

# Designing Green Closed-loop Supply Chain Network with Financial Decisions under Uncertainty

## Amir Salar Mohammadi

Ph.D. Student in Operation Management, Faculty of Management and Accounting, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran. E-mail: am\_mohammadi@sbu.ac.ir

## Akbar Alem Tabriz

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

## Mir Saman Pishvae

Assistant Prof. of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran. E-mail: pishvae@iust.ac.ir

## Abstract

**Objective:** Effective design of supply chain networks is necessary for micro-economic development. The aim of this study is to design green closed-loop supply chain network with financial decisions considering economic and environmental dimensions of development. Such decisions consist of non-supply chain investments and available loans. Uncertainty of demand and investments related to other investments (ROI) are taken into account, too.

**Methods:** Proposed model is multi-product, multi-objective, multi-period, stochastic and closed-loop which is modeled as a mixed integer linear programming problem. A scenario path model is applied in order to deal with the uncertainties.

**Results:** The results approved the effectiveness of considering financial decisions. By increasing the number of available loans, the level of the service delivered to the whole system will increase accompanied by a decreasing inclination. Obtained results are based on a case study in plastic recycling industry.

**Conclusion:** Simultaneous consideration of financial decisions and uncertainty in supply chain network design can lead to an improvement in the profit of the supply chain.

**Keywords:** Green supply chain, Mathematical programming, Supply chain network, Uncertainty, Financial decisions.

**Citation:** Mohammadi, A.S., Alem Tabriz, A., & Pishvae, M. (2018). Designing Green Closed-loop Supply Chain Network with Financial Decisions under Uncertainty. *Industrial Management Journal*, 10(1), 61- 84. (in Persian)

-----  
Industrial Management Journal, 2018, Vol. 10, No.1, pp. 61- 84

DOI: 10.22059/imj.2018.240867.1007303

Received: August 5, 2017; Accepted: February 6, 2018

© Faculty of Management, University of Tehran

# طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته همراه با تصمیم‌های مالی در شرایط عدم قطعیت

## امیرسالار محمدی

دانشجوی دکتری مدیریت تولید و عملیات، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانه:  
am\_mohammadi@sbu.ac.ir

## اکبر عالم تبریز

\* نویسنده مسئول، استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران. رایانه:  
a-tabriz@sbu.ac.ir

## میرسامان پیشوایی

استادیار مهندسی سیستم‌های اقتصادی و اجتماعی، دانشکده مهندسی صنایع دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران. رایانه:  
pishvae@iust.ac.ir

## چکیده

**هدف:** طراحی اثربخش شبکه‌های زنجیره تأمین از الزامات توسعه اقتصاد در سطح خرد است. هدف اصلی این پژوهش، طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته با در نظر گرفتن ابعاد اقتصادی و زیست‌محیطی توسعه به همراه تصمیم‌های مالی است. تصمیم‌های مالی شامل سرمایه‌گذاری‌های غیر از زنجیره تأمین و وام‌های دریافتی است. به عدم قطعیت تقاضا و بازگشت سرمایه مربوط به گزینه‌های دیگر سرمایه‌گذاری نیز توجه شده است.

**روش:** مسئله مورد بررسی چندمحصوله، چنددوره‌ای، چندهدفه، غیرقطعی و حلقه‌بسته است که به وسیله یک مدل ریاضی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ترکیبی، مدل‌سازی شده است. برای مواجهه با عدم قطعیت پارامترهای تقاضا و بازگشت سرمایه، از روش مسیر سناریو استفاده شده است.

**یافته‌ها:** نتایج پژوهش اثربخشی ملاحظه تصمیم‌های مالی در طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز را نشان می‌دهد؛ زیرا با افزایش تعداد وام‌های در دسترس، سطح خدمت ارائه‌شده به توزیع‌کنندگان افزایش می‌یابد. نتایج به‌دست‌آمده بر اساس یک مورد مطالعه در صنعت بازیافت پلاستیک است.

**نتیجه‌گیری:** ملاحظه هم‌زمان تصمیمات مالی و عدم قطعیت مربوط به تقاضا و بازگشت سرمایه به بهبود سودآوری زنجیره تأمین منجر می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** شبکه زنجیره تأمین، زنجیره تأمین سبز، عدم قطعیت، برنامه‌ریزی ریاضی، تصمیمات مالی.

**استناد:** محمدی، امیرسالار؛ عالم تبریز، اکبر؛ پیشوایی، میرسامان (۱۳۹۷). طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه بسته همراه با تصمیم‌های مالی در شرایط عدم قطعیت. *فصلنامه مدیریت صنعتی*، ۱۰(۱)، ۶۱-۸۴.

فصلنامه مدیریت صنعتی، ۱۳۹۷، دوره ۱۰، شماره ۱، صص. ۶۱-۸۴

DOI: 10.22059/imj.2018.240867.1007303

دریافت: ۱۳۹۶/۰۵/۱۴، پذیرش: ۱۳۹۶/۱۱/۱۷

© دانشکده مدیریت دانشگاه تهران

## مقدمه

در دنیای کسب‌وکار امروز رقابت میان سازمان‌ها جای خود را به رقابت میان زنجیره‌های تأمین داده است. یکی از مهم‌ترین مزایای رقابتی برای اعضای یک زنجیره تأمین در مقابل زنجیره‌های تأمین رقیب، طراحی اثربخش و کارایی شبکه زنجیره تأمین است. مدیریت این زنجیره شامل مدیریت سه نوع جریان فیزیکی، اطلاعاتی و مالی می‌شود (استدler و کیلگر، ۲۰۰۵). همان‌طور که شاپیرو (۲۰۰۴) اشاره کرده است در برنامه‌ریزی سازمانی، جریان‌ها و تصمیم‌های مالی تعامل و ارتباط زیادی با برنامه‌ریزی زنجیره تأمین دارند. آنچه در نهایت عملکرد زنجیره تأمین را مشخص می‌کند، عملکرد مالی آن در افزایش درآمدها و کاهش هزینه‌ها است. از این رو برای موفقیت زنجیره تأمین در بلندمدت، برنامه‌ریزی دقیق در زمینه ابعاد مالی در کنار ابعاد فیزیکی امری حیاتی است. علاوه بر این، مدیریت کارا و اثربخش جریان مالی زنجیره تأمین به عنوان یکی از سازه‌های اصلی در راستای تداوم و پایداری عملکرد این زنجیره شناخته می‌شود (ابراهیمی، صفری و صادقی‌مقدم، ۱۳۹۶).

در رویکردهای سنتی، عملکرد زنجیره تأمین فقط از بعد اقتصادی سنجیده می‌شد و در طراحی شبکه این زنجیره توجه محققان و صنعتگران فقط بر کمینه‌سازی هزینه‌ها یا بیشینه‌سازی درآمدها معطوف بود. اما در دهه‌های اخیر قوانین دولتی، فشارهای سازمان‌های مردم‌نهاد و وضعیت رو به افول محیط زیست، باعث شده است که اهداف و محدودیت‌های زیست‌محیطی در کنار اهداف و محدودیت‌های اقتصادی، به عنوان بخش جداناپذیری از طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین مطرح شوند (گراسمن و گویلن، ۲۰۱۰). این عوامل، علاوه بر موضوع زنجیره تأمین سبز، طراحی زنجیره‌های تأمین حلقه‌بسته را نیز رایج کرده است (سلیمانی، جویندانی، سقفی و جعفری، ۲۰۱۷). در زنجیره تأمین حلقه‌بسته، علاوه بر جریان معمول کالا از تأمین‌کننده به سمت مصرف‌کنندگان نهایی، به جریان معکوس محصولات برای بازیافت، بازسازی یا انهدام محصولات نیز توجه می‌شود. بسیاری از محققان به طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز، در ادبیات موضوع زنجیره تأمین توجه کرده‌اند. اما توجه به بعد مالی این زنجیره در این تحقیقات مغفول واقع شده است.

از طرف دیگر در دهه‌های گذشته، سبک زندگی بشر به گونه‌ای تغییر یافته که پلاستیک به عنوان یکی از پرکاربردترین و پرمصرف‌ترین مواد در سطح جهان شناخته شده است. مطالعات نشان می‌دهد که در سال ۲۰۱۵ میلادی بیش از ۳۲۲ میلیون تن پلاستیک در سطح جهان تولید شده که حدود ۲۳ میلیون تن آن در خاورمیانه و آفریقا بوده است (گزارش تولید و مصرف پلاستیک در اروپا، ۲۰۱۶). تحقیقات نشان می‌دهد بیش از نیمی از میزان پلاستیک تولیدی در خاورمیانه و آفریقا، پس از مصرف یا در زمین دفن می‌شوند یا در طبیعت رها شده و بازیافت نمی‌شوند. این در حالی است که تجزیه پلاستیک‌ها در طبیعت به چند صد سال زمان نیاز دارد و دفن این میزان پلاستیک در طبیعت اثرهای جبران‌ناپذیری بر طبیعت دارد. از این رو می‌توان نتیجه گرفت که طراحی مناسب شبکه‌های زنجیره تأمین حلقه‌بسته پلاستیک اهمیت زیادی در بازیافت پلاستیک و کاهش تأثیرات زیست‌محیطی دفن یا رهاسازی پلاستیک‌ها دارد.

بر اساس آنچه بیان شد، هدف این تحقیق عبارت است از ارائه مدلی برای طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته سبز به همراه تصمیم‌های مالی در شرایط عدم قطعیت در صنعت بازیافت پلاستیک. در این مدل، در رابطه با تصمیم‌های فیزیکی و مالی شبکه زنجیره تأمین تصمیم‌گیری می‌شود، تصمیم‌های فیزیکی شامل مکان‌یابی تسهیلات و حمل‌ونقل

محصولات و تصمیم‌های مالی شامل تصمیم‌گیری درباره گزینه‌های سرمایه‌گذاری خارج از حوزه زنجیره تأمین و همچنین وام‌های دریافتی می‌شود. هدف اصلی، افزایش درآمد حاصل از کل سرمایه‌گذاری‌ها است.

## پیشینه نظری پژوهش

### زنجیره تأمین سبز

تاریخ مطالعه و مدیریت آلودگی‌های زیست‌محیطی صنعت به زمان انقلاب صنعتی بازمی‌گردد، اما تولد مفهوم مدیریت زنجیره تأمین به سال ۱۹۸۲ میلادی برمی‌گردد (استدler و کیلگر، ۲۰۰۵). پس از آن با توجه به اهمیت مفهوم زنجیره تأمین در صنعت، موضوع مدیریت زنجیره تأمین سبز مطرح شد. سربواستاوا (۲۰۰۷) مدیریت زنجیره تأمین سبز را این گونه تعریف می‌کند: «در نظر گرفتن تفکر زیست‌محیطی در مدیریت زنجیره تأمین که شامل فرایندهای طراحی محصول، تأمین، تولید، تحویل به مشتری و مدیریت پایان عمر محصول می‌شود». اهداف کلان در مدیریت زنجیره تأمین سبز عبارت هستند از دستیابی به رفاه بیشتر، سازگاری با محیط و بهینه‌سازی مواد با بهبود سرعت و اطمینان (معزز و عزیز، ۱۳۹۵). با وجود اینکه علت گرایش اغلب سازمان‌ها به مدیریت زنجیره تأمین سبز رعایت الزامات قانونی است، این رویکرد در بلندمدت می‌تواند زمینه دستیابی شرکت‌ها به مزیت رقابتی پایدار و در نهایت سودآوری را فراهم کند (فلاح لاجیمی، عرب و بهرام‌زاده، ۱۳۹۵).

