



# Industrial Innovations:

Requirements and Strategies

<http://jii.araku.ac.ir>



## Designing a flexible supply chain network in the pharmaceutical industry with different delivery modes

Alireza Goli <sup>a\*</sup>, Sourena Rahmani <sup>a</sup>, Mohammad Amin Khedri <sup>a</sup>, Amin Hosseini <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Industrial Engineering and Future studies, Faculty of Engineering, University of Isfahan, Iran

### Original Article

Use your device to scan and read the article online



**Citation:** Goli A, Rahmani S, Khedri M A, Hosseini A. Designing a flexible supply chain network in the pharmaceutical industry with different delivery modes. *Mechanics of Advanced and Smart Materials*. 2023; 1(1)52-73.

 <https://10.52547/jii.1.1.52>

### KEYWORDS

Flexible supply chain,  
Adaptive meta-heuristic algorithm,  
Direct shipment,  
Direct delivery.

### ABSTRACT

Flexible supply chain networks are one of the most influential classes of supply chains in production and service. In such networks, different delivery modes can significantly increase the efficiency of the entire chain. In this article, mixed integer programming is used to design four-stage and multi-product supply chain networks in the pharmaceutical industry. The introduced model includes three different modes of delivery, which are: normal delivery, direct transportation and direct delivery. NSGA-II and MOHPSO algorithms have been used to solve this mathematical model. The obtained answers show that different optimal answers can be provided by trade-off between objectives. The comparisons of this algorithm with the NSGA II algorithm show the high efficiency of the proposed algorithm in solving the problem of flexible supply chain network design. In the end, the case study of supplying the pharmaceutical industry using the MOHPSO meta-heuristic algorithm shows that the presented set of Pareto solutions can be implemented and also improve customer satisfaction.

### Extended Abstract

#### 1. Purpose

In this study, we consider a multi-product and multi-stage flexible supply chain problem. The investigated chain includes five levels, which are: suppliers, manufacturing plants, distribution centers, retail areas, and customers, as shown in Figure 1. Purpose of the optimizing this supply chain are as follows.

- Selection and location of production equipment.
- Determining the amount of flow between production equipment.
- Choosing the best mode of transportation to deliver products to customers.
- Choosing the best transportation strategy to increase customer satisfaction.
- Minimizing the costs of the entire network.

#### 2. Design/methodology/approach

To satisfy the goal of production flexibility, the multi-product feature is added to the mathematical formulation. In addition, the supply chain network becomes a four-stage network by considering some suppliers; Also, for more flexibility of the supply chain, the selection of different transportation methods has been considered in two direct and indirect strategies, as well as

\* Corresponding author. Tel.: 031-37935662

E-mail address: [goli.a@eng.ui.ac.ir](mailto:goli.a@eng.ui.ac.ir)

DOI: <https://10.52547/jii.1.1.52>.

Received: August 24; Received in revised form: November 21; Accepted: December 11.

©Author



normal delivery modes, direct shipping and direct delivery. Since the problem is NP-hard, we proposed two multi-objective meta-heuristic algorithms as NSGA-II and MOHPSO.

### 3. Findings

In this research, a mathematical model was developed for locating and allocating facilities in a multi-level supply chain. In this model, the capacity of the factories and the capacity of the supply centers, as well as the cost of production and maintenance, was a fixed amount. Also, inventory and transportation costs were considered along with this location. The general innovation of this research is the simultaneous optimization of costs and customer satisfaction in the hierarchical location of the supply chain, as well as the use of evolutionary multi-objective meta-heuristic algorithms in order to optimize it. The algorithm presented in this article, which is based on the particle swarm algorithm, sought to find Pareto optimal solutions for the developed model and finally, it reports a number of insignificant solutions. The obtained answers show that different optimal answers can be provided by trade-off between objectives. The comparisons of this algorithm with the NSGA II algorithm show the high efficiency of the proposed algorithm in solving problems related to hierarchical positioning in the supply chain. In the end, the case study of providing mountain bikes using MOHPSO meta-heuristic algorithm shows that the set of presented Pareto solutions can be implemented and also improve customer satisfaction. As future research for the presented model, it is suggested to consider the reliability balance and risk factor for the chain as well as the cost of reliability.

### 4. Research limitations/implications

The main element of the chain is the transport network, which determines the efficiency. This element is used in all stages of production, from production to delivery of the final product to customers. With the proper design of transportation devices, the efficiency of the chain can be increased and the delivery time of products can be reduced. The solid transportation problem (STP) is one of the famous combinatorial optimization problems. In this transportation problem, an additional (sub) constraint consists of two main constraints (origin, destination, and capacity constraints) of the traditional transportation problem introduced by [1]. This additional restriction is generally associated with different types of transportation (trucks, planes, trains, etc.). The purpose of this method is to transport homogeneous products from some origins to some destinations using a suitable transportation method that minimizes the cost of transportation.

### 5. Practical implications

By having a flexible supply chain network, which is one of the competitive strategies, it is possible to cover uncertain situations, high variety of products, responding to changes in demand and timely. One of the ways to achieve productivity and flexibility at the same time is to use different modes of transportation, another way is to use different modes of delivery such as normal delivery, direct delivery and direct shipping. One of the main objectives of supply chain management is the strategic and operational planning of the supply chain and the control of its material flow. To achieve a high level of flexibility, it is essential to have a strategic supply chain network. One of the most important advantages of using direct transportation and direct delivery is the elimination of inventory, which reduces supply chain costs. The proposed approach is a strategic decision.

### 6. Originality/value

As a key innovation in the supply chain, in this research, the supply chain network has been transformed into a four-stage network by considering some suppliers. Also, for more flexibility of the supply chain, the selection of different transportation methods has been considered in two direct and indirect strategies, as well as normal delivery modes, direct shipping and direct delivery. Since the problem is NP-hard, we proposed some classical and adaptive meta-heuristic algorithms to solve the problem effectively. The parameters of the algorithms are adjusted through a common empirical method.



## طراحی شبکه زنجیره تأمین انعطاف‌پذیر در صنعت دارو سازی با حالت‌های تحویل مختلف

علیرضا گلی الف\*، سورنا رحمانی ب، محمدمامین خدری پ، امین حسینی ت

الف استادیار، گروه مهندسی صنایع و آینده‌پژوهی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، [goli.a@eng.ui.ac.ir](mailto:goli.a@eng.ui.ac.ir)

ب کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع و آینده‌پژوهی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، [s.rahmani@eng.ui.ac.ir](mailto:s.rahmani@eng.ui.ac.ir)

پ کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع و آینده‌پژوهی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، [ma.khedri@eng.ui.ac.ir](mailto:ma.khedri@eng.ui.ac.ir)

ت کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع و آینده‌پژوهی، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران، [amin.hosseini@eng.ui.ac.ir](mailto:amin.hosseini@eng.ui.ac.ir)

چکیده	واژگان کلیدی
شبکه‌های زنجیره تأمین انعطاف‌پذیر یکی از تأثیرگذارترین کلاس‌های زنجیره تأمین در تولید و خدمت‌دهی است. در این چنین شبکه‌ها حالت‌های تحویل متفاوتی می‌توانند به طور قابل توجهی کارآمدی کل زنجیره را بالا ببرند. در این مقاله از برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط جهت طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین چهار مرحله‌ای و چند محصولی در صنعت داروسازی استفاده شده است. مدل معرفی شده سه حالت مختلف تحویل را در بردارد که عبارت‌اند از: تحویل معمولی، حمل‌ونقل مستقیم و تحویل مستقیم. برای حل این مدل ریاضی، از الگوریتم‌های NSGA-II و MOHPSO استفاده شده است. جواب‌های به دست آمده، نشان می‌دهد که با تبادل (trade-off) بین اهداف می‌توان جواب‌های بهینه متفاوتی ارائه کرد. مقایسات انجام شده این الگوریتم با الگوریتم NSGA II نشانگر کارایی بالای الگوریتم پیشنهادی در حل مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین منعطف می‌باشد. در پایان نیز مطالعه موردی تامین صنعت داروسازی با استفاده از الگوریتم فراابتکاری MOHPSO نشان می‌دهد مجموعه جواب‌های پارتو ارائه شده قابلیت اجرایی شدن و نیز بهبود رضایتمندی مشتریان را نیز دارا می‌باشد.	زنجیره تأمین انعطاف‌پذیر، الگوریتم فراابتکاری، حمل‌ونقل مستقیم، تحویل مستقیم.
	تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۶/۰۲
	تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۰۸/۳۰
	تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۰

### ۱- مقدمه

با افزایش رقابت در محیط کاری، سازمان‌ها و کارخانه‌های تولیدی مجبور به بهینه کردن زنجیره تأمین خود به منظور اطمینان از کارایی عملیات شده‌اند. بهینه‌سازی به کاهش هزینه‌ها و بالا بردن رضایت مشتریان کمک می‌کند [۲]. هدف از مدیریت زنجیره تأمین، بالا بردن بهره‌وری سازمان و اثربخشی زنجیره در طی عملیات است. هر زنجیره شامل مراحل ماند، خرید مواد اولیه خام، تبدیل آن‌ها به محصول نهایی، انتقال محصولات به مراکز توزیع و در نهایت انتقال به خرده‌فروشان و مشتریان است. یک شبکه زنجیره تأمین از تأمین‌کنندگان، کارخانه‌ها، مراکز توزیع، خرده‌فروشان و مشتریان تشکیل می‌شود که پیاده‌سازی این شبکه تأثیر قابل توجهی در کاهش هزینه‌ها و بالا بردن کارایی عملیات تولیدی دارد.

اصلی‌ترین عنصر زنجیره، شبکه حمل‌ونقل است که کارایی را تعیین می‌کند. این عنصر در تمامی مراحل تولید، از تولید تا

تحويل محصول نهایی به مشتریان کاربرد دارد. با طراحی مناسب دستگاه‌های حمل‌ونقل می‌توان کارایی زنجیره را بالا برد و زمان تحويل محصولات را کاهش داد. مسئله حمل‌ونقل جامد (STP) یکی از مسائل بهینه‌سازی ترکیبی معروف است که توسط [۳] مطرح شد. در این مسئله حمل‌ونقل یک محدودیت اضافی (فرعی) از دو محدودیت اصلی (مبدأ، مقصد و محدودیت‌های ظرفیت) مسئله حمل‌ونقل سنتی که توسط [۱] معرفی شد، تشکیل می‌شود. این محدودیت اضافی به‌طور کلی با انواع مختلفی از انتقال (کامیون‌ها، هواپیماها، قطارها و...) مرتبط است. هدف این روش، حمل‌ونقل محصولات همگن از برخی مبدأها به برخی مقاصد با استفاده از راه انتقالی مناسب است که هزینه حمل‌ونقل را کمینه می‌کند.

