

## Two-Stage and Robust Stochastic Optimization of Closed-Loop Supply Chain Network under Uncertainty

**Mona Behzadi**

M.Sc. student, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran, monabehzadi@yahoo.com

**Mehdi Seifabrgy**\*

Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Alzahra University, Tehran, Iran, m.seifbarghy@alzahra.ac.ir

**Abstract:** In this paper, a network of closed-loop supply chain is considered, including external supplier, production/recovery facilities, hybrid distribution/collection centers, disposal centers and customers. Generally, in the closed-loop chains production is done by the returned products, we can't achieve a correct analysis by considering one period. In many situations in the real world, we need to consider more than one period, therefore the studied model is assumed in the form of some multi-period and suppliers are used to supply the shortage of parts. In this paper, it is assumed that parameters of demand, quantity and quality of returns and variable costs are uncertain. To evaluate the uncertainty, two approaches of two-stage and robust stochastic optimization have been used. The results show that performance of robust optimization is better than the two-stage stochastic optimization under uncertainty.

**Keywords:** Robust Optimization, Two-stage Stochastic Optimization, Closed-loop Supply Chain, Uncertainty

**Introduction:** In recent years, closed-loop supply chain networks and reverse logistics have been highly regarded as being used to minimize waste and recycling of products. Since the process of collecting, retrieving, and re-manufacturing requires time, it does not provide a real result in a model in a single period. Therefore, in this paper, a multi-period closed-loop supply network model is developed. Also, in the first period, raw materials are supplied from foreign suppliers, but in subsequent periods, the recycled materials are also used in production, thus saving raw materials purchase costs.

**Materials and Methods:** A Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model is proposed. Its objectives are to minimize the costs of establishing centers, shipping costs, purchasing, producing, maintaining, refining, and disposal, as well as costs associated with unused capacity penalties centers. The mathematical model of this paper is as follows:

$$\text{Min } FC+VC+PC \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_j U_{jkt} \geq d_{kt} \quad \forall k, t \quad (2)$$

$$\sum_j Q_{kjt} \geq r_{k(t-1)} d_{k(t-1)} \quad \forall k, t \quad (3)$$

$$\sum_i X_{ijt} - \sum_k U_{jkt} = 0 \quad \forall j, t \quad (4)$$

$$\sum_i V_{j\bar{t}} - (1-s_t) \sum_k Q_{kjt} = 0 \quad \forall j, t > 1 \quad (5)$$

\* Corresponding author

$$\sum_m T_{jmt} - s_i \sum_k Q_{kjt} = 0 \quad \forall j, t > 1 \quad (6)$$

$$\sum_j V_{jit} - \sum_j X_{ij(t-1)} \leq 0 \quad \forall i, t > 1 \quad (7)$$

$$\sum_j X_{ijt} \leq cw_i W_i \quad \forall i, t \quad (8)$$

$$\sum_i X_{ijt} \leq cy_j Y_j \quad \forall j, t \quad (9)$$

$$\sum_k Q_{kjt} \leq cy_r Y_j \quad \forall j, t > 1 \quad (10)$$

$$\sum_j V_{jit} \leq cwr_i W_i \quad \forall i, t > 1 \quad (11)$$

$$\sum_j T_{jmt} \leq cz_m Z_m \quad \forall m, t > 1 \quad (12)$$

$$\sum_j X_{ijt} \leq S_{it} \quad \forall i, t = 1 \quad (13)$$

$$\sum_j X_{ijt} - \sum_j V_{jit} \leq S_{it} \quad \forall i, t > 1 \quad (14)$$

$$W_i, Y_j, Z_m \in \{0,1\} \quad \forall i, j, m \quad (15)$$

$$S_{it}, X_{ijt}, U_{jkt}, V_{jit}, Q_{kjt}, T_{jmt} \quad \forall i, j, k, m, t \quad (16)$$

Constraint (2) shows the flow of customer demand. Constraints (3) ensures that returned products are collected from customers. Constraints (4) to (7) establish the flow equilibrium. Equations (8) to (12) are the capacity constraints of the production centers, the link centers are in forward and reverse, and disposal centers. Constraint (13) represents the flow of the number of pieces purchased from the supplier in the first period. Constraint (14) states that after the second period, the recycled parts will be produced and purchased from the supplier as needed. Constraints (15) and (16) represent the status of the decision variables.

**Results and Discussion:** In order to have an efficient logistics network, the uncertainty in demand, the quantity and quality of returning products and variable costs are considered in the model, which are solved by two methods of two-stage random planning. The EVPI and VSS indices have been used to compare the solutions used.

**Conclusion:** In this paper, a multi-cycle model of closed loop supply chain network including foreign suppliers, production / rehabilitation centers, distribution / collection centers, disposal centers and customers are presented. To evaluate the model under uncertainty, two-stage randomization and robust optimization methods presented by Mulvey et al (1995) have been used. The more scenarios are scattered, the responsiveness of the model is better than the two-stage model response, and it shows a better performance of the steady model.

## References

Mulvey, J., Vanderber, R., & zenios, S. (1995). Robust Optimization of Large-Scale Systems. Operations research. *Operations Research*, 43, 264-281.

## رویکردهای بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای و استوار در شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط عدم قطعیت

مونا بهزادی<sup>۱</sup>، مهدی سیف‌برقی<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران، monabehzadi@yahoo.com

۲- دانشیار، گروه مهندسی صنایع، دانشکده فنی، دانشگاه الزهراء، تهران، ایران، m.seifbarghy@alzahra.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته شامل تأمین‌کننده خارجی، مراکز تولید/بازیابی، مراکز ترکیبی توزیع/جمع‌آوری، مراکز دفع و مشتریان در نظر گرفته شده است. به‌طور کلی در زنجیره‌های حلقه بسته که تولید از طریق محصولات برگشتی انجام می‌شود، با در نظر گرفتن یک دوره تحلیل به‌درستی انجام نمی‌شود. در بسیاری از شرایط در دنیای واقعی نیاز به در نظر گرفتن بیش از یک دوره وجود دارد؛ به همین دلیل مدل بررسی شده به‌صورت چنددوره‌ای در نظر گرفته شده است و از تأمین‌کننده برای تأمین میزان کمبود قطعات استفاده می‌شود. در این مقاله فرض شده است پارامترهای تقاضا، کمیت و کیفیت محصولات برگشتی و هزینه‌های متغیر دارای عدم قطعیت‌اند. برای ارزیابی عدم قطعیت پارامترها از دو رویکرد بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای و بهینه‌سازی استوار استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد کارایی بهینه‌سازی استوار نسبت به بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای در شرایط عدم قطعیت بهتر است.

**واژه‌های کلیدی:** بهینه‌سازی استوار، بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای، زنجیره تأمین حلقه بسته، عدم قطعیت

## مقدمه

به طور کلی روش های متعددی برای به حداقل رساندن هزینه های زیست محیطی ناشی از تولید وجود دارد؛ اما پیشگیری از تولید ضایعات محصولات از بسیاری از هزینه های زیست محیطی قبل از وقوع آنها جلوگیری می کند. در سال های اخیر، بازیابی محصولات استفاده شده به دلیل نگرانی های زیست محیطی توجه زیادی را به خود جلب کرده است. شبکه های لجستیک معکوس با به کارگیری فعالیت های لجستیکی، محصولات استفاده شده کاربران را به محصولات درخور استفاده دوباره در بازار تبدیل می کنند. در این زمینه پژوهشگران مقالات متعددی را ارائه کرده اند که تعدادی از آنها در این مقاله بررسی شده است. جایرامن<sup>۱</sup> و همکاران (۱۹۹۹) در مقاله خود شبکه لجستیک معکوس را در نظر گرفته اند که این شبکه محل تسهیلات بازسازی/توزیع را مشخص و مقادیر بهینه محصولات تعمیر شده و قطعات در حال استفاده را تعیین می کند. فلیشمن<sup>۲</sup> و همکاران (۲۰۰۰) مطالعات موردی شبکه های لجستیک در صنایع مختلف را بررسی و آنها را با ساختارهای سنتی لجستیک مقایسه کرده اند. جایرامن و همکاران (۲۰۰۳) شبکه توزیع معکوس سه سطحی را پیشنهاد و روشی ابتکاری برای حل این شبکه معرفی کرده اند. شبکه ارائه شده شامل مراکز جمع آوری و بازیابی و مراکز منشأ (یعنی فروشگاه های خرده فروشی) است که مراکز جمع آوری و بازیابی مکان یابی شده و مراکز منشأ ثابت اند. در حوزه لجستیک روبه جلو، امیری (۲۰۰۶) مدل MILP<sup>۳</sup> را با ویژگی مکان یابی کارخانه های تولید و انبارهای توزیع و تعیین بهترین استراتژی برای توزیع محصول از کارخانه ها به انبارها و از انبارها به مشتریان در نظر گرفته اند و برای حل آن روش ابتکاری کارآمدی را ارائه کرده است. در این مقاله از سطوح مختلف ظرفیت برای مراکز استفاده شده است.

عدم قطعیت یکی از ویژگی های شبکه های بازیابی محصول است که در بسیاری از مقالات لجستیک معکوس بررسی شده است؛ روش هایی مانند برنامه ریزی تصادفی و یا روش های فرا ابتکاری برای حل مدل های دارای عدم قطعیت مناسب اند. لیستیس<sup>۴</sup> و دکر<sup>۵</sup> (۲۰۰۵) از رویکرد مبتنی بر برنامه ریزی تصادفی برای سناریوهای مختلف شبکه لجستیک خود استفاده کرده اند. این مدل سناریومحور به صورت مطالعه موردی واقعی در بازیافت شن و ماسه در هلند به کار رفته است. سالما<sup>۶</sup> و همکاران (۲۰۰۷) در شبکه لجستیک معکوس خود عدم قطعیت در تقاضای محصول و بازگشتی ها را در نظر گرفته اند. تارخ و همکاران (۱۳۹۱) شبکه لجستیک چندمحصولی را با در نظر گرفتن عدم قطعیت در تقاضا و محصولات برگشتی طراحی کرده اند. لیکنز<sup>۷</sup> و وندله<sup>۸</sup> (۲۰۰۷) نیز از عدم قطعیت در شبکه خود استفاده و شبکه لجستیک را با سیستم صف ترکیب کرده اند.

