



# Optimization of Sustainable Forward and Reverse Food Supply Chain Network: A Case Study (TABAROK Food Products Factory)

Amir Hossein Sheikh Azadi <sup>a</sup>, Ali Heidari <sup>b\*</sup>, Azar Fathi Heli Abadi <sup>c</sup>

<sup>a</sup> MSc. Student, Industrial Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, 14179-35840, Iran

<sup>b</sup> Department of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, 16846-13114, Iran

<sup>c</sup> Department of Industrial Management and Information Technology, Management and Accounting Faculty, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

## Original Article

Use your device to scan and read the article online



**Citation:** Sheikh Azadi A H, Heidari A, Fathi Heli Abadi A, Optimization of Sustainable Forward and Reverse Food Supply Chain Network: A Case Study (TABAROK Food Products Factory). Industrial Innovations. 2024;1(4):362-386.

 <https://doi.org/10.61186/jii.1.4.362>

## KEYWORDS

supply chain;  
Inspection;  
Sustainability.

## ABSTRACT

Effective management of the food supply chain with a waste plan in mind will play a vital role in the company's success and bring numerous competitive advantages to the stakeholders. Perishability of food products affects economic, environmental and social aspects of food supply chains. Perishable goods impose additional costs on the inventory system due to the spoilage of the goods, so it becomes necessary to use a closed-loop supply chain. According to the literature, the consideration of inspection in food supply chain networks has not been investigated. The use of inspection in the production and distribution center can contribute significantly to the three dimensions of sustainability. Examining this issue as a forward and reverse food supply chain is a challenging issue. In this research, a sustainable forward and reverse supply chain network for food is presented, taking into account inspection in the production and distribution center to prevent the transfer of spoiled products to the next layer. To solve the model, the enhanced epsilon constraint method was used, which is able to provide Pareto solutions suitable for all the objectives of the decision makers, and it was investigated to show the efficiency of the model in the real world of TABAROK food products factory.

## Extended Abstract

### 1. Introduction

Inventory of perishable items has been known as one of the important issues for organizations. In general, the main goal in the SC of perishable foods is to maintain product quality while improving logistics. Items are stored in some industries where the perishability rate is significant so that it cannot be ignored. In addition to economic losses to the manufacturing and agricultural industries, product spoilage will also cause environmental. Food waste can be converted into organic fertilizer using a biotechnology approach. In this method, food waste is completely prevented and a significant part of it is converted into organic fertilizer to save costs, reduce environmental pollution and use fewer natural resources (Figure 1). In fact, useless and wasteful materials might be valuable and re-enter the SC with some changes. To this end, CLSCNs are designed, depicted in Figure 2. By clarifying the importance of these networks, most manufacturing companies consider reverse flows in their SCNs along with forward flows so that they can gain more profit and improve their relationships with their customers in FSCN where the perishability rate is high, the producer can return spoiled items through establishing a proper coordination with the retailer and sharing the required information about inventory and demand.

\* Corresponding author.

E-mail address: [heidary.just@gmail.com](mailto:heidary.just@gmail.com)

DOI: <https://doi.org/10.61186/jii.1.4.362>

Received: January 20, 2024; Received in revised form: January 28, 2024; Accepted: February 1, 2024.

Article type: Research Paper

©Author



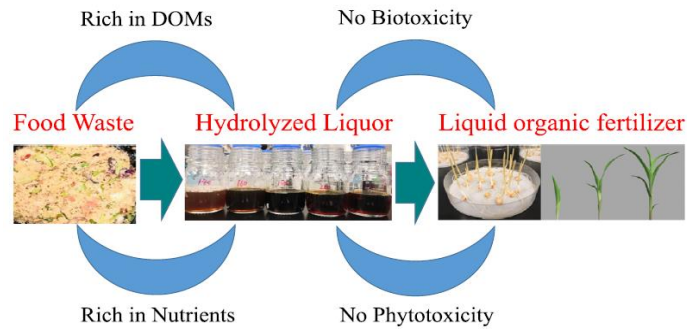


Figure 1 The process of converting food waste into organic fertilizer

Previous studies on the design of SCNs have paid less attention to inspection. However, if the spoiled product is detected at the distribution center before it reaches the customer and returns to the reverse loop to be converted into organic fertilizer, it will be very economical and environmentally friendly. Further, there are 35 million tons of food waste annually in Iran, and the food waste in the big cities of Iran is more than twice the world average. On the other hand, fertilizer can be produced from this huge amount of food waste. This challenging problem clearly indicates the necessity of conducting the present work.

Considering the significance of reverse logistics and issues raised in the field of sustainability, a sustainable CLSCN is designed for a gradually perishable product such as food by applying the concepts of multi-period to mitigate the harmful environmental effects of landfilling under conditions of uncertainty in this paper. In this work, an inspection is considered in the production and distribution centers, which prevents the spoiled foods from being sent to the customers. In other words, the number of spoiled products shipped to the clients and from the clients to the collection centers will be zero; thus, the financial loss and environmental pollution will be reduced. The FSC studied in the current research includes the following levels: food producers, distribution centers, customers, fertilizer production centers (from food product waste), and fertilizer sales centers to gardeners to use organic fertilizer (organic fertilizer customers). In addition, in this paper, three aspects of sustainability comprising economic (reducing costs), environmental (minimizing the greenhouse gas emissions of transportation and recycling), and social responsibility (increasing employment rate, developing community, and responding to customers' needs) are simultaneously considered in a CLSCN of gradually perishable foods under the conditions of uncertainty (the perishability rate). The present research's aim is to put forward a new robust multi-objective optimization framework for sustainable CLSCN for preventing the transfer of spoiled food products, choosing the best facility location (distribution center and fertilizer production center), finding the optimal materials flow and food products as well as specifying the inventory level in distribution centers.

## 2. Modeling and formulation

In this section, we introduce a mathematical mode.

$$\min of_1 = \text{fixed cost} + \text{transportation cost} + \text{inventory cost} + \text{production cost} \quad (1)$$

$$\text{fixed cost} = \sum_d Fd_d \cdot Z_d + \sum_l Fl_l \cdot x_l \quad (2)$$

$$\text{transportation cost} = \sum_f \sum_d \sum_t Fx_{fd} \cdot B_{fdt} + \sum_k \sum_d \sum_t Fu_{dk} \cdot \alpha_{dkt} + \sum_k \sum_f \sum_t Fs_{fk} \cdot \omega_{fkt} \quad (3)$$

$$+ \sum_l \sum_f \sum_t Fv_{fl} \cdot V_{fjt} + \sum_d \sum_l \sum_t Fq_{dl} \cdot \phi_{dlt} + \sum_k \sum_l \sum_t Fe_{kl} \cdot E_{klt} + \sum_r \sum_l \sum_t Ff_{lr} \cdot F_{lrt}$$

$$\text{inventory cost} = \sum_d \sum_t Ih_{dt} \cdot Fh_t \quad (4)$$

$$\text{production cost} = \sum_f \sum_d \sum_t Fp_t \cdot B_{fdt} + \sum_r \sum_l \sum_t Fr_t \cdot F_{lrt} + \sum_f \sum_t pr_{ft} \cdot Fp' \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \min of_2 = & \sum_f \sum_t Ce_{ft}^{emf} \cdot pr_{ft} + \sum_f \sum_d \sum_t Ce_{fdt}^{pd} \cdot B_{fdt} + \sum_k \sum_d \sum_t Ce_{dkt}^{dc} \cdot \alpha_{dkt} + \sum_k \sum_f \sum_t Ce_{fkt}^{pc} \cdot \omega_{fkt} \\ & + \sum_k \sum_l \sum_t Ce_{klt}^{cc'} \cdot E_{klt} + \sum_d \sum_l \sum_t Ce_{dlt}^{dc'} \cdot \phi_{dlt} + \sum_f \sum_l \sum_t Ce_{flt}^{pc} \cdot V_{fjt} \\ & + \sum_l \sum_r \sum_t Ce_{lrt}^{pc'} \cdot F_{lrt} \end{aligned} \quad (6)$$

$$s_1 = \sum_d j_{o_d} \cdot ur_d \cdot z_d + \sum_l j_{o_l} \cdot ur_l \cdot x_l \tag{7}$$

$$s_2 = \sum_d Ev_d \cdot (1 - rd_d) \cdot z_d + \sum_l Ev_l \cdot (1 - rd_l) \cdot x_l \tag{8}$$

$$Max\ of_3 = W_{em} \cdot s_1 + W_{ed} \cdot s_2 \tag{9}$$

$$pr_{ft} \times (1 - \alpha_t) \geq \sum_d B_{fdt} + \sum_k \omega_{fkt} \quad \forall f \in F, \forall t \in T \tag{10}$$

$$z_d = \begin{cases} 1, & \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T B_{fdt} > 0 \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad \forall d \in D \tag{11}$$

$$pr_{ft} \leq max_{c_{ft}} \quad \forall f \in F, \forall t \in T \tag{12}$$

$$Inv_{d(t-1)} + \sum_{f=1}^F B_{fdt} = Inv_{dt} + \sum_{k=1}^K \kappa_{dkt} + \sum_{l=1}^L \phi_{dlt} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \tag{13}$$

$$Inv_{dt} \leq Ch_d \quad \forall d \in D, \forall t \in T \tag{14}$$

$$\sum_{d=1}^D \kappa_{dkt} + \sum_{f=1}^F \omega_{fkt} \leq d_{kt} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \tag{15}$$

$$\sum_{l=1}^L V_{flt} \leq \alpha_t \times pr_{ft} \quad \forall f \in F, \forall t \in T \tag{16}$$

$$x_l = \begin{cases} 1, & \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F V_{flt} > 0 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad \forall l \in L \tag{17}$$

$$\sum_{l=1}^L \phi_{dlt} \leq \beta_t \times Inv_{d(t-1)} \quad \forall d, t \tag{18}$$

$$x_l = \begin{cases} 1, & \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D \phi_{dlt} > 0 \\ 0 & otherwise \end{cases} \quad \forall l \tag{19}$$

$$\sum_{l=1}^L E_{klt} \leq \theta_t \times d_{kt} \quad \forall k, t \tag{20}$$

$$x_l = \begin{cases} 1, & \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K E_{klt} > 0 \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad \forall l \tag{21}$$

$$(\sum_{f=1}^F V_{flt} + \sum_{d=1}^D \phi_{dlt} + \sum_{k=1}^K E_{klt}) \times \varphi = \sum_{r=1}^R F_{lrt} \quad \forall l \in L, \forall t \in T \tag{22}$$

$$\sum_{r=1}^R F_{lrt} \leq Cr_l \quad \forall l, t \tag{23}$$

$$\sum_{l=1}^L F_{lrt} \leq d'_{rt} \quad \forall r, t \tag{24}$$

$$\rho \times (\sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \omega_{fkt} + \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \kappa_{dkt}) / (\sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T d_{kt}) + (1 - \rho) \times (\sum_{l=1}^L \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T F_{lrt}) / (\sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T d'_{rt}) \geq \eta \tag{25}$$

$$x_i, z_d \in \{0,1\} \quad \forall d \in D, \forall l \in L \tag{26}$$

$$B_{fat}, \omega_{ikt}, \mathcal{A}_{akt}, V_{flt}, \mathcal{G}_{dt}, E_{klt}, F_{lrt} \geq 0 \quad \forall r \in R, \forall f \in F, \forall d \in D, \forall k \in K, \forall t \in T, \forall l \in L \tag{27}$$

$$Inv_{at} \geq 0, pr_{ft} \geq 0 \quad \forall f \in F, \forall d \in D, \forall t \in T \tag{28}$$

### 3. Implementation of the model and analysis

Various methods, such as AEC, have been proposed to solve multi-objective decision-making/optimization problems. In this work, the AEC method is utilized for solving this problem in hand. Equation (29) is exploited for solving the suggested model, achieve the Pareto frontier, and show the conflict between the objective functions.

$$\begin{cases} \text{Min} f_1(y) - \sum_{i=2}^n r_i s_i \\ f_i(y) + s_i = \varepsilon_i \quad i = 2, 3, \dots, n \\ y \in Y \\ s_i \geq 0 \end{cases} \tag{29}$$

The obtained Pareto frontier by the AEC method is displayed in Figure 1-3. In addition, one of the Pareto solutions is presented in Table 1. of1, of2, and of3 are the economic, environment, and social objective functions, respectively.

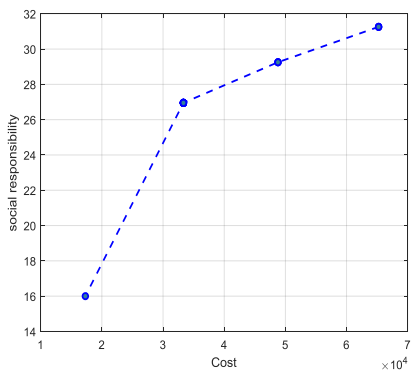


Figure 2 Relationship between economic and social responsibility objective functions

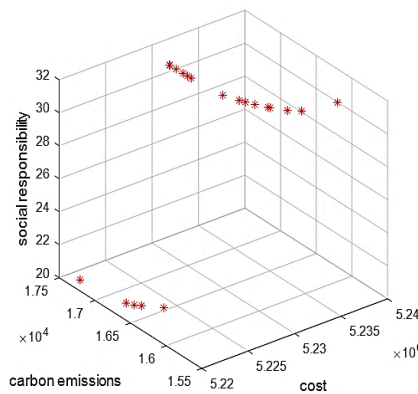


Figure 1 The Pareto frontier obtained using the AEC method

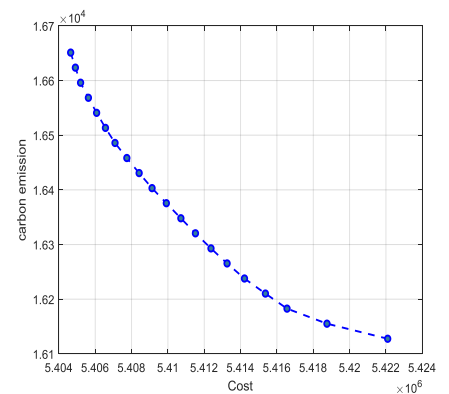


Figure 3 Relationship between economic and environmental objective functions

Table 1 The objective function values

Economical	5222368.985
Environmental impact	16576.187
Social responsibility	20.305
Fixed cost	47948
Transportation cost	12485.551
Inventory cost	14955.177
Production cost	5146980.257

### 4. Conclusion

In this research, a forward and reverse FSCN was investigated taking the concepts of sustainable SC into account to reduce the cost, harmful ecological effects caused by food waste disposal, and increase social responsibility under conditions of uncertainty. In other words, three economic (reducing costs), environmental (minimizing GHG emissions), and social responsibility (creating employment, community development and customer satisfaction) aspects of sustainability were simultaneously considered in this paper to optimize the FSC in conditions of uncertainty. The conflict between the first objective function (cost) and the second objective function (carbon emission) showed that the reduction of pollution leads to cost increase.



