | سطح ۳       |              |           |
| ۰/۰۵     | ۰/۱۵    | ۱       | ۰/۴۵  | ۰/۶   | (۴۰ و ۷۵)        | سطح ۱       | پیرو         |           |
| ۰/۱      | ۰/۲     | ۱/۵     | ۰/۵۵  | ۰/۷   | (۵۰ و ۶۰)        | سطح ۲       |              |           |
| ۰/۲      | ۰/۲۵    | ۲       | ۰/۶   | ۰/۸   | -                | سطح ۳       |              |           |
| -        | ۰/۱۵    | ۱       | ۰/۴۵  | ۰/۶   | (۳۰ و ۲۰۰)       | سطح ۱       | رهبر         | متوسط     |
| -        | ۰/۲     | ۱/۵     | ۰/۵۵  | ۰/۷   | (۴۰ و ۱۵۰)       | سطح ۲       |              |           |
| -        | ۰/۲۵    | ۲       | ۰/۶   | ۰/۸   | -                | سطح ۳       |              |           |
| ۰/۰۵     | ۰/۱۵    | ۱       | ۰/۴۵  | ۰/۶   | (۵۰ و ۱۲۰)       | سطح ۱       | پیرو         |           |
| ۰/۱      | ۰/۲     | ۱/۵     | ۰/۵۵  | ۰/۷   | (۶۰ و ۱۰۰)       | سطح ۲       |              |           |
| ۰/۲      | ۰/۲۵    | ۲       | ۰/۶   | ۰/۸   | -                | سطح ۳       |              |           |
| -        | ۰/۱۵    | ۱       | ۰/۴۵  | ۰/۶   | (۴۰ و ۲۵۰)       | سطح ۱       | رهبر         | بزرگ      |
| -        | ۰/۲     | ۱/۵     | ۰/۵۵  | ۰/۷   | (۵۰ و ۲۰۰)       | سطح ۲       |              |           |
| -        | ۰/۲۵    | ۲       | ۰/۶   | ۰/۸   | -                | سطح ۳       |              |           |
| ۰/۰۵     | ۰/۱۵    | ۱       | ۰/۴۵  | ۰/۶   | (۵۰ و ۲۰۰)       | سطح ۱       | پیرو         |           |
| ۰/۱      | ۰/۲     | ۱/۵     | ۰/۵۵  | ۰/۷   | (۱۰۰ و ۱۰۰)      | سطح ۲       |              |           |
| ۰/۲      | ۰/۲۵    | ۲       | ۰/۶   | ۰/۸   | -                | سطح ۳       |              |           |

جدول ۵. مقدار پارامترهای تنظیم شده الگوریتم ژنتیک دوسطحی

| $\gamma$ | $\pi_m$ | $\beta$ | $P_m$ | $P_c$ | (nPop, max_iter) | نوع مسئله | سطح الگوریتم |
|----------|---------|---------|-------|-------|------------------|-----------|--------------|
| -        | ۰/۲۵    | ۱       | ۰/۵۵  | ۰/۷   | (۳۰ و ۱۰۰)       | کوچک      | رهبر         |
| -        | ۰/۲۵    | ۱       | ۰/۵۵  | ۰/۷   | (۳۰ و ۲۰۰)       | متوسط     |              |
| -        | ۰/۲۵    | ۱       | ۰/۵۵  | ۰/۷   | (۴۰ و ۲۵۰)       | بزرگ      |              |
| ۰/۱      | ۰/۲۵    | ۱/۵     | ۰/۴۵  | ۰/۶   | (۵۰ و ۶۰)        | کوچک      | پیرو         |
| ۰/۱      | ۰/۲۵    | ۱/۵     | ۰/۴۵  | ۰/۸   | (۶۰ و ۱۰۰)       | متوسط     |              |
| ۰/۱      | ۰/۲۵    | ۱/۵     | ۰/۴۵  | ۰/۸   | (۱۰۰ و ۱۰۰)      | بزرگ      |              |

### بررسی عملکرد الگوریتم ژنتیک دوسطحی در مقایسه با روش شمارش کامل و لینگو

تعداد کل حالات موجود برای تخصیص حداقل یک عضو و حداکثر  $n$  عضو در هر مرحله زنجیره تأمین از رابطه مجموع ضرایب بسط دوجمله‌ای به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\binom{n}{0} + \binom{n}{1} + \dots + \binom{n}{n} = 2^n \Rightarrow \binom{n}{1} + \dots + \binom{n}{n} = 2^n - \binom{n}{0} = 2^n - 1 \quad \text{رابطه ۲۸}$$

از این رو برای یک زنجیره تأمین چهار مرحله‌ای با  $n_1$  تأمین کننده مواد اولیه،  $n_2$  تولیدکننده،  $n_3$  توزیع کننده و  $n_4$  خرده فروش، تعداد کل حالات موجود برای تخصیص حداقل یک عضو و حداکثر همه اعضاء در هر مرحله برابر است با:

$$(2^{n_1} - 1) \times (2^{n_2} - 1) \times (2^{n_3} - 1) \times (2^{n_4} - 1) \quad \text{رابطه ۲۹}$$

از آنجا که عملکرد هر یک از الگوریتم‌های سطح رهبر (پیرو) به مقدار متغیر تصمیم سطح پیرو (رهبر) وابسته است، برای هر مسئله، ابتدا پارامترهای الگوریتم بر اساس نتایج جدول ۵ مقاداری می‌شود، سپس به تعداد ۱۰ بار هر مسئله به اجرا در آمده و متوسط مقدار بهینه قابلیت اطمینان ( $\bar{R}$ ) و هزینه ( $\overline{TC}$ ) تعیین می‌شود. به دلیل اینکه حل مسائل برنامه‌ریزی دوسطحی توسط نرم‌افزار لینگو امکان پذیر نیست، مدل ریاضی سطح پیرو توسط نرم‌افزار لینگو کدنویسی شده و مقدار بهینه  $Y_{ij}$  هر تکرار در مدل جای گذاری می‌شود و به دلیل تغییر در مقدار پارامترهای اصلی مدل، در نهایت پس از ۱۰ تکرار متوسط مقدار بهینه  $Q_{ij}$  و  $TC$  تعیین می‌شود. همچنین از آنجا که در هر تکرار از حل مسئله، مقدار پارامتر  $R_{ij}$  به صورت تصادفی از بازه (۱ و ۰) انتخاب می‌شود، متوسط مقدار قابلیت اطمینان سیستم در روش شمارش کامل مد نظر است. بر این اساس، در جدول ۶ مقدار پارامترهای مسئله فرموله شده در رابطه ۱۶، در قالب توزیع یکنواخت برای سه دسته مسائل نمونه کوچک، متوسط و بزرگ ارائه شده است. جدول ۷ متوسط نتایج ۱۰ تکرار حل هر یک از مسائل نمونه توسط الگوریتم ژنتیک دوسطحی، روش شمارش کامل و نرم‌افزار لینگو را بر اساس اهداف قابلیت اطمینان و هزینه متناظر با آن ارائه می‌کند. از آنجا که برای بیشتر مسائل مورد مطالعه، تعیین بهترین جواب ممکن توسط روش شمارش کامل زمان بر بوده و با خطای محاسباتی نیز همراه است، در این مقاله تنها برای دو مسئله  $S_1$  و  $S_2$  در سطح رهبر، روش شمارش کامل اجرا شده و برای هر یک از حالات موجود، مقدار قابلیت اطمینان به دست آمده تعیین می‌شود.