از آنجاکه شبکه زنجیره تأمین مسئله ای استراتژیک است، برای کارایی و پاسخگویی بیشتر زنجیره تأمین و جلوگیری از زیربیهنگی ناشی از طراحی جداگانه شبکه لجستیک روبه جلو و معکوس، شبکه به صورت زنجیره تأمین یکپارچه طراحی شده است. لو<sup>۹</sup> و بوستل<sup>۱۰</sup> (۲۰۰۷) شبکه لجستیکی با جریان هم زمان روبه جلو و معکوس در نظر گرفته اند. همچنین در این زمینه لیستیس (۲۰۰۷) مدلی تصادفی برای طراحی شبکه حلقه بسته ارائه کرده است. در این مدل تعدادی سناریوی مختلف برای عدم قطعیت در پارامترهای تقاضا و محصولات برگشتی در نظر گرفته شده است. لی<sup>۱۱</sup> و دانگ<sup>۱۲</sup> (۲۰۰۸) شبکه لجستیک یکپارچه ای را برای پایان اجاره نامه محصولات کامپیوتری توسعه داده اند. آنها شبکه ای ساده با یک مرکز تولید واحد و تعدادی تسهیلات توزیع/جمع آوری معین در نظر گرفتند و برای حل آن از روش فرا ابتکاری جستجوی ممنوع استفاده کرده اند.

ارس<sup>۱۳</sup> و اکسن<sup>۱۴</sup> (۲۰۰۸) از شبکه لجستیک معکوس برای تعیین مکان مراکز جمع‌آوری و قیمت خرید بهینه استفاده کرده‌اند. همچنین لی<sup>۱۵</sup> و همکاران (۲۰۰۹) شبکه لجستیک سه‌مرحله‌ای با هدف حداقل کردن کل هزینه‌های لجستیک معکوس، شامل هزینه‌های حمل و نقل و هزینه ثابت راه‌اندازی مراکز جداسازی قطعات ارائه و برای حل آن از الگوریتم ژنتیک استفاده کرده‌اند. ملو<sup>۱۶</sup> و همکاران (۲۰۰۹) ادبیات مدل‌های مکان‌یابی تسهیلات در مدیریت زنجیره تأمین را بررسی کرده‌اند.

در برخی از مقالات از تسهیلات پیوندی استفاده شده است که علاوه بر صرفه‌جویی در هزینه، باعث کاهش آلودگی حاصل از به اشتراک گذاشتن تجهیزات و زیرساخت می‌شود. لی و دانگ (۲۰۰۸) از تسهیلات ترکیبی توزیع/جمع‌آوری در مدل خود بهره گرفته‌اند. پیشوایی و همکاران (۲۰۱۰) نیز از مراکز پیوندی توزیع/جمع‌آوری استفاده کرده‌اند و دو هدف حداقل کردن هزینه‌های کل و حداکثر کردن پاسخگویی شبکه لجستیک را در نظر گرفته‌اند. همچنین از ظرفیت چندسطحی برای مراکز بهره گرفته‌اند. بشیری و بشیری (۱۳۹۴) در مدل پیشنهادی خود مراکز جمع‌آوری را به بخش‌های مختلفی تقسیم کرده‌اند که این بخش‌ها در صورت لزوم استقرار می‌یابند. در این مدل کالاهای برگشتی از مشتریان خریداری می‌شود و این مشتریان را به برگرداندن کالاهای معیوب ترغیب می‌کند. ال-سید<sup>۱۷</sup> و ال-کاربوتلی<sup>۱۸</sup> (۲۰۱۰) شبکه‌ای متشکل از سه سطح در جهت روبه‌جلو (تأمین‌کننده، تسهیلات و مراکز توزیع) و دو سطح در جهت معکوس (جداسازی قطعات و مراکز توزیع مجدد) پیشنهاد کرده‌اند.

تأمین‌کنندگان خارجی یکی از اعضای مهم شبکه لجستیک معکوس و زنجیره تأمین حلقه بسته‌اند؛ با این حال در مدل‌های شبکه CLSC<sup>۱۹</sup>، تأمین‌کننده براساس هزینه خرید ارزیابی می‌شود و عوامل دیگر مانند تحویل به‌هنگام نادیده گرفته می‌شود. امین و زانگ<sup>۲۰</sup> (۲۰۱۲) شبکه یکپارچه‌ای ارائه کرده‌اند که در مرحله نخست چارچوبی برای معیارهای انتخاب تأمین‌کننده در RL<sup>۲۱</sup> ارائه شده است. همچنین روشی فازی برای ارزیابی تأمین‌کنندگان براساس معیارهای کیفی طراحی کرده‌اند. خروجی این مرحله وزن هر تأمین‌کننده است. در مرحله دوم، مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چندهدفه‌ای پیشنهاد کرده‌اند که اهداف به‌صورت حداکثر کردن سود و وزن تأمین‌کننده و حداقل کردن میزان نقص محصول است.

در مطالعات اخیر، امین و زانگ (۲۰۱۳) اثر عدم قطعیت تقاضا و محصولات بازیافتی را با روش برنامه‌نویسی تصادفی مبتنی بر سناریو بر شبکه CLSC بررسی کرده‌اند. اشفوری و همکاران (۲۰۱۴) شبکه لجستیک یکپارچه‌ای را با اهداف حداقل کردن هزینه‌های استقرار، حمل و نقل، مدیریت موجودی و به‌طور هم‌زمان حداکثر کردن رضایت مشتری با روش الگوریتم ژنتیک بررسی کرده‌اند. این مدل به‌صورت مطالعه موردی در شبکه پس از فروش اتومبیل پشتیبانی شده است. زو<sup>۲۲</sup> و زو (۲۰۱۵) شبکه لجستیک معکوسی برای سایت‌های انتخاب‌شده در پکن ارائه کرده‌اند که کاغذهای اداری را بازیافت می‌کنند. در زمینه رویکردهای بهینه‌سازی تصادفی و استوار، سانتوسا<sup>۲۳</sup> و همکاران (۲۰۰۵) مدل برنامه‌ریزی تصادفی و الگوریتم حل آن را برای شبکه زنجیره‌تأمین ارائه داده‌اند. از آنجاکه رویکردهای موجود محدود به شرایط واقعی هستند، از رویکرد برنامه‌ریزی تصادفی با قابلیت محاسبه تعداد زیاد سناریو استفاده کرده‌اند. ماروفازمن<sup>۲۴</sup> و همکاران (۲۰۱۴) مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای را برای شبکه زنجیره‌تأمین ارائه داده‌اند. این رویکرد عدم قطعیت بین تصمیم‌گیری درباره محل، حمل

و نقل و همچنین هزینه و خروجی زنجیره تأمین را پوشش می‌دهد. پن<sup>۲۵</sup> و نگس<sup>۳۶</sup> (۲۰۱۰) مدل زنجیره تأمین استوار را با عدم قطعیت در تقاضا در محیطی چابک در نظر گرفته‌اند که برای عدم قطعیت در تقاضا از رویکرد سناریویی استفاده شده است. در جدول ۱ برخی از پژوهش‌های گذشته براساس نوع شبکه‌ای ارائه شده است. در این جدول مدل پژوهش، توابع هدف، تسهیلات استقرار یافته، تک یا چند محصولی بودن، چند دوره‌ای، محدودیت ظرفیت و محدودیت کمبود مرور شده است.

جدول ۱- مرور برخی از پژوهش‌های موجود در زمینه شبکه زنجیره تأمین

پژوهش‌ها	نوع شبکه لجستیک	مدل	هدف	استقرار تسهیلات	چند محصولی	چند دوره‌ای	ظرفیت	کمبود مجاز
تارخ و همکاران (۱۳۹۱)	یکپارچه	MILP	حداقل سازی هزینه	کارخانه مراکز توزیع/جمع‌آوری مراکز بازیابی مراکز دفع	✓		✓	✓
بشیری و بشیری (۱۳۹۴)	یکپارچه	SMILP <sup>۳۷</sup>	حداقل سازی هزینه حداکثرسازی سود	کارخانه مراکز جمع‌آوری	✓		✓	
جایرامن و همکاران (۱۹۹۹)	معکوس	MILP	حداقل سازی هزینه	مراکز توزیع	✓		✓	✓
جایرامن و همکاران (۲۰۰۳)	معکوس	MILP	حداقل سازی هزینه	مراکز جمع‌آوری مراکز بازیابی			✓	
لیستس و دکر (۲۰۰۵)	معکوس	SMILP	حداکثرسازی سود	مراکز ذخیره‌سازی مراکز بازیابی	✓		✓	✓
امیری (۲۰۰۶)	رو به جلو	MILP	حداقل سازی هزینه	مراکز تولید انبارها			✓	
لو و بوستل (۲۰۰۷)	یکپارچه	MILP	حداقل سازی هزینه	مراکز تولید/بازسازی مراکز میانی	✓			
لیستس (۲۰۰۷)	یکپارچه	SMILP	حداقل سازی هزینه حداکثرسازی سود	مراکز تولید انبارها			✓	✓
سالما و همکاران (۲۰۰۷)	معکوس	SMILP	حداقل سازی هزینه	مراکز تولید انبارها مراکز جداسازی قطعات	✓		✓	✓
لیکنز و وندله (۲۰۰۷)	معکوس	MINLP	حداکثرسازی سود	-			✓	✓
لی و دانگ (۲۰۰۸)	یکپارچه	MILP	حداقل سازی هزینه	تسهیلات ترکیبی	✓		✓	
زو و وانگ (۲۰۰۸)	یکپارچه	MILP	حداقل سازی هزینه	مراکز تولید مراکز بازیابی مراکز توزیع			✓	✓
پیشوایی و همکاران (۲۰۰۹)	یکپارچه	SMILP	حداقل سازی هزینه	مراکز تولید مراکز پیوندی توزیع/جمع‌آوری مراکز دفع			✓	

