

A Closed-Loop Supply Chain Network in the Edible Oil Industry using a Novel Robust Stochastic-Possibilistic Programming

Ehsan Dehghan 

Ph.D. Candidate in Industrial Management, Department of Industrial Management, Faculty of Economic and Management, University of Semnan, Semnan, Iran.

Maghsoud Amiri 

Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Management and Accounting, Allameh Tabataba'i University, Tehran, Iran.

Mohsen Shafiei
Nikabadi 

Associate Professor, Department of Industrial Management, Faculty of Economic and Management, University of Semnan, Semnan, Iran.

Armin Jabbarzadeh 

Assistant Professor, Department of Industrial Engineering, Iran University of Science and Technology (IUST), Tehran, Iran.

Abstract

In recent years, the complexity of the environment, the intense competition of organizations, the pressure of governments on producers to manage waste products, environmental pressures and most importantly, the benefits of recycling products have added to the importance of designing a closed loop supply chain network. Also, the existence of inherent uncertainties in the input parameters is another important factor that the lack of attention them can affect the strategic, tactical and operational decisions of organizations. Given these reasons, this research aims to design a multi-product and multi period closed loop supply chain network model in uncertainty conditions. To this aim, first a mixed-integer linear programming model is proposed to minimize supply chain costs. Then, for considering model hybrid

* Corresponding Author: Shafiei@semnan.ac.ir

How to Cite: Dehghan, E., Amiri, M., Shafiei Nikabadi, M., Jabbarzadeh, A. (2022). A Closed-Loop Supply Chain Network in the Edible Oil Industry using a Novel Robust Stochastic-Possibilistic Programming, *Journal of Industrial Management Studies*, 20(64), 95-152.

uncertainties effectively, randomness and epistemic uncertainty, a novel robust stochastic-possibilistic programming (RSPP) approach is proposed. Furthermore, several varieties of RSPP models are developed and their differences, weaknesses, strengths and the most suitable conditions for being used are discussed. Finally, usefulness and applicability of the RSPP model are tested via the real case study in an edible oil industry.

Keywords: Closed-Loop Supply Chain Network Design, Robust Programming, Fuzzy Programming, Stochastic Programming, Possibilistic Programming, Edible Oil Supply Chain.



طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت روغن خوراکی با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی استوار امکانی - تصادفی

دانشجوی دکتری مدیریت صنعتی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.

id احسان دهقان

استاد گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و حسابداری، دانشگاه علامه طباطبائی، تهران، ایران.

id مقصود امیری

دانشیار گروه مدیریت صنعتی، دانشکده مدیریت و اقتصاد، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران.*

* id محسن شفیعی نیکابادی

استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشکده صنایع، دانشگاه علم و صنعت، تهران، ایران.

id آرمین جبارزاده

چکیده

در سال‌های اخیر پیچیدگی‌های محیطی، رقابت‌های شدید سازمان‌ها و فشار دولت‌ها بر تولیدکنندگان برای مدیریت پسماند محصولات، فشارهای زیست‌محیطی و از همه مهم‌تر سود ناشی از بازیافت محصولات، بر اهمیت طراحی شبکه زنجیره تأمین معکوس و حلقه بسته افزوده است. همچنین وجود عدم قطعیت‌های ذاتی در پارامترهای ورودی، یکی دیگر از موارد مهمی است که عدم توجه به آن می‌تواند تصمیمات استراتژیک، تاکتیکی و عملیاتی سازمان را تحت تأثیر قرار دهد. به همین جهت این پژوهش به طراحی یک مدل شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چند محصولی و چند دوره‌ای در شرایط عدم قطعیت می‌پردازد. در همین راستا ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح به منظور حداقل سازی هزینه‌های زنجیره تأمین ارائه می‌گردد. سپس جهت در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های ترکیبی مدل که شامل عدم قطعیت شناختی و تصادفی می‌باشد، پنج مدل استوار امکانی - تصادفی مختلف توسعه داده شده و نقاط ضعف، قوت و کاربرد هر یک مورد ارزیابی و تحلیل قرار می‌گیرد و مناسب‌ترین مدل جهت پاسخگویی به عدم قطعیت‌های

موجود در مدل پیشنهاد می‌شود. در پایان عملکرد و کاربردی بودن مدل پیشنهادی، از طریق مطالعه موردی در صنعت روغن خوراکی مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.

کلیدواژه‌ها: طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته، برنامه‌ریزی استوار، برنامه‌ریزی فازی، برنامه‌ریزی تصادفی، برنامه‌ریزی امکانی، زنجیره تأمین روغن خوراکی.



مقدمه

با توجه به اینکه در دنیای واقعی پارامترهای زیادی همچون هزینه‌های مکان‌یابی، تولید، حمل‌ونقل و تقاضای مشتریان عدم قطعی هستند، پس زنجیره تأمین باید به سمت استوار شدن حرکت کند (پیشوایی و همکاران، ۲۰۱۲a). یک زنجیره تأمین استوار، اثربخش و کارا یک مزیت رقابتی پایدار برای سازمان‌ها محسوب می‌گردد و به آن‌ها در محیط‌های متلاطم و غلبه بر فشارهای شدید رقابتی کمک می‌کند. زنجیره تأمین شبکه‌ای است از واحدهای مختلف مانند تأمین‌کنندگان، مراکز تولید و توزیع که وظیفه تولید محصول از تأمین مواد خام توسط تأمین‌کننده تا ارسال محصول به مشتری نهایی را شامل می‌شود (امیری، ۲۰۰۶). به‌طور کلی، تصمیمات طراحی شبکه به ظرفیت تولید تسهیلات، مکان‌یابی تسهیلات و تعیین مقدار جریان بین واحدها مربوط می‌شود. در دهه‌های اخیر موضوعی که توجه محققین را به خود جلب کرده است بحث بازیافت محصولات و مزایا و سود ناشی از آن می‌باشد. شرکت‌های زیادی همچون کداک، زیراکس و شرکت اچ پی روی فعالیت‌های بازیافت و تولید مجدد تمرکز کرده و موفقیت‌های زیادی در این حوزه به دست آورده‌اند (اوستر و همکاران، ۲۰۰۷).

مدیریت زنجیره تأمین حلقه بسته^۱ (CLSC) جریانات روبه‌جلو و روبه‌عقب زنجیره تأمین را به‌منظور ارتباط بین بازار محصولات جدید و بازار محصولات مرجوعی یکپارچه می‌کند (گاتور، ۲۰۱۷). زنجیره مستقیم یا روبه‌جلو^۲ در واقع نماینده نگاه سنتی در مدیریت زنجیره تأمین است. زنجیره مستقیم به مراحل اشاره دارد که محصول از مبدأ یعنی تأمین‌کننده تا مشتری نهایی را در زنجیره تأمین طی می‌کند؛ بنابراین بر هزینه‌های زنجیره تأمین و رضایت‌مندی مشتریان تأثیر مستقیم داشته و عامل کلیدی در سودآوری کلی زنجیره محسوب می‌شود. زنجیره تأمین معکوس یا رو به عقب^۳ به مراحل اشاره دارد که محصول برگشتی از مشتری نهایی تا مرحله بازگشت مجدد به بازار یا حذف از زنجیره تأمین را طی می‌کند. مشتری به دلایلی مانند پایان عمر محصول، خرابی محصول، از رده

1. Closed-Loop Supply Chain

2. Forward Supply Chain

3. Reverse Supply Chain

خارج شدن محصول و یا ملاحظات زیست‌محیطی، محصول را برمی‌گرداند و محصول یا بخشی از آن با طی مراحل مانند جمع‌آوری، مونتاژ، بازگردانی، بازیافت و حذف دوباره به زنجیره بازگردانده شده و یا از زنجیره خارج می‌شود (گوویندان، ۲۰۱۵). می‌توان گفت مجموعه عواملی مانند فشار دولت‌ها بر تولیدکنندگان برای مدیریت پسماند محصولات، فشارهای محیطی و از همه مهم‌تر سود ناشی از بازیافت سازمان‌ها را به سمت طراحی شبکه‌های زنجیره تأمین معکوس و حلقه بسته سوق داده است (پیشوایی و ترابی، ۲۰۱۰).

پویایی و پیچیدگی ذاتی زنجیره تأمین، درجه‌ی بالایی از عدم قطعیت را به تصمیمات برنامه‌ریزی زنجیره تأمین تحمیل می‌کند و در نتیجه بر روی عملکرد کلی شبکه زنجیره تأمین اثر می‌گذارد (پیشوایی و ترابی، ۲۰۱۰). در سال‌های اخیر، مدل‌های ریاضی برای در نظر گرفتن عدم قطعیت موجود در مدل‌های زنجیره تأمین نیز توسعه داده شده است. (وینکلر، ۲۰۱۱؛ رضانی و همکاران، ۲۰۱۳؛ زبالوس، ۲۰۱۴؛ هاتفی و جولای، ۲۰۱۴؛ کیوانشکوه و همکاران، ۲۰۱۶؛ فرخ و همکاران، ۲۰۱۷). برنامه‌ریزی تصادفی^۱، برنامه‌ریزی استوار^۲ و برنامه‌ریزی فازی^۳ سه روش مورد استفاده برای مقابله با پارامترهای عدم قطعی در مدل‌ها می‌باشند. همچنین با توجه به جنس متفاوت پارامترهای غیرقطعی در مدل‌های زنجیره تأمین و در نظر گرفتن این نکته که ممکن است به‌طور هم‌زمان با ترکیبی از حالت‌های غیرقطعی در پارامترها مواجه شویم، برخی از پژوهشگران در سال‌های اخیر برای پاسخگویی به این نوع عدم قطعیت‌ها از مدل‌های ترکیبی استفاده نموده‌اند؛ یعنی پارامترها به‌طور هم‌زمان دارای عدم قطعیت شناختی و تصادفی هستند (ژو و همکاران، ۲۰۱۳؛ ژاله چیان و همکاران، ۲۰۱۶؛ کیوانشکوه و همکاران، ۲۰۱۶؛ فرخ و همکاران، ۲۰۱۷).

یکی از شکاف‌های موجود در پژوهش‌های انجام‌شده مربوط می‌شود به نوع معیار برنامه‌ریزی امکانی برای مواجهه با عدم قطعیت‌های از جنس شناختی موجود در محدودیت‌های شانس. برنامه‌ریزی امکانی استوار از یک رویکرد بدینانه/خوش‌بینانه برای مواجهه با عدم قطعیت موجود در پارامترها استفاده می‌کند که به دلیل در نظر گرفتن حد

-
1. Stochastic Programming
 2. Robust Programming
 3. Fuzzy Programming

نهایی پارامترهای غیرقطعی جواب‌های به‌دست‌آمده از این مدل از مقادیر بهینه تابع هدف انحراف زیادی دارد (پیشوایی و همکاران، ۲۰۱۲a). معیار بعدی که به کار گرفته شد معیار اعتبار^۱ نامیده می‌شود، این معیار تصمیم‌گیرندگان را وادار به پذیرش حد متوسط از دو سر طیف خوش‌بینانه و بدبینانه می‌نماید (کین و جی، ۲۰۱۰؛ پیشوایی و همکاران، ۲۰۱۲b). برای رفع این مشکل یک معیار فازی جدید به نام معیار Me ارائه شد که انعطاف‌پذیری بالاتری نسبت به معیار اعتبار دارد و به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند که یک ترکیب محذب از رویکرد خوش‌بینانه و بدبینانه را در نظر بگیرند؛ اما مشکل مدل در این است که مدل ارائه‌شده باید ۲ بار حل شود و درواقع یک جواب بازه‌ای ارائه می‌کند (ژو و همکاران، ۲۰۱۳).

با توجه به نکات اشاره‌شده و در نظر گرفتن شکاف‌های موجود، یک مدل زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت روغن ارائه می‌گردد. از آنجا که در یک زنجیره تأمین روغن خوراکی، به دلیل ذات زنجیره تأمین روغن با انواع عدم قطعیت‌های شناختی و تصادفی مواجه هستیم، به‌عنوان مثال قیمت مواد خام (روغن خام، پالم و کلزا و...) در بازار جهانی تعیین می‌گردد در نتیجه عوامل متعددی مثل عوامل سیاسی و اقتصادی می‌توانند اثرگذار بوده و پارامترهایی همچون قیمت خرید روغن خام را تحت تأثیر قرار دهند. از طرف دیگر با توجه به اینکه اکثر تأمین‌کننده‌های روغن خام جهانی هستند و در نقاط مختلفی مثل شرق و جنوب شرقی آسیا، اروپا و امریکای جنوبی مستقر هستند، تغییر در عوامل اشاره‌شده به‌ویژه نرخ ارز می‌تواند تأثیر بسزایی در قیمت تمام‌شده حمل‌ونقل مواد داشته باشد. مشخص است که تغییر در قیمت موارد اشاره‌شده، قیمت نهایی محصول تولیدی یعنی روغن خوراکی را افزایش داده و در نتیجه میزان تقاضای بازار کاهش پیدا می‌کند. با توجه به توضیحات فوق مشخص است که صرفاً اتکا به نظرات تصمیم‌گیرندگان برای مواجهه با عدم قطعیت شناختی و همچنین تکیه بر داده‌های گذشته موجود برای پیش‌بینی پارامترها کافی نمی‌باشد. به همین جهت برای پاسخگویی به عدم قطعیت‌های ترکیبی از جنس شناختی و تصادفی موجود در زنجیره تأمین، مدل جدید برنامه‌ریزی استوار امکانی -

تصادفی^۱ با در نظر گرفتن معیار Me توسعه داده می‌شود. سپس پنج مدل مختلف برنامه‌ریزی استوار امکانی - تصادفی ارائه می‌گردد که نه تنها عدم قطعیت‌های ترکیبی را پاسخ می‌دهد بلکه مشکلات مربوط به معیار اعتبار و ME را نیز رفع می‌کند. از طرف دیگر، مدل‌های زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن عدم قطعیت در صنایع گوناگونی مورد بررسی قرار گرفته‌اند که می‌توان به صنایع باتری‌سازی، صنایع پزشکی و مواد غذایی اشاره کرد؛ اما تا آنجا که بررسی‌های ما نشان می‌دهد تنها یک پژوهش به مدل‌سازی ریاضی در صنعت زنجیره تأمین روغن می‌پردازد (پاکسوی، ۲۰۱۲). پژوهش ذکر شده با در نظر گرفتن عدم قطعیت فازی به مدل‌سازی مسئله پرداخته و با ارائه یک مثال عددی در ابعاد کوچک بهینه‌سازی مسئله را لحاظ می‌کند؛ بنابراین می‌توان گفت عدم قطعیت ترکیبی در صنعت روغن نیز برای اولین بار در این پژوهش مطالعه می‌شود. می‌توان نوآوری‌های مدل را به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- ارائه یک مدل چند محصولی و چند دوره‌ای در یک زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت روغن با در نظر گرفتن عدم قطعیت ترکیبی فازی و تصادفی ۲- ارائه پنج مدل استوار امکانی - تصادفی برای مواجه شدن با عدم قطعیت‌های ترکیبی موجود در زنجیره تأمین و توسعه مدل جهت رفع ضعف‌های موجود در مدل‌های مشابه ۳- ارزیابی عملکرد و اثربخشی مدل‌های اشاره شده و بررسی تفاوت‌ها، نقاط ضعف و قدرت هر یک از مدل‌ها با داده‌های مربوط به یک شرکت تولیدکننده روغن خوراکی.

بخش‌های بعدی مقاله به موارد ذیل خواهند پرداخت: در بخش ۲ مروری بر ادبیات و پیشینه تحقیق در مورد زنجیره تأمین حلقه بسته و مدل‌های ریاضی عدم قطعیت مرتبط بررسی می‌گردد. در بخش ۳ مدل چند دوره‌ای و چند محصولی زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت روغن خوراکی ارائه می‌شود. بخش ۴ مربوط می‌شود به ارائه انواع مدل‌های استوار امکانی - تصادفی با در نظر گرفتن عدم قطعیت ترکیبی. در بخش ۵ نتایج حاصل از حل مدل پیشنهادی ارائه شده و از طریق تحلیل حساسیت نتایج به دست آمده ارزیابی می‌گردد. در پایان نیز نتایج تحقیق و پیشنهادهای آتی ارائه خواهد شد.

پیشینه پژوهش

اولین مطالعات انجام شده در مورد زنجیره تأمین روبه جلو مربوط می شود به جارایامان و همکاران (۱۹۹۹) که یک مدل برنامه ریزی عدد صحیح ترکیبی را ارائه کردند. فلیچمن و همکاران (۲۰۰۱)، یک مدل طراحی شبکه ارائه کردند که جریانات روبه جلو و عقب را در زنجیره تأمین در نظر می گیرد و با برنامه ریزی عدد صحیح مدل سازی می شود. مین و همکاران (۲۰۰۶) با استفاده از مدل برنامه ریزی عدد صحیح و در نظر گرفتن مراکز بازیافت برای محصولات استفاده شده، زنجیره تأمین مربوطه را مورد ارزیابی قرار دادند. کو و ایوانز (۲۰۰۷)، برنامه ریزی غیرخطی عدد صحیح ترکیبی (MINLP) برای طراحی شبکه زنجیره تأمین روبه جلو و عقب مدل سازی نمودند. با توجه به وجود عدم قطعیت در زنجیره تأمین و به ویژه تأثیر بسزای آن در زنجیره تأمین حلقه بسته، تعدادی از پژوهشگران به این موضوع پرداختند. چواینارد و همکاران (۲۰۰۸) با در نظر گرفتن امکان استفاده مجدد و بازیافت محصولات، با استفاده از برنامه ریزی احتمالی یک شبکه لجستیک معکوس را مورد ارزیابی قرار دادند. مین و کو (۲۰۰۸) یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته سه سطحی را با استفاده از الگوریتم ژنتیک تحلیل کردند. کروز و همکاران (۲۰۰۹)، یک مسئله مکان یابی در شبکه لجستیک معکوس را بررسی کردند. لی و دانگ (۲۰۰۹)، با در نظر گرفتن تقاضای غیرقطعی، یک مدل مکان یابی و تخصیص پویا در دوره های مختلف زمانی پیشنهاد دادند. آل سید و همکاران (۲۰۱۰) با رویکرد حداکثر سازی سود زنجیره تأمین، یک مدل ۳ سطحی در زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه کردند. رضانی و همکاران (۲۰۱۳)، یک مدل زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن تقاضای احتمالی ارائه دادند و با استفاده از شاخص هایی همچون سود، کیفیت تأمین کنندگان و رضایت مشتری به بررسی عملکرد زنجیره تأمین پرداختند. حسنی و حسینی (۲۰۱۵) یک مدل شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته چندهدفه را با رویکرد برنامه ریزی استوار توسعه دادند و با الگوریتم ممنتیک آن را حل کردند. ولیدی و همکاران (۲۰۱۵) یک راه حل کارا با استفاده از یک مدل چندهدفه برای حل مسئله مسیریابی حمل و نقل و توزیع در زنجیره تأمین دولایه ارائه دادند. زحل و

سلیمانی (۲۰۱۶) با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی ترکیبی عدد صحیح یک مدل زنجیره تأمین طلا با دو تابع هدف اقتصادی و محیطی ارائه دادند و با استفاده از الگوریتم کلونی مورچگان آن را توسعه دادند. نوریجانی و همکاران (۲۰۱۷) یک مدل تک‌محصولی و تک دوره‌ای برای ارزیابی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته ارائه نمودند.