در جدول ۷، متوسط مقدار بهینه قابلیت اطمینان سیستم توسط هر دو روش شمارش کامل و الگوریتم ژنتیک، یکسان است که این نتیجه، عملکرد خوب الگوریتم ژنتیک دوسطحی را در حل مسئله سطح رهبر تأیید می‌کند. همچنین، مقدار بهینه هزینه به دست آمده از ۱۰ بار اجرای الگوریتم ژنتیک دوسطحی برای مسائل کوچک با اختلاف ناچیز، برابر با مقدار بهینه هزینه به دست آمده از حل مسئله توسط نرم‌افزار لینگو است و برای مسائل متوسط و بزرگ نیز، الگوریتم ژنتیک دوسطحی در مقایسه با نرم‌افزار لینگو، عملکرد بهتری را نشان می‌دهد. این موضوع را می‌توان به منزله تأییدی بر درستی عملکرد الگوریتم ژنتیک دوسطحی در حل مسئله سطح پیرو قلمداد کرد.

جدول ۶. مقدار پارامترها در مسائل نمونه آزمایشی

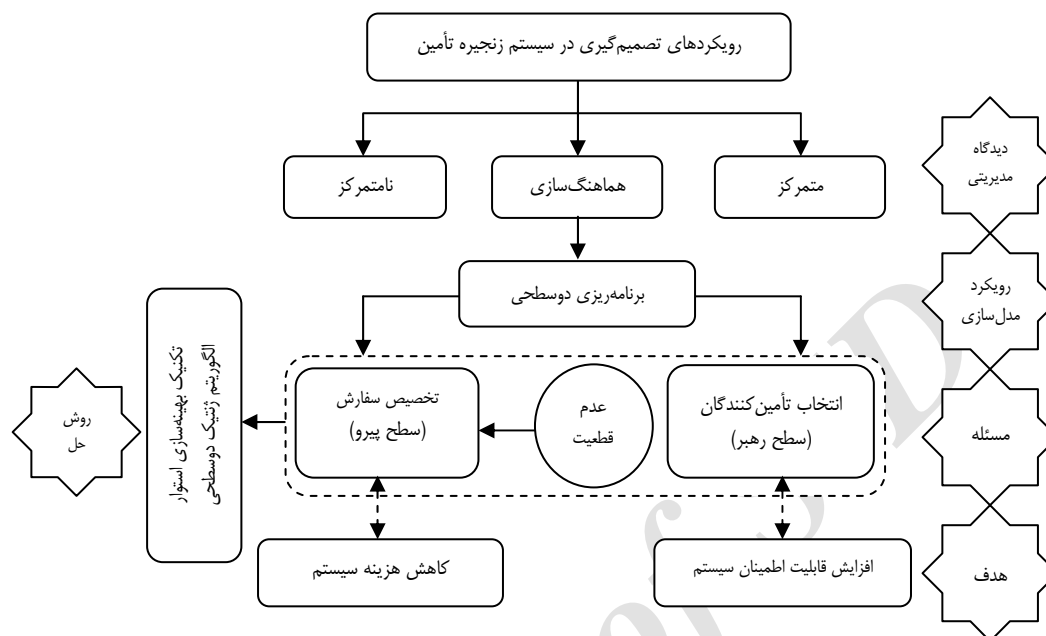
| پارامتر       | ابعاد مسائل کوچک  |  |   | ابعاد مسائل متوسط  |  |  | ابعاد مسائل بزرگ   |  |  |  |
|---------------|---|--|---|--|--|--|--|--|--|--|
|               | ۳-۳-۲-۴   | ۲-۲-۲-۲  | ۲-۱-۲-۲   | ۵-۳-۴-۵  | ۴-۲-۵-۵  | ۵-۳-۴-۴  | ۸-۳-۶-۸  | ۶-۴-۸-۱۲   | ۸-۶-۱۲-۱۸  |  |
| $R_{ij}$      | (۰, ۱)  | (۰, ۱)   | (۰, ۱)  | (۰, ۱)   | (۰, ۱)   | (۰, ۱)   | (۰, ۱)   | (۰, ۱)   | (۰, ۱)   |  |
| $C_{ij}$      | $[3 \times 10^6, 33 \times 10^6]$   | $[2/5 \times 10^6, 45 \times 10^6]$  | $[3 \times 10^6, 33 \times 10^6]$   | $[2/5 \times 10^6, 45 \times 10^6]$  | $[2/5 \times 10^6, 45 \times 10^6]$  | $[2/5 \times 10^6, 45 \times 10^6]$  | $[2/5 \times 10^6, 45 \times 10^6]$  | $[2/5 \times 10^6, 45 \times 10^6]$  | $[2/5 \times 10^6, 45 \times 10^6]$  |  |
| $B_i$         | $[15 \times 10^6, 100 \times 10^6]$   | $[25 \times 10^6, 12 \times 10^6]$   | $[15 \times 10^6, 100 \times 10^6]$   | $[25 \times 10^6, 12 \times 10^6]$   | $[25 \times 10^6, 12 \times 10^6]$   | $[25 \times 10^6, 12 \times 10^6]$   | $[25 \times 10^6, 12 \times 10^6]$   | $[25 \times 10^6, 12 \times 10^6]$   | $[25 \times 10^6, 12 \times 10^6]$   |  |
| $W_i$         | $[2000, 6000]$  | $[2500, 6500]$   | $[2000, 6000]$  | $[2500, 6500]$   | $[2500, 6500]$   | $[2500, 6500]$   | $[2500, 6500]$   | $[2500, 6500]$   | $[2500, 6500]$   |  |
| $m_{ij}$      | $[800, 9 \times 10^4]$  | $[1000, 9/2 \times 10^4]$  | $[800, 9 \times 10^4]$  | $[1000, 9/2 \times 10^4]$  | $[1000, 9/2 \times 10^4]$  | $[1000, 9/2 \times 10^4]$  | $[1000, 9/2 \times 10^4]$  | $[1000, 9/2 \times 10^4]$  | $[1000, 9/2 \times 10^4]$  |  |
| $M_{ij}$      | $[3 \times 10^3, 165 \times 10^3]$  | $[4 \times 10^3, 200 \times 10^3]$   | $[3 \times 10^3, 165 \times 10^3]$  | $[4 \times 10^3, 200 \times 10^3]$   | $[4 \times 10^3, 200 \times 10^3]$   | $[4 \times 10^3, 200 \times 10^3]$   | $[4 \times 10^3, 200 \times 10^3]$   | $[4 \times 10^3, 200 \times 10^3]$   | $[4 \times 10^3, 200 \times 10^3]$   |  |
| $H_{ij}$      | $[1360, 2150]$  | $[1500, 2400]$   | $[1360, 2150]$  | $[1500, 2400]$   | $[1500, 2400]$   | $[1500, 2400]$   | $[1500, 2400]$   | $[1500, 2400]$   | $[1500, 2400]$   |  |
| $S_{ij}$      | $[7 \times 10^5, 13 \times 10^5]$   | $[9 \times 10^5, 20 \times 10^5]$  | $[7 \times 10^5, 13 \times 10^5]$   | $[9 \times 10^5, 20 \times 10^5]$  | $[9 \times 10^5, 20 \times 10^5]$  | $[9 \times 10^5, 20 \times 10^5]$  | $[9 \times 10^5, 20 \times 10^5]$  | $[9 \times 10^5, 20 \times 10^5]$  | $[9 \times 10^5, 20 \times 10^5]$  |  |
| $v_{ij}$      | $[15, 24]$  | $[14, 25]$   | $[15, 24]$  | $[14, 25]$   | $[14, 25]$   | $[14, 25]$   | $[14, 25]$   | $[14, 25]$   | $[14, 25]$   |  |
| $P_{ij}$      | $[1500, 2600]$  | $[1900, 2350]$   | $[1500, 2600]$  | $[1900, 2350]$   | $[1900, 2350]$   | $[1900, 2350]$   | $[1900, 2350]$   | $[1900, 2350]$   | $[1900, 2350]$   |  |
| $E_{pj}$      | $[0/00025, 0/0003]$   | $[0/00025, 0/0003]$  | $[0/00025, 0/0003]$   | $[0/00025, 0/0003]$  | $[0/00025, 0/0003]$  | $[0/00025, 0/0003]$  | $[0/00025, 0/0003]$  | $[0/00025, 0/0003]$  | $[0/00025, 0/0003]$  |  |
| $g_{pj}$      | $[58 \times 10^3, 70 \times 10^3]$  | $[60 \times 10^3, 75 \times 10^3]$   | $[58 \times 10^3, 70 \times 10^3]$  | $[60 \times 10^3, 75 \times 10^3]$   | $[60 \times 10^3, 75 \times 10^3]$   | $[60 \times 10^3, 75 \times 10^3]$   | $[60 \times 10^3, 75 \times 10^3]$   | $[60 \times 10^3, 75 \times 10^3]$   | $[60 \times 10^3, 75 \times 10^3]$   |  |
| $U_{pe}$      | $[0/002, 0/0025]$   | $[0/002, 0/0025]$  | $[0/002, 0/0025]$   | $[0/002, 0/0025]$  | $[0/002, 0/0025]$  | $[0/002, 0/0025]$  | $[0/002, 0/0025]$  | $[0/002, 0/0025]$  | $[0/002, 0/0025]$  |  |
| $\tilde{D}_1$ | $([7 \times 10^4, 7/5 \times 10^4], [7/6 \times 10^4, 8 \times 10^4], [1/2 \times 10^4, 10 \times 10^4])$ | $([19 \times 10^4, 20 \times 10^4], [24 \times 10^4, 25 \times 10^4], [28 \times 10^4, 30 \times 10^4])$     | $([7 \times 10^4, 7/5 \times 10^4], [7/6 \times 10^4, 8 \times 10^4], [1/2 \times 10^4, 10 \times 10^4])$ | $([19 \times 10^4, 20 \times 10^4], [24 \times 10^4, 25 \times 10^4], [28 \times 10^4, 30 \times 10^4])$     | $([19 \times 10^4, 20 \times 10^4], [24 \times 10^4, 25 \times 10^4], [28 \times 10^4, 30 \times 10^4])$     | $([19 \times 10^4, 20 \times 10^4], [24 \times 10^4, 25 \times 10^4], [28 \times 10^4, 30 \times 10^4])$     | $([19 \times 10^4, 20 \times 10^4], [24 \times 10^4, 25 \times 10^4], [28 \times 10^4, 30 \times 10^4])$     | $([19 \times 10^4, 20 \times 10^4], [24 \times 10^4, 25 \times 10^4], [28 \times 10^4, 30 \times 10^4])$     | $([19 \times 10^4, 20 \times 10^4], [24 \times 10^4, 25 \times 10^4], [28 \times 10^4, 30 \times 10^4])$     | $([19 \times 10^4, 20 \times 10^4], [24 \times 10^4, 25 \times 10^4], [28 \times 10^4, 30 \times 10^4])$ |
| $\tilde{D}_p$ | $([42 \times 10^3, 45 \times 10^3], [55 \times 10^3, 57 \times 10^3], [60 \times 10^3, 63 \times 10^3])$  | $([58 \times 10^3, 60 \times 10^3], [75 \times 10^3, 76 \times 10^3], [85 \times 10^3, 90 \times 10^3])$     | $([42 \times 10^3, 45 \times 10^3], [55 \times 10^3, 57 \times 10^3], [60 \times 10^3, 63 \times 10^3])$  | $([58 \times 10^3, 60 \times 10^3], [75 \times 10^3, 76 \times 10^3], [85 \times 10^3, 90 \times 10^3])$     | $([58 \times 10^3, 60 \times 10^3], [75 \times 10^3, 76 \times 10^3], [85 \times 10^3, 90 \times 10^3])$     | $([58 \times 10^3, 60 \times 10^3], [75 \times 10^3, 76 \times 10^3], [85 \times 10^3, 90 \times 10^3])$     | $([58 \times 10^3, 60 \times 10^3], [75 \times 10^3, 76 \times 10^3], [85 \times 10^3, 90 \times 10^3])$     | $([58 \times 10^3, 60 \times 10^3], [75 \times 10^3, 76 \times 10^3], [85 \times 10^3, 90 \times 10^3])$     | $([58 \times 10^3, 60 \times 10^3], [75 \times 10^3, 76 \times 10^3], [85 \times 10^3, 90 \times 10^3])$     |  |
| $\tilde{D}_f$ | $([3/5 \times 10^3, 4 \times 10^3], [4/3 \times 10^3, 6 \times 10^3], [6/5 \times 10^3, 8 \times 10^3])$  | $([33 \times 10^3, 34/5 \times 10^3], [36 \times 10^3, 37 \times 10^3], [38/5 \times 10^3, 40 \times 10^3])$ | $([3/5 \times 10^3, 4 \times 10^3], [4/3 \times 10^3, 6 \times 10^3], [6/5 \times 10^3, 8 \times 10^3])$  | $([33 \times 10^3, 34/5 \times 10^3], [36 \times 10^3, 37 \times 10^3], [38/5 \times 10^3, 40 \times 10^3])$ | $([33 \times 10^3, 34/5 \times 10^3], [36 \times 10^3, 37 \times 10^3], [38/5 \times 10^3, 40 \times 10^3])$ | $([33 \times 10^3, 34/5 \times 10^3], [36 \times 10^3, 37 \times 10^3], [38/5 \times 10^3, 40 \times 10^3])$ | $([33 \times 10^3, 34/5 \times 10^3], [36 \times 10^3, 37 \times 10^3], [38/5 \times 10^3, 40 \times 10^3])$ | $([33 \times 10^3, 34/5 \times 10^3], [36 \times 10^3, 37 \times 10^3], [38/5 \times 10^3, 40 \times 10^3])$ | $([33 \times 10^3, 34/5 \times 10^3], [36 \times 10^3, 37 \times 10^3], [38/5 \times 10^3, 40 \times 10^3])$ |  |
| $Cap_i$       | $[9 \times 10^4, 2 \times 10^6]$  | $[15 \times 10^4, 2/5 \times 10^6]$  | $[9 \times 10^4, 2 \times 10^6]$  | $[15 \times 10^4, 2/5 \times 10^6]$  | $[15 \times 10^4, 2/5 \times 10^6]$  | $[15 \times 10^4, 2/5 \times 10^6]$  | $[15 \times 10^4, 2/5 \times 10^6]$  | $[15 \times 10^4, 2/5 \times 10^6]$  | $[15 \times 10^4, 2/5 \times 10^6]$  |  |