## بهینه‌سازی شبکه زنجیره تأمین روبه‌جلو و معکوس پایدار غذا: مطالعه موردی (کارخانه محصولات غذایی تبرک)

امیرحسین شیخ آزادی<sup>الف</sup>، علی حیدری<sup>ب\*</sup>، آذر فتحی هلی آبادی<sup>ج</sup>

<sup>الف</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی صنایع، دانشگاه تهران، تهران، ایران، [amir1377623@gmail.com](mailto:amir1377623@gmail.com)

<sup>ب</sup> کارشناسی ارشد، مهندسی صنایع، علم و صنعت ایران، تهران، ایران، [heidary.iust@gmail.com](mailto:heidary.iust@gmail.com)

<sup>ج</sup> دانشجوی دکتری، گروه مدیریت صنعتی و فناوری اطلاعات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران  
[engineerfathiazar@gmail.com](mailto:engineerfathiazar@gmail.com)

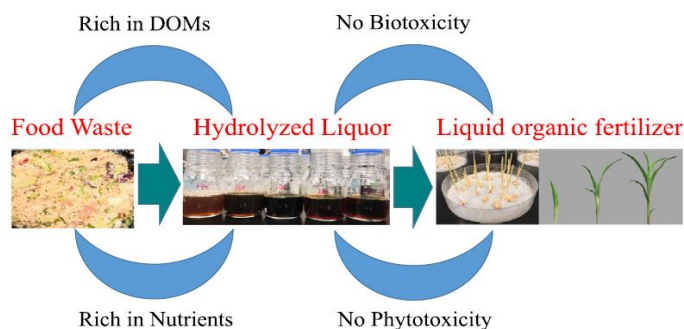
چکیده	واژگان کلیدی
<p>مدیریت اثربخش زنجیره تأمین مواد غذایی با در نظر داشتن برنامه برای پسماند، نقشی حیاتی در موفقیت شرکت به همراه خواهد داشت و مزایای رقابتی بی‌شماری را برای ذینفعان به ارمغان می‌آورد. فسادپذیری محصولات غذایی بر جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی زنجیره‌های تأمین غذا تأثیر می‌گذارد. کالای فسادپذیر، به دلیل فاسدشدن کالاها هزینه‌های اضافی را بر سیستم موجودی تحمیل می‌کند، لذا به‌کارگیری زنجیره‌تأمین حلقه‌بسته ضرورت می‌یابد. با توجه به ادبیات موضوع در نظر داشتن بازرسی در شبکه‌های زنجیره‌تأمین غذا موردبررسی قرار نگرفته است. استفاده از بازرسی در مرکز تولید و توزیع می‌تواند به سه بعد پایداری کمک قابل‌توجهی داشته باشد. بررسی این موضوع به‌صورت زنجیره‌تأمین روبه‌جلو و معکوس غذا موضوع چالش‌برانگیزی می‌باشد. در این پژوهش یک شبکه زنجیره تأمین روبه‌جلو و معکوس پایدار برای مواد غذایی با در نظر گرفتن بازرسی در مرکز تولید و توزیع جهت جلوگیری از انتقال محصولات فاسد شده به لایه بعدی ارائه می‌گردد. برای حل مدل، از روش محدودیت افسیلون تقویت‌شده استفاده شد که قادر است جواب‌های پارتو متناسب با تمام اهداف تصمیم‌گیرندگان ارائه دهد و برای نشان دادن کارایی مدل در دنیای واقعی کارخانه محصولات غذایی تبرک موردبررسی قرار گرفت.</p>	<p>زنجیره تأمین؛ بازرسی؛ پایدار.</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۳۰ تاریخ بازنگری: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۱۲</p>

### ۱- مقدمه

فسادپذیری محصولات بر جنبه‌های اقتصادی، زیست‌محیطی، اجتماعی و تولید زباله تأثیر می‌گذارد [۱]. نتایج نشان می‌دهد در نظر داشتن فسادپذیری مواد غذایی در طراحی زنجیره تأمین، (به‌ویژه برای محصولات با ماندگاری کوتاه) به‌شدت تأثیرگذار است و همچنین عملکرد خوب اقتصادی و درعین‌حال سودآوری در زنجیره تأمین غذا زمانی بهبود می‌یابد که فسادپذیری محصول در نظر گرفته شود [۲]. سالانه بالغ بر ۸۸ میلیون تن غذا در اروپا هدر می‌رود که ۲۰ درصد تولیدات را تشکیل می‌دهد [۳]. بنابراین، پایداری اقتصادی و زیست‌محیطی کشورهای اروپایی تا حد زیادی با پایداری زنجیره‌های تأمین محصولات کشاورزی و غذایی مرتبط است. همواره در نظر داشتن ابعاد پایداری برای طراحی شبکه زنجیره تأمین مورد تأکید پژوهشگران بوده است [۴] محققان، مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی را برای حل مسائل تاکتیکی و عملیاتی محصولات غذایی

\* نویسنده مسئول؛

به منظور بهینه‌سازی و کارایی زنجیره‌های تأمین محصولات فسادپذیر با در نظرگیری اهداف اقتصادی و زیست‌محیطی پیشنهاد کرده‌اند [۱۵]. برای کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی زنجیره‌های تأمین محصولات فسادپذیر، در نظر گرفتن فسادپذیری محصول در طراحی زنجیره‌های تأمین محصولات غذایی در تحقیقات محققین مورد تأکید قرار گرفته است [۱۶]. با توجه به اینکه در نظر گرفتن فساد در طراحی زنجیره تأمین غذا امری ضروری است مبحث لجستیک معکوس مطرح می‌شود. در شبکه معکوس شرایط پیچیده‌ای وجود دارد که می‌توان عنوان کرد اگر لجستیک معکوس با جریان روبه‌جلو ادغام شود پیچیدگی مسئله بیشتر می‌شود [۴، ۷]. فسادپذیری در سطوح تاکتیکی و عملیاتی در برخی مدل‌ها در نظر گرفته شده است [۸]. بنابراین به‌کارگیری مفاهیم و اصول لجستیک معکوس و زنجیره تأمین حلقه بسته برای سازمان‌های مختلف به‌خصوص صنایع مرتبط با اقلام ز امری ضروری به نظر می‌رسد که امروزه مورد توجه محققان زیادی قرار گرفته است [۹]. صنعت غذا در مواجهه با چالش‌های مربوط به تغذیه پایدار برای جمعیتی که در حال رشد است، به‌طور فزاینده‌ای بر تکنیک‌های تحقیق در عملیات (OR) برای دستیابی به پایداری اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی تکیه دارد [۱۰]. یکی از مسائل مهمی که سازمان‌ها و صنایع با آن روبرو می‌باشند کنترل و نگهداری موجودی اقلام فاسدشدنی است [۱۱]. در بعضی صنایع اقلامی نگهداری می‌شوند که نرخ فسادپذیری در آن‌ها قابل توجه می‌باشد، به طوری که نمی‌توان آن را نادیده گرفت. فاسدشدن محصول علاوه بر اینکه از نظر اقتصادی باعث ضرر و زیان صنایع تولیدی و کشاورزی می‌شود، از لحاظ زیست‌محیطی نیز موجب افزایش ضایعات و در نتیجه آلودگی بیشتر محیط خواهد شد [۱۲]. با استفاده از یک رویکرد بیوتکنولوژی می‌توان ضایعات مواد غذایی را به کود آلی تبدیل کنیم [۱۳]. در این روش دیگر از دورریز مواد غذایی به‌طور کامل، جلوگیری می‌شود و بخش قابل توجهی از آن به کود آلی تبدیل می‌شود (شکل ۱). این موضوع از این واقعیت ناشی می‌شود که مواد بی‌فایده ممکن است ارزشمند باشند و می‌توانند با تغییراتی دوباره وارد زنجیره تأمین شوند که این مهم را شبکه‌های زنجیره تأمین حلقه بسته انجام می‌دهند (شکل ۲). با روشن شدن اهمیت شبکه‌های مزبور، بیشتر شرکت‌های تولیدی جریان‌های معکوس را در شبکه زنجیره تأمین خود در کنار جریان‌های روبه‌جلو در نظر می‌گیرند تا سود بیشتری عاید آن‌ها گردد و روابط میان مشتریان و خود را ارتقاء بخشند [۱۴]. در شبکه‌های زنجیره تأمین غذا که نرخ فساد بالاست تولیدکننده می‌تواند با ایجاد یک هماهنگی مناسب با خرده‌فروشان و به اشتراک‌گذاری اطلاعات مربوط به تقاضا و موجودی، اقدام به بازگرداندن اقلام فاسد شده کند [۱۵]. از اقلام فاسد شده برای تولید کود آلی بهره گرفته می‌شود تا به این ترتیب زمینه را برای صرفه‌جویی در هزینه‌ها، کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و استفاده کمتر از منابع طبیعی فراهم شود. در پژوهش‌های انجام شده در حوزه طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین به مسئله بازرسی کمتر توجه شده است. تصور کنیم که اگر محصول فاسد شده قبل از اینکه به دست مشتری برسد در مرکز توزیع بازرسی شود و به حلقه معکوس جهت تبدیل به کود آلی برگردد از نظر اقتصادی و زیست‌محیطی بسیار مقرون‌به‌صرفه خواهد بود و موجب می‌شود یک مدل پایدار ارائه شود.



شکل ۱ روند تبدیل پسماند غذا به کود آلی [۱۶]

با توجه به اهمیت لجستیک معکوس و مسائل مطرح شده در حوزه پایداری در این پژوهش یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته برای کالای فسادپذیر تدریجی مانند غذا با اعمال مفاهیم زنجیره تأمین سبز و پایداری چند دوره‌ای، چند محصولی

به‌منظور کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از دفن زباله‌ها تحت شرایط عدم قطعیت ارائه می‌گردد. همان‌طور که اشاره شد در مدل ریاضی این پژوهش در مرکز تولید و توزیع عمل بازرسی انجام می‌شود که از ارسال محصولات (غذای فاسد شده) به مشتریان جلوگیری می‌شود و همین موضوع باعث می‌شود حمل‌ونقل از توزیع به مشتری و از مشتری به مرکز جمع‌آوری برای محصول فاسد شده صفر گردد که هم بار مالی را کاهش می‌دهد و هم از نظر کاهش آلاینده‌گی بسیار مؤثر می‌باشد. زنجیره تأمین غذا این پژوهش شامل سطوح تولیدکننده محصولات غذایی، مراکز توزیع، مشتریان محصولات غذایی، مراکز تولید کود از ضایعات محصولات غذایی و مراکز فروش کود به باغداران جهت استفاده از کود آلی (مشتریان کود آلی) می‌باشد سه جنبه پایداری شامل اقتصادی (کاهش هزینه‌ها)، زیست‌محیطی (کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط بخش حمل‌ونقل، بازیافت) و مسئولیت اجتماعی (ایجاد اشتغال، توسعه جامعه و پاسخگویی به نیاز مشتریان) برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته غذاهای فسادپذیر تدریجی در شرایط عدم قطعیت (نرخ فساد) به‌طور هم‌زمان در این پژوهش در نظر گرفته می‌شود که هدف آن جلوگیری از انتقال محصولات غذایی فاسد شده، انتخاب بهترین مکان تأسیسات (مرکز توزیع و مرکز تولید کود)، به دست آوردن جریان بهینه مواد و محصولات غذایی در ارتباط با تعیین سطح موجودی در مراکز توزیع ارائه می‌شود.