ادامه جدول ۱- مرور برخی از پژوهش‌های موجود در زمینه شبکه زنجیره تأمین

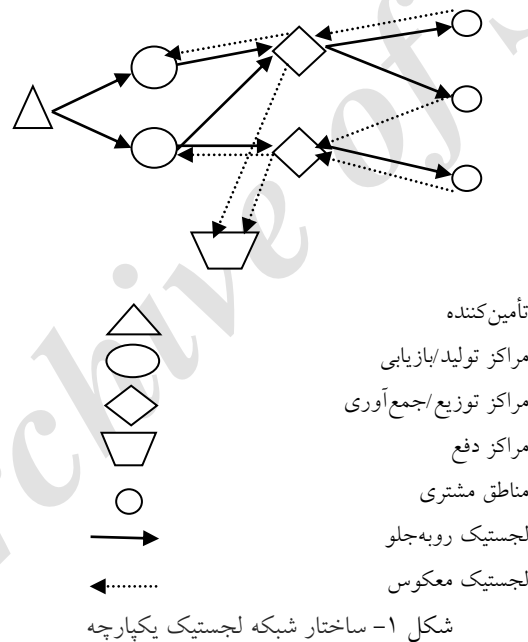
پژوهش‌ها	نوع شبکه لجستیک	مدل	هدف	استقرار تسهیلات	چند محصولی	چند دوره‌ای	ظرفیت	کمبود مجاز
لی و همکاران (۲۰۰۹)	معکوس	MILP	حداقل‌سازی هزینه	مراکز جداسازی قطعات مراکز پردازش مراکز بازگشتی	✓		✓	
ال-سید و ال-کاربوتلی (۲۰۱۰)	یکپارچه	SMILP	حداکثرسازی سود	تأمین‌کننده مراکز تولید توزیع‌کننده مراکز جداسازی قطعات مراکز توزیع مجدد مراکز دفع		✓	✓	
پیشوایی و همکاران (۲۰۱۰)	یکپارچه	MILP	حداقل‌سازی هزینه حداکثرسازی سطح رضایت مشتری	مراکز تولید مراکز جمع‌آوری/بازرسی مراکز توزیع مراکز دفع			✓	
امین و زانگ (۲۰۱۲)	یکپارچه	MILP	حداکثرسازی سود	-	✓		✓	
الومیور و همکاران (۲۰۱۲)	معکوس	MILP	حداکثرسازی سود	مراکز بازسازی مراکز بازرسی	✓	✓	✓	
امین و زانگ (۲۰۱۳)	یکپارچه	MILP	حداکثرسازی هزینه	مراکز تولید مراکز جمع‌آوری	✓		✓	
اشفری و همکاران (۲۰۱۴)	یکپارچه	SMILP	حداقل‌سازی هزینه حداکثرسازی رضایت مشتری	مراکز تولید/بازایی انبار منطقه‌ای مراکز بازرسی/جمع‌آوری	✓	✓		✓
زو و زو (۲۰۱۵)	معکوس	MINLP	حداقل‌سازی هزینه	ایستگاه‌های بازیافت کارخانه‌های بازیافت			✓	

پیشوایی و همکاران (۲۰۰۹) شبکه لجستیک یکپارچه‌ای شامل مراکز تولید، مراکز ترکیبی توزیع/جمع‌آوری و مراکز دفع را در نظر گرفته‌اند. این مدل تک‌دوره‌ای است و تولید از بازیافتی‌ها انجام می‌شود؛ اما در این مدل به‌علت تک‌دوره‌ای بودن، این مسئله مبهم است که آیا ابتدا محصولات از مواد اولیه تولید می‌شوند و به مشتری می‌رسند و سپس محصولات بازیافتی جمع‌آوری می‌شوند یا ابتدا محصولات بازیافتی جمع‌آوری و تولید از آنها انجام می‌شود، سپس به دست مشتری رسیده است. واضح است که در دنیای واقعی در دوره نخست محصول بازیافت‌شده وجود ندارد و باید در یک دوره قطعات اولیه خریداری، تولید انجام و تقاضای مشتری برآورده شود، سپس فرآیند جمع‌آوری، بازیافت و تولید مجدد از محصولات برگشتی انجام شود. همچنین فرآیند جمع‌آوری، بازیافت و تولید مجدد احتیاج به زمان دارد و با یک دوره، مدل با واقعیت تطبیق داده نمی‌شود. در

این مقاله مدل به صورت چند دوره‌ای در نظر گرفته شده است و این ابهام را برطرف کرده است. همچنین در دوره نخست، تولید از قطعات خریداری شده از تأمین‌کننده خارج انجام می‌شود و در دوره‌های بعدی از محصولات بازیافتی نیز برای تولید استفاده می‌شود؛ در این صورت در هزینه‌های خرید قطعات صرفه‌جویی می‌شود. در بخش ۲ ویژگی‌ها و نمادهای شبکه لجستیک یکپارچه ارائه شده است. در بخش ۳ مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط (MILP) ارائه و در بخش ۴ مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای و برنامه‌ریزی استوار گسترش داده شده است. در بخش ۵ آزمایش‌های محاسباتی انجام و در بخش ۶ نتیجه‌گیری بیان شده است.

### بیان مسئله و نمادها

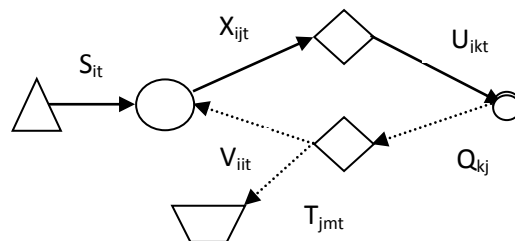
شبکه لجستیک یکپارچه بحث شده در این پژوهش شبکه‌ای تک‌محصولی و چندمرحله‌ای شامل تأمین، تولید، توزیع، مشتری، جمع‌آوری، بازیابی و مراکز دفع است. در این شبکه، تسهیلات پردازش ترکیبی (توزیع/جمع‌آوری) ارائه شده است و مزایای بیشتری نسبت به مراکز توزیع و جمع‌آوری جداگانه دارد. همچنین فرآیند بازیافت در مراکز تولید انجام می‌شود. در شکل ۱ ساختار شبکه نمایش داده شده است.



در جریان روبه‌جلو، ابتدا قطعات لازم از تأمین‌کننده خارجی تهیه و سپس محصولات جدید در مراکز تولید/بازیابی تولید و به مناطق مشتری از طریق مراکز پیوندی توزیع/جمع‌آوری برای مواجه‌شدن با تقاضا حمل می‌شوند. مناطق مشتری ثابت هستند. در جریان معکوس، محصولات برگشتی در مراکز توزیع/جمع‌آوری جمع و بعد از بازرسی، محصولات درخور بازیابی به تسهیلات بازیابی و محصولات اوراق به مراکز دفع حمل می‌شوند. پس از فرآیند بازیابی، محصولات بازیابی شده به عنوان محصولات جدید در جریان روبه‌جلو وارد می‌شوند و برای تأمین باقیمانده تقاضا، مراکز تولید از تأمین‌کننده میزان کمبود لازم را تهیه می‌کنند. فرض می‌شود برای تولید هر محصول به یک قطعه (که از تأمین‌کننده خریداری شده یا از محصولات بازیافتی به دست آمده است) نیاز است.



یک درصد از پیش تعریف شده‌ای از تقاضای مشتری نیز به‌عنوان محصولات برگشتی فرض می‌شود ( $r_{kp}$ ) و مقداری از پیش تعریف شده‌ای برای نرخ متوسط دفع ( $s_p$ ) تعیین شده است. متغیرهای تصمیم این مدل شامل میزان تقاضای قطعات مراکز تولید از تأمین‌کننده و تعداد محصولات حمل‌شده در جریان روبه‌جلو و معکوس هستند که در شکل ۲ این متغیرها روی ساختار شبکه نمایش داده شده‌اند. همچنین متغیرهای باینری شامل استقرار مراکز تولید، مراکز پیوندی و مراکز دفع هستند.



شکل ۲- جریان شبکه لجستیک همراه با نمادها

جدول ۲- نمادهای مجموعه‌های شبکه لجستیک

مجموعه‌ها	
I	مجموعه مکان‌های بالقوه مرکز تولید/بازیابی $i \in I$
J	مجموعه مکان‌های بالقوه مرکز توزیع - جمع‌آوری ترکیبی $j \in J$
K	مکان‌های ثابت مناطق مشتری $k \in K$
M	مجموعه مکان‌های بالقوه مرکز دفع $m \in M$
T	مجموعه دوره‌های افق برنامه‌ریزی $t \in T$

جدول ۳- نمادهای پارامترهای شبکه لجستیک

پارامترها	
$d_{kt}$ : تقاضای محل مشتری $k$ در دوره $t$	$p_{jm}$ : هزینه حمل هر واحد از محصول اوراق از مرکز پیوندی $j$ به مرکز دفع $m$
$r_{kt}$ : نرخ برگشت محصولات استفاده‌شده از محل مشتری $k$ در دوره $t$	$\rho_i$ : هزینه ساخت/بازیابی هر واحد محصول در مرکز تولید $i$
$s_t$ : کسر میانگین دفع در دوره $t$	$\varphi_j$ : هزینه پردازش هر واحد محصول در واحد پیوندی $j$
$f_i$ : هزینه ثابت استقرار بازکردن مرکز تولید/بازیابی $i$	$\eta_m$ : هزینه دفع هر واحد محصول در واحد دفع $m$
$g_j$ : هزینه ثابت استقرار بازکردن مرکز پیوندی $j$	$\tau_i$ : هزینه جریمه هر واحد از ظرفیت استفاده‌نشده در مرکز تولید/بازیابی $i$
$h_m$ : هزینه ثابت استقرار بازکردن مرکز دفع $m$	$\beta_j$ : هزینه جریمه هر واحد از ظرفیت استفاده‌نشده در مرکز پیوندی $j$
$\mu$ : هزینه خرید هر واحد قطعه از تأمین‌کننده	$\alpha_m$ : هزینه جریمه هر واحد از ظرفیت استفاده‌نشده در مرکز دفع $m$
$c_i$ : هزینه حمل هر واحد قطعه از تأمین‌کننده به تولیدکننده $i$	$cw_i$ : ظرفیت تولید برای واحد تولید/بازیابی $i$
$c_{ij}$ : هزینه حمل و نقل هر واحد محصول از واحد تولید/بازیابی $i$ به مرکز پیوندی $j$	$cy_j$ : ظرفیت نگهداری محصول در جریان روبه‌جلو در مرکز پیوندی $j$
$a_{jk}$ : هزینه حمل و نقل هر واحد محصول از واحد پیوندی $j$ به مشتری $k$	$cZ_m$ : ظرفیت نگهداری محصول اوراق در مرکز دفع $m$
$b_{kj}$ : هزینه حمل و نقل هر واحد محصول برگشتی از مشتری $k$ به مرکز پیوندی $j$	$cyr_j$ : ظرفیت نگهداری محصولات برگشتی در جریان معکوس در مرکز پیوندی $j$
$e_{ji}$ : هزینه حمل و نقل هر واحد محصول قابل بازیابی از واحد پیوندی $j$ به مرکز بازیابی $i$	$cwr_i$ : ظرفیت بازیابی برای واحد تولید/بازیابی $i$

جدول ۴- نمادهای متغیرهای شبکه لجستیک

متغیرها	
$S_{it}$ : میزان تقاضای قطعات مرکز تولید $i$ از تأمین کننده در دوره $t$	$Q_{kjt}$ : تعداد محصولات برگشتی حمل شده از مشتری به مرکز پیوندی در دوره $t$
$X_{ijt}$ : تعداد محصولات حمل شده از مرکز تولید/بازیابی به مرکز پیوندی در دوره $t$	$V_{jit}$ : تعداد محصولات قابل بازیابی حمل شده از مرکز پیوندی به مرکز تولید/بازیابی در دوره $t$
$U_{jkt}$ : تعداد محصولات حمل شده از مرکز پیوندی به مشتری در دوره $t$	$T_{jmt}$ : تعداد محصول اوراق حمل شده مرکز پیوندی به مرکز دفع در دوره $t$
$W_i$ : اگر مکان $i$ به مرکز تولید/بازیابی تخصیص یابد ۱ و درغیراین صورت صفر	
$Y_j$ : اگر مکان $j$ به مرکز پیوندی تخصیص یابد ۱ و درغیراین صورت صفر	
$Z_m$ : اگر مکان $m$ به مرکز دفع تخصیص یابد ۱ و درغیراین صورت صفر	