جدول ۷. متوسط نتایج حل مسائل نمونه

| مسئله | ابعاد<br>$n_1 - n_2 - n_3 - n_4$ | تعداد کل حالات<br>قابل بررسی | روش       |            |                        |
|-------|----------------------------------|------------------------------|-----------|------------|------------------------|
|       |                                  |                              | لینگو     | شمارش کامل | الگوریتم ژنتیک دوسطحی  |
|       |                                  |                              | $\bar{R}$ | $\bar{R}$  | $\bar{TC}$             |
| S1    | ۲-۱-۲-۲                          | ۲۷                           | -/۲۱۲     | -/۲۱۲      | $19934/4 \times 10^6$  |
| S2    | ۲-۲-۲-۲                          | ۸۱                           | -/۲۵۱     | -/۲۵۱      | $27905/4 \times 10^6$  |
| S3    | ۳-۲-۳-۴                          | ۲۲۰۵                         | -         | -          | $39444/2 \times 10^6$  |
| M1    | ۵-۲-۴-۴                          | ۲۰۹۲۵                        | -         | -          | $88712/5 \times 10^6$  |
| M2    | ۴-۲-۵-۵                          | ۴۳۲۴۵                        | -         | -          | $93510/7 \times 10^6$  |
| M3    | ۵-۳-۴-۵                          | ۱۰۰۹۰۵                       | -         | -          | $159731/5 \times 10^6$ |
| L1    | ۸-۳-۶-۸                          | ۲۸۶۷۶۰۲۵                     | -         | -          | $18308/2 \times 10^6$  |
| L2    | ۶-۴-۸-۱۲                         | ۹۸۶۷۹۲۶۲۵                    | -         | -          | $269806/4 \times 10^6$ |
| L3    | ۸-۶-۱۲-۱۸                        | ۱۷۲۴۵۳۸۵۲۷۳۰۲۵               | -         | -          | $506821/1 \times 10^6$ |

## روش‌شناسی پژوهش

شکل ۴ چارچوب اجرای پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.