- طراحی شبکه زنجیره‌تأمین روبه‌جلو و معکوس برای محصولات غذایی
- در نظر داشتن بازرسی
- تولید کود از طریق پسماند غذایی

## ۲- ادبیات موضوع

آگاهی زیست‌محیطی و بازیافت محصولات، سبب شده است که جریان‌های روبه‌جلو و معکوس همگام شوند [۱۷، ۱۸]. محصولات برگشتی از جریان معکوس از نظر هزینه و زیست‌محیطی با ارزش هستند [۱۹]. با توجه به بروز مسائلی مانند کمبود منابع طبیعی، قوانین دولتی، خطرات باقیمانده محصولات برای زندگی انسان و نگرانی‌های زیست‌محیطی [۲۰]، طراحی لجستیک معکوس و زنجیره تأمین حلقه بسته به موضوعی محوری برای محققان و تصمیم‌گیران تبدیل شده است [۲۱-۲۳]. به‌طور کلی مدیریت زنجیره تأمین (روبه‌جلو و یا معکوس) شامل سه سطح برنامه‌ریزی (استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی) است [۲۴]. که پیکربندی زنجیره تأمین یک تصمیم استراتژیک است که بر فعالیت‌های تاکتیکی و عملیاتی تأثیر می‌گذارد [۲۵]. برنامه‌ریزی برای بازیابی محصول نیازمند یک زیرساخت لجستیکی مناسب است [۲۶]. علاوه بر این اثرات و نتایج پیکربندی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چندین سال باقی خواهد ماند، علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه، طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته برای محصولات فاسدشدنی می‌تواند مزایای زیست‌محیطی داشته باشد. پژوهش‌های زیادی در این حوزه انجام شده است به‌عنوان مثال: برای طراحی یک شبکه لجستیک معکوس بر، با در نظر داشتن مکان‌یابی-تخصیص، یک مدل ریاضی MILP توسط [۲۷] پیشنهاد شده است. [۲۸] برای به حداکثر رساندن سود پس از مالیات، یک CLSC برای تجهیزات پزشکی در شرایط عدم قطعیت پیش‌بینی کردند. مدل آن‌ها تصمیمات استراتژیک (مانند انتخاب تأمین‌کننده، استقرار سایت تولید، انتخاب انبار/توزیع‌کننده، و ایجاد تسهیلات جمع‌آوری/بازیابی) و چندین تصمیم تاکتیکی از جمله تهیه قطعات، برنامه‌ریزی تولید، برنامه‌ریزی حمل‌ونقل، بازیابی محصولات برگشتی و هزینه‌های انتقال را ادغام می‌کند. با در نظر گرفتن ریسک برای به حداکثر رساندن کل سود مورد انتظار، یک مدل شبکه CLSC چند دوره‌ای و چندلایه ارائه کردند. [۲۹] اهداف زیست‌محیطی مانند انتشار آلاینده‌ها نقش مهمی در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ایفا می‌کنند و نادیده گرفتن آن در طراحی شبکه غیرممکن است [۳۰]. طراحی شبکه زنجیره تأمین از نظر زیست‌محیطی به‌گونه‌ای که قادر به ادغام تصمیمات استراتژیک مانند مکان تأسیسات - با تصمیمات تاکتیکی - مانند جریان مواد در هر دوره باشد باعث ایجاد یک مبادله بین دو تابع هدف مهم، یعنی مجموع هزینه‌ها و انتشار کل CO<sub>2</sub> از طریق حمل‌ونقل در زنجیره تأمین پیش‌رو و معکوس می‌شود [۲۹]. اثرات زیست‌محیطی ناشی از حمل‌ونقل مواد/محصولات در هر دو شبکه روبه‌جلو و معکوس مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین در حوزه شبکه‌های زنجیره تأمین مواد غذایی و کشاورزی پژوهش‌هایی انجام شده است به‌عنوان مثال: یک روش بازی تکاملی برای تجزیه و تحلیل تصمیم‌گیری در مورد بازیافت کشاورزی از دیدگاه ذینفعان ایجاد کرد. هماهنگی زنجیره‌های تأمین محصولات

غذایی با در نظرگیری بازیافت/پسماند در مسائل زنجیره تأمین در ادبیات کمتر موردبررسی قرار گرفته است [۳۱]. با گنجاندن نقش هماهنگی در مراحل زنجیره و رابطه آن با عملکرد اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی، به ادبیات پایداری زنجیره تأمین کشاورزی-غذایی کمک کردند. [۳۲] در مقاله خود نشان داد که هماهنگی زنجیره تأمین می‌تواند بهره‌وری و سودآوری کانال کشاورزی را بهبود بخشد. [۳۳] زنجیره تأمین مواد غذایی و صنعت مواد غذایی تحت تأثیر بیماری همه‌گیر COVID ۱۹ را موردبررسی قرار دادند، در این پژوهش بررسی انتقال COVID ۱۹ از طریق زنجیره تأمین مواد غذایی، سطوح و محیط انجام شد زنجیره‌های تأمین حلقه بسته (CLSC) برای محصولات غذایی عمدتاً بر بازیابی ارزش باقیمانده غذا متمرکز هستند [۳۴]. بسته‌بندی مواد غذایی که نقش مهمی در زنجیره تأمین مواد غذایی ایفا می‌کند را در یک مدل زنجیره تأمین حلقه بسته مورد ارزیابی قرار دادند. مجموعه‌ای از مراکز توزیع، عمده‌فروشان، کارخانه‌های فرآوری میگو، بازارها، کارخانه پودر ضایعات میگو و بازار پودر ضایعات میگو را به صورت یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته طراحی و سپس با سه الگوریتم فرا ابتکاری به تجزیه و تحلیل این شبکه غذایی پرداختند. استدلال کردند که بسیاری از فروشگاه‌های مواد غذایی، مواد غذایی بیش‌ازحد موردنیاز را دور می‌ریزند. آن‌ها یک مدل ریاضی برای مدیریت فرآیند جمع‌آوری غذاهای تاریخ‌مصرف گذشته از بخش‌های کشاورزی و توزیع آن‌ها در مزارع دام پیشنهاد کردند. این موضوع می‌تواند سبب بیماری دام شود در پژوهش فعلی این مقاله هدف جمع‌آوری چنین ضایعاتی است و تبدیل آن به کود آلی و در نهایت ارسال به باغداران می‌باشد [۳۵].

جدول ۱ مروری بر ادبیات اخیر در زمینه CLSC و شکاف تحقیقاتی

منابع	نوع مدل		ساختار مدل				ابعاد پایداری			
	زیست محیطی	اقتصادی	چند محصولی	چند دوره‌ای	چند هدفه	اقتصادی	زیست محیطی	اجتماعی	حلقه بسته	بازرسی
ژاله‌چیان و همکاران ۲۰۱۶	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	
اسفندآبادی و همکاران ۲۰۱۸	✓		✓		✓	✓	✓			
مردان و همکاران ۲۰۱۹	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	
نوازی و همکاران ۲۰۱۹	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
یاوری و گرایلی ۲۰۱۹	✓		✓	✓	✓	✓	✓		✓	
ژان و همکاران ۲۰۱۹	✓		✓		✓	✓	✓		✓	
بیوکی و همکاران ۲۰۲۰	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
گویندان و همکاران ۲۰۲۰	✓		✓		✓	✓	✓		✓	
نیری و همکاران ۲۰۲۰	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	
صادقی و همکاران ۲۰۲۰	✓		✓	✓		✓	✓		✓	
توانا و همکاران ۲۰۲۰	✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
این پژوهش	✓		✓		✓	✓	✓	✓	✓	✓

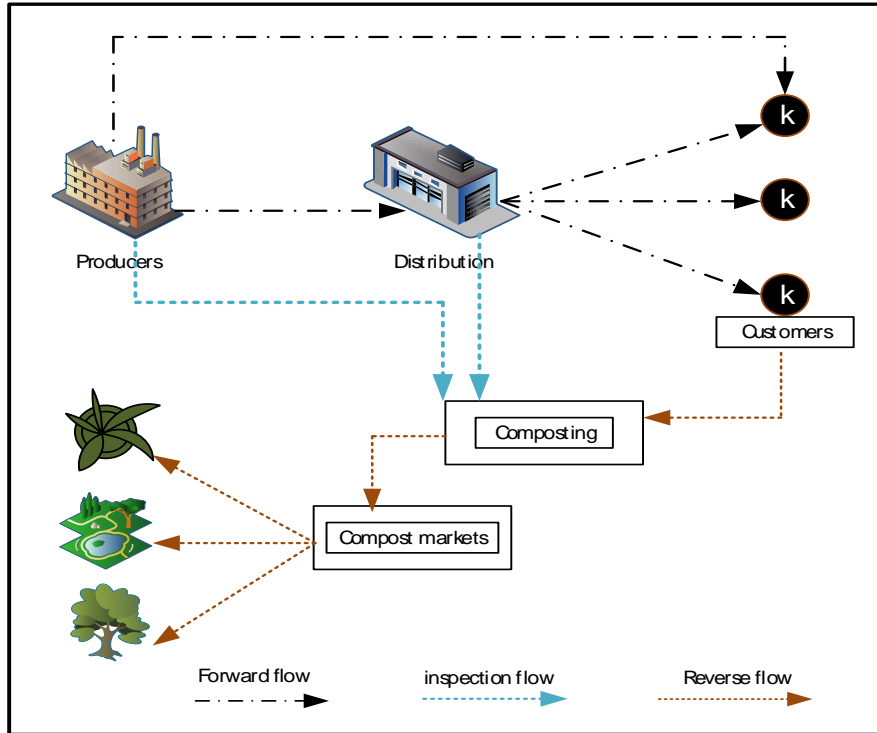
تولید زباله‌های جامد آلی در سراسر جهان؛ هر سال به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. اکثر زباله‌های جامد آلی از ضایعات کشاورزی، ضایعات مواد غذایی خانگی، ضایعات انسانی و حیوانی و غیره تشکیل شده‌اند. در اکثر پژوهش‌های انجام شده برای محصولات فاسدشدنی معمولاً برنامه‌ای برای دورریز، دفن و یا نهایتاً انتقال آن برای مصرف دام شده است [۱۸-۳۵]. زباله‌های جامد آلی معمولاً به‌عنوان خوراک حیوانات استفاده می‌شوند، سوزانده می‌شوند یا در مکان‌های دفن زباله دفع می‌شوند.

زباله‌های جامد آلی از مواد غنی از پروتئین، مواد معدنی و قند تشکیل شده است که می‌تواند در فرآیندهای دیگر به‌عنوان بستر یا مواد خام مورد استفاده قرار گیرد [۳۶]. اگر مواد غذایی فاسدشدنی (بدون اینکه ارزش افزوده‌ای به آن داده شود) به‌عنوان خوراک حیوانات استفاده شود موجب ایجاد بیماری در حیوانات می‌شود. برخی از این محصولات دارای ترکیبات مضر می‌باشند که باعث می‌شود ارزش بالقوه پسماندها قابل بهره‌برداری برای حیوان نباشد و اغلب باعث کاهش مصرف خوراک از طریق کاهش قابلیت هضم و یا ابتلا به بیماری می‌گردد. در کنار اثری که بر قابلیت هضم می‌گذارند ممکن است در شکمبه تجزیه‌شده و سم حاصل از آن‌ها وارد بدن شود. ضایعات مواد غذایی مضرتر از آن چیزی است که قبلاً تصور می‌شد. مقدار زیادی از ضایعات مواد غذایی به محل‌های دفن زباله ختم می‌شود که تنها ۲۰ درصد آن بهداشتی است [۳۷]. در این پژوهش یک شبکه زنجیره تأمین روبه‌جلو و معکوس جهت تبدیل مواد غذایی فاسد شده و یا ضایع شده به کود آلی طراحی شده است که در مبحث پایداری هر سه بعد اقتصادی (کاهش هزینه‌ها)، زیست‌محیطی (کاهش آلاینده‌ها) و مسئولیت اجتماعی (شرایط بیکاری، توسعه جامعه و افزایش رضایت مشتری از طریق ارضای تقاضا) در نظر گرفته شده است. موضوع قابل توجه این است فرض کنیم اگر محصولات فاسد شده (و یا ضایع شده) از یک‌لایه به لایه بعدی منتقل شود هزینه‌ها و انتشار آلاینده‌ها (حمل‌ونقل از تولید به مرکز توزیع و از توزیع به مکان مشتری) دوچندان می‌شود چراکه بایستی کل مسیر طی شده را برگردد و به مرکز تولید کود آلی منتقل شود. در این پژوهش فرض بازرسی در مرکز تولید و توزیع مدنظر است که از انتقال مواد غذایی فاسد شده به لایه بعدی جلوگیری می‌کند.