به‌طور کلی عدم قطعیت داده‌ها می‌تواند به ۲ دسته کلی تقسیم شود: گروه اول، عدم قطعیت تصادفی است که از ذات تصادفی پارامترها ناشی می‌شود و برنامه‌ریزی تصادفی برای مواجهه با این نوع عدم قطعیت کاربرد دارد. گروه دوم عدم قطعیت شناختی که ناشی از کمبود اطلاعات و دانش است و برای مقابله با آن از برنامه‌ریزی امکانی استفاده می‌گردد. با نگاهی به عدم قطعیت‌های موجود در ادبیات زنجیره تأمین، می‌توان ۳ رویکرد را برای پاسخگویی به این عدم قطعیت‌ها نام برد: ۱- برنامه‌ریزی تصادفی، ۲- برنامه‌ریزی فازی ۳- برنامه‌ریزی استوار (موسی زاده، ۲۰۱۴). با توجه به نوع عدم قطعیت و ساختار مسئله، هر یک از این رویکردها و یا ترکیبی از آن‌ها می‌تواند برای در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها بکار گرفته شود.

برنامه‌ریزی تصادفی برای مواقعی که تصادفی بودن منبع اصلی عدم قطعیت پارامترهای غیرقطعی است و توزیع احتمال آن‌ها معلوم باشد مناسب است. (آذرون و همکاران، ۲۰۰۸؛ رضانی و همکاران، ۲۰۱۳؛ زبالوس و همکاران، ۲۰۱۴). ساهیندیس و همکاران (۲۰۰۴)، برنامه‌ریزی تصادفی را به دو دسته تقسیم نمودند. ۱- برنامه‌ریزی تصادفی دو مرحله‌ای^۱ یا برنامه‌ریزی منابع ۲- برنامه‌ریزی احتمالی. روش اول زمانی که نشدنی بودن جواب با هزینه‌های جریمه در نظر گرفته شود مناسب است. در برنامه‌ریزی احتمالی (مورد دوم)، تمرکز روی قابلیت سیستم برای مواجهه با شدنی بودن راه‌حل در محیط‌های غیرقطعی است؛ که در واقع همان حداقل سطح رضایت‌بخش موردنیاز برای محقق کردن محدودیت‌های احتمالی است.

برنامه‌ریزی فازی برای پاسخگویی به عدم قطعیت شناختی در داده‌ها، یا انعطاف‌پذیری در اهداف و محدودیت‌ها بکار می‌رود. با استفاده از این روش پارامترهای غیردقیق به وسیله توزیع امکانی^۱ در شکل اعداد فازی مدل می‌شوند. همچنین تابع هدف‌های انعطاف‌پذیر و محدودیت‌های مبهم (نرم) از طریق تابع عضویت که کاملاً بر اساس ترجیحات ذهنی تصمیم‌گیرندگان است، مدل‌سازی می‌شوند. به‌طور کلی برنامه‌ریزی فازی به دودسته تقسیم می‌شوند: برنامه‌ریزی امکانی و برنامه‌ریزی انعطاف‌پذیر (اینگوچی و همکاران، ۲۰۰۰؛ مولا و همکاران، ۲۰۰۶؛ ترابی و حسینی، ۲۰۰۸؛ پیشوایی و ترابی، ۲۰۱۰). برنامه‌ریزی امکانی زمانی بکار می‌رود که با کمبود دانش و اطلاعات در مورد مقدار دقیق پارامترهای ورودی مواجه هستیم که می‌تواند به دلیل عدم دسترسی یا کافی نبودن اطلاعات موردنیاز باشد. در نتیجه با توجه به نظرات تصمیم‌گیرندگان و در نظر گرفتن اهداف مسئله، پارامترهای غیردقیق از طریق اعداد فازی تعریف می‌شوند. پیشوایی و ترابی (۲۰۱۰)، روش برنامه‌ریزی امکانی را برای یک مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین ارائه دادند که دارای تعدادی پارامتر غیرقطعی می‌باشد. در این مدل سطوح استراتژیک و تاکتیکی تصمیمات در یک شبکه حلقه بسته یکپارچه می‌گردند. کین و جی (۲۰۱۰)، با استفاده از سه معیار اعتبار بر اساس برنامه‌ریزی فازی، یعنی مقدار میانگین، برنامه‌ریزی محدودیت شانس و برنامه‌ریزی محدودیت شانس وابسته یک شبکه بازیافت محصول را پیشنهاد دادند. پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲a)، یک مدل زنجیره تأمین حلقه بسته با در نظر گرفتن مسئولیت اجتماعی پیشنهاد دادند که هدف از مدل، مکان‌یابی تسهیلات شبکه با توجه به کاهش هزینه تابع هدف و افزایش مسئولیت اجتماعی به‌طور هم‌زمان می‌باشد. پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲b)، یک مدل زنجیره تأمین سبز حلقه بسته پیشنهاد دادند که هدف آن کاهش نوسان بین دو تابع هدف مربوط به کاهش هزینه‌ها و کم کردن اثرات گازهای گلخانه‌ای است. برای پاسخگویی به عدم اطمینان موجود در مدل آن‌ها از یک رویکرد برنامه‌ریزی فازی توسعه‌یافته با معیار اعتبار و ترکیب آن با برنامه‌ریزی استوار استفاده کردند. بابا زاده و همکاران (۲۰۱۷)، یک مدل برنامه‌ریزی امکانی بر اساس میانگین

فازی و انحراف مطلق فازی پیشنهاد دادند و برای پاسخگویی به عدم قطعیت‌های موجود در زنجیره تأمین بکار گرفتند.

برنامه‌ریزی استوار یک روش استوار یک روش ریسک-گریز^۱ است که تصمیم‌گیرندگان را قادر می‌سازد تا سطح محافظه‌کاری نتایج را با توجه به عدم قطعیت پارامترها اصلاح کنند (سویستر، ۱۹۷۳؛ مولوی و همکاران، ۱۹۹۵؛ اینگوچی و ساکاو، ۱۹۹۸؛ بن تال و نمیروسکی ۲۰۰۰؛ برتسیماس و سیم، ۲۰۰۴). یک مسئله بهینه‌سازی زمانی استوار محسوب می‌شود که هم شدنی بودن محدودیت‌ها و هم بهینگی تابع هدف تأمین شود. استوار شدنی^۲ یعنی برای همه (تقریباً) مقادیر ممکن پارامترهای غیرقطعی در محدودیت‌ها، جواب شدنی باقی بماند. همچنین منظور از استوار بهینگی^۳ این است که مقدار تابع هدف نزدیک به بهینه باشد یا در واقع کمترین انحراف را از مقدار بهینه تابع هدف به ازای همه (تقریباً همه) مقادیر ممکن پارامترهای غیرقطعی داشته باشد (پیشوایی و همکاران، ۲۰۱۲ a). برنامه‌ریزی استوار به ۳ دسته تقسیم می‌شود:

۱- برنامه‌ریزی استوار سخت^۴ (سویستر، ۱۹۷۳؛ بنتال و نمیروفسکی، ۱۹۹۸؛ بنتال و همکاران، ۲۰۰۹): در اینجا فرض بر این است که همه پارامترها می‌توانند به‌طور هم‌زمان بدترین مقدار خود را داشته باشند. اگرچه این مدل با ارائه جواب‌های شدنی برای تحقق همه پارامترهای غیرقطعی، بالاترین سطح حفاظت را ایجاد می‌کند اما سطح محافظه‌کاری بالای جواب‌ها و انحراف زیاد از مقادیر بهینه انتقادات زیادی را متوجه این روش نموده است و اعتقاد بر این است که جواب‌های به‌شدت بدبینانه‌ای ارائه می‌کند (برتسیماس و سیم، ۲۰۰۴).

۲- برنامه‌ریزی استوار نرم^۵: این رویکرد از حالت سخت انعطاف‌پذیرتر است. مشابه با برنامه‌ریزی استوار سخت، در اینجا هم سعی می‌شود که بدترین مقدار تابع هدف حداقل شود اما تفاوت این دو رویکرد این است که در حالت نرم همه محدودیت‌ها نیازی نیست

-
1. Risk-Averse
 2. Feasibility Robustness
 3. Optimality Robustness
 4. Hard worst case robust programming
 5. Soft worst case robust programming

(تقریباً همه) در بدترین مقدار پارامترهای عدم قطعیت تحقق پیدا کنند. (اینگوچی و ساکاوا، ۱۹۹۸؛ برتسیماس و سیم، ۲۰۰۴).

۳- برنامه‌ریزی استوار واقع‌بینانه^۱ (مولوی و همکاران، ۱۹۹۵) به دنبال پیدا کردن بهترین راه‌حل ممکن به لحاظ هزینه منفعت بین استوار شدن مدل و هزینه‌های ناشی از استواری هست. این رویکرد برای مسائلی که نیاز به تصمیم‌گیری انعطاف‌پذیر دارد و همچنین دستیابی به سود بیشتر مانند بسیاری از مسائل مدیریتی کاربردی خواهد بود (پیشوایی و همکاران، ۲۰۱۲a). با توجه به اینکه برای تصمیم‌گیری در دنیای واقعی، معمولاً اطلاعات کافی برای تخمین پارامترها وجود ندارد در نتیجه توزیع احتمال پارامترها برای سناریوهای مختلف قابل‌محاسبه نیست، پس می‌توان برای رفع این ضعف برنامه‌ریزی تصادفی، پارامترها را به شکل سناریوی فازی تعریف کرد یعنی در نظر گرفتن یک رویکرد ترکیبی برای پاسخگویی به عدم قطعیت تصادفی و فازی به‌طور هم‌زمان (ملو، ۲۰۰۹؛ کلیبی و مارتل، ۲۰۱۲؛ کیوانشکوه و همکاران، ۲۰۱۶؛ ژاله چیان و همکاران، ۲۰۱۶؛ فرخ و همکاران، ۲۰۱۷).

با توجه به ادبیات و پیشینه تحقیق و جدول ۱ می‌توان این‌گونه جمع‌بندی کرد که در سال‌های اخیر پرداختن به طراحی زنجیره تأمین معکوس با استفاده از مدل‌های استواری، برنامه‌ریزی فازی و تصادفی توسط پژوهشگران زیادی صورت گرفته است؛ اما با وجود اینکه در یک مدل زنجیره تأمین به‌ویژه در دنیای واقعی با عدم قطعیت‌های ترکیبی از جنس شناختی و تصادفی مواجه هستیم، کارهای بسیار محدودی مانند مدل ژاله چیان و همکاران (۲۰۱۶)، فرخ و همکاران (۲۰۱۷) در این بخش انجام شده است که در پژوهش‌های مورد اشاره نیز مانند اکثر مدل‌های امکانی برای مواجهه با عدم قطعیت‌های شناختی، معیار اعتبار (Cr) در نظر گرفته شده و همان‌طور که اشاره گردید تنها حد وسط طیف نگرش خوش بینانه-بدبینانه را در نظر می‌گیرد و مشخص است که انعطاف‌پذیری پایینی دارد و در دنیای واقعی نمی‌تواند پاسخگوی طیف وسیعی از نگرش تصمیم‌گیرندگان باشد. از طرف دیگر تاکنون هیچ پژوهشی به ارائه انواع مدل‌های استوار

1. Realistic robust programming

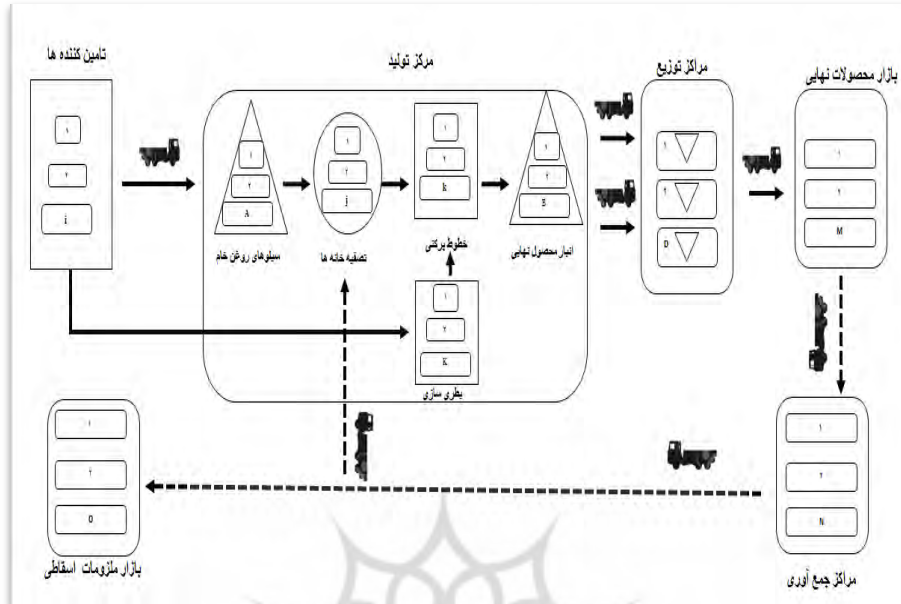
در حالت‌های واقع‌بینانه، سخت و نرم در شرایط عدم قطعیت ترکیبی نپرداخته و مقایسه و کاربرد آن‌ها را در مواجهه با عدم قطعیت‌های شناختی و تصادفی صورت نگرفته است. از همین رو در این پژوهش ابتدا یک مدل استواری امکانی-تصادفی جهت پاسخگویی به عدم قطعیت‌های ترکیبی موجود در مدل زنجیره تأمین حلقه بسته چند محصولی و چند دوره‌ای پرداخته می‌شود که شکاف‌های اشاره‌شده در مدل‌های مشابه را برطرف می‌کند. از طرف دیگر، پنج مدل استوار امکانی-تصادفی در شرایط مختلف توسعه داده می‌شود و سپس به بررسی و تحلیل تفاوت‌ها و نقاط ضعف و قوت هر یک از مدل‌ها پرداخته می‌شود. در پایان عملکرد و کارایی مدل‌ها با توجه به مفروضات زنجیره تأمین پیشنهادی، در یک صنعت تولید روغن خوراکی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

جدول ۱. پژوهش‌های مرتبط با زنجیره تأمین حلقه بسته همراه با عدم قطعیت

| مقاله | حلقه بسته | چند محصولی | چند دوره‌ای | مطالعه موردی | رویکرد برنامه‌ریزی | | | شاخص فازی | معیار عدم قطعیت محدودیت‌ها | استوار بهینگی | استوار شدنی |
|------------------|-----------|------------|-------------|--------------|--------------------|------|---------|-------------|----------------------------|---------------|-------------|
| | | | | | تصادفی | فازی | استواری | | | | |
| پیشوایی (۲۰۱۲a) | ✓ | - | ✓ | - | - | ✓ | ✓ | نیم انحراف | Nec | ✓ | ✓ |
| پیشوایی (۲۰۱۲b) | - | - | - | - | - | ✓ | - | نیم انحراف | Cr | - | - |
| ژو و ژو (۲۰۱۳) | - | - | - | - | - | ✓ | - | نیم انحراف | Me | - | - |
| رضانی (۲۰۱۳) | ✓ | ✓ | - | - | - | ✓ | - | - | - | - | ✓ |
| گوویندان (۲۰۱۵) | ✓ | - | - | ✓ | ✓ | ✓ | - | - | - | ✓ | - |
| کیوانشکوه (۲۰۱۶) | - | - | - | - | - | ✓ | - | - | - | ✓ | - |
| ژاله چیان (۲۰۱۶) | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | - | انحراف مطلق | - | - | - |
| فرخ (۲۰۱۷) | - | - | - | - | - | - | - | انحراف مطلق | Cr | ✓ | ✓ |
| پژوهش حاضر | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ | نیم انحراف | Me | ✓ | ✓ |

تعریف مسئله

در این بخش یک مدل طراحی شبکه چند محصولی و چند دوره‌ای تحت شرایط عدم قطعیت ترکیبی برای یک زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت روغن ارائه می‌گردد. مطابق با شکل (۱)، این شبکه زنجیره تأمین شامل تأمین‌کنندگان مواد خام (روغن خام و ملزومات اولیه مانند قوطی پلاستیکی و ورق‌های حلبی)، سیلوهای دریافت روغن خام، تصفیه‌خانه‌ها، بطری‌سازی، خطوط پرکنی، مراکز توزیع، نقاط تقاضای محصولات، مراکز جمع‌آوری و بازار ملزومات برای فروش ورق و حلب اوراقی می‌باشد. جریان روبه‌جلوی زنجیره تأمین با انتقال روغن خام از تأمین‌کنندگان به سیلوهای روغن خام و انتقال مواد اولیه و ملزومات به بطری‌سازی آغاز می‌شود. مطابق با برنامه تولید، روغن‌های خام از سیلوها وارد تصفیه‌خانه شده و در آنجا پردازش‌های شیمیایی روی روغن خام انجام می‌شوند که به ترتیب عبارت‌اند از: ۱- جداسازی که شامل حذف مواد اضافی مثل فسفات‌ها و چربی‌های اضافی است ۲- خنثی‌سازی که عبارت است از بین بردن اسیدهای آزاد موجود در روغن خام ۳- رنگ‌زدایی که برای حذف رنگ‌دانه‌های روغنی بکار می‌رود ۴- بی‌بو‌سازی برای از بین بردن عطر و طعم روغن خام ۵- سرمادهی برای از بین بردن واکس و موم‌های موجود در روغن خام که در دمای پایین از بین می‌روند.



