

## طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن ریسک اختلال منبع‌یابی و زمان تولید

مسعود ربانی<sup>۱\*</sup>، عرفان عسگری<sup>۱</sup>، علی قوامی‌فر<sup>۲</sup> و حامد فرخی‌اصل<sup>۲</sup>

۱. دانشکده مهندسی صنایع، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران، تهران

۲. دانشکده مهندسی صنایع، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

(دریافت مقاله: ۱۳۹۵/۱۰/۱۰ - دریافت نسخه نهایی: ۱۳۹۷/۰۳/۲۸)

**چکیده** - در دهه‌های اخیر، مواد خام و منابع از جمله موضوع‌های قابل توجه محققان بوده‌اند، به عبارت دیگر، نقش مهمی در صنایع تولیدی و یا سازمان‌های خدماتی دارند. از سوی دیگر، جمعیت هر روز افزایش می‌یابد و افزایش جمعیت به معنی افزایش تقاضا برای کالاها یا خدمات است. بنابراین لازم است که منابع بیشتری برای ارائه خدمات یا کالاها مصرف شود. به همین دلیل، سازمان‌های دولتی و آژانس‌های محیط زیستی، به وضع و اجرای قوانین سخت‌گیرانه نسبت به تولیدکنندگان و خدمت‌دهندگان که باعث ضربه‌زدن بیش از حد مجاز به محیط زیست هستند، اقدام کرده‌اند که در پاره‌ای موارد استفاده از منابع را برای آنها محدود می‌کند. در این میان زنجیره تأمین به یکی از مسئله‌های مهم که تأثیر بسیاری از این موضوع می‌پذیرد، تبدیل شده است. در این تحقیق، زنجیره تأمین حلقه بسته با توجه به عدم اطمینان، اختلالات و هزینه تولید نیز مدل‌سازی شده است. هدف از این مسئله، به حداقل رساندن هزینه سیستم مورد نظر بر اساس تصمیمات مکان، میزان جریان بین سطوح و فروش از دست رفته است. روش حل آزادسازی لاگرانژی برای حل این مسئله NP-hard استفاده شده است. در پایان، از یک مثال عددی برای آزمایش مدل و روش حل پیشنهادی استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد که زمان اجرای مسئله در مقیاس بزرگ با GAMS نسبت به روش پیشنهادی بالاتر است.

واژه‌های کلیدی: زنجیره تأمین حلقه بسته، اختلال، ریسک تأمین، آزادسازی لاگرانژ، عدم قطعیت.

## Designing a Closed Loop Supply Chain Network Considering the Supplier Disorder Risk and Production Time

M. Rabhani<sup>1\*</sup>, E. Asgaari<sup>1</sup>, A. Ghavamifar<sup>2</sup> and H. Farrokhi-Asl<sup>2</sup>

1. Department of Industrial Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.

2. Department of Industrial Engineering, Iran University of Science & Technology, Tehran, Iran.

**Abstract:** In the recent decades, raw materials and resources have been remarkable issues for researchers; in other words, they play an important role in manufacturing industries or service organizations. On the other hand, the population is increasing

\*: مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: mrabani@ut.ac.ir

every day. An increase in the population means the increased demand for goods or services. Therefore, more resources are needed to deliver services or goods. For this reason, government agencies and environmental agencies have developed and enforced stringent laws against producers and service providers who have exceeded the permissible limits for the environment; in some cases, the use of resources has been even restricted. In the meantime, the supply chain has become one of the major issues that can greatly influence this issue. In this research, the supply chain of the closed loop has been modeled due to uncertainty, disturbances and cost of production. The purpose of this problem has been to minimize the cost of the system in question based on the location decisions, and flow rates between levels and sales. The Lagrangian liberation solution method is used to solve this NP-hard problem. In the end, a numerical example has been employed to test the model and the proposed solution method. The results show that the time of implementation of the large-scale problem with GAMS is higher than that of the proposed method.

**Keywords:** Closed loop supply chain, Disruption, Risk, Lagrangian relaxatio, Uncertainty.

## فهرست علائم

هزینه حمل و نقل از مرکز جمع‌آوری $l$ به مرکز انهدام به ازاء هر واحد غیرقابل بازیافت نوع $n$ در دوره $t$	$\overline{NTC}_{ln t}$	هزینه مونتاژ در مرکز تولید $z$ در دوره $t$	$AC_{jt}$
زمان مورد نیاز برای مونتاژ کردن محصول $p$	$ot_p$	جریمه هر واحد تقاضای برآورده نشده محصول $p$ برای مشتری $k$ در دوره $t$	$b_{pkt}$
هزینه عملیات هر محصول $p$ در مرکز تولید $z$	$OpC_{pj}$	میزان بودجه در دسترس مرکز تولید $z$ در دوره $t$	$bud_{jt}$
تعداد مراکز تولیدی که باید ساخته شوند	$OP$	هزینه ثابت بازگشایی مرکز جمع‌آوری $l$	$CFC_l$
تعداد مراکز جمع‌آوری که باید ساخته شوند	$OC$	هزینه دموونتاژ در مرکز دموونتاژ $l$ در دوره $t$	$DAC_{lt}$
اگر در مکان $z$ مرکز تولید استقرار یابد برابر یک و در غیر این صورت صفر	$Op_j$	تقاضای محصول $p$ توسط مشتری $k$ در دوره $t$	$d_{pkt}$
اگر در مکان $l$ مرکز جمع‌آوری استقرار یابد برابر یک و در غیر این صورت صفر	$Oc_l$	مقدار محصول حمل شده نوع $p$ از مشتری $k$ به مرکز جمع‌آوری $l$ در سناریو $s$ در دوره $t$	$e_{pkt}^s$
اندیس نوع محصولات	$p$	هزینه ثابت بازگشایی مرکز تولید $z$	$FC_z$
احتمال هر سناریو در دوره $t$	$ps_{st}$	اندیس تأمین کنندگان	$i$
ظرفیت مرکز تولید $z$ در دوره $t$	$p.cap_{jt}$	اندیس مراکز تولید	$j$
ظرفیت مرکز جمع‌آوری $l$ در دوره $t$	$p.cap_{lt}$	اندیس مشتریان	$k$
ظرفیت تأمین‌کننده $i$ در دوره $t$	$p.cap_{it}$	اندیس مراکز جمع‌آوری و دموونتاژ	$l$
مقدار واحد غیرقابل بازیافت نوع $n$ محصول $p$ حمل شده از جمع‌آوری $l$ به مرکز انهدام در سناریو $s$ در دوره $t$	$q_{pnlt}^s$	مقدار تقاضای برآورده نشده محصول $p$ مشتری $k$ تحت سناریو $s$ در دوره $t$	$ls_{pkt}^s$
مقدار واحد قابل بازیافت نوع $m$ محصول $p$ حمل شده از جمع‌آوری $l$ به مرکز تولید $z$ در سناریو $s$ در دوره $t$	$q_{pmljt}^{-s}$	اندیس واحدهای قابل بازیافت	$m$
مقدار واحد قابل بازیافت نوع $m$ محصول $p$ موجود در مرکز جمع‌آوری $l$ در سناریو $s$ در دوره $t$	$q_{pmlt}^s$	اندیس واحدهای غیرقابل بازیافت	$n$
مقدار واحد قابل بازیافت نوع $m$ محصول $p$ حمل شده از جمع‌آوری $l$ به مرکز انهدام در سناریو $s$ در دوره $t$	$q_{pmlt}^{=s}$	هزینه حمل و نقل از تأمین‌کننده $i$ به مرکز تولید $z$ به ازای هر واحد غیرقابل بازیافت نوع $n$ در دوره $t$	$NTC_{ijnt}$

مقدار واحد قابل بازیافت نوع $m$ حمل شده از تأمین کننده $i$ به مرکز تولید $z$ در سناریو $s$ در دوره $t$	$x_{ijmt}^s$	هزینه حمل و نقل از تأمین کننده $i$ به مرکز تولید $z$ به ازای هر واحد قابل بازیافت نوع $m$ در دوره $t$	$RTC_{ijmt}$
مقدار واحد غیرقابل بازیافت نوع $n$ حمل شده از تأمین کننده $i$ به مرکز تولید $z$ در سناریو $s$ در دوره $t$	$\bar{x}_{ijnt}^s$	هزینه حمل و نقل از مرکز جمع آوری $l$ به مرکز تولید $z$ به ازای هر واحد قابل بازیافت نوع $m$ در دوره $t$	$\overline{RTC}_{ljmt}$
مقدار محصول حمل شده نوع $p$ از مرکز تولید $z$ به مشتری $k$ در سناریو $s$ در دوره $t$	$y_{pjkt}^s$	نرخ بازگشت محصول $p$ از مشتری $k$ در دوره $t$	$r_{orpkt}$
نرخ انهدام محصول $p$ بازیافت شده در هر مرکز جمع آوری در دوره $t$	$\alpha_{pt}$	اندیس سناریوها	$s$
اگر تأمین کننده $i$ در سناریو $s$ مختل شود برابر یک و در غیر این صورت صفر	$\theta_i^s$	اندیس دوره	$t$
اگر برابر یک باشد اختلال کامل، اگر صفر باشد بدون اختلال و بین بازه $[0, 1]$ اختلال جزئی	$\bar{\theta}_i^s$	هزینه حمل و نقل از مرکز تولید $z$ به مشتری $k$ به ازای هر محصول در دوره $t$	$TC_{jkt}$
میزان استفاده از هر واحد قابل بازیافت نوع $m$ در هر محصول	$\varphi_m$	هزینه حمل و نقل از مشتری $k$ به مرکز جمع آوری $l$ به ازای هر محصول در دوره $t$	$TCC_{kit}$
		زمان کل در دسترس برای هر تولید کننده $z$ در دوره $t$	$T_{jt}$