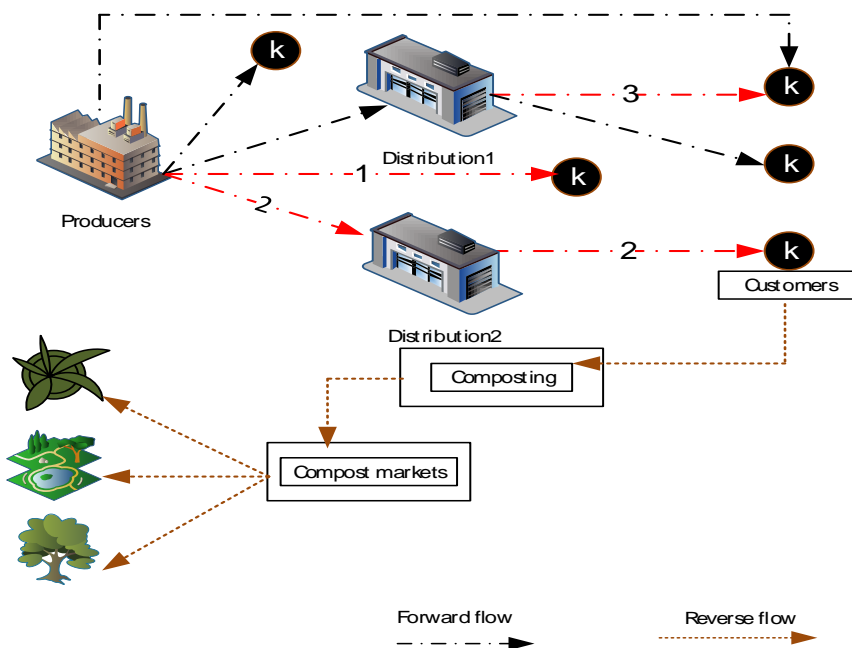
## ۲- مدل ریاضی

شبکه مورد بررسی در این تحقیق، یک شبکه لجستیک یکپارچه مستقیم-معکوس چند سطحی و چند دوره‌ای است. در این شبکه که جریان مستقیم و معکوس را به‌صورت توأم در نظر می‌گیرد، در کانال مستقیم شامل سطوح تولیدکنندگان محصولات غذایی، توزیع‌کنندگان و مشتریان بوده و در کانال معکوس که جریان آن‌هم از تولیدکنندگان (بازگشت محصولات به دلیل بازرسی به مرکز تولید کود آلی) هم توزیع‌کنندگان (بازگشت محصولات به دلیل بازرسی به مرکز تولید کود آلی) و نیز مشتریان نشأت می‌گیرد، دربرگیرنده مراکز تولید کود و مراکز فروش کود می‌باشد. همان‌طور که در شکل ۲ آمده است، زنجیره تأمین شامل سطوح تولیدکننده محصولات غذایی، مراکز توزیع، مشتریان محصولات غذایی، مراکز تولید کود از ضایعات محصولات غذایی و مراکز فروش کود آلی و مشتریان کود که باغدارانند می‌باشد. در جریان روبه‌جلو اقلام محصولات غذایی از تولیدکننده به دو حالت: ۱- از طریق مراکز توزیع، ۲- ارائه مستقیم، در اختیار مشتریان قرار می‌گیرند. بازرسی برای مشخص کردن محصولات فاسد شده یا ضایع شده در دو محل انجام می‌شود در بخش تولید که از ارسال به مشتری و مرکز توزیع جلوگیری می‌کند و بازرسی در بخش مراکز توزیع این مورد نیز سبب می‌شود از ارسال محصولات فاسد به مشتریان که موجب نارضایتی در مشتریان و افزایش هزینه‌ها و آلاینده‌ها می‌شود. در جریان معکوس، محصول فاسد شده از مشتریان به مراکز تهیه کود فرستاده می‌شوند جایی که به کود آلی تبدیل و به مشتریان آن یعنی مراکز فروش کود فرستاده می‌شوند. نتیجه این روند علاوه بر حفظ سلامت انسان و محیط‌زیست، تولید مقدار قابل‌توجهی از کودهای آلی است. از طرفی فرض کنیم که بازرسی در مراکز تولید و توزیع صورت نگیرد بخش حمل‌ونقل می‌بایست بر اساس شکل ۲ مسیره‌های قرمز رنگ را بدون داشتن عایدی بپیماید که علاوه بر این ایجاد نارضایتی برای مشتریان و بحث تولید آلاینده‌ها و هزینه حمل‌ونقل نیز مطرح می‌شود. بر اساس شکل ۳، مسیر ۱ ارسال مستقیم از تولید به مشتری حاوی ضایعات بوده، مسیر ۲ محصول ارسالی به مرکز توزیع بدون نقص بوده و در مرکز توزیع دچار ضایعات شده و ارسال به مشتری و در نهایت مسیر ۳ که بدبینانه‌ترین حالت رخ می‌دهد محصول فاسد شده به مرکز توزیع ارسال و سپس به مشتریان ارسال می‌شود (نتیجه این شبکه (شکل ۳) بازگشت محصول با حجم بیشتر، افزایش نارضایتی، هزینه و آلاینده‌ها است). در حالتی که اگر بازرسی باشد از مواردی که گفته شد جلوگیری می‌شود. بنابراین مساله ایجاد امکانات تولید کود برای انجام لجستیک معکوس در زنجیره تأمین مواد غذایی با در نظر داشتن بازرسی محسوب می‌شود. سه جنبه پایداری اقتصادی (کاهش هزینه‌ها)، زیست‌محیطی (کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط بخش حمل‌ونقل) و مسئولیت اجتماعی (ایجاد اشتغال، توسعه جامعه و رضایت مشتریان) برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین روبه‌جلو و معکوس کالای فسادپذیر تدریجی در شرایط عدم قطعیت به‌طور هم‌زمان در این پژوهش

در نظر گرفته می‌شود. همچنین در شبکه مورد طراحی به منظور تطابق بیشتر مدل با شرایط واقعی، مدل به صورت چند دوره‌ای و نرخ فساد محصولات غذایی به صورت غیرقطعی در نظر گرفته شده است. این امر امکان لحاظ نمودن برخی پویایی‌ها را از طریق تغییر برخی پارامترها در طول زمان فراهم می‌کند. در این مدل هدف تعیین مکان تسهیلات مراکز توزیع محصولات غذایی و مراکز تولید کود و جریان‌های بین تسهیلات می‌باشد.



شکل ۲ ساختار شبکه زنجیره تأمین مورد بررسی



شکل ۳ لزوم داشتن بخش بازرسی در مراکز تولید و بازرسی

## ۲-۱- مفروضات مدل

مکان‌های بالقوه برای احداث مراکز توزیع مشخص می‌باشند. مکان‌های بالقوه برای احداث مراکز تولید کود آلی مشخص می‌باشند. محصولات غذایی فاسد شده و پسماند آن‌ها قابل تبدیل شدن به کود آلی هستند. در مرکز تولید و مرکز توزیع بازرسی وجود دارد و از ارسال محصولات ضایع شده یا فاسد شده به لایه بعدی جلوگیری می‌شود.

## ۲-۲- تصمیمات مدل

مکان‌های تأسیس مراکز توزیع، مکان‌های تأسیس مراکز تولید کود، مقدار محصولات حمل شده از تولیدکنندگان به توزیع‌کنندگان، مقدار محصولات حمل شده به‌طور مستقیم از تولیدکنندگان به مشتریان، مقدار محصولات حمل شده از مراکز توزیع به مشتریان، مقدار محصولات نگهداری شده توسط مراکز توزیع، مقدار محصولات مرجوعی فسادپذیر از تولیدکنندگان به مراکز تولید کود، مقدار محصولات مرجوعی فسادپذیر از توزیع‌کنندگان به مراکز تولید کود، مقدار محصولات مرجوعی فسادپذیر از مشتریان به مراکز تولید کود، مقدار کود آلی تولیدشده و ارسال شده توسط مراکز تولید کود به مراکز فروش کود.

## ۲-۳- مجموعه‌ها

محل تولیدکننده مواد غذایی (بازرسی محصولات فاسد شده یا غیرقابل استفاده)	$f = 1, 2, \dots, F$
محل توزیع‌کننده (بازرسی محصولات فاسد شده یا غیرقابل استفاده)	$d = 1, 2, \dots, D$
محل مشتری محصولات غذایی	$k = 1, 2, \dots, K$
محل تولید کود آلی	$l = 1, 2, \dots, L$
دوره‌های زمان	$t = 1, 2, \dots, T$
مغازه‌های کود فروشی به کشاورزان	$r = 1, 2, \dots, R$
پارامترهای هدف اقتصادی	
هزینه ثابت تأسیس مرکز تولید کود $l$	$F l_l$
هزینه ثابت تأسیس مرکز توزیع $d$	$F d_d$
هزینه حمل‌ونقل هر واحد از کالا از تولیدکننده $f$ تا مشتری $k$	$F s_{fk}$
هزینه حمل‌ونقل هر واحد از کالا از تولیدکننده $f$ تا مرکز توزیع $d$	$F x_{fd}$
هزینه حمل‌ونقل هر واحد از کالا از توزیع‌کننده $d$ تا مشتری $k$	$F u_{dk}$
هزینه حمل‌ونقل برگشت هر واحد از کالا از مشتری $k$ تا مرکز تولید کود $l$	$F e_{kl}$
هزینه حمل‌ونقل برگشت هر واحد از کالا از تولیدکننده $f$ تا مرکز تولید کود $l$	$F v_{fl}$
هزینه حمل‌ونقل برگشت هر واحد از کالا از توزیع‌کننده $d$ تا مرکز تولید کود $l$	$F q_{dl}$
هزینه حمل‌ونقل هر واحد از کالا از مرکز تولید کود $l$ تا مغازه کود فروشی $r$	$F f_{lr}$
هزینه انبارداری به ازای هر واحد موجودی از مرکز توزیع در زمان $t$	$F h_t$
هزینه تولید کود به ازای هر محصول از مرکز تولید کود در واحد زمان $t$	$F r_t$
هزینه پردازش و بسته‌بندی به ازای هر محصول از مراکز توزیع در زمان $t$	$F p_t$
تقاضای محصولات غذایی توسط مشتری $k$ در زمان $t$	$d_{kt}$
تقاضای محصول پردازش یافته (کود) توسط مغازه فروش کود $r$ در زمان $t$	$d r'_{rt}$
هزینه تولید کود به ازای هر محصول از تولیدکننده	$F p^i$
ظرفیت انبارداری مرکز توزیع $d$ در زمان $t$	$Ch_{dt}$
ظرفیت بیشینه تولیدکننده $f$ در زمان $t$	$max c_{ft}$
ظرفیت تولید کود مرکز تولید کود $l$ در زمان $t$	$Cr_l$
درصد محصولات فاسد شده یا ضایع شده توسط بازرسی (عمل بازرسی در مرکز تولید) توسط تولیدکننده در زمان $t$	$\alpha_t$
درصد محصولات فاسد شده یا ضایع شده توسط بازرسی در مرکز توزیع (عمل بازرسی در مرکز توزیع) در زمان $t$	$\beta_t$

ضریب اسمی اتلاف محصول توسط مشتری در زمان $t$	$\theta_t$
ضریب انحرافی اتلاف محصول توسط تولیدکننده در زمان $t$	$\rho\alpha_t$
ضریب انحرافی اتلاف محصول توسط مرکز توزیع در زمان $t$	$\rho\beta_t$
ضریب انحرافی اتلاف محصول توسط مشتری در زمان $t$	$\rho\theta_t$
پارامتر پوشش‌دهنده عدم قطعیت	$\psi$
یک عدد مثبت به‌اندازه کافی بزرگ	$M$
ضریب تبدیل ضایعات محصولات غذایی به محصول باز پردازش‌شده (کود)	$\Phi$
ضریب پاسخ‌گویی حلقه مستقیم	$\rho$
ضریب پاسخ‌گویی حلقه معکوس	$1 - \rho$
درصد ارضای تقاضا	$\eta$
پارامترهای هدف زیست‌محیطی	
مقدار کربن تولیدشده توسط تولیدکننده محصولات غذایی $f^1$ در زمان $t$	$Ce_{ft}^{emf}$
انتشار کربن ناشی از حمل محصولات غذایی از تولیدکننده محصولات غذایی $f$ به مراکز توزیع $d$ در زمان $t$	$Ce_{fdt}^{pd}$
انتشار کربن ناشی از حمل محصولات کشاورزی از توزیع‌کننده $d$ به مراکز فروش محصولات غذایی $k$ در زمان $t$	$Ce_{fdt}^{dc}$
انتشار کربن ناشی از حمل محصولات غذایی از محل تولیدکننده $f$ به محل فروش محصولات غذایی $k$ در زمان $t$	$Ce_{fkt}^{pc}$
انتشار کربن ناشی از حمل ضایعات محصولات غذایی از محل فروش محصولات غذایی $k$ به محل تولید کود $l$ در زمان $t$	$Ce_{kl}^{tcc}$
انتشار کربن ناشی از حمل ضایعات محصولات غذایی از توزیع‌کننده $d$ به محل تولید کود $l$ در زمان $t$	$Ce_{dl}^{tdc}$
انتشار کربن ناشی از حمل ضایعات محصولات غذایی از محل تولیدکننده $f$ به محل کود فروشی $l$ در زمان $t$	$Ce_{lo}^{tpc}$
انتشار کربن ناشی از حمل کود از محل تولید کود $l$ به مراکز فروش کود $r$ در زمان $t$	$Ce_{lrt}^{c}$
مقدار کربن تولیدشده توسط تولیدکننده کود $l^2$ که به مراکز کود فروشی $r$ فرستاده می‌شوند در زمان $t$	$Ce_{lr}^{emf}$
پارامترهای هدف اجتماعی	
تعداد شغل‌های ایجادشده بر اساس هر مرکز توزیع در منطقه $d$	$jo_d$
تعداد شغل‌های ایجادشده بر اساس هر مرکز تولید کود در منطقه $l$	$jo_l$
نرخ بیکاری در منطقه $d$	$ur_d$
نرخ بیکاری در منطقه $l$	$ur_l$
میزان افزایش ارزش اقتصادی منطقه به ازای احداث مرکز توزیع در منطقه $d$	$Ev_d$
میزان افزایش ارزش اقتصادی منطقه به ازای احداث مرکز تولید کود در منطقه $l$	$Ev_l$
سطح توسعه اقتصادی در منطقه $d$	$rd_d$
سطح توسعه اقتصادی در منطقه $l$	$rd_l$
ضریب اهمیت اشتغال‌زایی	$w_{em}$
ضریب اهمیت توسعه اقتصادی	$w_{ec}$
متغیرهای تصمیم پیوسته و مثبت	
مقدار محصول غذایی حمل شده از تولیدکننده $f$ به توزیع‌کننده $d$ در زمان $t$	$B_{fdt}$
مقدار محصول غذایی حمل شده از تولیدکننده $f$ به مشتری $k$ در زمان $t$	$\omega_{fkt}$
مقدار محصول غذایی حمل شده از مرکز توزیع $d$ به مشتری $k$ در زمان $t$	$\chi_{akt}$
مقدار محصول غذایی بازگشت داده‌شده از مشتری $k$ به مرکز تولید کود $l$ در زمان $t$	$E_{klt}$
مقدار محصول غذایی بازگشت داده‌شده (از طریق بازرسی در مرکز توزیع) از مرکز توزیع $d$ به مرکز تولید کود $l$ در زمان $t$	$\phi_{alt}$

<sup>1</sup> embrdfed carbrn frirt prfnt

<sup>2</sup> embrdfed carbrn frirt prfnt

زمان t	
مقدار محصول غذایی بازگشت داده شده از تولیدکننده f به مرکز تولید کود l در زمان t (عمل بازرسی در مرکز تولید)	$V_{flt}$
مقدار محصول غذایی پردازش شده از مرکز تولید کود l به مغازه کود فروشی r در زمان t	$F_{lrt}$
مقدار محصول غذایی پردازش شده نگهداری شده توسط مرکز توزیع d در زمان t	$Inv_{dt}$
مقدار تولید توسط تولیدکننده f در زمان t	$pr_{ft}$
اگر مرکز توزیع احداث شود ۱ در غیر اینصورت ۰	$Z_d$
اگر مرکز تولید کود احداث شود ۱ در غیر اینصورت ۰	$x_l$