می‌توان با داشتن یک شبکه زنجیره‌تأمین انعطاف‌پذیر<sup>۱</sup> که یکی از استراتژی‌های رقابتی است، موقعیت‌های نامشخص، تنوع محصولات زیاد، پاسخگویی به تغییرات تقاضا و به‌موقع را پوشش داد [۴]. یکی از راه‌های رسیدن به بهره‌وری و انعطاف‌پذیری به‌طور هم‌زمان، استفاده از حالت‌های مختلف حمل‌ونقل است، راه دیگر، استفاده از حالت‌های مختلف تحويل مانند تحويل عادی، تحويل مستقیم<sup>۲</sup> و حمل مستقیم است. یکی از اهداف اصلی مدیریت زنجیره‌تأمین، برنامه‌ریزی استراتژیک و عملیاتی زنجیره‌تأمین و کنترل جریان مواد آن است. برای دستیابی به انعطاف‌پذیری سطح بالا، داشتن یک شبکه زنجیره‌تأمین استراتژیک ضروری است [۵]. یکی از مهم‌ترین مزیت‌های استفاده از حمل‌ونقل مستقیم<sup>۳</sup> و تحويل مستقیم حذف انبارهای موجودی است که موجب کاهش هزینه‌های زنجیره‌تأمین می‌شود. رویکرد پیشنهادی یک تصمیم استراتژیک است [۶].

طبق گفته ریس [۷] در شبکه‌های زنجیره‌تأمین منعطف حالت‌های مختلفی برای تحويل محصولات وجود دارد که توسط بسیاری از شرکت‌های مشهور مانند "دل"<sup>۴</sup> [۸، ۹] و "صنایع خودروسازی" [۱۰] استفاده می‌شود. در تحويل مستقیم، محصولات به‌جای خرده‌فروشی‌ها از مراکز توزیع به مشتری‌ها منتقل می‌شوند. در حمل‌ونقل مستقیم محصولات مستقیم از کارخانه‌ها به مشتریان یا خرده‌فروشان منتقل می‌شوند. تحويل مستقیم و حمل‌ونقل مستقیم، زمان تحويل و هزینه حمل‌ونقل را کاهش داده و سطح رضایت مشتریان را افزایش می‌دهد [۸].

## ۲- پیشینه تحقیق

اخیراً مسائل مربوط به تحويل در شبکه زنجیره‌تأمین مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. با این حال بیشتر تحقیقات ارائه شده به بررسی مسائل مربوط به تحويل کلاسیک در زنجیره‌تأمین می‌پردازند. در این بخش تنها مسائل مربوط به حمل‌ونقل مستقیم یا تحويل مستقیم بررسی می‌شود.

چوپرا [۱۱] چندین عامل مؤثر در انتخاب شبکه‌های توزیع مختلف را توصیف و نقاط قوت و ضعف را مورد تجزیه و تحلیل قرار داد. همچنین اسکینگان [۱۲] یک مدل دو مرحله‌ای طراحی شبکه زنجیره‌تأمین (SCND<sup>۵</sup>) را توسعه داد و آن را به‌عنوان یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی فرمول نمود. میلو [۱۳] یک مسئله زنجیره‌تأمین سه مرحله‌ای چند محصولی و چند زمانه را در نظر گرفت و با استفاده از یک مدل عدد صحیح، تأثیرات متنوع آن را بررسی نمود.

میلو [۱۳] مدل قبلی خود را توسعه داد و الگوریتم فراابتکاری<sup>۶</sup> "تبو سرچ" را برای مسائل در اندازه‌های کوچک ارائه داد. میلو [۱۴] مدل عدد صحیح مختلط را به مقاله قبلی خود اضافه نمود. او برای حل این مدل یک روش اکتشافی دومرحله‌ای که شامل مراحل ساخت و بهسازی بود را در زنجیره‌تأمین خود ارائه داد. دن [۱۵] یک مسئله چند مرحله‌ای را در زمینه‌ی چند محصولی و چند دوره‌ای ارائه داد و آن را با مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط حل نمود. دن [۱۶] مدل قبلی خود را با استفاده از رویکرد فراابتکاری بنا شده بر پایه آزادسازی خطی حل نمود؛ او مدل ابتکاری ارائه شده خود را در سال ۲۰۱۰ با استفاده از روش ابتکاری و توابع محدب ارتقا داد [۱۷].

<sup>1</sup> Flexible supply chain

<sup>2</sup> Direct delivery

<sup>3</sup> Direct shipment

<sup>4</sup> Dell

<sup>5</sup> Supply chain network design

<sup>6</sup> Tabu search

لین [۸] مدل برنامه‌نویسی عدد صحیح مختلط را برای حل مسئله تدارکات سه مرحله‌ای یکپارچه با حمل‌ونقل و تحویل مستقیم در نظر گرفت. آن‌ها برای حل مدل خود از الگوریتم ژنتیک استفاده نمودند. سینترون [۱۸] یک مدل عدد صحیح مختلط خطی چند معیاری برای مسئله SCND سه مرحله‌ای با حمل‌ونقل و تحویل مستقیم ارائه داد. آن‌ها از داده‌های واقعی در مدل استفاده کرده و مدل را با نرم‌افزار گمز<sup>۱</sup> حل نموده‌اند.

پیشوایی و ربانی [۱۹] برای یک مدل SCND دو مرحله‌ای با حمل‌ونقل مستقیم دو مدل عدد صحیح مختلط خطی پیشنهاد داده‌اند؛ همچنین آن‌ها یک الگوریتم ابتکاری به‌عنوان راه‌حل ارائه کرده و برای حل مسئله، الگوریتم بهینه‌سازی ذرات ایمنی هیبریدی ترکیبی را پیشنهاد نمودند. جولایمی و فن [۲۰] یک مسئله دو مرحله‌ای SCND چند دوره‌ای را تدوین و با استفاده از نرم‌افزار سیپلکس<sup>۲</sup> در مثال‌هایی با ابعاد مختلف حل نمودند. مهدی زاده و افراينده پی [۲۱] یک مسئله چندمرحله‌ای SCND را به‌عنوان یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی مختلط عدد صحیح تدوین نمودند. در بررسی آن‌ها یک رویکرد مبتنی بر الگوریتم ژنتیک و ترکیب آن با الگوریتم شبیه‌سازی تبرید در دو مرحله ارائه شده است. بابا زاده و همکاران [۲۲] مدل ارائه شده در مقاله قبل خود را در یک بستر سه مرحله‌ای توسعه دادند و به این نتیجه رسیدند که هزینه‌های ثابت، هزینه برون‌سپاری و تقاضا مشتریان تأثیر چشمگیری بر تعداد تسهیلات مورد استفاده دارد.

هایرمت [۲۳] یک مسئله SCND سه مرحله‌ای و چند هدفه را مدل نمود. هدف مدل مربوطه کاهش کل هزینه‌ها و افزایش نرخ استفاده از تسهیلات است. در این مطالعه الگوریتم ژنتیک مرتب‌سازی نامغلوب به‌عنوان یک‌راه حل ارائه شده است. در مقاله ریانتنگ و دومرنگسیری [۲۴] سیستم حمل‌ونقل از محل بارگیری در دو مرحله از SCND تشکیل شده است؛ ابتدا روی کامیون‌های برون شهری بارگیری شده و سپس بدون انتقال به انبار مستقیماً به دست خرده‌فروشان می‌رسد؛ آن‌ها یک مدل عدد صحیح مختلط خطی را فرمول نموده و الگوریتم ابتکاری خود را با نرم‌افزار سیپلکس حل نمودند.

رجبعلی پور چشمه‌غاز و همکاران [۲۵، ۲۶] یک موضوع چند مرحله‌ای از مسئله SCND را با روش عدد صحیح مختلط خطی فرمول نمود. برای حل این مدل از الگوریتم ژنتیک چند هدفه استفاده نمود. بزرگی راد و همکاران [۲۷] مسئله SCND سه مرحله‌ای را با الگوریتم ژنتیک با توجه به جریمه حل نموده و در نرم‌افزار لیندو<sup>۳</sup> مقایسه کرده‌اند.

جامروس و همکاران [۲۸] یک مدل ریاضی چند دوره‌ای، سه مرحله‌ای رو به جلو و یا معکوس را با امکان تحویل مستقیم از مراکز توزیع به مشتریان ارائه داده‌اند. آن‌ها همچنین یک نسخه ترکیبی از الگوریتم ژنتیک و بهینه‌سازی ذرات برای حل مسئله ارائه نمودند. گویدان و همکاران [۲۹] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط<sup>۴</sup> را برای یک مسئله SCND چهار مرحله‌ای پایدار با تقاضای تصادفی و امکان حمل مستقیم بین مرکز توزیع و خرده‌فروشان پیشنهاد داد تا به‌طور هم‌زمان هزینه‌های کل و اثرات زیست‌محیطی را کمینه سازد؛ آن‌ها یک مسئله چند هدفی ترکیبی را برای حل مدل پیشنهاد نمودند.

کورتینا و همکاران [۳۰] برون‌سپاری و انتخاب مدل‌های حمل‌ونقل متفاوت را در مسئله پیشنهادی توسط میلو و همکارانش [۱۳، ۱۴، ۳۱] در نظر گرفتند و تأثیرات استراتژی‌های مختلف در توزیع را بررسی نمودند. آن‌ها یک مسئله عدد صحیح مختلط خطی را فرمول نمودند و به توسعه برخی نابرابری‌ها جهت شناسایی راه‌حل عملی بهتر و تلاش برای کاهش محاسبات پرداختند. بهمنش و پنک [۳۲] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط خطی برای مسئله SCND حلقه بسته با حمل مستقیم در نظر گرفتند. آن‌ها یک الگوریتم ممتاز<sup>۵</sup> را برای حل و مقایسه ارائه نموده و توسط نرم‌افزار لینگو حل نمودند. پادل و همکاران [۳۳] یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط غیرخطی را برای مسئله SCND سه مرحله و با سوخت‌های زیستی در نظر گرفتند، همچنین احتمال خرابی و حمل‌ونقل مستقیم را در نظر گرفتند. وانگ و همکاران [۳۴] یک مسئله SCND انعطاف‌پذیر سه مرحله‌ای را با امکان حمل مستقیم فرمول نمودند. آن‌ها مسئله را با استفاده از نرم‌افزار لینگو حل نمودند و نتایج نشان داد که مدل پیشنهادی مدت‌زمان تحویل و تولید و هزینه‌های حمل‌ونقل را بهبود می‌بخشد.