شبکه زنجیره تأمین سبز نخستین بار در سال ۱۹۹۶ میلادی توسط بلوهوف، واسن‌هول، گابل و ویور (۱۹۹۶) مطرح شد. این محققان برای طراحی بهینه شبکه زنجیره تأمین کاغذ و خمیر کاغذ در اروپا با ملاحظات زیست‌محیطی، مدلی ارائه دادند. پس از آن محققان مختلف به ارائه مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز با ویژگی‌های گوناگون پرداخته‌اند. این مدل‌ها را می‌توان به دو گروه قطعی و غیرقطعی تقسیم کرد. با توجه به هدف این تحقیق، در ادامه برخی از مهم‌ترین تحقیقات در زمینه طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز در شرایط عدم قطعیت، بررسی می‌شوند.

کستی، مینسیاردی، روبا و رواتی (۲۰۰۴) برای مدیریت زباله‌های شهری، مدل تصمیم‌گیری دوستدار محیط‌زیست را ارائه دادند. در این تحقیق نظامی تصمیم‌یار برای توسعه شبکه بازیافت شهری ارائه می‌شود. گولن و گراسمن (۲۰۱۰) مدل چندهدفه احتمالی برای طراحی زنجیره تأمین پایدار مواد شیمیایی ارائه می‌دهند و دو بعد اقتصاد و محیط زیست را در مسئله وارد می‌کنند. عدم اطمینان موجود در مسئله، مربوط به تأثیرات زیست‌محیطی است. کرسانو، وچیتیا و موتاگانا (۲۰۱۱) به طراحی زنجیره تأمین پایدار اتانول زیستی پرداخته‌اند. در این تحقیق میزان تولید مخمر و بازیافت پسماندها به عنوان دو عامل سنجش اثرهای زیست‌محیطی در نظر گرفته شده‌اند. پیشوایی و رزمی (۲۰۱۲)، مدل چندهدفه طراحی شبکه زنجیره تأمین دوستدار محیط زیست ارائه می‌دهند. در این مدل تأثیرات زیست‌محیطی با رویکرد چرخه عمر محصول سنجیده می‌شود. پیشوایی، ترابی و رزمی (۲۰۱۲) برای طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز با دو هدف کمینه‌سازی هزینه و تأثیرات زیست‌محیطی، یک مدل فازی احتمالی ارائه می‌دهند. لیرا، پونس، سرنا و ال‌هلواگی (۲۰۱۱) نیز مدل تک‌هدفه‌ای با ملاحظات اقتصادی و زیست‌محیطی ارائه داده‌اند. تحلیل حساسیت صورت‌گرفته در این تحقیق رابطه میان هزینه و تأثیرات زیست‌محیطی را می‌سنجد. گیارولا، شاه و بزو (۲۰۱۲) در طراحی زنجیره تأمین چندمحصولی اتانول زیستی، علاوه بر کاهش هزینه، کمینه‌سای انتشار گازهای گلخانه‌ای را نیز در نظر گرفته‌اند.

امین و ژانگ (۲۰۱۳) با در نظر گرفتن عدم قطعیت تقاضا و بازگشت محصولات، مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته با اهداف زیست‌محیطی و اقتصادی ارائه می‌دهند. رویز، گولن، گیمنز و کابالرو (۲۰۱۳) مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین مواد شیمیایی با اهداف زیست‌محیطی و اقتصادی و عدم اطمینان در تقاضا را ارائه می‌دهند. در این تحقیق نیز برای سنجش تأثیرات زیست‌محیطی از رویکرد چرخه عمر محصول بهره گرفته شده است. در مدل احتمالی مکان‌یابی مرکز ثقل که توسط محمدی، ترابی و توکلی مقدم (۲۰۱۴) ارائه شده است، محققان به دنبال کمینه‌سازی آلودگی صوتی و هوایی وسایل نقلیه در بعد زیست‌محیطی، هستند. صفار و رزمی (۲۰۱۵) و همچنین صفار، شکوری و رزمی (۲۰۱۴) مدل احتمالی چندهدفه برای طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز با ملاحظه انتشار گاز دی‌اکسیدکربن ارائه می‌دهند. اخیراً سلیمانی و همکاران (۲۰۱۷) مدل چندهدفه طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته با ملاحظه عدم قطعیت فزای تقاضا را ارائه داده و با استفاده از الگوریتم ژنتیک به حل آن پرداخته‌اند. جدول ۱ به صورت جامع مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز در شرایط عدم قطعیت را نمایش می‌دهد.

### جریان و تصمیم‌های مالی زنجیره تأمین

در کنار جریان‌های فیزیکی و اطلاعاتی در زنجیره تأمین، جریان مالی نیز برقرار است. به ازای هر تراکنش فیزیکی، یک تراکنش مالی نیز اتفاق می‌افتد. علاوه بر این بسیاری از تصمیم‌های سطح استراتژیک زنجیره تأمین دارای ماهیت مالی هستند و باید با سایر تصمیم‌های مالی یکپارچه و هماهنگ شوند. به بیان دیگر طراحی و مدیریت زنجیره تأمین بخشی از فعالیت‌های یک سازمان است و باید سرمایه‌گذاری در این زنجیره با سرمایه‌گذاری‌های سودآور دیگر کاملاً یکپارچه باشد (شاپیرو، ۲۰۰۴). با وجود اهمیت این موضوع، مدل‌های قابل توجهی در ادبیات موضوع این یکپارچگی را مد نظر قرار نداده‌اند.

نیکل، گاما و زیگلر (۲۰۱۲) مدلی طراحی کردند که در کنار تصمیم‌های فیزیکی طراحی شبکه زنجیره تأمین، تصمیم‌های مالی در زمینه سرمایه‌گذاری‌های غیر از زنجیره تأمین و همچنین انتخاب وام مناسب میان گزینه‌های اخذ وام نیز در آن اخذ شود. در این مدل عدم اطمینان در زمینه میزان بازگشت سرمایه‌گذاری‌ها و همچنین میزان تقاضا در نظر گرفته شده است. لانگیندیس و جورگیادس (۲۰۱۳) وضعیت مالی و توانایی پرداخت دیون را به عنوان دو عامل حیاتی در وضعیت مالی شرکت در نظر می‌گیرند و تأثیر آن را در طراحی شبکه زنجیره تأمین لحاظ می‌کنند. در مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح پیشنهادی یکپارچگی میان طراحی شبکه زنجیره تأمین و وضعیت مالی و اعتباری در شرایط عدم اطمینان اقتصادی برقرار می‌شود. گولن، بادل و پویجانر (۲۰۰۷) برای طراحی زنجیره تأمین محصولات شیمیایی علاوه بر زمان‌بندی و برنامه‌ریزی این زنجیره، در مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح ترکیبی خود، جریان مالی و بودجه را نیز بهینه‌سازی کرده‌اند. لاینز، گوپله، بادل، اسپون و پویجانر (۲۰۰۷) نیز مدلی برای بهینه‌سازی برنامه‌ریزی زنجیره تأمین شیمیایی ارائه داده‌اند که در آن فرایندهای شیمیایی و مالی به صورت همزمان و یکپارچه بهینه می‌شوند. اخیراً کلانتری، پیشوایی و یعقوبی (۱۳۹۴) برای یکپارچه‌سازی جریان مالی و فیزیکی در برنامه اصلی زنجیره تأمین، مدل بهینه‌سازی چندهدفه‌ای ارائه کرده‌اند. اهداف این مدل عبارت‌اند از بیشینه‌سازی سود و کمینه‌سازی انحراف شاخص‌های مالی از حدود مطلوب.

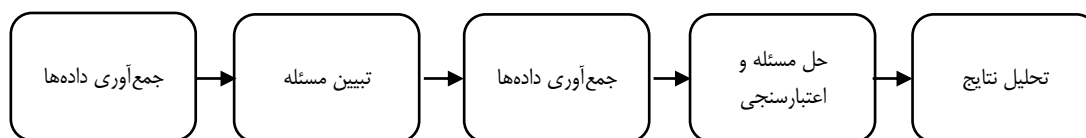
آن طور که از مرور مطالعات صورت گرفته مشخص است، تعدادی از محققان به طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز پرداخته‌اند اما در هیچ یک از این تحقیقات به تصمیم‌ها یا جریان مالی زنجیره تأمین توجه نشده است. جدول ۱ به صورت خلاصه تحقیقات طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز در شرایط عدم قطعیت را نشان می‌دهد. از طرف دیگر تعدادی از محققان به جریان مالی زنجیره تأمین توجه قرار کرده‌اند اما در این تحقیقات فقط به بعد اقتصادی آن توجه شده است و تأثیرات زیست‌محیطی زنجیره تأمین مغفول واقع شده است. این در حالی است که توجه توأمان به تأثیرات زیست‌محیطی و تصمیم‌های مالی می‌تواند در بهینه‌سازی اقتصادی - زیست‌محیطی زنجیره تأمین نقش مؤثری ایفا کند. بر این اساس، در این تحقیق برای طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز به همراه تصمیم‌های مالی در شرایط عدم قطعیت، مدلی ارائه می‌شود. این مدل علاوه بر سبز بودن، تصمیم‌های مالی و عدم قطعیت، به صورت چنددوره‌ای، چندمحصولی، چندهدفه و حلقه‌بسته طراحی می‌شود. مجموع این ویژگی‌ها باعث می‌شود مدل ارائه شده مدلی جامع باشد که علاوه بر پوشش شکاف موجود در ادبیات موضوع طراحی شبکه زنجیره تأمین، به نیاز دنیای کسب‌وکار امروز ویژگی‌هایی بسیار نزدیکی داشته باشد.