• تابع هدف اقتصادی

$$\min of_1 = \text{fixed cost} + \text{transportation cost} + \text{inventory cost} + \text{production cost} \quad (1)$$

$$\text{fixed cost} = \sum_d Fd_d \cdot Z_d + \sum_l Fl_l \cdot x_l \quad (2)$$

$$\text{transportation cost} = \sum_f \sum_d \sum_t Fx_{fd} \cdot B_{fdt} + \sum_k \sum_d \sum_t Fu_{dk} \cdot \kappa_{dkt} + \sum_k \sum_f \sum_t Fs_{fk} \cdot \omega_{fkt} \quad (3)$$

$$+ \sum_l \sum_f \sum_t Fv_{fl} \cdot V_{flt} + \sum_d \sum_l \sum_t Fq_{dl} \cdot \varphi_{dlt} + \sum_k \sum_l \sum_t Fe_{kl} \cdot E_{klt} + \sum_r \sum_l \sum_t Ff_{lr} \cdot F_{lrt}$$

$$\text{inventory cost} = \sum_d \sum_t Ih_{dt} \cdot Fh_t \quad (4)$$

$$\text{production cost} = \sum_f \sum_d \sum_t Fp_t \cdot B_{fdt} + \sum_r \sum_l \sum_t Fr_t \cdot F_{lrt} + \sum_f \sum_t pr_{ft} \cdot Fp' \quad (5)$$

تابع هدف شماره (۱) هزینه‌های کل را کمینه می‌کند که خود شامل هزینه‌های ثابت (۲) و هزینه‌های حمل‌ونقل (۳) می‌باشد، هزینه نگهداری مراکز توزیع (۴)، هزینه تولید برای تولیدکنندگان، هزینه پردازش مراکز توزیع و هزینه باز پردازش مراکز تهیه کود (۵) می‌باشد

• تابع هدف زیست‌محیطی

$$\begin{aligned} \min of_2 = & \sum_f \sum_t Ce_{ft}^{emf} \cdot pr_{ft} + \sum_f \sum_d \sum_t Ce_{fdt}^{pd} \cdot B_{fdt} + \sum_k \sum_d \sum_t Ce_{dkt}^{dc} \cdot \kappa_{dkt} \\ & + \sum_k \sum_f \sum_t Ce_{fkt}^{pc} \cdot \omega_{fkt} + \sum_k \sum_l \sum_t Ce_{klt}^{cc'} \cdot E_{klt} + \sum_d \sum_l \sum_t Ce_{dlt}^{dc'} \cdot \varphi_{dlt} \\ & + \sum_f \sum_l \sum_t Ce_{flt}^{pc} \cdot V_{flt} + \sum_l \sum_r \sum_t Ce_{lrt}^{pc'} \cdot F_{lrt} \end{aligned} \quad (6)$$

تابع هدف (۶) شامل حداقل کردن انتشار گاز  $CO_2$  ناشی از حمل‌ونقل مواد غذایی و ضایعات آن‌ها بین تسهیلات و همچنین

گاز CO<sub>2</sub> ناشی از روند تولید محصولات غذایی فاسد شده و پسماند و کود آلی<sup>۳</sup> می باشد

• تابع هدف مسئولیت اجتماعی

$$s_1 = \sum_d jo_d \cdot ur_d \cdot z_d + \sum_l jo_l \cdot ur_l \cdot x_l \quad (۷)$$

$$s_2 = \sum_d Ev_d \cdot (1 - rd_d) \cdot z_d + \sum_l Ev_l \cdot (1 - rd_l) \cdot x_l \quad (۸)$$

$$Max\ of_3 = W_{em} \cdot s_1 + W_{ed} \cdot s_2 \quad (۹)$$

تابع هدف (۹) به دنبال برقراری عدالت اجتماعی است. در این مدل فرصت‌های شغلی ناشی از احداث مراکز توزیع و مراکز تولید کود را در نظر گرفته‌ایم. ارزش اجتماعی با استفاده از تعداد فرصت‌های شغلی خلق شده و نرخ بیکاری آن منطقه محاسبه می‌شود و در این راستا ایجاد فرصت‌های شغلی در یک منطقه با نرخ بیکاری بالاتر به ارزش اجتماعی بیشتر منجر می‌شود. نرخ توسعه منطقه‌ای و ارزش اقتصادی مرکز توزیع و مرکز تولید کود تأسیس شده برای ارزیابی ارزش اجتماعی مدنظر است. از این رو ارزش اجتماعی بیشتر برای وضعیتی است که به مناطقی که از توسعه اقتصادی کمتری برخوردارند بیشتر اهمیت داده می‌شود. [۳۶]

از این رو معیار توسعه اقتصادی (۷) و معیار اشتغال‌زایی (۸) به صورت بالا گسترش داده شده‌اند و با توجه به اینکه هر دو اقدام ماهیت اجتماعی دارند و هم اینکه جهت جلوگیری از پیچیدگی بیشتر مدل پیشنهادی، می‌توانیم هر دو اقدام را به صورت یک تابع هدف به کار می‌رود.

$$pr_{ft} \times (1 - \alpha_t) \geq \sum_d B_{fdt} + \sum_k \omega_{fkt} \quad \forall f \in F, \forall t \in T \quad (۱۰)$$

$$Z_d = \begin{cases} 1, & \sum_{f=1}^F \sum_{t=1}^T B_{fdt} > 0 \\ 0, & otherwise \end{cases} \quad \forall d \in D \quad (۱۱)$$

$$pr_{ft} \leq maxc_{ft} \quad \forall f \in F, \forall t \in T \quad (۱۲)$$

$$Inv_{d(t-1)} + \sum_{f=1}^F B_{fdt} = Inv_{dt} + \sum_{k=1}^K \kappa_{dkt} + \sum_{l=1}^L \phi_{dlt} \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (۱۳)$$

$$Inv_{dt} \leq Ch_d \quad \forall d \in D, \forall t \in T \quad (۱۴)$$

$$\sum_{d=1}^D \kappa_{dkt} + \sum_{f=1}^F \omega_{fkt} \leq d_{kt} \quad \forall k \in K, \forall t \in T \quad (۱۵)$$

$$\sum_{l=1}^L V_{flt} \leq \alpha_t \times pr_{ft} \quad \forall f \in F, \forall t \in T \quad (۱۶)$$

<sup>3</sup> embdfed carbrn frirt prfnt

$$x_l = \begin{cases} 1, & \sum_{t=1}^T \sum_{f=1}^F V_{flt} > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall l \in L \quad (17)$$

$$\sum_{l=1}^L \phi_{alt} \leq \beta_t \times Inv_{d(t-1)} \quad \forall d, t \quad (18)$$

$$x_l = \begin{cases} 1, & \sum_{t=1}^T \sum_{d=1}^D \phi_{alt} > 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall l \quad (19)$$

$$\sum_{l=1}^L E_{klt} \leq \theta_t \times d_{kt} \quad \forall k, t \quad (20)$$

$$x_l = \begin{cases} 1, & \sum_{t=1}^T \sum_{k=1}^K E_{klt} > 0 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad \forall l \quad (21)$$

$$(\sum_{f=1}^F V_{flt} + \sum_{d=1}^D \phi_{alt} + \sum_{k=1}^K E_{klt}) \times \varphi = \sum_{r=1}^R F_{lot} \quad \forall l \in L, \forall t \in T \quad (22)$$

$$\sum_{r=1}^R F_{lrt} \leq Cr_l \quad \forall l, t \quad (23)$$

$$\sum_{l=1}^L F_{lrt} \leq d'_{rt} \quad \forall r, t \quad (24)$$

$$\rho \times \left( \sum_{f=1}^F \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \omega_{fkt} + \sum_{d=1}^D \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T \alpha_{akt} \right) / \left( \sum_{k=1}^K \sum_{t=1}^T d_{kt} \right) + (1 - \rho) \times \left( \sum_{l=1}^L \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T F_{lrt} \right) / \left( \sum_{r=1}^R \sum_{t=1}^T d'_{rt} \right) \geq \eta \quad (25)$$

$$x_l, z_d \in \{0,1\} \quad \forall d \in D, \forall l \in L \quad (26)$$

$$B_{fat}, \omega_{ikt}, \alpha_{akt}, V_{flt}, \phi_{alt}, E_{klt}, F_{lrt} \geq 0 \quad \forall r \in R, \forall f \in F, \forall d \in D, \forall k \in K, \forall t \in T, \forall l \in L \quad (27)$$

$$Inv_{dt} \geq 0, pr_{ft} \geq 0 \quad \forall f \in F, \forall d \in D, \forall t \in T \quad (28)$$

رابطه (۱۰) تضمین می‌کند که مقدار محصول تولیدشده منهای مقدار تلف‌شده بزرگتر است از مقداری که از تولیدکننده به مراکز توزیع و مشتریان حمل می‌شود، یعنی مقداری از تولیدات تولیدکننده برای مصرف خودش انبار می‌شود. رابطه (۱۱) مربوط به رابطه (۱۰) می‌شود یعنی تولیدات به مراکز توزیع فرستاده می‌شوند اگر و تنها اگر مراکز توزیع در محل موردنظر تأسیس شود. محدودیت (۱۲) تضمین می‌کند که مقدار مواد غذایی تولیدکننده کمتر یا مساوی مقدار حداکثر ظرفیت تولیدکننده است. محدودیت (۱۳) تضمین می‌کند که میزان موجودی مرکز توزیع در هر دوره برابر با مقدار دوره قبلی به‌علاوه محصولات دریافتی از تولیدکنندگان منهای مقدار محصولات حمل شده به مشتریان و مراکز تهیه کود است. محدودیت (۱۴) نشان می‌دهد که مقدار موجودی مرکز توزیع کمتر یا مساوی حداکثر ظرفیت آن است. اینکه تقاضای مشتری در هر دوره

بزرگ‌تر یا مساوی مقدار مواد غذایی دریافتی از تولیدکننده و مرکز توزیع است، توسط محدودیت (۱۵) مشخص می‌شود. محدودیت (۱۶) نشان می‌دهد که مقدار مواد غذایی برگشتی از تولیدکننده به مراکز تهیه کود در هر دوره کمتر یا مساوی مقدار اتلاف که توسط بازرسی مشخص شده در آن دوره می‌باشد. محدودیت (۱۷) نشان‌دهنده این است که مواد غذایی برگشتی از تولیدکننده به مراکز تهیه کود فرستاده شوند اگر و تنها اگر مرکز تهیه کود در مکان موردنظر تأسیس شود. محدودیت (۱۸) نشان می‌دهد که مقدار مواد غذایی برگشتی تحت نظر بازرسی از توزیع‌کننده به مراکز تهیه کود در هر دوره کمتر یا مساوی مقدار اتلافی در دوره قبلی می‌باشد. محدودیت (۱۹) نشان می‌دهد که مواد غذایی برگشتی از توزیع‌کننده به مراکز تهیه کود فرستاده شوند اگر و تنها اگر مرکز تهیه کود در مکان موردنظر تأسیس شود. محدودیت (۲۰) نشان می‌دهد که مقدار پسماند مواد غذایی برگشتی از مشتریان یا مغازه‌ها (مصرف‌کننده محصولات غذایی) به مراکز تهیه کود در هر دوره کمتر یا مساوی تقاضای آن دوره می‌باشد. محدودیت (۲۱) نشان می‌دهد که پسماند مواد غذایی برگشتی از مشتری به مراکز تهیه کود فرستاده شوند اگر و تنها اگر مرکز تهیه کود در مکان موردنظر تأسیس شود. محدودیت (۲۲) تضمین می‌کند که مواد غذایی برگشتی تحویلی از تولیدکننده، مرکز توزیع و مشتریان که توسط نرخ تبدیل چند برابر می‌شوند برابر است با کل محصول باز پردازش شده که به مراکز فروش کود تحویل داده می‌شود. محدودیت (۲۳) و (۲۴) نشان می‌دهد که مقدار کود حمل شده به مراکز فروش در هر دوره کمتر یا مساوی ظرفیت تولید و تقاضای هر مرکز فروش می‌باشد. محدودیت (۲۵) حداقل ارضای تقاضا در هر دو زنجیره مستقیم و معکوس را نمایش می‌دهد. نهایتاً محدودیت‌های صفر و یکی و غیر منفی در تصمیم‌گیری توسط روابط (۲۶)، (۲۷) و (۲۸) مشخص می‌شوند.

### ۳- روش حل

در روش اپسیلون محدودیت با تغییر مقادیر  $\varepsilon_i$  جواب‌های مختلفی به دست می‌آید که یا کارا هستند و یا حداقل کارای ضعیف می‌باشند. با تقویت روش محدودیت اپسیلون کلاسیک، می‌توان همواره جواب کارا به دست آورد، این روش به روش اپسیلون محدودیت تکامل یافته (AEC) معروف است. در روش AEC ابتدا باید بازه مناسب تغییر  $\varepsilon_i$ ها مشخص شود و سپس به ازای مقادیر مختلف  $\varepsilon_i$ ها جبهه پارتو را به دست آورد. برای حل مدل پژوهش و رسم پارتو و نمایش تضاد بین اهداف از معادلات (۲۹) استفاده می‌شود با توجه به اینکه هدف سوم پیشینه‌سازی است در یک منفی ضرب می‌شود [۳۸].