شکل ۴. چارچوب پژوهش

## یافته‌های پژوهش

صنعت فولاد یکی از مهم‌ترین و مؤثرترین صنایع رشد و توسعه صنعتی کشورها محسوب می‌شود. در حال حاضر شرکت‌های ایرانی متعدد و معتبری در این صنعت فعالیت دارند که هدف اصلی همه آنها توسعه صنعت فولاد کشور و قطع وابستگی به واردات محصولات فولادی است. شرکت فولاد مهر سهند نیز یکی از تولیدکنندگان لوله و پروفیل فولادی در شمال غرب کشور است. از جمله اصول راهبردی این شرکت، می‌توان دستیابی به رضایتمندی و خشنودی روزافزون مشتریان و ذی‌نفعان و تلاش برای افزایش بازدهی تولید، تنوع محصولات و کاهش قیمت تمام‌شده محصولات را بیان کرد.

## حل مسئله اصلی

در شرکت مورد مطالعه، واحد برنامه‌ریزی استراتژیک، مسئولیت ارزیابی و انتخاب شرکا و تأمین‌کنندگان زنجیره و واحد برنامه‌ریزی عملیاتی، مدیریت و کنترل موجودی‌ها و تخصیص سفارش بهینه به اعضای زنجیره را بر عهده دارد. در این بخش، از روش‌شناسی پیشنهاد شده به منظور ارائه برنامه‌ای برای دستیابی به اصول راهبردی شرکت یاد شده استفاده می‌شود، به گونه‌ای که به دلیل اولویت‌ترتیبی انتخاب تأمین‌کنندگان بر تخصیص سفارش به آنان، واحد برنامه‌ریزی استراتژیک در سطح رهبر و واحد برنامه‌ریزی عملیاتی در سطح پیرو مد نظر قرار می‌گیرد. مبنای محاسبات، داده‌های تاریخی استخراج شده از تولید لوله و پروفیل این شرکت در مقطعی از سال ۱۳۹۶ است. همچنین، از آنجا که پارامتر

تقاضای مشتریان زنجیره غیر قطعی است، لذا به منظور تعیین عدد فازی مثلثی  $\bar{D}_i$ ، از رابطه ۳۰ بر مبنای داده‌های تاریخی گذشته مربوط به تقاضای مرحله  $i$  ام زنجیره تأمین استفاده می‌شود.

$$\bar{D}_i = (D_i^{(p)}, D_i^{(m)}, D_i^{(o)}) = \left( \min\{D_{it}\}, \frac{\sum_{t=1}^T D_{it}}{T}, \max\{D_{it}\} \right), \quad (i = m) \quad \text{رابطه ۳۰}$$

به‌گونه‌ای که  $D_{it}$  مقدار تقاضای ثبت شده در زمان  $t$  برای مرحله  $i$  ام زنجیره تأمین است.

با توجه به ابعاد زنجیره تأمین شرکت (۱۰-۷-۳-۵)، مسئله فرموله شده در رابطه ۱۶ در زمره مسائل بزرگ قرار می‌گیرد، بنابراین پارامترهای الگوریتم ژنتیک دوسطحی مطابق با مقدار پارامترهای تنظیم شده برای مسائل بزرگ در جدول ۵ مقاداردهی می‌شوند.

برای حل مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی مطالعه موردی، الگوریتم ژنتیک دوسطحی به تعداد ۵ بار تکرار می‌شود، به‌گونه‌ای که پس از مقایسه جواب‌ها توسط معیار استانداردسازی اهداف قابلیت اطمینان ( $R$ ) و هزینه ( $TC$ ) در رابطه ۳۱، جدول ۸ بهترین جواب به‌دست آمده را ارائه می‌کند.

$$L = \min \left( w_1 \times \left( \frac{R^+ - R}{R^+ - R^-} \right) + w_2 \times \left( \frac{TC - TC^-}{TC^+ - TC^-} \right) \right) \quad \text{رابطه ۳۱}$$

به‌گونه‌ای که  $R^+$  و  $R^-$  به ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر به‌دست‌آمده قابلیت اطمینان و  $TC^+$  و  $TC^-$  نیز به ترتیب بیشترین و کمترین مقادیر به‌دست‌آمده هزینه طی ۵ تکرار هستند.  $w_1$  و  $w_2$  نیز، به ترتیب وزن‌های اهمیت اهداف قابلیت اطمینان و هزینه‌اند که در این مقاله مقدار هریک برابر با ۰/۵ در نظر گرفته شده است. شکل ۵ به ترتیب نمودارهای همگرایی قابلیت اطمینان و هزینه بهترین جواب به‌دست‌آمده در هر تکرار را نشان می‌دهد. براساس نتایج جدول ۸، وضعیت بهینه در هر دو معیار قابلیت اطمینان و هزینه، شرایط بهتری را در مقایسه با وضعیت فعلی سیستم ارائه می‌کند و این بیانگر عملکرد صحیح روش شناسی پیشنهادی مقاله حاضر در دستیابی به راه‌حل بهینه است.

### تحلیل حساسیت تغییرات پارامترهای اصلی مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی

در این بخش نحوه تأثیر تغییرات هریک از پارامترهای اصلی مسئله فرموله شده در رابطه ۱۶ با فرض عدم تغییر سایر پارامترهای موجود در مسئله، مورد بررسی قرار می‌گیرد. همچنین نتایج ارائه شده برای هریک از سناریوهای مورد بررسی در این بخش، براساس بهترین جواب‌های تعیین شده توسط رابطه ۳۱ طی ۱۰ بار اجرای الگوریتم ژنتیک دوسطحی است. در جدول ۹، حداکثر تعداد اعضاء قابل تخصیص به مراحل زنجیره تأمین ( $K_i$ ) مشخص شده است. از آنجا که تعداد اعضاء زنجیره بر اهداف قابلیت اطمینان و هزینه اثرگذار است، نتایج جدول ۹ تأیید می‌کند که در جواب بهینه هر سناریو، حداکثر تعداد اعضاء مشخص شده، تخصیص یافته است؛ چرا که با افزایش تعداد اعضاء زنجیره، تقاضای ایجاد شده در سیستم بهتر برآورده شده و کمبود کاهش می‌یابد و در نهایت، قابلیت اطمینان سیستم افزایش خواهد یافت. از سوی دیگر با افزایش تعداد اعضاء زنجیره، هزینه‌های تأمین اعضاء جدید نیز افزایش یافته و به تبع آن هزینه کل سیستم افزایش می‌یابد.