جدول ۱. مدل‌های طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز در شرایط عدم قطعیت

صنعت مورد مطالعه	ویژگی‌های شبکه زنجیره تأمین							نویسندگان
	حلقه بسته	تصمیم‌های مالی	چندهدفه	چند محصولی	چند دوره‌ای	عدم قطعیت	ابعاد	
مواد شیمیایی							ز-۱	گوپلن و گراسمن (۲۰۰۹)
مواد شیمیایی							ز-۱	گوپلن و گراسمن (۲۰۱۰)
اشاره نشده (عمومی)							ز-۱	پیشوایی، رزمی و ترابی (۲۰۱۲)
اتانول							ز-۱	جیارولا و همکاران (۲۰۱۲)
اشاره نشده (عمومی)							ز-۱	پیشوایی و رزمی (۲۰۱۲)
اشاره نشده (عمومی)							ز-۱	پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲)
اشاره نشده (عمومی)							ز-۱	امین و ژانگ (۲۰۱۳)
صنعت نفت							ز-۱	ورما، جندریم و لاپورته (۲۰۱۳)
مواد شیمیایی							ز-۱	رویز و همکاران (۲۰۱۳)
اشاره نشده (عمومی)							ز-۱	صفار و همکاران (۲۰۱۴)
اشاره نشده (عمومی)							ز-۱	محمدی، ترابی و توکلی مقدم (۲۰۱۴)
اشاره نشده (عمومی)							ز-۱	صفار و همکاران (۲۰۱۵)
اشاره نشده (عمومی)							ز-۱	ما، یائو، جین، رن و الوی (۲۰۱۶)
کشاورزی							ز-۱	ایلماز، بالامن و سلیم (۲۰۱۶)
سوخت زیستی							ز-۱	محسنی و پیشوایی (۲۰۱۶)
اشاره نشده (عمومی)							ز-۱	گلپرا، زندیه، ناجا و سجادی نژاد (۲۰۱۷)
اشاره نشده (عمومی)							ز-۱	سلیمانی و همکاران (۲۰۱۷)
اشاره نشده (عمومی)							ز-۱	محمد، سلیم، حسن و سید (۲۰۱۷)
سوخت زیستی							ز-۱	بابازاده پیشوایی، رزمی و ربانی (۲۰۱۷)
بازیافت پلاستیک							ز-۱	پژوهش حاضر

### روش‌شناسی پژوهش و مفروضات مسئله

مراحل انجام این پژوهش که در زمره پژوهش‌های کمی و کاربردی قرار دارد بدین صورت است که پس از مطالعه پیشینه نظری پژوهش، مسئله پژوهش ابتدا به صورت مفهومی و سپس به وسیله مدل ریاضی تبیین می‌شود. در گام بعد مدل ریاضی حل شده و داده‌ها و نتایج تحلیل می‌شوند. داده‌های پژوهش با روش میدانی و مصاحبه با خبرگان صنعت بازیافت پلاستیک جمع‌آوری شده و با مقایسه با اطلاعات مندرج در سامانه جامع اطلاع‌رسانی «سازمان بورس اوراق بهادار (کدال)» صحت‌سنجی شده‌اند. خبرگان مورد اشاره، همگی دارای حداقل سه سال سابقه مدیریت ارشد در حوزه‌های مرتبط با زنجیره تأمین در صنعت تولید و بازیافت پلاستیک بوده‌اند. گام‌های انجام پژوهش را می‌توان به صورت خلاصه در شکل ۱ مشاهده کرد.

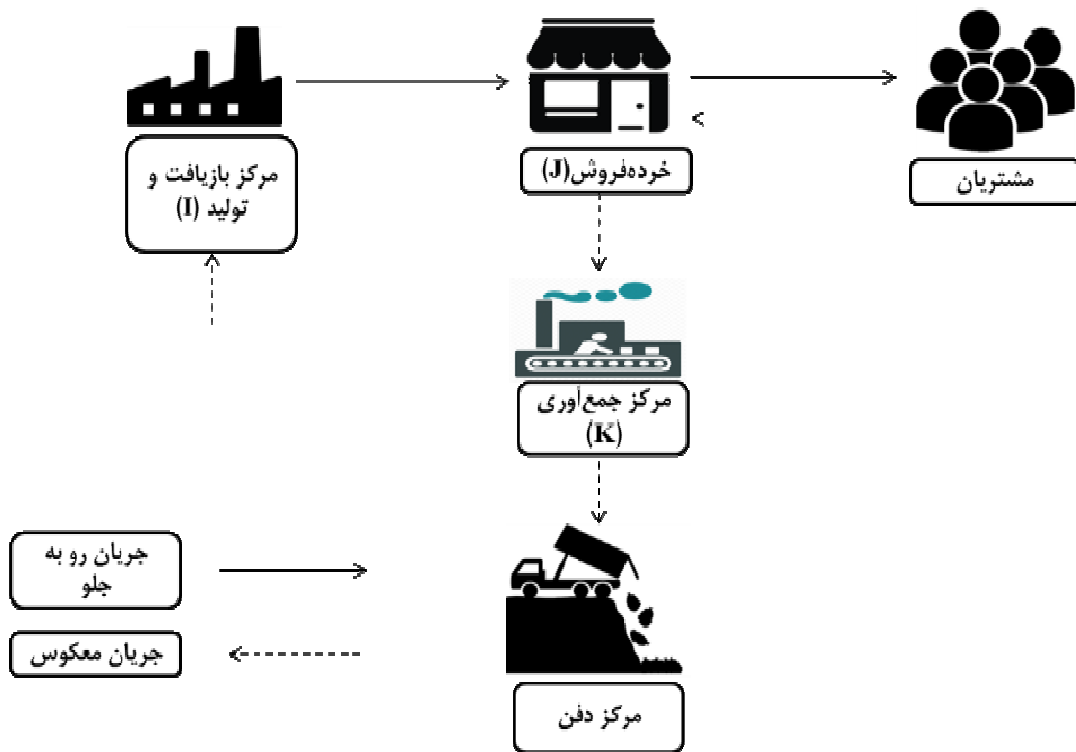


شکل ۱. گام‌های انجام پژوهش

در زنجیره تأمین مورد مطالعه در این تحقیق، همان‌طور که در شکل ۲ مشخص است، محصولات پلاستیکی ابتدا در مرکز بازیافت و تولید به شیوه بازیافت تولید می‌شوند و سپس به خرده‌فروشی‌ها ارسال می‌شوند. پس از آن فروشنده محصولات را به مشتریان می‌فروشد و مشتریان پس از مصرف محصول مصرف‌شده را دوباره به خرده‌فروشی‌ها می‌فروشند. خرده‌فروش‌ها ضایعات پلاستیک را به مراکز جمع‌آوری ارسال می‌کنند که در آنجا ضایعات جداسازی و پرس می‌شوند، پس از آن ضایعات غیرقابل بازیافت به مراکز دفن و ضایعات پرس‌شده به مرکز تولید و بازیافت ارسال می‌شوند و فرایند تولید دوباره اجرا می‌شود. تصمیم‌ها در هر دوره، در دو فاز اخذ می‌شوند، تصمیم‌های مربوط به مکان‌یابی تسهیلات، سرمایه‌گذاری‌های غیر از زنجیره تأمین و وام‌های دریافت‌شده در فاز نخست (ابتدای دوره) اخذ می‌شوند و تصمیم‌های مربوط به حمل در فاز دوم و پس از تعیین مکان تسهیلات اتخاذ می‌شوند. منظور از سرمایه‌گذاری‌های غیر از زنجیره تأمین سرمایه‌گذاری در گزینه‌های دیگری مانند بانک، اوراق و غیره است.

مفروضات مسئله نیز به شرح زیر است:

- تصمیم‌های مکان‌یابی تسهیلات از دوره‌ای به دوره دیگر تغییر می‌کند.
- خرده‌فروش‌ها، مشتریان و مراکز دفن، ثابت هستند.
- مشتریان بدهی خود را در انتهای هر دوره پرداخت می‌کنند.
- ارضای کامل تقاضای خرده‌فروشی‌ها لازم نیست و میزان ارضای تقاضای مشتری وابسته به وزن اهمیت آن است (یکی از متغیرهای تصمیم مسئله، سطح خدمت به هر خرده‌فروشی است).
- میان تسهیلات در یک سطح از زنجیره، ارتباطی وجود ندارد.
- ضایعات پلاستیک طی بازیافت با توجه به جداسازی ناخالصی‌ها افت وزن دارند.



شکل ۲. ساختار شبکه زنجیره تأمین مورد مطالعه

### مدل‌سازی مسئله

پیش از ارائه مدل مسئله، ابتدا اندیس‌ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم معرفی می‌شوند.

#### اندیس‌ها

$i$ : اندیس مراکز تولید و بازیافت

$j$ : اندیس مراکز خرده‌فروشی

$q$ : اندیس تکنولوژی تولید

$m$ : اندیس گزینه سرمایه‌گذاری

$k$ : اندیس مراکز جمع‌آوری ضایعات

$p$ : اندیس محصولات

$t$ : اندیس دوره‌های زمانی

$b$ : اندیس وام

#### پارامترهای فنی

$K_i^q$ : ظرفیت مرکز تولید با تکنولوژی  $q$

$\mu_{pi}^q$ : نرخ استفاده از ظرفیت تولید یک واحد از محصول  $p$  با تکنولوژی  $q$  در مرکز تولید و بازیافت  $i$

$\alpha_j$ : وزن اهمیت خرده‌فروش  $j$



$MF_p$ : حداقل نرخ افت ضایعات محصول  $p$  در فرایند بازیافت

$K_k^q$ : ظرفیت جمع‌آوری  $k$  با تکنولوژی  $q$

$\varepsilon_{pk}^q$ : نرخ استفاده از ظرفیت جمع‌آوری یک واحد از ضایعات محصول  $p$  با تکنولوژی  $q$  در مرکز جمع‌آوری  $k$

$DF_p$ : حداکثر نرخ افت ضایعات محصول  $p$  در فرایند بازیافت

### پارامترهای اقتصادی

$C_{iq}^t$ : هزینه ثابت افتتاح مرکز تولید  $i$  در دوره  $t$  با تکنولوژی  $q$

$V_{ijp}^t$ : هزینه حمل یک واحد از محصول  $p$  از مرکز تولید  $i$  به خرده‌فروشی  $j$  در دوره  $t$

$V_{kip}^t$ : هزینه حمل یک واحد از ضایعات محصول  $p$  از مرکز جمع‌آوری  $k$  به مرکز تولید  $i$  در دوره  $t$

$Z_{kip}^t$ : درآمد واحد حاصل از فروش ضایعات محصول  $p$  توسط مرکز جمع‌آوری  $k$  به مرکز تولید  $i$  در دوره  $t$

ROI: نرخ بازگشت سرمایه‌گذار مورد هدف در کل دوره برنامه‌ریزی

$f_{iq}$ : نرخ استهلاک دوره‌ای مربوط به مرکز تولید  $i$  با تکنولوژی  $q$

$c$ : وزن اهمیت ریسک عدول از نرخ بازگشت مورد هدف در تابع هدف

$Q_{kq}^t$ : هزینه ثابت افتتاح مرکز جمع‌آوری  $k$  در دوره  $t$  با تکنولوژی  $q$

$V_{jkp}^t$ : هزینه حمل یک واحد از ضایعات محصول  $p$  از خرده‌فروشی  $j$  به مرکز جمع‌آوری  $k$  در دوره  $t$

$R_{ijp}^t$ : درآمد واحد حاصل از فروش محصول  $p$  توسط مرکز تولید  $i$  به خرده‌فروشی  $j$  در دوره  $t$

$\eta_b^t$ : نرخ بهره وام  $b$  که در دوره  $t$  پراخت می‌شود.