## ۱- مقدمه

در سال های اخیر با توجه به افزایش نگرانی های زیست محیطی، قوانین دولتی و محدودیت منابع طبیعی و تأثیر قوانین سبز، زنجیره تأمین حلقه بسته توجه فزاینده ای را به خود جلب کرده است [۱]. از آنجایی که تأمین کننده نقش مهم و اساسی در زنجیره تأمین دارد، در صورت مواجه شدن با ریسک و اختلال اثرات زیانبار و مهمی برای زنجیره تأمین به بار خواهد آورد، لذا مطالعه و بررسی این شرایط امری ضروری به نظر می رسد. از این رو به بررسی مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در شرایط ریسک تأمین پرداخته می شود. هدف از این مسئله کمینه کردن هزینه های زنجیره با توجه به تصمیمات مکان یابی، میزان جریان بین سطوح و فروش از دست رفته و همچنین کمینه کردن زمان تولید یا به عبارت دیگر بیشینه کردن مقدار تولید در زمان موجود و کمینه کردن هزینه های راه اندازی است. در طول چند سال اخیر، انواع مختلف وقایع غیرقابل پیش بینی شامل اعمال عمدی غیر تروریستی، اعمال تروریستی، حوادث،

بلاای طبیعی و غیره رخ داده اند که نشان می دهند جهان ما به طور فزاینده ای غیر قطعی و آسیب پذیر است. علاوه بر این به نظر می رسد که زنجیره های تأمین امروزه نسبت به گذشته با توجه به تعداد زیاد صنایع و فعالیت های کاری، تولید غیر متمرکز، افزایش برون سپاری، کاهش تعداد تأمین کنندگان و تمرکز بر کاهش موجودی ها شکننده تر شده اند. اگرچه این صنایع مختلف و فعالیت های کاری هزینه های زنجیره تأمین را کاهش داده اند اما زنجیره تأمین را بیشتر در معرض ریسک و اختلال قرار داده و زنجیره های تأمین را طولانی تر و پیچیده تر کرده اند.

خرابی های زنجیره تأمین وقایع برنامه ریزی نشده و غیر قابل پیش بینی است که جریان نرمال کالاها و مواد را در زنجیره تأمین مختل می کند و در نتیجه شرکت های درون زنجیره تأمین را در معرض ریسک های مالی و عملیاتی قرار می دهد. به طور کلی اکثر خرابی های زنجیره تأمین می توانند در سه دسته طبقه بندی شوند.

۱) مرتبط با عرضه، ۲) مرتبط با تقاضا و ۳) ریسک‌های متفرقه. اختلالات تأمین هنگامی رخ می‌دهند که تأمین‌کننده قادر به برآورده کردن سفارشات در موقع مناسب نباشد. به‌طور بالقوه این ریسک‌ها می‌توانند موجب مختل شدن تأمین محصول و یا سرویسی که زنجیره تأمین به مشتریان خود پیشنهاد می‌دهد، شوند. اختلالات تقاضا ممکن است به دلیل افت و یا افزایش ناگهانی سفارشات مشتریان باشد. ریسک‌های مربوط به تقاضا می‌توانند به‌طور بالقوه منجر به مختل شدن عملیات خرده‌فروش شوند و در توانایی آن برای در دسترس ساختن محصولات برای مشتریان تأثیر بگذارد. ریسک‌های متفرقه ریسک‌هایی هستند که به‌طور بالقوه بر هزینه انجام کار و تجارت تأثیر می‌گذارند، مانند تغییرات ناگهانی در هزینه‌های خرید، نرخ بهره، نرخ ارز جاری، قوانین ایمنی توسط آژانس‌های دولتی [۲].

## ۲- مرور ادبیات موضوع

مدل‌های موجود در این حوزه از مدل‌های ساده مکان‌یابی تسهیلات با ظرفیت نامحدود تا مدل‌های پیچیده چندسطحی و چندمحصولی با ظرفیت محدود را شامل می‌شوند. تابع هدف اصلی این مدل‌ها تعیین حداقل هزینه طراحی سیستم است که معمولاً شامل برقراری توازن بین هزینه‌های ثابت بازگشایی تسهیلات و هزینه‌های حمل‌ونقل است. ملو و همکاران و کلیبی و همکاران [۳] مرورهای جامعی روی مسائل طراحی شبکه زنجیره تأمین جهت حمایت از تحقیقات آتی انجام دادند. در اینجا ادبیات موضوع در دو دسته جدا ولی بسیار نزدیک مرور می‌شود. طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس و حلقه بسته.

### ۲-۱- طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس<sup>۱</sup>

اوایل سال ۱۹۹۷، فیلیشمن و همکاران مرور جامعی روی کاربرد مدل‌های ریاضی در مدیریت لجستیک معکوس ارائه کردند [۴]. همچنین کریکه و همکاران مدل برنامه‌ریزی عدد

صحیح خطی مختلط برای شبکه زنجیره تأمین معکوس دو مرحله‌ای برای سازندگان دستگاه کپی طراحی کردند. در این مدل هزینه‌های پردازش محصولات بازگشتی و هزینه‌های موجودی در تابع هدف جهت کمینه کردن هزینه‌های کل آورده شده است [۵].

مین و کو مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط و الگوریتم ژنتیک که می‌تواند مسئله طراحی شبکه لجستیک معکوس چند دوره‌ای را حل کند ارائه کردند [۶].

عدم قطعیت تقاضا و همچنین عدم قطعیت در نوع و مقدار محصولات بازگشتی، از عوامل مهمی هستند که باید در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته و معکوس در نظر گرفته شوند. بنابراین درحقیقت، لیستس و دکر [۷] مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط تصادفی طراحی شبکه بازیافت شن و ماسه برای بیشینه کردن سود کل ارائه کردند. از آنجایی که این توسعه روابط غیرخطی را معرفی کرده است، مسئله به‌صورت مدل برنامه‌ریزی غیرخطی عدد صحیح مختلط معرفی شده و الگوریتم ژنتیک برای حل مدل توسعه داده شده است [۷].

### ۲-۲- طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته

مفهوم زنجیره تأمین حلقه بسته امروزه در نتیجه این شناخت که هر دو زنجیره تأمین معکوس و مستقیم مستلزم مدیریت توأم هستند توجه بسیار زیادی را به‌خود جلب کرده است. پیکره‌بندی هر دو شبکه زنجیره تأمین معکوس و مستقیم تأثیر بسیار زیادی روی عملکرد هریک دارد. از این‌رو جهت جلوگیری از زیربهنیگی‌های ناشی از طراحی‌های مجزا، طراحی شبکه‌های مستقیم و معکوس باید ادغام شود.

در طراحی شبکه لجستیک حلقه بسته چند محصولی برای فراهم‌آوردن‌گان لجستیک طرف سوم، مین و کو مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند دوره‌ای را مطرح کردند. این مدل برنامه‌ریزی برای تعیین تعداد و مکان تسهیلات تعمیر است که محصولات بازگشتی از خرده

فروشان و یا مشتریان نهایی برای توزیع مجدد بازرسی، تعمیر و نوسازی می‌شوند. برای حل مدل الگوریتم ژنتیک توسعه داده شده است [۶].

پیشوایی و همکاران مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط چند هدفه را ارائه کردند، که این مدل شامل بیشینه کردن پاسخ‌گویی شبکه و کمینه کردن هزینه‌های کل در شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته که شامل هر دو جریان مستقیم و معکوس است. برای حل مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط<sup>۲</sup> چند هدفه ارائه شده الگوریتم ممتیک توسعه داده شده است [۸].

پیشوایی و همکاران از جمله اولین افرادی بودند که از مفهوم استواری در زنجیره تأمین استفاده کردند. آنها عدم قطعیت موجود در تقاضا، هزینه‌ها و محصولات برگشتی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته خود را به وسیله مجموعه عدم قطعیت جعبه‌ای در نظر گرفتند [۹].

پیشوایی و ترابی در سال ۲۰۱۰ یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط احتمالی دو هدفه که سازگار با عدم قطعیت‌ها است ارائه کردند. مدل ارائه شده تصمیمات طراحی شبکه را در هر دو شبکه‌های زنجیره تأمین مستقیم و معکوس ادغام می‌کند و همچنین تصمیمات استراتژیک طراحی شبکه و تاکتیکی جریان مواد را با هم ترکیب می‌کند تا از زیربهبودهایی که از طراحی جداگانه این دو بخش ایجاد می‌شود جلوگیری شود. برای حل مدل بهینه‌سازی احتمالی ارائه شده، رویکرد حل فازی با ترکیب کردن تعدادی از رویکردهای حل مؤثر در ادبیات توسعه داده شده است [۹].