### ارائه مدل

مدل ارائه شده از نوع MILP است و هزینه‌های مربوط به لجستیک را در بر می‌گیرد. هزینه‌های ثابت شامل هزینه‌های استقرار مراکز تولید/بازیابی، ترکیبی و دفع (FC)، هزینه‌های متغیر شامل هزینه‌های حمل و نقل، خرید، تولید، نگهداری، پردازش و دفع (VC) و هزینه‌های جریمه ظرفیت استفاده نشده مراکز (PC) به صورت زیر است.

$$FC = \sum_i f_i W_i + \sum_j g_j Y_j + \sum_m h_m Z_m \quad (1)$$

$$VC = \sum_i \sum_t (\mu + c_i) S_{it} + \sum_i \sum_j \sum_t (\rho_i + c_{ij}) X_{ijt} + \sum_j \sum_k \sum_t (\varphi_j + a_{jk}) U_{jkt} + \sum_k \sum_j \sum_{t \neq 1} (\varphi_j + b_{kj}) Q_{kjt} + \sum_j \sum_i \sum_t (\rho_i + e_{ji}) V_{jit} + \sum_j \sum_m \sum_{t \neq 1} (\eta_m + p_{jm}) T_{jmt} \quad (2)$$

$$PC = \sum_m \alpha_m \sum_{t \neq 1} (Z_m c Z_m - \sum_j T_{jmt}) + \sum_i \tau_i [\sum_t (W_i c w_i - \sum_j X_{ijt}) + \sum_{t \neq 1} (W_i c w r_i - \sum_j V_{jit})] + \sum_j \beta_j [\sum_t (Y_j c y_j - \sum_k U_{jkt}) + \sum_{t \neq 1} (Y_j c y r_j - \sum_k Q_{kjt})] \quad (3)$$

هزینه‌های حمل و نقل بین تسهیلات از ضرب هزینه حمل یک واحد محصول در هر واحد فاصله (برای مثال یک کیلومتر) محاسبه می‌شود. محدودیت‌ها به صورت کلی، جریان محصول در شبکه و ظرفیت مراکز را نشان می‌دهند. مدل براساس نمادهای تعریف شده در جداول ۳، ۴ و ۵ به صورت زیر فرموله شده است.

$$\text{Min FC+VC+PC} \quad (۴)$$

s.t.

$$\sum_j U_{jkt} \geq d_{kt} \quad \forall k, t \quad (۵)$$

$$\sum_j Q_{kjt} \geq r_{k(t-1)} d_{k(t-1)} \quad \forall k, t \quad (۶)$$

$$\sum_i X_{ijt} - \sum_k U_{jkt} = 0 \quad \forall j, t \quad (۷)$$

$$\sum_i V_{jit} - (1-s_t) \sum_k Q_{kjt} = 0 \quad \forall j, t > 1 \quad (۸)$$

$$\sum_m T_{jmt} - s_t \sum_k Q_{kjt} = 0 \quad \forall j, t > 1 \quad (۹)$$

$$\sum_j V_{jit} - \sum_j X_{ij(t-1)} \leq 0 \quad \forall i, t > 1 \quad (۱۰)$$

$$\sum_j X_{ijt} \leq cw_i W_i \quad \forall i, t \quad (۱۱)$$

$$\sum_i X_{ijt} \leq cy_j Y_j \quad \forall j, t \quad (۱۲)$$

$$\sum_k Q_{kjt} \leq cy_r Y_j \quad \forall j, t > 1 \quad (۱۳)$$

$$\sum_j V_{jit} \leq cwr_i W_i \quad \forall i, t > 1 \quad (۱۴)$$

$$\sum_j T_{jmt} \leq cz_m Z_m \quad \forall m, t > 1 \quad (۱۵)$$

$$\sum_j X_{ijt} \leq S_{it} \quad \forall i, t = 1 \quad (۱۶)$$

$$\sum_j X_{ijt} - \sum_j V_{jit} \leq S_{it} \quad \forall i, t > 1 \quad (۱۷)$$

$$W_i, Y_j, Z_m \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, m \quad (۱۸)$$

$$S_{it}, X_{ijt}, U_{jkt}, V_{jit}, Q_{kjt}, T_{jmt} \geq 0 \quad \forall i, j, k, m, t \quad (۱۹)$$

محدودیت (۵) جریان تأمین تقاضای مشتریان را نشان می‌دهد. محدودیت (۶) بیان می‌کند که محصولات برگشتی از مشتریان جمع‌آوری می‌شوند. محدودیت‌های (۷) تا (۱۰) تعادل جریان را نشان می‌دهد. محدودیت‌های (۱۱) تا (۱۵)، محدودیت‌های ظرفیت مراکز تولید، مراکز پیوندی در حالت روبه‌جلو و معکوس و مراکز دفع هستند. محدودیت (۱۶) جریان تعداد قطعات خریداری شده از تأمین‌کننده در دوره نخست را نشان می‌دهد. محدودیت (۱۷) نیز بیان می‌کند که در دوره‌های دوم به بعد از قطعات بازیافتی تولید کرده است و در صورت نیاز از تأمین‌کننده نیز خریداری می‌شود. محدودیت‌های (۱۸) و (۱۹) نیز وضعیت متغیرهای تصمیم را نشان می‌دهند.

به‌طور کلی، برخی از پارامترها در طراحی شبکه لجستیک مانند تقاضای مشتریان کاملاً نامشخص است. در دهه اخیر نوسانات قیمت سوخت به‌طور درخور توجهی هزینه‌های حمل و نقل را متأثر کرده است و به نظر می‌رسد این وضعیت نامشخص در قیمت سوخت با توجه به بحران‌های اقتصادی همچنان ادامه دارد. همچنین تولیدکننده نمی‌داند هزینه خرید قطعات چگونه تغییر می‌کند؛ به این ترتیب هزینه‌های حمل و نقل و سایر هزینه‌های متغیر نیز در بلندمدت نامشخص‌اند. برای داشتن شبکه لجستیکی کارا در شرایط عدم قطعیت در تقاضا، کمیت و کیفیت محصولات بازگشتی و هزینه‌های متغیر، مدل بهینه‌سازی تصادفی برای مدل پیشنهادی فوق توسعه یافته است.

### ارائه مدل در حالت عدم قطعیت

در برنامه‌ریزی ریاضی معمولاً مسائل با پیش فرض قطعی بودن داده‌ها حل می‌شوند؛ درحالی‌که در دنیای واقعی بیشتر داده‌ها دچار عدم قطعیت هستند. پیش فرض اصلی برنامه‌ریزی‌های ریاضی، توسعه مدل براساس داده‌های صریحاً معین و برابر با مقداری اسمی است؛ در نتیجه در مسائل بهینه‌سازی نمی‌توان از این مطلب چشم‌پوشی کرد؛ زیرا گاهی یک عدم قطعیت ناچیز در داده‌ها حل بهینه موجود را کاملاً بی‌معنی می‌کند. در حوزه بهینه‌سازی ریاضی، برنامه‌ریزی تصادفی برای مواجهه با وجود عدم قطعیت به کار می‌رود. برای مدل‌سازی مسئله در شرایط عدم قطعیت، ابتدا رویکرد بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای و سپس برنامه‌ریزی استوار به کار رفته است. در این مدل‌ها  $\Omega$  مجموعه سناریوهای ممکن و  $\theta$  یک سناریوی خاص است.

مدل برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای<sup>۲۸</sup>: علاوه بر مجموعه‌هایی که در جدول ۲ بیان شد، مجموعه زیر نیز به مجموعه‌ها اضافه می‌شود.

$$\Omega: \text{مجموعه سناریوهای بالقوه } \theta \in \Omega$$

بعضی از پارامترهای تعریف‌شده در جدول ۳ به صورت بیان‌شده در جدول ۵ تغییر کرده است و سایر پارامترها همان پارامترهای بیان‌شده در بخش ۲ هستند. متغیرهای تغییر کرده نیز در جدول ۶ بیان شده‌اند.

جدول ۵- نمادهای پارامترهای مدل برنامه‌ریزی تصادفی

پارامترها	
$d_{kt\theta}$ : تقاضای محل مشتری $k$ در دوره $t$ برای سناریوی $\theta$	$e_{ji\theta}$ : هزینه حمل و نقل هر واحد محصول درخور بازیابی از واحد پیوندی $i$ به مرکز بازیابی $j$ برای سناریوی $\theta$
$r_{kt\theta}$ : نرخ برگشت محصولات استفاده‌شده از محل مشتری $k$ در دوره $t$ برای سناریوی $\theta$	$p_{jm\theta}$ : هزینه حمل هر واحد از محصول اوراق از مرکز پیوندی $j$ به مرکز دفع $m$ برای سناریوی $\theta$
$s_{t\theta}$ : کسر میانگین دفع در دوره $t$ برای سناریوی $\theta$	$\rho_{i\theta}$ : هزینه ساخت/بازیابی هر واحد محصول در مرکز تولید $i$ برای سناریوی $\theta$
$\mu_{\theta}$ : هزینه خرید هر واحد قطعه از تأمین‌کننده برای سناریوی $\theta$	$\varphi_{j\theta}$ : هزینه پردازش هر واحد محصول در واحد پیوندی $j$ برای سناریوی $\theta$
$c'_{i\theta}$ : هزینه حمل هر واحد قطعه از تأمین‌کننده $i$ به تولیدکننده $i$ برای سناریوی $\theta$	$\eta_{m\theta}$ : هزینه دفع هر واحد محصول در واحد دفع $m$ برای سناریوی $\theta$
$c_{ij\theta}$ : هزینه حمل و نقل هر واحد محصول از واحد تولید/بازیابی $i$ به مرکز پیوندی $j$ برای سناریوی $\theta$	$\tau_{i\theta}$ : هزینه جریمه هر واحد از ظرفیت استفاده‌نشده در مرکز تولید/بازیابی $i$ برای سناریوی $\theta$
$a_{jk\theta}$ : هزینه حمل و نقل هر واحد محصول از واحد پیوندی $j$ به مشتری $k$ برای سناریوی $\theta$	$\beta_{j\theta}$ : هزینه جریمه هر واحد از ظرفیت استفاده‌نشده در مرکز پیوندی $j$ برای سناریوی $\theta$
$b_{kj\theta}$ : هزینه حمل و نقل هر واحد محصول برگشتی از مشتری $k$ به مرکز پیوندی $j$ برای سناریوی $\theta$	$\alpha_{m\theta}$ : هزینه جریمه هر واحد از ظرفیت استفاده‌نشده در مرکز دفع $m$ برای سناریوی $\theta$
$\pi_{\theta}$ : احتمال سناریوی $\theta$	