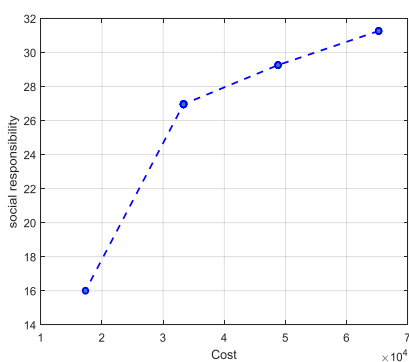
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min} f_1(y) - \sum_{i=2}^n r_i \delta_i \\ f_i(y) + \delta_i = \varepsilon_i \quad i = 2, 3, \dots, n \\ y \in Y \\ \delta_i \geq 0 \end{array} \right. \quad (29)$$

### ۴- ارزیابی مدل در ابعاد کوچک

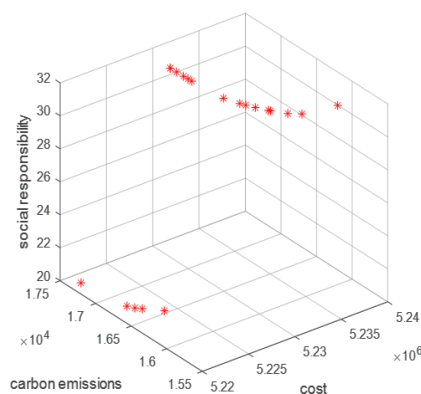
در این بخش به منظور ارزیابی مدل ریاضی پیشنهادی در ابعاد کوچک، مدل مذکور برای حل یک مثال عددی به کار گرفته شده است. مسئله موردنظر شامل ۳ تولیدکننده محصولات غذایی ( $F=3$ )، ۴ مرکز توزیع ( $d=4$ )، ۲ مصرف‌کننده محصولات غذایی ( $K=2$ )، ۲ مرکز تولید کود ( $L=2$ ) و ۲ مرکز فروش کود ( $r=2$ ) در ۸ دوره زمانی ( $T=8$ ) در نظر گرفته شده است. اطلاعات لازم برای تولید مقادیر پارامترها بر اساس جدول ۵ (دیتاهای بخش مطالعه موردی) می‌باشد. مثال مذکور توسط نرم‌افزار گمز با استفاده از روش اپسیلون کانسترینت تکامل یافته<sup>۴</sup> (AEC) حل شده است. جواب حاصل از یکی از نقاط پارتو به در جدول ۲ ارائه شده است.  $of1, of3, of2$  به ترتیب توابع هدف اقتصادی، زیست‌محیطی و اجتماعی هستند. با استفاده از خروجی حاصل از روش‌های مورد استفاده در این پژوهش، جبهه پارتو حاصل شده با استفاده از روش محدودیت اپسیلون

<sup>4</sup> Augmented  $\varepsilon$ -constraint (AEC)

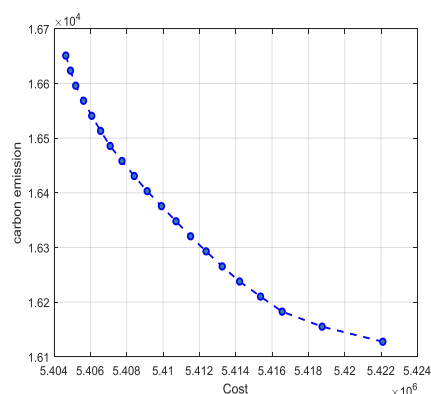
تکامل یافته نمایش داده می‌شود. شکل ۵ جواب‌های پارتو حاصل از روش AEC را با در نظر گرفتن تمام ابعاد تصمیم‌گیری یعنی هدف‌های اقتصادی، زیست‌محیطی و مسئولیت اجتماعی نمایش می‌دهد. با توجه به شکل ۴ تضاد بین تابع هدف اقتصادی (cost) و تابع هدف زیست‌محیطی (carbon emission) کاملاً مشهود است که اگر در سطوح تصمیم‌گیری تمرکز بیشتری برای کاهش آلودگی باشد می‌بایست هزینه بیشتری کنیم. بنابراین هرچه قدر هدف ما این باشد که آلاینده‌گی زیست‌محیطی کاهش یابد می‌بایست هزینه بیشتری کنیم که تابع هدف زیست‌محیطی کاهش یابد و برعکس. با توجه به شکل ۶ و اینکه تابع هدف سوم (social responsibility) مسئولیت اجتماعی را دنبال می‌کند.



شکل ۶ ارتباط بین توابع هدف اقتصادی و مسئولیت اجتماعی



شکل ۵ نمایش جبهه پارتو توسط روش AEC



شکل ۴ ارتباط توابع هدف اقتصادی و زیست‌محیطی

برای اینکه تابع هدف سوم افزایش یابد و ما به خواسته خود یعنی ایجاد فرصت شغلی بیشتر و توسعه منطقه‌ای برسیم که هرچه بیشتر باشد بهتر است، و از طرفی رسیدن به این خواسته مهم وابسته به این است که مرکز توزیع و مرکز تولید کود بیشتری احداث کنیم و این نیاز به سرمایه بالایی دارد که تابع هدف اقتصادی به دنبال کاهش هزینه‌هاست و با افزایش تابع هدف مسئولیت اجتماعی هزینه نیز افزایش می‌یابد که کنترل هزینه‌ها با تابع هدف اقتصادی می‌باشد.

## ۵- مطالعه موردی

در ایران به‌طور سالانه ۳۵ میلیون تن دورریز مواد غذایی وجود دارد و هدر رفت مواد غذایی در شهرهای بزرگ ایران بیش از دو برابر میانگین جهانی است از این پسماند مواد غذایی می‌توان کود آلی تولید کرد و از هدر رفت آن جلوگیری کرد. با توجه به موارد گفته‌شده ضرورت پژوهش مشخص می‌شود و به این منظور مدل ریاضی این پژوهش طراحی شد در این بخش برای نشان دادن کارایی مدل ریاضی پیشنهادی، برای کاربردهای واقعی، صنایع غذایی تبرک در ایران مورد بررسی قرار می‌گیرد. گروه کارخانجات صنعتی تبرک در سال ۱۳۷۷ فعالیت خود را در حوزه صنایع غذایی در شهر مشهد شروع کردند. در حال حاضر محصولات غذایی را به‌صورت کنسرو با داشتن ۱۴۳۶ پرسنل، چندین واحد اقتصادی و ۱۰۰۰۰ کشاورز ماهر تولید می‌کنند. این واحد سهم بزرگی در تولید مواد غذایی در کشور ایران دارد. برای طراحی این مثال واقعی کارخانه تبرک در شهرهای مشهد، تهران، تبریز و کرمانشاه مدنظر است. برای هرکدام از مراکز تولید ۵ مرکز توزیع (جمعاً ۲۰ مرکز توزیع) مدنظر است، ۱۰۰ محل مشتری (مشتری ۱ تا ۲۵ مشهد، ۲۶ تا ۵۰ تهران، ۵۱ تا ۷۵ تبریز و ۷۶ تا ۱۰۰ کرمانشاه)، ۶ دوره زمانی، به ازای هر کارخانه تولیدی یک مرکز تولید کود آلی و ۸ مغازه فروش کود به کشاورزان خود مجموعه موردنظر می‌باشد. اطلاعات لازم برای حل مسئله به‌صورت زیر است. لازم به ذکر است که واحد هزینه‌ها دلار است و واحد تقاضا برای مواد غذایی هزار و برای کود کیلوگرم می‌باشد با توجه به اینکه ارسال از مشهد برای مشتری در کرمانشاه معقول نمی‌باشد، لذا هزینه ارسال و انتشار آلاینده‌گی این مسیرها یک عدد بسیار بزرگ می‌باشد که مدل از این چنین ارسال‌هایی جلوگیری کند.

جدول ۲ دیتاهای موردنظر برای حل مسئله

$Fl_t$	Uniform[114290,185715]	$dr'_{rt}$	Uniform[5,20]
$Fd_d$	Uniform[14285,22855]	$\alpha_t$	Uniform[0.01,0.5]
$FS_{fk}$	Uniform[50,80]	$\beta_t$	Uniform[0.01,0.5]
$Fx_{fd}$	Uniform[30,90]	$\theta_t$	Uniform[0.01,0.5]
$Fu_{dk}$	Uniform[20,80]	$\Phi$	1.1
$Fe_{kl}$	Uniform[20,45]	$\rho$	0.6
$Fv_{fl}$	Uniform[20,45]	$1 - \rho$	0.4
$Fq_{dl}$	Uniform[20,45]	$\eta$	0.72
$Ff_{tr}$	Uniform[50,80]	$Fr_t$	Uniform[80,120]
$Fh_t$	Uniform[50,70]	$Fp_t$	Uniform[50,100]
Environmental parameters	Uniform[18,30]	$d_{kt}$	Uniform[3,10]
Social parameters	Uniform[0.2,0.7]	Create job	Uniformint [60,80]

پس از حل مطالعه موردی، نتایج در جدول ۳ تا ۷، که در جدول ۳ مقادیر تابع هدف‌های اقتصادی به تفکیک (هزینه‌های ثابت، حمل‌ونقل، موجودی و تولید) از جدول ۳ تا ۷ نحوه ارسال محصولات غذایی توسط هریک از کارخانه‌ها در هر شهر ارائه می‌شود.

جدول ۳ مقادیر توابع هدف به تفکیک

Economical	36959097.32
Environmental impact	48109.227
Social responsibility	6.301
fixcost	128169
transportationcost	409172.651
inventorycost	0
produtioncost	45661530.00

هزینه اقتصادی ۳۶۹۵۹۰۹۷.۳۲ دلار، بخش هزینه‌های ثابت ۱۲۸۱۶۹ دلار، هزینه‌های حمل‌ونقل ۴۰۹۱۷۲.۶۵ دلار و هزینه موجودی ۰ و در نهایت هزینه‌های تولید ۴۵۶۶۱۵۳۰ دلار حاصل شده است و دو بخش دیگر پایداری یعنی مقدار تابع هدف زیست‌محیطی و اجتماعی به ترتیب برابر ۴۸۱۰۹.۲۲۷ (kgCO<sub>2</sub>/km) و ۶.۳۰۱ می‌باشد. مقدار محصول حمل‌شده از تولیدکننده‌ها به مراکز توزیع (ضرایب محصولات ارسالی ۱۰۰۰ است) یکی از راه‌های انتقال محصول به مشتریان توسط مراکز توزیع است که خروجی این مثال به این صورت است که به‌عنوان مثال تولیدکننده در تبریز مواد غذایی را به مرکز توزیع ۲ که در تبریز احداث شده است منتقل کرده است.

جدول ۴ مقدار محصول حمل شده از تولیدکننده‌ها به مراکز توزیع

	t1	t2	t3	t4	t5	t6
$B_{fat}$						
mashad .mad2	80	103	112	54	100	58
tehran .ted1	86	117	90	60	120	64
tabriz .tad2	109	120	81	74	102	88
kermanshah .ked3	95	120	83	79	116	108

مقدار محصول حمل شده از تولیدکننده‌ها به مشتریان (ضرایب محصولات ارسالی ۱۰۰۰ است) در این بخش به دلیل اینکه چابکی مدل بالا باشد و مواد غذایی سریع‌تر و بدون واسطه به مشتریان برسد، ارسال مستقیم را داریم. به‌عنوان مثال مشتری شماره ۴ و ۱۹ در مشهد به ترتیب در دوره‌های ۴ و ۶ برای مشتری ۴ و ۱، ۴ و ۷ برای مشتری ۱۹ ارسال مستقیم داشتیم.

جدول ۵ مقدار محصول حمل شده از تولیدکننده‌ها به مشتریان

		t1	t2	t4	t5	t6
$\omega_{fkt}$						
mashad	k4			3		9
mashad	k19	8		3		7
tehran	k26				2	9
tehran	k42	5		1	4	4
tabriz	k62		3			
kermanshah	k88		2			

مقدار تولید توسط تولیدکننده  $f$  در زمان  $t$  (ضریب تولیدات ۱۰۰۰ می‌باشد) در جدول ۶ ارائه شده است به‌عنوان مثال مقدار تولید در کرمانشاه در دوره اول ۱۱۲۰۰۰ و در دوره ۶ ام ۱۴۴۰۰۰ می‌باشد که بیشترین مقدار تولید در تمامی ادوار بوده است.

جدول ۶ مقدار تولید توسط تولیدکننده

	t1	t2	t3	t4	t5	t6
$pr_{ft}$						
mashad	104	117	136	105	104	100
tehran	107	132	110	106	131	103
tabriz	128	139	99	129	106	118
kermanshah	112	138	101	138	121	144

مقدار محصول غذایی پردازش شده از مرکز تولید کود  $l$  به مغازه کود فروشی  $r$  در زمان  $t$  (ضرایب محصول پردازش شده ۱۰۰۰ است) به‌صورت جدول ۷ می‌باشد به‌عنوان مثال از مرکز تولید کود مشهد  $maco$  و از مغازه کود فروشی  $mao1$  در مشهد در دوره  $t5$  ۶.۴۰۸ کیلوگرم کود به کشاورزان ارسال شده است.