همچنین پیشوایی و همکاران در سال ۲۰۱۱ مدل بهینه‌سازی استوار را برای مدیریت عدم قطعیت ذاتی در داده‌های ورودی مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه دادند. در ابتدا، یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی مختلط در حالت قطعی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته توسعه داده شده است. سپس حالت استوار این مدل با استفاده از توسعه‌های اخیر در تئوری بهینه‌سازی

استوار ارائه شده است. این مقاله مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط را برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته که می‌تواند فعالیت‌های بازیافت و انهدام را پشتیبانی کند ارائه می‌دهد [۱۰].

در سال ۲۰۱۲ رضانی و همکاران یک طراحی استوار برای مدل شبکه لجستیک حلقه بسته چند سطحی و چند محصولی تحت شرایط عدم قطعیت ارائه کردند که شامل هر دو جریان رو به جلو و معکوس است. از آنجایی که طراحی شبکه لجستیک زمان‌بر و پرهزینه است، یک رویکرد بهینه‌سازی استوار برای در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا و نرخ بازگشت با در نظر گرفتن مجموعه متناهی از سناریوها ارائه شده است. برای به دست آوردن جواب بهینه، الگوریتم آزادسازی سناریو به کار رفته است [۱۱].

ارائه یک مدل چند هدفه برای شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته از دیگر تلاش‌های محققین این حوزه بوده است که توسط حسن‌زاده امین و ژانگ در سال ۲۰۱۲ انجام شده است. آنها یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته که شامل کارخانه‌ها، مراکز جمع‌آوری، نقاط تقاضا و محصولات است را بررسی کردند و یک مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی مختلط که هدف آن کمینه‌کردن هزینه‌ها است ارائه کرده‌اند. مدل با در نظر گرفتن فاکتورهای محیط زیستی از طریق جمع اوزان و  $\epsilon$ -constraint توسعه داده شده است [۱۲].

## ۲-۳- طراحی قابل اطمینان شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت شرایط اختلال

در سال ۲۰۰۹ کی و همکاران مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین یکپارچه را برای تعیین مکان خرده‌فروشان و تخصیص مشتریان به آنها، برای کمینه کردن هزینه‌های مکان‌یابی، حمل و نقل و موجودی مطالعه کردند. این سیستم ممکن است دچار اختلالات تأمین در تأمین‌کننده و خرده‌فروش شود. مدل تک دوره‌ای و تک محصولی است و در حالت قطعی مدل شده است [۱۳].

آریائزاد و همکاران در سال ۲۰۱۰ به طراحی شبکه زنجیره تأمین که در آن مراکز توزیع دچار اختلال می‌شوند، پرداختند. در نتیجه اختلال، یک یا چند مرکز توزیع ممکن است نتوانند به مشتریان سرویس بدهند. فرض شده است که مشتریان تقاضای تصادفی دارند. بنابراین هر مرکز توزیع مقداری ذخیره اطمینان برای اینکه بتواند به مشتریان خود سرویس دهد، نگهداری می‌کند. مدل به صورت برنامه‌ریزی عدد صحیح غیرخطی جهت کمینه کردن کل هزینه‌ها که شامل هزینه‌های مکان‌یابی، موجودی، حمل‌ونقل و فروش از دست رفته می‌شود، مدل شده است. مدل همزمان مکان مراکز توزیع و تخصیص مشتریان به مراکز توزیع را تعیین می‌کند. برای حل مدل رویکرد حل کارا مبتنی بر الگوریتم ژنتیک توسعه داده شده است [۱۴].

کوی و همکاران در سال ۲۰۱۰ مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط و مدل تخمین پیوسته را برای مطالعه مسئله مکان‌یابی تسهیلات با هزینه ثابت و ظرفیت نامحدود ارائه کردند. که هدف آن کمینه کردن هزینه‌های راه‌اندازی و هزینه‌های حمل‌ونقل تحت سناریوهای نرمال و شکست است. این مدل همزمان مکان بهینه تسهیلات و تخصیص مشتریان را تعیین می‌کند. برای حل مدل الگوریتم آزادسازی لاگرانژین توسعه داده شده است [۱۵]. در سال ۲۰۱۲ وحدانی و همکاران یک مدل برای طراحی شبکه قابل اطمینان از تسهیلات در یک زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت ارائه کردند. برای این منظور یک مدل برنامه‌ریزی دوهدفه توسعه داده شده است که هزینه کل و هزینه‌های حمل‌ونقل انتظاری بعد از شکست تسهیلات در شبکه لجستیک را کمینه می‌کند. برای حل مدل، روش حل ترکیبی معرفی شده است که شامل رویکرد بهینه‌سازی استوار و تئوری صف و برنامه‌ریزی چند هدفه فازی است [۱۶].

همچنین آنها در سال ۲۰۱۳ یک رویکرد سیستماتیک برای ایجاد یک شبکه قابل اطمینان از تسهیلات در زنجیره تأمین حلقه بسته تحت عدم قطعیت ارائه کردند. یک مدل

برنامه‌ریزی که تصمیمات طراحی شبکه را در هر دو حالت مستقیم و معکوس ادغام می‌کند، ارائه شده است. همچنین مدل یک رویکرد قابل اطمینان برای دستیابی به طراحی شبکه استوار بیان کرده است. مدل در نظر گرفته شده در این مقاله به صورت چند سطحی، چند تسهیلی، چند محصولی و با چندین تأمین‌کننده است [۱۷]. در سال ۲۰۱۳ آزاد و همکاران مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین با ظرفیت محدود را که دارای اختلالات تصادفی در تسهیلات و حمل‌ونقل است ارائه کردند. هدف مدل تعیین مکان بهینه مراکز توزیع و همچنین تخصیص بهینه مشتریان به این مراکز است. با وجود مقالات اشاره شده، در این مقاله از مفاهیم جدید قابلیت اطمینان برای مدل کردن رفتار استراتژیک مراکز توزیع و مشتریان در شبکه استفاده شده است: (۱) اختلال مرکز توزیع ممکن است جزئی باشد به این معنی که مرکز توزیع مختل شده همچنان بتواند با بخشی از ظرفیت اولیه خود سرویس بدهد، (۲) ظرفیت از دست رفته مرکز توزیع مختل شده توسط مرکز توزیع دیگری که مختل نشده است تأمین شود، (۳) نسبت ظرفیت از دست رفته مرکز توزیع مختل شده به سرمایه‌گذاری اولیه در فاز طراحی بستگی دارد. برای حل مدل نسخه بهبود یافته جداسازی بندرز به کار رفته است [۱۸].

هاتفی و جولای در مقاله خود که در سال ۲۰۱۳ منتشر شد بیان داشتند که دو دسته گسترده از خطر، که بر طراحی زنجیره تأمین و مدیریت تأثیرگذارند وجود دارد. گروه اول در رابطه با عدم اطمینان موجود در پارامترهای مدل است، که بر مسئله توازن عرضه و تقاضا تأثیر می‌گذارد. دسته دوم خطرها از بلایای طبیعی، بحران‌ها و مشکلات اقتصادی، وقایع تروریستی و غیره ناشی می‌شوند. اکثر مطالعات موجود این دو دسته را به صورت جدا بررسی کرده‌اند. آنها مدل قابل اطمینان و استوار برای طراحی شبکه لجستیک حلقه بسته یکپارچه پیشنهاد کردند که به طور همزمان پارامترهای غیرقطعی و خرابی تسهیلات را در نظر می‌گیرد. مدل ارائه شده بر اساس رویکرد بهینه‌سازی استوار برای حفظ شبکه در برابر عدم

قطعیتم فرموله شده است [۱۹].