جدول ۶- نمادهای متغیرهای مدل برنامه‌ریزی تصادفی

متغیرها	
$S_{it\theta}$ : میزان تقاضای قطعات مرکز تولید $i$ از تأمین‌کننده در دوره $t$ برای سناریوی $\theta$	$Q_{kjt\theta}$ : تعداد محصولات برگشتی حمل‌شده از مشتری به مرکز پیوندی در دوره $t$ برای سناریوی $\theta$
$X_{ijt\theta}$ : تعداد محصولات حمل‌شده از مرکز تولید/بازیابی به مرکز پیوندی در دوره $t$ برای سناریوی $\theta$	$V_{j\theta}$ : تعداد محصولات درخور بازیابی حمل‌شده از مرکز پیوندی به مرکز تولید/بازیابی در دوره $t$ برای سناریوی $\theta$
$U_{jkt\theta}$ : تعداد محصولات حمل‌شده از مرکز پیوندی به مشتری در دوره $t$ برای سناریوی $\theta$	$T_{jmt\theta}$ : تعداد محصول اوراق حمل‌شده مرکز پیوندی به مرکز دفع در دوره $t$ برای سناریوی $\theta$

$$FC = \sum_i f_i W_i + \sum_j g_j Y_j + \sum_m h_m Z_m \quad (20)$$

$$VC_\theta = \sum_\theta \pi_\theta \{ \sum_i \sum_t (\mu_\theta + c_{i\theta}) S_{it\theta} + \sum_i \sum_j \sum_t (\rho_{i\theta} + c_{ij\theta}) X_{ijt\theta} + \sum_j \sum_k \sum_t (\varphi_{j\theta} + a_{jk\theta}) U_{jkt\theta} + \sum_k \sum_j \sum_{t \neq 1} (\varphi_{j\theta} + b_{kj\theta}) Q_{kjt\theta} + \sum_j \sum_i \sum_t (\rho_{i\theta} + e_{ji\theta}) V_{ji\theta} + \sum_j \sum_m \sum_{t \neq 1} (\eta_{m\theta} + p_{jm\theta}) T_{jmt\theta} \} \quad (21)$$

$$PC_\theta = \sum_\theta \pi_\theta \{ \sum_m \alpha_{m\theta} \sum_{t \neq 1} (Z_m c Z_m - \sum_j T_{jmt\theta}) + \sum_i \tau_{i\theta} [ \sum_t (W_i c w_i - \sum_j X_{ijt\theta}) + \sum_{t \neq 1} (W_i c w r_i - \sum_j V_{ji\theta}) ] + \sum_j \beta_{j\theta} [ \sum_t (Y_j c y_j - \sum_k U_{jkt\theta}) + \sum_{t \neq 1} (Y_j c y r_j - \sum_k Q_{kjt\theta}) ] \} \quad (22)$$

$$Min \quad FC + VC_\theta + PC_\theta \quad (23)$$

s.t.

$$\sum_j U_{jkt\theta} \geq d_{kt\theta} \quad \forall k, t, \theta \quad (24)$$

$$\sum_j Q_{kjt\theta} \geq r_{k(t-1)\theta} d_{k(t-1)\theta} \quad \forall k, t, \theta \quad (25)$$

$$\sum_i X_{ijt\theta} - \sum_k U_{jkt\theta} = 0 \quad \forall j, t, \theta \quad (26)$$

$$\sum_i V_{ji\theta} - (1 - s_{i\theta}) \sum_k Q_{kjt\theta} = 0 \quad (27)$$

$$\forall j, t > 1, \theta$$

$$\sum_m T_{jmt\theta} - s_{i\theta} \sum_k Q_{kjt\theta} = 0 \quad \forall j, t > 1, \theta \quad (28)$$

$$\sum_j V_{ji\theta} - \sum_j X_{ij(t-1)\theta} \leq 0 \quad \forall i, t > 1, \theta \quad (29)$$

$$\sum_j X_{ijt\theta} \leq c w_i W_i \quad \forall i, t, \theta \quad (30)$$

$$\sum_i X_{ijt\theta} \leq c y_j Y_j \quad \forall j, t, \theta \quad (31)$$

$$\sum_k Q_{kjt\theta} \leq c_{yr_j} Y_j \quad \forall j, t > 1, \theta \quad (32)$$

$$\sum_j V_{jit\theta} \leq c_{wr_i} W_i \quad \forall i, t > 1, \theta \quad (33)$$

$$\sum_j T_{jmt\theta} \leq c_{z_m} Z_m \quad \forall m, t > 1, \theta \quad (34)$$

$$\sum_j X_{ijt\theta} \leq S_{it\theta} \quad \forall i, t = 1, \theta \quad (35)$$

$$\sum_j X_{ijt\theta} - \sum_j V_{jit\theta} \leq S_{it\theta} \quad \forall i, t > 1, \theta \quad (36)$$

$$W_i, Y_j, Z_m \in \{0, 1\} \quad \forall i, j, m \quad (37)$$

$$S_{it\theta}, X_{ijt\theta}, U_{jkt\theta}, V_{jit\theta}, Q_{kjt\theta}, T_{jmt\theta} \geq 0 \quad (38)$$

$$\forall i, j, k, m, t, \theta$$

برای حل مدل بهینه‌سازی تصادفی دو مرحله‌ای از سه رویکرد WS<sup>۲۹</sup> (امید ریاضی جواب قطعی سناریوها)، HN<sup>۳۰</sup> (امید ریاضی جواب سناریوها با در نظر گرفتن تسهیلات استقرار یافته در حالت سناریویی) و EEV<sup>۳۱</sup> (امید ریاضی جواب سناریوها با در نظر گرفتن تسهیلات استقرار یافته در سناریوی مرجع) استفاده شده است. در حل مسئله با پارامترهای غیرقطعی، حل مسئله با رویکرد HN سخت‌تر از دو رویکرد WS و EEV است؛ زیرا در این حالت باید همه سناریوها با هم در نظر گرفته شوند. در بسیاری از موارد حل مدل در چنین شرایطی ناممکن می‌شود. برای پاسخ به چنین شرایطی ارائه حد پایین و بالا برای  $Z_{HN}$  بسیار راه‌گشا است. همچنین کاهش سناریو رویکردی کاربردی است. با فرض داشتن  $Z_{WS}$  و  $Z_{HN}$  و  $Z_{EEV}$  باید رابطه زیر برقرار باشد.

$$Z_{WS} \leq Z_{HN} \leq Z_{EEV}$$

به بیان ساده‌تر وقتی اطلاعات کامل در اختیار است ( $Z_{WS}$ ) جواب‌ها بهتر از وقتی است که اطلاعات آینده مشخص نیست ( $Z_{HN}$ ). همچنین وقتی در تصمیم‌گیری مرحله نخست همه سناریوها دخیل هستند، جواب به‌دست آمده بهتر از حالتی است که تنها براساس میانگین پارامترها عمل شود ( $Z_{EEV}$ ). همچنین در این مقاله از شاخص EVPI<sup>۳۲</sup> استفاده شده است که نشان می‌دهد جمع‌آوری اطلاعات آینده چقدر اهمیت دارد.

$$EVPI = Z_{HN} - Z_{WS}$$

شاخص VSS<sup>۳۳</sup> اهمیت استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی را نشان می‌دهد.

$$VSS = Z_{EEV} - Z_{HN}$$

**مدل برنامه‌ریزی تصادفی استوار<sup>۳۴</sup>:** هنگامی که در مسئله برنامه‌ریزی ریاضی برخی پارامترهای تابع هدف غیرقطعی هستند، به دست آوردن مقدار بهینه آسان نیست. همچنین اگر محدودیت‌ها دارای پارامترهای غیرقطعی باشند، هنگام تحقق برخی از مقادیر واقعی پارامترها، ممکن است که این محدودیت‌ها برآورده نشوند. بهینه‌سازی استوار روشی برای برخورد با عدم قطعیت پارامترهای غیرقطعی مسائل بهینه‌سازی است که اخیراً توسعه یافته است. این رویکرد به دنبال جواب‌های نزدیک به بهینه‌ای است که با احتمال بالایی موجه باشند. به عبارت دیگر تصمیم استوار تصمیمی است که نسبت به عدم قطعیت محیط تحمل دارد و عملکرد ناشی از آن حداقل نوسان را داشته باشد (اشتیاقی و همکاران (۱۳۹۴)). طبق روش بهینه‌سازی استوار ملوی<sup>۳۵</sup> و همکاران (۱۹۹۵)، یک جواب برای مسئله بهینه‌سازی، جوابی استوار است اگر دارای استواری شدنی بودن و استواری بهینگی باشد.

ملوی و همکاران (۱۹۹۵)، براساس مدل پیشنهادی خود که ترکیب برنامه‌ریزی آرمانی و توصیف داده‌های مسئله برمبنای سناریو است، تعریفی برای پاسخ استوار و مدل استوار ارائه کرده است. براساس تعریف ملوی، اگر پاسخ حاصل از مدل بهینه‌سازی برای همه سناریوهای در نظر گرفته شده برای داده‌های ورودی بتواند نزدیک به بهینه باقی بماند این پاسخ استوار است و در صورتی که مدل بهینه‌سازی نیز برای تمامی داده‌ها در شرایط کلیه سناریوهای در نظر گرفته شده تقریباً عملی باشد، مدل استوار نامیده می‌شود.

بهینه‌سازی استوار شامل دو محدودیت متمایز است؛ محدودیت ساختاری و محدودیت کنترل. محدودیت‌های ساختاری به دنبال مفهوم برنامه‌ریزی خطی هستند و داده‌های ورودی آنها بدون هرگونه تغییری است؛ درحالی‌که محدودیت‌های کنترل یک محدودیت کمکی متأثر از داده‌های ورودی است. فرم کلی مدل استوار به صورت زیر است.

$$\text{Min } c^T x + d^T y \quad (39)$$

s.t.

$$Ax = b \quad (40)$$

$$Bx + Cy = e \quad (41)$$

$$x, y \geq 0 \quad (42)$$

در این مدل  $x \in \mathcal{R}^{n_1}$  برداری از متغیرهای طراحی و  $y \in \mathcal{R}^{n_2}$  برداری از متغیرهای کنترل است. محدودیت (۴۰) محدودیت ساختاری و ضرایب آن ثابت و بدون تغییر است؛ درحالی‌که معادله (۴۱) محدودیت کنترلی است و ضرایب آن در معرض تغییر قرار دارند. محدودیت (۴۲) غیرمنفی بودن بردارها را برآورده می‌کند. مجموعه سناریوها عبارت است از  $\Omega = \{1, 2, \dots, N\}$ . در شرایط هر سناریو  $\theta \in \Omega$  ضرایب مرتبط با محدودیت‌های کنترل با احتمال ثابت  $\pi_\theta$  (که نشان‌دهنده احتمالی است که سناریو  $\theta$  اتفاق می‌افتد و  $\sum_{\theta=1}^N \pi_\theta = 1$ ) به  $\{d_\theta, B_\theta, C_\theta, e_\theta\}$  تبدیل خواهد شد.