شکل ۱. ساختار شبکه زنجیره تأمین روغن خوراکی

پس از مراحل فوق روغن خام تبدیل به روغن خوراکی شده و برای تبدیل شدن به محصول نهایی به خطوط پرکنی فرستاده می شود. در واحد پرکنی، روغن خوراکی ارسال شده از تصفیه خانه، به همراه قوطی ها و حلب های آماده شده در واحد بطری سازی، در خطوط پرکنی قوطی پلاستیکی و حلبی یا محصولات فله، به محصولات نهایی تبدیل می شوند. محصولات آماده شده به انبار محصولات نهایی فرستاده می شوند و از آنجا بارگیری شده و به مراکز توزیع منتقل و در نهایت به دست مشتری نهایی می رسند. جریان معکوس زنجیره تأمین با ارسال محصولات تاریخ گذشته یا فروخته نشده از طریق مشتریان به مراکز جمع آوری ارسال می گردند. با توجه به اینکه روغن های مرجوعی پس از پردازش شیمیایی مجدداً قابل استفاده هستند، در مرکز جمع آوری روغن از حلب و قوطی پلاستیکی جدا شده و مجدداً به تصفیه خانه کارخانه ارسال می گردد. قوطی های حلبی و پلاستیکی جدا شده نیز اسقاط شده و به بازار ملزومات اسقاطی ارسال می گردد.

این تحقیق از لحاظ هدف تحقیقی کاربردی بوده، از لحاظ متغیر، تحقیقی کمی و از لحاظ زمانی مقطعی می‌باشد. در زنجیره تأمین پیشنهادی به دنبال پیدا کردن تأمین‌کننده‌های مناسب و مکان‌یابی مراکز توزیع، انبارهای مواد خام، مراکز جمع‌آوری باهدف حداقل سازی تابع هدف هستیم. تصمیم‌گیرندگان باید از میان تسهیلات بالقوه با در نظر گرفتن معیارهای مختلفی مانند ظرفیت‌های مختلف تسهیلات، منطقه جغرافیایی، هزینه افتتاح تسهیلات، در نظر گرفتن بهترین نوع وسیله نقلیه، هزینه‌های حمل‌ونقل و از همه مهم‌تر پاسخگویی به تقاضای مشتریان، بهترین گزینه را در نظر بگیرند.

به دلیل عدم دسترسی و کافی نبودن اطلاعات در دنیای واقعی به‌ویژه در افق‌های زمانی بلندمدت در مدل زنجیره تأمین پیشنهادی، همه پارامترهای مدل دارای عدم قطعیت هستند؛ بنابراین برای پارامترهایی که اطلاعات کافی در دسترس نیست از توزیع امکانی مناسب برای مدل‌سازی استفاده می‌شود. برای پارامترهایی که ذات تصادفی داشته و باید در افق‌های زمانی بلندمدت در قالب سناریوهای مختلف پیش‌بینی شوند مانند پارامتر تقاضا، برنامه‌ریزی تصادفی برای مواجهه با عدم قطعیت بکار گرفته می‌شود. افق تصمیم‌گیری برای مدل چندین دوره‌ای در نظر گرفته می‌شود و بدین ترتیب جریان میان سطوح مختلف زنجیره تأمین با توجه به تقاضا و دیگر پارامترهای مبتنی بر دوره زمانی تعریف می‌شوند. از طرف دیگر با در نظر گرفتن حالت‌های مختلف وسیله نقلیه و چند محصولی بودن جهت پاسخگویی به تنوع نیازهای مشتریان، تصمیمات تاکتیکی مربوط به جریان مواد با تصمیمات استراتژیک سطوح مکان‌یابی تسهیلات یکپارچه خواهد شد. با توجه به توضیحات اشاره‌شده، مفروضات، شاخص‌ها، پارامترها، متغیرهای تصمیم مسئله برای مدل‌سازی زنجیره تأمین حلقه بسته روغن به شکل زیر خواهد بود:

شاخص‌ها:

- | | |
|------------------------------|---------------------------------|
| i: تأمین‌کننده‌های بالقوه | K: خطوط پرکنی |
| j: مراکز تصفیه‌خانه | l: مراکز توزیع بالقوه |
| m: بازار مشتریان محصول نهایی | o: بازار مشتریان محصولات اسقاطی |

| | |
|---|-----------------------------|
| t: دوره زمانی | n: مراکز بازیافت بالقوه |
| b: انبار محصولات نهایی | P: محصولات نهایی |
| r: ماده خام (شامل روغن خام، ملزومات موردنیاز مثل ورق حلبی و پت) | a: سیلوهای نگهداری روغن خام |
| W: نوع وسیله نقلیه | U: واحد بطری سازی |
| | q: ظرفیت بالقوه توزیع کننده |

متغیرهای تصمیم:

| | |
|---|--|
| X^{ss}_{riawts} : مقدار ماده اولیه r حمل شده از تأمین کننده i به بطری سازی u با وسیله نوع w در دوره t تحت سناریوی s | X^s_{riawts} : مقدار ماده اولیه r حمل شده از تأمین کننده i به انبار a با وسیله نوع w در دوره t تحت سناریوی s |
| X^d_{plmwts} : مقدار محصول p حمل شده از توزیع کننده l به مشتری m با وسیله نوع w در دوره t تحت سناریوی s | X^h_{njts} : مقدار ماده اولیه r حمل شده از انبار a به تصفیه خانه z در دوره t تحت سناریوی s |
| X^m_{pmwts} : مقدار محصول p حمل شده از مشتری m به مرکز بازیافت n با وسیله نوع w در دوره t تحت سناریوی s | X^r_{pjks} : مقدار محصول p تولید شده در تصفیه خانه z و حمل شده به پرکنی k در دوره t تحت سناریوی s |
| X^c_{mjts} : مقدار مواد اولیه r حمل شده از مرکز بازیافت n به تصفیه خانه z در دوره t تحت سناریوی s | X^f_{pkbts} : مقدار محصول p حمل شده از پرکنی k به انبار b در دوره t تحت سناریوی s |
| X^{rc}_{mowts} : مقدار مواد r حمل شده از مرکز بازیافت n به مرکز انهدام o با وسیله نوع w در دوره t تحت سناریوی s | X^h_{pbwts} : مقدار محصول p حمل شده از انبار b به توزیع کننده l با وسیله نوع w در دوره t تحت سناریوی s |
| y^s_{ni} : برابر است با ۱، اگر ماده اولیه r توسط تأمین کننده i تأمین شود، در غیر این صورت ۰ | X^u_{ukts} : مقدار قوطی حمل شده از بطری سازی u به پرکنی k در دوره t تحت |

سناریوی S

y_{aq}^h : برابر است با ۱، اگر سیلوی a با
 سطح ظرفیت q راه‌اندازی شود در
 غیراین صورت •

y_{nq}^c : برابر است با ۱، اگر مرکز جمع‌آوری
 n با سطح ظرفیت q راه‌اندازی شود، در
 غیراین صورت •

y_{lq}^d : برابر است با ۱، اگر مرکز توزیع l با
 سطح ظرفیت q راه‌اندازی شود در
 غیراین صورت •

پارامترها:

d_{pmts}^m : تقاضای محصول p توسط مشتری
 m در دوره t تحت سناریوی S

c_{pkts}^f : هزینه تولید محصول p در پرنکی k
 در دوره t تحت سناریوی S

d'_{rots}^m : تقاضای ماده اولیه r توسط مرکز
 انهدام o در دوره t تحت سناریوی S

c_{pits}^u : هزینه ساخت بطری در بطری‌سازی u
 در دوره t تحت سناریوی S

c_{pjts}^r : هزینه تولید محصول p در تصفیه‌خانه
 j در دوره t تحت سناریوی S

c_{pils}^d : هزینه نگهداری محصول p در
 توزیع‌کننده l در دوره t تحت سناریوی S

c_{rits}^s : هزینه خرید ماده اولیه r از تأمین‌کننده
 i در دوره t تحت سناریوی S

$f_{a,q}^h$: هزینه ثابت افتتاح سیلوی a با ظرفیت
 q

c_{rats}^h : هزینه نگهداری مواد اولیه r در انبار a
 در دوره t تحت سناریوی S

$f_{n,q}^c$: هزینه ثابت افتتاح مرکز جمع‌آوری n
 با ظرفیت q

f_{i}^s : هزینه ثابت قرارداد بلندمدت با
 تأمین‌کننده i

c_{riavts}^{ts} : هزینه حمل‌ونقل مواد اولیه r از
 تأمین‌کننده i به انبار a با وسیله نوع w در

c_{plmws}^{td} : هزینه حمل‌ونقل محصول از مرکز
 توزیع l به مشتری m با وسیله نوع w در

دوره t تحت سناریوی

هزینه حمل و نقل مواد اولیه r از C_{riuwts}^{tss}

تأمین کننده i به بطری سازی u با وسیله نوع

w در دوره t تحت سناریوی s

هزینه حمل و نقل محصول p از انبار C_{pblwts}^{nth}

محصول نهایی b به مرکز توزیع l با وسیله

نوع w در دوره t تحت سناریوی s

متوسط نرخ محصول p قابل بازیافت r_{pr}^c

مورد استفاده در مواد خام r

ضریب مصرف ماده اولیه r به ازای w_{rp}

تولید یک واحد محصول p

بیشترین ظرفیت انبار مواد اولیه a ca_a^h

بیشترین ظرفیت پرکنی k ca_k^k

بیشترین ظرفیت انبار محصول نهایی b ca_b^{th}

بیشترین ظرفیت مرکز جمع آوری n ca_n^c

دوره t تحت سناریوی s

هزینه حمل و نقل محصول از C_{pmnwts}^{tm}

مشتری m به مرکز بازیافت n با وسیله نوع

w در دوره t تحت سناریوی s

هزینه حمل و نقل محصول p از C_{mowts}^{tc}

مرکز بازیافت n به محل انهدام o با وسیله

نوع w در دوره t تحت سناریوی s

بیشترین ظرفیت تأمین کننده i برای ca_i^s

تولید ماده اولیه r

نرخ محصول p برگشت شده از طرف r_{pm}

مشتری m

بیشترین ظرفیت تصفیه خانه j ca_j^r

بیشترین ظرفیت بطری سازی u ca_u^u

بیشترین ظرفیت مرکز توزیع ca_l^d

احتمال رخداد هر سناریوی s p_s

| | |
|--|---|
| $ \begin{aligned} Min Z = & \sum \sum \sum f_{r,i}^s \cdot y_{r,i}^s + \sum \sum \sum f_{a,q}^h \cdot y_{a,q}^h + \sum \sum \sum f_{l,q}^d \cdot y_{l,q}^d + \sum \sum \sum f_{n,q}^c \cdot y_{n,q}^c \\ & + \sum \sum \sum \sum \sum (c_{nits}^s + c_{riuwts}^{tss}) \cdot X_{nawts}^s + \sum \sum \sum \sum \sum (c_{nits}^s + c_{riuwts}^{tss}) \cdot X_{riuwts}^{ss} \\ & + \sum \sum \sum \sum c_{nats}^h \cdot X_{najtts}^h + \sum \sum \sum \sum (c_{pbts}^{h'} + c_{pblwts}^{th'}) \cdot X'_{pblwts}^h \\ & + \sum \sum \sum \sum c_{pjts}^r \cdot X_{pjktts}^r + \sum \sum \sum \sum c_{pkts}^f \cdot X_{pkbtts}^f + \sum \sum \sum \sum c_{utts}^u \cdot X_{uktts}^u \\ & + \sum \sum \sum (c_{plts}^d + c_{plmwts}^{td}) \cdot X_{plmwts}^d + \sum \sum \sum c_{mits}^c \cdot X_{mjts}^c \\ & + \sum \sum \sum \sum c_{mots}^{tc} \cdot X_{mowts}^{tc} + \sum \sum \sum \sum c_{pmnwts}^{tm} \cdot X_{pmnwts}^m \\ & s.t. \end{aligned} $ | ۱ |
|--|---|

| | | |
|---|-------------------------|----|
| $\sum_a \sum_w X_{riawts}^s + \sum_u \sum_w X_{riuwtss}^{ss} \leq ca_{ni}^s \cdot y_{ni}^s$ | $\forall r, i, t, s$ | ۲ |
| $\sum_k \sum_p X_{pjkt}^r \leq ca_j^r$ | $\forall j, t, s$ | ۳ |
| $\sum_p \sum_b X_{pkbt}^f \leq ca_k^f$ | $\forall k, t, s$ | ۴ |
| $\sum_k X_{ukts}^u \leq ca_u^u$ | $\forall t, s$ | ۵ |
| $\sum_j X_{rajts}^h \leq ca_a^h$ | $\forall r, a, t, s$ | ۶ |
| $\sum_l \sum_w X_{pblwts}^{lh} \leq ca_b^{lh}$ | $\forall p, k, b, t, s$ | ۷ |
| $\sum_p \sum_m \sum_w X_{plmwts}^d \leq \sum_q ca_l^d \cdot y_{lq}^d$ | $\forall l, t, s$ | ۸ |
| $\sum_m \sum_p \sum_w X_{pmwts}^m \leq ca_n^c$ | $\forall n, t, s$ | ۹ |
| $\sum_a X_{rajts}^h + \sum_n X_{mjts}^c = \sum_k \sum_p w_{rp} \cdot X_{pjkt}^r$ | $\forall r, j, t, s$ | ۱۰ |
| $\sum_j X_{pjkt}^r + \sum_u X_{ukts}^u = \sum_b X_{pkbt}^f$ | $\forall p, k, t, s$ | ۱۱ |
| $\sum_k X_{ukts}^u = \sum_i \sum_w \sum_r X_{riuwtss}^{ss}$ | $\forall u, t, s$ | ۱۲ |
| $\sum_j X_{rajts}^h = \sum_w \sum_i X_{riawts}^s$ | $\forall r, a, t, s$ | ۱۳ |
| $\sum_k X_{pkbt}^f = \sum_l X_{pblts}^{lh}$ | $\forall p, b, t, s$ | ۱۴ |
| $\sum_b X_{pblwts}^{lh} = \sum_m X_{plmwts}^d$ | $\forall p, l, w, t, s$ | ۱۵ |
| $\sum_p \sum_m \sum_w r_{pr}^c \cdot X_{pmwts}^m = \sum_j X_{mjts}^c$ | $\forall r, n, t, s$ | ۱۶ |

| | | |
|---|---|----|
| $\sum_m \sum_p (1 - r_{pr}^c) \cdot X_{pmwts}^m = \sum_o X_{mowts}^{rc}$ | $\forall r, n, w, t, s$ | ۱۷ |
| $\sum_l \sum_w X_{plmwts}^d \geq d_{pmts}^m$ | $\forall p, k, m, t, s$ | ۱۸ |
| $\sum_n \sum_w X_{pmwts}^m \geq d_{pmts}^m \cdot r_{pm}$ | $\forall p, m, t, s$ | ۱۹ |
| $\sum_n \sum_w X_{mowts}^{rc} \geq d_{rots}^m$ | $\forall r, o, t, s$ | ۲۰ |
| $\sum_q y_{l,q}^d \leq 1$ | $\forall l$ | ۲۱ |
| $\sum_q y_{n,q}^c \leq 1$ | $\forall n$ | ۲۲ |
| $\sum_q y_{a,q}^h \leq 1$ | $\forall a$ | ۲۳ |
| $X_{riawts}^s, X_{pjks}^r, X_{pkbts}^f, X_{plmwts}^d, X_{riuwts}^{ss}, X_{pmwts}^m, X_{mjts}^c, X_{mowts}^{rc} \geq 0,$ | $\forall r, i, j, k, l, m, n, o, w, t, s$ | ۲۴ |
| $y_{ri}^s, y_{l,q}^d, y_{aq}^h, y_{nq}^c \in \{0,1\}$ | $\forall r, i, l, q, a, n$ | ۲۵ |

معادله ۱ مربوط است به تابع هدف که به دنبال حداقل کردن هزینه‌ها می‌باشد. عبارت اول هزینه ثابت قرارداد با تأمین‌کننده‌ها را نشان می‌دهد، عبارت دوم تا چهارم به ترتیب هزینه ثابت افتتاح تسهیلات مربوط به انبار، مراکز توزیع و جمع‌آوری را نشان می‌دهد. بقیه عبارت‌ها مجموع هزینه‌های حمل‌ونقل و پردازش محصول را میان سطوح مختلف زنجیره تأمین نشان می‌دهند. محدودیت‌های شماره ۲-۹ مربوط هستند به ظرفیت بخش‌های مختلف زنجیره تأمین. محدودیت‌های ۱۰-۱۷ مربوط می‌شوند به جریان‌های تعادلی میان واحدهای مختلف. محدودیت‌های ۱۸ و ۱۹ پاسخگویی به تقاضای مشتریان را در برمی‌گیرد. محدودیت ۲۰ نشان می‌دهد که مجموع محصولات برگشتی از نقاط تقاضا به مراکز جمع‌آوری ارسال می‌شوند. محدودیت ۲۱-۲۳ اطمینان ایجاد می‌کند که فقط یکی

از سطوح ظرفیت مراکز بالقوه تسهیلات، گشایش یابد؛ و در پایان محدودیت‌های ۲۴ و ۲۵ معرف متغیرهای صفر و یک و غیر منفی بودن متغیرها هستند.

برنامه‌ریزی استوار

همان‌طور که در بخش ادبیات و پیشینه تحقیق اشاره شد، برنامه‌ریزی امکانی برای پاسخگویی به عدم قطعیت‌های از نوع شناختی استفاده می‌شود. یکی از مهم‌ترین روش‌های برنامه‌ریزی امکانی عبارت است از برنامه‌ریزی محدودیت شانس امکانی^۱. این روش می‌تواند برای انواع مختلف اعداد فازی مثل اعداد فازی مثلثی و دوزنقه‌ای بکار گرفته شود. همچنین در این روش، تصمیم‌گیرندگان می‌توانند با استفاده از مفهوم ریاضی مقدار میانگین و اعداد فازی و همچنین در نظر گرفتن حداقل سطوح اطمینان (α) محدودیت‌های شانس امکانی را محقق کنند. به‌طور کلی مدل شانس امکانی، دو نوع استاندارد دارد: استاندارد امکانی^۲ و استاندارد الزام^۳. با توجه به نوع نگرش تصمیم‌گیرندگان می‌توان گفت Pos درواقع به حداکثر امکان رخداد یک پارامتر غیرقطعی اشاره دارد یعنی حالت خوش‌بینانه و Nec مربوط است به حداقل امکان رخداد پارامتر غیرقطعی یا درواقع همان نگرش بدبینانه تصمیم‌گیرندگان (لئو و ایوامورا، ۱۹۹۸؛ اینگوچی و رامیک، ۲۰۰۰؛ پیشوایی و همکاران، ۲۰۱۲a). در مدل پیشنهادی از اعداد فازی دوزنقه‌ای استفاده می‌شود. اگر متغیر فازی را به صورت (r_1, r_2, r_3, r_4) تعریف کنیم که $r_1 < r_2 < r_3 < r_4$ باشد. ξ تابع عضویت مطابق با معادله ۲۶ خواهد بود. مطابق با (ژو و ژانگ، ۲۰۰۹؛ ژو و ژو، ۲۰۱۳) اثبات می‌شود که اگر $\alpha > 0.5$ مدل همتای قطعی Pos, Nec به صورت معادله‌های ۲۷ تا ۳۰ خواهد بود.