سرویس دهی کند که این اختلال از نوع اختلالات جزئی بوده که تأمین کننده به طور کامل از بین نمی رود بلکه ظرفیت آن کاهش می یابد. پارامترها و متغیرهای مسئله در جدول فهرست علائم ذکر شده اند:

در نهایت مسئله به صورت زیر مدل می شود:

$$\begin{aligned} \text{Min} = & \sum_j FC_j Op_j + \sum_l CFC_l Oc_l + \\ & \sum_{i,j,m,t,s} ps_{st} RTC_{ijmt} x_{ijmt}^s + \\ & \sum_{i,j,n,t,s} ps_{st} NTC_{ijnmt} \bar{x}_{ijnmt}^s + \\ & \sum_{p,j,k,t,s} ps_{st} (TC_{jkt} + AC_{jt}) y_{pjkt}^s + \\ & \sum_{p,k,l,t,s} ps_{st} (TCC_{klt} + DAC_{lt}) e_{pklt}^s + \\ & \sum_{p,l,j,m,t,s} ps_{st} \overline{RTC}_{ljmt} \bar{q}_{pmljt}^s + \\ & \sum_{p,l,n,m,t,s} ps_{st} \overline{NTC}_{lnmt} (q_{pmlt}^s + \bar{q}_{pmlt}^s) + \\ & \sum_{p,k,t,s} ps_{st} b_{pkt} ls_{pkt}^s + \sum_{p,j,k,t,s} Op C_{pj} ot_p y_{pjkt}^s \end{aligned} \quad (1)$$

$$\sum_j Op_j = OP \quad (2)$$

$$\sum_l Oc_l = OC \quad (3)$$

$$\varphi_m \sum_k e_{pklt}^s = q_{pmlt}^s \quad (4)$$

$$\varphi_m \sum_k \bar{e}_{pklt}^s = \bar{q}_{pmlt}^s \quad (5)$$

$$\alpha_{pt} q_{pmlt}^s = \bar{q}_{pmlt}^s \quad (6)$$

$$(1 - \alpha_{pt}) q_{pmlt}^s = \sum_j \bar{q}_{pmljt}^s \quad (7)$$

$$\sum_j y_{pjkt}^s + ls_{pkt}^s \geq d_{pkt} \quad (8)$$

$$\sum_l e_{pklt}^s = ror_{pkt} \sum_j y_{pjkt}^s \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{\varphi_m} \left( \sum_i \sum_m x_{ijmt}^s + \sum_l \sum_m \sum_p \bar{q}_{pmljt}^s \right) + \\ & \frac{1}{\varphi_n} \sum_i \sum_n \bar{x}_{ijnmt}^s = \sum_k \sum_p y_{pjkt}^s \end{aligned} \quad (10)$$

بعد از بررسی مقالات حوزه طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، جدول مرور ادبیات را که شامل مقالات مطالعه شده است، ارائه می شود (جدول ۱). در این مقاله علاوه بر دیده شدن فرضیات مقاله های قبل و در نظر گرفتن مدل پایه جهت شروع کار، نوآوری هایی همچون تشکیل یک مدل عمومی که یک مدل چند دوره ای و چند محصولی با در نظر گرفتن زمان تولید محصولات و همچنین هزینه تولید به ازای هر محصول دیده شده است.

### ۳- تعریف و مدل سازی مسئله

شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در نظر گرفته شده در این تحقیق شامل تأمین کنندگان، مراکز تولید، جمع آوری، انهدام و مشتریان است. مواد اولیه از تأمین کنندگان به مراکز تولید منتقل می شود. سپس در مراکز تولید بعد از سپری کردن زمان مورد نیاز برای مونتاژ با یکدیگر و ساخت محصول نهایی، با توجه به تقاضای مشتریان به دست آنها می رسند. در این مسئله فرض شده است که مراکز تولید دارای ساعات کاری مشخص و محدود هستند. سپس محصولات بازگشتی از مشتریان به مراکز جمع آوری فرستاده شده و در این مراکز، محصولات دمونتاژ شده و به واحدهای قابل بازیافت و غیرقابل بازیافت مجزا می شوند. واحدهای قابل بازیافت در صورت قابل استفاده بودن به مراکز تولید بازگشته و مجدداً مورد استفاده قرار می گیرند و در غیر این صورت به همراه واحدهای غیرقابل بازیافت به مرکز انهدام فرستاده می شوند. مدل به صورت چند دوره ای و چند محصولی بوده و تمامی محصولات بازگشتی از مشتریان باید به مراکز جمع آوری منتقل شوند. هدف این مسئله تعیین مکان مراکز تولید و جمع آوری و همچنین میزان جریان بین تسهیلات است. در این مسئله فرض شده است که تأمین کننده به دلایل بلایای طبیعی مختلف و یا حوادث ساخته دست انسان ممکن است دچار اختلال شود و نتواند در زمان مناسب به مشتریان خود

روش های عددی در مهندسی، سال ۳۷، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۷

جدول ۱- مروری بر مقالات موجود در زمینه طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته

ویژگی‌های مدل		اهداف							روش حل	
		پارامترها	پارامترهای غیرقطعی	نرخ بازگشت	عرضه	پاسخ‌گویی	سود	هزینه		
دوره زمانی	دوره کالا	چند محصولی	قطعی	غیرقطعی	استوار	تقاضا	تقاضای احتمالی	تقاضای احتمالی	رویکرد مدل‌سازی	
تک دوره‌ای	چند دوره‌ای	تک محصولی	*	*	*	✓	✓	✓	MIP	الگوریتم ژنتیک حل دقیق
*	*	*	*	*	*	✓	✓	✓	SMILP	الگوریتم ممبیک بر مبنای روش اولویت‌دهی و وزندهی برای یافتن نقاط ناچیره
*	*	*	*	*	*	✓	✓	✓	MINLP	رویکرد حل فازی و حل توسط LINGO
*	*	*	*	*	*	✓	✓	✓	MOPMILP	رویکرد بهینه‌سازی استوار و حل با ILOG CPLEX
*	*	*	*	*	*	✓	✓	✓	MILP	الگوریتم آزادسازی سناریو و حل با CPLEX
*	*	*	*	*	*	✓	✓	✓	MILP	روش جمع‌وزنی و CPLEX
*	*	*	*	*	*	✓	✓	✓	FMMILP	رویکرد حل فازی و CPLEX
*	*	*	*	*	*	✓	✓	✓	MILP	روش آزادسازی لاگرانژ و CPLEX



## ادامه جدول ۱-

## سطوح شبکه لجستیک

منبع	مراکز تأمین	مراکز تولید	مراکز توزیع	مراکز تعمیر	مراکز توزیع مجدد	مراکز باز یافت	مراکز بهبود	مراکز انهدام	رویکرد مدل سازی	روش حل
[۱]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	MIP	الگوریتم ژنتیک
[۸]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	SMILP	حل دقیق
[۷]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	MINLP	الگوریتم ممبیک بر مبنای روش اولویت‌دهی و وزندهی برای یافتن نقاط ناچیره
[۲]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	MOPMILP	رویکرد حل فازی و حل توسط LINGO
[۵]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	MILP	رویکرد بهینه‌سازی استوار و حل با ILOG CPLEX
[۹]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	MILP	الگوریتم آزادسازی سناریو و حل با CPLEX
[۱۰]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	MILP	روش جمع وزنی و CPLEX
[۲۱]	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	FMMILP	رویکرد حل فازی و CPLEX
این تحقیق	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	MILP	روش آزادسازی لاگرانژ و CPLEX

در نظر گرفته شده است. محدودیت (۳) نشان دهنده میزان محصولات قابل بازیافت موجود در مرکز جمع آوری است. محدودیت (۴) نشان دهنده میزان محصولات غیرقابل بازیافت موجود در مرکز جمع آوری است. محدودیت (۵) نشان دهنده میزانی از محصولات بازگشتی است که غیرقابل بازیافت بوده و از مرکز جمع آوری به مرکز انهدام منتقل می شود. محدودیت (۶) میزانی از محصولات بازگشتی از سمت مشتریان است که قابل بازیافت بوده و از مرکز جمع آوری به مرکز تولید باز می گردند.

محدودیت (۷) محدودیت برآورده شده تقاضاها است. محدودیت (۸) محدودیت میزان محصولات بازگشتی از سوی مشتری به مراکز جمع آوری است. محدودیت (۹) نشان دهنده تعادل جریان در مرکز تولید است. محدودیت (۱۰) و (۱۱) نشان دهنده محدودیت ظرفیت به ترتیب در مراکز تولید و جمع آوری است. محدودیت (۱۲) و (۱۳) نشان دهنده محدودیت ظرفیت تأمین کننده با توجه به شرایط اختلال است. در شرایط رخ دادن اختلال مقداری از ظرفیت تأمین کننده کم می شود که این مورد در محدودیت های (۱۲) و (۱۳) دیده می شود. محدودیت های آخر نشان دهنده باینری و مثبت بودن متغیرها است.

محدودیت (۱۴) نشان دهنده حداکثر زمان در دسترس برای تولید محصولات است. محدودیت (۱۵) نیز بیان کننده حداکثر بودجه موجود برای هر مرکز تولید است که این بودجه برای مصارف مختلف از جمله هزینه های تولید یا حمل و نقل استفاده می شود.