جدول ۷ مقدار محصول غذایی پردازش شده

	t1	t2	t3	t4	t5	t6
$F_{lrt}$						
maco.mao1	9	6	9	13	6.408	9
maco.mao2	9	19	12	11	17	17
teco.teo1	14	18	18	7	7	8
teco.teo2	6	7.595	12	16	11	19
taco.tao1	16	15	20	9	17	10
taco.tao2	9	8.328	12.415	12	5.859	13.849
keco.keo1	10	15	7	7	9	6
keco.keo2	13.78	11.541	9	5	9	17

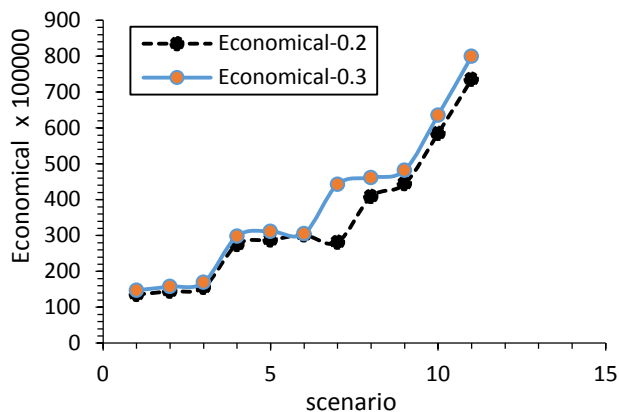
مجموع تقاضا برای کنسروهای غذا برای ۴ تولیدکننده مشهد، تهران، تبریز و کرمانشاه ۳۹۸۱۰۰۰ واحد است که ۶۰۰۰۰ واحد آن به‌صورت مستقیم  $\omega_{fkt}$ ، ۲۲۱۹۰۰۰ از طریق کانال‌های توزیع  $B_{fkt}$ ، ارضا شده است. مجموع تقاضای کشاورزان برای کود ۵۸۳۰۰۰ می‌باشد که ۵۴۸۰۰۰.۷۷۶ کیلوگرم برای کشاورزان ارسال شده است. مقدار مواد غذایی که به‌صورت پسماند از مشتری جمع‌آوری شده است  $E_{kit}$  برابر با ۲۳۵۱.۶۹۶ کیلوگرم و مقدار مواد غذایی ضایع شده در مراکز تولید به مرکز تولید کود منتقل شده است  $V_{flt}$  برابر ۳۹۲.۱۸۲ کیلوگرم می‌باشد و در نهایت در مراکز توزیع  $G_{dt}$  مقدار ۳۱۵ واحد به مراکز تولید کود منتقل شده است. برای تحلیل حساسیت پارامترهای مهم این پژوهش تحت ۲۲ سناریو مطابق جدول ۸ طراحی و توسط مدل ریاضی اجرا شد برای تحلیل نتایج و بررسی مدل در این شرایط پارامترهای تقاضای محصولات غذایی توسط مشتری  $d_{kt}$ ، تقاضای محصول پردازش یافته (کود)  $dt'_{rt}$ ، نرخ محصولات فاسد شده یا ضایع شده توسط بازرسی (عمل بازرسی در مرکز تولید و

توزیع  $\alpha_t, \beta_t$ ، نرخ پسماند مواد غذایی توسط مشتری  $\theta_t$ ، و درنهایت جهت بررسی رضایت مشتری درصد ارضای تقاضا  $\eta$  مورد بررسی قرار می‌گیرد.

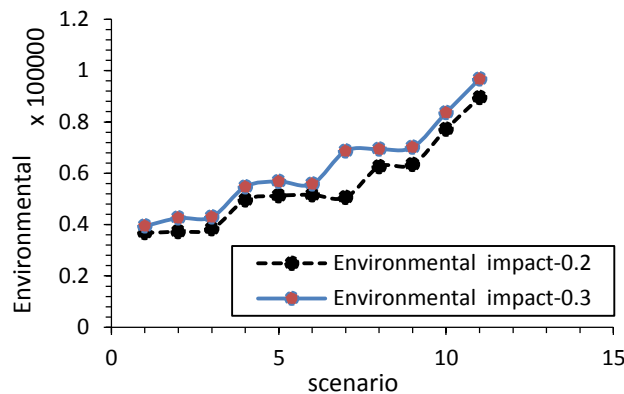
جدول ۸ سناریوهای طراحی شده برای تحلیل حساسیت

	$d_{kt}$	$dr'_{rt}$	$\alpha_t$	$\beta_t$	$\theta_t$	$\eta$
	[3-10]	[5-20]	[0.01-0.5]	[0.01--0.5]	[0.01--0.5]	0.5
1	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.5
2	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.5
3	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.5
4	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.6
5	0.2	0.2	0.1	0.1	0.1	0.6
6	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.6
7	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.7
8	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.7
9	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.7
10	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.8
11	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.9
12	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.5
13	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.5
14	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.5
15	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.6
16	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.6
17	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.6
18	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.7
19	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.7
20	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.7
21	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.8
22	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2	0.9

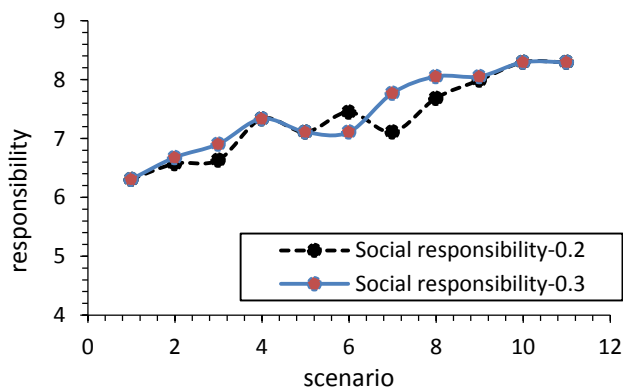
مقایسه مقدار تابع هدف اقتصادی در حالت افزایش تقاضا ۲۰ و ۳۰ درصدی برای محصولات و کود برای کشاورزان نشان می‌دهد که در حالتی که تقاضا ۳۰ درصد افزایش دارد مقدار تابع هدف اقتصادی، زیست‌محیطی و مسئولیت اجتماعی به مقدار بیشتری افزایش می‌یابد. این موضوع مسلم است چراکه هنگامی که تقاضا افزایش یابد هزینه‌های ثابت (به دلیل افزایش تقاضا می‌بایست تسهیلات بیشتری احداث شود)، هزینه‌های تولید (تعداد محصولات بیشتری باید تولید شود)، موجودی و حمل‌ونقل افزایش می‌یابد و نهایتاً همه ابعاد پایداری (شکل‌های ۷-۹) تحت تأثیر تقاضا قرار می‌گیرد به طوری که میزان آلاینده‌گی و هدف اجتماعی بر اساس شکل‌های ۷-۹ افزایش می‌یابد. (به این نکته توجه شود که در تمامی تحلیل‌ها با افزایش پارامتر کنترل عدم قطعیت هزینه‌ها افزایش می‌یابد)



شکل ۸ تأثیر افزایش تقاضا بر هدف اقتصادی

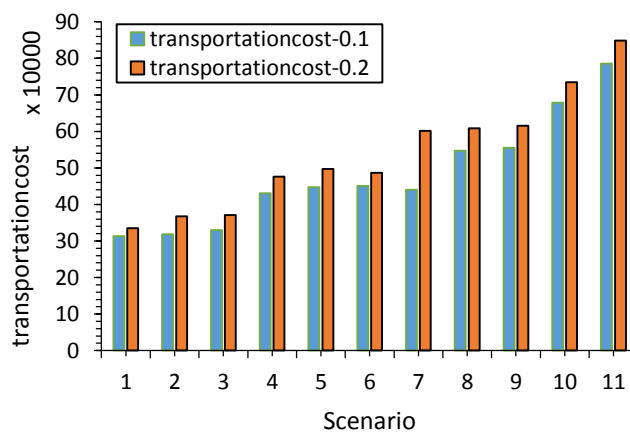
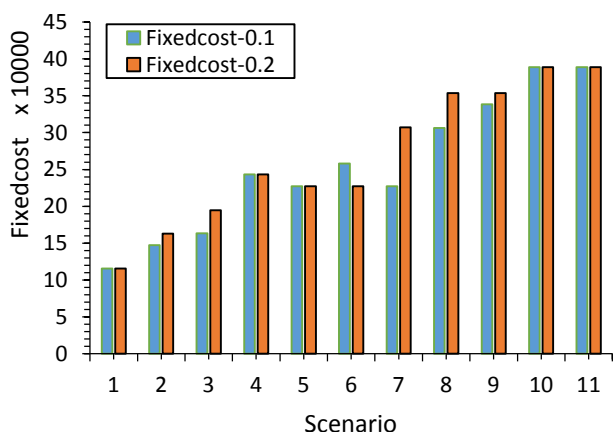


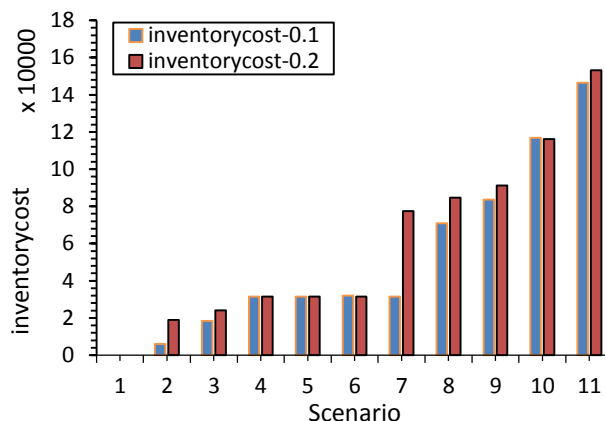
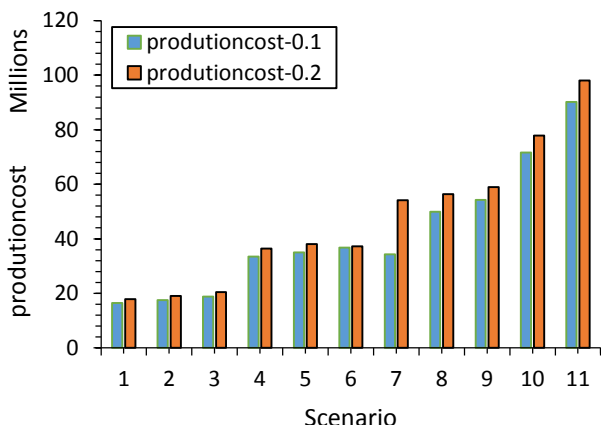
شکل ۷ تأثیر افزایش تقاضا بر هدف زیست‌محیطی



شکل ۹ تأثیر افزایش تقاضا بر هدف اجتماعی

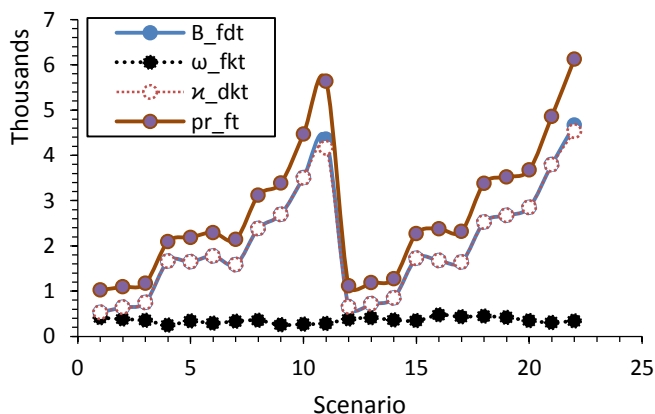
مقایسه مقدار بخش‌های هدف اقتصادی در حالت افزایش ۱۰ و ۲۰ درصدی نرخ محصولات فاسد شده یا ضایع شده توسط بازرسی (عمل بازرسی در مرکز تولید و توزیع)  $\alpha_t, \beta_t$ ، نرخ پسماند مواد غذایی توسط مشتری  $\theta_t$ ، نشان می‌دهد که در حالتی که نرخ فساد توسط بازرسی ۲۰ درصد افزایش دارد هزینه‌های ثابت و هزینه‌های موجودی افزایش قابل توجهی ندارند به‌عنوان مثال فقط در سناریوهای ۷ و ۸ این افزایش مشخص است اما از نظر هزینه‌های حمل‌ونقل و هزینه‌های تولید در تمامی سناریوها نسبت به افزایش ده‌درصدی افزایش بیشتری داشته است. (شکل ۱۰)



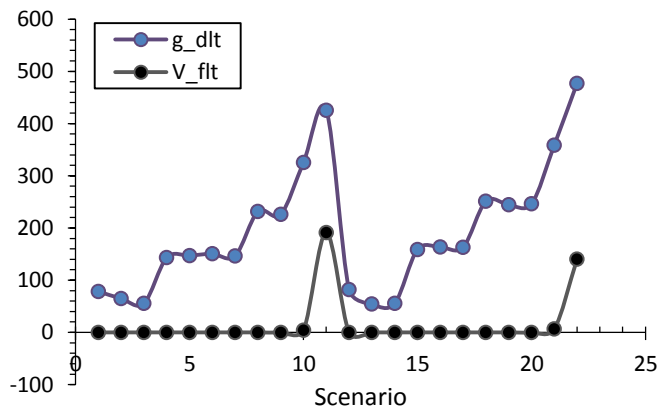


شکل ۱۰ مقایسه بخش‌های مختلف اقتصادی تحت شرایط افزایش نرخ فساد

تغییرات در پارامترهای هر مدل ریاضی موجب می‌شود که متغیرهای تصمیم تغییرات داشته باشند در شکل‌های ۱۱ و ۱۲ تغییرات باعث شده است که مقدار متغیرهای تصمیم افزایش یابند. در سناریوهای ۱ تا ۱۱ این افزایش نسبت به ۱۲ تا ۲۲ کمتر است. در سناریوهای ۱۲ تا ۲۲ نرخ رشد بیشتری در متغیرهای تصمیم وجود دارد همچنین میزان محصولات فاسد شده توسط بازرسی نمایش داده شده است. این روند بازگشتی توسط بازرسی نشان می‌دهد که نرخ بازگشت در محل تولید، در سناریو ۱۱، ۲۱ و ۲۲ وجود دارد و در سایر سناریوها مقادیر آن ناچیز است. اما در مرکز توزیع این مقدار در سناریو ۱۱ و ۲۲ به بیشترین مقدار خود می‌رسد (شکل ۱۱). این محصولات توسط مراکز تولید کود به کود آلی تبدیل می‌شوند و به کشاورزان مجموعه تبرک ارسال می‌شود. حال فرض کنیم اگر از ارسال این محصولات جلوگیری نمی‌شد می‌بایست این چرخه از مشتری به مرکز تولید کود برگشت داده شود که هزینه‌های حمل‌ونقل و میزان آلاینده‌گی افزایش می‌یابد. با توجه به شکل ۱۲ می‌توان دریافت که مقدار تولید در بالاترین بخش نمودار قرار دارد که بخشی از آن توسط ارسال به صورت مستقیم به محل مشتری ارسال می‌شود و بخش دیگر توسط مرکز توزیع، کاملاً مشهود است که ارسال از طریق مرکز توزیع به محل مشتری بیشتر است و ارسال مستقیم در پایین‌ترین سطح قرار دارد. مقایسه روند  $B_{fdt}$  و  $\chi_{dkt}$  نشان می‌دهد تقریباً هر آنچه از تولید دریافت شده است به محل مشتری ارسال شده و در جاهایی که سطح نمودار  $\chi_{dkt}$  پایین‌تر است به دلیل بازرسی در این مرکز و منتقل کردن برخی مواد غذایی (ضایع شده یا فاسد شده) به مرکز تولید کود می‌باشد.