1. Possibilistic chance-constrained programming (PCCP)

2. Possibility (Pos)

3. Necessity (Nec)

$$\mu_x \begin{cases} \frac{x-r_1}{r_+ - r_1} & \text{if } r_1 \leq x \leq r_+ \\ 1 & \text{if } r_+ \leq x \leq r_- \\ \frac{r_- - x}{r_- - r_+} & \text{if } r_- \leq x \leq r_+ \end{cases} \quad (26)$$

$$Pos\{\tilde{\xi} \leq x\} \geq \alpha \Leftrightarrow \frac{x-r_1}{r_+ - r_1} \geq \alpha \Leftrightarrow x \geq (1-\alpha)r_1 + \alpha.r_+ \quad (27)$$

$$Pos\{\tilde{\xi} \geq x\} \geq \alpha \Leftrightarrow \frac{r_- - x}{r_- - r_+} \geq \alpha \Leftrightarrow x \leq (1-\alpha)r_- + \alpha.r_+ \quad (28)$$

$$Nec\{\tilde{\xi} \leq x\} \geq \alpha \Leftrightarrow \frac{x-r_+}{r_+ - r_+} \geq \alpha \Leftrightarrow x \geq (1-\alpha)r_+ + \alpha.r_+ \quad (29)$$

$$Nec\{\tilde{\xi} \geq x\} \geq \alpha \Leftrightarrow \frac{r_+ - x}{r_+ - r_1} \geq \alpha \Leftrightarrow x \leq (1-\alpha)r_+ + \alpha.r_1 \quad (30)$$

مطابق با آنچه در ادبیات و پیشینه تحقیق گفته شد، معیار اعتبار برای رفع مشکلات دو معیار استاندارد بدینانه و خوش بینانه Pos و Nec ارائه شد. این معیار که توسط لئو و لئو (۲۰۰۲) ارائه گردید میانگین Pos و Nec می باشد. مطابق با نظر تصمیم گیرندگان برای $\alpha > 0.5$ خواهیم داشت:

$$Cr\{A\} = 1/2(Pos\{A\} + Nec\{A\}) \quad (31)$$

$$Cr\{\tilde{\xi} \leq x\} \geq \alpha \Leftrightarrow \frac{x-2r_+ + r_+}{2(r_+ - r_+)} \geq \alpha \Leftrightarrow x \geq (2-2\alpha)r_+ + (2\alpha-1)r_+ \quad (32)$$

$$Cr\{\tilde{\xi} \geq x\} \geq \alpha \Leftrightarrow \frac{2r_+ - r_1 - x}{2(r_+ - r_1)} \geq \alpha \Leftrightarrow x \leq (2\alpha-1)r_+ + (2-2\alpha)r_+ \quad (33)$$

اگرچه معیار Cr نسبت به معیار Pos, Nec جواب معقول تری ارائه می دهد و از جواب صرفاً خوش بینانه و بدینانه جلوگیری می کند، اما ایراد اصلی این معیار هم در این است که فقط حق تصمیم گیری را برای تصمیم گیرندگان به حد وسط یا درواقع میانگین دو سر طیف خوش بینانه و بدینانه محدود می کند. برای رفع این مشکل، ژو و ژو (۲۰۱۳) یک معیار فازی جدید تعریف کردند بنام معیار 'Me؛ که در این مدل تصمیم گیرندگان

می توانند با استفاده از یک پارامتر بدبینانه-خوش بینانه به نام λ ترکیب محدبی از این طیف خوش بینانه و بدبینانه را در نظر بگیرند. این معیار به صورت معادله ۳۴ تعریف می شود.

$$Me\{A\} = Nec\{A\} + \lambda (Pos\{A\} - Nec\{A\}) = \lambda \cdot Pos\{A\} + (1-\lambda) \cdot Nec\{A\} \quad (34)$$

همان طور که از معادله فوق مشخص است می توان نتیجه گیری کرد که:

۱- اگر $\lambda = 1$ پس خواهیم داشت $Me = Pos$ (تصمیم گیرنده حداکثر شانس ممکن را برای پارامتر غیرقطعی در نظر می گیرد).

۲- اگر $\lambda = 0$ پس خواهیم داشت $Me = Nec$ (تصمیم گیرنده حداقل شانس ممکن را برای پارامتر غیرقطعی در نظر می گیرد).

۳- اگر $\lambda = 0,5$ پس خواهیم داشت $Me = Cr$ (یعنی تصمیم گیرنده متوسط شانس را برای پارامتر غیرقطعی در نظر می گیرد).

شکل عمومی معیار Me با فرض اینکه $\tilde{x} \geq x$, $\tilde{x} \leq x$ به صورت زیر خواهد بود (ژو و ژو، ۲۰۱۳):

$$Me\{\tilde{x} \leq x\} = \begin{cases} 0 & \text{if } x \leq r_1 \\ \lambda \cdot \frac{x-r_1}{r_2-r_1} & \text{if } r_1 \leq x \leq r_2 \\ \lambda & \text{if } r_2 \leq x \leq r_3 \\ \lambda + (1-\lambda) \cdot \frac{x-r_2}{r_3-r_2} & \text{if } r_2 \leq x \leq r_3 \\ 1 & \text{if } x \geq r_3 \end{cases} \quad (35)$$

$$Me\{\tilde{x} \geq x\} = \begin{cases} 1 & \text{if } x \leq r_1 \\ \lambda + (1-\lambda) \cdot \frac{r_2-x}{r_2-r_1} & \text{if } r_1 \leq x \leq r_2 \\ \lambda & \text{if } r_2 \leq x \leq r_3 \\ \lambda \cdot \frac{r_3-x}{r_3-r_2} & \text{if } r_2 \leq x \leq r_3 \\ 0 & \text{if } x \geq r_3 \end{cases} \quad (36)$$

همچنین مقدار میانگین معیار Me می تواند به صورت معادله ۳۷ تعریف گردد:

$$E^{Me}[\tilde{\xi}] = \int_{-\infty}^{+\infty} Me\{\tilde{\xi} \geq x\} dx - \int_{-\infty}^{-\infty} Me\{\tilde{\xi} \leq x\} dx = \frac{1-2\lambda}{\gamma}(r_1 + r_2) + \frac{\lambda}{\gamma}(r_1 + r_2) \quad (37)$$

مدل پایه‌ای محدودیت شانس امکانی^۱

در این بخش برای راحتی کار فرم فشرده مدل زنجیره تأمین حلقه بسته استفاده می‌شود. x_s, y به ترتیب معرف متغیرهای صفر و یک و متغیرهای پیوسته هستند. A, B, N, S ماتریس ضرایب را نشان می‌دهند و c, d, f مربوط هستند به پارامترهای مدل. بردار c عبارت است از پارامترهای هزینه‌ها که شامل هزینه حمل و نقل، هزینه تولید، هزینه نگهداری و هزینه خرید مواد اولیه می‌شود و بردار d برای پارامتر تقاضا تعریف می‌گردد. هردوی این بردارها (یعنی c, d) با توجه به مفروضات مدل عدم قطعیت سناریویی دارند. بردار f به عنوان هزینه ثابت افتتاح تسهیلات یعنی مراکز توزیع، جمع‌آوری، انبارهای روغن خام و هزینه ثابت قرارداد با تأمین کنندگان، تعریف می‌شود و به همراه ماتریس ضرایب N دارای عدم قطعیت فازی می‌باشد. پارامترهای مبتنی بر سناریو با اندیس s نشان داده می‌شود. با توجه به توضیحات فوق فرم فشرده مدل پیشنهادی عبارت است از

$$\begin{aligned} \text{Min } z &= \tilde{f}y + \tilde{c}_s x_s \\ \text{s.t.} \\ Ax_s &\geq \tilde{d}_s, \\ Bx &= 0, \\ Sx_s &\leq \tilde{N}y, \\ y &\in \{0, 1\}, x \geq 0, \end{aligned} \quad (38)$$

با در نظر گرفتن معیار Me فرم فشرده مدل پایه برنامه‌ریزی امکانی-تصادفی به شکل معادله ۳۹ خواهد بود:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } E[z] = E[\tilde{f}]y + E[\tilde{c}_s]x_s \\
 & \text{s.t.} \\
 & \text{Me}\{Ax_s \geq \tilde{d}_s\} \geq \alpha_s, \\
 & Bx = 0, \\
 & \text{Me}\{Sx_s \leq \tilde{N}y\} \geq \beta_s, \\
 & y \in \{0,1\}, x \geq 0.
 \end{aligned} \tag{۳۹}$$

در مدل فوق α_s, β_s حداقل سطوح اطمینان برای محقق شدن محدودیت‌های شانس تحت سناریوهای مختلف هستند. مطابق با مدل ژو و ژو (۲۰۱۳)، برای تبدیل مدل فوق به فرم قطعی باید از دو مدل تقریبی حد بالا^۱ و مدل تقریبی حد پایین^۲ استفاده کرد که به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\begin{aligned}
 & \text{UAM} \left\{ \begin{array}{l} \text{Min } E[z] = E[\tilde{f}]y + E[\tilde{c}_s]x_s \\ \text{s.t.} \\ \text{Pos}\{Ax_s \geq \tilde{d}_s\} \geq \alpha_s, \\ Bx = 0, \\ \text{Pos}\{Sx_s \leq \tilde{N}y\} \geq \beta_s, \\ y \in \{0,1\}, x \geq 0, \end{array} \right. \quad \text{and} \quad \text{LAM} \left\{ \begin{array}{l} \text{Min } E[z] = E[\tilde{f}]y + E[\tilde{c}_s]x_s \\ \text{s.t.} \\ \text{Nec}\{Ax_s \geq \tilde{d}_s\} \geq \alpha_s, \\ Bx = 0, \\ \text{Nec}\{Sx_s \leq \tilde{N}y\} \geq \beta_s, \\ y \in \{0,1\}, x \geq 0, \end{array} \right. \tag{۴۰}
 \end{aligned}$$

همان‌طور که از معادله ۴۰ مشخص است مدل ارائه شده توسط ژو و ژو (۲۰۱۳)، یک تابع چند ضابطه‌ای است یعنی جواب مدل در یک بازه‌ای از حد بالا و پایین قرار می‌گیرد؛ که مدل UAM جواب‌های خوش‌بینانه یعنی حد بالا ارائه می‌دهد و مدل LAM یک مدل با رویکرد بدبینانه است و جواب‌های حد پایین را مشخص می‌کند. ما با استفاده از منطق مشابه مدل اعتبار (ژو و ژانگ، ۲۰۰۹) برای رفع مشکل جواب بازه‌ای مدل ژو، اثبات می‌کنیم که:

-
1. Upper Approximation Model (UAM)
 2. Lower Approximation Model (LAM)

گزاره ۱: اگر ξ یک عدد فازی ذوزنقه‌ای باشد و حداقل سطح اطمینان $\alpha, \beta > 0.5$

باشند پس داریم:

$$Me \{ \xi \geq x \} \geq \alpha \Leftrightarrow x \leq \frac{(\alpha - \lambda)r_1 + (1 - \alpha)r_2}{1 - \lambda} \quad \text{و}$$

$$Me \{ \xi \leq x \} \geq \alpha \Leftrightarrow x \geq \frac{(\alpha - \lambda)r_4 + (1 - \alpha)r_3}{1 - \lambda}$$

اثبات. مطابق با توزیع معیار Me می‌توان نتیجه گرفت که اگر:

$$(1) Me \{ \xi \geq x \} \geq \alpha \Leftrightarrow x \leq r_1 \quad (Me \{ \dots \} \equiv 1) \text{ or } \lambda + (1 - \lambda) \cdot \frac{x - r_2}{r_2 - r_1} \geq \alpha.$$

$$\text{If } x \leq r_1, \text{ then } x \leq r_1 \leq \frac{(\alpha - \lambda)r_1 + (1 - \alpha)r_2}{1 - \lambda} \quad (\lambda \neq 1).$$

(۲) If

$$x \leq \frac{(\alpha - \lambda)r_1 + (1 - \alpha)r_2}{1 - \lambda}, \text{ then } \lambda + (1 - \lambda) \cdot \frac{r_2 - x}{r_2 - r_1} \geq \alpha \Rightarrow Me \{ \xi \geq x \} \geq \alpha.$$

پس اثبات می‌شود که:

$$Me \{ \xi \geq x \} \geq \alpha \Leftrightarrow x \leq \frac{(\alpha - \lambda)r_1 + (1 - \alpha)r_2}{1 - \lambda}$$

اثبات کرد که:

$$Me \{ \xi \leq x \} \geq \alpha \Leftrightarrow x \geq \frac{(\alpha - \lambda)r_4 + (1 - \alpha)r_3}{1 - \lambda}.$$

همان‌طور که در معادله ۳۹ مشخص است مدل ارائه شده دارای پارامترهای غیرقطعی از نوع ترکیبی تصادفی و فازی در تابع هدف و محدودیت‌ها می‌باشد. مطابق با دو بیس و پراد (۱۹۸۷)، لئو و ایوامارا (۱۹۹۸)، مولوی و همکاران (۱۹۹۵)، یو و همکاران (۲۰۰۰) برای مدل‌های برنامه‌ریزی تصادفی و همچنین بر اساس اینگوچی و رامک (۲۰۰۰)، پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲b) برای مدل‌های برنامه‌ریزی فازی از نوع امکانی، می‌توان مدل همتای قطعی را به صورت معادله ۴۱ تبدیل کرد:

$$\text{Min } E[z] = \left[\frac{1-\lambda}{\gamma} (f_1 + f_r) + \frac{\lambda}{\gamma} (f_r + f_r) \right] \cdot y + \sum_s p_s \cdot \left[\frac{1-\lambda}{\gamma} (c_{1s} + c_{rs}) + \frac{\lambda}{\gamma} (c_{rs} + c_{rs}) \right] x_s$$

s.t.

$$Ax_s \geq \frac{(\alpha_s - \lambda)d_{rs} + (1 - \alpha_s)d_{rs}}{1 - \lambda} \quad (41)$$

$$Bx = 0,$$

$$Sx_s \leq \left[\frac{(\beta_s - \lambda)N_{1s} + (1 - \beta_s)N_{rs}}{1 - \lambda} \right] \cdot y$$

$$y \in \{0, 1\}, x \geq 0,$$

در معادله ۴۱، عبارت اول تابع هدف مربوط است به میانگین امکانی و عبارت دوم میانگین تصادفی. λ یک پارامتر بدینانه-خوش‌بینانه است که مطابق با رویکرد تصمیم‌گیرندگان نسبت به مسئله قابل تعریف است و احتمال متناظر با هر سناریو با p_s نشان داده می‌شود که

$$\sum_s p_s = 1$$

برنامه‌ریزی استوار امکانی - تصادفی^۱

با وجود اینکه مدل BPCCP برای پاسخگویی به عدم قطعیت‌های مدل مناسب است، اما ایراد اساسی آن این است که نسبت به انحرافات ایجاد شده از جواب بهینه در تابع هدف (استوار بهینگی) و مقادیر سمت راست محدودیت‌های شانس (استوار شدنی) حساسیت ندارد (بن تال و همکاران، ۲۰۰۹)؛ بنابراین برای رفع این مشکل، یک مدل استوار امکانی - تصادفی ارائه می‌گردد که ترکیبی است از برنامه‌ریزی استوار، امکانی و برنامه‌ریزی تصادفی بر اساس معیار Me برای مواجهه با عدم قطعیت‌های ترکیبی مدل یعنی عدم قطعیت‌های از نوع تصادفی و شناختی (فازی). این مدل RSPP پیشنهادی به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min } E[z] + \gamma(z_{\max} - z_{\min}) + \delta_1 \sum_S P_S \left[d_{\tau_s} - \frac{(\alpha_s - \lambda)d_{\tau_s} + (1 - \alpha_s)d_{\tau_s}}{1 - \lambda} \right] + \\
 & \delta_2 \sum_S P_S \left[\frac{(v_s - \lambda)N_{1s} + (y - v_s)N_{\tau_s}}{1 - \lambda} - N_{1s} \cdot y \right] \\
 & \text{s.t.} \\
 & Ax_s \geq \frac{(\alpha_s - \lambda)d_{\tau_s} + (1 - \alpha_s)d_{\tau_s}}{1 - \lambda} \quad (42) \\
 & Bx = 0, \\
 & Sx_s \leq \left[\frac{(\beta_s - \lambda)N_{1s} + (1 - \beta_s)N_{\tau_s}}{1 - \lambda} \right] \cdot y \\
 & y \in \{0, 1\}, x \geq 0,
 \end{aligned}$$

همانند مدل BSPP، عبارت اول عبارت است از مقدار میانگین تابع هدف. عبارت دوم به استوار بهیگی مدل اشاره دارد که می‌تواند از طریق اختلاف میان مقدار حداکثر و حداقل مقدار تابع هدف (Z_{\min} و Z_{\max}) تعریف شود. ما این عبارت دوم را انحراف امکانی مینامیم که مقادیر آن از طریق معادله‌های ۴۳ و ۴۴ به دست می‌آید. همچنین ضریب γ اهمیت یا وزن عبارت دوم را نسبت به عبارت‌های دیگر تابع هدف مشخص می‌کند. در حقیقت این ضریب وزنی باعث می‌شود که اختلاف میان Z_{\min} و Z_{\max} حداقل شود.