احتمال بسیار کمی وجود دارد که هر پاسخ به دست آمده از مدل بالا برای کلیه سناریوها عملی و موجه باشد؛ بنابراین لازم است مقداری برای تبادل میان پایداری مدل و پاسخ، در نظر گرفته شود. در مدل پیشنهادی ملوی امکان این تبادل منظور شده است. بردار  $\delta_\theta$  غیرعملی بودن مجاز را در محدودیت‌های کنترلی، در شرایط سناریوی  $\theta$  اندازه‌گیری می‌کند. سپس، یک مدل بهینه‌سازی استوار براساس مسئله برنامه‌ریزی ریاضی ارائه شده بالا (۳۹) - (۴۲) به صورت زیر مدل می‌شود.

$$\text{Min } \sigma(x, y_1, \dots, y_\theta) + \omega \rho(\delta_1, \dots, \delta_\theta) \quad (43)$$

s.t.

$$Ax = b \quad (44)$$

$$B_\theta x + C_\theta y_\theta + \delta_\theta = e \quad \forall \theta \in \Omega \quad (45)$$

$$x \geq 0, y_\theta \geq 0 \quad \forall \theta \in \Omega \quad (46)$$

نخستین عبارت تابع هدف استواری جواب و عبارت دوم استواری مدل را نشان می‌دهد. با در نظر گرفتن چندین سناریوی مختلف، تابع هدف  $\xi = c^T x + d^T y$ ، به یک متغیر تصادفی تبدیل می‌شود که در شرایط سناریو  $\theta \in \Omega$  با احتمال  $\pi_\theta$  دارای ارزشی معادل  $\xi_\theta = c^T x + d_\theta^T y_\theta$  می‌شود؛ بنابراین، دیگر یک گزینه برای تابع هدف

وجود ندارد. در فرمول برنامه‌ریزی خطی تصادفی مقدار متوسط  $\sigma(.) = \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} \xi_{\theta}$  استفاده شده است. برای دستیابی به یک جواب نزدیک به بهینه استوار، می‌توان عبارت نخست تابع هدف را به امید ریاضی و واریانس تبدیل کرد. به عبارت دیگر می‌توان مقدار مورد انتظار تابع هدف را در یک سناریو بهینه کرد و با حداقل کردن واریانس تابع هدف در سناریوهای مختلف، درجه ریسک مدل را کم کرد تا جواب به دست آمده استوار باشد. در این صورت می‌توان آن را به شکل زیر به امید ریاضی و واریانس تبدیل کرد.

$$\sigma(.) = \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} \xi_{\theta} + \lambda \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} (\xi_{\theta} - \sum_{\theta' \in \Omega} \pi_{\theta'} \xi_{\theta'})^2 \quad (47)$$

در رابطه (۴۷) پارامتر  $\lambda$  درجه ریسک‌پذیری مدل‌ساز را نشان می‌دهد. هرچه  $\lambda$  افزایش یابد راه‌حل نسبت به تغییرات داده‌ها در شرایط همه سناریوها کمتر حساس است. همان‌طور که مشخص است یک عبارت درجه دوم در تابع هدف وجود دارد که این محاسبات را دشوار می‌کند (لئونگ و همکاران، ۲۰۰۷). یو و لی (۲۰۰۰) به جای عبارت درجه دوم رابطه (۴۷) از یک عبارت قدرمطلق به صورت زیر استفاده کردند.

$$\sigma(.) = \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} \xi_{\theta} + \lambda \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} |\xi_{\theta} - \sum_{\theta' \in \Omega} \pi_{\theta'} \xi_{\theta'}| \quad (48)$$

برای حداقل کردن عبارت (۴۸) یو و لی (۲۰۰۰) روشی کارآمد ارائه کرده‌اند. این روش را ابتدا لی (۱۹۹۶) ارائه داده است که فرمولاسیون‌های متعددی برای حل مسائل برنامه‌ریزی ارائه کرده است. چارچوب مدل یو و لی برای به حداقل رساندن تابع هدف در (۴۹) طراحی شده است.

$$\begin{aligned} \text{Min } \sigma(.) &= \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} \xi_{\theta} + \lambda \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} [(\xi_{\theta} - \sum_{\theta' \in \Omega} \pi_{\theta'} \xi_{\theta'}) + 2\mathcal{G}_{\theta}] \\ \text{s.t.} \\ \xi_{\theta} - \sum_{\theta' \in \Omega} \pi_{\theta'} \xi_{\theta'} + \mathcal{G}_{\theta} &\geq 0 \\ \forall \theta \in \Omega \end{aligned} \quad (49)$$

متغیر  $\mathcal{G}_{\theta}$  برای تبدیل عبارت قدرمطلق در تابع هدف به عبارت خطی است. دومین عبارت در تابع هدف (۴۳)،  $\omega \rho(\delta_1, \dots, \delta_{\theta})$  تابع جریمه عملی نبودن است که برای جریمه کردن تخطی از محدودیت‌های کنترل تعدادی از سناریوها استفاده می‌شود تا از نقض شدن محدودیت‌ها در سناریوها جلوگیری و استواری مدل را تضمین کند. تخطی از محدودیت‌های کنترل بدین معناست که راه‌حل‌های غیرعملی برای یک مسئله در شرایط برخی از سناریوها به دست آمده است (ملوی و همکاران ۱۹۹۵). ضریب  $\omega$  نیز برای ارتباط بین استواری جواب و استواری مدل به کار می‌رود و مقدار آن را تصمیم‌گیر و مدل‌ساز تعیین می‌کند؛ بنابراین مدل نهایی به شکل زیر است.

$$\begin{aligned} \text{Min } \sigma(.) &= \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} \xi_{\theta} + \lambda \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} [(\xi_{\theta} - \sum_{\theta' \in \Omega} \pi_{\theta'} \xi_{\theta'}) + 2\mathcal{G}_{\theta}] \\ &+ \omega \sum_{\theta \in \Omega} \pi_{\theta} \delta_{\theta}^T \delta_{\theta} \end{aligned} \quad (51)$$



برای مدل ارائه شده در بخش ۳،  $\xi_\theta = FC + VC + PC$  به صورت  $\xi_\theta$  به صورت ۳، بخش ۳، به صورت  $\xi_\theta = FC + VC + PC$  در نظر گرفته می‌شود. متغیرهایی که به مدل اضافه می‌شوند در جدول ۸ نشان داده شده‌اند. در ادامه مدل بهینه‌سازی استوار بیان شده است که مشابه مدل برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای است؛ با این تفاوت که یک محدودیت جدید اضافه شده است و محدودیت‌های (۲۴)، (۲۵)، (۲۷) و (۲۸) به محدودیت‌های (۵۴) تا (۵۷) تغییر می‌کنند. سایر محدودیت‌ها همان متغیرهای بیان شده در مدل بهینه‌سازی دومرحله‌ای است.

جدول ۷- متغیرهای اضافه شده به مدل برای بهینه‌سازی استوار

متغیرها
$\delta d_{kt\theta}$ : میزان تقاضای ارضانگشته مشتری $k$ در دوره $t$ در شرایط سناریوی $\theta$
$\delta_{kt\theta}$ : میزان محصولات جمع‌آوری نشده مشتری $k$ در دوره $t$ در شرایط سناریوی $\theta$
$\delta_{jt\theta}$ : میزان محصولات ارسال نشده برای مراکز بازاریابی $j$ در دوره $t$ در شرایط سناریوی $\theta$

$$\text{Min } FC + VC_\theta + PC_\theta + \quad (52)$$

$$\lambda \sum_{\theta} \pi_{\theta} [(\xi_{\theta} - \sum_{\theta'} \pi_{\theta'} \xi_{\theta'}) + 2\vartheta_{\theta}] +$$

$$\omega \sum_{\theta} \pi_{\theta} (\sum_t (\sum_k \delta d_{kt\theta} + \delta_{kt\theta}) + \sum_j \delta_{jt\theta})$$

s.t.

$$\xi_{\theta} - (FC + VC_{\theta} + PC_{\theta}) + \vartheta_{\theta} \geq 0 \quad \forall \theta \quad (53)$$

$$\sum_j U_{jkt\theta} + \delta d_{kt\theta} \geq d_{kt\theta} \quad \forall k, t, \theta \quad (54)$$

$$\sum_j Q_{kjt\theta} + \delta_{kt\theta} \geq r_{k(t-1)\theta} d_{k(t-1)\theta} \quad \forall k, t, \theta \quad (55)$$

$$\sum_i V_{jit\theta} + \delta_{jt\theta} - (1 - s_{t\theta}) \sum_k Q_{kjt\theta} = 0 \quad \forall j, t > 1, \theta \quad (56)$$

$$\sum_m T_{jmt\theta} + \delta_{jt\theta} - s_{t\theta} \sum_k Q_{kjt\theta} = 0 \quad \forall j, t > 1, \theta \quad (57)$$

### مسائل عددی و ارزیابی مدل

در این قسمت برای ارزیابی عملکرد مدل پیشنهادی، مسئله آزمایشی انتخاب و برای آن چهار سناریو در نظر گرفته شده است. سناریوها در جدول ۸ بیان شده‌اند و نخستین سناریو که دارای احتمال بیشتری است به‌عنوان داده‌های اسمی برای مدل قطعی استفاده می‌شود. مسائل با نرم‌افزار GAMS حل شده‌اند. همان‌طور که در جدول ۱۰ نشان داده شده است نتایج مدل تصادفی با مدل قطعی مقایسه شده است. همچنین تعداد متغیر و محدودیت برای دو مدل پیچیدگی مدل تصادفی را نشان می‌دهد.