$BD^t$ : بودجه تزریقی در دسترس در ابتدای دوره  $t$

$\gamma_{kq}$ : نرخ استهلاک دوره‌ای مربوط به مرکز جمع‌آوری  $k$  با تکنولوژی  $q$

### پارامترهای زیست‌محیطی

$en_p^q$ : تأثیر زیست‌محیطی تولید یک واحد از محصول  $p$  با استفاده از تکنولوژی  $q$

$ex_{jk}^p$ : تأثیر زیست‌محیطی حمل یک واحد از ضایعات محصول  $p$  از خرده‌فروشی  $j$  به مرکز جمع‌آوری  $k$

$ec_{kp}^q$ : تأثیر زیست‌محیطی جمع‌آوری یک واحد از ضایعات محصول  $p$  با استفاده از تکنولوژی  $q$  در مرکز جمع‌آوری  $k$

$et_k^q$ : تأثیر زیست‌محیطی برقراری مرکز جمع‌آوری  $k$  با تکنولوژی  $q$

$em_{ij}^p$ : تأثیر زیست‌محیطی حمل یک واحد از محصول  $p$  از مرکز تولید  $i$  به خرده‌فروشی  $j$

$ey_{ki}^p$ : تأثیر زیست‌محیطی حمل یک واحد از ضایعات محصول  $p$  از مرکز جمع‌آوری  $k$  به خرده‌فروشی  $i$

$es_i^q$ : تأثیر زیست‌محیطی برقراری مرکز تولید  $i$  با تکنولوژی  $q$

### پارامترهای غیرقطعی

$\omega^t$ : یک رویداد در دوره  $t$

$\Omega^t$ : متغیر تصادفی نشان‌دهنده رویدادهایی که ممکن است در دوره  $t$  محقق شوند.

$$\begin{aligned}
 & p(\Omega^t = \omega^t): \text{احتمال تحقق رویداد } \omega^t \\
 & \Phi_m^t(\Omega^t): \text{یک رویداد از مجموعه } \Phi_m^t = \Phi_m^t(\omega^t) \\
 & DP_{jp}^t(\Omega^t): \text{یک رویداد از مجموعه } DP_{jp}^t = DP_{jp}^t(\omega^t) \\
 & \omega^0: \text{وضعیت حال} \\
 & \Omega^0: \text{وضعیت نرمال در آغاز دوره برنامه‌ریزی} \\
 & \Phi_m^t(\Omega^t): \text{نرخ بازگشت سرمایه‌گذاری } m \text{ که در انتهای دوره } t \text{ پرداخت می‌شود.} \\
 & DP_{jp}^t(\Omega^t): \text{تقاضای خرده‌فروشی } j \text{ برای محصول } p \text{ در دوره } t
 \end{aligned}$$

### متغیرهای تصمیم مالی

$$\begin{aligned}
 & R_m^t: \text{مقدار بودجه سرمایه‌گذاری شده در سرمایه‌گذاری } m \text{ در ابتدای دوره } t \\
 & DR: \text{ریسک عدول از نرخ بازگشت هدف} \\
 & L_b^t: \text{مقدار بودجه به‌دست‌آمده از وام } b \text{ در دوره } t \\
 & SL_j: \text{نرخ خدمت ارائه‌شده به خرده‌فروشی } j \text{ در کل دوره برنامه‌ریزی}
 \end{aligned}$$

### متغیرهای تصمیم فیزیکی

$$\begin{aligned}
 & U_{iq}^t: \text{اگر مرکز تولید و بازیافت } i \text{ با تکنولوژی } q \text{ در دوره } t \text{ برقرار شد برابر با } 1, \text{ در غیر این صورت برابر با صفر} \\
 & X_{ijp}^t: \text{مقدار محصول } p \text{ حمل‌شده از مرکز تولید و بازیافت } i \text{ به خرده‌فروشی } j \text{ در دوره } t \\
 & M_{kip}^t: \text{مقدار ضایعات جمع‌آوری و پرس‌شده محصول } p \text{ حمل‌شده از مرکز جمع‌آوری } k \text{ به مرکز تولید و بازیافت } i \text{ در} \\
 & \text{دوره } t \\
 & UC_{kq}^t: \text{اگر مرکز جمع‌آوری } k \text{ با تکنولوژی } q \text{ در دوره } t \text{ برقرار شد برابر با } 1, \text{ در غیر این صورت برابر با صفر} \\
 & U_{jkp}^t: \text{مقدار ضایعات محصول } p \text{ حمل‌شده از خرده‌فروشی } j \text{ به مرکز جمع‌آوری } k \text{ در دوره } t
 \end{aligned}$$

### توابع و محدودیت‌ها

همان‌طور که پیش‌تر اشاره شد، تصمیم‌ها در هر دوره در دو مرحله اخذ می‌شوند، از این رو توابع هدف و محدودیت‌ها نیز برای هر دوره و در هر دوره در دو مرحله طراحی می‌شوند.

### ابتدای دوره ۱

در ابتدای دوره ۱، تصمیم‌ها در زمینه میزان سرمایه‌گذاری در هر یک از گزینه‌های سرمایه‌گذاری، میزان وام دریافتی از هر یک از گزینه‌های وام، تسهیلات تولید و بازیافت و تسهیلات جمع‌آوری، اتخاذ می‌شود. اهداف این تصمیم‌گیری شامل بیشینه‌سازی سود در انتهای دوره نخست و ابتدای دوره‌های بعدی هستند. زیرا سود حاصل از سرمایه‌گذاری در هر دوره در ابتدای دوره‌های بعد دریافت می‌شود.

$$\text{Max } Q^{-1} = \sum_{\omega^1} P(\Omega^1 = \omega^1) \cdot Q^{+1} (U^1, UC^1, DP^1) \quad \text{رابطه ۱}$$

$$+ \sum_{\omega^1} P(\Omega^1 = \omega^1) \cdot Q^{-2} (\phi^1, R^1, L^1)$$

$$\text{Min } N^{-1} = \sum_i \sum_q u_{iq}^1 es_i^q + \sum_i \sum_q uc_{kq}^1 et_k^q \quad \text{رابطه ۲}$$

s. t.

$$BD^1 - \sum_i \sum_q C_{iq}^1 U_{iq}^1 - \sum_k \sum_q Q_{kq}^1 UC_{kq}^1 - \sum_m R_M^1 + \sum_b L_b^1 \geq 0 \quad \text{رابطه ۳}$$

$$U_{iq}^1, UC_{kq}^1 \in \{0; 1\} \quad \forall i, k, q. \quad \text{رابطه ۴}$$

$$R_M^1, L_b^1 \geq 0 \quad \forall i, M, b, k, q. \quad \text{رابطه ۵}$$

در رابطه ۱، بیان می‌شود مکان‌یابی تسهیلات تولید و بازیافت و جمع‌آوری ضایعات و همچنین بازگشت سرمایه‌گذاری‌ها باید به نحوی باشد که سود مورد انتظار بیشینه شود. مکان‌یابی تسهیلات وابسته به تقاضا، انتخاب گزینه‌های سرمایه‌گذاری‌ها و وام‌ها وابسته به نرخ بازگشت سرمایه‌گذاری‌ها است. رابطه ۲ تأثیرات زیست‌محیطی تأسیسات مراکز تولید و بازیافت و همچنین جمع‌آوری را به حداقل می‌رساند. محدودیت بیان شده در رابطه ۳ تضمین می‌کند که توازن بودجه برقرار باشد و سرمایه‌گذاری‌های صورت گرفته و هزینه تأسیسات تسهیلات از بودجه تزریق شده و وام‌های دریافت شده بیشتر نباشد. روابط ۴ و ۵ نیز ماهیت متغیرهای تصمیم را مشخص می‌کند.

### انتهای دوره ۱

در انتهای دوره زمانی نخست، تصمیم‌های مربوط به حمل‌ونقل در مسیر مراکز تولید و بازیافت به خرده‌فروشی‌ها، خرده‌فروشی‌ها به مراکز جمع‌آوری و همچنین مراکز جمع‌آوری به مراکز تولید و بازیافت اخذ می‌شود.

$$\text{Max } Q^{+1} = \sum_i \sum_j \sum_p \sum_k ((R_{ijp}^1 - V_{ijp}^1) X_{ijp}^1 + (Z_{kip}^1 - Vr_{kip}^1 - (U_{jkp}^1 * Vc_{jkp}^1)) M_{kip}^1) * (1 + ROI)^{T-1} \quad \text{رابطه ۶}$$

$$\text{Min } N^{+1} = \sum_i \sum_j \sum_q (en_p^q + em_{ij}^p) X_{ijp}^1 + \sum_j \sum_k \sum_p ex_{jk}^p U_{jkp}^1 \quad \text{رابطه ۷}$$

$$+ \sum_i \sum_k \sum_p (ey_{ki}^p + ec_{kp}^q) \cdot M_{kip}^1$$

s.t

$$\sum_p \mu_{pi}^q * \sum_j X_{ijp}^1 \leq K_i^q * U_{iq}^1 \quad \forall q, i \quad \text{رابطه ۸}$$

$$\sum_p \varepsilon_{pk}^q * \sum_i M_{kip}^1 \leq KC_k^q * UC_{kq}^1 \quad \forall q, k \quad \text{رابطه ۹}$$

$$\sum_i X_{ijp}^1 \leq DP_{jp}^1 \quad \forall j, p \quad \text{رابطه ۱۰}$$

$$\sum_k M_{kip}^1 (1 - MF_p) \leq \sum_j X_{ijp}^1 \leq \sum_k M_{kip}^1 (1 - DF_p) \quad \forall i, p \quad \text{رابطه ۱۱}$$

$$X_{ijp}^1 * M_{kip}^1 \geq 0 \quad \forall i, j, p, k. \quad \text{رابطه ۱۲}$$

$$MF_p, DF_p \in [0; 1] \quad \forall p \quad \text{رابطه ۱۳}$$

در رابطه ۶ سود حاصل از خرید ضایعات از خرده‌فروشی‌ها و تبدیل آن به محصول بیشینه می‌شود. این تابع هدف طوری تنظیم شده است که سود حاصل از سرمایه‌گذاری نقدینگی به‌دست‌آمده در دوره‌های آتی نیز محاسبه شود و نرخ بازگشت<sup>۱</sup> آن مطابق نرخ بازگشت هدف باشد. رابطه ۶ مربوط به کمینه‌سازی تأثیرات زیست‌محیطی حمل‌ونقل است. محدودیت‌های ۸ و ۹ به ترتیب مربوط به ظرفیت مراکز تولید و بازیافت و جمع‌آوری هستند. در محدودیت ۱۰ تضمین می‌شود که مقدار کالای ارسالی به مراکز توزیع بیش از تقاضای آنان نباشد. به وسیله محدودیت ۱۱ نیز تضمین می‌شود که با توجه به افت وزن ضایعات در فرایند بازیافت (با توجه به زوده شدن ناخالصی‌های ضایعات)، میزان ضایعات ارسال شده از مراکز جمع‌آوری به مراکز تولید و بازیافت مناسب تقاضای این مراکز باشد. محدودیت‌های ۱۲ و ۱۳ مربوط به ماهیت متغیرهای تصمیم هستند.

### ابتدای دوره t

پس از پایان دوره نخست، در ابتدای دوره  $t \in \{2, \dots, T-1\}$  تصمیم‌های مربوط به فاز نخست دوره بر اساس مدل زیر اخذ می‌شود.

$$\begin{aligned} \text{Max } Q^{-t} = & \sum_{\omega^t} P(\Omega^t = \omega^t) \cdot Q^{+t} (U^t, UC^t, DP^t) \\ & + \sum_{\omega^t} P(\Omega^t = \omega^t) \cdot Q^{-(t+1)} (\phi^t, R^t, L^t) \end{aligned} \quad \text{رابطه ۱۴}$$

$$\text{Min } N^{-t} = \sum_i \sum_q u_{iq}^t es_i^q + \sum_i \sum_q uc_{kq}^t et_k^q \quad \text{رابطه ۱۵}$$

$$\begin{aligned} \text{s.t} \\ BD^t - \sum_i \sum_q C_{iq}^t U_{iq}^t - \sum_k \sum_q Q_{kq}^t UC_{kq}^t - \sum_m R_m^t + \sum_b L_b^t \\ + \sum_{t=1}^{t-1} \left( \sum_m \phi_m^t * R_m^t - \sum_b \eta_b^t * L_b^t \right) \geq 0 \end{aligned} \quad \text{رابطه ۱۶}$$

$$U_{iq}^t \cdot UC_{kq}^t \in \{0; 1\} \quad \forall i, k, q \quad \text{رابطه ۱۷}$$

$$L_b^t \cdot R_m^t \geq 0 \quad \forall b, m, t \quad \text{رابطه ۱۸}$$

رابطه ۱۴ در راستای بیشینه‌سازی درآمد از تصمیم‌های مکان‌یابی و سرمایه‌گذاری طراحی شده است. رابطه ۱۵ در راستای کمینه‌سازی تأثیرات زیست‌محیطی تأسیس تسهیلات بیان شده است. محدودیت ۱۶ مربوط به توازن و کفایت بودجه برای سرمایه‌گذاری و تأسیس تسهیلات است، در بخش آخر این رابطه نقدینگی مربوط به سرمایه‌گذاری‌های پیشین و همچنین پرداخت‌های مربوط به وام‌هایی که پیش‌تر اخذ شده‌اند، محاسبه می‌شود. روابط ۱۷ و ۱۸ مربوط به ماهیت متغیرهای تصمیم هستند.