#### ۴- روش حل

مدل ارائه شده در قسمت قبلی یک مسئله بزرگ عدد صحیح مختلط است. تا زمانی که مسئله NP-hard باشد نمی توان با یک روش استاندارد (مثل سیمپلکس) در یک بازه زمانی چند جمله ای به جواب رسید [۲۰]. به همین دلیل از روش آزادسازی لاگرانژ جهت رسیدن به جواب بهینه استفاده می شود. آزادسازی

روش های عددی در مهندسی، سال ۳۷، شماره ۲، زمستان ۱۳۹۷

$$\sum_i \sum_m x_{ijmt}^s + \sum_i \sum_n \bar{x}_{ijnt}^s + \sum_l \sum_m \sum_p \bar{q}_{pmljt}^s \leq p \cdot \text{cap}_{jt} \cdot \text{op}_j \quad (11)$$

$$\sum_p \sum_k e_{pkl}^s \leq c \cdot \text{cap}_{lt} \cdot \text{oc}_{lt} \quad (12)$$

$$\sum_m \sum_j x_{ijmt}^s \leq s \cdot \text{cap}_{it} (1 - \theta_i^s \bar{\theta}_i^s) \quad (13)$$

$$\sum_n \sum_j \bar{x}_{ijnt}^s \leq s \cdot \text{cap}_{it} (1 - \theta_i^s \bar{\theta}_i^s) \quad (14)$$

$$\sum_p \sum_k \text{ot}_p y_{pjkt}^s \leq T_{jt} \quad (15)$$

$$\sum_i \sum_m \sum_t \sum_s \text{ps}_{st} \text{RTC}_{ijmt} x_{ijmt}^s + \sum_i \sum_n \sum_t \sum_s \text{ps}_{st} \overline{\text{NTC}}_{ijnt} \bar{x}_{ijnt}^s + \sum_p \sum_k \sum_t \sum_s \text{ps}_{st} (\text{TC}_{jkt} + \text{AC}_{jt}) y_{pjkt}^s \leq \text{bud}_{jt} \quad (16)$$

$$\text{Op}_j \in \{0, 1\}, \text{Oc}_l \in \{0, 1\} \quad (17)$$

$$x_{ijmt}^s, \bar{x}_{ijnt}^s, y_{pjkt}^s, e_{pkl}^s, q_{lnt}^s, \bar{q}_{pmljt}^s, \bar{q}_{pmlt}^s, \bar{q}_{pmlt}^s, l_{spkt}^s \geq 0 \quad (18)$$

تابع هدف نشان دهنده کمینه کردن هزینه ها است که قسمت اول و دوم آن نشان دهنده هزینه های ثابت بازگشایی مراکز تولید و جمع آوری و قسمت سوم هزینه حمل و نقل واحدهای قابل بازیافت از تأمین کننده به مرکز تولید است. قسمت چهارم هزینه حمل و نقل واحدهای غیرقابل بازیافت از تأمین کننده به مرکز تولید است. قسمت پنجم نشان دهنده هزینه مونتاژ در مرکز تولید و هزینه حمل محصولات از مرکز تولید به مشتریان است. قسمت های بعدی نیز نشان دهنده هزینه های بازگرداندن محصولات از مشتریان به مراکز جمع آوری و سپس به مراکز انهدام و تولید است. قسمت بعدی نشان دهنده جریمه تقاضاهای برآورده نشده است و قسمت آخر نیز هزینه زمان کاری در هر مرکز تولید را نشان می دهد.

محدودیت (۱) برای تخصیص بهینه مراکز تولید در مکان های موجود است. محدودیت (۲) نیز مانند محدودیت اول یک محدودیت تخصیص بهینه است که برای مراکز جمع آوری

$$\begin{aligned}
& \sum_p \sum_l \sum_j \sum_m \sum_t \sum_s ps_{st} \overline{RTC}_{ijmt} \bar{q}_{pmljt}^s + \\
& \sum_p \sum_l \sum_n \sum_m \sum_t \sum_s ps_{st} \overline{NTC}_{lnt} (q_{pnlt}^s + \bar{q}_{pmlt}^s) + \\
& \sum_p \sum_k \sum_t \sum_s ps_{st} b_{pkt} l_{pkt}^s + \\
& \sum_p \sum_j \sum_k \sum_t \sum_s OpC_{pj} ot_p y_{pjkt}^s + \\
& \sum_j \sum_s \sum_t u_{jst}^1 \left( \frac{1}{\varphi_m} \left( \sum_i \sum_m x_{ijmt}^s + \sum_l \sum_m \sum_p \bar{q}_{pmljt}^s \right) \right) + \\
& \frac{1}{\varphi_n} \sum_i \sum_n \bar{x}_{ijnt}^s - \sum_k \sum_p y_{pjkt}^s + \\
& \sum_p \sum_k \sum_s \sum_t u_{pkst}^2 \left( \sum_j y_{pjkt}^s + l_{pkt}^s - d_{pkt} \right)
\end{aligned}
\tag{19}$$

محدودیت‌های مدل بالا هم محدودیت‌های (۷-۲)، (۹) و (۱۸) است. متغیرهای  $u_{jst}^1$  و  $u_{pkst}^2$  نیز ضرایب نامنفی لاگرانژ هستند. در نتیجه سعی بر این است که با مقادیر ثابت  $u_{jst}^1$  و  $u_{pkst}^2$  کمینه مقدار تابع هدف بالا به دست آورده شود. مقدار بهینه تابع هدف دوگان لاگرانژ مقدار حد پایین مسئله اصلی را به دست می‌دهد [۲۵].

#### ۲-۴- پیدا کردن حد بالا<sup>۴</sup>

در بیشتر موارد راه حل به دست آمده از حل مسئله دوگان لاگرانژ بالا به دلیل آزاد کردن محدودیت‌های (۸) و (۱۰) غیرموجه است. راه حل موجه را می‌توان به صورتی که در ادامه توضیح داده می‌شود به دست آورد. مسئله اولیه با محدودیت‌های (۱) تا (۱۸) به صورتی حل خواهد شد که جواب متغیرهای به دست آمده در مسئله اول به عنوان مقدار ثابت وارد شوند. بدین صورت نتیجه به دست آمده از جواب موجه مقدار حد بالا را به دست می‌دهد.

#### ۳-۴- تغییر حد بالا و پایین

اگر در مراحل قبل حد پایین و حد بالا در یک فاصله مشخص از هم باشند جواب بهینه مسئله اصلی به دست آمده است در غیر این صورت ضرایب لاگرانژ  $u_{jst}^1$  و  $u_{pkst}^2$  تغییر داده می‌شوند

لاگرانژ یک روش قدرتمند با کاربردهای مطرح شده برای حل مسائل بهینه‌سازی زنجیره تأمین ترکیبی است [۲۴-۲۲]. روش آزادسازی لاگرانژ قادر است یک حد پایین و حد بالا از جواب بهینه مسئله را به دست آورد و به تصمیم گیرنده این امکان را می‌دهد که کیفیت جواب را حدس بزند و همچنین تصمیم گیرنده متوجه خواهد شد که جواب نهایی به دست آمده چقدر با جواب بهینه فاصله دارد [۲۵].

روش آزادسازی لاگرانژ استفاده شده دارای سه گام است:

- ۱- به دست آوردن حد پایین جواب بهینه مسئله
- ۲- به دست آوردن حد بالای جواب بهینه مسئله
- ۳- تغییر حد بالا و پایین و کمتر کردن فاصله بین آنها در صورتی که به اندازه کافی به هم نزدیک نباشند.

این سه گام تا زمانی که حد بالا و پایین به مقدار کافی به هم نزدیک شوند تکرار خواهند شد. در ادامه این سه گام را برای رسیدن به جواب بهینه مدل ارائه شده در بخش قبل توضیح می‌دهیم.

#### ۱-۴- پیدا کردن حد پایین<sup>۳</sup>

حد پایین به وسیله آزاد کردن چندین محدودیت که موجب حل شدن راحت‌تر مسئله می‌شود به دست می‌آید. حتی اگر این کار موجب غیرموجه شدن مسئله شود [۱۹]. در مدل ارائه شده محدودیت‌های (۸) و (۱۰) را برای به دست آوردن حد پایین و حل شدن راحت‌تر مسئله آزاد خواهیم کرد. آزاد کردن این محدودیت‌ها مسئله را به یک دوگان لاگرانژ تبدیل می‌کند که در قسمت پایین نشان داده شده است:

$$\begin{aligned}
\text{Min} = & \sum_j FC_j Op_j + \sum_l CFC_l Oc_l + \\
& \sum_i \sum_j \sum_m \sum_t \sum_s ps_{st} RTC_{ijmt} x_{ijmt}^s + \\
& \sum_i \sum_j \sum_n \sum_t \sum_s ps_{st} NTC_{ijnt} \bar{x}_{ijnt}^s + \\
& \sum_p \sum_j \sum_k \sum_t \sum_s ps_{st} (TC_{jkt} + AC_{jt}) y_{pjkt}^s + \\
& \sum_p \sum_k \sum_l \sum_t \sum_s ps_{st} (TCC_{klt} + DAC_{lt}) e_{pklt}^s +
\end{aligned}$$

و در نتیجه حد بالا و حد پایین جدید به دست می آید. با استفاده از روش شرح داده شده توسط فیشر [۲۵] مقادیر ضرایب

لاگرائز<sup>n</sup> در دور n+۱ ام تخصیص داده می شود:

$$u_{jst}^{1,n+1} = \max \left\{ \begin{array}{l} u_{jst}^{1,n} - \\ \text{stepsize}^n \left( \frac{1}{\varphi_m} \left( \sum_i \sum_m x_{ijmt}^s + \sum_l \sum_m \sum_p \bar{q}_{pmljt}^s \right) + \frac{1}{\varphi_n} \sum_i \sum_n \bar{x}_{ijnt}^s - \sum_k \sum_p y_{pjkt}^s \right) \end{array} \right\} \quad (20)$$

$$u_{pkst}^{2,n+1} = \max \left\{ \begin{array}{l} u_{pkst}^{2,n} - \text{stepsize}^n \left( \sum_j y_{pjkt}^s + l_{pkt}^s - d_{pkt} \right) \end{array} \right\} \quad (21)$$

که n نشان دهنده شماره تکرار است و مقادیر<sup>n</sup> stepsize و مقادیر<sup>n</sup> stepsize به صورت زیر به دست می آیند:

$$\text{stepsize}^n = \frac{\alpha^n (UP - LB^n)}{\sum_j \sum_s \sum_t \left\{ \left( \frac{1}{\varphi_m} \left( \sum_i \sum_m x_{ijmt}^s + \sum_l \sum_m \sum_p \bar{q}_{pmljt}^s \right) + \frac{1}{\varphi_n} \sum_i \sum_n \bar{x}_{ijnt}^s - \sum_k \sum_p y_{pjkt}^s \right)^2 \right\}} \quad (22)$$

گمز از یک کامپایلر زبان و حل کننده یکپارچه با عملکرد بالا برای مدل سازی و حل مسائل بهینه سازی پیچیده، مقیاس بزرگ استفاده می کند. توزیع پارامترهای استفاده شده در مسئله ها نیز در جدول (۲) و (۳) نشان داده شده است.