## جدول ۹. بهترین جواب به دست آمده برای سناریوهای تغییر پارامترهای اصلی مسئله

| سناریو | $K_1 - K_2 - K_3 - K_4$ | در مرحله ۱<br>بگذار تخصیص | در مرحله ۲<br>بگذار تخصیص | در مرحله ۳<br>بگذار تخصیص | در مرحله ۴<br>بگذار تخصیص | R                      | TC                     |
|--------|-------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|
| ۱      | ۳-۲-۵-۸                 | [۰۱۱۱۰]                   | [۰۱۱]                     | [۱۱۱۰۰۱۱]                 | [۱۱۱۰۱۱۱۱۰۱]              | ۰/۵۶۶                  | $128249/6 \times 10^6$ |
| ۲      | ۴-۳-۴-۷                 | [۱۱۱۱۰]                   | [۱۱۱]                     | [۱۱۱۰۰۱۰]                 | [۱۰۱۰۱۱۱۱۰۱]              | ۰/۵۸                   | $167560/4 \times 10^6$ |
| ۳      | ۲-۲-۷-۶                 | [۰۰۱۱۰]                   | [۰۱۱]                     | [۱۱۱۱۱۱۱]                 | [۱۰۱۰۱۰۱۱۰۱]              | ۰/۵۶۱                  | $120704/8 \times 10^6$ |
| سناریو | Cap <sub>۱</sub>        | Cap <sub>۲</sub>          | Cap <sub>۳</sub>          | Cap <sub>۴</sub>          | R                         | TC                     |                        |
| ۱      | افزایش ۱۰ درصدی         | کاهش ۱۰ درصدی             | افزایش ۲۰ درصدی           | افزایش ۲۰ درصدی           | ۰/۵۸۵۵                    | $180323/4 \times 10^6$ |                        |
| ۲      | کاهش ۱۰ درصدی           | افزایش ۲۰ درصدی           | کاهش ۱۰ درصدی             | افزایش ۲۰ درصدی           | ۰/۵۸۵۵                    | $204613/2 \times 10^6$ |                        |
| ۳      | کاهش ۱۰ درصدی           | کاهش ۱۰ درصدی             | افزایش ۲۰ درصدی           | کاهش ۲۰ درصدی             | ۰/۵۸۵۵                    | $169028/5 \times 10^6$ |                        |
| سناریو | $\bar{D}_1$             | $\bar{D}_2$               | $\bar{D}_3$               | $\bar{D}_4$               | R                         | TC                     |                        |
| ۱      | کاهش ۵ درصدی            | افزایش ۱۰ درصدی           | افزایش ۵ درصدی            | کاهش ۱۰ درصدی             | ۰/۵۸۵۵                    | $177317/9 \times 10^6$ |                        |
| ۲      | کاهش ۱۰ درصدی           | کاهش ۵ درصدی              | افزایش ۱۰ درصدی           | افزایش ۲۰ درصدی           | ۰/۵۸۵۵                    | $179326/2 \times 10^6$ |                        |
| ۳      | کاهش ۱۰ درصدی           | افزایش ۲۰ درصدی           | افزایش ۱۰ درصدی           | افزایش ۱۰ درصدی           | ۰/۵۸۵۵                    | $184701/9 \times 10^6$ |                        |
| سناریو | H <sub>۱j</sub>         | H <sub>۲j</sub>           | H <sub>۳j</sub>           | H <sub>۴j</sub>           | R                         | TC                     |                        |
| ۱      | افزایش ۲۰ درصدی         | افزایش ۱۵ درصدی           | افزایش ۱۰ درصدی           | افزایش ۵ درصدی            | ۰/۵۸۵۵                    | $204182/9 \times 10^6$ |                        |
| ۲      | کاهش ۱۵ درصدی           | کاهش ۱۰ درصدی             | کاهش ۱۰ درصدی             | کاهش ۵ درصدی              | ۰/۵۸۵۵                    | $177084/6 \times 10^6$ |                        |
| ۳      | کاهش ۱۰ درصدی           | کاهش ۱۰ درصدی             | افزایش ۱۰ درصدی           | افزایش ۱۰ درصدی           | ۰/۵۸۵۵                    | $191391 \times 10^6$   |                        |
| سناریو | P <sub>۱j</sub>         | P <sub>۲j</sub>           | P <sub>۳j</sub>           | P <sub>۴j</sub>           | R                         | TC                     |                        |
| ۱      | افزایش ۵ درصدی          | افزایش ۱۰ درصدی           | افزایش ۱۵ درصدی           | افزایش ۲۰ درصدی           | ۰/۵۸۵۵                    | $211653/4 \times 10^6$ |                        |
| ۲      | کاهش ۱۰ درصدی           | کاهش ۵ درصدی              | افزایش ۱۰ درصدی           | افزایش ۱۰ درصدی           | ۰/۵۸۵۵                    | $207167/4 \times 10^6$ |                        |
| ۳      | افزایش ۱۰ درصدی         | افزایش ۱۵ درصدی           | کاهش ۵ درصدی              | کاهش ۵ درصدی              | ۰/۵۸۵۵                    | $182097/3 \times 10^6$ |                        |
| سناریو | v <sub>۱j</sub>         | v <sub>۲j</sub>           | v <sub>۳j</sub>           | v <sub>۴j</sub>           | R                         | TC                     |                        |
| ۱      | کاهش ۱۰ درصدی           | افزایش ۱۰ درصدی           | کاهش ۱۰ درصدی             | افزایش ۱۰ درصدی           | ۰/۵۸۵۵                    | $176796/7 \times 10^6$ |                        |
| ۲      | کاهش ۱۰ درصدی           | کاهش ۱۰ درصدی             | کاهش ۱۵ درصدی             | کاهش ۲۰ درصدی             | ۰/۵۸۵۵                    | $154720/8 \times 10^6$ |                        |
| ۳      | افزایش ۱۵ درصدی         | افزایش ۱۵ درصدی           | افزایش ۱۰ درصدی           | افزایش ۱۰ درصدی           | ۰/۵۸۵۵                    | $188896/2 \times 10^6$ |                        |
| سناریو | S <sub>۱j</sub>         | S <sub>۲j</sub>           | S <sub>۳j</sub>           | S <sub>۴j</sub>           | R                         | TC                     |                        |
| ۱      | افزایش ۱۰ درصدی         | افزایش ۱۰ درصدی           | افزایش ۱۰ درصدی           | کاهش ۱۵ درصدی             | ۰/۵۸۵۵                    | $199632/2 \times 10^6$ |                        |
| ۲      | افزایش ۱۵ درصدی         | کاهش ۱۰ درصدی             | افزایش ۱۰ درصدی           | افزایش ۵ درصدی            | ۰/۵۸۵۵                    | $179825/4 \times 10^6$ |                        |
| ۳      | کاهش ۱۰ درصدی           | افزایش ۱۰ درصدی           | کاهش ۵ درصدی              | افزایش ۱۰ درصدی           | ۰/۵۸۵۳                    | $195841/7 \times 10^6$ |                        |
| سناریو | R <sub>۱j</sub>         | R <sub>۲j</sub>           | R <sub>۳j</sub>           | R <sub>۴j</sub>           | R                         | TC                     |                        |
| ۱      | کاهش ۱۰ درصدی           | افزایش ۱۰ درصدی           | کاهش ۵ درصدی              | افزایش ۲۰ درصدی           | ۰/۶۲۹                     | $170630/8 \times 10^6$ |                        |
| ۲      | کاهش ۱۰ درصدی           | کاهش ۱۰ درصدی             | کاهش ۵ درصدی              | افزایش ۲۰ درصدی           | ۰/۵۲۸                     | $193627/1 \times 10^6$ |                        |
| ۳      | کاهش ۱۰ درصدی           | کاهش ۱۰ درصدی             | کاهش ۱۰ درصدی             | کاهش ۱۰ درصدی             | ۰/۵۲۷                     | $208371/2 \times 10^6$ |                        |

نتایج جدول ۹ مؤید این است که با افزایش مقدار  $\bar{D}_i$ ، الگوریتم ژنتیک دوسطحی به منظور دستیابی به جواب‌های شدنی به سمت مقادیر بزرگ‌تر  $Q_{ij}$  تمایل خواهد داشت. بنابراین، با افزایش  $Q_{ij}$ ها، مقدار هزینه نهایی سیستم نیز افزایش می‌یابد. همچنین افزایش مقدار  $\bar{D}_i$  در تابع هدف هزینه، افزایش مقدار هزینه نهایی سیستم را در پی خواهد داشت. تغییرات  $\bar{D}_i$  در سناریوهای تعریف شده در جدول ۹، نسبت به تغییرات مقدار نهایی قابلیت اطمینان سیستم بی‌تأثیر بوده است. همچنین افزایش (کاهش) پارامترهای  $H_{ij}$ ،  $P_{ij}$ ،  $v_{ij}$  و  $S_{ij}$  در تابع هدف هزینه در مسئله فرموله شده در رابطه ۱۶، به افزایش (کاهش) مقدار هزینه نهایی منجر شده و نسبت به تغییرات قابلیت اطمینان سیستم بی‌اثر است.