<sup>1</sup> GamsIDE

<sup>2</sup> Cplex

<sup>3</sup> Lindo lingo

<sup>4</sup> Mixed Integer Linear Programming (MILP)

<sup>5</sup> Memetic Algorithm (MA)

یو و همکاران [۳۵] یک مسئله SCND سه مرحله‌ای را برای یک محصول تازه کشاورزی جهت حداقل کردن هزینه عملکرد زنجیره‌تأمین و حداکثر نمودن درجه رضایت‌مندی تقاضا بین گره‌های زنجیره‌تأمین تحت محیط فازی فرمول نمودند؛ بنابراین، آن‌ها هزینه و ظرفیت را به‌عنوان پارامترهای فازی مثلثی فرض نمودند و از رویکرد فازی چند هدفه برای حل مدل استفاده نمودند.

برزین‌پور و تکی [۳۶] یک مسئله SCND دو مرحله‌ای سبز را با در نظر گرفتن هزینه و حالت‌های حمل‌ونقل ارائه نمودند. آن‌ها یک مدل غیرخطی را فرمول نمودند و آن را توسط الگوریتم‌های ژنتیک و ممتاز حل نمودند. مولا علیزاده زوراده‌هی و شجاع [۳۷] یک مدل ریاضی SCND چند محصولی و دو مرحله‌ای را با در نظر گرفتن حمل مستقیم و محیط فازی ارائه نمودند. آن‌ها ضرایب هزینه را عدد فازی دوزنقه‌ای در نظر گرفته و مدل توسعه‌یافته را توسط نرم‌افزار گمز حل نمودند.

فهیم نیا، داورزنی و اشراق [۳۸] یک مدل برنامه‌ریزی غیرخطی اعداد صحیح مختلط را برای یک مسئله طراحی شبکه زنجیره‌تأمین سبز دو مرحله‌ای ارائه کردند که هدف آن متعادل کردن عملکرد هزینه و مقدار انتشار گازهای گلخانه‌ای در SC است. آن‌ها از سه الگوریتم فراابتکاری، Genetic algorithm (GA)، Simulated annealing (SA) و Cross Entropy (CE) برای حل آن استفاده کردند. کریستیانو و گوناسه‌کاران [۳۹] یک مسئله SCND دو مرحله‌ای رو به جلو و معکوس با امکان ارسال مستقیم در مسیری بین تأمین‌کنندگان و توزیع‌کنندگان ایجاد کردند. آن‌ها مسئله را به‌صورت  $MINLP^1$  فرموله کردند و با یک الگوریتم دو مرحله‌ای بر اساس روش شاخه و کران آن را حل کردند.

همان‌طور که قبلاً ذکر شد، به دلیل عدم انجام تحقیقات مرتبط، تمامی تحقیقات در مورد حمل مستقیم و تحویل مستقیم در مسئله SCND گزارش شده است. بررسی این تحقیقات نشان می‌دهد که نمی‌توان آن‌ها را به‌طور دقیق طبقه‌بندی کرد. در برخی از آن‌ها سهم عمده‌ای از تحقیق متعلق به ارسال مستقیم یا تحویل مستقیم است و در برخی دیگر، این موارد تنها به‌عنوان یک متغیر تصمیم‌گیری در مدل ریاضی مسائل نشان داده می‌شوند. در این‌گونه پژوهش‌ها بحثی در مورد به‌کارگیری استراتژی مستقیم در فراابتکاری و در نتیجه نمایش راه‌حل و طرح رمزگذاری و رمزگشایی آن‌ها وجود ندارد. در بین تحقیقات ادبیات تنها مطالعه گوویندان و همکاران [۲۹] استراتژی حمل‌ونقل مستقیم را فقط بین توزیع‌کنندگان و خرده‌فروشان اعمال می‌کند.

در این تحقیق به طراحی شبکه زنجیره‌تأمین دارویی منعطف پرداخته می‌شود. اهداف این طراحی شامل کاهش کل هزینه ها و افزایش تقاضای تأمین شده می‌باشد. از آنجایی که مسئله NP-hard است [۴۰]، دو الگوریتم NSGA-II و MOPSO برای بهینه‌سازی مدل ریاضی مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۳- شرح مسئله

در این مطالعه ما یک مسئله زنجیره‌تأمین انعطاف‌پذیر چند محصولی و چند مرحله‌ای را در نظر می‌گیریم. زنجیره مورد مطالعه از تحقیق [۴] الگو گرفته شده است. زنجیره مورد بررسی شامل پنج سطح است که عبارت‌اند از: تأمین‌کنندگان، کارخانه‌های تولیدی، مراکز توزیع، مناطق خرده‌فروشی و مشتریان

#### هدف از زنجیره‌تأمین ارائه شده:

- انتخاب و مکان‌یابی تجهیزات تولیدی.
- تعیین مقدار جریان بین تجهیزات تولیدی.
- انتخاب بهترین حالت حمل‌ونقل جهت تحویل محصولات به مشتریان.
- انتخاب بهترین استراتژی حمل‌ونقل جهت بالا بردن رضایت مشتریان.

<sup>1</sup> Mixed integer non-linear programming

• کمینه کردن هزینه‌های کل شبکه است.

### ۳-۱- شرح مدل

#### ۳-۱-۱- اندیس‌ها

$P$	مجموعه محصولات.
$S$	مجموعه تأمین‌کنندگان.
$I$	مجموعه کارخانه‌ها.
$J$	مجموعه مراکز توزیع.
$R$	مجموعه خرده‌فروشان.
$K$	مجموعه مشتریان.
$L$	مجموعه‌ای از وسایل نقلیه در مرحله اول.
$M$	مجموعه‌ای از وسایل نقلیه در مرحله دوم.
$N$	مجموعه‌ای از وسایل نقلیه در مرحله سوم.
$O$	مجموعه‌ای از وسایل نقلیه در مرحله چهارم.
$Q$	مجموعه‌ای از وسایل نقلیه در مرحله پنجم.
$E$	مجموعه‌ای از وسایل نقلیه در مرحله ششم.
$U$	مجموعه‌ای از وسایل نقلیه در مرحله هفتم.

#### ۳-۱-۲- پارامترها

$d_{pk}$	تقاضای محصول $p$ توسط مشتری $k$ .
$f_i''$	هزینه ثابت جهت احداث کارخانه $i$ .
$s_{pi}'$	هزینه تنظیمات محصول $p$ در کارخانه $i$ .
$p_{pi}'$	هزینه تولید هر واحد محصول $p$ در کارخانه $i$ .
$o_j'$	هزینه ثابت احداث مرکز توزیع $j$ .
$\gamma_{pj}'$	هزینه حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد محصول $p$ به مرکز توزیع $j$ .
$r_r'$	هزینه ثابت احداث خرده‌فروشی $r$ .
$\alpha_{pr}'$	هزینه حمل‌ونقل به‌ازای هر واحد محصول $p$ به خرده‌فروشی $r$ .
$\theta_i'$	هزینه جریمه به‌ازای هر واحد ظرفیت استفاده نشده در کارخانه $i$ .
$\lambda_j'$	هزینه جریمه به‌ازای هر واحد ظرفیت استفاده نشده در مرکز توزیع $j$ .
$\gamma_r'$	هزینه جریمه به‌ازای هر واحد ظرفیت استفاده نشده در خرده‌فروشی $r$ .
$cap1_s$	ظرفیت تأمین‌کننده $s$ .
$cap2_i$	ظرفیت کارخانه $i$ .
$cap3_j$	ظرفیت مرکز توزیع $j$ .
$cap4_r$	ظرفیت خرده‌فروشی $r$ .
$cov1_l$	ظرفیت وسیله نقلیه $l$ در مرحله اول.
$cov2_m$	ظرفیت وسیله نقلیه $m$ در مرحله دوم.
$cov3_n$	ظرفیت وسیله نقلیه $n$ در مرحله سوم.
$cov4_o$	ظرفیت وسیله نقلیه $o$ در مرحله چهارم.
$cov5_q$	ظرفیت وسیله نقلیه $q$ در مرحله پنجم.
$cov6_e$	ظرفیت وسیله نقلیه $e$ در مرحله ششم.
$cov7_u$	ظرفیت وسیله نقلیه $u$ در مرحله هفتم.
$a_{sil}$	هزینه حمل‌ونقل هر واحد مواد اولیه از تأمین‌کننده $s$ به کارخانه $i$ با وسیله نقلیه $l$ .
$b_{pijm}$	هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول $p$ از کارخانه $i$ به مرکز توزیع $j$ با وسیله نقلیه $m$ .
$c_{pirn}$	هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول $p$ از کارخانه $i$ به خرده‌فروشی $r$ با وسیله نقلیه $n$ .
$w_{piko}$	هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول $p$ از کارخانه $i$ به مشتری $k$ با وسیله نقلیه $o$ .
$f_{pjrq}$	هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول $p$ از مرکز توزیع $j$ به خرده‌فروشی $r$ با وسیله نقلیه $q$ .
$t_{pjke}$	هزینه حمل‌ونقل هر واحد محصول $p$ از مرکز توزیع $j$ به مشتری $k$ با وسیله نقلیه $e$ .