شکل ۱۲ نمایش افزایش مقدار متغیرهای تصمیم



شکل ۱۱ مقایسه مقدار مواد غذایی برگشتی از مرکز تولید و توزیع

## ۶- بینش مدیریتی

دفع پسماند مواد غذایی یک مشکل بزرگ در بسیاری از کشورهای توسعه‌یافته و در حال توسعه است. اگر نگرش مدیریت

پسماند به پسماند مواد غذایی به‌عنوان زباله‌های بی‌فایده باشد آنگاه بایستی به دنبال جمع‌آوری و دفع زباله‌ها باشند و این موضوع یکی از مشکلات عمده محیط شهری در اکثر کشورهای جهان امروزی است. راه‌حل‌های مدیریت پسماند باید از نظر مالی، فنی، اجتماعی، قانونی، امکان‌پذیر و سازگار با محیط‌زیست باشد. بحث مدیریت پسماند بزرگ‌ترین چالش برای مسئولان شهرهای کوچک و بزرگ است. ارزش‌گذاری پسماندهای آلی مواد غذایی یکی از زمینه‌های مهم تحقیقاتی کنونی است که می‌توان با استفاده از پسماند مواد غذایی کود آلی تولید کرد که علاوه بر اینکه موجب ایجاد درآمدزایی می‌شود، از نظر زیست‌محیطی و اجتماعی بسیار مفید و ارزشمند خواهد بود. با توجه به اینکه گروه تولیدی تبرک بیش از ۱۰ هزار کشاورز فعال دارد این کود را می‌توان به آنان تحویل داد که موجب رضایت بالای کشاورزان خواهد شد. در این بین شبکه‌های زنجیره تأمین غذا می‌بایست به‌درستی و متناسب با ابعاد پایداری و در جهت بهبود آن طراحی شوند استفاده از بازرسی همان‌طور که مطرح شد موجب می‌شود از ارسال محصولات ضایع‌شده یا فاسد شده به سطح بعدی جلوگیری کند که این امر در مرکز تولید نسبت به مراکز توزیع کمتر است. در شکل ۱۲ در سناریو ۲۲ از ارسال حدود ۵۰۰ واحد کالا به مشتری و حدود ۱۰۰ واحد کالا ارسال به مرکز توزیع جلوگیری شده است که فرض کنیم اگر این ۶۰۰ واحد کالا در صورت ارسال چقدر هزینه‌های حمل‌ونقل را افزایش می‌داد و چه میزان آلاینده‌گی به دنبال داشت مدل ریاضی این پژوهش برای شبکه‌های زنجیره تأمین غذا که ابعاد پایداری را در نظر دارند بسیار مؤثر می‌باشد چراکه یک هماهنگی بین ارضای تقاضای مشتریان، بازرسی مواد غذایی معیوب وجود دارد چراکه این مدل بر این اصل استوار است که تمامی تقاضای مشتریان قابل ارضا نیست چراکه ممکن است با کمبود به دلیل بازرسی مواجه شویم که این موضوع به این دلیل مهم است که بهتر است تقاضا برآورده نشود تا اینکه مواد غذایی فاسد/ضایع‌شده به مشتری برسد این موضوع وجه برند کارخانه را از بین می‌برد و به‌مراتب نسبت به کمبود تأثیرات مخرب‌تری دارد که یکی از تأثیرات مخرب آن تبلیغات منفی مشتری به دلیل محصول معیوب است.

## ۷- نتیجه‌گیری

در این پژوهش یک شبکه زنجیره تأمین رو به جلو و معکوس مواد غذایی با اعمال مفاهیم زنجیره تأمین سبز و پایداری به‌منظور کاهش اثرات مخرب زیست‌محیطی ناشی از دفن پسماند مواد غذایی تحت شرایط عدم قطعیت با در نظر گرفتن بازرسی در مرکز توزیع و تولید ارائه شد. یکی از روش‌های اصلی بازیافت زباله‌های آلی تولید کود می‌باشد. نتیجه این روند علاوه بر حفظ سلامت انسان و محیط‌زیست، تولید مقدار قابل‌توجهی از کودهای آلی است. سه جنبه پایداری اقتصادی (کاهش هزینه‌ها)، زیست‌محیطی (کمینه‌سازی انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط بخش حمل‌ونقل) و مسئولیت اجتماعی (ایجاد اشتغال، توسعه جامعه و رضایت مشتری) برای بهینه‌سازی زنجیره تأمین مواد غذایی در شرایط عدم قطعیت به‌طور هم‌زمان در این پژوهش در نظر گرفته شد که تضاد بین تابع هدف اقتصادی و تابع هدف زیست‌محیطی نشان داد که اگر در سطوح تصمیم‌گیری تمرکز بیشتری برای کاهش آلودگی باشد می‌بایست هزینه بیشتری کنیم. با توجه به اینکه تابع هدف سوم مسئولیت اجتماعی را دنبال می‌کند، برای اینکه تابع هدف اجتماعی را به سطح بالایی برسانیم و به خواسته خود یعنی ایجاد فرصت شغلی بیشتر و توسعه منطقه‌ای و رضایت مشتری از طریق ارضای تقاضای آنان برسیم که هرچه بیشتر باشد بهتر است، و از طرفی رسیدن به این خواسته مهم وابسته به این است که مرکز توزیع و مرکز تولید کود بیشتری احداث کنیم و این نیاز به سرمایه بالایی دارد و با افزایش تابع هدف مسئولیت اجتماعی هزینه نیز افزایش می‌یابد و تابع هدف اقتصادی به دنبال کاهش هزینه‌هاست و کنترل هزینه‌ها با تابع هدف اقتصادی می‌باشد. مدل ارائه‌شده سعی دارد به یک تعادل منطقی بین سه جنبه پایداری برسد، برای حل این مدل در ابعاد کوچک از نرم‌افزار GAMS و روش AEC استفاده شد. برای پیشنهادات آتی جهت ارائه بهتر این پژوهش می‌توان از الگوریتم‌های فرا ابتکاری و یا رویکردهای دقیق مانند الگوریتم بندرز استفاده کرد.

## ۸- منابع

- [1] Esteso A, Alemany MM, Ortiz A. Conceptual framework for designing agri-food supply chains under uncertainty by mathematical programming models. *International Journal of Production Research*. 2018;56:4418-46.

- [2] Estes A, Alemany M, Ortiz Á. Impact of product perishability on agri-food supply chains design. *Applied Mathematical Modelling*. 2021;96:20-38.
- [3] al ÅSe. FUSIONS - Estimates of European food waste levels. . IVL-report C 186. 2016.
- [4] Pishvae MS, Razmi J, Torabi SA. Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy sets and systems*. 2012;206:1-20.
- [5] Soto-Silva WE, Nadal-Roig E, González-Araya MC, Pla-Aragones LM. Operational research models applied to the fresh fruit supply chain. *European Journal of Operational Research*. 2016;251:345-55.
- [6] Firoozi Z, Ismail N, Ariafar S, Tang SH, Ariffin M, Memariani A. Distribution network design for fixed lifetime perishable products: a model and solution approach. *Journal of Applied Mathematics*. 2013;2013.
- [7] Stindt D, Sahamie R. Review of research on closed loop supply chain management in the process industry. *Flexible Services and Manufacturing Journal*. 2014;26:268-93.
- [8] Grillo H, Alemany M, Ortiz A, De Baets B. Possibilistic compositions and state functions: application to the order promising process for perishables. *International Journal of Production Research*. 2019;57:7006-31.
- [9] Govindan K, Soleimani H. A review of reverse logistics and closed-loop supply chains: a *Journal of Cleaner Production* focus. *Journal of cleaner production*. 2017;142:371-84.
- [10] Zhu Z, Chu F, Dolgui A, Chu C, Zhou W, Piramuthu S. Recent advances and opportunities in sustainable food supply chain: a model-oriented review. *International Journal of Production Research*. 2018;56:5700-22.
- [11] Ghazanfari M, Mohammadi H, Pishvae MS, Teimoury E. Fresh-product trade management under government-backed incentives: A case study of fresh flower market. *IEEE Transactions on Engineering Management*. 2019;66:774-87.
- [12] Gholami-Zanjani SM, Klibi W, Jabalameli MS, Pishvae MS. The design of resilient food supply chain networks prone to epidemic disruptions. *International Journal of Production Economics*. 2021;233:108001.
- [13] Hamid HA, Qi LP, Harun H, Sunar NM, Ahmad FH, Muhamad MS. Development of organic fertilizer from food waste by composting in UTHM campus Pagoh. *Journal of Design for Sustainable and Environment*. 2019;1.
- [14] Madani SR, Rasti-Barzoki M. Sustainable supply chain management with pricing, greening and governmental tariffs determining strategies: A game-theoretic approach. *Computers & Industrial Engineering*. 2017;105:287-98.
- [15] Hajizamani Z, Sahebi H, Pishvae M. A Freight Planning and Carrier Selection Robust Programming Model: A Case of Study. *Turkish Journal of Computer and Mathematics Education (TURCOMAT)*. 2021;12:1802-22.
- [16] Gao S, Lu D, Qian T, Zhou Y. Thermal hydrolyzed food waste liquor as liquid organic fertilizer. *Science of The Total Environment*. 2021;775:145786.
- [17] Keyvanshokoh E, Ryan SM, Kabir E. Hybrid robust and stochastic optimization for closed-loop supply chain network design using accelerated Benders decomposition. *European Journal of Operational Research*. 2016;249:76-92.
- [18] Marcos J, Scheller C, Godina R, Spengler T, Carvalho H. Sources of uncertainty in the closed-loop supply chain of lithium-ion batteries for electric vehicles. *Cleaner Logistics and Supply Chain*. 2021;1:100006.
- [19] Krikke H, Hofenk D, Wang Y. Revealing an invisible giant: A comprehensive survey into return practices within original (closed-loop) supply chains. *Resources, Conservation and Recycling*. 2013;73:239-50.
- [20] Krikke H, Bloemhof-Ruwaard J, Van Wassenhove LN. Concurrent product and closed-loop supply chain design with an application to refrigerators. *International Journal of Production Research*. 2003;41:3689-719.
- [21] Easwaran G, Üster H. A closed-loop supply chain network design problem with integrated forward and reverse channel decisions. *Iie transactions*. 2010;42:779-92.
- [22] Fazli-Khalaf M, Mirzazadeh A, Pishvae MS. A robust fuzzy stochastic programming model for the design of a reliable green closed-loop supply chain network. *Human and ecological risk assessment: an international journal*. 2017;23:2119-49.

- [23] Govindan K, Soleimani H, Kannan D. Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*. 2015;240:603-26.
- [24] Melo MT, Nickel S, Saldanha-Da-Gama F. Facility location and supply chain management—A review. *European Journal of Operational Research*. 2009;196:401-12.
- [25] Shen Z. Integrated supply chain design models: a survey and future research directions. *Journal of industrial and management optimization*. 2007;3:1.
- [26] Fleischmann M, Beullens P, BLOEMHOF-RUWAARD JM, Van Wassenhove LN. The impact of product recovery on logistics network design. *Production and operations management*. 2001;10:156-73.
- [27] Salema M, Pova A, Novais AQ. A warehouse-based design model for reverse logistics. *Journal of the Operational Research Society*. 2006;57:615-29.
- [28] Van Engeland J, Beliën J, De Boeck L, De Jaeger S. Literature review: Strategic network optimization models in waste reverse supply chains. *Omega*. 2020;91:102012.
- [29] El-Sayed M, Afia N, El-Kharbotly A. A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk. *Computers & Industrial Engineering*. 2010;58:423-31.
- [30] Devika K, Jafarian A, Nourbakhsh V. Designing a sustainable closed-loop supply chain network based on triple bottom line approach: A comparison of metaheuristics hybridization techniques. *European Journal of Operational Research*. 2014;235:594-615.
- [31] Nematollahi M, Tajbakhsh A, Sedghy BM. The reflection of competition and coordination on organic agribusiness supply chains. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2021;154:102462.
- [32] Moreno-Miranda C, Dries L. Integrating coordination mechanisms in the sustainability assessment of agri-food chains: From a structured literature review to a comprehensive framework. *Ecological Economics*. 2022;192:107265.
- [33] Rizou M, Galanakis IM, Aldawoud TM, Galanakis CM. Safety of foods, food supply chain and environment within the COVID-19 pandemic. *Trends in food science & technology*. 2020;102:293-9.
- [34] Mutonyi S, Beukel K, Hjortsø CN. Relational factors and performance of agrifood chains in Kenya. *Industrial Marketing Management*. 2018;74:175-86.
- [35] Fancello G, Mola F, Frigau L, Serra P, Mancini S, Fadda P. A new management scheme to support reverse logistics processes in the agrifood distribution sector. *Transportation research procedia*. 2017;25:695-715.
- [36] Zhalechian M, Tavakkoli-Moghaddam R, Zahiri B, Mohammadi M. Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2016;89:182-214.
- [37] Abad HKE, Vahdani B, Sharifi M, Etebari F. A bi-objective model for pickup and delivery pollution-routing problem with integration and consolidation shipments in cross-docking system. *Journal of cleaner production*. 2018;193:784-801.
- [38] Mavrotas G. Effective implementation of the  $\epsilon$ -constraint method in multi-objective mathematical programming problems. *Applied mathematics and computation*. 2009;213:455-65.