از آنجا که متوسط قابلیت اطمینان در مراحل دوم و چهارم زنجیره، در مقایسه با سایر مراحل کوچک‌تر است، بر اساس نتایج سناریو ۱ تغییرات  $R_{ij}$ ، قابلیت اطمینان سیستم با کاهش قابلیت اطمینان اعضای زنجیره در مراحل اول و سوم و افزایش قابلیت اطمینان اعضا در مراحل دوم و چهارم، نسبت به وضعیت موجود ارتقا یافته و در هزینه‌ها صرفه‌جویی می‌شود. بر اساس سناریوهای ۲ و ۳ و با کاهش قابلیت اطمینان، هزینه‌های سیستم نیز افزایش خواهد یافت. این موضوع می‌تواند به دلیل افزایش هزینه‌های عدم رضایتمندی مشتریان از سیستم باشد.

### تحلیل حساسیت تغییرات پارامترهای استواری مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی

در جدول ۱۰، نتایج به‌دست‌آمده از تغییر پارامترهای بهینه‌سازی استوار در خصوص مسئله مطالعه موردی درج شده است. سناریو ۱ نتایج وضعیت قطعیت را در شرایطی که مقدار پارامتر تقاضای  $i$  برابر با  $D_i^{(m)}$  بوده و  $\alpha = 1$  است و سناریوهای ۲ تا ۱۰ نیز نتایج به‌دست‌آمده از مسئله رابطه ۱۶ را در وضعیت عدم قطعیت ارائه می‌کنند.

سناریو ۹ نیز همان نتایج به‌دست‌آمده از حل مسئله در شرایط عدم قطعیت است که در جدول ۸ ارائه شد. بر اساس مقایسه نتایج ارائه شده در وضعیت‌های قطعیت و عدم قطعیت، هزینه نهایی سیستم در وضعیت قطعیت در کمترین مقدار قرار دارد، چرا که از لحاظ مدل‌سازی، در این وضعیت جزء استواری از تابع هدف هزینه حذف شده و از لحاظ مدیریتی، مقدار تقاضای سیستم کاهش یافته است، بنابراین مقدار بهینه هزینه در کمترین سطح قرار گرفته است. همچنین در سناریوهای ۱ تا ۸ تعداد اعضای تخصیص یافته ۲۴ عضو بوده و در سناریو ۹ این تعداد ۲۵ عضو است. بر این اساس، قابلیت اطمینان سیستم در سناریوهای ۱ تا ۸ از سناریو ۹ کمتر خواهد بود. شایان ذکر است که نتایج به‌دست آمده تحت سناریو ۱۰، محدودیت‌های مسئله رابطه ۱۶ را برآورده نساخته است، بنابراین در این سناریو جواب شدنی وجود ندارد.

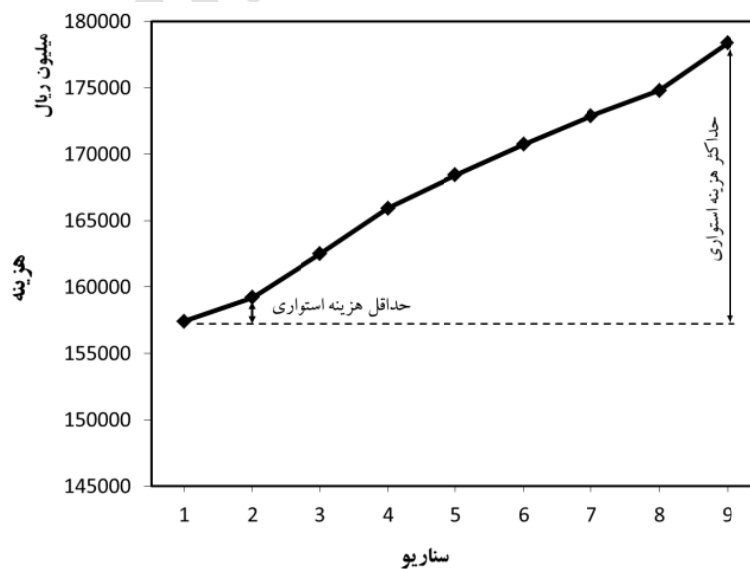
به دلیل ماهیت پیچیده الگوریتم ژنتیک دوسطحی و توجه آن به افزایش کیفیت جواب‌ها، حل مسئله در شرایط قطعیت و عدم قطعیت زمان‌بر خواهد بود که نتایج جدول ۱۰ نیز این گفته را تأیید می‌کند. شکل ۶ روند صعودی مقدار هزینه مربوط به هر سناریوی تعریف شده در جدول ۱۰ را نشان می‌دهد، به گونه‌ای که کمترین (بیشترین) مقدار هزینه نهایی در سناریو ۱ (سناریو ۹) رخ می‌دهد. اختلاف میان مقدار بهینه هزینه در سناریوی مرتبط با وضعیت قطعی و سناریو مربوط به وضعیت غیرقطعی بیان‌کننده هزینه استواری است که عبارت است از حداکثر مقدار هزینه‌ای که می‌بایست در نظر گرفته شود تا امکان‌پذیری وقوع کلیه سناریوهای مورد بررسی (حتی بدترین آنها) را دربرگیرد (پیشوایی، جولای و رزمی، ۲۰۰۹). مطابق شکل ۶، بیشترین (کمترین) هزینه استواری از اختلاف هزینه سناریوهای ۱ و ۹ (۱ و ۲) به‌دست می‌آید.

جدول ۱۰. سناریوهای تغییر پارامترهای استواری

| سناریو          | عدم قطعیت              |                        |                        |                        |
|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                 | ۱                      | ۲                      | ۳                      | ۴                      |
| $\pi$           | ۰                      | ۰/۱                    | ۰/۲                    | ۰/۲۵                   |
| $\omega$        | ۰                      | ۰/۱                    | ۰/۲                    | ۰/۲۵                   |
| $\gamma$        | ۰                      | ۰/۱                    | ۰/۲                    | ۰/۲۵                   |
| $R$             | ۰/۵۸۴۱                 | ۰/۵۸۴۱                 | ۰/۵۸۴۱                 | ۰/۵۸۴۱                 |
| $TC$            | $۱۵۷۴۱۹/۶ \times ۱۰^۶$ | $۱۵۹۲۰۸/۳ \times ۱۰^۶$ | $۱۶۲۴۹۵/۵ \times ۱۰^۶$ | $۱۶۵۹۳۱/۲ \times ۱۰^۶$ |
| $K_i$           | ۲۴                     | ۲۴                     | ۲۴                     | ۲۴                     |
| زمان حل (دقیقه) | ۳۱۵/۲۶                 | ۳۴۸/۴۱                 | ۳۴۰/۳۲                 | ۳۵۴/۰۹                 |

| سناریو          | عدم قطعیت              |                        |                        |                        |
|-----------------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
|                 | ۶                      | ۷                      | ۸                      | ۹                      |
| $\pi$           | ۰/۴                    | ۰/۵                    | ۰/۶                    | ۰/۶۵                   |
| $\omega$        | ۰/۴                    | ۰/۴                    | ۰/۴                    | ۰/۴۳                   |
| $\gamma$        | ۰/۴                    | ۰/۵                    | ۰/۵                    | ۰/۵۲                   |
| $R$             | ۰/۵۸۴۱                 | ۰/۵۸۴۱                 | ۰/۵۸۴۱                 | ۰/۵۸۵                  |
| $TC$            | $۱۷۰۷۴۱/۲ \times ۱۰^۶$ | $۱۷۲۸۸۷/۷ \times ۱۰^۶$ | $۱۷۴۷۹۲/۵ \times ۱۰^۶$ | $۱۷۸۲۶۴/۶ \times ۱۰^۶$ |
| $K_i$           | ۲۴                     | ۲۴                     | ۲۴                     | ۲۵                     |
| زمان حل (دقیقه) | ۳۴۵/۲۲                 | ۳۵۱/۱۶                 | ۳۵۴/۴۸                 | ۳۴۷/۱۴                 |



شکل ۶. روند تغییر هزینه بر اساس سناریوهای تغییر پارامترهای استواری

همچنین در نمودار شکل ۶، سناریو ۸ تا ۹ با شیب بیشتری در مقایسه با سایر سناریوها ترسیم شده است که مهم‌ترین علت آن، افزایش یک عضو جدید به اعضای زنجیره و به تبع آن افزایش بیشتر هزینه‌های سیستم است.

## نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به اهمیت نقش هماهنگ‌سازی در زنجیره‌های تأمین، در این مقاله یک مدل برنامه‌ریزی دوسطحی برای زنجیره‌های تأمین چند مرحله‌ای پیشنهاد شد که در سطح رهبر، مسئله انتخاب تأمین‌کنندگان و در سطح پیرو، مسئله تخصیص سفارش به اعضای منتخب فرموله شدند. در مدل پیشنهاد شده، پارامتر تقاضای مشتریان یک پارامتر غیرقطعی است و برای حل مسئله عدم قطعیت، از تکنیک بهینه‌سازی استوار استفاده شد. از آنجا که مدل پیشنهاد شده در قالب برنامه‌ریزی دوسطحی فرموله شده و حل این‌گونه مدل‌ها توسط نرم‌افزارهای حل‌کننده مقدور نیست، در این مقاله از الگوریتم ژنتیک دوسطحی استفاده شده است. مدل پیشنهاد شده برای چند مسئله نمونه توسط الگوریتم ژنتیک دوسطحی، روش شمارش کامل و نرم‌افزار لینگو به اجرا درآمد و نتایج به‌دست آمده مقایسه و ارزیابی شدند. پس از تشریح مدل پیشنهاد شده برای حل مسئله مطالعه موردی، نتایج به‌دست آمده تحت سناریوهای مختلف تحلیل شد که مهم‌ترین آنها عبارت‌اند از:

- از جنبه مدل‌سازی مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی، افزایش تعداد اعضای زنجیره موجب افزایش قابلیت اطمینان و هزینه سیستم می‌شود. این موضوع می‌تواند به دلیل فضای رقابتی حاکم میان سطوح رهبر و پیرو باشد؛ چرا که هر یک از سطوح در حالی به دنبال دستیابی به حداکثر منافع خود است که اهداف آنها با دیگری متضادند. بنابراین هدف، ایجاد توازن میان قابلیت اطمینان و هزینه از طریق تعامل و هماهنگی میان سطوح رهبر و پیرو است.
- نتایج به‌دست‌آمده در شرایط عدم قطعیت در مقایسه با وضعیت قطعی، بدتر است؛ چرا که در تابع هدف هزینه تحت شرایط عدم قطعیت، جزء استواری وجود دارد که به افزایش هزینه سیستم منجر می‌شود. از جنبه مدیریتی، افزایش هزینه در بهترین وضعیت غیرقطعی در مقایسه با بهترین وضعیت قطعی، گویای هزینه استواری سیستم در برابر کلیه سناریوهایی است که وقوع هر یک از آنها امکان‌پذیر است.
- برای بهبود قابلیت اطمینان سیستم زنجیره تأمین باید متوسط قابلیت اطمینان هر مرحله از زنجیره افزایش یابد. از این رو، به‌منظور صرفه‌جویی اقتصادی باید متوسط قابلیت اطمینان مراحل از زنجیره تأمین که در مقایسه با سایر مراحل در کمترین (بیشترین) سطح قرار دارند، افزایش (کاهش) یابد تا از بروز هزینه‌های اضافی جلوگیری شود.
- همان‌گونه که افزایش قابلیت اطمینان می‌تواند به افزایش هزینه‌های سیستم منتهی شود، کاهش قابلیت اطمینان که عمدتاً از عدم رعایت مسائل کیفی و کمبود نشئت می‌گیرد نیز، به افزایش سطح عدم رضایتمندی مشتریان و در نهایت، افزایش هزینه کل سیستم منجر خواهد شد. از این رو، در وضعیت مطلوب باید به سطحی از قابلیت اطمینان سیستم توجه شود که از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه است.

در رابطه با نتایج این پژوهش، موضوعاتی مانند مدل‌سازی مسئله انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش در زنجیره‌های تأمین معکوس، چند محصولی و چند مرحله‌ای، مدل‌سازی مسئله در قالب مدل برنامه‌ریزی دوسطحی چند هدفه و نحوه حل آن، کاهش زمان حل مسئله برنامه‌ریزی دوسطحی از طریق به‌کارگیری سایر الگوریتم‌های فراابتکاری، به‌منظور انجام تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود.

## منابع

- ابوذری، سحر؛ نهاوندی، نسیم (۱۳۹۵). انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارش در صنعت برق. چهارمین کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های کاربردی در مدیریت و حسابداری، تهران: دانشگاه شهید بهشتی.
- امیری، مقصود (۱۳۹۳). *قابلیت اطمینان*. تهران: انتشارات آن.
- حسینی گودرزی، عاطفه؛ ربانی، مسعود (۱۳۹۱). انتخاب تأمین‌کننده‌ها در زنجیره تأمین با رویکرد تولید بر مبنای سفارش با در نظر گرفتن ارزش در معرض ریسک. *فصلنامه مدیریت زنجیره تأمین*، ۱۴ (۳۶)، ۲۰-۲۹.
- اشرفی، مهدی؛ چهارسوقی، کمال (۱۳۹۲). انتخاب تأمین‌کننده پایدار و تخصیص سفارش با الگوریتم تغییر شکل یافته بندرز. *مجله مدل‌سازی پیشرفته ریاضی*، ۳ (۲)، ۸۱-۱۰۲.
- رمضان‌زاده برکی، روح‌اله؛ کیانفر، فرهاد (۱۳۹۴). ارائه مدلی برای انتخاب تأمین‌کنندگان و تخصیص سفارش به آنها با در نظر گرفتن مسیریابی سبز تحت عدم قطعیت. *کنفرانس بین‌المللی پژوهش‌های نوین در مدیریت و مهندسی صنایع*، تهران.
- فائز، فرهاد؛ قدسی‌پور، سید حسن؛ فاطمی قمی، سید محمد تقی (۱۳۸۵). طراحی یک مدل تلفیقی برای انتخاب تأمین‌کننده و تخصیص سفارشات با استفاده از روش استدلال موردگرا و برنامه‌ریزی ریاضی چند هدفه. *فصلنامه دانشکده فنی دانشگاه تهران*، ۴۰ (۴)، ۵۵۳-۵۶۸.
- نصیری، محمد مهدی؛ پورمحمدضیا، نادیا (۱۳۹۴). یک مدل تلفیقی جهت انتخاب تأمین‌کنندگان و تخصیص سفارش در زنجیره تأمین. *نشریه تخصصی مهندسی صنایع*، ۴۹ (۱)، ۱۱۷-۱۲۸.
- نورمحمدی شالکه، پروین؛ پایدار، محمد مهدی؛ حاجی آقایی کشتلی، مصطفی (۱۳۹۵). انتخاب تأمین‌کننده پایدار و تخصیص مقدار سفارش با در نظر گرفتن تخفیف‌های مقداری. *دومین کنفرانس بین‌المللی مهندسی صنایع و سیستم‌ها*، مشهد: دانشگاه فردوسی.