$$z_{\max} = f_{\tau} \cdot y + \sum_S P_S \cdot c_{\tau_s} \cdot y_s \quad (43)$$

$$z_{\min} = f_{1} \cdot y + \sum_S P_S \cdot c_{1s} \cdot y_s \quad (44)$$

عبارت سوم و چهارم در تابع هدف استوار شدنی بودن را کنترل می‌کنند و ضرایب δ_1, δ_2 ضریب جریمه تخطی از مقادیر سمت راست محدودیت‌های شانس هستند. در واقع

$$\delta_1 \sum_S P_S \left[d_{\tau_s} - \frac{(\alpha_s - \lambda)d_{\tau_s} + (1 - \alpha_s)d_{\tau_s}}{1 - \lambda} \right]$$

نظر گرفتن ضریب جریمه δ_1 یک سطح اطمینان قابل قبول ایجاد می‌کند و عبارت

$$\left[d_{\tau_s} - \frac{(\alpha_s - \lambda)d_{\tau_s} + (1 - \alpha_s)d_{\tau_s}}{1 - \lambda} \right]$$

فازی تقاضا و مقدار بکار گرفته شده در محدودیت شانس در قالب سناریوهای مختلف

اشاره می‌کند. به طور مشابه عبارت چهارم و ضریب جریمه δ_2 برای محدودیت ظرفیت بکار گرفته می‌شود. باید توجه داشت با توجه به اینکه ماتریس ضرایب N غیرقطعی است، پس مدل پیشنهادی غیرقطعی خواهد بود؛ بنابراین با اضافه کردن یک متغیر کمکی به صورت $v_s = \beta_s \cdot y$ می‌توان مدل را به فرم خطی به شکل معادله ۴۵ تبدیل کرد که در آن مقدار M عبارت است از یک عدد بسیار بزرگ. همچنین ۳ محدودیت نیز برای کنترل متغیر کمکی V به مدل اضافه می‌گردد. در واقع می‌توان گفت وقتی که $y=0$ پس $V=0$ و زمانی که $y=1$ باشد $V=\beta$ خواهد بود.

$$\begin{aligned} & \text{Min } E[z] + \gamma(z_{\max} - z_{\min}) + \delta_1 \sum_S P_S \left[d_{fs} - \frac{(\alpha_s - \lambda)d_{fs} + (1 - \alpha_s)d_{rs}}{1 - \lambda} \right] + \\ & \delta_2 \sum_S P_S \left[\frac{(v_s - \lambda)N_{ls} + (y - v_s)N_{rs}}{1 - \lambda} - N_{ls} \cdot y \right] \\ & \text{s.t.} \\ & Ax_s \geq \frac{(\alpha_s - \lambda)d_{fs} + (1 - \alpha_s)d_{rs}}{1 - \lambda} \quad (45) \\ & Bx = 0, \\ & Sx_s \leq \left[\frac{(v_s - \lambda)N_{ls} + (y - v_s)N_{rs}}{1 - \lambda} \right] \\ & v_s \leq M \cdot y \\ & v_s \geq M \cdot (y - 1) + \beta_s \\ & v_s \leq \beta_s \\ & y \in \{0, 1\}, x \geq 0, \end{aligned}$$

در مدل فوق نکته مهم این است که عبارت $\gamma(z_{\max} - z_{\min})$ به دنبال مینیم کردن بیشترین انحراف از مقادیر تابع هدف بالاتر از میانگین (Z_{\max}) و مقادیر کمتر از میانگین (Z_{\min}) می‌باشد؛ اما در برخی مواقع ممکن است تصمیم گیرنده نسبت به حد بالا و پایین میانگین به یک اندازه حساسیت نداشته باشد. به عنوان مثال در مدل زنجیره تأمین روغن ممکن است که هزینه‌های پایین‌تر از میانگین برای تصمیم گیرنده اهمیت نداشته باشد و به جای آن

تصمیم گیرنده بخواهد کنترل بیشتری روی هزینه‌های بالاتر از میانگین داشته باشد؛ بنابراین مدل به شکل معادله ۴۶ تغییر می‌کند که ما آن را RSPP2 می‌نامیم.

$$\text{Min } E[z] + \gamma(z_{\max} - E[Z]) + \delta \sum_S P_S \left[d_{\tau_s} - \frac{(\alpha_s - \lambda)d_{\tau_s} + (1 - \alpha_s)d_{\tau_s}}{1 - \lambda} \right] + \delta_v \sum_S P_S \left[\frac{(v_s - \lambda)N_{\tau_s} + (y - v_s)N_{\tau_s}}{1 - \lambda} - N_{v_s, y} \right] \quad (46)$$

محدودیت‌های مدل مانند مدل ۱ RSPP خواهد بود. در معادله ۴۶ عبارت $\gamma(z_{\max} - E[Z])$ اطمینان ایجاد می‌کند که مدل فقط به مقادیر بالاتر از میانگین حساس باشد و هیچ محدودیتی نسبت به مقادیر کمتر از میانگین نداشته باشد. در واقع یک نرخ جبرانی قوی برای انحرافات بیشتر از میانگین ایجاد می‌گردد که توسط نرخ جریمه γ کنترل می‌شود. همچنین برای ارائه یک مدل جایگزین با نرخ جبرانی کمتر که در واقع به دنبال کنترل کردن بیشترین مقادیر تابع هدف هزینه‌ای باشد (با توجه به تعریف Zmax) می‌توان مدل RSPP3 را به صورت زیر تعریف کرد:

$$\text{Min } E[z] + \gamma z_{\max} + \delta \sum_S P_S \left[d_{\tau_s} - \frac{(\alpha_s - \lambda)d_{\tau_s} + (1 - \alpha_s)d_{\tau_s}}{1 - \lambda} \right] + \delta_v \sum_S P_S \left[\frac{(v_s - \lambda)N_{\tau_s} + (y - v_s)N_{\tau_s}}{1 - \lambda} - N_{v_s, y} \right] \quad (47)$$

که در واقع با تعاریف ارائه شده در بخش ادبیات و پیشینه تحقیق دقیقاً معادل برنامه‌ریزی استوار واقع‌بینانه تعریف می‌گردد.

برنامه‌ریزی استوار امکانی - تصادفی در بدترین حالت از نوع سخت

این مدل مطابق تعریفی که در ادبیات و پیشینه ارائه شد، یک رویکرد بدبینانه و ریسک‌گریز نسبت به عدم قطعیت‌های موجود در مدل است و به دنبال آن است تا به ازای تمام حالت‌های ممکن برای پارامترهای غیرقطعی، هم استوار شدنی بودن (بیشترین میزان استوار شدنی) مدل کنترل شود و هم استوار بهینگی. در واقع در این مدل تصمیم‌گیرنده به دنبال آن است که بدترین حالت مقدار گیری تابع هدف (برای مدل‌های مینیم سازی یعنی Max

تابع هدف) را به عنوان بدترین در نظر گیرد. با توجه به توضیحات اشاره شده مدل HWRSPPT عبارت است از:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \quad \text{Sup}(z) \\
 & \text{s.t.} \\
 & Ax_s \geq \text{sup}(\tilde{d}_s) \\
 & Bx = 0, \\
 & Sx_s \leq \text{inf}(\tilde{N})y, \\
 & y \in \{0,1\}, x \geq 0,
 \end{aligned} \tag{48}$$

با توجه به اینکه فرض شد پارامترهای غیرقطعی از نوع فازی دوزنقه‌ای هستند. پس مدل HWRSPPT به فرم زیر خواهد بود:

$$\begin{aligned}
 & \text{Min} \quad Z_{\max} \\
 & \text{s.t.} \\
 & Ax_s \geq d_r \\
 & Bx = 0, \\
 & Sx_s \leq N_r y, \\
 & y \in \{0,1\}, x \geq 0,
 \end{aligned} \tag{49}$$

می‌توان اثبات کرد که مدل HWRSPPT در واقع حالت خاصی از مدل RSPP2 می‌باشد. اثبات. اگر در مدل RSPP2 فرض کنیم که تصمیم‌گیرندگان بالاترین سطح محافظه‌کاری را دارند (کاملاً ریسک‌گریز)، یعنی سطح اطمینان مربوط به محدودیت‌های شانسی برابر باشند با $\alpha, \beta = 1$ و همچنین وزن یا اهمیت مربوط به استوار بهینگی نیز باید برابر با یک باشد یعنی $\gamma = 1$. پس چنانچه مقادیر فوق را در مدل RSPP2 جایگزین کنیم مدل HWRSPPT به دست خواهد آمد.

همان‌طور که مشخص است مدل HWRSPPT تنها نقاط حدی پارامترهای غیرقطعی را برای محدودیت‌ها و تابع هدف لحاظ می‌کند و نسبت به تابع توزیع امکانی پارامترها بی‌توجه است. البته از زاویه‌ای دیگر این نکته خود می‌تواند مزیت مدل‌های سخت هم محسوب گردد چراکه در این حالت تصمیم‌گیرندگان نیازی به تعریف توزیع امکانی پارامترها ندارند و فقط دانستن حد بالا و پایین پارامتر غیرقطعی کافی خواهد بود؛ اما باید

توجه داشت که زمانی که تابع توزیع امکانی پارامترهای غیرقطعی مشخص باشند، مدل HWRSP نمی‌تواند هیچ ارزش افزوده‌ای برای تصمیم‌گیرندگان در پی داشته باشد و در واقع جواب به دست آمده از مدل HWRSP بدترین مقدار ممکن از حالت بهینه را خواهد داشت (کمترین میزان استوار بهینگی) که البته با منطق سخت‌گیرانه بودن مدل همخوانی دارد. نکته مهم دیگر این است که مطابق نظر پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲a) مدل فوق برای به کارگیری در صنایع نظامی و پزشکی که سطح ریسک‌پذیری پایین است مناسب خواهد بود.

برنامه‌ریزی استوار امکانی - تصادفی در بدترین حالت از نوع نرم

همان‌طور که اشاره شد مدل HWRSP بسیار محافظه‌کارانه است و بالاترین مقدار ممکن برای حفاظت از محدودیت‌های شانس را در نظر می‌گیرد (استوار بهینگی) و همچنین نسبت به تابع توزیع امکانی نیز بی‌تفاوت است. از طرف دیگر جواب‌های به دست آمده به مقدار زیادی از جواب بهینه سایر مدل‌ها فاصله دارد مثلاً مدل RSPP₁ و این بدان معناست که تصمیم‌گیرندگان باید هزینه زیادی را برای پاسخگویی به عدم قطعیت‌های موجود در مدل متقبل شوند. در واقع به جز موارد خاصی مثل صنایع نظامی یا پزشکی چندان هم واقع‌بینانه نیست که تمام پارامترهای غیرقطعی بدترین مقدار ممکن خود را بگیرند. پس برای حل ایرادات مطرح شده، مدل SWRSPP پیشنهاد می‌گردد. مشابه با برنامه‌ریزی استوار سخت، در اینجا هم سعی می‌شود که بدترین مقدار تابع هدف مینیمم شود اما تفاوت این دو رویکرد این است که در حالت نرم همه محدودیت‌ها نیازی نیست (تقریباً همه) در بدترین مقدار پارامترهای عدم قطعیت تحقق پیدا کنند. (اینگوچی و ساکاوا، ۱۹۹۸؛ برتسیماس و سیم، ۲۰۰۴). در واقع در این حالت مدل به دنبال آن است که برای تخطی از تحقق محدودیت‌های شانس مشابه مدل RSPP₁ عمل کند و برای کنترل استوار بهینگی، بدترین مقدار ممکن تابع هدف را بهینه کند. پس مدل SWRPPS عبارت است از:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z_{\max} + \delta_1 \sum_S P_S \left[d_{\tau_s} - \frac{(\alpha_s - \lambda)d_{\tau_s} + (1 - \alpha_s)d_{\tau_s}}{1 - \lambda} \right] + \\ \delta_2 \sum_S P_S \left[\frac{(v_s - \lambda)N_{v_s} + (y - v_s)N_{\tau_s}}{1 - \lambda} - N_{v_s} \cdot y \right] \end{aligned} \quad (50)$$

در ادامه به مقایسه مدل‌های پیشنهادی و نقاط ضعف و قوت هر یک از آن‌ها پرداخته خواهد شد.

ارزیابی و پیاده‌سازی مدل

برای ارزیابی عملکرد و کارایی مدل RSPP پیشنهادی، مطالعه موردی در صنعت زنجیره تأمین روغن خوراکی با جمع‌آوری داده از شرکت روغن مارگارین صورت گرفت. برای طراحی شبکه زنجیره تأمین شرکت، دو نوع تأمین‌کننده در نظر گرفته می‌شود. تأمین‌کننده‌های روغن خام (مانند کلزا و پالم) و مواد اولیه و ملزومات (مانند ورق حلب و پت یا همان قوطی‌های پلاستیکی). تأمین‌کننده‌های روغن خام در نقاط مختلف جهان پراکنده شده‌اند که از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان به اندونزی، مالزی، اکراین، المان، هلند، امریکا، برزیل، آرژانتین و. اشاره کرد. در مورد تأمین ملزومات بخش اصلی نیاز شرکت در داخل کشور تأمین می‌گردد. در واقع با توجه به اینکه تابع هدف مسئله کاهش هزینه‌ها می‌باشد و توجه به این نکته که کشورهای مجاور به یکدیگر به لحاظ جغرافیایی (مانند برزیل و آرژانتین) هزینه حمل‌ونقل تقریباً یکسانی دارند و با فرض یکسان بودن کیفیت روغن خام ارائه‌شده توسط تأمین‌کنندگان، کشورهای برزیل (S1)، هلند (S2)، مالزی (S3) و اکراین (S4) برای تأمین روغن خام انتخاب شدند. همچنین چهار تأمین‌کننده داخلی برای تأمین ملزومات ورق حلب و پت در نظر گرفته شد که در شهرهای ورامین (S5)، تهران (S6)، کرج (S7) و قزوین (S8) واقع شده‌اند. روغن خام از طریق کشتی بارگیری شده و در بنادر شمالی یا جنوبی کشور تحویل شرکت داده می‌شود. روغن خام دریافتی از طریق قطار یا کامیون بارگیری و به سیلوهای کارخانه منتقل می‌گردد. همچنین ملزومات تهیه‌شده از طریق تأمین‌کننده‌های داخلی، به وسیله کامیون به بخش بطری‌سازی منتقل می‌گردند. با توجه به توضیحات اشاره‌شده، مشخص است که سه حالت حمل‌ونقل با

کشتی، قطار و کامیون برای بخش ارتباطی میان واحدهای مختلف زنجیره تأمین در نظر گرفته شد.

مطابق با برنامه‌ی تولید، روغن خام موجود در سیلوهای کارخانه، به دو تصفیه‌خانه با ظرفیت ۳۵۰ و ۵۰۰ تن منتقل می‌شوند. در تصفیه‌خانه چند مرحله فرایند شیمیایی روی روغن خام انجام می‌شود که به ترتیب عبارت‌اند از: ۱- جداسازی ۲- خنثی‌سازی ۳- رنگ‌زدایی ۴- بی‌بو سازی ۵- سرمادهی. پس از مراحل فوق روغن خام تبدیل به روغن خوراکی یا همان محصول نهایی تبدیل شده و به خط پرکنی منتقل می‌شود. واحد پرکنی شامل ۲ خط پرکنی بطری برای محصولات روغن مایع ۸۱۰ و ۱۳۵۰ گرمی بوده و خط پرکنی حلب برای محصولات روغن جامد ۵ و ۱۰ و ۱۶ کیلوگرمی می‌باشد. ما سه محصول پر فروش شرکت شامل دو محصول روغن آفتابگردان خوراکی و سرخ‌کردنی برای مشتریان بخش B2B و محصول روغن سویا را هم که در صنایع غذایی مصرف بالایی دارد برای بخش B2C در نظر گرفتیم. پس در واقع مدل زنجیره تأمین پیشنهادی شامل ۳ نوع روغن می‌شود که هر کدام در ۵ نوع بسته‌بندی مختلف می‌تواند ارائه گردد پس در واقع مدل شامل ۱۵ محصول نهایی خواهد بود.

بعد از این مرحله، محصولات نهایی از خطوط پرکنی به انبار محصولات نهایی منتقل شده و از آنجا به مراکز توزیع ارسال می‌گردند. ۵ مرکز توزیع بالقوه در استان‌های مازندران (D۱)، خراسان (D۲)، آذربایجان شرقی (D۳)، بندرعباس (D۴) و تهران (D۵) جهت پوشش شرق، غرب، شمال، جنوب و مرکز کشور تعریف شدند. همچنین برای هر مرکز توزیع بالقوه، ۳ سطح ظرفیت ۵۰۰۰ تن (q۱)، ۱۰۰۰۰ تن (q۲) و ۱۵۰۰۰ تن (q۳) در نظر گرفته شد. این مراکز توزیع محصولات نهایی را به ۳۰ استان کشور برای مشتریان ارسال می‌کنند. برای محاسبه هزینه خرید روغن خام و حمل و نقل از ساعت انجمن صنعت دانه‌های روغنی ایرانیان (<http://www.oilepa.com>) استفاده گردید. برای تخمین فاصله میان تأمین‌کننده تا سیلوی دریافت مواد اولیه، یا فاصله مراکز توزیع تا مشتریان در استان‌های مختلف از گوگل مپ استفاده گردید. محصولات فروش نرفته یا فاسد شده به مراکز جمع‌آوری واقع در محل کارخانه ارسال می‌گردند. به دلیل اینکه مرکز جمع‌آوری

فعلی پاسخگویی نیاز کارخانه می باشد و با کمبود ظرفیت مواجهه نمی باشد بدون تغییر در ساختار عمومی مدل همین مرکز برای این منظور در نظر گرفته شد بدیهی است که در صورت اضافه شدن چند مرکز بازیافت بالقوه، با توجه به مدل عمومی ارائه شده، مدل پاسخگو خواهد بود. در مرکز جمع آوری روغن از حلب و قوطی پلاستیکی جدا شده، روغن خام به تصفیه خانه ارسال می شود و ورق حلب و قوطی های پلاستیکی راهی بازار مواد اسقاطی می شوند. با توجه به افق برنامه ریزی شرکت و تغییر تقاضا در فصل های مختلف ۴ دوره ۳ ماهه برای برنامه ریزی مورد ارزیابی قرار گرفت. برای پاسخگویی به شرایط عدم قطعیت، چهار سناریو با احتمالات مختلف در نظر گرفته شد که عبارت اند از: بد، نرمال، خوب، عالی که توزیع احتمال هر یک به ترتیب ۰,۱، ۰,۲، ۰,۳، ۰,۴ می باشند. برای هر پارامتر غیرقطعی از نوع شناختی، اعداد فازی ذوزنقه ای برای هر سناریو تعریف شد. به عنوان مثال برای تخمین پارامتر تقاضا داریم:

$$\tilde{d}_{pmts}^m = (0.9, 0.95, 1, 1.05)$$

از آنجا که مدل پیشنهادی چند دوره ای (۴ دوره)، چند محصولی (۱۵ محصول نهایی) و همچنین تعداد زیاد استان ها (۳۰ استان) در ۴ سناریوی مختلف تعریف می گردد به دلیل محدودیت فضا داده های ورودی گزارش نشدند، هرچند در صورت نیاز این داده ها در دسترس خواهند بود. مدل پیشنهادی با استفاده از نرم افزار GAMS 24.8 با CPLEX حل شد و همه محاسبات در کامپیوتر با پردازنده core i5 و Ram 4 GB صورت گرفت.