نتایج عددی مسائل بررسی شده به شکل زیر است. همان طور که در جدول (۴) مشاهده می شود روش آزاد سازی لاگرائز در ابعاد کوچک مسئله زمان حل بیشتری از حل کننده CPLEX گمز دارد اما در ابعاد بالا این روش دارای کارایی بسیار زیادی است و زمان حل مسئله را بسیار پایین می آورد.

## ۶- تحلیل حساسیت

در این قسمت با توجه به اطلاعات قسمت قبلی روی پارامترهای مسئله تحلیل حساسیت انجام شده و نتایج آن به صورت نمودارهایی نشان داده شده است. برای اطمینان از نتایج و نتیجه گیری صحیح، سه مسئله انتخاب شده (۱، ۴ و ۶) و تحلیل ها بر این مسائل انجام شده است.

اولین پارامتری که در این بخش مورد تحلیل قرار می گیرد نرخ برگشت محصولات از مشتریان (rof<sub>pkt</sub>) است. با توجه به

$$\text{stepsize}^n = \frac{\alpha^n (UP - LB^n)}{\sum_p \sum_k \sum_s \sum_t \left( \sum_j y_{pjkt}^s + l_{pkt}^s - d_{pkt} \right)^2} \quad (23)$$

مقدار UP بهترین مقدار حد بالای به دست آمده تا به اینجا و LB<sup>n</sup> حد پایین به دست آمده در تکرار n-ام است. مقدار اولیه α برابر ۲ قرار داده و اگر بعد از تعدادی تکرار مشخص بهبودی در مقدار LB حاصل نشد مقدار α نصف می شود. این فرایند تا زمانی که جواب موجه با فاصله مطلوب بین حد بالا و حد پایین حاصل شود یا کمترین مقدار stepsize به دست آید ادامه می یابد.

## ۵- نتایج عددی

در این قسمت مجموعه ای از آزمون ها برای آزمایش عملکرد روش ارائه شده در قسمت قبل طراحی می شود. اطلاعات سه مدل تصادفی تولید شده برای مسئله در جدول (۱) نشان داده شده است. مدل ارائه شده و همچنین روش حل در نرم افزار گمز (GAMS) کد شده و در یک سیستم با مشخصات زیر اجرا شده است:

Windows: 10, CPU: Corei7 4710HQ, RAM: 12GB

جدول ۲- اطلاعات مربوط به سه مدل

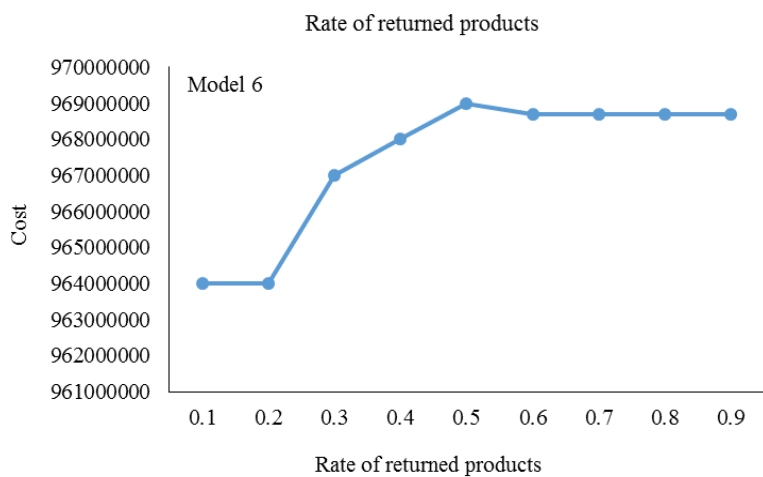
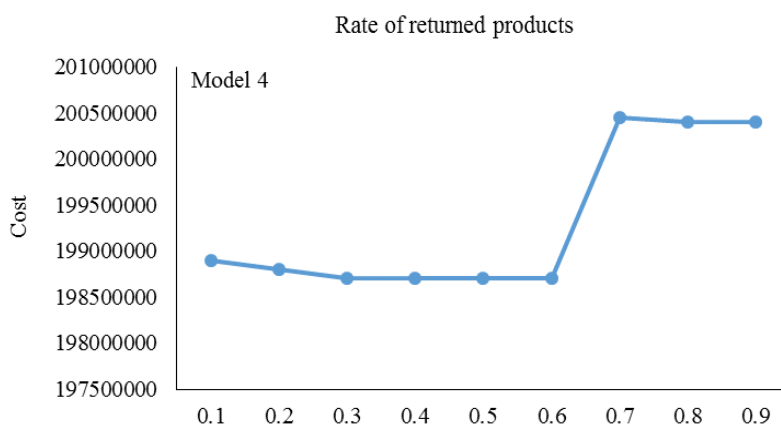
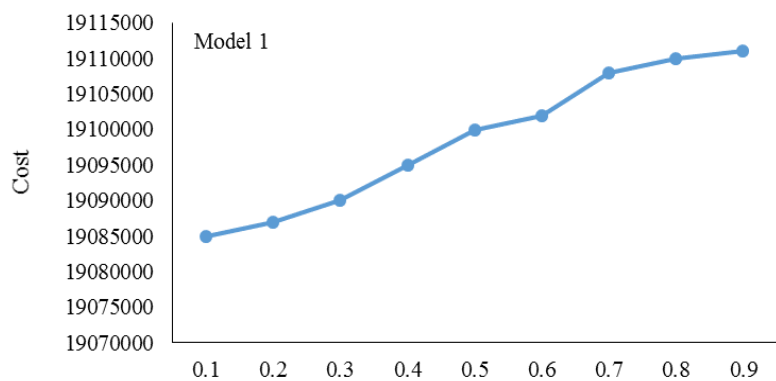
s	t	n	m	p	k	l	j	i	
۳	۳	۲	۱	۲	۵	۲	۴	۱	داده‌های سری ۱
۳	۳	۲	۱	۴	۵	۲	۵	۱	داده‌های سری ۲
۴	۳	۲	۲	۴	۷	۳	۶	۲	داده‌های سری ۳
۴	۵	۳	۲	۵	۷	۳	۷	۳	داده‌های سری ۴
۵	۷	۳	۲	۵	۸	۳	۷	۳	داده‌های سری ۵
۶	۷	۳	۴	۶	۱۰	۵	۹	۴	داده‌های سری ۶
۶	۷	۳	۵	۷	۱۰	۵	۹	۴	داده‌های سری ۷
۶	۸	۴	۶	۷	۱۰	۵	۱۰	۵	داده‌های سری ۸

جدول ۳- جدول توزیع پارامترها

توزیع	پارامترها	توزیع	پارامترها
$U(۸۰۰,۱۰۰۰)$	$s_{cap_{it}}$	$U(۰,۱)$	$ps_{st}$
$U(۵۰,۲۵۰)$	$d_{pkt}$	$U(۱۰۰,۱۵۰)$	$RTC_{ijmt}$
$U(۰,۱)$	$ror_{pkt}$	$U(۱۰۰,۱۵۰)$	$NTC_{ijnt}$
$U(۰,۱)$	$\alpha_{pt}$	$U(۷۰,۱۵۰)$	$TC_{jkt}$
$U(۰,۱), Integer$	$\theta_i^s$	$U(۷۰,۱۰۰)$	$TCC_{klt}$
$U(۰,۱)$	$\bar{\theta}_i^s$	$U(۷۰,۱۵۰)$	$\overline{RTC}_{ljmt}$
$U(۰,۱)$	$\phi_m$	$U(۱۰۰,۱۵۰)$	$\overline{NTC}_{lnt}$
$U(۰,۱)$	$\bar{\phi}_n$	$U(۵۰۰,۱۰۰۰)$	$FC_j$
$U(۱۰۰۰,۳۰۰۰)$	$b_{pkt}$	$U(۵۰۰,۸۰۰)$	$CFC_l$
$U(۰,۰.۵)$	$ot_p$	$U(۵۰,۶۰)$	$DAC_{lt}$
$U(۲۰۰,۳۵۰)$	$OpC_{pj}$	$U(۶۰,۱۰۰)$	$AC_{jt}$
$U(۲۰۰۰۰۰۰,۲۵۰۰۰۰۰)$	$bud_{jt}$	$U(۲۰۰,۳۰۰)$	$p.cap_{jt}$
۸ ساعت	$T_{jt}$	$U(۲۰۰,۲۵۰)$	$c.cap_{lt}$