هزینه حمل و نقل هر واحد محصول p از خرده‌فروشی r به مشتری k با وسیله نقلیه u.	$\beta_{prku}$
هزینه ثابت حمل و نقل از تأمین‌کننده S به کارخانه i با وسیله نقلیه I.	$a'_{sil}$
هزینه ثابت حمل و نقل از کارخانه i به مرکز توزیع j با وسیله نقلیه m.	$b'_{ijm}$
هزینه ثابت حمل و نقل از کارخانه i به خرده‌فروشی r با وسیله نقلیه n.	$c'_{irn}$
هزینه ثابت حمل و نقل از کارخانه i به مشتری k با وسیله نقلیه o.	$w'_{iko}$
هزینه ثابت حمل و نقل از مرکز توزیع j به خرده‌فروشی r با وسیله نقلیه q.	$f'_{jrq}$
هزینه ثابت حمل و نقل از مرکز توزیع j به مشتری k با وسیله نقلیه e.	$t'_{jke}$
هزینه ثابت حمل و نقل از خرده‌فروشی r به مشتری k با وسیله نقلیه u.	$\beta'_{rku}$
عدد بزرگ	LN

۳-۱-۳- متغیرهای تصمیم

مقدار حمل شده از تأمین‌کننده S به کارخانه i با سیستم حمل و نقل I.	$X_{sil}$
مقدار محصول حمل شده از کارخانه i به مرکز توزیع j با سیستم حمل و نقل m.	$Y_{pijm}$
مقدار محصول حمل شده از کارخانه i به خرده‌فروشی r با سیستم حمل و نقل n.	$Z_{pirn}$
مقدار محصول حمل شده از کارخانه i به مشتری k با سیستم حمل و نقل o.	$H_{piko}$
مقدار محصول حمل شده از مرکز توزیع j به خرده‌فروشی r با سیستم حمل و نقل q.	$G_{pjrq}$
مقدار محصول حمل شده از مرکز توزیع j به مشتری k با سیستم حمل و نقل e.	$W_{pjke}$
مقدار محصول حمل شده از خرده‌فروشی r به مشتری k با سیستم حمل و نقل u.	$V_{prku}$
اگر کارخانه در مکان i احداث شود برابر ۱؛ در غیر این صورت ۰.	$M'_i$
اگر مرکز توزیع در مکان j احداث شود برابر ۱؛ در غیر این صورت ۰.	$N'_j$
اگر خرده‌فروشی در مکان r احداث شود برابر ۱؛ در غیر این صورت ۰.	$Q'_r$
اگر محصول از تأمین‌کننده S به کارخانه i با سیستم حمل و نقل I انتقال یابد برابر ۱؛ در غیر این صورت ۰.	$X'_{sil}$
اگر محصول از کارخانه i به مرکز توزیع j با سیستم حمل و نقل m انتقال یابد برابر ۱؛ در غیر این صورت ۰.	$Y'_{ijm}$
اگر محصول از کارخانه i به خرده‌فروشی r با سیستم حمل و نقل n انتقال یابد برابر ۱؛ در غیر این صورت ۰.	$Z'_{irn}$
اگر محصول از کارخانه i به مشتری k با سیستم حمل و نقل o انتقال یابد برابر ۱؛ در غیر این صورت ۰.	$H'_{iko}$
اگر محصول از مرکز توزیع j به خرده‌فروشی r با سیستم حمل و نقل q انتقال یابد برابر ۱؛ در غیر این صورت ۰.	$G'_{jrq}$
اگر محصول از مرکز توزیع j به مشتری k با سیستم حمل و نقل e انتقال یابد برابر ۱؛ در غیر این صورت ۰.	$W'_{jke}$
اگر محصول از خرده‌فروشی r به مشتری k با سیستم حمل و نقل u انتقال یابد برابر ۱؛ در غیر این صورت ۰.	$V'_{rku}$

باتوجه به متغیرهای تعریف شده مسئله به صورت زیر مدل می‌شود [۴]:

$$\begin{aligned}
 \min Z1 = & \sum_i f''_i M'_i + \sum_j o'_j N'_j + \sum_r r'_r Q'_r + \sum_s \sum_i \sum_l a_{sil} X_{sil} + \sum_p \sum_i \sum_j \sum_m (p'_{pi} + s'_{pi} + b_{pijm}) Y_{pijm} \\
 & + \sum_p \sum_i \sum_r \sum_n (p'_{pi} + s'_{pi} + c_{pirn}) Z_{pirn} + \sum_p \sum_i \sum_k \sum_o (p'_{pi} + s'_{pi} + w'_{piko}) H_{piko} \\
 & + \sum_p \sum_j \sum_r \sum_q (y'_{pj} + f_{pjrq}) G_{pjrq} + \sum_p \sum_j \sum_k \sum_e (y'_{pj} + t_{pjke}) W_{pjke} + \sum_p \sum_r \sum_k \sum_u (\alpha'_{pr} + \beta_{prku}) V_{prku} \\
 & + \sum_i \theta'_i \left[ cap2_i M'_i - \left( \sum_p \sum_j \sum_m Y_{pijm} + \sum_p \sum_r \sum_n Z_{pirn} + \sum_p \sum_k \sum_o H_{piko} \right) \right] \\
 & + \sum_j \lambda'_j \left[ cap3_j N'_j - \left( \sum_p \sum_r \sum_q G_{pjrq} + \sum_p \sum_k \sum_e W_{pjke} \right) \right] + \sum_r \gamma'_r \left[ cap4_r Q'_r - \left( \sum_p \sum_k \sum_u V_{prku} \right) \right] \\
 & + \sum_s \sum_i \sum_l a'_{sil} X'_{sil} + \sum_i \sum_j \sum_m b'_{ijm} Y'_{ijm} + \sum_i \sum_r \sum_n c'_{irn} Z'_{irn} + \sum_i \sum_k \sum_o w'_{iko} H'_{iko} \\
 & + \sum_j \sum_r \sum_q f'_{jrq} G'_{jrq} + \sum_j \sum_k \sum_e t'_{jke} W'_{jke} + \sum_r \sum_k \sum_u \beta'_{rku} V'_{rku}
 \end{aligned} \tag{1}$$

$$\text{Max } Z2 = \sum_i \sum_o H_{piko} + \sum_j \sum_e W_{pjke} + \sum_r \sum_u V_{prku} \quad (2)$$

$$\sum_i \sum_o H_{piko} + \sum_j \sum_e W_{pjke} + \sum_r \sum_u V_{prku} \leq d_{pk} \quad \forall p, k \quad (3)$$

$$\sum_s \sum_l X_{sil} = \sum_p \sum_j \sum_m Y_{pijm} + \sum_p \sum_r \sum_n Z_{pirn} + \sum_p \sum_k \sum_o H_{piko} \quad \forall i \quad (4)$$

$$\sum_p \sum_i \sum_n Y_{pijm} = \sum_p \sum_r \sum_q G_{pjr q} + \sum_p \sum_k \sum_e W_{pjke} \quad \forall j \quad (5)$$

$$\sum_p \sum_j \sum_q G_{pjr q} + \sum_p \sum_i \sum_n Z_{pirn} = \sum_p \sum_k \sum_u V_{prku} \quad \forall r \quad (6)$$

$$\sum_i \sum_l X_{sil} \leq \text{cap}1_s \quad \forall s \quad (7)$$

$$\sum_p \sum_j \sum_m Y_{pijm} + \sum_p \sum_r \sum_n Z_{pirn} + \sum_p \sum_k \sum_o H_{piko} \leq M'_i \text{cap}2_i \quad \forall i \quad (8)$$

$$\sum_p \sum_r \sum_q G_{pjr q} + \sum_p \sum_k \sum_e W_{pjke} \leq M'_j \text{cap}3_j \quad \forall j \quad (9)$$

$$\sum_p \sum_k \sum_u V_{prku} \leq Q'_r \text{cap}4_r \quad \forall r \quad (10)$$

$$\sum_s \sum_l X_{sil} \leq \text{cov}1_l \quad \forall l \quad (11)$$

$$\sum_p \sum_i \sum_j Y_{pijm} \leq \text{cov}2_m \quad \forall m \quad (12)$$

$$\sum_p \sum_i \sum_r Z_{pirn} \leq \text{cov}3_n \quad \forall n \quad (13)$$

$$\sum_p \sum_i \sum_k H_{piko} \leq \text{cov}4_o \quad \forall o \quad (14)$$

$$\sum_p \sum_j \sum_r G_{pjr q} \leq \text{cov}5_q \quad \forall q \quad (15)$$

$$\sum_p \sum_j \sum_k W_{pjke} \leq \text{cov}6_e \quad \forall e \quad (16)$$

$$\sum_p \sum_r \sum_k V_{prku} \leq \text{cov}7_u \quad \forall u \quad (17)$$

$$Y_{pijm} \leq LNY'_{ijm} \quad \forall s, i, l \quad (18)$$

$$X_{sil} \leq LNX'_{sil} \quad \forall p, i, j, m \quad (19)$$

$$Z_{pirn} \leq LNZ'_{irn} \quad \forall p, i, r, n \quad (20)$$

$$H_{piko} \leq LNH'_{iko} \quad \forall p, i, k, o \quad (21)$$

$$G_{pjr q} \leq LNG'_{jr q} \quad \forall p, j, r, q \quad (22)$$

$$W_{pjke} \leq LNW'_{jke} \quad \forall p, j, k, e \quad (23)$$

$$V_{prku} \leq LNV'_{rku} \quad \forall p, r, k, u \quad (24)$$

$$X_{sil} Y_{pijm} Z_{pirn} H_{piko} G_{pjr q} W_{pjke} V_{prku} \geq 0 \quad \forall p, s, i, j, k, l, m, n, o, q, e, u \quad (25)$$

$$X'_{sil} Y'_{ijm} Z'_{irn} H'_{iko} G'_{jr q} W'_{jke} V'_{rku} M'_i N'_j Q'_r \in \{0,1\} \quad \forall s, i, j, k, l, m, n, o, q, e, u \quad (26)$$

وظیفه تابع هدف اول کمینه کردن هزینه‌های احداث تسهیلات، هزینه‌های تولید، هزینه‌های تنظیمات و راه اندازی، هزینه‌های ثابت و متغیر حمل‌ونقل، هزینه‌های جریمه برای ظرفیت‌های بدون استفاده در کارخانه‌ها و مراکز توزیع و خرده‌فروشان است. تابع هدف دوم، حداکثر سازی مقدار کالای تحویل داده شده به مشتریان با نشان می دهد. محدودیت (۳) مربوط به برآورده کردن خواسته‌های مشتریان است. محدودیت‌های (۴) تا (۶) تعادل جریان بین کارخانه‌ها و مراکز توزیع و خرده‌فروشان را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۷) تا (۱۰)، محدودیت‌های ظرفیت مراکز را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۱۱) تا (۱۷) محدودیت‌های ظرفیت وسیله حمل‌ونقل را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۱۸) تا (۲۵) محدودیت‌های (۲۶) مقادیر متغیر تصمیم را نشان می‌دهد.