مقایسه مدل های استوار

در این بخش به مقایسه انواع مدل های پیشنهادی استوار واقع بینانه، استوار سخت و نرم از طریق داده های اسمی پرداخته می شود. برای این منظور ابتدا ۱۰ عدد تصادفی با توزیع یکنواخت تولید می شود و نتایج به دست آمده در هر بار تولید پارامترها بررسی می شود. فرض کنید پارامتر غیرقطعی $\xi = (r_1, r_2, r_3, r_4)$ و $r_1 < r_2 < r_3 < r_4$ یک عدد فازی ذوزنقه ای باشد در هر مرتبه یک عدد تصادفی یکنواخت بین حد بالا و پایین این پارامتر یعنی

به دست آمده یعنی (x^*, y^*) را در مدل برنامه ریزی خطی که فرم فشرده آن به صورت معادله ۵۱ است جایگزین می نماییم:

$$\begin{aligned} \min Z &= f^{real} \cdot Y^* + c_s^{real} \cdot x_s^* + \delta_1 S_1 + \delta_2 S_2 \\ \text{s.t.} \\ S \cdot X_s^* &\leq N^{real} \cdot Y^* + S_1 \\ A \cdot X_s^* + S_2 &\geq d^{real} \\ B \cdot X_s^* &= 0 \\ S_1, S_2 &\geq 0 \end{aligned} \quad (51)$$

برای یافتن بهترین رویکرد، مدل‌های فوق ۱۶۰ بار اجرا شدند (۱۶ مدل که هر کدام ۱۰ بار با اعداد تصادفی محاسبه می‌شوند) و نتایج در جدول ۲ گزارش شده‌اند. با توجه به نتایج جدول ۲ می‌توان این گونه نتیجه گرفت که:

جدول ۲. عملکرد مدل‌های استواری پیشنهادی

| نام مدل | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | میانگین | واریانس |
|---|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|------------|
| BSPP(a) $\lambda = 0, \alpha, \beta = 0, 9$ | 195, 933 | 206, 467 | 229, 625 | 247, 374 | 237, 730 | 225, 154 | 213, 628 | 237, 492 | 224, 713 | 239, 265 | 225, 738 | 15,3 49 |
| BSPP(c) $\lambda = 0, 9, \alpha, \beta = 0, 6$ | 186, 615 | 219, 157 | 212, 697 | 197, 167 | 188, 358 | 194, 672 | 184, 468 | 216, 138 | 215, 286 | 180, 271 | 199, 483 | 14,1 46 |
| RSPP1(b) $\lambda = 0, 5$ | 153, 806 | 149, 506 | 170, 395 | 144, 203 | 152, 759 | 146, 875 | 141, 180 | 167, 506 | 160, 850 | 159, 024 | 154, 610 | 9,23 3 |
| RSPP2 (a) $\lambda = 0$ | 190, 652 | 182, 098 | 194, 588 | 185, 395 | 191, 833 | 185, 382 | 195, 143 | 183, 386 | 202, 587 | 176, 060 | 188, 712 | 7,32 2 |
| RSPP2(c) $\lambda = 0, 9$ | 189, 088 | 176, 194 | 173, 970 | 179, 394 | 186, 477 | 181, 231 | 196, 554 | 186, 060 | 195, 899 | 179, 619 | 184, 449 | 7,36 9 |

| نام مدل | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | میانگین | واریانس |
|---|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| RSPP3(b) $\lambda = 0.5$ | 155,024 | 149,408 | 162,865 | 161,351 | 155,854 | 161,027 | 153,762 | 147,178 | 144,367 | 144,050 | 153,489 | 6,658 |
| SWRSPP(a) $\lambda = \cdot$ | 190,714 | 188,693 | 183,117 | 197,469 | 202,210 | 174,672 | 193,421 | 186,474 | 197,897 | 170,651 | 188,532 | 9,637 |
| SWRSPP(c) $\lambda = 0.9$ | 187,125 | 170,526 | 189,296 | 178,477 | 189,268 | 195,433 | 169,906 | 179,418 | 191,255 | 187,217 | 183,792 | 8,310 |
| BSPP(a) $\lambda = \cdot, \alpha, \beta = 0.9$ | 155,046 | 165,220 | 137,173 | 165,556 | 146,054 | 141,835 | 163,823 | 155,306 | 156,471 | 146,832 | 153,332 | 9,519 |
| BSPP(c) $\lambda = 0.9, \alpha, \beta = 0.9$ | 190,668 | 183,993 | 195,923 | 208,085 | 193,121 | 204,388 | 186,233 | 207,299 | 204,674 | 211,137 | 198,552 | 9,271 |
| RSPP1(b) $\lambda = 0.5$ | 187,107 | 203,048 | 187,737 | 192,410 | 195,120 | 198,260 | 194,025 | 177,455 | 184,433 | 205,247 | 192,484 | 8,120 |
| RSPP2 (a) $\lambda = \cdot$ | 155,032 | 152,875 | 142,825 | 151,798 | 172,902 | 162,884 | 159,241 | 173,946 | 148,748 | 170,313 | 159,056 | 10,157 |
| RSPP2(c) $\lambda = 0.9$ | 190,943 | 199,754 | 203,288 | 188,089 | 200,655 | 200,532 | 176,587 | 185,373 | 180,224 | 169,271 | 189,472 | 11,066 |
| RSPP3(b) $\lambda = 0.5$ | 187,332 | 173,131 | 178,958 | 202,323 | 179,085 | 196,865 | 205,526 | 182,817 | 174,333 | 170,691 | 185,106 | 11,846 |
| SWRSPP(a) $\lambda = \cdot$ | 155,301 | 168,251 | 171,071 | 164,792 | 147,700 | 140,470 | 150,218 | 156,930 | 143,246 | 149,166 | 154,714 | 9,961 |
| SWRSPP(c) $\lambda = 0.9$ | 197,350 | 254,509 | 228,364 | 217,288 | 250,336 | 211,056 | 244,991 | 199,729 | 248,038 | 238,741 | 229,040 | 20,340 |

مدل‌های RSPP₁ و RSPP₂ و SWRSP تقریباً عملکرد یکسانی دارند؛ که در میان حالت‌های مختلف این سه مدل، بهترین عملکرد مربوط است به مدل‌های RSPP1(c), RSPP2(c), SWRSP(c). در واقع در حالت c، با سطح بالای ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرندگان مواجه هستیم یعنی مقدار بالای پارامتر خوش‌بینانه- بدبینانه $\lambda=0.9$ (تصمیم‌گیرنده نگرش خوش‌بینانه دارد) و مقدار کم سطوح اطمینان برای تحقق محدودیت‌های شانس $\alpha, \beta=0.6$. همچنین مشخص است که از میان سه مدل اشاره‌شده بهترین مقدار میانگین تابع هدف مربوط است به مدل RSPP2(c).

مدل‌های HWRSP و BSPP(a) به ترتیب بدترین عملکرد ممکن را در میان مدل‌ها دارند که با توجه به توضیحاتی که در مورد هر مدل داده شد، عملکردشان مطابق انتظار می‌باشد. در واقع با توجه به اینکه در هر دو مدل برای حالت استوار بهینگی و استوار شدنی مدل، جریمه و ضربی در تابع هدف در نظر گرفته نمی‌شود، در نتیجه در قیاس با حالت‌های مشابه عملکرد مطلوبی را شاهد نیستیم. همچنین مدل HWRSP به دلیل اینکه بالاترین سطح محافظه‌کاری را برای مواجهه با پارامترهای عدم قطعیت لحاظ می‌کند و در واقع رویکردی کاملاً ریسک‌گریز دارد با توجه به مقدار میانگین تابع هدف شاهد بدترین عملکرد ممکن هستیم. نکته قابل‌ذکر دیگر در مورد این دو مدل این است که با توجه به جدول ۲ می‌توان دید که مقدار واریانس هر دو مدل از سایر مدل‌ها بالاتر است و در واقع به این دلیل است که هر دو مدل نسبت به استوار شدنی و بهینگی بودن، بی‌تفاوت هستند. در میان سه حالت مختلف در نظر گرفته‌شده برای مدل BSPP یعنی a, b, c با توجه به اینکه مدل BSPP(a) سطح محافظه‌کاری بالایی دارد یعنی $\alpha, \beta=1$ و رویکرد بدبینانه‌تری توسط تصمیم‌گیرندگان اتخاذ می‌شود یعنی $\lambda=0.9$ نسبت به دو حالت دیگر عملکرد بدتری را شاهد هستیم. در واقع می‌توان گفت در حالت a منطقه موجه نسبت به دو حالت دیگر کوچک‌تر شده و در نتیجه شاهد جواب‌های بدتری هستیم.

در میان مدل‌های استوار موجود می‌توان مشاهده کرد که نوع رویکرد خوش‌بینانه یا بدبینانه تصمیم‌گیرندگان تا چه حد روی نتایج مدل اثرگذار است در واقع در تمامی مدل‌ها

وقتی از حالت بدبینانه $\lambda = 0$ به سمت حالت‌های خوش‌بینانه‌تر یعنی $\lambda = 0.9$ حرکت می‌کنیم شاهد بهبود مقدار تابع هدف خواهیم بود.

در میان مدل‌های واقع‌بینانه ۱ و ۲ و RSPP^۳ مشخص است که عملکرد مدل RSPP3 از مدل‌های مشابه بدتر است. در واقع با توجه به اینکه این مدل فقط به دنبال کنترل کمتر مقدار انحرافات تابع هدف است و محافظه‌کارانه‌تر بودن آن نسبت به دو مدل واقع‌بینانه دیگر، انتظار می‌رود جواب‌های بدتری را شاهد باشیم.

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت که با در نظر گرفتن مفروضات زنجیره تأمین پیشنهادی، مدل (c) RSPP^۳ نسبت به سایر مدل‌ها عملکرد بهتری دارد؛ بنابراین استفاده از این مدل برای مواجهه با عدم قطعیت‌های موجود در زنجیره تأمین روغن پیشنهاد می‌گردد و برای محاسبات بعدی از این مدل استفاده خواهد شد. البته باید توجه داشت که معیارهای گوناگونی مانند ذات و ساختار زنجیره تأمین و نظرات تصمیم‌گیرندگان، مفروضات مدل را تعیین می‌کنند در نتیجه تصمیم‌گیری در مورد اینکه کدام یک از مدل‌های فوق بهترین عملکرد را دارد در صنایع مختلف و مسائل گوناگون می‌تواند نتایج متفاوتی داشته باشد.

ارزیابی عملکرد مدل RSPP

همان‌طور که در بخش‌های قبل اشاره شد مدل برنامه‌ریزی استوار امکانی - تصادفی (RSPP)، ترکیبی است از برنامه‌ریزی استوار، برنامه‌ریزی امکانی و برنامه‌ریزی تصادفی بر اساس معیار استاندارد Me که برای پاسخگویی به عدم قطعیت ترکیبی سناریویی و فازی موجود در پارامترهای مدل زنجیره تأمین پیشنهاد می‌شود. این مدل انعطاف‌پذیرتر از مدل‌های مشابه که معیارهای اعتبار (Cr) و یا معیارهای بدبینانه (Nec) می‌باشد و به تصمیم‌گیرندگان کمک می‌کند که ترکیب محذوبی از نگرش‌های مختلف را در بی‌نهایت حالت ممکن بین دو سر طیف بدبینانه و خوش‌بینانه در نظر گیرند. در واقع با استفاده از مدل RSPP پیشنهادی نه تنها به عدم قطعیت ترکیبی پاسخ داده می‌شود بلکه می‌توان نگرش‌های مختلف تصمیم‌گیرندگان را نیز با استفاده از یک معیار بدبینانه و خوش‌بینانه (λ) نسبت به

مسئله در نظر گرفت. پس مدل RSPP می‌تواند جواب‌های با انعطاف‌پذیری بالاتر تولید کند و اطلاعات بیشتر و کاربردی‌تری در اختیار تصمیم‌گیرندگان قرار دهد. در این بخش جهت ارزیابی عملکرد مدل، یک تحلیل حساسیت روی پارامتر λ و همچنین پارامترهای مربوط به حداقل سطح اطمینان (α, β) محدودیت‌های شانس انجام می‌شود. نتایج به‌دست آمده در جدول ۳ نوع نگرش تصمیم‌گیرندگان در یک طیف محدب خوش‌بینانه تا بدبینانه را، با در نظر گرفتن حداقل سطوح اطمینان مختلف نشان می‌دهد. نتایج بر اساس مدل RSPP(c) گزارش می‌شوند. برای این منظور:

- ۱- فرض می‌کنیم که (α, β) مقدار ثابتی دارند و مقدار λ متغیر است. ۲- فرض می‌کنیم که λ ثابت است و α, β متغیر هستند

جدول ۳. تحلیل حساسیت با توجه به نگرش تصمیم‌گیرندگان

| $\lambda \setminus \alpha, \beta$ | 0.5 | 0.6 | 0.7 | 0.8 | 0.9 | 1.0 |
|-----------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 0.0 | 187,876 | 188,754 | 190,331 | 191,927 | 196,013 | 197,146 |
| 0.1 | 187,101 | 188,311 | 189,476 | 191,497 | 195,644 | 197,137 |
| 0.2 | 185,275 | 187,696 | 189,146 | 191,186 | 194,862 | 197,125 |
| 0.3 | 183,368 | 186,528 | 188,623 | 190,343 | 193,268 | 197,120 |
| 0.4 | 181,715 | 184,948 | 187,860 | 189,636 | 193,268 | 197,120 |
| 0.5 | 178,994 | 181,319 | 187,572 | 188,809 | 191,856 | 197,119 |
| 0.6 | 173,953 | 175,895 | 183,903 | 186,857 | 190,046 | 197,118 |
| 0.7 | 166,343 | 169,736 | 177,898 | 181,372 | 188,739 | 197,117 |
| 0.8 | 154,567 | 160,496 | 169,459 | 176,928 | 185,509 | 197,117 |
| 0.9 | 133,361 | 146,122 | 154,086 | 166,459 | 179,052 | 197,117 |

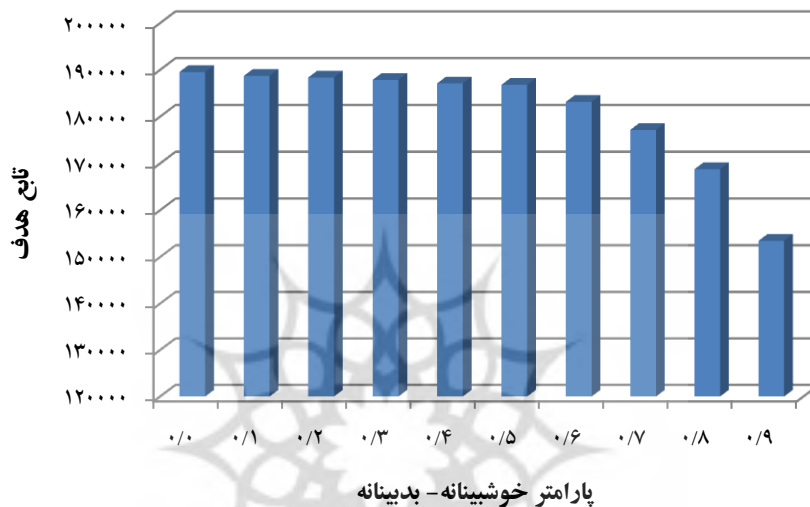
مطابق با جدول ۳ و شکل‌های ۲ و ۳ می‌توان گفت زمانی که α, β مقدار ثابتی دارند با افزایش λ مقدار بهینه تابع هدف (Z^* بهبود می‌یابد یعنی با توجه به اینکه تابع هدف مینیمم سازی است مقدار Z^* کمتر می‌شود و عکس این حالت برای فرض دوم اتفاق می‌افتد یعنی زمانی که مقدار λ ثابت است و مقدار α, β را تغییر می‌دهیم Z^* مقادیر بدتری به خود می‌گیرد. در واقع می‌توان گفت در صورتی که تابع هدف Min باشد λ یک پارامتر خوش‌بینانه محسوب می‌شود و زمانی که تابع هدف به صورت max باشد λ پارامتر بدبینانه خواهد بود. همان‌طور که جدول ۳ نشان می‌دهد زمانی که مقدار λ ثابت است با افزایش

α, β منطقه موجه جواب کوچک تر شده و جواب های مسئله مقادیر بدتری می گیرند و به طور عکس در مقادیر ثابت α, β و زمانی که λ را افزایش می دهیم با افزایش منطقه موجه روبرو شده و جواب های مسئله بهبود میابند.