#### انتهای دوره t

$$\text{Max } Q^{+t} = \sum_i \sum_j \sum_p \sum_k ((R_{ijp}^t - V_{ijp}^t) X_{ijp}^t + (Z_{kip}^t - Vr_{kip}^t - (U_{jkp}^t * VC_{jkp}^t)) M_{kip}^t) * (1 + ROI)^{T-t} \quad \text{رابطه ۱۹}$$

$$\text{Min } N^{+t} = \sum_i \sum_j \sum_q (en_p^q + em_{ij}^p) X_{ijp}^t + \sum_j \sum_k \sum_p ex_{jk}^p U_{jkp}^t + \sum_i \sum_k \sum_p (ey_{ki}^p + ec_{kp}^q) \cdot M_{kip}^t \quad \text{رابطه ۲۰}$$

s.t

$$\sum_p \mu_{pi}^q * \sum_j X_{ijp}^t \leq K_{ip}^q * U_{iq}^t \quad \forall q, i \quad \text{رابطه ۲۱}$$

$$\sum_p \varepsilon_{pk}^q * \sum_i M_{kip}^t \leq KC_{kp}^q * UC_{kq}^t \quad \forall q, k \quad \text{رابطه ۲۲}$$

$$\sum_i X_{ijp}^t \leq DP_{jp}^t \quad \forall j, p \quad \text{رابطه ۲۳}$$

$$\sum_k M_{kip}^t (1 - MF_p) \leq \sum_j X_{ijp}^t \leq \sum_k M_{kip}^t (1 - DF_p) \quad \forall i, p \quad \text{رابطه ۲۴}$$

$$X_{ijp}^t \cdot M_{kip}^t \geq 0 \quad \forall i, j, p, k \quad \text{رابطه ۲۵}$$

#### ابتدای دوره T

$$\text{Max } Q^{-T} = \sum_{\omega^T} P(\Omega^T = \omega^T) \cdot Q^{+T} (U^T, UC^T, DP^T) \quad \text{رابطه ۲۶}$$

$$\text{Min } N^{-T} = \sum_i \sum_q u_{iq}^T es_i^q + \sum_i \sum_q uc_{kq}^T et_k^q \quad \text{رابطه (۲۷)}$$

s.t رابطه (۲۸)

$$BD^T - \sum_i \sum_q C_{iq}^T U_{iq}^T - \sum_k \sum_q Q_{kq}^T UC_{kq}^T - \sum_m R_m^T + \sum_b L_b^T + \sum_{t=1}^{T-1} \left( \sum_m \phi_m^{T-1} * R_m^t - \sum_b \eta_b^{T-1} * L_b^t \right) \geq 0$$

$$U_{iq}^T \cdot UC_{kq}^T \in \{0; 1\} \quad \forall i. k. q \quad \text{رابطه (۲۹)}$$

$$L_b^T \cdot R_m^T \geq 0 \quad \forall b. m. t \quad \text{رابطه (۳۰)}$$

در ابتدای دوره T همانند ابتدای دوره‌های دیگر سود حاصل از برقرار کردن تسهیلات بیشینه می‌شود، اما در این دوره با توجه به اینکه دوره نهایی برنامه‌ریزی است، سود حاصل از سرمایه‌گذاری به دوره‌های بعد منتقل نمی‌شود. تابع هدف و محدودیت‌های دیگر، مشابه ابتدای دوره‌های قبل است.

### انتهای دوره T

$$\begin{aligned} \text{Max } Q^{+T} = & \sum_i \sum_j \sum_p \sum_k ((R_{ijp}^T - V_{ijp}^T) X_{ijp}^t + (Z_{kip}^T - Vr_{kip}^T - (U_{jkp}^T \\ & * VC_{jkp}^T)) M_{kip}^T) + \sum_j \beta_j * SL_j - cDR \\ & + \sum_{t=1}^T \left( \sum_m \phi_m^T * R_m^T - \sum_b \eta_b^T * L_b^T \right) - \sum_i \sum_q (\beta_{iq}) * U_{iq}^T * C_{iq}^T \\ & - \sum_k \sum_q (\beta_{kq}) * UC_{kq}^T * Q_{kq}^T \end{aligned} \quad \text{رابطه (۳۱)}$$

$$\begin{aligned} \text{Min } N^{+T} = & \sum_i \sum_j \sum_q (en_p^q + em_{ij}^p) X_{ijp}^T + \sum_j \sum_k \sum_p ex_{jk}^p U_{jkp}^T \\ & + \sum_i \sum_k \sum_p (ey_{ki}^p + ec_{kp}^q) M_{kip}^T \end{aligned} \quad \text{رابطه (۳۲)}$$

s.t رابطه (۳۳)

$$\sum_p \mu_{pi}^q * \sum_j X_{ijp}^T \leq K_{ip}^q * U_{iq}^T \quad \forall q. i$$

$$\sum_p \varepsilon_{pk}^q * \sum_i M_{kip}^T \leq KC_{kp}^q * UC_{kq}^T \quad \forall q. k \quad \text{رابطه (۳۴)}$$

$$\sum_i X_{ijp}^T \leq DP_{jp}^T \quad \forall j, p \quad \text{رابطه ۳۵}$$

$$\sum_k M_{kip}^T (1 - MF_p) \leq \sum_j X_{ijp}^T \leq \sum_k M_{kip}^T (1 - DF_p) \quad \forall j, p \quad \text{رابطه ۳۶}$$

$$DR \geq 1 - \frac{A}{\sum_t BG^t \cdot (1 + ROI)^{T-t+1}} \quad \text{رابطه ۳۷}$$

$$\begin{aligned} A = & \sum_t \left( \sum_m \phi_m^T \cdot R_m^T \right. \\ & - \sum_b \eta_b^T \cdot L_b^T \left. \right) \\ & + \sum_i \sum_j \sum_p \sum_p \left( (R_{ijp}^t - V_{ijp}^t) \cdot X_{ijp}^t \right. \\ & + \left. (Z_{kip}^t - V_{kip}^t - (U_{jkp}^t \cdot V_{cjkp}^t)) \cdot M_{kip}^t \right) \cdot (1 + ROI)^{T-t} - \sum_i \sum_q (\hat{h}_{iq}) \cdot U_{iq}^T \cdot C_{iq}^T \\ & - \sum_k \sum_q (y_{kq}) \cdot U_{Ckq}^T \cdot Q_{kq}^T \end{aligned}$$

$$\sum_t \sum_p X_{ijp}^t \geq SL_j * \sum_t \sum_p DP_{jp}^t \quad \forall j \quad \text{رابطه ۳۸}$$

$$SL_j \in [0; 1] \quad \forall j \quad \text{رابطه ۳۹}$$

$$DR \geq 0 \quad \text{رابطه ۴۰}$$

در رابطه ۳۱، همانند انتهای دوره‌های دیگر سود حاصل از فروش محصولات به مشتریان بیشینه می‌شود. اما در این دوره، علاوه بر این موضوع سطح خدمت (پاسخ به تقاضا) به مشتریان بیشینه، انحراف از نرخ بازگشت هدف کمینه، استهلاك مربوط به مراکز تولید و بازیافت و همچنین جمع‌آوری کمینه و سود حاصل از سرمایه‌گذاری‌ها بیشینه می‌شود. استهلاك، نرخ بازگشت و سطح خدمت همه دوره‌ها تجمیع و در این دوره محاسبه می‌شود. در رابطه ۳۲، هدف کمینه کردن تأثیرات زیست‌محیطی حمل و تأسیس تسهیلات در دوره آخر است. نامساوی‌های ۳۳ و ۳۴ به ترتیب مربوط به ظرفیت مراکز تولید و بازیافت و جمع‌آوری هستند. روابط ۳۵ و ۳۶ نیز به ترتیب مربوط به تقاضای خرده‌فروشی‌ها و توازن میان ورودی و خروجی‌های مراکز تولید و بازیافت با توجه به افت بار هستند. رابطه ۳۷ یکی از مهم‌ترین روابط این مدل است، در سمت راست این نامساوی نسبت نرخ بازگشت محقق شده به نرخ بازگشت هدف محاسبه می‌شود و از عدد یک کسر می‌شود و در سمت چپ متغیر تصمیم مربوط به انحراف از نرخ بازگشت هدف قرار داده شده است. از این رو هر چه میزان انحراف از نرخ بازگشت هدف بیشتر شود، این متغیر تصمیم بیشتر می‌شود. بر همین اساس در تابع هدف رابطه ۳۱، این متغیر تصمیم کمینه شده است. در رابطه ۳۸ بیان می‌شود که میزان ارسال کالا به یک مشتری باید بیش از حاصل ضرب تقاضای مشتری و سطح خدمت ارائه شده به آن مشتری باشد. پیش از این، در تابع هدف سطح خدمت مشتریان بیشینه شده است. روابط ۳۹ و ۴۰ بیانگر ماهیت متغیرهای تصمیم هستند.

## روش حل

مدلی که در بخش قبل ارائه شده به صورت دقیقی مسئله مورد بررسی در این تحقیق را بیان کرده و شناخت مسئله را ممکن می‌سازد، اما قابلیت حل ندارد. برای حل مسئله نیاز به یک مدل جامع با ترکیب دوره‌های زمانی است. نیکل و همکاران (۲۰۱۲) برای حل مسائل تصادفی چند دوره‌ای، یک مدل برنامه‌ریزی سناریو ارائه می‌دهند. در این مدل ترکیبی از رویدادهای حادث شده از دوره نخست تا دوره آخر یک سناریو را می‌سازند. احتمال هر سناریو برابر است با ضرب دکارتی احتمال هر یک از رویدادها.