جدول ۴- نتایج عددی مسائل بررسی شده

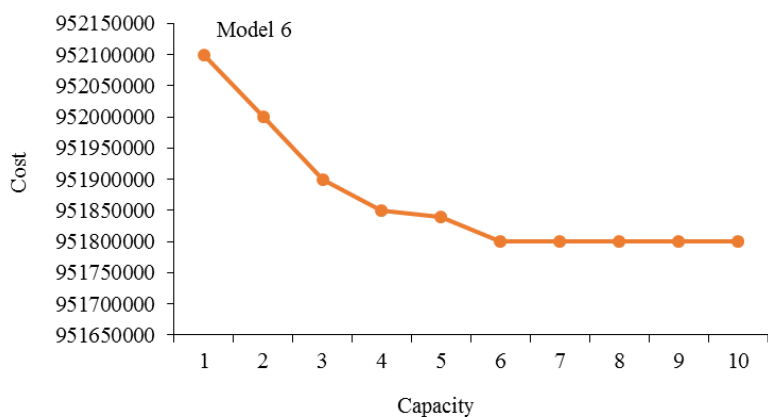
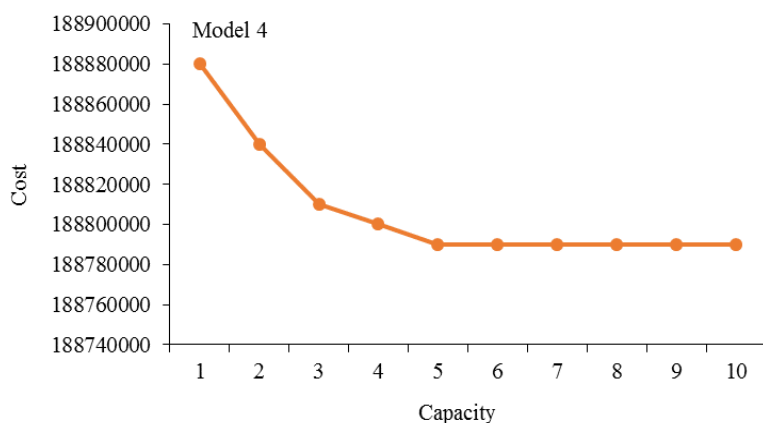
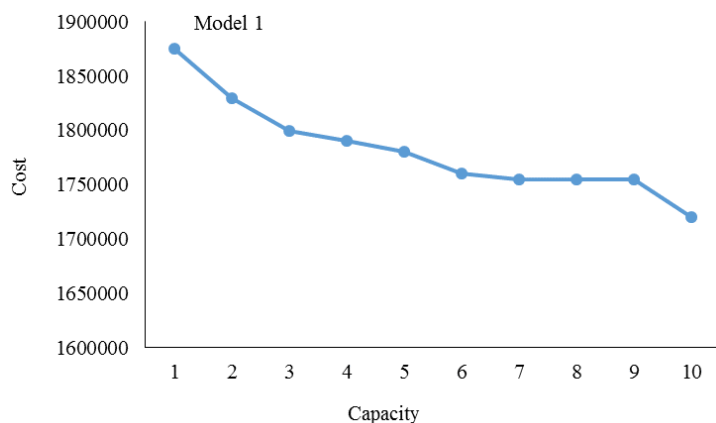
شماره مدل	تابع هدف		میزان انحراف بین لاگرانژ و CPLEX	زمان (میلی ثانیه)	
	لاگرانژ	CPLEX		لاگرانژ	CPLEX
۱	۱۷۷۶۰۱۸۳	۱۷۷۲۶۰۰۶	٪ ۰/۱	۱۱۸	۱۶۵۰
۲	۲۱۰۴۰۱۳	۲۱۰۳۶۳۲	٪ ۰/۰۱	۲۲۳	۱۷۴۳
۳	۹۳۵۵۴۲۱۰	۹۳۵۵۴۲۱۰	۰	۴۳۷	۱۹۶۷
۴	۱۸۸۷۹۵۱۰۹	۱۸۸۷۹۵۱۰۹	۰	۶۰۹	۲۲۵۸
۵	۲۰۱۹۹۷۱۲۱	۲۰۱۹۵۷۱۲۱	٪ ۰/۰۲	۳۵۱۳	۳۷۶۱
۶	۹۴۱۸۱۴۲۸۲	۹۴۳۴۹۸۵۵۳	٪ ۰/۱	۱۲۹۹۴	۵۸۳۵
۷	۹۷۳۱۲۵۳۲۸	۹۷۲۱۵۴۶۱۹	٪ ۰/۰۹	۱۸۳۴۱	۶۴۲۱
۸	۱۳۳۷۵۶۸۹۲۲	-	-	-	۷۹۳۳



شکل ۱- تحلیل حساسیت نرخ بازگشت محصولات

مقداری هزینه برای جلوگیری از هزینه‌های بیشتر در آینده یک حرکت کاملاً منطقی و استراتژیک خواهد بود. همان‌طور که در شکل (۱) مشخص است، هرچه ابعاد مسئله بزرگ‌تر می‌شود نسبت تغییرات هزینه به تغییرات نرخ بازگشت کمتر می‌شود. وقتی نرخ برگشت از حدود مشخصی بزرگ‌تر شود هزینه زنجیره تأمین مفروض بدون تغییر خواهد ماند که دلیل این امر

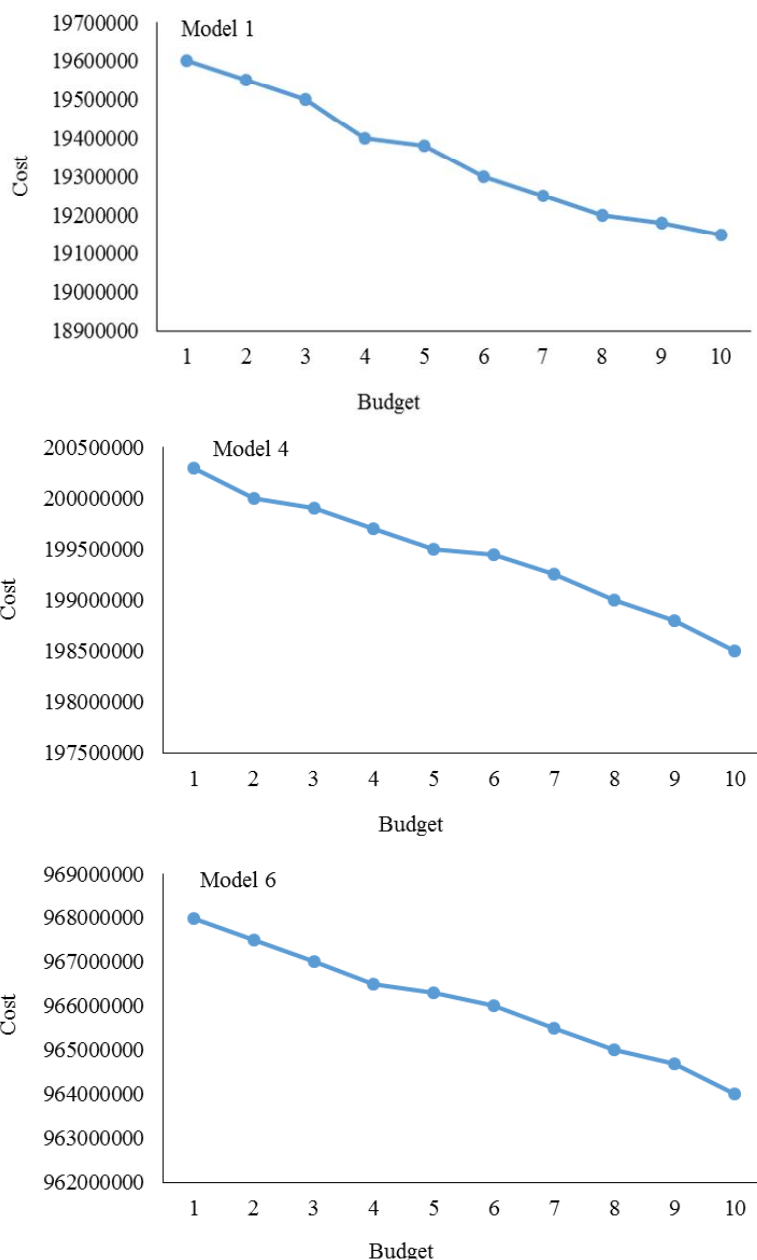
شکل‌های (۱) تا (۳)، پی بردن به این مسئله که با افزایش این پارامتر مقدار هزینه کل افزایش می‌یابد کار ساده‌ای خواهد بود. این وضعیت اهمیت این پارامتر را نشان می‌دهد. بنابراین می‌توان گفت صرف وقت و هزینه ناچیز برای افزایش کیفیت و کم شدن مقدار نرخ برگشت نه تنها باعث اضافه شدن هزینه کل نمی‌شود، بلکه باعث کاهش آن می‌شود. به عبارت دیگر، صرف



شکل ۲- تحلیل حساسیت ظرفیت مراکز تولید

در قسمت پایانی این بخش نمودارهای مربوط به بودجه‌های تخصیص داده شده به مراکز تولید نشان داده شده است. همان‌طور که در این نمودارها مشخص است زمانی که بودجه‌های در نظر گرفته شده برای تأسیس و تخصیص بیشتر می‌شود، هزینه‌های کل زنجیره تأمین در نظر گرفته شده کاهش می‌یابد. به عبارت دیگر، نه تنها افزایش بودجه به‌عنوان

این است که از آنجا به بعد تمام تقاضاها به سفارش عقب افتاده تبدیل می‌شوند. علاوه بر این در نمودارهای شکل (۲) مشاهده می‌شود با اضافه کردن میزان ظرفیت تأمین‌کننده و همچنین مراکز تولید مقدار تابع هدف مسئله کاهش می‌یابد که این نشان‌دهنده اهمیت ظرفیت تسهیلات در حل مسئله است.