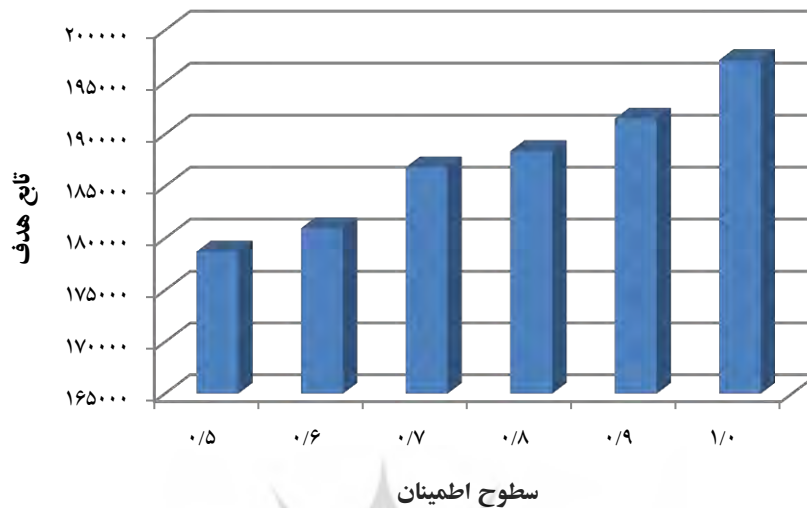
با توجه به جدول ۳ می توان گفت که در قیاس با مدل های مشابه که از معیار اعتبار (Cr) برای پاسخگویی به عدم قطعیت موجود در محدودیت های شانس استفاده کرده اند مانند پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲b) و فرخ و همکاران (۲۰۱۷)، حالت صرفاً خوش بینانه $\lambda = 1$ ، صرفاً بدبینانه $\lambda = 0$ و یا حد وسط خوش بینانه و بدبینانه $\lambda = 0.5$ در نظر گرفته می شود. در واقع مشخص است که تصمیم گیرندگان حق انتخاب محدودی خواهند داشت که در مسائل مربوط به دنیای واقعی نمی تواند چندان مفید محسوب شود. در حالی که در مدل RSPP پیشنهادی تمام گزینه های مدنظر تصمیم گیرندگان با توجه به نوع نگرش آنها نسبت مسئله و سطح ریسک پذیری یا ریسک گزیری می تواند در نظر گرفته شود و در نتیجه جواب به دست آمده انعطاف پذیرتر بوده و تمامی اطلاعات ممکن را در اختیار تصمیم گیرندگان قرار می دهد. در واقع باید گفت که با استفاده از مدل RSPP پیشنهادی می توان به نوع نگرش تصمیم گیرندگان به اهداف مسئله و همچنین میزان ریسک پذیری یا محافظه کاری آنها نسبت به تحقق محدودیت های عدم قطعی، از طریق مقادیر λ و α, β پاسخ داد. همان طور که از جدول مشخص است می توان ترکیب محدبی از طیف بدبینانه و خوش بینانه را با استفاده از مقادیر مختلف λ در نظر گرفت.

همچنین همان طور که در بخش مدل سازی اشاره شد مدل ژو و ژو (۲۰۱۳)، باید یک بار به ازای مدل UAM حل شود تا حد بالای مدل به دست آید و یک بار به ازای مدل LAM برای به دست آوردن حد پایین مسئله و در واقع شاهد یک جواب بازه ای خواهیم بود؛ اما در مدل RSPP پیشنهادی تنها یک بار مسئله حل می شود و همان طور که از جدول ۳ مشخص است دیگر شاهد جواب بازه ای نخواهیم بود. از نقطه نظر دیگر، در مدل پیشنهادی ژو و ژو (۲۰۱۳)، پارامتر خوش بینانه - بدبینانه (λ) تنها در تابع هدف بکار گرفته شده یعنی کاهش یا افزایش مقدار (λ) تنها موجب کاهش و افزایش مقدار تابع هدف می شود و در میزان شدنی بودن محدودیت ها تأثیر ندارد و در نتیجه تأثیری در فضای موجه

جواب بهینه نخواهد داشت پس می‌توان گفت تنها بهینگی مدل را کنترل می‌کند، درحالی‌که در مدل RSPP همان‌طور که در نتایج حاصل از جدول ۳ مشاهده گردید با تغییرات λ شاهد کاهش و افزایش فضای موجه بوده و درواقع هم استوار بهینگی و هم استوار شدنی بودن مدل به‌طور هم‌زمان کنترل می‌گردد.



شکل ۲. اثرات تغییر روی پارامتر خوش‌بینانه - بدبینانه (λ) بروی تابع هدف



شکل ۳. اثرات تغییر روی سطوح اطمینان (α, β) بروی تابع هدف

تحلیل حساسیت مدل زنجیره تأمین روغن

در این بخش تحلیل حساسیت بر روی تعدادی از پارامترهای مهم زنجیره تأمین روغن خوراکی پیشنهادی صورت می‌گیرد. در واقع هدف از این بخش این است که بررسی کنیم در صورت تغییرات در پارامترهای عدم قطعی چه تغییراتی در میزان هزینه‌ها، تعداد تأمین‌کنندگان موردنیاز و تعداد مراکز بالقوه راه‌اندازی شده صورت می‌گیرد. یکی از مهم‌ترین پارامترها تقاضاست که در طراحی یک شبکه زنجیره تأمین نقش بسزایی دارد. بدیهی است که برای سطوح پایین تقاضا، انتظار افتتاح تسهیلات با ظرفیت کمتری می‌رود و زمانی که تقاضا افزایش می‌یابد یا نیاز به گشایش مراکز بیشتری می‌باشد و یا باید ظرفیت مرکز افزایش پیدا کند. به همین منظور مقدار تابع هدف تحت تأثیر تغییرات در مقدار تقاضا مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. همان‌طور که از جدول ۳ مشخص است مقادیر پارامتر غیرقطعی تقاضا تحت بازه‌های ۲۵٪ تغییر کرده و نتایج حاصل از هر سناریو روی تابع هدف و در نتیجه افتتاح تسهیلات و انتخاب تأمین‌کننده‌ها در سطوح اطمینان مختلف

گزارش شده است. مطابق انتظار با افزایش مقدار تقاضا تعداد تسهیلات بیشتری گشایش می‌یابد و برعکس با کاهش تقاضا شاهد کاهش تعداد تسهیلات ایجاد شده خواهیم بود که در واقع نشان‌دهنده عملکرد مناسب مدل RSPP می‌باشد. برای مثال زمانی که تقاضا به ۰,۲۵ کاهش یافته و مقدار $\alpha, \beta = 0.6$ باشد مراکز توزیع شماره ۳ با سطح ظرفیت ۱، یعنی با ظرفیت ۵۰۰۰ تن گشایش خواهند یافت. از طرف دیگر زمانی که تقاضا را دو برابر می‌کنیم در همان سطح اطمینان، مراکز توزیع ۲ با سطح ظرفیت ۵۰۰۰ تن، مرکز توزیع ۱ و ۳ با ظرفیت ۱۰۰۰۰ تن و مراکز توزیع ۴ و ۵ با ظرفیت ۱۵۰۰۰ تن افتتاح می‌شوند.

همچنین نتایج جدول ۳، اثرات تغییر تقاضا روی تعداد تأمین‌کننده‌های انتخابی نیز مشخص می‌کند که با کاهش تقاضا، نیاز به قرارداد با تأمین‌کننده‌های کمتری می‌باشد و برعکس. به عنوان مثال زمانی که تقاضا به نصف کاهش می‌یابد (یعنی ۰,۵) در سطح اطمینان $\alpha, \beta = 0.6$ تأمین‌کننده S۱ برای روغن خام (I۱) و تأمین‌کننده S۷ برای تهیه ملزومات ورق و حلب و پت پلاستیکی (I۲) انتخاب می‌شوند و زمانی که مقدار تقاضا را تا دو برابر افزایش می‌دهیم در همان سطح اطمینان، برای تهیه روغن خام تأمین‌کننده‌های S۲ و S۴ انتخاب شده و برای تأمین ملزومات ۳ تأمین‌کننده ۵ و ۸ انتخاب می‌شوند.

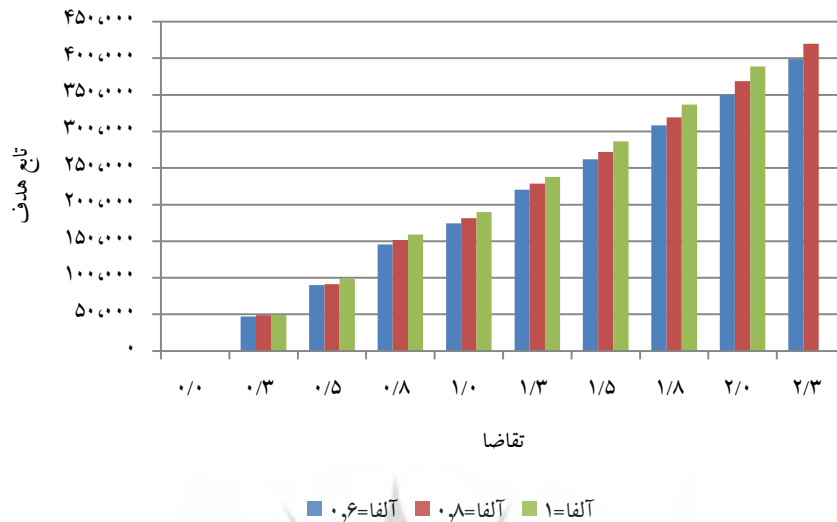
همچنین تحلیل حساسیت بر روی تغییرات تقاضا و سطوح اطمینان و اثر هم‌زمان آن‌ها بر تابع هدف انجام شد که نتایج آن در شکل ۴ مشخص می‌باشد. زمانی که تصمیم‌گیرندگان نگرشی با ریسک‌پذیری بالا داشته باشند برای پاسخگویی به عدم قطعیت موجود در محدودیت شانس، سطوح اطمینان کمتر یعنی $\alpha, \beta = 0.6$ انتخاب می‌شود در نتیجه مشخص است که نسبت به حالت ریسک‌پذیری کمتر (کاملاً محافظه‌کارانه) یعنی $\alpha, \beta = 1$ ، مقدار تابع هدف کمتر خواهد بود. در واقع همان‌طور که از شکل ۴ مشخص است زمانی که هم‌زمان با افزایش تقاضا با سطح ریسک‌پذیری کمتری از تصمیم‌گیرندگان مواجه می‌شویم و به سمت سطوح اطمینان بالاتر حرکت می‌کنیم یعنی از $\alpha, \beta = 0.6$ به سمت $\alpha, \beta = 1$ حرکت می‌کنیم رفته‌رفته ناحیه موجه کوچک‌تر شده و انتظار جواب بدتری را داریم در نتیجه مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد.

از طرف دیگر همان‌طور که از جدول ۴ نیز مشخص است میزان محافظه‌کاری یا ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرندگان تأثیر خود را در تعداد مراکز افتتاح‌شده نیز نشان می‌دهد و در سطوح بالای ریسک‌پذیری تعداد مراکز کمتری انتخاب‌شده و هرچه میزان محافظه‌کاری بیشتر می‌شود و به سمت $\alpha, \beta = 1$ می‌رویم، تعداد مراکز بالاتری گشایش می‌یابد تا در واقع با احتمال بیشتری پاسخگویی به تقاضای مشتریان صورت گیرد که این کاملاً با منطقی زنجیره تأمین هم مطابقت دارد یعنی تصمیم‌گیرندگان با محافظه‌کاری بیشتر، مراکز و تسهیلات بیشتری را برای پاسخ به تقاضای مشتریان در نظر می‌گیرند و در نتیجه متقبل هزینه‌های بیشتری نیز خواهند شد. همان‌طور که در جدول ۴ می‌توان مشاهده کرد، زمانی که تقاضا را به ۲,۲۵ برابر افزایش می‌دهیم در سطح اطمینان $\alpha, \beta = 1$ مسئله نشدنی می‌شود و مفهوم آن این است که با افزایش سطح اطمینان به مقدار $\alpha, \beta = 1$ فضای منطقه موجه جواب نسبت به حالت‌های مشابه کوچک‌تر شده و پاسخگویی تقاضای برآورد شده نیست و به تعداد مراکز توزیع بیش از ۵ مرکز بالقوه‌ای که در مفروضات زنجیره تأمین مسئله در نظر گرفته‌شده، نیاز می‌باشد.

جدول ۳. تحلیل حساسیت بر روی پارامتر تقاضا

| تقاضا | $\alpha, \beta = 1$ | | | $\alpha, \beta = 0.8$ | | | $\alpha, \beta = 0.6$ | | |
|-------|---------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------|
| | Z^{1*} | Dc^{2*} | S^{3*} | Z | Dc | S | Z | Dc | S |
| 0 | 0 | - | - | 0 | - | - | 0 | - | - |
| 0.25 | 49,379 | 13(2) | r1(2)-r2(7) | 48,659 | 13(2) | r1(3)-r2(5) | 47,104 | 13(2) | r1(3)-r2(5) |
| 0.5 | 98,093 | 14(1)-15(3) | r1(2)-r2(8) | 91,461 | 14(1)-13(2) | r1(2)-r2(8) | 89,800 | 15(3) | r1(2)-r2(8) |
| 0.75 | 158,938 | 14(1)-13(2)-15(3) | r1(2)-r2(8) | 151,873 | 14(1)-11,3(2) | r1(2)-r2(8) | 145,685 | 11,2,3,4(1) | r1(2)-r2(8) |
| 1 | 189,855 | 12,4(1)-13(2)-15(3) | r1(2)-r2(8) | 181,492 | 12(1)-13(2)-15(3) | r1(2)-r2(8) | 174,418 | 11,2,4(1)-13(2) | r1(2)-r2(8) |
| 1.25 | 237,995 | 12(1)-13(2)-14,5(3) | r1(2,4)-r2(7,8) | 228,783 | 13(2)-14,5(3) | r1(2)-r2(8) | 220,211 | 11,3(2)-15(3) | r1(2)-r2(8) |
| 1.5 | 286,566 | 12(1)-11,3(2)-15,4(3) | r1(2,4)-r2(5,8) | 271,889 | 12,4(1)-11,3(2)-15(3) | r1(2,4)-r2(5,8) | 261,934 | 14(1)-11,3(2)-15(3) | r1(2,4)-r2(5,8) |
| 1.75 | 336,645 | 11,3(2)-12,4,5(3) | r1(2,4)-r2(7,8) | 319,222 | 12(1)-11,3(2)-15,4(3) | r1(2,4)-r2(7,8) | 308,398 | 11,3(2)-14,5(3) | r1(2,4)-r2(7,8) |
| 2 | 388,749 | 11,2,3,4,5(3) | r1(2,4)-r2(5,7,8) | 368,560 | 11,3(2)-12,4,5(3) | r1(2,4)-r2(5,8) | 350,432 | 12(1)-11,3(2)-14,5(3) | r1(2,4)-r2(5,8) |
| 2.25 | infeasible | - | - | 419,921 | 11,2,3,4,5(3) | r1(2,4)-r2(5,7,8) | 399,024 | 11,3(2)-12,4,5(3) | r1(2,4)-r2(5,8) |

۱: مقدار بهینه تابع هدف، ۲: تعداد مراکز توزیع بالقوه افتتاح شده (ظرفیت هر مرکز)، ۳: نامین کننده مواد خام نوع ۱، ۲، ۳ (نام نامین کننده)



شکل ۴: تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای تقاضا و سطوح اطمینان (α, β) و تأثیر هم‌زمان آن بر روی تابع هدف

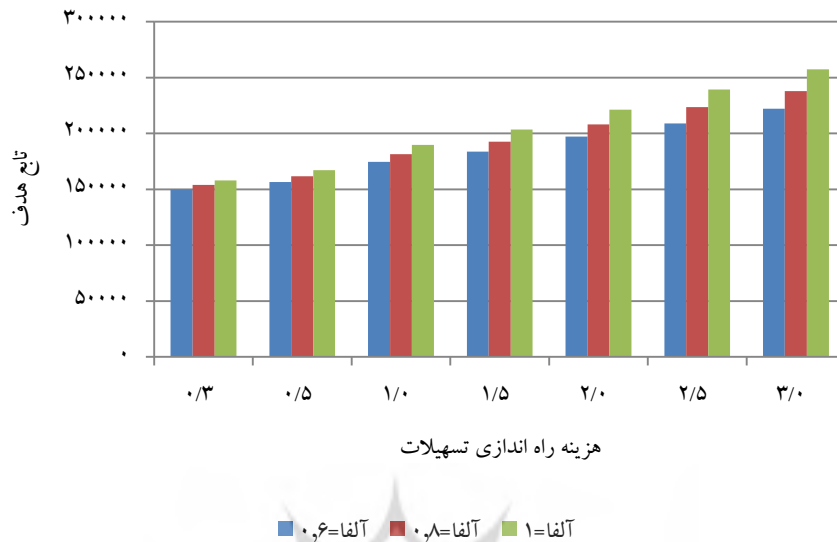
یکی دیگر از پارامترهای مهم در طراحی زنجیره تأمین مربوط می‌شود به هزینه افتتاح تسهیلات مختلف. در واقع هزینه‌های بالای افتتاح مراکز موجب تأثیر آن بر سایر بخش‌ها نیز خواهد شد. به همین منظور تحلیل حساسیت روی پارامتر عدم قطعی هزینه‌های افتتاح تسهیلات صورت گرفته و نتایج آن در جدول ۴ گزارش می‌شود. همان‌طور که مشخص است با کاهش هزینه‌های گشایش تسهیلات، در هر سطح اطمینان مشخص، مراکز توزیع با تعداد بیشتر یا با ظرفیت بیشتری راه‌اندازی می‌شوند و با افزایش هزینه‌های افتتاح مراکز، علیرغم چند برابر شدن هزینه‌ها به دلیل پاسخگویی به سطح تقاضای مشتریان، تعداد مراکز تقاضا ثابت می‌ماند. برای مثال زمانی که هزینه‌های افتتاح به نصف کاهش می‌یابد و در سطح اطمینان $\alpha, \beta = 0.6$ مراکز توزیع D1, D2, D3, D4, D5 با سطح ظرفیت q1 یعنی ۵۰۰۰ تن باید راه‌اندازی شوند و زمانی که پارامتر عدم قطعی هزینه گشایش را به ۳ برابر افزایش می‌دهیم، تعداد مراکز نسبت به حالت نرمال یعنی زمانی که هزینه افتتاح برابر یک است تغییری نمی‌کند و ثابت می‌ماند.

همچنین انتظار می‌رود که با کاهش سطح ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرندگان از $\alpha, \beta = 0.6$ به سمت $\alpha, \beta = 1$ شاهد افزایش تعداد مراکز راه‌اندازی باشیم که نتایج جدول ۴ این امر را تصدیق می‌کند. همچنین همان‌طور که از شکل ۷ مشخص است مشابه با تحلیل حساسیت مربوط به تقاضا، در اینجا هم با افزایش سطوح اطمینان، رفته‌رفته ناحیه موجه کوچک‌تر شده و در نتیجه مقدار تابع هدف افزایش می‌یابد. در ضمن قابل‌ذکر است که محدودیت بودجه در نظر گرفته نشده است، در اینجا باحالت نشدنی مواجه نمی‌شویم.