برای فرموله کردن مسئله، لازم است ابتدا پارامترهای جدید معرفی شود:

$$S^t = \Omega^1 \times \Omega^2 \times \dots \times \Omega^t$$

$S^0$ : نقطه شروع

$$path_{s^t} = \{s^0, s^1, \dots, s^t\}$$

$$S^t \in S^t = (\omega^0 \times \omega^1 \times \dots \times \omega^t)$$

$S^T$ : مسیری از رویدادها از نقطه ابتدا تا نقطه‌ای در انتهای دوره  $T$  که یک سناریو کامل را می‌کند.

$$P(S^t = s^t) = \prod_{t=1}^t p(\Omega^t = \omega^t)$$

بر اساس آنچه بیان شد، مسئله به صورت زیر فرموله می‌شود:

$$\begin{aligned} \text{Max } Q = & \sum_t \sum_{s^t \in S^t} P(S^t = s^t) & \text{رابطه (۴۱)} \\ & * \left[ \sum_j \sum_j \sum_k \sum_p ((R_{ijp}^t - V_{ijp}^t) * X_{ijp}^t(s^t)) \right. \\ & + (Z_{kip}^t - V_{kip}^t - (U_{jkp}^t(s^t) * V_{jkp}^t)) * M_{kip}^t(s^t) \left. \right] + \sum_{s^T \in S^T} P(S^T = s^T) \\ & * \left[ \sum_j \beta_j * SL_j(s^T) - c * DR(s^T) \right. \\ & + \sum_t \sum_{s^{t-1} \in path_{s^T}} \left( \sum_m \phi_m^t(s^T) * R_m^t(s^{t-1}) - \sum_b \eta_b^t(s^T) * L_b^t(s^{t-1}) \right) \\ & \left. - \sum_i \sum_q (\hat{h}_{iq}) * U_{iq}^T(s^{t-1}) * C_{iq}^T - \sum_k \sum_q (y_{kq}) * UC_{kq}^T(s^{t-1}) * Q_{kq}^T \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Min } N = & \sum_t \sum_{s^t \in S^t} P(S^t) & \text{رابطه (۴۲)} \\ = & s^t * \left[ \sum_q \sum_p \sum_i \sum_j (en_p^q - em_{ij}^p) * X_{ijp}^t(s^t) \right. \\ & + \sum_j \sum_k \sum_p en_{jk}^p * U_{jkp}^t(s^t) + \sum_q \sum_p \sum_k \sum_i (ey_{ki}^p + ec_{kp}^q) * M_{kip}^t(s^t) \left. \right] \\ & + \sum_t \sum_{s^t \in S^t} P(S^t = s^t) * \left[ \sum_i \sum_q U_{iq}^T * es_i^q + \sum_k \sum_q UC_{kq}^T * et_k^q \right] \end{aligned}$$



s.t. رابطه (۴۳)

$$BD^1 - \sum_i \sum_q C_{iq}^1 U_{iq}^1(s^0) - \sum_k \sum_q Q_{kq}^1 UC_{kq}^1(s^0) - \sum_m R_M^1(s^0) + \sum_b L_b^1(s^0) \geq 0$$

$$BD^t - \sum_i \sum_q C_{iq}^t U_{iq}^t(s^{t-1}) - \sum_k \sum_q Q_{kq}^t UC_{kq}^t(s^{t-1}) - \sum_m R_M^t(s^{t-1}) + \sum_b L_b^t(s^{t-1}) + \sum_{t=1}^{t-1} \left( \sum_m \phi_m^t \cdot R_m^t(s^{t-1}) - \sum_b \eta_b^t \cdot L_b^t(s^{t-1}) \right) \geq 0$$
رابطه (۴۴)

$$\sum_p \mu_{pi}^q * \sum_i X_{ijp}^t(s^t) \leq K_i^q * U_{iq}^t(s^{t-1}) \quad \forall q, j$$
رابطه (۴۵)

$$\sum_p \varepsilon_{pk}^q * \sum_i M_{kip}^t(s^t) \leq KC_k^q * UC_{kq}^t(s^{t-1}) \quad \forall q, k$$
رابطه (۴۶)

$$\sum_i X_{ijp}^t(s^t) \leq DP_{jp}^t(s^t) \quad \square j, p$$
رابطه (۴۷)

$$\sum_k M_{kip}^t(s^t)(1 - MF_p) \leq \sum_j X_{ijp}^t(s^t) \leq \sum_k M_{kip}^t(s^t)(1 - DF_p) \quad \forall i, p$$
رابطه (۴۸)

$$DR \geq 1 - \frac{A}{\sum_t BG^t * (1 + ROI)^{T-t+1}}$$
رابطه (۴۹)

$$A = \sum_t \left( \left( \sum_m \phi_m^T * R_m^T - \sum_b \eta_b^T * L_b^T \right) + \sum_i \sum_j \sum_p \sum_p \left( (R_{ijp}^t - V_{ijp}^t) * X_{ijp}^t + (Z_{kip}^t - Vr_{kip}^t - (U_{jkp}^t * V_{cjkp}^t)) * M_{kip}^t \right) \cdot (1 + ROI)^{T-t} - \sum_i \sum_q (\eta_{iq}) * U_{iq}^T * C_{iq}^T - \sum_k \sum_q (\gamma_{kq}) * UC_{kq}^T * Q_{kq}^T \right)$$

$$\sum_i \sum_t \sum_p X_{ijp}^t(s^t) \geq SL_j * \sum_t \sum_p DP_{jp}^t(s^t) \quad \forall j$$
رابطه (۵۰)

$$U_{iq}^1 \cdot UC_{kq}^1 \in \{0; 1\}$$
رابطه (۵۱)

$$X_{ijp}^t(s^t) \cdot M_{kip}^t(s^t) \cdot DP_{jp}^t(s^t) \cdot R_m^t(s^{t-1}) \cdot L_b^t(s^{t-1}) \cdot DR(s^T) \geq 0 \quad \forall i, j, p, k, m, b$$
رابطه (۵۲)

$$SL_j(s^T) \in [0; 1] \quad \forall j$$
رابطه (۵۳)

مسئله طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه‌بسته، در دسته مسائل NP-hard قرار می‌گیرد که برای آن نمی‌توان از راه حل‌های دقیق بهره برد (پیشوایی، زنجیرانی فراهانی و دولائرت، ۲۰۰۶). از طرف دیگر، مدل طراحی شده در این تحقیق یک مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح چندهدفه<sup>۱</sup> است. در این نوع مدل، با توجه به وجود چند تابع هدف، راه حلی بهینه که همزمان همه توابع هدف را بهینه کند وجود ندارد. از این رو تصمیم‌گیرندگان به دنبال پاسخی ارجح هستند. بر این اساس، در مدل‌های برنامه‌ریزی ریاضی چندهدفه، مفهوم کارایی یا بهینگی پارتو جایگزین مفهوم بهینگی می‌شود. پاسخ بهینه پارتو پاسخی است که پس از دستیابی به آن، نمی‌توان یکی از توابع هدف را بدون کاهش بهینگی توابع دیگر، بهبود بخشید (آقایی، امجدی و شایان‌فر، ۲۰۱۱). یکی از بهترین روش‌های حل مسائل چندهدفه، روش محدودیت اسیلون<sup>۲</sup> است که در آن یک از توابع هدف به عنوان تابع اصلی شناخته می‌شود و سایر توابع به محدودیت‌های مدل منتقل می‌شوند. در این تحقیق برای مواجهه با ماهیت چندهدفه مسئله، از روش محدودیت اسیلون ارائه‌شده توسط ماوروتاس (۲۰۰۹) استفاده شده است. مزیت روش ارائه شده توسط ماوروتاس (۲۰۰۹) که محدودیت اسیلون تقویت‌شده<sup>۳</sup> نام دارد، نسب به مدل ساده محدودیت اسیلون این است که زمان فرایند حل را به وسیله حذف تکرارهای زائد و عدم انتخاب پاسخ‌های پارتویی ضعیف کاهش می‌دهد. به بیان دقیق‌تر، در مدل طراحی شده توسط این محقق، الگوریتم به سرعت از حلقه مسدود<sup>۴</sup> که به تولید جواب غیرموجه منجر می‌شود، خارج می‌شود.

بر این اساس، الگوریتم حل مسئله بیان شده در این تحقیق بدین صورت بوده که ابتدا هر یک از دو تابع هدف به طور جداگانه به عنوان تابع هدف اصلی در نظر گرفته شده و جواب‌های بهینه به دست آمده است. با در نظر گرفتن تابع هدف اقتصادی به عنوان تابع هدف اصلی، بهترین جواب ممکن برای این تابع و بدترین جواب ممکن برای تابع هدف زیست‌محیطی به دست می‌آید. برای به دست آوردن بهترین جواب ممکن برای تابع هدف زیست‌محیطی این تابع به عنوان تابع اصلی در نظر گرفته شده و مسئله حل شده است. بدین صورت، دامنه تغییرات تابع هدف زیست‌محیطی به دست آمده است. سپس تابع هدف اقتصادی به عنوان تابع اصلی در نظر گرفته شده و دامنه تابع هدف زیست‌محیطی به تعداد  $g_N$  نقطه تقسیم شده است. سپس حداقل به تعداد نقاط ذکرشده، مسئله حل شده و مجموعه‌ای از پاسخ‌های کارا و امکان‌پذیر به دست آمده است. از مجموعه بالا، پاسخی که بهترین مقدار برای تابع هدف را تضمین کند به عنوان پاسخ بهینه انتخاب شده است. رابطه ۵۴، مدل عمومی الگوریتم را نمایش می‌دهد.

$$\max Q(x) + eps. (s_N/r_N) \quad \text{رابطه ۵۴}$$

st:

$$x \in S$$

$$N(x) - s_N = e_N$$

$$\text{Where } e_N = lb_N + (i_N + r_N)/g_N$$

در این رابطه،  $lb_N$  حد پایین تابع هدف  $N$ ؛  $S$  ناحیه امکان‌پذیر؛  $g_N$  تعداد گریدپوینت‌ها؛  $r_N$  بازه تابع هدف  $N$ ؛

$eps$  عددی بسیار کوچک و  $i_N$  شمارشگر است.

1. Multi-Objective Mixed Integer Linear Programming
2.  $\epsilon$ -constraint
3. Augmented  $\epsilon$ -constraint
4. Nested loop

## پیااده‌سازی مدل

مفروضات مدل طراحی شده بر اساس ویژگی‌های صنعت بازیافت بیان شده‌اند. برای پیاده‌سازی مدل یک شرکت بازیافت پلاستیک با ۱۲ توزیع‌کننده به عنوان مشتری، ۸ محل به عنوان کاندید برای احداث محل تولید و بازیافت و ۵ محل به عنوان کاندید برای احداث مرکز جمع‌آوری در نظر گرفته شده است. این شرکت دو نوع محصول می‌کند و برای سرمایه‌گذاری ۵ گزینه با احتمالات نرخ بازگشت متفاوت و برای اخذ وام ۴ گزینه با شرایط بازپرداخت متفاوت در دسترس دارد. برای حل مدل از حل‌کننده سی‌پلکس<sup>۱</sup> با محدودیت زمانی ۳۰۰۰ ثانیه بهره گرفته شده است. جدول ۲ نتایج را به صورت خلاصه نشان می‌دهد.