باز و بسته شدن یک مرکز، فرآیندهایی گران و وقت‌گیر هستند؛ در نتیجه تغییر محل تسهیلات در کوتاه‌مدت غیرممکن است (پیشوایی و همکاران ۲۰۰۹)؛ به همین دلیل محل و تعداد تسهیلات (متغیرهای باینری) تغییر نمی‌کند. برای ارزیابی عملکرد مدل قطعی و غیرقطعی در شرایط هر سناریو، ابتدا مدل‌ها با نرم‌افزار حل می‌شوند؛ سپس، جواب در شرایط همه سناریوها بررسی و در جدول ۱۱ گزارش می‌شود. درانتها از سناریوی مرجع معیاری برای مقایسات استفاده شده است. سناریو مرجع سناریویی دلخواه است و معمولاً از بین سناریوهای موجود انتخاب می‌شود. در انتخاب این سناریو به صورتی عمل می‌شود که همه سناریوهای دیگر با جواب حاصله موجه باشند؛ برای مثال سناریو با بیشترین تقاضا یا سناریو با میانگین تقاضا در نظر گرفته می‌شود. در این قسمت این سناریو به صورت امید ریاضی سناریوهای دیگر در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۸- سناریوهای ارائه شده برای ارزیابی مدل های برنامه ریزی تصادفی

ابعاد مسئله $i*j*k*m*t$	سناریو ( $\Omega$ )	احتمال سناریو ( $\pi_\theta$ )	تقاضا	نرخ مقدار برگشت	نرخ میانگین دفع	هزینه های متغیر
۱۰*۱۵*۱۰*۳*۲	۱	۰/۴	$unif [400, 520]$	$unif [0/7, 0/8]$	۰/۲	$unif [22, 38]$
	۲	۰/۲	$unif [300, 450]$	$unif [0/75, 0/85]$	۰/۲۵	$unif [40, 67]$
	۳	۰/۳	$unif [450, 600]$	$unif [0/8, 0/9]$	۰/۱۵	$unif [15, 30]$
	۴	۰/۱	$unif [350, 450]$	$unif [0/65, 0/75]$	۰/۱۸	$unif [55, 83]$
سناریوی مرجع			$unif [390, 523]$	$unif [0/735, 0/835]$	۰/۱۹۳	$unif [27, 46]$

جدول ۹- سهم هزینه های مختلف در تابع هدف

ابعاد مسئله $i*j*k*m*t$	تعداد متغیرها		تعداد محدودیت ها		سهم هزینه های ثابت در تابع هدف		سهم هزینه های حمل و نقل و پردازش در تابع هدف		سهم هزینه جرمه ظرفیت استفاده نشده در تابع هدف		سهم هزینه خرید در تابع هدف	
	تصادفی	قطعی	تصادفی	قطعی	تصادفی	قطعی	تصادفی	قطعی	تصادفی	قطعی	تصادفی	قطعی
۱۰*۱۵*۱۰*۳*۲	۳۸۶۰	۹۶۵	۷۹۲	۱۹۸	۰/۸۲۶	۰/۷۸۶	۰/۰۴۱	۰/۰۴۴	۰/۱۲۲	۰/۱۳۳	۰/۰۱۱	۰/۰۳۷

جدول ۱۰- نتایج محاسبات سناریوها در دو حالت قطعی و تصادفی

ابعاد مسئله $i*j*k*m*t$	سناریو ( $\Omega$ )	احتمال سناریو ( $\pi_\theta$ )	مقدار بهینه تابع هدف		استقرار مراکز	
			قطعی	سناریو	سناریو	قطعی
۱۰*۱۵*۱۰*۳*۲	۱	۰/۴	۳۶۰۸۷۵۳۶	۴۴۷۲۷۷۴۴	$W=[101111111]$ $Y=[0101101010101]$ $Z=[011]$	$W=[1010111100]$ $Y=[101101001011100]$ $Z=[010]$
	۲	۰/۲	۳۷۰۶۰۲۴۲		$W=[001110110]$ $Y=[111100001010110]$ $Z=[010]$	
	۳	۰/۳	۳۶۶۵۳۶۸۱		$W=[1111000110]$ $Y=[111100001110110]$ $Z=[010]$	
	۴	۰/۱	۴۱۴۱۴۶۹۰		$W=[0011010111]$ $Y=[011101001110000]$ $Z=[001]$	
سناریوی مرجع	-	-	۶۹۵۲۳۳۴۸		$W=[11111111111]$ $Y=[111111111111111]$ $Z=[111]$	

برای ارزیابی مدل بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای سه رویکرد WS (امید ریاضی جواب قطعی سناریوها)، HN (امید ریاضی جواب سناریوها با در نظر گرفتن تسهیلات استقرار یافته در حالت سناریویی) و EEV (امید ریاضی جواب سناریوها با در نظر گرفتن تسهیلات استقرار یافته در سناریوی مرجع) استفاده شده است. همان‌طور که از جدول ۱۲ مشخص است، رابطه زیر برقرار است.

$$Z_{WS} \leq Z_{HN} \leq Z_{EEV}$$

شاخص EVPI نشان‌دهنده اهمیت جمع‌آوری اطلاعات آینده است.

$$EVPI = Z_{HN} - Z_{WS} = ۶۴۱۱۶۹۸.۵$$

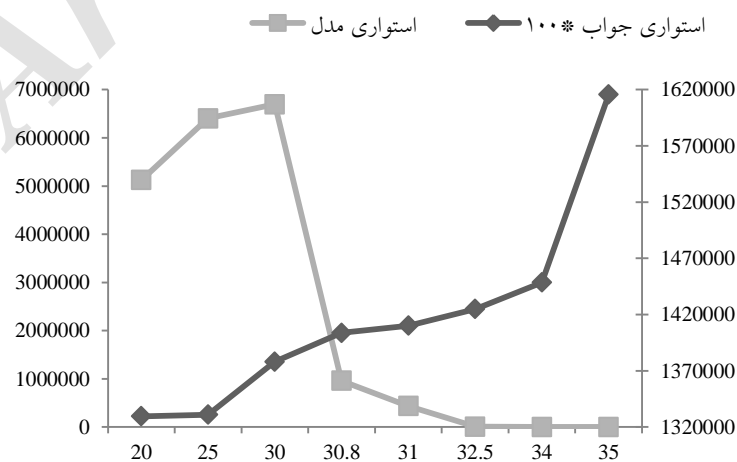
یعنی وقتی درباره آینده اطلاعاتی وجود ندارد، ۶۴۱۱۶۹۸,۵ واحد ضرر حاصل می‌شود. همچنین شاخص VSS اهمیت استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی را نشان می‌دهد.

$$VSS = Z_{EEV} - Z_{HN} = ۲۵.۰۹۹۲۴۷$$

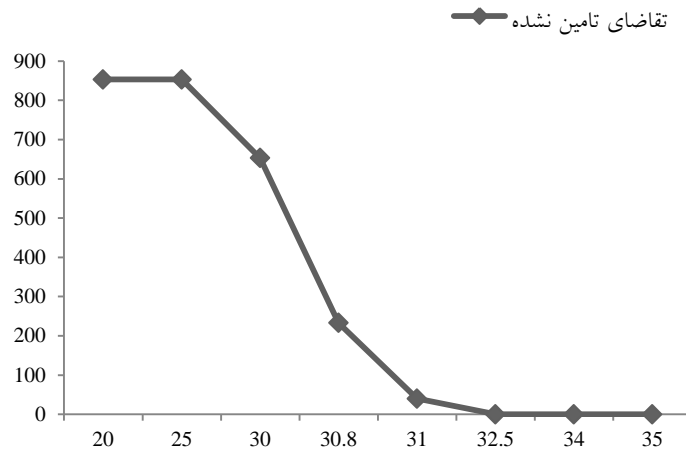
جدول ۱۱- محاسبات شرایط مسئله دومرحله‌ای

امید ریاضی مقادیر به دست آمده
$Z_{WS} = ۳۶.۸۷۵۳۶ * ۰/۴ + ۳۷.۶۰۲۴۲ * ۰/۲ + ۳۶.۶۵۳۶۸۱ * ۰/۳ + ۴۱.۴۱۴۶۹۰ * ۰/۱ = ۳۶۹۸۴۶۳۶$
$Z_{HN} = ۴۲.۴۲۹۲۰۵ * ۰/۴ + ۴۶.۷۵۴۹۳۷ * ۰/۲ + ۴۰.۲۰۲۷۸۸ * ۰/۳ + ۵۰.۱۲۸۲۸۸ * ۰/۱ = ۴۳۹۶۳۳۵$
$Z_{EEV} = ۶۶۹.۰۳۴۳۶ * ۰/۴ + ۷۳۸۳۶.۶۴ * ۰/۲ + ۶۳۲۹۴۲۴.۰ * ۰/۳ + ۷۹۷۸۷۲۲۴ * ۰/۱ = ۶۸۴۹۵۵۸۲$

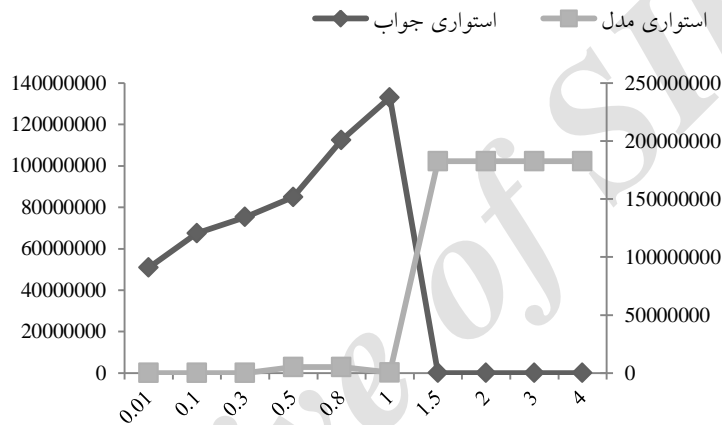
رویکرد بهینه‌سازی استوار به کمک مقدار جریمه  $\omega$  غیرموجهی در محدودیت‌های کنترلی را مجاز می‌کند. همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است هنگامی که  $\omega$  افزایش می‌یابد، کل هزینه مورد انتظار (استواری جواب) افزایش می‌یابد و کل جریمه مورد انتظار (استواری مدل) افت خواهد کرد؛ یعنی برای مقادیر بزرگ  $\omega$  راه حل به دست آمده از طریق افزایش در هزینه کل، تقریباً عملی می‌شود؛ در این صورت کل جریمه مورد انتظار به صفر میل می‌کند؛ به عبارت دیگر عدم قطعیت در پارامترها پوشش یافته است و با توجه به شکل ۴ این مطلب مشخص است که میزان تقاضای تأمین نشده به صفر رسیده است.