شکل ۳- تحلیل حساسیت بودجه

زنجیره‌های تأمین دارد. در این مقاله به بررسی مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چند دوره‌ای و چند محصولی در شرایط ریسک تأمین و با در نظر گرفتن زمان لازم برای تولید هر محصول پرداخته شد که هدف آن کمینه کردن هزینه‌های زنجیره با توجه به تصمیمات میزان جریان بین سطوح و فروش از دست رفته است. در این مقاله با در نظر گرفتن اختلال در سطح تأمین کننده به عنوان عامل برهم زننده عملکرد زنجیره

هزینه باعث افزایش هزینه نمی‌شود، بلکه موجب کمتر شدن هزینه‌ها در کل زنجیره تأمین می‌شوند. با توجه به این امر می‌توان بیان کرد که بودجه‌ها نقش مهمی را در زنجیره تأمین ایفا می‌کنند.

#### ۷- نتیجه گیری

خرابی<sup>۷</sup> و اختلال<sup>۸</sup> در حال حاضر تأثیر فراوانی روی عملکرد



بررسی قرار گرفته است. برای مطالعات بیشتر نیز می‌توان استفاده از روش‌های متاهیورستیک را پیشنهاد داد.

تأمین به ارائه مدلی پرداخته شده است. مدل ارائه شده با استفاده از الگوریتم آزادسازی لاگرانژ حل شده و در یک مطالعه عددی صحت مدل ارائه شده و روش حل پیشنهادی مورد

## واژه‌نامه

- |                                     |                           |               |
|-------------------------------------|---------------------------|---------------|
| 1. reverse supply chain             | 4. upper bound            | 7. failure    |
| 2. mixed integer linear programming | 5. Lagrangian coefficient | 8. disruption |
| 3. lower bound                      | 6. returned product rate  |               |

## مراجع

1. Bashiri, M., and Shiri, M., "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 Research in Production Systems*, Vol. 3, No. 5, pp. 27-41, 2015, (In Farsi).
2. Li, J., Wang, S., and Cheng, T. E., "Competition and Cooperation in a Single-retailer Two-supplier Supply Chain with Supply Disruption", *International Journal of Production Economics*, Vol. 124, No. 1, pp. 137-150, 2010.
3. Melo, M. T., Nickel, S., and Saldanha-da-Gama, F., "Facility Location and Supply Chain Management-A Review", *European Journal of Operational Research*, Vol. 196, No. 2, pp. 401-412, 2009.
4. Fleischmann, M., Bloemhof-Ruwaard, J. M., Dekker, R., Van der Laan, E., Van Nunen, J. A., and Van Wassenhove, L. N., "Quantitative Models for Reverse Logistics: A Review", *European Journal of Operational Research*, Vol. 103, No. 1, pp. 1-17, 1997.
5. Krikke, H., van Harten, A., and Schuur, P., "Business Case Oce: Reverse Logistic Network Re-design for Copiers", *OR-Spektrum*, Vol. 21, No. 3, pp. 381-409, 1999.
6. Min, H., and Ko, H.-J., "The Dynamic Design of a Reverse Logistics Network From the Perspective of Third-party Logistics Service Providers", *International Journal of Production Economics*, Vol. 113, No. 1, pp. 176-192, 2008.
7. Listeş, O., and Dekker, R., "A Stochastic Approach to a Case Study for Product Recovery Network Design", *European Journal of Operational Research*, Vol. 160, No. 1, pp. 268-287, 2005.
8. Pishvae, M. S., Farahani, R. Z., and Dullaert, W., "A Memetic Algorithm for Bi-objective Integrated Forward/reverse Logistics Network Design", *Computers & Operations Research*, Vol. 37, No. 6, pp. 1100-1112, 2010.
9. Pishvae, M., and Torabi, S., "A Possibilistic Programming Approach for Closed-loop Supply Chain Network Design under Uncertainty", *Fuzzy Sets and Systems*, Vol. 161, No. 20, pp. 2668-2683, 2010.
10. Pishvae, M. S., Rabbani, M., and Torabi, S. A., "A Robust Optimization Approach to Closed-loop Supply Chain Network Design under Uncertainty", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 35, No. 2, pp. 637-649, 2011.
11. Ramezani, M., Bashiri, M., and Tavakkoli-Moghaddam, R., "A Robust Design for a Closed-loop Supply Chain Network under an Uncertain Environment", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 66, No. 5-8, pp. 825-843, 2013.
12. Hassanzadeh, Amin, S., and Zhang, G., "A Multi-objective Facility Location Model for Closed-loop Supply Chain Network under Uncertain Demand and Return", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 37, No. 6, pp. 4165-4176, 2013.
13. Qi, L., Shen, Z. -J. M., and Snyder, L. V., "The Effect of Supply Disruptions on Supply Chain Design Decisions", *Transportation Science*, Vol. 44, No. 2, pp. 274-289, 2010.
14. Aryanezhad, M. -B., Jalali, S. G., and Jabbarzadeh, A., "An Integrated Supply Chain Design Model with Random Disruptions Consideration", *African Journal of Business Management*, Vol. 4, No. 12, pp. 2393-2401, 2010.
15. Cui, T., Ouyang, Y., and Shen, Z. -J. M., "Reliable Facility Location Design under the Risk of Disruptions", *Operations Research*, Vol. 58, No. 4, part-1, pp. 998-1011, 2010.
16. Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Modarres, M., and Baboli, A., "Reliable Design of a Forward/reverse Logistics Network under Uncertainty: A Robust-M/M/c Queuing Model", *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Vol. 48, No. 6, pp. 1152-1168, 2012.

17. Vahdani, B., Tavakkoli-Moghaddam, R., Jolai, F., and Baboli, A., "Reliable Design of a Closed Loop Supply Chain Network under Uncertainty: An Interval Fuzzy Possibilistic Chance-constrained Model", *Engineering Optimization*, Vol. 45, No. 6, pp. 745-765, 2013.
18. Azad, N., Saharidis, G. K., Davoudpour, H., Malekly, H., and Yektamaram, S. A., "Strategies for Protecting Supply Chain Networks Against Facility and Transportation Disruptions: An Improved Benders Decomposition Approach", *Annals of Operations Research*, Vol. 210, No. 1, pp. 125-163, 2013.
19. Hatefi, S., and Jolai, F., "Robust and Reliable Forward-reverse Logistics Network Design under Demand Uncertainty and Facility Disruptions", *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 38, No. 9, pp. 2630-2647, 2014.
20. El-Sayed, M., Afia, N., and El-Kharbotly, A., "A Stochastic Model for Forward-reverse Logistics Network Design Under Risk", *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 58, No. 3, pp. 423-431, 2010.
21. Ramezani, M., Kimiagari, A. M., Karimi, B., and Hejazi, T. H., "Closed-loop Supply Chain Network Design under a Fuzzy Environment", *Knowledge-Based Systems*, Vol. 59, pp. 108-120, 2014.
22. Diabat, A., Battaia, O., and Nazzal, D., "An Improved Lagrangian Relaxation-based Heuristic for a Joint Location-inventory Problem", *Computers & Operations Research*, Vol. 61, pp. 170-178, 2015.
23. Kang, J. -H., and Kim, Y. -D., "Inventory Control in a Two-Level Supply Chain with Risk Pooling Effect", *International Journal of Production Economics*, Vol. 135, pp. 116-124, 2012.
24. Badri, H., Bashiri, M., and Hejazi, T. H., "Integrated Strategic and Tactical Planning in a Supply Chain Network Design with a Heuristic Solution Method", *Computers & Operations Research*, Vol. 40, pp. 1143-1154, 2013.
25. Fisher, M. L., "The Lagrangian Relaxation Method for Solving Integer Programming Problems", *Management Science*, Vol. 50, pp. 1861-1871, 2004.