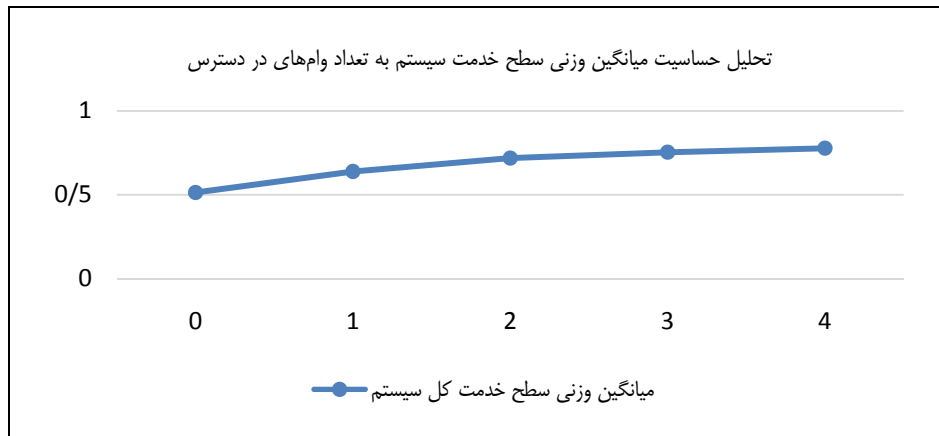
نتایج نشان داده شده در جدول ۲ با در نظر گرفتن ۴ گزینه اخذ وام به دست آمده است. برای نشان دادن ارزش در نظر گرفتن وام به عنوان بودجه اضافی برای سرمایه‌گذاری، تحلیل حساسیت روی تعداد وام‌های دریافتی صورت گرفته است. تحلیل حساسیت تأثیر تعداد وام‌ها بر سطح خدمت ارائه شده به توزیع‌کنندگان را بررسی می‌کند. شکل ۳ نتایج این تحلیل حساسیت را نشان می‌دهد.

جدول ۲. نتایج

ریسک افول از نرخ بازگشت سرمایه مورد هدف	تابع هدف اقتصادی	میانگین وزنی سطح خدمت کل سیستم	سطح خدمت ارائه شده به مشتری در کل دوره برنامه‌ریزی	محل و شماره توزیع کننده
۰/۱۳۳	۳۷۴۵۸۴	۰/۷۸	۰/۹۱	۱. تهران
			۰/۶	۲. شیراز
			۱	۳. اصفهان
			۰/۹۴	۴. اصفهان
			۰/۳۸	۵. بندرعباس
			۰/۵۶	۶. تبریز
			۰/۹۲	۷. اصفهان
			۰/۸۱	۸. تهران
			۰/۳۹	۹. تبریز
			۱	۱۰. اصفهان
			۰/۷۴	۱۱. یزد
			۰/۶۸	۱۲. تهران

همان‌طور که در شکل ۳ مشخص است، افزایش تعداد وام‌های در دسترس، با شبیهی کندشونده موجب بهبود سطح خدمت میانگین به مشتریان می‌شود. اخذ وام موجب افزایش بودجه و متعاقب آن افزایش توانمندی مدیران برای تأسیس

تسهیلات تولید و بازیافت و همچنین جمع‌آوری ضایعات می‌شود که افزایش تسهیلات فیزیکی باعث افزایش حجم تولید و پاسخگویی به نیاز توزیع‌کنندگان می‌شود. اما این تأثیر دارای شیب کاهنده است و تأثیر گزینه چهارم نسبت به گزینه نخست در افزایش سطح خدمت بسیار کمتر است تا جایی که اضافه کردن گزینه نخست ۲۴ درصد سطح خدمت سیستم را افزایش می‌دهد (۰/۶۳۸۶ نسبت به ۰/۵۱۳۵). اما وجود چهار گزینه نسبت به سه گزینه موجب ۳ درصد بهبود در سطح خدمت سیستم می‌شود (۰/۷۵۳۷ نسبت به ۰/۷۷۷۳).



شکل ۳. تحلیل حساسیت سطح خدمت سیستم به تعداد وام‌های در دسترس

برای ارزیابی کارایی فرمول مسیر سناریو که برای ملاحظه عدم قطعیت به کار گرفته شده، از شاخص ارزش مرتبط با رویکرد تصادفی چندمرحله‌ای<sup>۱</sup> استفاده شده است. در این شاخص درصد تفاوت تابع هدف در مدل قطعی و تصادفی محاسبه می‌شود. برای محاسبه تابع هدف در مدل قطعی از مفهوم امید ریاضی برای پارامترهای غیرقطعی استفاده می‌شود و در فرمول جایگزین پارامتر غیرقطعی می‌شود. از این رو به جای  $\Phi_m^t(s^T)$  از  $E[\Phi_m^t(s^T)]$  استفاده می‌شود و  $E[DP_{jp}^t(s^T)]$  جایگزین  $DP_{jp}^t(s^T)$  شده و تابع هدف محاسبه می‌شود:

$$RVMSA = \frac{Q^{STO} - Q^{DET}}{Q^{DET}} = \frac{374584 - 368421}{368421} = 0.017 \quad (\text{رابطه ۵۵})$$

نتیجه نشان می‌دهد که استفاده از مدل غیرقطعی تابع هدف را به میزان ۰/۰۱۷ درصد بهبود می‌دهد و مدل غیرقطعی نسبت به مدل قطعی، کارایی بیشتری دارد.

برای به دست آمدن نتایج بالا، در هر دوره سه سناریو خوشبینانه، واقع‌بینانه و بدبینانه با احتمال یکسان در نظر گرفته شده‌اند. برای ملاحظه تأثیر احتمال تخصیص داده‌شده برای هر سناریو، احتمالات وقوع سناریوها با سه ترکیب دیگر نیز مطابق جدول ۳ در نظر گرفته شدند. طبیعی است که با تغییر احتمال وقوع سناریوهای خوشبینانه، واقع‌بینانه و بدبینانه نرخ بازگشت مورد هدف سرمایه‌گذار نیز تغییر کند. جدول ۳، تأثیر تغییر ترکیب احتمالات سناریوها و نرخ بازگشت مورد هدف بر تابع هدف اقتصادی و ریسک افول از نرخ بازگشت سرمایه مورد هدف را نشان می‌دهد. در شرایطی که احتمال وقوع سناریوی خوشبینانه بیشتر است، متعاقب آن انتظار سرمایه‌گذار از نرخ بازگشت بیشتر می‌شود. با

1. Relative value of multi-stage stochastic approach (RVMSA)

توجه به اینکه در سناریو خوشبینانه احتمال مربوط تقاضا و نرخ بازگشت بیشتر، بیشتر است، تابع هدف اقتصادی ۷/۱ درصد نسبت به شرایط مساوی بودن احتمال رویدادها افزایش می‌یابد اما ریسک افول از بازگشت سرمایه مورد نیاز نیز ۲۱/۸ درصد افزایش می‌یابد، زیرا نرخ بازگشت مورد هدف افزایش زیادی داشته است. در شرایطی که رویدادهای واقع‌بینانه بیشترین احتمالات وقوع را داشته باشند نیز تابع هدف نسبت به شرایط مساوی بودن احتمال رویدادها ۲/۱ درصد افزایش دارد. ولی با توجه به اینکه در این شرایط نرخ بازگشت سرمایه مورد هدف کمتر است، ریسک افول از آن ۶/۷ درصد است. سرانجام در شرایطی که بیشترین احتمال وقوع مربوط به رویدادهای بدبینانه باشد، تابع هدف اقتصادی نسبت به شرایط مساوی بودن احتمال رویدادها ۱/۷ درصد کاهش دارد اما با توجه به کاهش نرخ بازگشت مورد هدف، ریسک عدول از آن ۲۰/۳ درصد کاهش می‌یابد.

جدول ۳. تأثیر تغییر ترکیب احتمالات سناریوها بر نتایج

احتمال وقوع هر سناریو	نرخ بازگشت مورد هدف	تابع هدف اقتصادی	میزان تغییر تابع هدف اقتصادی نسبت به شرایط احتمال مساوی برای سناریوها	ریسک افول از نرخ بازگشت سرمایه مورد هدف	میزان تغییر ریسک افول نسبت به شرایط احتمال مساوی برای سناریوها
خوش‌بینانه: ۵۰ درصد، واقع‌بینانه: ۳۰ درصد، بدبینانه: ۲۰ درصد	۵۰ درصد	۴۰۱۲۷۸	۷/۱ درصد افزایش	۰/۱۶۲	۲۱/۸ درصد افزایش
خوش‌بینانه: ۲۰ درصد، واقع‌بینانه: ۶۰ درصد، بدبینانه: ۲۰ درصد	۳۵ درصد	۳۸۲۴۶۰	۲/۱ درصد افزایش	۰/۱۴۲	۶/۷ درصد افزایش
خوش‌بینانه: ۲۰ درصد، واقع‌بینانه: ۳۰ درصد، بدبینانه: ۵۰ درصد	۲۰ درصد	۳۶۸۰۴۳	۱/۷ درصد کاهش	۰/۱۰۶	۲۰/۳ درصد کاهش

برای اعتبارسنجی نتایج مدل از روش شرایط سخت<sup>۱</sup> استفاده شده است. در این روش به یکی از پارامترهای مسئله یک عدد بسیار بزرگ یا بسیار کوچک تخصیص داده می‌شود و رفتار مدل در قبال آن ملاحظه می‌شود (استرمن، ۲۰۰۰). بر این اساس، پس از حل مدل، برای هزینه حمل بین برخی مراکز تولید و بازیافت و خرده‌فروشی‌ها یک عدد بسیار بزرگ و غیرمنطقی، که بیست برابر هزینه عادی حمل و نقل بود، در نظر گرفته شد و در نتایج مشاهده شد که تبادل کالا بین این اعضای زنجیره حذف شد. علاوه بر این، با توجه به کاهش مسیرهای در دسترس با هزینه منطقی، سود کل شبکه نیز با کاهش مواجه شد.

### نتیجه‌گیری و پیشنهادها

با توجه به تنگنای مالی پیش روی بنگاه‌های اقتصادی در ایران و همچنین کمبودهای مربوط به ابعاد زیست‌محیطی توسعه، مشاهده این مسائل در طراحی ابعاد مختلف کسب‌وکارها امری حیاتی و ضروری است. از این رو در این تحقیق به

1. Extreme condition

ارائه مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین سبز حلقه‌بسته به همراه تصمیم‌های مالی در شرایط عدم قطعیت پرداخته شد. در بعد مالی مدل، تصمیم‌های مربوط به سرمایه‌گذاری در زنجیره تأمین در کنار تصمیم‌های سرمایه‌گذاری در حوزه‌های دیگر قرار داده شد و نحوه تأمین مالی نیز به وسیله انتخاب میزان و نوع وام‌های دریافتی تعیین شد. علاوه بر بیشینه‌سازی درآمد، سطح خدمت و کمینه‌سازی انحراف از بازگشت سرمایه مورد هدف در بعد مالی و اقتصادی، در بعد زیست‌محیطی تأثیرات زیست‌محیطی تولید، حمل و مصرف محصولات و تأسیس تسهیلات کمینه شد. برای مواجهه با عدم قطعیت مربوط به تقاضا و بازگشت سرمایه از روش مسیر سناریو استفاده شد که در آن در هر دوره سه سناریو خوش‌بینانه، واقع‌بینانه و بدبینانه در نظر گرفته شده و با روش فرموله‌بندی مسیر مدل‌سازی شد. بررسی نتایج مدل حل شده نشان‌دهنده تأثیر مثبت تصمیم‌های مالی بر سطح خدمت ارائه‌شده به توزیع‌کنندگان است. با افزایش گزینه‌های وام در دسترس سطح خدمت ارائه‌شده به توزیع‌کنندگان با شیب کاهنده‌ای افزایش یافت. به طور کلی، نتایج نشان می‌دهد که ملاحظه تصمیم‌های مالی به صورت یکپارچه با تصمیم‌های فیزیکی، عملکرد زنجیره تأمین را هم از لحاظ سودآوری و هم از لحاظ پاسخ به نیاز مشتریان بهبود می‌بخشد. از این رو از لحاظ کاربردی، پیشنهاد می‌شود تصمیم‌های سطح استراتژیک زنجیره تأمین به صورت یکپارچه با تصمیم‌های مالی در زمینه سرمایه‌گذاری و تأمین سرمایه اخذ شود. چنین رویکردی نه تنها سود عایدی سرمایه‌گذار در مجموع سرمایه‌گذاری‌ها را بیشتر می‌کند، بلکه عملکرد زنجیره تأمین را نیز هم از لحاظ سودآوری و هم از لحاظ پاسخ به مشتری بهبود می‌بخشد. همچنین مشاهده تصمیم‌های تأمین مالی به صورت یکپارچه با طراحی استراتژیک زنجیره تأمین، می‌تواند ریسک عدم بازپرداخت بدهی‌ها را کاهش دهد. علاوه بر این، تأثیر مثبت مشاهده عدم قطعیت در مدل، نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاران با تشکیل گروه‌های خبرگی و تعیین سناریوهای مختلف و تصمیم‌گیری بر مبنای سناریوها و احتمال رویداد آنها، می‌توانند کیفیت تصمیم‌های خود را در زمینه سرمایه‌گذاری و طراحی شبکه زنجیره تأمین بهبود بخشند.