#### ۴- بهینه سازی در شرایط چندهدفه

بهینه سازی عمومی چند هدفه را می توان به عنوان یک فرآیند پیوسته از بهینه سازی دو یا چند هدف متضاد با در نظر گرفتن محدودیت های مشخصی در نظر گرفت. از آنجایی که بهینه سازی چند هدفه دارای چندین تابع هدف است؛ روش حل به دنبال یافتن تبادلی هایی بین جواب های بدست آمده است. مفهوم بهینگی پارتو در بهینه سازی چندهدفه توسط پارتو در ۱۹۸۶ بدین صورت معرفی شد:

$$I = \{1, 2, \dots, K\} \quad \text{نقطه } x^* \in \Omega \text{ جواب بهینه پارتو است اگر } \forall i \in I (f_i(x^*) \leq f_i(x)) \quad \forall x \in \Omega$$

$$\text{و حداقل یک } i \in I \text{ وجود داشته باشد که } \forall i \in I (f_i(x^*) \prec f_i(x)).$$

این تعریف بیان می کند که  $X^*$  جواب بهینه پارتو است اگر هیچ جواب موثری وجود نداشته باشد که بتواند باعث کاهش تعدادی از معیارها بدون افزایش همزمان حداقل یکی دیگر از اهداف شود. الگوریتم بهینه سازی چند هدفه از مفهوم چیرگی برای رسیدن به جواب بهینه استفاده می کند. در این الگوریتم دو جواب با هم مقایسه می شوند به طوریکه بررسی می شود آیا یکی در دیگری چیرگی دارد یا خیر. اگر  $M$  تابع هدف وجود داشته باشد؛ جواب  $X$  بر جواب  $Y$  چیرگی دارد اگر هر دو شرط زیر برقرار باشد:

$$1- \text{ جواب } X \text{ بدتر از } Y \text{ در هیچ یک از اهداف نباشد.}$$

$$2- \text{ جواب } X \text{ در حداقل یک هدف از } M \text{ هدف، بهتر از } Y \text{ باشد.}$$

اگر تنها یکی از دو شرط فوق برقرار باشد جواب  $X$  بر جواب  $Y$  چیرگی ندارد. در بهینه سازی چندهدفه از آنجایی که با بیش از یک هدف برای بهینه سازی مواجه ایم لذا تنها یک جواب بهینه که تمام اهداف را بهینه نماید؛ وجود ندارد. نتایج خروجی، مجموعه ای از جواب های بهینه است که در توابع مختلف، مقادیر متفاوتی دارد. به این مجموعه از جواب ها، مجموعه ناچیره گفته می شود. دو شرط زیر برای هر یک از اعضای مجموعه ناچیره باید برقرار باشد:

- ۱- هر دو مجموعه ناچیره باید نسبت به تمام اعضای یکدیگر ناچیره باشد.
- ۲- هر جوابی که متعلق به مجموعه ناچیره نیست توسط یکی از اعضای مجموعه ناچیره مغلوب می‌شود. چنین مجموعه ناچیره ای به مجموعه جواب های بهینه پارتو، مشهور است.

بدلیل حداقل کردن کل هزینه های زنجیره تامین و حداکثر سازی نرخ تکمیل و در نتیجه، تضاد این دو هدف در ماهیت آنها نمی‌تواند به یک جواب بهینه برای این مسئله دست یافت. در چنین حالتی بدنبال جواب های بهینه ای هستیم که سیاست های مناسب را برای زنجیره مشخص کند. بنابراین مجموعه جواب های پارتو و متغیر های تصمیم آن به گونه ای طراحی می‌شوند که تصمیم گیرنده بتواند در میان این جواب‌های پارتو به منظور برآورده سازی نیاز خود انتخاب کند [۴۱، ۴۲].

#### ۱-۴- معرفی الگوریتم ازدحام ذرات

الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) از جدیدترین تکنیک های جمعیت محور به منظور بهینه سازی مدل‌ها است (کندی و ابرهات). در این الگوریتم، تعدادی از جواب های مسئله به عنوان ذرات در حال حرکت در فضای جواب، در نظر گرفته می‌شود. PSO براساس رفتار جوامعی که هم از نظر اجتماعی و هم از نظر فردی با یکدیگر در ارتباط اند (مانند پرندگان در حال جستجو برای غذا) عمل می‌کند. یک پرنده ممکن است غذای خود را از طریق همکاری گروهی با سایر پرندگان بدست آورد و یا اینکه خود به تنهایی غذای خود را پیدا کند.

در الگوریتم PSO هر فرد (ذره) نشانگر یک جواب در فضای N بعدی است. همچنین هر ذره بهترین تجربه خود و بهترین تجربه سایر افراد را اطلاع دارد. هر ذره، مسیر حرکت خود را با توجه به رابطه زیر تغییر می‌دهد.

$$v_{ij} = w * v_{ij} + c_1 * r_1 * (p_{ij} - x_{ij}) + c_2 * r_2 * (p_{gi} - x_{ij})$$

$$x_{ij} = x_{ij} + v_{ij}$$

در رابطه فوق w یک فاکتور ثابت است که از توانایی محلی و کلی الگوریتم تاثیر می‌گیرد.  $v_{ij}$  سرعت ذره i ام در زمان بعد می‌باشد.  $c_1$  و  $c_2$  وزن هایی هستند که از حرکت فردی و اجتماعی تاثیر می‌گیرند.  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی از توزیع یکنواخت بین (۰ و ۱) می‌باشند.  $p_{ij}$  معرف بهترین مقدار یافته شده توسط ذره i ام و  $p_{gi}$  به بهترین جواب یافته شده توسط کل ذرات اشاره می‌کند. پس از اینکه سرعت حرکت ذره به روز شد؛ موقعیت جدید ذره i در جهت زام محاسبه می‌شود. این فرآیند برای تمام ابعاد و تمام ذرات تکرار می‌شود. در نهایت کل ذرات همانند دسته عظیمی از پرندگان هستند که در جستجوی غذای خود به سمت مناطقی حرکت می‌کنند که دارای غذای بیشتری است و در اصل به جواب بهینه ای نزدیک می‌شوند که تابع برازش بیشتری دارد. الگوریتم pso به دلیل سادگی در اجرای آن و توانایی همگرایی سریع به جواب معقول، بسیار مورد توجه است. در این الگوریتم نیاز به تنظیم تعداد کمی پارامتر برای جستجوی بهتر و یافتن جواب بهینه است.

به طور کلی گام های الگوریتم MOHPSO را میتوان به صورت زیر بیان نمود

گام اول: تولید جواب های اولیه به صورت تصادفی

گام دوم: محاسبه مقدار برازش هر یک از جواب های اولیه بر حسب توابع هدف تعریف شده

گام سوم: تعیین جواب های ناچیره که در مجموعه جواب های اولیه ایجاد شده است

گام چهارم: تعیین جواب رهبر از بین مجموعه جواب های در دست برای ایجاد همسایگی در جواب ها

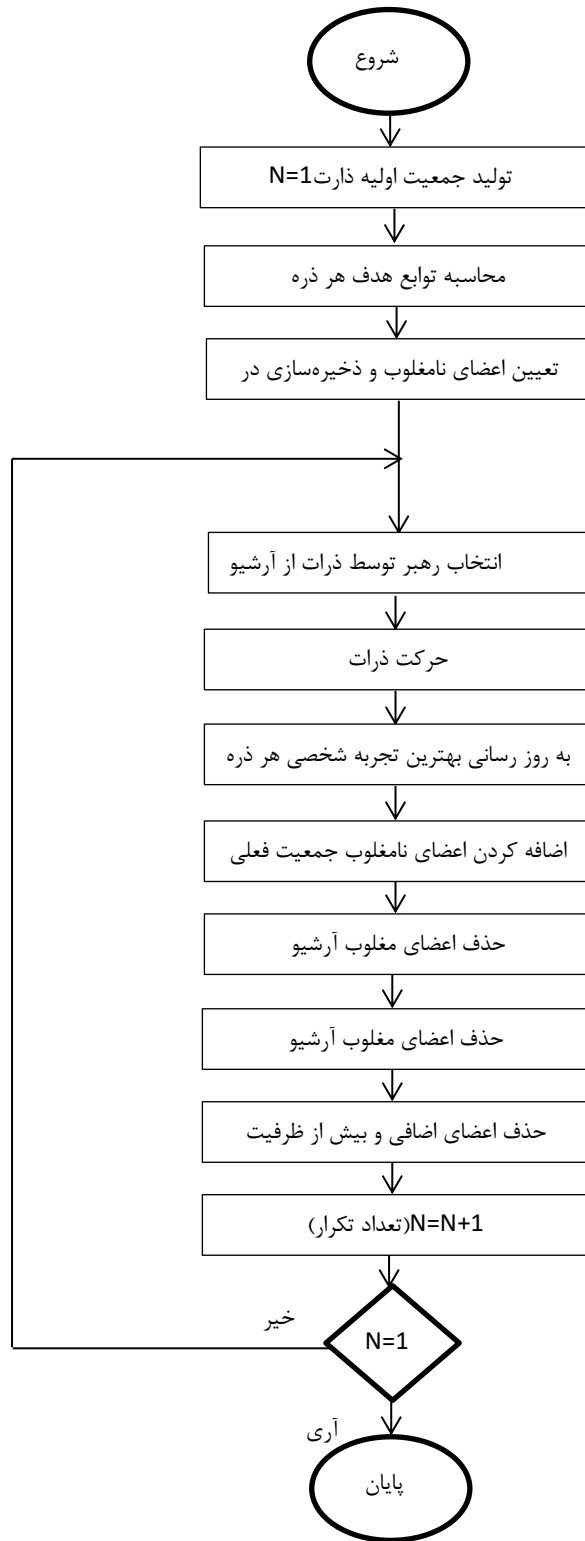
گام پنجم: ایجاد جواب های جدید

گام ششم: به رور رسانی بهترین تجربه شخصی هر یک از ذرات. اگر موقعیت جدید ذره، بهترین تجربه را مغلوبی کند. موقعیت جدید جای بهترین تجربه را می‌گیرد و اگر هیچ یک همدیگر را مغلوب نکنند یکی از دو موقعیت بالا به طور تصادفی به عنوان بهترین تجربه میشود.

گام هفتم: اضافه شدن اعضای نامغلوب جمعیت فعلی به حافظه خارجی

گام هشتم: حذف اعضای نامغلوب حافظه خارجی

گام نهم: حذف اعضای بیش از ظرفیت حافظه خارجی



شکل ۱- فلوچارت الگوریتم MOHPSO

#### ۴-۲- الگوریتم ژنتیک دو هدفه NSGA II

الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم‌های اکتشافی حل مسئله است که از مدل سازی زیستی جمعیت جانداران به وجود آمده است. در این الگوریتم، خصوصیات نسل جانداران به مقدار توابع هدف و بهبود در خصوصیات نسلی در پی گذشت زمان تشبیه و ظهور نسل‌های جدید از آمیزش نسل‌های قبلی به بهبود در مقدار توابع هدف مانند شده است. به عبارت دیگر این الگوریتم از اصول انتخاب طبیعی داروین برای یافتن فرمول یا جواب بهینه به منظور پیشبینی یا تطبیق الگو استفاده میکند.