شکل ۳- نمودار تبادل بین هزینه مورد انتظار و زیان مورد انتظار در مدل بهینه‌سازی استوار



شکل ۴- نمودار میزان تقاضای تأمین نشده در مدل بهینه‌سازی استوار



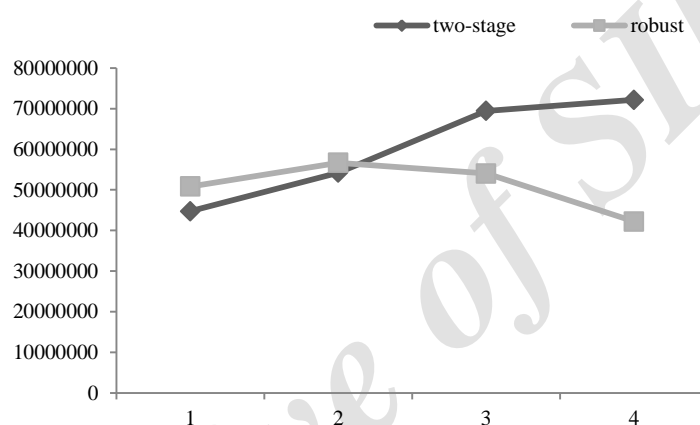
شکل ۵- نمودار تأثیر  $\lambda$  بر استواری مدل و استواری راه‌حل

مشاهده می‌شود که با افزایش  $\omega$  استواری مدل افت می‌کند، حال در شکل ۵ نشان داده شده است که با افزایش  $\lambda$  لزوماً استواری مدل کاهش نمی‌یابد و لزوماً استوار راه‌حل افزایش نیافته است. از  $\lambda = 2$  به بعد استواری مدل و راه‌حل نسبت به تغییرات  $\lambda$  بی‌تفاوت شده‌اند. همچنین در  $\lambda = 1$  استواری مدل در حداقل مقدار خود است؛ به عبارت دیگر تابع جریمه نزدیک به صفر و تقاضای تأمین نشده در حداقل مقدار خود است و استواری راه‌حل نیز در این نقطه بیشترین مقدار خود را می‌گیرد؛ به همین علت  $\lambda = 1$  را برای محاسبات در نظر گرفته شده است.

### نتیجه‌گیری

در این مقاله، شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته شامل تأمین‌کننده خارجی، مراکز تولید/بازیابی، مراکز ترکیبی توزیع/جمع‌آوری، مراکز دفع و مشتریان ارائه شده است. مدلی که پیشوایی و همکاران (۲۰۰۹) ارائه داده‌اند به صورت تک‌دوره‌ای بوده است. جریان شبکه به این صورت است که از محصولات برگشتی تولید انجام و تقاضا تأمین می‌شود. واضح است که با یک دوره جریان تولید از محصولات برگشتی به خوبی نشان داده نمی‌شود و مسئله مبهم می‌شود. در این مقاله این مدل به صورت چنددوره‌ای توسعه داده شده و برای دقیق‌تر شدن برآورد هزینه و

تأمین میزان کمبود قطعات برای تأمین تقاضا، تأمین‌کننده نیز در شبکه در نظر گرفته شده است. در این مدل پارامترهای تقاضا، کمیت و کیفیت محصولات برگشتی و هزینه‌های متغیر دارای عدم قطعیت هستند. برای ارزیابی مدل در شرایط عدم قطعیت از روش‌های بهینه‌سازی تصادفی دومرحله‌ای و بهینه‌سازی استوار بهره گرفته شده است. با استفاده از شاخص‌های EVPI و VSS اهمیت جمع‌آوری اطلاعات آینده و اهمیت استفاده از برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای محاسبه شده است. در نهایت مدل بهینه‌سازی دومرحله‌ای با بهینه‌سازی استوار مقایسه و نتایج آن در نمودار شکل ۶ بیان شده است. در این نمودار ۴ نوع احتمال مختلف برای سناریوها در نظر گرفته شده است؛ یعنی مجموعه احتمالات (۱، ۳ و ۰، ۲ و ۰، ۴)، (۲، ۲ و ۰، ۱ و ۰، ۵)، (۱، ۲ و ۰، ۱ و ۰، ۶) و (۱، ۱ و ۰، ۱ و ۰، ۷)، و همان‌طور که مشاهده می‌شود هرچه پراکندگی احتمالات سناریوها بیشتر شود پاسخ مدل استوار بهتر از پاسخ مدل دومرحله‌ای است و این کارایی بهتر مدل استوار را نشان می‌دهد.



شکل ۶- مقایسه کارایی مدل بهینه‌سازی تصادفی و استوار در شرایط احتمالات متفاوت برای سناریوها

برای پژوهش‌های آینده، مدل شبکه لجستیک با در نظر گرفتن موجودی و سطوح ظرفیت متفاوت برای مراکز توسعه داده شود. همچنین با بزرگ شدن ابعاد مسئله، زمان حل طولانی می‌شود و استفاده از روش‌های فرا ابتکاری مفید است.

## References

- Albadvi, A., Nakhaei Kamalabadi, I. & Eshtiaghy, F. (2015). A robust optimization approach to optimal allocation of marketing budgets in maximizing the CE. *Novel Marketing Research*, 5(1), 21-42.
- Amiri, A. (2006). Designing a distribution network in a supply chain system: Formulation and efficient solution procedure. *European Journal of Operational Research*, 171(2), 567-576.
- Aras, N., Aksen, D., & Tanuğur, A. G. (2008). Locating collection centers for incentive-dependent returns under a pick-up policy with capacitated vehicles. *European Journal of Operational Research*, 191(3), 1223-1240.
- Ashfari, H., Sharifi, M., ElMekkawy, T. Y., & Peng, Q. (2014). Facility location decisions within integrated forward/reverse logistics under uncertainty. *Procedia CIRP*, 17, 606-610.

- Bashiri, M. & Shiri, M. (2015). Design of closed-loop supply chain network with considering of multi-part collection centers under uncertainty with two heuristic and meta-heuristic algorithms. *Industrial Engineering Researches In Production Systems*, 3(5), 27-41.
- El-Sayed, M., Afia, N., & El-Kharbotly, A. (2010). A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk. *Computers & Industrial Engineering*, 58(3), 423-431.
- Fleischmann, M., Krikke, H. R., Dekker, R., & Flapper, S. D. P. (2000). A characterisation of logistics networks for product recovery. *Omega*, 28(6), 653-666.
- Amin, S. H., & Zhang, G. (2012). An integrated model for closed-loop supply chain configuration and supplier selection: Multi-objective approach. *Expert Systems With Applications*, 39(8), 6782-6791.
- Amin, S. H., & Zhang, G. (2013). A multi-objective facility location model for closed-loop supply chain network under uncertain demand and return. *Applied Mathematical Modelling*, 37(6), 4165-4176.
- Jayaraman, V., Guide Jr, V. D. R., & Srivastava, R. (1999). A closed-loop logistics model for remanufacturing. *Journal of the Operational Research Society*, 50(5), 497-508.
- Jayaraman, V., Patterson, R. A., & Rolland, E. (2003). The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures. *European Journal of Operational Research*, 150(1), 128-149.
- Lee, D. H., & Dong, M. (2008). A heuristic approach to logistics network design for end-of-lease computer products recovery. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 44(3), 455-474.
- Lee, J. E., Gen, M., & Rhee, K. G. (2009). Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 56(3), 951-964.
- Leung, S. C., Tsang, S. O., Ng, W. L., & Wu, Y. (2007). A robust optimization model for multi-site production planning problem in an uncertain environment. *European Journal of Operational Research*, 181(1), 224-238.
- Li, H. L. (1996). An efficient method for solving linear goal programming problems. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 90(2), 465-469.
- Lieckens, K., & Vandaele, N. (2007). Reverse logistics network design with stochastic lead times. *Computers & Operations Research*, 34(2), 395-416.
- Listeş, O. (2007). A generic stochastic model for supply-and-return network design. *Computers & Operations Research*, 34(2), 417-442.
- Listeş, O., & Dekker, R. (2005). A stochastic approach to a case study for product recovery network design. *European Journal of Operational Research*, 160(1), 268-287.
- Lu, Z., & Bostel, N. (2007). A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities. *Computers & Operations Research*, 34(2), 299-323.
- Melo, M. T., Nickel, S., & Saldanha-Da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management—A review. *European Journal of Operational Research*, 196(2), 401-412.
- Mulvey, J., Vanderberri, R., & zenios, S. (1995). Robust Optimization of Large-Scale Systems. *Operations research*. *Operations Research*, 43, 264-281.
- Pishvae, M. S., Jolai, F., & Razmi, J. (2009). A stochastic optimization model for integrated forward/reverse logistics network design. *Journal of Manufacturing Systems*, 28(4), 107-114.
- Pishvae, M. S., Farahani, R. Z., & Dullaert, W. (2010). A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design. *Computers & Operations Research*, 37(6), 1100-1112.

- Salema, M. I. G., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2007). An optimization model for the design of a capacitated multi-product reverse logistics network with uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 179(3), 1063-1077.
- Tarokh, M.J., Goukeh, M. & Torabi, SH. (2012). General optimization model of reverse logistics network design under uncertainty. *Journal of Industrial Engineering*, 46(2), 159-173
- Yu, C. S., & Li, H. L. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International Journal of Production Economics*, 64(1-3), 385-397.
- Zhou, X., & Zhou, Y. (2015). Designing a multi-echelon reverse logistics operation and network: A case study of office paper in Beijing. *Resources, Conservation and Recycling*, 100, 58-69.
- Santoso, T., Ahmed, S., Goetschalckx, M., & Shapiro, A. (2005). A stochastic programming approach for supply chain network design under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 167(1), 96-115.
- Marufuzzaman, M., Eksioglu, S. D., & Huang, Y. E. (2014). Two-stage stochastic programming supply chain model for biodiesel production via wastewater treatment. *Computers & Operations Research*, 49, 1-17.
- Pan, F., & Nagi, R. (2010). Robust supply chain design under uncertain demand in agile manufacturing. *Computers & Operations Research*, 37(4), 668-683.

- 
- <sup>1</sup>- Jayaraman V.
  - <sup>2</sup>- Fleischmann M.
  - <sup>3</sup>- Mixed Integer Linear Programing
  - <sup>4</sup>- Listeş O.
  - <sup>5</sup>- Dekker
  - <sup>6</sup>- Salema M.
  - <sup>7</sup>- Lieckens K.
  - <sup>8</sup>- Vandaele N.
  - <sup>9</sup>- Lu Z.
  - <sup>10</sup>- Bostel N.
  - <sup>11</sup>- Lee D.
  - <sup>12</sup>- Dong M.
  - <sup>13</sup>- Aras N.
  - <sup>14</sup>- Aksen D.
  - <sup>15</sup>- Lee J.E.
  - <sup>16</sup>- Melo M.T
  - <sup>17</sup>- El-Sayed
  - <sup>18</sup>- El-Kharbotly
  - <sup>19</sup>- Close Loop Supply Chain
  - <sup>20</sup>- Zhang
  - <sup>21</sup>- Reverse Logistics
  - <sup>22</sup>- Zhou
  - <sup>23</sup>- Santoso T.
  - <sup>24</sup>- Marufuzzaman M.
  - <sup>25</sup>- Pan F.
  - <sup>26</sup>- Nagi R.
  - <sup>27</sup>- Stochastic Mixed Integer Linear Programing
  - <sup>28</sup>- Two Stage Stochastic Programing
  - <sup>29</sup>- Wait and See Solution
  - <sup>30</sup>- Here and Now Solution
  - <sup>31</sup>- Expected result of using the EV
  - <sup>32</sup>- Expected Value of Perfect Information
  - <sup>33</sup>- Value of Stochastic Solution
  - <sup>34</sup>- Robust Stochastic Programming
  - <sup>35</sup>- Mulvey J.