برای تحقیقات آتی پیشنهاد می‌شود با توجه به شرایط اقتصادی کشور، به ریسک عوامل محیطی مانند نرخ ارز و نرخ تورم بر سرمایه‌گذاری‌های مختلف و تأثیر آن در بازگشت سرمایه هر یک از گزینه‌های سرمایه‌گذاری توجه شود. علاوه بر این پیشنهاد می‌شود روش‌های دیگر مواجهه با عدم قطعیت بررسی و نتایج آن از حیث کارایی با روش مورد استفاده در این تحقیق مقایسه شود. همچنین تأثیرات زیست‌محیطی سرمایه‌گذاری‌های دیگر نیز می‌تواند در تصمیم‌گیری مد نظر قرار گیرد. همچنین با توجه به مطالبات معوق فراوان در نظام بانکی کشور، محاسبه ریسک عدم بازپرداخت وام‌ها نیز از موارد دیگری است که می‌تواند مد نظر محققان قرار گیرد. در زمینه ریسک، محققان می‌توانند تأثیر تحریم‌ها بر تصمیم‌گیری را لحاظ کنند، بدین صورت که میزان تأثیر تحریم‌ها بر هر یک از گزینه‌های سرمایه‌گذاری در نظر گرفته شده و در تصمیم‌گیری اثرگذار باشد.

## منابع

ابراهیمی، مهران؛ صفری، حسین؛ صادقی‌مقدم، محمدرضا (۱۳۹۶). ارائه مدل تداوم زنجیره تأمین بر اساس رویکرد طراحی آگروماتیک، ۹ (۴)، ۵۸۶-۵۸۶.

- کلانتری، محدثه؛ پیشوایی، میرسامان؛ یعقوبی، سعید (۱۳۹۴). یک مدل بهینه‌سازی چندهدفه برای یکپارچه‌سازی جریان فیزیکی در برنامه‌ریزی اصلی زنجیره تأمین. چشم‌انداز مدیریت صنعتی، ۱۹، ۹-۳۱.
- فلاح لاجیمی، حمیدرضا؛ عرب، علیرضا؛ بهرام زاده، هوشمند (۱۳۹۵). بررسی موانع پیاده‌سازی زنجیره تأمین سبز در صنایع فولاد استان مازندران با رویکرد ترکیبی BSC/BWM. فصلنامه مدیریت صنعتی، ۸ (۴)، ۶۵۳-۶۸۴.
- معزز، هاشم؛ عزیزی، جواد (۱۳۹۵). توسعه مدل مدیریت زنجیره تأمین سبز یانگ در شرکت سینره. فصلنامه مدیریت صنعتی، ۸ (۲)، ۳۰۹-۳۳۲.

## References

- Aghaei, J., Amjadi, N., & Shayanfar, H.A. (2011). Multi-objective electricity market clearing considering dynamic security by lexicographic optimization and augmented epsilon constraint method. *Applied Soft Computing*, 11(4), 3846–3858.
- 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.
- Babazadeh, R., Razmi, J., Pishvae, M. S., & Rabbani, M. (2017). A sustainable second-generation biodiesel supply chain network design problem under risk. *Omega (United Kingdom)*, 66, 258–277.
- Bloemhof-Ruwaard, J., Van Wassenhovel, L. N., Gabel, H. L., & Weaver, P. M. (1996). An environmental life cycle optimization model for the European pulp and paper industry. *Omega*, 6(24), 615–629.
- Corsano, G., Vecchiotti, A. R., & Montagna, J. M. (2011). Optimal design for sustainable bioethanol supply chain considering detailed plant performance model. *Computers and Chemical Engineering*, 35(8, S1), 1384–1398.
- Costi, P., Minciardi, R., Robba, M., Rovatti, M., & Sacile, R. (2004). An environmentally sustainable decision model for urban solid waste management. *Waste Management*, 24(3), 277–295.
- Ebrahimi, M., Safari, H., & Sadeghi-Moghadam, M. R. (2018). A Supply chain continuity model based on axiomatic design approach. *Industrial Management Journal*, 9(4), 563–586. (in Persian)
- Fallah-Lajimi, H. R., Arab, A., & Bahramzadeh, H. (2017). Investigate the barriers of implement green supply chain in Mazandaran steel industry with a combined approach BSC / BWM. *Industrial Management Journal*, 8(4), 653–684. (in Persian)
- Grossmann, I. E., & Guillén-Gosálbez, G. (2010). Scope for the application of mathematical programming techniques in the synthesis and planning of sustainable processes. *Computers & Chemical Engineering*, 34(9), 1365–1376.
- Giarola, S., Shah, N., & Bezzo, F. (2012). A comprehensive approach to the design of ethanol supply chains including carbon trading effects. *Bioresource Technology*, 107, 175–185.
- Golpira, H., Zandieh, M., Najaa, E., & Sadi-Nezhad, S. (2017). A multi-objective, multi-echelon green supply chain network design problem with risk-averse retailers in an uncertain environment. *Scientia Iranica E*, 24(1), 413–423.

- Guillén-Gosálbez, G., & Grossmann, I. (2010). A global optimization strategy for the environmentally conscious design of chemical supply chains under uncertainty in the damage assessment model. *Computers & Chemical Engineering*, 34(1), 42–58.
- Guillén-Gosálbez, G., & Grossmann, I. (2009). Optimal design and planning of sustainable chemical supply chains under uncertainty. *AIChE journal*, 55(1), 99–121.
- Guillen, G., Badell, M., & Puigjaner, L. (2007). A holistic framework for short-term supply chain management integrating production and corporate financial planning. *International Journal of Production Economics*, 106(1), 288–306.
- Kalantari, M., Pishvae, M. S., & Yaghoubi, S. (2015). A multi-objective optimization model for integrating financial and physical flow in supply chain master planning. *Journal of Industrial Management Perspective*, 19, 9-31. (in Persian)
- Lai, J.M., Guille, G., Badell, M., Espun, A., & Puigjaner, L. (2007). Enhancing Corporate Value in the Optimal Design of Chemical Supply Chains. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 46(23), 7739–7757.
- Lira-Barragán, L. F., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., & El-Halwagi, M. (2011). An MINLP Model for the Optimal Location of a New Industrial Plant with Simultaneous Consideration of Economic and Environmental Criteria. *Industrial Engineering Chemistry Research*, 50(2), 953–964.
- Longinidis, P., & Georgiadis, M. C. (2013). Managing the trade-offs between financial performance and credit solvency in the optimal design of supply chain networks under economic uncertainty. *Computers and Chemical Engineering*, 48, 264–279.
- MA, R., YAO, L., JIN, M., REN, P., & LV, Z. (2016). Robust environmental closed-loop supply chain design under uncertainty. *Chaos, Solitons and Fractals*, 89, 195–202.
- Mavrotas, G. (2009). Effective implementation of the  $\epsilon$ -constraint method in Multi-Objective Mathematical Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, 213(2), 455–465.
- Moazzez, H., & Azizi, J. (2016). Developing the green supply chain management model of Yang in Cinere company. *Industrial Management Journal*, 8(2), 309-332. (in Persian)
- Mohammadi, M., Torabi, S. a., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2014). Sustainable hub location under mixed uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 62, 89–115.
- Mohammed, F., Selim, S. Z., Hassan, A., & Syed, M. N. (2017). Multi-period planning of closed-loop supply chain with carbon policies under uncertainty. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 51, 146–172.
- Mohseni, S., & Pishvae, M. S. (2016). A robust programming approach towards design and optimization of microalgae-based biofuel supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 100, 58-71.
- Nickel, S., Saldanha-da-Gama, F., & Ziegler, H.-P. (2012). A multi-stage stochastic supply network design problem with financial decisions and risk management. *Omega*, 40(5), 511–524.



- Pishvae, M. S., & Razmi, J. (2012). Environmental supply chain network design using multi-objective fuzzy mathematical programming. *Applied Mathematical Modelling*, 36(8), 3433–3446.
- Pishvae, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2012). Robust possibilistic programming for socially responsible supply chain network design: A new approach. *Fuzzy Sets and Systems*, 206, 1–20.
- Pishvae, M. S., Torabi, S. A., & Razmi, J. (2012). Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 62(2), 624–632.
- Pishvae, M. S., Zanjirani Farahani, R., & Dullaert, W. (2006). C A memetic algorithm for bi-objective integrated forward/reverse logistics network design. *Computers & Operations Research*, 37(6), 1100–1112.
- PlasticsEurope. (2016). Plastic - the facts 2016, 38. Retrieved from <http://www.plasticseurope.es/Document/plastics---the-facts-2016-15787.aspx?FolID=2>.
- Ruiz-Femenia, R., Guillen-Gosalbez, G., Jimenez, L., & Caballero, J. a. (2013). Multi-objective optimization of environmentally conscious chemical supply chains under demand uncertainty. *Chemical Engineering Science*, 95, 1–11.
- Saffar, M. M., G, H. S., & Razmi, J. (2015). A new multi objective optimization model for designing a green supply chain network under uncertainty. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 6, 15–32.
- Saffar, M. M., Shakouri G., H., & Razmi, J. (2014). A new bi-objective mixed integer linear programming for designing a supply chain considering CO2 emission. *Uncertain Supply Chain Management*, 2(4), 275–292.
- Shapiro, J. F. (2004). Challenges of strategic supply chain planning and modeling.. *Computers & Chemical Engineering*, 28(6), 855–861.
- Soleimani, H., Govindan, K., Saghafi, H., & Jafari, H. (2017). Fuzzy Multi-Objective Sustainable and Green Closed-Loop Supply Chain Network Design. *Computers & Industrial Engineering*, 109, 191-203.
- Srivastava, S. K. (2007). Green supply-chain management: a state-of-the-art literature review. *International Journal of Management Reviews*, 9(1), 53–80.
- Stadtler, H., & Kilger, C. (2005). Supply chain management and advance planning (3rd ed.). *Springer*.
- Sterman, J. D. (2000). Business Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. *McGraw-Hill, USA*.
- Verma, M., Gendreau, M., & Laporte, G. (2013). Optimal location and capability of oil-spill response facilities for the south coast of Newfoundland. *Omega*, 41(5), 856–867.
- Yilmaz Balaman, Ş., & Selim, H. (2016). Sustainable design of renewable energy supply chains integrated with district heating systems: A fuzzy optimization approach. *Journal of Cleaner Production*, 133, 863-885.