روش کار و الگوریتم کلی NSGA II که یکی از حالت‌های چند هدفه الگوریتم ژنتیک می باشد، به شرح ذیل است :

۱. ایجاد جمعیت اولیه
  ۲. محاسبه معیارهای برازندگی
  ۳. مرتب کردن جمعیت بر اساس شرطهای غلبه کردن
  ۴. محاسبه فاصله ازدحامی
  ۵. انتخاب: به محض این که جمعیت اولیه بر اساس شرطهای غلبه کردن مرتب شد، مقدار فاصله ازدحامی در آن محاسبه خواهد شد و انتخاب از میان جمعیت اولیه آغاز می شود. این انتخاب بر اساس دو المان صورت میپذیرد
    - رتبه جمعیت: جمعیتها در رتبههای پایینتر انتخاب میشوند
    - محاسبه فاصله: با فرض این که  $p$  و  $q$  دو عضو از یک رتبه باشند، عضوی انتخاب میشود که فاصله ازدحامی بیشتری دارد. گفتنی است که اولویت انتخاب، ابتدا با رتبه و سپس بر اساس فاصله ازدحامی است.
  ۶. برای تولید فرزندان جدید از طریق تقاطع و جهش و تلفیق جمعیت اولیه و جمعیت به دست آمده از تقاطع و جهش.
  ۷. جایگزین کردن جمعیت والدین با بهترین اعضای جمعیت تلفیق شده در مراحل قبل.
- در مرحله نخست، اعضای رتبه های پایینتر جایگزین والدهای قبلی میشوند و سپس بر اساس فاصله ازدحامی مرتب میشوند. جمعیت اولیه و جمعیت ناشی از تقاطع و جهش، ابتدا بر حسب رتبه دسته بندی میشوند و قسمتی از آنها که دارای رتبه پایین تری هستند، حذف می گردند. در مرحله بعد، جمعیت باقیمانده بر اساس فاصله ازدحامی مرتب میشوند.

#### ۵- نتایج عددی

به منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی لازم است تا بر روی مثال‌های نمونه، عملکرد الگوریتم MOHPSO مد نظر، مورد ارزیابی قرار گیرد. با توجه به ساختار چند هدفه بودن مدل ریاضی و نیز الگوریتم پیشنهادی، این مقایسه با یکی از قوی ترین الگوریتم‌های بهینه سازی چند هدفه یعنی الگوریتم NSGA II انجام می شود. لذا ساختار این دو الگوریتم در نرم افزار MATLAB R2014 کدنویسی شده است.

به همین منظور ۱۰ مثال در ابعاد مختلف طراحی و با الگوریتم MOHPSO و نیز الگوریتم NSGA II حل شده است. با توجه به اینکه در مسئله مورد بررسی تا کنون بنچمارک دقیقی دیده نشده است، مثال‌های نمونه به صورت تصادفی از توزیع یکنواخت پیوسته تولید شده است. در جدول زیر ابعاد مسائل و نیز نتایج حاصل از پیاده سازی با دو الگوریتم مورد نظر ارائه شده است.

جدول ۱- ابعاد مسائل نمونه تولید شده و نتایج حل با الگوریتم‌های مختلف

	ابعاد مسئله					MOHPSO			NSGA II		
	J	E	I	H	C	NOS	MD	T	NOS	MD	T
P1	5	3	2	1	1	2	32.1	0.24	2	32.1	1.27
P2	10	5	4	3	2	4	187.4	3.79	4	187.4	8.67
P3	15	7	5	4	4	11	891.7	7.16	10	9016.2	12.47
P4	20	12	10	9	5	21	1428.3	9.15	25	1539.3	19.33

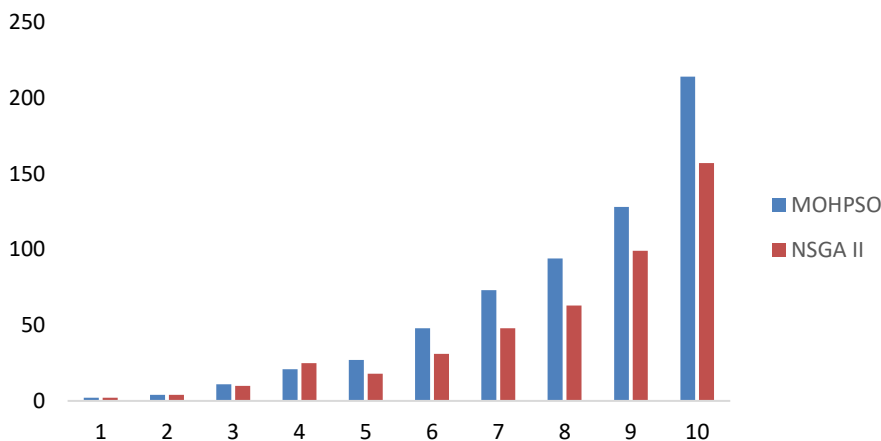
	ابعاد مسئله					MOHPSO			NSGA II		
	J	E	I	H	C	NOS	MD	T	NOS	MD	T
P5	25	15	13	11	9	27	2781.6	13.87	18	26146.1	29.14
P6	30	17	15	12	13	48	5472.1	21.1	31	5503.6	37.16
P7	35	20	20	14	20	73	8105.2	26.48	48	8133.2	51.11
P8	40	25	22	16	30	94	10741.1	55.71	63	10942.8	66.43
P9	50	30	25	20	40	128	11247.1	89.41	99	11019.5	83.56
P10	60	35	30	25	50	214	119007.6	103.19	157	11143.8	96.79
AVE						62.2	15989.42	33.01	45.7	8366.4	40.593

در جدول فوق قسمت ابعاد مسئله به ترتیب تعداد مشتریان، تعداد انبار ها، تعداد کارخانه ها، تعداد تامین کننده ها و تعداد قطعات را نشان می دهد. در مقایسه الگوریتم های مورد بررسی از دو شاخص NOS و MD استفاده شده است. NOS تعداد جواب های پارتو در خروجی نهایی الگوریتم فراابتکاری را بیان میکند و MD شاخص بیشترین گستردگی را بیان میکند. این شاخص بر اساس رابطه زیر محاسبه می شود.

$$MD = \sqrt{(Z_1^{\max} - Z_1^{\min})^2 + (Z_2^{\max} - Z_2^{\min})^2}$$

همچنین T زمان اجرای الگوریتم برحسب ثانیه می باشد. مشخص است هرچه مقدار شاخص های NOS و MD بیشتر باشد، کارایی الگوریتم در یافتن مرز پارتو، بیشتر می باشد.

با مقایسه الگوریتم های MOHPSO و نیز NSGA II بر حسب شاخص NOS مشخص شده است که الگوریتم MOHPSO به طور متوسط حدود ۶۲ جواب در مرز پارتو پیدا کرده است و الگوریتم NSGA II حدود ۴۵ جواب در مرز پارتو پیدا کرده است. لذا در این شاخص برتری با الگوریتم MOHPSO بوده است. با بررسی دقیقتر مشخص می شود که الگوریتم NSGA II تنها در مسئله P4 شاخص NOS بهتری داشته و در سایر موارد MOHPSO بهتر بوده است. در شکل ۲ مقادیر شاخص NOS برای مثال های مختلف ارائه شده است.

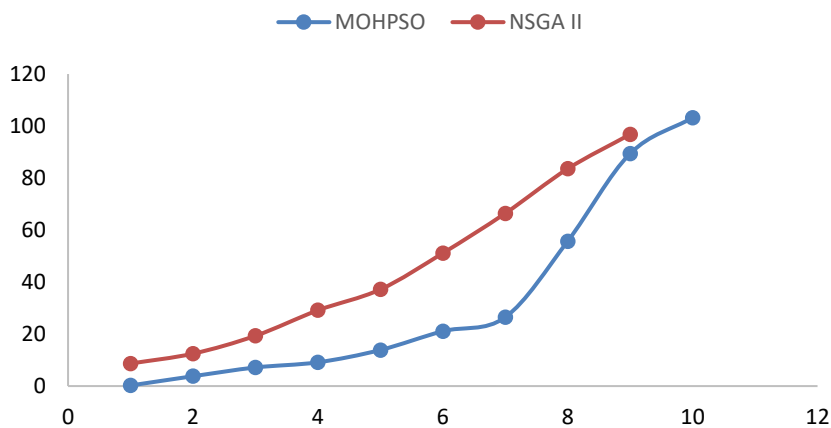


شکل ۲- تعداد جواب های پارتو در مثال های عددی مختلف

در خصوص شاخص MD نیز روند مانند NOS می باشد. در ۱۰ مثال حل شده، در ۸ مثال الگوریتم MOHPSO مقدار شاخص MD بهتری داشته است و در کل به طور متوسط اختلاف حدود ۷۶۰۰ واحدی بین متوسط این شاخص بین دو الگوریتم وجود دارد. لذا در این شاخص نیز برتری با الگوریتم MOHPSO بوده است.

اما علاوه بر کیفیت جواب، زمان حل نیز بعد دیگری از الگوریتم فراابتکاری می باشد که لازم است مورد ارزیابی و تحلیل قرار

گیرد. در شکل ۳ روند زمان حل در دو الگوریتم مورد بررسی ارائه شده است.



شکل ۳- زمان حل در مثال‌های عددی مختلف

همانطور که مشاهده می‌شود از نظر زمان حل نیز الگوریتم MOHPSO توانسته است برتری نسبی نسبت به الگوریتم NSGA II داشته و جواب‌های خود را در کوتاهترین زمان ممکن ارائه کند. بر اساس مقایسات انجام شده کارایی الگوریتم MOHPSO از بعد کیفیت جواب و نیز سرعت به اثبات می‌رسد. لذا در ادامه مطالعه موردی واقعی خود را بر این الگوریتم پیاده‌سازی می‌کنیم.