## References

- Abouzari, S. & Nahavandi, N. (2016). Supplier selection and order allocation in the electrical industry. *4th National Conference on Applied Research in Management and Accounting Sciences*. Tehran: Shahid Beheshti University, September. (in Persian)
- Amiri, M. (2014). *Reliability*. Tehran: Ann Publishing. (in Persian)
- Arabzad, S.M., Ghorbani, M., Razmi, J. & Shirouyehzad, H. (2015). Employing fuzzy TOPSIS and SWOT for supplier selection and order allocation problem. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 76(5-8), 803-818.
- Ashrafi, M. & Chaharsughi, K. (2014). Sustainable supplier selection and order allocation with modified benders decomposition. *Journal of Advanced Mathematical Modeling*, 3(2), 81-102. (in Persian)

- Bard, J.F. (1991). Some properties of the bi-level linear programming. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 68(2), 371–378.
- Chen, Y.J. (2011). Structured methodology for supplier selection and evaluation in a supply chain. *Information Sciences*, 181(9), 1651-1670.
- Colson, B., Marcotte, P. & Savard, G. (2007). An overview of bilevel optimization. *Annals of Operations Research*, 153(1), 235–56.
- Dhillon, B.S. (1992). *Reliability and Quality Control: Bibliography on General and Specified Area*. Ontario: Beta Publisher.
- Ertogral, K. & Wu, S.D. (2000). Auction-theoretic coordination of production planning in the supply chain. *IIE Transactions*, 32(10), 1154–1168.
- Esfandiari, N. & Seifbarghy, M. (2013). Modeling a stochastic multi-objective supplier quota allocation problem with price-dependent ordering. *Applied Mathematical Modelling*, 37(8), 5790-5800.
- Faez, F., Ghodsi Pour, S.H., Fatemi Ghomi, S.M.T. (2006). Designing an integrated model for selecting supplier and allocation of orders using the method of argumentative reasoning and multi-objective mathematical programming. *Journal of Faculty of Engineering*, 40(4), 553-568. (in Persian)
- Haleh, H. & Hamidi, A. (2011). A fuzzy MCDM model for allocating orders to suppliers in a supply chain under uncertainty over a multi-period time horizon. *Expert Systems with Applications*, 38(8), 9076-9083.
- Hamdan, S. & Cheaitou, A. (2017). Supplier selection and order allocation with green criteria: An MCDM and multi-objective optimization approach. *Computers & Operations Research*, 81, 282-304.
- Hassani Goudarzi, A. & Rabbani, R. (2012). Supplier selection in supply chain with an order-based production approach considering Value at Risk. *Iranian Journal of Supply Chain Management*, 36, 20-29. (in Persian)
- Hassanzadeh Amin, S., Razmi, J. & Zhang, G. (2011). Supplier selection and order allocation based on fuzzy SWOT analysis and fuzzy linear programming. *Expert Systems with Applications*, 38(1), 334-342.
- He, M., Xie, J., Wu, X., Hu, Q. & Dai, Y. (2016). Capability coordination in automobile logistics service supply chain based on reliability. *Procedia Engineering*, 137, 325-333.
- Holland, J. H. (1975). *Adaptation in natural and artificial systems*. Michigan: University of Michigan Press.
- Hosseini, E. & Nakhai Kamalabadi, I. (2015). Two approaches for solving non-linear bi-level programming problem. *Advances in Research*, 3(5), 512-525.
- Kuo, R.J. & Han, Y.S. (2011). A hybrid of genetic algorithm and particle swarm optimization for solving bi-level linear programming problem-A case study on supply chain model. *Applied Mathematical Modelling*, 35(8), 3905–3917.
- Kö ksoy, O., & Yalcinoz, T. (2008). Robust design using pareto type optimization: A genetic algorithm with arithmetic crossover. *Computers & Industrial Engineering*, 55(1), 208-2018.
- Leng, M. & Parlar, M. (2005). Game-theoretic applications in supply chain management: a review. *INFOR Information Systems and Operational Research*, 43(3), 187–220.
- Nasiri, M.M. & Pourmohammad Zia, N. (2015). A hybrid model for supplier selection and order allocation in supply chain. *Journal of Industrial Engineering*, 49(1), 117-128. (in Persian)
- Ng, T.S., Sun, Y. & Fowler, J. (2010). Semiconductor lot allocation using robust optimization. *European Journal of Operational Research*, 205(3), 557-570.

- Nour Mohammadi Shalkeh, P., Paydar, M.M. & Haji Aghaei Keshtli, M. (2016). Selecting a stable supplier and assigning order quantities with allowance for discounts. *2nd International Conference on Industrial and Systems Engineering*, Mashhad: Ferdousi University. (in Persian)
- Pishvae, M.S. & Fazli Khalaf, M. (2016). Novel robust fuzzy mathematical programming methods. *Applied Mathematical Modelling*, 40(1), 407–418.
- Pishvae, M.S., Jolai, F. & Razmi, J. (2009). A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design. *Journal of Manufacturing Systems*, 28(4), 107-114.
- Porter, M. E. (1985). *The Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*. New York: Free Press.
- Punniyamoorthy, M., Mathiyalagan, P. & Parthiban, P. (2011). A strategic model using structural equation modeling and fuzzy logic in supplier selection. *Expert Systems with Applications*, 38(1), 458–474.
- Rabieh, M., Modarres, M. & Azar, A. (2011). Robust-fuzzy model for supplier selection under uncertainty: An application to the automobile industry. *Scientia Iranica*, In press: DOI: 10.24200/sci.2017.4456.
- Ramezanzadeh Baraki, R. & Kianfar, F. (2015). Providing a model for selecting suppliers and assigning orders to them by considering green routing under uncertainty. *International Conference on Recent Researches in Management and Industrial Engineering*, Tehran. (in Persian)
- Razmi, J. & Rafiei, H. (2010). An integrated analytic network process with mixed-integer non-linear programming to supplier selection and order allocation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 49(9-12), 1195–1208.
- RoosbehNia, A., Hemmati Far, M. & Akhavan Niaki, S.T. (2015). A hybrid genetic and imperialist competitive algorithm for green vendor managed inventory of multi-item multi-constraint EOQ model under shortage. *Applied Soft Computing*, 30, 353-364.
- Shabanpour, H., Yousefi, S. & Farzipoor Saen, R. (2017). Future planning for benchmarking and ranking sustainable suppliers using goal programming and robust double frontiers DEA. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 50, 129–143.
- Shah, N.H. & Soni, H. (2011). A multi-objective production inventory model with backorder for fuzzy random demand under flexibility and reliability. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 10(4), 341–356.
- Singh, A. (2014). Supplier evaluation and demand allocation among suppliers in a supply chain. *Journal of Purchasing and Supply Management*, 20(3), 167–176.
- Sivanandam, S. N. & Deepa, S. N. (2008). *Introduction to Genetic Algorithms*. Berlin: Springer Berlin Heidelberg.
- Stephan, J. & Badr, Y. (2007). A quantitative and qualitative approach to manage risks in the supply chain operations reference. *2nd International Conference on Digital Information Management*, 1, 410–417.
- Venkatesan, S.P. & Goh, M. (2016). Multi-objective supplier selection and order allocation under disruption risk. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 95, 124-142.
- Yang, S., Hong, K. & Lee, C. (2014). Supply chain coordination with stock-dependent demand rate and credit incentives. *International Journal of Production Economics*, 157, 105-111.
- Zhang, H., Deng, Y., Chan, F.T.S. & Zhang, X. (2013). A modified multi-criterion optimization genetic algorithm for order distribution in collaborative supply chain. *Applied Mathematical Modelling*, 37(14-15), 7855-7864.