جدول ۴: تحلیل حساسیت بر روی پارامتر هزینه افتتاح مراکز بالقوه

| هزینه راه‌اندازی تسهیلات | $\alpha, \beta = 1$ | | $\alpha, \beta = 0.8$ | | $\alpha, \beta = 0.6$ | |
|-----------------------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-------------------|-----------------------|-----------------|
| | Z^1* | $Dc(l)^{2*}$ | Z | Dc | Z | Dc |
| 0.25 | 161,996 | 11,2,3,4(1)-15(3) | 157,817 | 11,2,4,5(1)-13(2) | 153,844 | 11,2,3,4,5(1) |
| 0.5 | 171,283 | 11,2,3,4(1)-15(3) | 165,707 | 11,2,4(1)-15(3) | 160,702 | 11,2,3,4,5(1) |
| 1 | 189,855 | 12,4(1)-13(2)-15(3) | 181,492 | 12(1)-13(2)-15(3) | 174,418 | 11,2,4(1)-13(2) |
| 1.5 | 208,427 | 12,4(1)-13(2)-15(3) | 197,277 | 12(1)-13(2)-15(3) | 188,134 | 11,2,4(1)-13(2) |
| 2 | 226,999 | 12,4(1)-13(2)-15(3) | 213,062 | 12(1)-13(2)-15(3) | 203,919 | 11,2,4(1)-13(2) |
| 2.5 | 245,572 | 12,4(1)-13(2)-15(3) | 228,847 | 12(1)-13(2)-15(3) | 219,704 | 11,2,4(1)-13(2) |
| 3 | 264,144 | 12,4(1)-13(2)-15(3) | 244,632 | 12(1)-13(2)-15(3) | 235,489 | 11,2,4(1)-13(2) |

^۱: مقدار بهینه تابع هدف، ^۲: تعداد مراکز توزیع بالقوه افتتاح‌شده (ظرفیت هر مرکز)



شکل ۵: تحلیل حساسیت بر روی پارامترهای هزینه افتتاح مراکز بالقوه و سطوح اطمینان (α, β) و تأثیر هم‌زمان آن بر روی تابع هدف

نتیجه‌گیری و پیشنهادهای تحقیق

در این پژوهش یک مدل طراحی شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته تحت شرایط عدم قطعیت ترکیبی مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح ترکیبی با تابع هدف حداقل سازی هزینه‌ها ارائه شد. از آنجایی که مدل ارائه‌شده دارای دو نوع عدم قطعیت شناختی و تصادفی می‌باشد، یک مدل برنامه‌ریزی استوار امکانی-تصادفی جهت مواجهه با عدم قطعیت‌های مورد اشاره، توسعه داده شد. سپس با توجه به نگرش متفاوت تصمیم‌گیرندگان به مسئله پنج مدل استواری بر اساس مدل RSPP ارائه گردید. پس از آن از مطالعه موردی در صنعت روغن به منظور ارزیابی پنج مدل استواری پیشنهادی و بررسی نقاط ضعف و قوت هر یک از مدل‌ها استفاده شد. همچنین مقایسه‌ای میان نتایج مدل RSPP پیشنهادی با مدل‌های مشابه مانند مدل پیشوایی و همکاران (۲۰۱۲a) و فرخ و همکاران (۲۰۱۷) صورت گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که مدل RSPP نه تنها می‌تواند عدم قطعیت ترکیبی را پاسخ دهد بلکه با استفاده از ترکیب محددی از طیف

بدبینانه - خوش‌بینانه، تمام حالات ممکن نگرش تصمیم‌گیرندگان را نسبت به عدم قطعیت‌های موجود در مدل پاسخ دهد و در نتیجه با انعطاف‌پذیری بالاتر نسبت به مدل‌های مشابه اطلاعات بیشتری را در اختیار آن‌ها قرار دهد. از طرف دیگر در قیاس با مدل‌های مشابه همچون مدل ژو و ژو (۲۰۱۳) که جواب بازه‌ای تولید می‌کند و نیاز هست که مدل یک‌بار برای حد بالا و یک‌بار برای جواب‌های حد پایین حل شود و در واقع برای رسیدن به جواب بازه‌ای مدل باید در هر تکرار دو بار حل شود، در مدل RSPP پیشنهادی این ضعف برطرف شده و تنها یک‌بار مدل حل می‌گردد.

با توجه به اینکه در زنجیره تأمین با انواع ریسک‌ها اعم از ریسک‌های مربوط به محیط بیرونی مثل بحران‌های اقتصادی و نوسانات نرخ ارز و همچنین ریسک‌های داخلی یا عملیاتی موجود در سیستم مانند نوسانات موجود در تقاضای مشتریان، عرضه تأمین‌کنندگان و انواع هزینه‌های عدم قطعی مواجه هستیم، ارائه مدل RSPP می‌تواند در زمینه‌های مختلفی به تصمیم‌گیرندگان کمک کند. در حقیقت تصمیم‌گیرندگان به دنبال کاهش ریسک‌های عملیاتی مثل عدم قطعیت تقاضا در کوتاه‌مدت هستند و از طرفی می‌خواهند که عدم قطعیت‌های محیطی را در بلندمدت مدیریت کنند.

تصمیم‌گیرندگان در شرکت مارگارین می‌توانند با انتخاب مقدار مناسب پارامتر خوش‌بینانه - بدبینانه و با توجه به مقادیر بهینه سطوح اطمینان به این عدم قطعیت‌ها به‌طور هم‌زمان پاسخ دهند. به‌عنوان مثال اگر برآورد تقاضای مشتریان برای شرکت در یک دوره اهمیت ویژه‌ای داشته باشد، می‌توانند با در نظر گرفتن مقدار α, β بالاتر و نزدیک به یک، سطح اطمینان بالاتری را لحاظ کنند و در واقع محافظه‌کارانه‌تر نسبت به برآورد شدن تقاضا رفتار نمایند و با در نظر گرفتن مقدار λ نزدیک به صفر در واقع تصمیم‌گیرندگان می‌توانند با نوع نگرش بدبینانه نسبت به مسئله برخورد کرده و با استفاده از ضرایب جریمه سنگین در تابع هدف (δ_1, δ_2) ، امکان برآورده نشدن محدودیت‌های دارای پارامترهای غیرقطعی را مدیریت کنند. باید توجه داشت که مدل استواری پیشنهادی یک مدل ریسک‌گریز است یعنی ریسک‌پذیری تصمیم‌گیرندگان را از طریق در نظر گرفتن همین ضرایب جریمه پاسخ می‌دهد. باید اشاره داشت که ضرایب جریمه تعریف‌شده در تابع هدف صرفاً پارامترهای

تئوری و بی معنی ریاضی نیستند و به عنوان مثال در مدل پیشنهادی زنجیره تأمین روغن هزینه‌های مربوط به عدم تحقق تقاضا از طریق ضریب جریمه δ_1 و هزینه‌های ناشی از کمبود ظرفیت از طریق ضریب جریمه δ_2 کنترل می‌گردد. همچنین با توجه به ارائه انواع مدل‌های استواری ارائه شده یعنی مدل‌های واقع بینانه $RSPP^1$ و $RSPP^2$ و $RSPP^3$ و مدل‌های بدبینانه سخت و نرم $HWRSP$ و $SWRPP$ ، تصمیم گیرندگان می‌توانند به راحتی با توجه به نوع عدم قطعیت، مدل مناسب را در نظر گرفته و بهترین تصمیم را اتخاذ نمایند. همان طور که مشاهده شد در میان مدل‌های ارائه شده، با توجه به نیازها و مفروضات مدل شرکت مارگارین مدل (($RSPP^2C$) بهترین عملکرد را دارد؛ اما همان طور که توضیح داده شد در شرایط گوناگون هر یک از مدل‌ها می‌تواند کاربرد خاص خود را داشته باشد. به عنوان مثال چنانچه در یک دوره خاص مدیریت هزینه فرصت از دست دادن مشتریان اولویت شرکت مارگارین باشد، مدیران می‌توانند از مدل‌های با محافظه کاری بالاتر مثل $HWRSP$ برای مواجه شدن با عدم قطعیت‌های ترکیبی استفاده کنند که در این صورت با یک ترکیب بهینه در افزایش ظرفیت‌های مراکز بالقوه، تأمین کنندگان بیشتر و در نتیجه پاسخگویی بهتر می‌توانند تقاضای مشتریان را در نظر بگیرند.


برای تحقیقات آتی می‌توان مدل پیشنهادی فعلی را در فضای استوار امکانی انعطاف پذیر هم مورد بررسی قرارداد. همچنین می‌توان با در نظر گرفتن شاخص‌های محیطی و اجتماعی به ارائه یک مدل زنجیره تأمین پایدار پرداخت. سرانجام می‌توان به این نکته هم اشاره داشت که برای حل مدل با ابعاد بزرگ تر، استفاده از مدل‌های فرا ابتکاری می‌تواند مفید باشد.

ORCID


Ehsan Dehghan

 <https://orcid.org/0000-0002-5982-8983>

Maghsoud Amiri

 <https://orcid.org/0000-0002-0650-2584>

Mohsen Shafiei

 <https://orcid.org/0000-0002-9744-960X>

Nikabadi

Armin Jabbarzadeh

 <https://orcid.org/>

منابع

- Amiri, A. (2006). Designing a distribution network in a supply chain system: Formulation and efficient solution procedure. *European Journal of Operational Research*, 171 (2), 567-576.
- Azaron, A., Brown, K. N., Tarim, S. A., & Modarres, M. (2008). A multi-objective stochastic programming approach for supply chain design considering risk. *International Journal of Production Economics*, 116 (1), 129-138.
- Babazadeh, R., Razmi, J., Pishvae, M. S., & Rabbani, M. (2017). A sustainable second-generation biodiesel supply chain network design problem under risk. *Omega*, 66, 258-277.
- Ben-Tal, A., & Nemirovski, A. (1998). Robust solutions of uncertain linear programs. *Operations research letters*, 25(1), 1-13.
- Ben-Tal, A., & Nemirovski, A. (2000). Robust solutions of linear programming problems contaminated with uncertain data. *Mathematical programming*, 88(3), 411-424.
- Ben-Tal, A., & Nemirovski, A. (2009). Selected topics in robust convex optimization. *Mathematical Programming*, 112(1), 125-158.
- Bertsimas, D., & Sim, M. (2004). The price of robustness. *Operations research*, 52(1), 35-53.
- Chouinard, M., D'Amours, S., & Aït-Kadi, D. (2008). A stochastic programming approach for designing supply loops. *International Journal of Production Economics*, 113(2), 657-677
- Cruz-Rivera, R., & Ertel, J. (2009). Reverse logistics network design for the collection of end-of-life vehicles in Mexico. *European Journal of Operational Research*, 196(3), 930-939.
- Dubois, D., & Prade, H. (1987). The mean value of a fuzzy number. *Fuzzy sets and systems*, 24(3), 279-300.
- El-Sayed, M., Afia, N., & El-Kharbotly, A. (2010). A stochastic model for forward–reverse logistics network design under risk. *Computers & Industrial Engineering*, 58(3), 423-431.
- Farrokh, M., Azar, A., Jandaghi, G., & Ahmadi, E. (2017). A novel robust fuzzy stochastic programming for closed loop supply chain network design under hybrid uncertainty. *Fuzzy Sets and Systems*. 1(3), 131-160.
- Fleischmann, M., Beullens, P., BLOEMHOF- RUWAARD, J. M., & Wassenhove, L. N. (2001). The impact of product recovery on logistics network design. *Production and operations management*, 10(2), 156-173.

- Gaur, J., Amini, M., & Rao, A. K. (2017). Closed-loop supply chain configuration for new and reconditioned products: An integrated optimization model. *Omega*, 66, 212-223.
- Govindan, K., Soleimani, H., & Kannan, D. (2015). Reverse logistics and closed-loop supply chain: A comprehensive review to explore the future. *European Journal of Operational Research*, 240(3), 603-626.
- Hasani, A., & Hosseini, S.M.H., (2015). A Comprehensive Robust Biobjective Model and a Memetic Solution Algorithm for Designing Reverse Supply. *Journal of Industrial Management Perspective*, 16, 31-54 (In Persian).
- Hatefi, S. M., & Jolai, F. (2014). Robust and reliable forward–reverse logistics network design under demand uncertainty and facility disruptions. *Applied Mathematical Modelling*, 38(9), 2630-2647.
- Inuiguchi, M., & Ramik, J. (2000). Possibilistic linear programming: a brief review of fuzzy mathematical programming and a comparison with stochastic programming in portfolio selection problem. *Fuzzy sets and systems*, 111(1), 3-28.
- Inuiguchi, M., & Sakawa, M. (1998). Robust optimization under softness in a fuzzy linear programming problem. *International Journal of Approximate Reasoning*, 18(1-2), 21-34.
- Jayaraman, V., Patterson, R. A., & Rolland, E. (1999). The design of reverse distribution networks: Models and solution procedures. *European journal of operational research*, 150(1), 128-149.
- Keyvanshokoo, E., Ryan, S. M., & Kabir, E. (2016). Hybrid robust and stochastic optimization for closed-loop supply chain network design using accelerated Benders decomposition. *European Journal of Operational Research*, 249(1), 76-92.
- Klibi, W., & Martel, A. (2012). Scenario-based supply chain network risk modeling. *European Journal of Operational Research*, 223(3), 644-658.
- Ko, H. J., & Evans, G. W. (2007). A genetic algorithm-based heuristic for the dynamic integrated forward/reverse logistics network for 3PLs. *Computers & Operations Research*, 34(2), 346-366.
- Lee, D. H., & Dong, M. (2009). Dynamic network design for reverse logistics operations under uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 45(1), 61-71.
- Liu, B., & Iwamura, K. (1998). Chance constrained programming with fuzzy parameters. *Fuzzy sets and systems*, 94(2), 227-237.
- Liu, B., & Liu, Y. K. (2002). Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models. *IEEE transactions on Fuzzy Systems*, 10(4), 445-450.

- Melo, M. T., Nickel, S., & Saldanha-Da-Gama, F. (2009). Facility location and supply chain management—A review. *European journal of operational research*, 196(2), 401-412
- Min, H., & Ko, H. J. (2008). The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers. *International Journal of Production Economics*, 113(1), 176-192
- Min, H., Ko, H. J., & Ko, C. S. (2006). A genetic algorithm approach to developing the multi-echelon reverse logistics network for product returns. *Omega*, 34(1), 56-69.
- Mousazadeh, M., Torabi, S. A., & Pishvae, M. S. (2014). *Green and reverse logistics management under fuzziness in Supply Chain Management Under Fuzziness* (pp. 607-637). Springer Berlin Heidelberg.
- Mula, J., Poler, R., & Garcia, J. P. (2006). MRP with flexible constraints: A fuzzy mathematical programming approach. *Fuzzy sets and systems*, 157(1), 74-97.
- Mulvey, J. M., Vanderbei, R. J., & Zenios, S. A. (1995). Robust optimization of large-scale systems. *Operations research*, 43(2), 264-281.
- Nurjanni, K. P., Carvalho, M. S., & Costa, L. (2017). Green supply chain design: A mathematical modeling approach based on a multi-objective optimization model. *International Journal of Production Economics*, 183, 421-432.
- Paksoy, T., Pehlivan, N. Y., & Özceylan, E. (2012). Application of fuzzy optimization to a supply chain network design: a case study of an edible vegetable oils manufacturer. *Applied Mathematical Modelling*, 36(6), 2762-2776.
- Pishvae, M. S., & Torabi, S. A. (2010). A possibilistic programming approach for closed-loop supply chain network design under uncertainty. *Fuzzy sets and systems*, 161(20), 2668-2683.
- Pishvae, M. S., Razmi, J., & Torabi, S. A. (2012a). 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. (2012b). Credibility-based fuzzy mathematical programming model for green logistics design under uncertainty. *Computers & Industrial Engineering*, 62(2), 624-632.
- Qin, Z., & Ji, X. (2010). Logistics network design for product recovery in fuzzy environment. *European Journal of Operational Research*, 202(2), 479-490.
- Ramezani, M., Bashiri, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). A robust design for a closed-loop supply chain network under an uncertain

- environment. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(5-8), 825-843.
- Sahinidis, N. V. (2004). Optimization under uncertainty: state-of-the-art and opportunities. *Computers & Chemical Engineering*, 28(6), 971-983.
- Soyster, A. L. (1973). Convex programming with set-inclusive constraints and applications to inexact linear programming. *Operations research*, 21(5), 1154-1157.
- Torabi, S. A., & Hassini, E. (2008). An interactive possibilistic programming approach for multiple objective supply chain master planning. *Fuzzy sets and systems*, 159(2), 193-214.
- Üster, H., Easwaran, G., Akçali, E., & Çetinkaya, S. (2007). Benders decomposition with alternative multiple cuts for a multi-product closed-loop supply chain network design model. *Naval Research Logistics (NRL)*, 54(8), 890-907.
- Validi, S., Bhattacharya, A., & Byrne, P. J. (2015). A solution method for a two-layer sustainable supply chain distribution model. *Computers & Operations Research*, 54, 204-217.
- Winkler, H. (2011). Closed-loop production systems—A sustainable supply chain approach. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 4(3), 243-246.
- Xu, J., & Zhou, X. (2013). Approximation based fuzzy multi-objective models with expected objectives and chance constraints: Application to earth-rock work allocation. *Information Sciences*, 238, 75-95.
- Yu, C. S., & Li, H. L. (2000). A robust optimization model for stochastic logistic problems. *International journal of production economics*, 64(1), 385-397.
- Zeballos, L. J., Méndez, C. A., Barbosa-Povoa, A. P., & Novais, A. Q. (2014). Multi-period design and planning of closed-loop supply chains with uncertain supply and demand. *Computers & Chemical Engineering*, 66, 151-164.
- Zhalechian, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Zahiri, B., & Mohammadi, M. (2016). Sustainable design of a closed-loop location-routing-inventory supply chain network under mixed uncertainty. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 89, 182-214.
- Zhu, H., & Zhang, J. (2009, November). A credibility-based fuzzy programming model for APP problem. In Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2009. AICI'09. *International Conference on* (Vol. 1, pp. 455-459). IEEE.
- Zohal, M., & Soleimani, H. (2016). Developing an ant colony approach for green closed-loop supply chain network design: a case study in gold industry. *Journal of Cleaner Production*, 133, 314-337.



پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

استناد به این مقاله: دهقان، احسان، امیری، مقصود، شفیعی نیکابادی، محسن، جبارزاده، آرمین. (۱۴۰۰). طراحی یک شبکه زنجیره تأمین حلقه بسته در صنعت روغن خوراکی با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی استوار امکانی - تصادفی، فصلنامه مطالعات مدیریت صنعتی، ۲۰(۶۴)، ۹۵-۱۵۲.

DOI: 10.22054/JIMS.2019.30172.2000



Industrial Management Studies is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.