### ۶- مطالعه موردی

برای نمایش توانمندی الگوریتم ارائه شده، یک مطالعه موردی واقعی در خصوص صنعت دارو سازی از یک زنجیره تأمین چند سطحی که دارای ساختار شبکه‌ای با ۳ تأمین‌کننده، ۵ کارخانه، ۶ مرکز توزیع و ۷ نقطه مشتری است؛ در نظر گرفته می‌شود. مواد اولیه توسط تأمین‌کننده‌های داخلی و خارجی به کارخانه‌های مورد نظر ارسال می‌شود. در کارخانه‌ها این قطعات ترکیب کرده و محصول نهایی آماده ارسال به انبارها و سپس برای مشتریان می‌شود. در این مساله، شرکت بدنبال مکانیابی ۵ کارخانه تولیدی با مجموع ظرفیت ۱۴۲ واحد در ماه است؛ به طوری که بتواند به کمک ۶ انبار با مجموع ظرفیت ۸۲ واحد، تقاضای ۳۰ واحدی ۷ منطقه را برآورده سازد. در سطح اول شبکه زنجیره تأمین، تأمین‌کنندگان تمام سه نوع ماده خام برای تولید یک محصول را فراهم می‌کنند. ظرفیت تأمین‌کنندگان، ظرفیت کارخانه‌ها، ظرفیت انبارها و هزینه ثابت برای هر کارخانه در جدول ۲ نمایش داده شده است. هزینه تولید یک جز و انتقال هر واحد از آن به کارخانه‌های تولیدی در جدول ۳ نمایش داده شده است. موجودی متغیر تولید و هزینه تولید و حمل و نقل هر واحد محموله ارسالی تقاضای هر یک از مناطق مشتری در جدول ۴ نمایش داده شده است. هزینه نگهداری و حمل و نقل و هزینه تولید برای هر واحد در سطح سوم زنجیره در جدول ۵ آورده شده است. این مسئله و نتایج در نهایت، با در نظر گرفتن دو هدف متضاد، تحلیل شده است.

جدول ۲ - ظرفیت تأمین‌کنندگان، ظرفیت کارخانه‌ها، هزینه ثابت برای هر کارخانه و ظرفیت انبارها

ظرفیت انبار	ظرفیت کارخانه	هزینه ثابت	جزها			ظرفیت تأمین‌کننده
			c1	c2	c3	
wh1	p1	7650	36	62	50	15
wh2	p2	3500	40	65	55	12
wh3	p3	500	42	70	60	14
wh4	p4	4100				13
wh5	p5	2200				12
wh6						16

جدول ۳- هزینه تولید یک جز و انتقال هر واحد از آن به کارخانه های تولیدی

تامین کننده	جز ها	هزینه آماده سازی برای تامین کننده	هزینه حمل و نقل کارخانه				
			1	2	3	4	5
1	c1	300	10	13	8	11	15
	c2	115	6	7	5	8	4
	c3	90	3	4	5	4	5
2	c1	320	17	14	12	12	15
	c2	120	6	5	7	5	7
	c3	85	6	6	5	6	4
3	c1	290	13	12	14	11	9
	c2	125	6	5	3	4	5
	c3	75	3	6	3	2	3

جدول ۴- موجودی متغیر تولید و هزینه تولید و حمل و نقل هر واحد محموله ارسالی تقاضای هر یک از مناطق مشتری

کارخانه	انبار						هزینه تولید	هزینه موجودی
	wh1	wh2	wh3	wh4	wh5	wh6		
1	7	12	18	17	18	20	3900	50
2	12	10	11	13	15	17	2010	45
3	8	10	14	15	18	21	1945	55
4	10	12	13	14	13	18	1855	48
5	8	10	11	15	11	12	1975	52

جدول ۵- هزینه نگهداری و حمل و نقل و هزینه تولید برای هر واحد در سطح سوم زنجیره تامین

انبار	مشتری							هزینه نگهداری
	1	2	3	4	5	6	7	
wh1	8	3	9	6	7	3	4	55
wh2	5	8	7	6	3	2	8	50
wh3	9	3	8	6	7	5	4	60
wh4	3	9	2	2	5	4	8	54
wh5	7	6	3	9	4	9	4	55
wh6	5	6	7	8	3	2	9	45
تقاضای ماهانه	3	5	4	6	4	5	3	

برای این مسئله، حداقل کردن مجموع هزینه ها و حداکثر سازی نرخ تکمیل با در نظر گرفتن اینکه حداقل نرخ تکمیل باید

۸۰٪ تقاضای واقعی باشد؛ انجام می‌شود. در کل ۱۲۸ متغیر تصمیم و ۴۸ محدودیت وجود دارد. نتایج حل این مسئله، بدست آوردن ۷ جواب بهینه پارتو است. تصمیم نهایی این است که از بین این جواب‌ها براساس معیارهای مشخصی رتبه بندی انجام شود. این رتبه بندی، یکی از مسائل مهم تصمیم‌گیری برای تصمیم‌گیرنده است. همچنین این تصمیم ممکن است هر سال و با توجه به تغییرات تقاضا و هزینه‌ها تغییر کند.

در جدول ۶، جواب‌های پارتو حاصل شده از الگوریتم ازدحام ذرات، مشخص شده است. هر یک از این جواب‌ها ناچیره در قالب یک سناریو جهت پیاده‌سازی و اجرا می‌باشد. جدول ۷، جریان مواد بهینه را از تامین‌کننده به کارخانه با توجه به پارتو نشان می‌دهد.

جدول ۶- پارتو حاصل شده

جواب ناچیره(سناریو)	هزینه زنجیره	سطح تقاضای ارضا شده	تقاضای واقعی
۱	۱۵۹۳۰۶	۳۰	۳۰
۲	۱۴۹۳۸۵	۲۹	۳۰
۳	۱۴۰۶۲۹	۲۸	۳۰
۴	۱۲۹۹۰۴	۲۷	۳۰
۵	۱۱۷۸۱۸	۲۶	۳۰
۶	۱۰۷۲۹۰	۲۵	۳۰
۷	۱۰۰۴۸۰	۲۴	۳۰

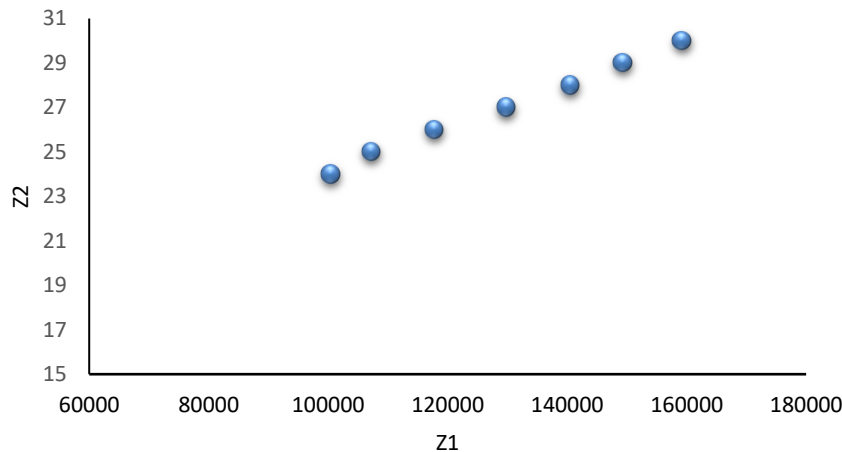
جدول ۷- جریان بهینه مواد در سناریوهای ۷ گانه

کارخانه	جز ۱			جز ۲			جز ۳		
	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
سناریو ۱									
۱	۰	۰	۸	۱۰	۰	۰	۰	۱۲	۰
۲	۵	۰	۱۱	۱۰	۱۲	۰	۰	۲۲	۰
۳	۱۵	۰	۰	۱۸	۰	۰	۰	۱۲	۰
۴	۱۱	۰	۰	۰	۱۲	۰	۱۵	۰	۰
۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
سناریو ۲									
۱	۰	۱	۴	۰	۰	۸	۰	۰	۰
۲	۰	۱۸	۰	۰	۰	۹	۱۲	۰	۰
۳	۱۰	۹	۰	۱۷	۰	۰	۰	۲۰	۲۰
۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۵	۰	۱۱	۰	۱۰	۰	۰	۹	۰	۰
سناریو ۳									
۱	۷	۰	۱۰	۵	۰	۵	۰	۱۴	۱۴
۲	۰	۰	۶	۸	۰	۰	۰	۹	۹
۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

کارخانه	جز ۱			جز ۲			جز ۳		
	۱	۲	۳	۱	۲	۳	۱	۲	۳
۴	۸	۰	۰	۰	۰	۷	۰	۰	۰
۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
سناریو ۴									
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۲۳	۰	۰	۰	۰	۲۱	۰	۰	۰
۴	۰	۰	۱۵	۱۶	۰	۰	۰	۱۸	۱۸
۵	۰	۰	۱۷	۰	۰	۰	۰	۲۲	۲۲
سناریو ۵									
۱	۰	۱۱	۰	۰	۱۲	۸	۳	۰	۰
۲	۰	۶	۰	۶	۰	۰	۰	۷	۷
۳	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۴	۱۰	۰	۰	۰	۲	۱۲	۰	۰	۰
۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
سناریو ۶									
۱	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۲	۰	۷	۱۱	۰	۱۴	۱۹	۰	۰	۰
۳	۶	۵	۰	۰	۰	۱۲	۰	۰	۰
۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۵	۰	۰	۹	۱۲	۰	۰	۷	۰	۰
سناریو ۷									
۱	۰	۰	۹	۰	۱۰	۰	۰	۱۱	۱۱
۲	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۳	۱۷	۰	۰	۰	۰	۰	۲۰	۰	۰
۴	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰
۵	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰	۰

### ۱-۶- تحلیل نتایج

به منظور بررسی دقیقتر نتایج حاصل از مطالعه موردی ابتدا لازم است تا نمودار پارتو جواب های حاصل از حل مطالعه موردی ارائه شود. در شکل زیر نمودار پارتو مطالعه موردی ارائه شده است.



شکل ۴- مجموعه جواب‌های پارتو در مطالعه موردی

همانطور که در شکل ۴ مشاهده می‌شود چنانچه به دنبال انتخاب سناریو ها با هزینه کمتر باشیم میزان رضایت مشتریان نیز کمتر می‌شود. به همین دلیل میتوان تضاد (conflict) اهداف ارائه شده در این تحقیق را به خوبی نشان داد. از طرفی با توجه به محدود کردن مسئله به برآورد سازی حداقل ۸۰ درصد تقاضا، تنها ۷ سناریو توسط الگوریتم فراابتکاری مورد نظر ارائه شده است. چنانچه این محدودیت به مقادیر کمتر از ۸۰ درصد تقلیل یابد مسلماً تعداد جواب‌های پارتو یافت شده بیشتر خواهد بود. همچنین از آنجایی که راه حل‌های بهینه متعدد برای این مسئله یافت شده است، مدیریت زنجیره تأمین این امکان را خواهد داشت تا سنآوری‌های مختلف را از جهت قابلیت اجرایی شدن و نیز جنبه‌های مخفی مسئله که در ساختارهای مدل‌های ریاضی قابل ارائه نیست، مورد ارزیابی قرار داده و در نهایت مناسب‌ترین آنها را برگزیند.

#### ۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش، یک مدل ریاضی برای مکان‌یابی و تخصیص تسهیلات در یک زنجیره تأمین چند سطحی، توسعه داده شد. در این مدل، ظرفیت کارخانه‌ها و ظرفیت مراکز عرضه و نیز هزینه تولید و نگهداری، مقداری مشخص و ثابت بود. همچنین هزینه‌های موجودی و حمل‌ونقل در کنار این مکان‌یابی در نظر گرفته شد. نوآوری کلی این تحقیق در بهینه‌سازی همزمان هزینه‌ها و رضایت‌مندی مشتریان در مکان‌یابی سلسله‌مراتبی زنجیره تأمین و نیز استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری چند هدفه تکاملی به منظور بهینه‌سازی آن بوده است. الگوریتم ارائه شده در این مقاله که بر اساس الگوریتم ازدحام ذرات می‌باشد، به دنبال یافتن جواب‌های بهینه پارتو برای مدل توسعه داده شده بود و در نهایت، تعدادی جواب ناچیره گزارش می‌کند. جواب‌های به دست آمده، نشان می‌دهد که با تبادل (trade-off) بین اهداف می‌توان جواب‌های بهینه متفاوتی ارائه کرد. مقایسات انجام شده این الگوریتم با الگوریتم NSGA II نشانگر کارایی بالای الگوریتم پیشنهادی در حل مسائل مربوط به مکان‌یابی سلسله‌مراتبی در زنجیره تأمین می‌باشد. در پایان نیز مطالعه موردی تأمین دوچرخه‌های کوهستان با استفاده از الگوریتم فراابتکاری MOHPSO نشان می‌دهد مجموعه جواب‌های پارتو ارائه شده قابلیت اجرایی شدن و نیز بهبود رضایت‌مندی مشتریان را نیز دارا می‌باشد. به عنوان تحقیقات آتی برای مدل ارائه شده، در نظر گرفتن موجودی اطمینان و ضریب ریسک برای زنجیره و نیز هزینه قابلیت اطمینان پیشنهاد می‌گردد.

#### ۸- منابع

- [1] Hitchcock FL. The distribution of a product from several sources to numerous localities. J Math Phys. 1941;20:224-30.
- [2] Diabat A, Theodorou E. A location-inventory supply chain problem: Reformulation and piecewise linearization. Computers and Industrial Engineering. 2015;90:381-9.

- [3] Shell E. Distribution of a product by several properties, Directorate of Management Analysis. Proceedings of the second symposium in linear programming 1955. p. 615-42.
- [4] Gunasekaran A, Dubey R, Singh SP. Flexible Sustainable Supply Chain Network Design: Current Trends, Opportunities and Future. *Global Journal of Flexible Systems Management*. 2016;17:109-12.
- [5] Winkler H. How to improve supply chain flexibility using strategic supply chain networks. *Logistics Research*. 2009;1:15-25.
- [6] Chopra S, Meindl P. Supply chain management. Strategy, planning & operation. *Das summa summarum des management: Springer*; 2007. p. 265-75.
- [7] Reyes PM. Logistics networks: A game theory application for solving the transshipment problem. *Applied Mathematics and Computation*. 2005;168:1419-31.
- [8] Lin L, Gen M, Wang X. Integrated multistage logistics network design by using hybrid evolutionary algorithm. *Computers and Industrial Engineering*. 2009;56:854-73.
- [9] Gen M, Lin L, Yun Y, Inoue H. Recent advances in hybrid priority-based genetic algorithms for logistics and SCM network design. *Computers and Industrial Engineering*. 2018;125:394-412.
- [10] Boysen N, Emde S, Hoeck M, Kauderer M. Part logistics in the automotive industry: Decision problems, literature review and research agenda. *European Journal of Operational Research*. 2015;242:107-20.
- [11] Chopra S. Designing the distribution network in a supply chain. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2003;39:123-40.
- [12] Eskigun E, Uzsoy R, Preckel PV, Beaujon G, Krishnan S, Tew JD. Outbound supply chain network design with mode selection, lead times and capacitated vehicle distribution centers. *European Journal of Operational Research*. 2005;165:182-206.
- [13] Melo MT, Nickel S, Saldanha Da Gama FS. Dynamic multi-commodity capacitated facility location: A mathematical modeling framework for strategic supply chain planning. *Computers and Operations Research*. 2006;33:181-208.
- [14] Melo MT, Nickel S, Saldanha-da-Gama F. An efficient heuristic approach for a multi-period logistics network redesign problem. *TOP*. 2014;22:80-108.
- [15] Thanh PN, Bostel N, Péton O. A dynamic model for facility location in the design of complex supply chains. *International Journal of Production Economics*. 2008;113:678-93.
- [16] Thanh PN, Péton O, Bostel N. A linear relaxation-based heuristic approach for logistics network design. *Computers and Industrial Engineering*. 2010;59:964-75.
- [17] Thanh PN, Bostel N, Péton O. A DC programming heuristic applied to the logistics network design problem. *International Journal of Production Economics*. 2012;135:94-105.
- [18] Cintron A, Ravindran AR, Ventura JA. Multi-criteria mathematical model for designing the distribution network of a consumer goods company. *Computers and Industrial Engineering*. 2010;58:584-93.
- [19] Pishvae MS, Rabbani M. A graph theoretic-based heuristic algorithm for responsive supply chain network design with direct and indirect shipment. *Advances in Engineering Software*. 2011;42:57-63.
- [20] Jolayemi JK, Fan C. Production-distribution and transportation planning in flexible multi-echelon supply chains. *Annals of Management Science*. 2012;1:41-60.

- [21] Mehdizadeh E, Afrabandpei F. Design of a mathematical model for logistic network in a multistage multi-product supply chain network and developing a metaheuristic algorithm. *Journal of Optimization in Industrial Engineering*. 2012;5:35-43.
- [22] Babazadeh R, Razmi J, Ghodsi R. Supply chain network design problem for a new market opportunity in an agile manufacturing system. *Journal of Industrial Engineering International*. 2012;8.
- [23] Hiremath NC, Sahu S, Tiwari MK. Multi objective outbound logistics network design for a manufacturing supply chain. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2013;24:1071-84.
- [24] Rianthong N, Dumrongsiri A. Time-partitioning heuristic algorithm for optimal production, inventory, and transportation planning with direct shipment. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 2013;35:369-77.
- [25] Rajabalipour Cheshmehgaz H, Desa MI, Wibowo A. A flexible three-level logistic network design considering cost and time criteria with a multi-objective evolutionary algorithm. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2013;24:277-93.
- [26] Rajabalipour Cheshmehgaz H, Islam MN, Desa MI. A polar-based guided multi-objective evolutionary algorithm to search for optimal solutions interested by decision-makers in a logistics network design problem. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2014;25:699-726.
- [27] BozorgiRad SY, Desa MI, Firoozi M. Genetic algorithms with heuristics rules to solve multi source single product flexible multistage logistics network problem. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*. 2014;4:264-76.
- [28] Jamrus T, Chien C, Gen M, Sethanan K. Flexible multistage forward/reverse logistics network under uncertain demands with hybrid genetic algorithm. *Toward Sustainable Operations of Supply Chain and Logistics Systems, Part v*. 2015:377-90.
- [29] Govindan K, Jafarian A, Nourbakhsh V. Bi-objective integrating sustainable order allocation and sustainable supply chain network strategic design with stochastic demand using a novel robust hybrid multi-objective metaheuristic. *Computers and Operations Research*. 2015;62:112-30.
- [30] Cortinhal MJ, Lopes MJ, Melo MT. Dynamic design and re-design of multi-echelon, multi-product logistics networks with outsourcing opportunities: A computational study. *Computers and Industrial Engineering*. 2015;90:118-31.
- [31] Melo MT, Nickel S, Saldanha-Da-Gama F. A tabu search heuristic for redesigning a multi-echelon supply chain network over a planning horizon. *International Journal of Production Economics*. 2012;136:218-30.
- [32] Behmanesh E, Pannek J. A memetic algorithm with extended random path encoding for a closed-loop supply chain model with flexible delivery. *Logistics Research*. 2016;9.
- [33] Poudel SR, Marufuzzaman M, Bian L. Designing a reliable bio-fuel supply chain network considering link failure probabilities. *Computers and Industrial Engineering*. 2016;91:85-99.
- [34] Wang LC, Cheng CY, Wang WK. Flexible supply network planning for hybrid shipment: A case study of memory module industry. *International Journal of Production Research*. 2016;54:444-58.
- [35] Yu J, Gan M, Ni S, Chen D. Multi-objective models and real case study for dual-channel FAP supply chain network design with fuzzy information. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2018;29:389-403.
- [36] Barzinpour F, Taki P. A dual-channel network design model in a green supply chain considering pricing and transportation mode choice. *Journal of Intelligent Manufacturing*. 2018;29:1465-83.
- [37] Molla-Alizadeh-Zavardehi S, Shoja A. A Fuzzy multi-product two-stage supply chain network design with possibility of direct shipment. *Annals of Optimization Theory and Practice*. 2018;1:11-22.

- [38] Fahimnia B, Davarzani H, Eshragh A. Planning of complex supply chains: A performance comparison of three meta-heuristic algorithms. *Computers and Operations Research*. 2018;89:241-52.
- [39] Kristianto Y, Gunasekaran A. A global optimization for sustainable multi-domain global manufacturing. *Computers and Operations Research*. 2018;89:307-23.
- [40] Molla-Alizadeh-Zavardehi S, Hajiaghaei-Keshteli M, Tavakkoli-Moghaddam R. Solving a capacitated fixed-charge transportation problem by artificial immune and genetic algorithms with a Prüfer number representation. *Expert Systems with Applications*. 2011;38:10462-74.
- [41] Hirsch WM, Dantzig GB. The fixed charge problem. *Naval Research Logistics Quarterly*. 1968;15:413-24.
- [42] Klose A. Algorithms for solving the single-sink fixed-charge transportation problem. *Computers and Operations Research*. 2008;35:2079-92.